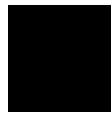


kassel
university



press

**Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur
problemorientierten Anwendung der statistischen
Versuchsplanung**

Carsten Gundlach

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2004
ISBN 3-89958-068-0

© 2004, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de

Umschlaggestaltung: 5 Büro für Gestaltung, Kassel
Druck und Verarbeitung: Unidruckerei der Universität Kassel
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner langjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion an der Universität Kassel.

Mein Dank gilt daher Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Klein für die Möglichkeit, die vorliegende Dissertation im Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion zu verfassen und die dabei gewährten Freiheiten zur Bearbeitung von Forschungs- und Industrieprojekten sowie der Betreuung von Arbeitskreisen.

Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. *Franz Tikal* vom Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen für die Übernahme des Zweitgutachtens. Weiterhin gilt mein Dank ebenso den Herren Prof. Dr.-Ing. *Arnd Urban* vom Institut für Wasser, Abfall und Umwelt, Fachgebiet Abfalltechnik und Prof. Dr.-Ing. *Hans Martin* vom Institut für Arbeitswissenschaften, Fachgebiet Arbeitswissenschaft, da sie die Rolle der Prüfer innerhalb der Promotionskommission gern und ohne zögern übernommen haben.

Im Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion habe ich ein angenehmes, offenes und kreatives aber auch forderndes Arbeitsklima vorgefunden, welches man sicherlich nicht überall findet. Für die über fünf Jahre dauernde Zusammenarbeit danke ich stellvertretend für alle Kolleginnen und Kollegen unserer Sekretärin *Marina Winter*.

Besonders erwähnen möchte ich noch meine Wegbegleiter und Kollegen Dipl.-Ing. *Horst Nähler* und Dipl.-Ing. *Sebastian Montua*. Aus den mit ihnen verbrachten Stunden ist eine echte Freundschaft erwachsen.

Bedanken möchte ich mich nicht zuletzt bei Herrn Dipl.-Ing. *Winfried Lauer*, meinem ehemaligen Studenten der mittlerweile ebenfalls Doktorand an der Universität Kassel ist, und Herrn Dipl.-Ing./Dipl.-Oec *Ralph Kölbl* für ihre konstruktiven Anmerkungen.

Neben den Herren *Mark Heckmann* und *Borris Schaefer* danke ich vielen namentlich nicht genannten Studentinnen und Studenten für Ihren Gedankenaustausch und die rege Mitarbeit.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. *Andreas Orth*, der mir die Gelegenheit gab, in die Tiefen der statistischen Versuchsplanung einzutauchen und von seinen jahrelangen Erfahrungen zu lernen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. *Wilhelm Kleppmann*, der mir als Diskussionspartner Rede und Antwort stand.

Innerhalb der durchgeführten Arbeitskreise sowie der Arbeit im Vorstand des Europäischen TRIZ-Centrum e.V. habe ich interessante Menschen kennengelernt, die mich im Rahmen von Diskussionen, Unterlagen oder Kontakten jederzeit unterstützt haben. Stellvertretend dafür möchte ich Herrn Dr. *Rolf Herb*, Herrn Dr. *Thilo Herb* und Herrn Dipl.-Ing. *Gerd Streckfuß* nennen.

Der Stiftung Industrieforschung danke ich für die unkomplizierte finanzielle Förderung des Projektes „*Untersuchung zur technologischen und wirtschaftlichen Effizienz einer systematisierten Versuchsplanungsmethodik in der Produktentwicklung*“, welches ich von Anfang 1999 bis Mitte 2001 geleitet habe.

Dieses Forschungsprojekt stellt auch die Grundlage der vorliegenden Dissertation dar, mit der ein Brückenschlag zwischen der Theorie und der Praxis der statistischen Versuchsplanung erreicht werden soll.

Nicht vergessen möchte ich, mich bei Frau Dipl.-Geol. *Sonja Hogewoning* und Herrn Dr. *Sven-Olaf Schmidt* von der Forschungsgemeinschaft Kalk + Mörtel e.V., Köln sowie Herrn Dipl.-Ing. *Wolfgang Eden* von der Forschungsgemeinschaft Kalk-Sand e.V., Hannover zu bedanken, da sie mir die Gelegenheit zur Mitarbeit in einem von der AiF geförderten Forschungsprojektes gaben, aus dem mein Praxisbeispiel resultiert.

Ihnen allen und vielen weiteren Personen gilt mein herzlicher Dank für die gute und fruchtbare Zusammenarbeit.

Die erfolgreiche Arbeit im Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion wäre jedoch unmöglich gewesen, hätte ich nicht ein intaktes Privatleben in einer harmonischen Familie vorgefunden. Ich danke deshalb ganz besonders meiner Frau *Solveig* und meinen Eltern *Irmgard* und *Helmut* für Ihre umfassende Unterstützung, wodurch ich erst meinen Weg gehen und dieses Ziel erreichen konnte.

Grebenstein, im November 2003

Carsten Gundlach

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Forschung	3
1.2	Inhalte und Ziele der Arbeit	4
2	Qualität - ein ökonomischer Imperativ	6
2.1	Qualität im Wandel der Zeit	6
2.2	Wandel des Qualitätsbegriffs	6
2.3	Definition von Qualität.....	8
2.4	Qualität als Wettbewerbsfaktor.....	9
2.5	Qualität als Kostenfaktor	10
2.6	Von der Qualitätskontrolle zum Qualitätsmanagement	11
2.7	Ständige Verbesserung	13
2.8	Aufgaben und Umfang des Qualitätsmanagements.....	13
2.9	Aufwand und Nutzen von Methoden zur vorbeugenden Sicherung der Qualität.....	15
2.10	Konzepte, Methoden und Techniken zur Beherrschung der Qualitätsplanung.....	17
3	QE-Methoden zur präventiven Produkt-/Prozeßentwicklung	19
3.1	Quality Function Deployment	20
3.2	Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse.....	22
3.3	Fehlerbaumanalyse	24
3.4	Statistical Process Control	24
3.5	Conjoint Analyse	26
3.6	Target Costing	26
3.7	Wertanalyse	27
3.8	Statistische Tolerierung.....	27
3.9	Hilfsmittel des Qualitätsmanagements	28
3.10	Einsatzspektrum von Quality-Engineering-Methoden	31
4	Grundlegendes zur statistischen Versuchsplanung	33
4.1	Historische Entwicklung.....	33
4.2	Begriff „statistische Versuchsplanung“	37
4.3	Begriffe und Definitionen der Versuchsplanung	38
4.3.1	Grundlegende Begriffe der Versuchsplanung.....	38
4.3.2	Grundlegende Prinzipien der Versuchsplanung	40
4.4	Richtlinien versus statistische Versuchsplanung.....	40
4.5	Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der statistischen Versuchsplanung	41
4.6	Schnittstellen der statistischen Versuchsplanung.....	43
5	Klassische Versuchsmethoden	45
5.1	Statistische Versuchspläne für einen Einflußfaktor.....	45
5.1.1	Vollständige Zufallspläne.....	47
5.1.2	Zufällige Blockpläne	47
5.1.3	Lateinische Quadratpläne	47
5.1.4	Griechisch-Lateinische Quadratpläne.....	48
5.1.5	Hypergriechisch-Lateinische Quadratpläne.....	49
5.1.6	Ausgewogene unvollständige Blockpläne	50
5.1.7	Youden Quadratpläne	50
5.2	Faktorielle Versuchspläne.....	51
5.2.1	Versuchspläne erster Ordnung (Screening).....	52
5.2.1.1	Vollständige 2 ^k -Faktorenversuchspläne.....	52

5.2.1.2	2 ^{k-p} -Teilfaktorenpläne	55
5.2.1.3	Plackett-Burman Versuchspläne	60
5.2.1.4	Zentralpunktversuche	62
5.2.2	Versuchspläne 2. Ordnung	63
5.2.2.1	Vollständige 3 ^k -Versuchspläne	63
5.2.2.2	3 ^{k-p} -Teilfaktorenpläne	65
5.2.2.3	Gemischte 2 ^k 3 ^k -Faktorenpläne	66
5.2.2.4	Box-Behnken Versuchspläne	66
5.2.2.5	Zentral zusammengesetzte Versuchspläne	70
5.2.3	Versuchspläne dritter Ordnung	74
5.3	<i>Zusammenstellung Charakteristika klassische Methoden</i>	74
6	Optimale Versuchsplanung	76
6.1	<i>D-optimale Versuchspläne</i>	77
6.2	<i>Vor- und Nachteile von D-optimalen Versuchsplänen</i>	78
6.3	<i>Modellansatz</i>	79
6.3.1	Potential Terms	81
6.4	<i>Beurteilungskriterien zur Auswahl eines D-optimalen Versuchsplans</i>	82
6.5	<i>Versuchspunkte</i>	85
6.5.1	Einbeziehung von Versuchspunkten	86
6.5.2	Einschränkung des Versuchsgebiets	87
6.6	<i>Anzahl erforderlicher Versuche in Abhängigkeit vom Modell</i>	90
6.7	<i>Vorgehensweise zur Erstellung D-optimaler Pläne</i>	91
6.8	<i>Suchalgorithmen</i>	91
6.8.1	Sequentielle Methode (Dykstra)	92
6.8.2	Einfacher Austausch (Wynn-Mitchell)	92
6.8.3	Detmax-Algorithmus (Austausch mit Extrusionen)	92
6.8.4	Fedorov-Methode (simultaner Austausch)	93
6.8.5	Modifizierte Fedorov-Methode (simultaner Austausch)	93
6.9	<i>Zusammenstellung Charakteristika D-optimaler Pläne</i>	93
7	Experimentelle Optimumsuche	95
7.1	<i>Gradientenverfahren (steilster Anstieg)</i>	96
7.2	<i>Simplex-Methode</i>	97
7.3	<i>Gauss-Seidl-Strategie</i>	98
7.4	<i>Evolutionäre Optimierungsstrategien</i>	99
7.4.1	Evolutionary Operation (EVOP)	99
7.4.2	Evolutionäre Algorithmen (EA)	104
7.4.2.1	Genetische Algorithmen (GA)	104
7.4.2.2	Evolutionstrategie (ES)	106
7.5	<i>Zusammenstellung Charakteristika der Experimentellen Optimumsuche</i>	108
8	Versuchspläne für Mischungsexperimente	109
8.1	<i>Mathematische Modelle</i>	111
8.2	<i>Scheffé und Cox-Modell</i>	113
8.3	<i>Nichtlineare Wirkungen</i>	114
8.4	<i>Statistische und grafische Analyse von Mischungsplänen</i>	115
8.5	<i>Mischungsversuchspläne</i>	116
8.5.1	Standard-Simplex-Versuchspläne	117
8.5.2	Simplex-Centroid-Versuchspläne	120
8.5.3	Simplex-Axial-Versuchspläne	122
8.5.4	Simplex-Screening-Versuchspläne	123
8.5.5	Mischungspläne mit Begrenzung	124
8.5.6	Ratio-Versuchspläne	128
8.5.7	Mischungspläne mit einer Hauptkomponente	131
8.5.8	Kombinierte Versuchspläne	132
8.6	<i>Zusammenstellung Charakteristika von Mischungsplänen</i>	133

9 Taguchi-Methodik.....	135
9.1 Historisches	135
9.2 Qualität-Philosophie von Taguchi	136
9.3 Verlustfunktion	137
9.4 Robustheit/Robust Design	138
9.5 Ursachen für Variation.....	140
9.6 Taguchis Drei-Stufen-Methode zur Produkt- bzw. Prozeßentwicklung	141
9.7 Parameter-Klassifikation	142
9.8 Taguchis orthogonale Felder/orthogonale Versuchspläne	144
9.9 Konzept der inneren und äußeren Felder.....	145
9.10 Bestimmung der Freiheitsgrade	146
9.11 Modifikation der orthogonalen Felder.....	147
9.12 Analyse von Wechselwirkungen mittels Wechselwirkungstabellen und linearen Graphen.....	151
9.13 Signal/Rausch-Verhältnisse.....	154
9.14 Zusammenstellung Charakteristik Taguchi-Versuchspläne	154
10 Shainin-Methodik.....	156
10.1 Historisches	156
10.2 Shainins Philosophie	157
10.3 Werkzeuge von Shainin.....	158
10.4 Isoplot®	160
10.5 Multi-Variations-Karte.....	161
10.6 Komponententausch	163
10.7 Prozeßabschnittstausch	166
10.8 Run-Test.....	167
10.9 Paarweiser Vergleich	168
10.10 Konzentrationsdiagramme	169
10.11 Variablenvergleich	169
10.12 Vollständiger Versuch	171
10.13 Validieren der Ergebnisse mit der A-zu-B-Analyse.....	171
10.14 Optimierung der Zielgröße mit dem Streudiagramm	174
10.15 Multi-Spec-Analyse.....	176
10.16 Zusammenstellung Charakteristik Shainin-Methode.....	176
11 Problemlösungszyklus der statistischen Versuchsplanung.....	177
11.1 Projektdefinition/Projektinitiierung	178
11.1.1 Projektstart/Freigabe.....	179
11.1.2 Teambildung.....	179
11.1.3 Beschreibung der Ausgangs- bzw. Problemsituation	180
11.1.4 Zieldefinition.....	181
11.1.5 Ähnliche Projekte suchen	181
11.2 Systemanalyse.....	182
11.2.1 Detaillierte Problemanalyse.....	183
11.2.1.1 Systemabgrenzung.....	183
11.2.2 Informationsbeschaffung	184
11.2.2.1 Allgemeine Hilfsmittel	185
11.2.3 Ermittlung aller potentiellen Ziel-, Einfluß- und Störgrößen	186
11.2.3.1 Potentielle Zielgrößen.....	186
11.2.3.2 Potentiellen Einfluß- und Störgrößen	186
11.3 Selektion und Festlegung von Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen.....	187
11.3.1 Selektion und Festlegung der Zielgröße(n)	187
11.3.1.1 Grobbewertung aller potentiellen Zielgrößen	188
11.3.1.2 Feinbewertung aller potentiellen Zielgrößen	189

11.3.1.3	Meßbarkeit der Zielgröße(n).....	190
11.3.1.3.1	Qualitative oder quantitative Zielgrößen.....	190
11.3.1.3.2	Meßbereich der Zielgrößen.....	191
11.3.1.3.3	Meßmethode der Zielgröße in Verbindung mit Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Meßwerte	191
11.3.1.4	Festlegung der Zielgröße(n).....	192
11.3.2	Selektion und Festlegung von Faktoren und Störgrößen.....	192
11.3.2.1	Trennung von Stell- und Störgrößen	193
11.3.2.2	Bewertung und Eingrenzung	193
11.3.2.2.1	Grobbewertung von Stell- und Störgrößen.....	193
11.3.2.2.2	Feinbewertung von Stell- und Störgrößen.....	194
11.3.2.2.2.1	Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen	195
11.3.2.2.2.2	Wechselwirkungsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen.....	196
11.3.2.2.2.3	Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und Zielgröße(n)	197
11.3.2.2.2.4	Intensitäts-Beziehungsmatrix und Portfolio-Diagramm	198
11.3.2.3	Festlegung von Faktoren, Steuer- und Störgrößen.....	201
11.3.2.3.1	Wahl der Faktorstufen.....	201
11.3.2.3.2	Störgrößenbehandlung	202
11.4	Versuchsstrategie.....	203
11.4.1	Auswahl einer Versuchsmethode	204
11.4.2	Versuchsplanerstellung	214
11.4.2.1	Umfang des Versuchsplans.....	214
11.4.2.2	Festlegung der Versuchsreihenfolge.....	215
11.4.3	Überprüfung auf praktische Umsetzbarkeit.....	216
11.5	Versuchsdurchführung.....	216
11.5.1	Kennzeichnung der Versuchsteile	217
11.5.2	Meßmittelüberprüfung.....	217
11.5.3	Durchführung aller Versuche (wie festgelegt)	218
11.5.4	Meßdatenerfassung.....	218
11.5.5	Abweichungen jeglicher Art festhalten	219
11.5.6	Aufbewahrung der Versuchsteile	219
11.6	Versuchsauswertung	220
11.6.1	Datenaufbereitung	221
11.6.2	Modellsicherheit und Fehlersignifikanz festlegen.....	221
11.6.3	Überprüfung der Auswertvoraussetzungen	222
11.6.3.1	Test auf Normalverteilung.....	222
11.6.3.2	Transformation von Meßwerten	223
11.6.4	Ausreißeranalyse	223
11.6.5	Residuenanalyse	224
11.6.5.1	Normalverteilungsplot der Residuen	225
11.6.5.2	Residuen gegen Faktoren.....	226
11.6.5.3	Residuen gegen Versuchsreihenfolge	226
11.6.5.4	Residuen gegen Modellschätzer	227
11.6.5.5	Beobachtungen gegen Vorhersagen.....	227
11.6.6	Effektanalyse (Haupt- und Wechselwirkungseffektanalyse).....	228
11.6.6.1	Haupteffektanalyse	228
11.6.6.2	Wechselwirkungseffektanalyse	228
11.6.6.3	Interpretation der Effekte.....	229
11.6.6.4	Zentrierung und Skalierung	230
11.6.7	Regressionsanalyse.....	231
11.6.8	Varianzanalyse	233
11.6.8.1	Modelladäquatheitstests.....	234
11.6.8.1.1	Modellsignifikanztest.....	234
11.6.8.1.2	Modellschwächentest	234
11.6.8.2	Gütemaße des Modells	235
11.6.8.2.1	Bestimmtheitsmaß.....	235
11.6.8.2.2	Vorhersagepotential	236
11.6.8.2.3	Reproduzierbarkeit.....	236
11.6.8.2.4	Modellvalidität	237
11.6.9	Korrelationsanalyse	237
11.6.10	Graphische Auswertung	238

11.6.11	Optimale Einstellungen bei mehreren Zielgrößen	239
11.6.11.1	Schrittweise Optimierung	239
11.6.11.2	Wunschfunktion nach Harrington	240
11.6.11.3	Wunschfunktion nach Derringer und Suich	240
11.7	<i>Validierung</i>	242
11.7.1	Interpretation und Rückschlüsse	242
11.7.2	Maßnahmen	243
11.7.3	Absicherung und weiteres Vorgehen	243
11.7.4	Bestätigungsversuch	243
11.7.5	Dokumentation abschließen und vervollständigen	244
12	Praxisbeispiel ProStaV	246
12.1	<i>Projektdefinition/Projektinitiierung</i>	246
12.1.1	Projektstart/Freigabe	246
12.1.2	Teambildung	246
12.1.3	Beschreibung der Ausgangs- bzw. Problemsituation	246
12.1.4	Zieldefinition	247
12.1.5	Ähnliche Projekte suchen	248
12.2	<i>Systemanalyse</i>	248
12.2.1	Detaillierte Problemanalyse	248
12.2.1.1	Systemabgrenzung	250
12.2.2	Informationsbeschaffung	251
12.2.2.1	Allgemeine Hilfsmittel	251
12.2.3	Ermittlung aller potentiellen Ziel-, Einfluß- und Störgrößen	252
12.2.3.1	Potentielle Zielgrößen	252
12.2.3.2	Potentiellen Einfluß- und Störgrößen	252
12.3	<i>Selektion/Festlegung von Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen</i>	253
12.3.1	Selektion und Festlegung der Zielgröße(n)	253
12.3.1.1	Grobbewertung aller potentiellen Zielgrößen	253
12.3.1.2	Feinbewertung aller potentiellen Zielgrößen	253
12.3.1.3	Meßbarkeit der Zielgröße(n)	253
12.3.2	Selektion von Faktoren und Störgrößen	254
12.3.2.1	Trennung von Stell- und Störgrößen	254
12.3.2.2	Bewertung und Eingrenzung	254
12.3.2.2.1	Grobbewertung von Stell- und Störgrößen	254
12.3.2.2.2	Feinbewertung von Stell- und Störgrößen	255
12.3.2.2.2.1	Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen	255
12.3.2.2.2.2	Wechselwirkungsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen	256
12.3.2.2.2.3	Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und Zielgröße(n)	256
12.3.2.2.3	Intensitäts-Beziehungsmatrix und Portfolio-Diagramm	257
12.3.2.3	Festlegung von Faktoren, Steuer- und Störgrößen	257
12.3.2.3.1	Wahl der Faktorstufen	257
12.3.2.3.2	Störgrößenbehandlung	257
12.4	<i>Versuchsstrategie</i>	257
12.4.1	Auswahl einer Versuchsmethode	257
12.4.2	Versuchsplanerstellung	259
12.4.3	Überprüfung auf praktische Umsetzbarkeit	259
12.5	<i>Versuchsdurchführung</i>	259
12.5.1	Kennzeichnung der Versuchsteile	259
12.5.2	Meßmittelüberprüfung	259
12.5.3	Durchführung aller Versuche (wie festgelegt)	260
12.5.4	Meßdatenerfassung	260
12.5.5	Abweichungen jeglicher Art festhalten	260
12.5.6	Aufbewahrung der Versuchsteile	261
12.6	<i>Versuchsauswertung</i>	261
12.6.1	Datenaufbereitung	261
12.6.2	Modellsicherheit und Fehlersignifikanz festlegen	261
12.6.3	Überprüfung der Auswertvoraussetzungen	261
12.6.4	Ausreißeranalyse	261
12.6.5	Residuenanalyse	261

12.6.5.1	Normalverteilungsplot der Residuen	262
12.6.5.2	Residuen gegen Faktoren.....	262
12.6.5.3	Residuen gegen Versuchsreihenfolge	262
12.6.5.4	Residuen gegen Modellschätzer	262
12.6.5.5	Beobachtungen gegen Vorhersagen.....	263
12.6.6	Effektanalyse (Haupt- und Wechselwirkungseffektanalyse).....	263
12.6.6.1	Haupteffektanalyse	263
12.6.6.2	Wechselwirkungseffektanalyse	265
12.6.6.3	Interpretation und Zusammenfassung der Effekte	268
12.6.7	Regressionsanalyse.....	269
12.6.8	Varianzanalyse	270
12.6.8.1	Modelladäquatheitstests.....	270
12.6.8.2	Gütemaße des Modells	272
12.6.9	Korrelationsanalyse	272
12.6.10	Graphische Auswertung	273
12.6.11	Optimale Einstellungen bei mehreren Zielgrößen.....	273
12.7	Validierung	274
12.7.1	Interpretation und Rückschlüsse.....	274
12.7.2	Maßnahmen.....	274
12.7.3	Absicherung und weiteres Vorgehen.....	274
12.7.4	Bestätigungsversuch.....	274
12.7.5	Dokumentation abschließen und vervollständigen.....	274
13	Ausbildung, Training und Einführung der statistischen Versuchsmethodik in ein Unternehmen.....	275
13.1	<i>Wer sind die potentiellen Anwender der statistischen Versuchsplanung in einem Unternehmen?</i>	275
13.2	<i>Wie kann die statistische Versuchsplanung in ein Unternehmen eingeführt werden?</i>	276
13.3	<i>Wann sollten die Personen trainiert werden?</i>	277
13.4	<i>Trainingsumfang und Inhalte zur Schulung von DoE</i>	277
13.5	<i>Welche Anforderungen werden an die beteiligten Personen zur Durchführung von Versuchsplanungsprojekten gestellt?</i>	279
13.6	<i>Wie sollten Versuchsplanungsprojekte durchgeführt werden, bzw. welche Schritte sind erforderlich?</i>	280
13.7	<i>Wie oft werden bestimmte Verfahren bzw. Versuchspläne verwendet?</i>	281
13.8	<i>Welche Kosten sind für die DoE-Anwendung zu veranschlagen, bzw. wie sieht der Kosten-/Nutzen-Vergleich aus?</i>	282
14	Zusammenfassung.....	284
	Abbildungsverzeichnis.....	286
	Tabellenverzeichnis.....	290
	Abkürzungsverzeichnis	292
	Formelverzeichnis	293
	Literaturverzeichnis.....	296
	Anhang	

1 Einleitung

In den vergangenen 50 Jahren hat sich der Begriff „Qualität“ stark gewandelt. Produkte galten direkt nach dem zweiten Weltkrieg, als die Produktion von Gütern im Vordergrund stand, als qualitativ hochwertig, wenn sie gut gefertigt wurden. Erst am Ende des Produktionsvorgangs fand eine Qualitätsprüfung statt, d.h. die Spezifikationen der Konstruktionsabteilung wurden geprüft. Anschließend wurden die Waren an die Kunden ausgeliefert.

Der so geprägte Qualitätsbegriff hielt viele Jahre, bis die Japaner Anfang der 80er Jahre innerhalb kürzester Zeit hohe Marktanteile gewannen /BUM00, EHR93/. Somit wurden die europäischen Unternehmen faktisch gezwungen, über die Qualität ihrer Produkte neu nachzudenken /HAS95/. Dadurch trat ein Wandel von der rein fertigungstechnischen Qualität zur Erfüllung von Kundenforderungen ein /PFE96/.

Um diese Anforderungen im heutigen industriellen Wettbewerb sicherstellen zu können, verlangt der Markt von den Unternehmen bessere Qualität in immer kürzeren Zyklen (*time to market*) und zu niedrigeren Kosten. Aufgrund einer immer stärker werdenden Globalisierung, Dynamik der Märkte, kürzeren Produktlebenszyklen, Audits nach QS 9000, TS 16949 und VDA 6 sowie steigenden Kundenanforderungen ist dies zwingend erforderlich. Daher ist auch eine zentrale Forderung des *Lean-Production-Konzepts* eine kostengünstigere, robuste und innovative Produktion bei gleichzeitiger Steigerung der Produkt- und Prozeßqualität, d.h. von den Entwicklungsabteilungen wird höchste Effektivität und Flexibilität gefordert, um qualitativ hochwertige und kundenorientierte Produkte und Prozesse zu entwickeln /NEU96/. Hierbei kommt der Beherrschung der Qualitätsplanung als qualitätsbezogene Komponente der Produktentwicklung eine tragende Rolle zu.

Kundenseitig ist eine ständig steigende Erwartungshaltung zu erkennen, welche sich in immer höheren und differenzierteren Forderungen an die Produkte ausdrückt. Durch die hohe Leistungsdichte der angebotenen Produkte sind die Hersteller heute gezwungen, die Wünsche und Bedürfnisse der Kunden zu respektieren und diese dementsprechend umzusetzen.

Angesichts dieser Forderungen, die in kürzeren Entwicklungszeiten und zu vorgegebenen Kosten umzusetzen sind, ist aus der Qualitätsplanung eine komplexe Aufgabe geworden, die nur mit methodischer, präventiver und systematischer Unterstützung zu realisieren ist /ZIS00/.

Zur Unterstützung haben sich in den letzten Jahren sogenannte *Quality-Engineering-Methoden* (QE-Methoden), wie z.B. *Quality Function Deployment* (QFD), *Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse* (FMEA) oder *Design of Experiments* (DoE), als präventive Qualitätssicherungsmaßnahmen etabliert /RED99, PFE96, TVE95, KRU95, KAS95a, KAS95b, FQS01/. Unter ihnen ist die statistische Versuchsplanung (englisch: Design of Experiments) als erfolgversprechendes Instrument anzusehen, mit dessen Hilfe Versuche zielgerichtet geplant, analysiert und optimiert werden können.

Diese Behauptung läßt sich dahingehend begründen, daß sowohl organisationsbezogene als auch produkt- und prozeßbezogene Ressourcen besser ausgeschöpft werden können. Organisatorische Vorteile liegen vor allem in

- einer nachhaltigeren Analyse und Planung von Entwicklungsprozessen,
 - einer besseren Transparenz der Entwicklungsziele,
 - einer nachvollziehbareren Dokumentation gemäß DIN EN ISO 9000:2000,
 - den reibungsloseren und plankostengerechteren Serienanläufen
- und
- einer besseren Nutzung des Entwicklungspotentials (Mensch, Maschine, Methode, Material, Mitwelt, usw.).

Jedoch haben viele industrielle Unternehmen die Vorteile einer systematischen Versuchsplanung mit anschließender statistischer Auswertung noch nicht erkannt. Dies mag unterschiedliche Gründe haben, die in der Einfachheit der bisherigen, unsystematischen „Trial-and-Error“-Versuche, der zumeist englischsprachigen Literatur (die vielfach von Statistikern oder Mathematikern verfaßt wurde) oder der Vielzahl an Verfahren und Methoden sowie deren Komplexität liegen kann. Als Vorteile für die Anwendung der statistische Versuchsplanung sind in aller Kürze zu nennen:

- Kostensenkung bei der Produkt- und Prozeßoptimierung,
 - Gewinnung von mathematisch/statistischen Aussagen bei minimalen Versuchskosten,
 - Klarheit bezüglich Wechselwirkungen,
 - reduzierte Entwicklungszeiten bei neuen Produkten
- sowie
- systematische Arbeitsweise durch Vorgabe eines aufgaben- bzw. problembezogenen Versuchsplans.

Des weiteren kann das Potential der Verbesserungsansätze betriebswirtschaftlich nicht eindeutig quantifiziert werden. Tendenzangaben von Unternehmen belegen jedoch, welches Potential DoE und die übrigen QE-Methoden beinhaltet /ZIS00, RED99, CZE97, THE01, KAS95a, KAS95b/. Zum Teil konnten erhebliche Einsparungen¹ bei der Anwendung von DoE in den Versuchsbudgets und der Zeit realisiert werden.

Darüber hinaus gibt es kein Konzept, welches die Versuchsplanung ganzheitlich von Projektbeginn bis zur Umsetzung der erzielten Ergebnisse in die Praxis unterstützt. Gestützt werden kann diese Aussage auf Publikationen, wie /BOX78, HIC80, MCL84, MAS89, SCH97, SPE91, MON91, PET91b, QUE89b, FKM92/, die ebenfalls auf das bisher ungelöste Problem einer effizienten Versuchsplanung hinweisen.

Zur weiteren Verwirrung kommt noch die von einigen DoE-Anwendern kontrovers geführte Diskussion über die Versuchstechniken nach *Taguchi* und *Shainin* /KLP92, KRO91/ hinzu. Viele Experten, allen voran Statistiker und Mathematiker, stehen der *Taguchi*-Methodik reserviert gegenüber. Als Kritikpunkte werden genannt:

- die Methodik stelle nur einen begrenzten Ausschnitt aus dem Gesamtmethodenfeld statistisch planbarer Versuche dar,
 - der Umgang mit den orthogonalen Feldern, die auf dem Hochvermengungsprinzip beruhen, verlangen einen sicheren Umgang mit Wechselwirkungen, der aber oft nicht vorhanden ist,
 - daß nicht nachvollziehbar ist, woher die orthogonalen Felder stammen
- sowie

¹ *Barker* /BAK90/ schreibt, daß typische Anwender über ein Verkürzung von Projektlaufzeiten und eine Senkung der Versuchskosten um 40 % bis 70 % berichten. /HRB02/ macht ähnliche Angaben.

- die propagierte „kochrezeptartige“ Vorgehensweise berge viele Unzulänglichkeiten, die eine falsche Versuchsdurchführung und Fehlinterpretationen hervorrufen kann.

Shainin hat einen anderen Weg eingeschlagen. Seine Methoden beruhen auf dem gesunden Menschenverstand, die vielfach als „Screening-Versuche“² oder „Homing-In“ Verwendung finden.

1.1 Stand der Forschung

Die klassische Versuchsplanung kann auf die Arbeiten des englischen Statistikers und Wissenschaftlers *Sir Ronald Aylmer Fisher* zurückgeführt werden. Er entwickelte Anfang des 19. Jahrhunderts die wesentlichen Grundsätze der faktoriellen Versuche, um eine Ertragssteigerung in der Landwirtschaft zu erreichen. In diesem Zusammenhang wurde die Technik der Datenanalyse, die sogenannte Varianzanalyse (ANOVA), konzipiert.

In den folgenden Jahren wurden darüber hinaus zahlreiche neue Verfahren und Methoden entwickelt, so daß heute ein umfangreiches Spektrum zur Versuchsplanung zur Verfügung steht. Erweitert wurde dieses Spektrum durch die Methoden von *Dr. Genichi Taguchi* /PHA89, TAG88/ und *Dorian Shainin* /BHO90, BHO99/ in den 70er und 80er Jahren.

Nachdem die Versuchsplanung auch erste Anwendungen in Europa erfahren hat, haben sich einige Großunternehmen (u. a. Bosch /BOS91, BOS93/, Hoechst /HOE93/, BASF /PET91a-b/, BMW /BRN92/, VW /DOA95/, usw.), die über eigene Stabsabteilungen in puncto Qualitätssicherung verfügen, damit beschäftigt.

Klein- und mittelständische³ Betriebe (KMU) können sich jedoch solche Stabsabteilungen meistens nicht leisten. Daher ist versucht worden, durch deutschsprachige Publikationen, wie /LIN53, LIN69, RET78, PET91a-c, SPE91, KRO94, QUE94, SCH97, KLP98/, die Versuchsplanung näher zu beschreiben und in Deutschland weiterzuverbreiten. Nur die Beschreibung allein ist nicht ausreichend, denn es gehört wesentlich mehr dazu, als nur Versuchspläne erstellen zu können.

Die eigentlichen Defizite in der praktischen Anwendung der statistischen Versuchsmethodik liegen bis heute hauptsächlich in einer fehlenden Systematik, mangelnder Koordination und Dokumentation sowie fehlendem Methodenwissen und Problemidentifikation. Diese Punkte sind oft ausschlaggebend dafür, daß eine erfolgreiche Anwendung der Versuchsmethodik scheitert.

In der Vergangenheit hat es immer wieder Bestrebungen gegeben, diese Grundprobleme zu lösen, ohne bisher ein pragmatisches Konzept mit der notwendigen Tiefe etablieren zu können.

² i.S.v. Auffinden der relevanten Einflußgrößen.

³ Kleine Unternehmen haben laut einer Definition der Europäischen Union aus dem Jahre 1996 max. 50 Beschäftigte, eine Bilanzsumme von max. 5 Mio. Euro und einen Jahresumsatz von maximal 7 Mio. Euro. Mittlere Unternehmen sind laut der gleichen Quelle Unternehmen mit maximal 250 Beschäftigten, eines Bilanzsumme von ca. 27 Mio. Euro, einem Jahresumsatz von max. 40 Mio. Euro und stehen zu höchstens 25% im alleinigen oder gemeinschaftlichen Eigentum eines größeren Unternehmens.

Der Forschungsbericht Nr. 137 des Kuratoriums Maschinenbau /FKM92/ hingegen bietet schon einen recht guten Ansatz zur Vorgehensweise (Leitfaden bestehend aus acht Arbeitsblättern), ist aber aufgrund einer nicht vollständigen Betrachtungsweise (nur einige wenige fraktionierte faktorielle Versuchspläne) nur eingeschränkt anwendbar.

Gimpel /GIM91/ beschreibt eine Systematik, die aufbauend auf einer Beobachtung des Prozeßgeschehens die Optimierung des Prozesses durch geplante Versuche ermöglicht.

Petersen /PET92c/ hat Auswahldiagramme entwickelt, die dem Anwender helfen sollen, einen geeigneten Versuchsplan herauszufinden. Er kann sich bei der Suche nach der Anzahl der Einflußgrößen bzw. der Stufenanzahl orientieren. Mischungsversuchspläne werden in einem gesonderten Ablaufdiagramm behandelt. Auch hier ist anzumerken, daß diese Publikation nicht ganzheitliche ausgerichtet ist.

Die Arbeiten von *Flamm* /FLA95/ und *Grob* /GRO95/ gehen mit dem wissensbasierten Ansatz weit über das hinaus, was in der täglichen Praxis einsetzbar ist bzw. benötigt wird.

Holst /HOL95/ weist schon deutlich auf eine Vorgehensweise hin, die sehr viel mehr als nur die reine Versuchsplangestaltung und –auswertung betrifft. Aber auch hier fehlt der ganzheitliche Aspekt, denn er beschreibt nur die zu Beginn notwendigen Planungsschritte und auch dort könnten noch neue Gesichtspunkte einfließen.

In der Arbeit von *Mayers* /MAY97/ werden Hinweise zur Auswahl von relevanten Einflußgrößen im Vorfeld der Versuchsplanung, dem sogenannten „heuristischen Screening“, gegeben. Weiterhin hat *Mayers* eine Vorgehensweise bei der Optimierung von komplexen Prozessen und Produkten für mehrere Zielgrößen entwickelt.

Weitere Arbeiten, wie /BOU93, HLF96, KRE96, LEH98, MAJ98, TIE99, DU00, HIL00, MIE00a, SRR00, KRÖ01/, beschäftigen sich mit der Anwendung für bestimmte Problemstellungen. In ihnen findet der interessierte sicherlich noch weitere hilfreiche Anregungen.

1.2 Inhalte und Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, Defizite in der Methodenkenntnis sowie beim zielsicheren Einsatz der statistischen Versuchsplanung zu reduzieren. Heute bestehen gerade bei klein- und mittelständischen Unternehmen immer noch große Hemmnisse, die statistische Versuchsplanung anzuwenden. Problempunkte, die oft genannt werden, lauten:

- zu umfangreiches Methodenspektrum bei der Versuchsplanung,
 - unzureichende Kenntnisse der Versuchsplanungsmethoden,
 - Unzulänglichkeiten bei der Auswahl einer geeigneten Methode,
 - zu viele Einflußgrößen,
 - Schwierigkeiten bei der statistische Auswertung
- sowie
- ein fehlender Anwendungsleitfaden hinsichtlich Planung, Durchführung und Auswertung.

Hinzu kommen noch fehlende Implementierungsansätze, den Durchdringungsgrad bezüglich der Anwendung der statistischen Versuchsplanung innerhalb der Unternehmen zu erhöhen.

Um diesen angesprochenen Kritikpunkten entgegenzuwirken, soll im Rahmen dieser Arbeit ein Brückenschlag von der theoretischen Aufbereitung der relevanten Methoden und Verfahren der statistischen Versuchsplanung bis hin zur Entwicklung eines ganzheitlich ausgerichteten Vorgehensmodells auf wissenschaftlich praktikablem Niveau realisiert werden.

Nach einer Erläuterung des Qualitätsbegriffes, relevanter Quality-Engineering-Methoden sowie einführender Sachverhalte zur statistischen Versuchsplanung werden deren Methoden und Verfahren ausführlich dargelegt. Dadurch soll eine umfassende Beschreibung und Charakterisierung der einzelnen Methoden und Verfahren erfolgen.

Das wesentliche Ziel der Arbeit ist es, ein Vorgehensmodell zu entwickeln, um gerade unversierten Anwendern aus klein- und mittelständischen Unternehmen ein Leitinstrument an die Hand zu geben, die statistische Versuchsplanung zur Problemlösung und zur Verringerung der Versuchsläufe einzusetzen. Mit diesem Vorgehensmodell soll versucht werden, die zuvor angesprochenen Defizite zu beseitigen.

Die Praxistauglichkeit des entwickelten Vorgehensmodell wird anschließend an einer praktischen Problemstellung überprüft.

Hinweise zur Einführung und Implementierung der statistischen Versuchsplanung runden die Arbeit ab.

***Anmerkung:** In der vorliegenden Arbeit wird nicht zwischen den Begriffen statistische Versuchsplanung (SVP) und statistische Versuchsmethodik (SVM) unterschieden, wie dies z.B. in Holst /HOL95/ zu finden ist. Vielmehr wird versucht, beide Begriffe in einem leserlichen Stil zu verwenden, um nicht zur Verwirrung beizutragen. Die Verwendung des Begriffs Design of Experiments (DoE) geschieht gleichermaßen. Ebenso wird keine wissenschaftliche Trennung der Begriffe Methode und Verfahren vorgenommen, da es im Bereich der Versuchsplanung Methoden (Taguchi, Shainin) sowie zahlreiche Verfahren und Versuchspläne gibt. Im Text werden daher beide Begriffe gleichermaßen angesprochen.*

2 Qualität - ein ökonomischer Imperativ

2.1 Qualität im Wandel der Zeit

Qualität läßt sich etymologisch auf das lateinische Wort „*quadis*“ (wie beschaffen) oder das Wort „*qualitas*“ (Beschaffenheit eines Gegenstandes) zurückführen /REH96/.

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts war das handwerkliche Können der Menschen ausschlaggebend für die Qualität der Produkte. Mit Beginn der industriellen Revolution¹ übernahmen Maschinen die entscheidende Rolle sowohl für die Produktqualität, als auch für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Die menschliche Arbeitskraft wurde im Laufe der Zeit durch eine immer perfektere Automatisierung ersetzt /GAA96/. Außerdem wurde zu Beginn des 20. Jahrhunderts eine geänderte Produktionsstrategie eingeführt, der nach Taylor entwickelte und nach ihm benannte *Taylorismus*².

Die zunehmende Taylorisierung macht es notwendig, die Qualität durch unabhängige Kontrollabteilungen zu prüfen, d.h. die Qualitätsverantwortung wurde delegiert. Qualität wurde erprüft, von erzeugter Qualität konnte keine Rede sein. Teile, die den Qualitätsspezifikationen nicht entsprachen wurden ausgesiebt, welches sich auf die Lohnkosten der Arbeiter auswirkte. Da diese Anschauung sehr unwirtschaftlich war, ist offensichtlich, wurde aber vom damaligen Verkäufermarkt toleriert, da die Nachfrage größer als das Angebot war. Qualität wurde durch die Lieferanten und der Preis durch die Kosten bestimmt.

Im Laufe der Jahre mußten die Unternehmen teilweise schmerzlich feststellen, daß eine zunehmende Marktsättigung eintrat, die als Folge steigende Qualitätsansprüche der Kunden nach sich zog /REH96/.

2.2 Wandel des Qualitätsbegriffs

Im heutigen Verdrängungswettbewerb reichen traditionelle Methoden nicht mehr aus, um sich von den Mitbewerbern entscheidend abzuheben. Der Markt hat sich weg vom Verdrängungsmarkt hin zum Käufermarkt entwickelt. Kunden haben den Begriff „*Qualität*“ weiter ausgeprägt. Kriterien, wie z.B.

- Umweltverträglichkeit,
 - Verfügbarkeit am Markt
- sowie sekundäre Merkmale wie
- Kundenservice
- oder
- Markenprestige,

¹ Bezeichnung für den durch wiss.-techn. Fortschritt bewirkten Übergang von der Agrar- zur Industrien-Gesellschaft.

² Ein von dem amerikanischen Ingenieur *Frederick Winslow Taylor* (* 1856 - † 1915) entwickeltes System der wiss. Betriebsführung, das v.a. auf dem Prinzip der Zerlegung von Arbeitsvorgängen in einzelne Bewegungsabläufe zum Zweck der Realisierung beruht.

nehmen eine wichtige qualitätsbezogene Position ein.

Erschwerend kommt noch hinzu, daß Wünsche, die den Kunden begeistern und zum wiederholten Kauf verleiten, oft unausgesprochen bleiben (*Kano-Modell*). Ein Schritt in die richtige Richtung ist, daß Unternehmen erkannt haben, wie wichtig eine Kundenorientierung ist. Unternehmen müssen nämlich weniger Aufwand betreiben bestehende Kunden zufriedenzustellen, als neue Kunden zu gewinnen. Umfragen ergaben, daß 31 % der Endverbraucher die Qualität eines Produktes als ausschlaggebend für den Kaufentschluß bezeichnen. Von den übrigen machen 18 % ihre Kaufentscheidung vom Namen des Herstellers abhängig. Für weitere 18 % ist der Preis entscheidend, während 14 % die bewährten Produkteigenschaften als sehr wichtig erachten /TAW96/.

Welche Bedeutung die Kundenorientierung hat, zeigt eine Umfrage nach der Gewichtung der Wettbewerbsfaktoren. Dort zeigte sich, daß 80 % der Nennungen den Kontakt zwischen Unternehmen und Kunde betreffen.

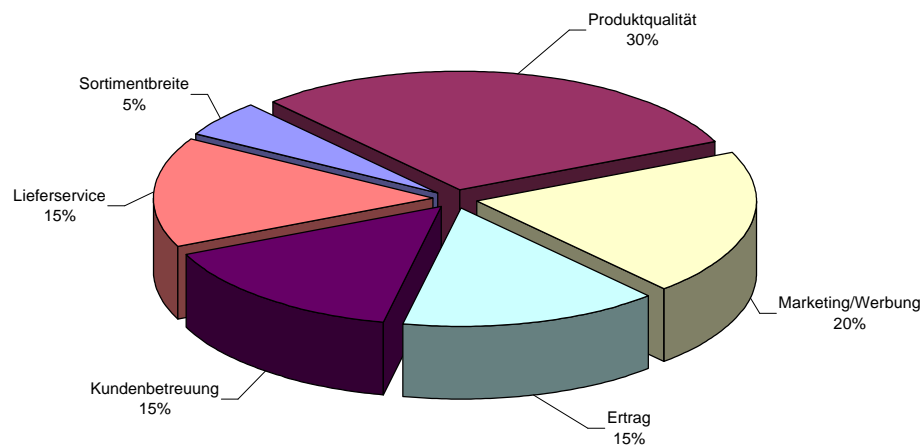


Abb. 2.1: Kundenorientierte Bedeutung von Wettbewerbsfaktoren /KAS93/

Neben den Erwartungen und Forderungen, die ein Kunde an die Leistungen eines Lieferanten knüpft, kommt weiterhin noch ein akzeptabler Preis und der Liefertermin hinzu. *Geiger* schreibt in diesem Zusammenhang: „Preis und Termintreue sind jedoch vielfach bald vergessen. Ob aber ein Produkt den Anforderungen an die Qualität entspricht, ob seine Zuverlässigkeit zufriedenstellt und seine Verfügbarkeit den Erwartungen entspricht, dies alles wird während der gesamten Nutzungsdauer immer bedeutender und bestimmt schließlich nachfolgende Kaufentscheidungen“ /GEI98/.

Soll jetzt die Kundenorientierung zum Kern der Qualität werden, ist ein Abrücken von der ausschließlichen produktzentrierten Sichtweise unausweichlich. Auf das Unternehmen kommen zusätzliche Marktaspekte, wie Flexibilität, Kosten- und Terminzwang, hinzu. Ebenfalls muß ein Unternehmen die Kostenseite neu betrachten, denn die Basis zur Kostenkalkulation für Produkte sind nicht mehr die eingesetzten Kosten, sondern der Preis, den ein Kunde bereit ist, zu zahlen. Nur die Unternehmen haben eine Chance am Markt zu bleiben bzw. ihren Marktanteil zu vergrößern, die innovative, qualitativ hochwertige, robuste Produkte früh am Markt zu geringen Kosten anbieten.

Diese These belegen die Erfolge der Automobil- und Halbleiterindustrie der Japaner. Seit den 60er Jahren haben japanische Unternehmen ein neues Qualitätsbewußtsein in ihrer Unternehmensphilosophie verankert.

Auch heute erzielen sie damit zum Teil noch gute Markterfolge. Es wurden die Gedanken und Ansätze der amerikanischen Qualitäts-Gurus

- *Shewart*,
 - *Juran*,
 - *Crosby*,
- und
- *Deming*
- sowie der Japaner
- *Ishikawa*
- und
- *Taguchi*

mit typischer Konsequenz implementiert /BUM00/.

Nicht nur nach außen war die Qualität eine wichtige Größe, sondern auch innerhalb des Unternehmens. Im Zusammenhang stehende Prozesse bekamen dadurch eine neue Bedeutung /REH96/.

2.3 Definition von Qualität

Bereits große Namen sind an dem Versuch gescheitert, den Ausdruck „Qualität“ eindeutig zu definieren. Die Qualität gehört schon seit dem griechischen Philosophen *Aristoteles* (* 384 v. Chr. - † 322 v. Chr.) zu den grundlegenden philosophischen Kategorien (neben Quantität, Ort, Zeit, usw.). Seitdem sind die unterschiedlichsten Auffassungen über Qualität entstanden. Eine Definition von Qualität, die klar, präzise und eindeutig ist, gibt es nicht /HES94/.

Im Laufe der Zeit entstanden immer neue Definitionen und Anschauungen zum Begriff „*Qualität*“. Im Brockhaus aus dem Jahre 1959 war der Begriff noch einfach als „*Wertstufe, Güte, Eigenschaft*“ definiert. Es wird bei dieser Diskussion nicht berücksichtigt, daß Qualität kein absoluter Begriff, sondern eigentlich nur eine wertfreie Beschreibung der Beschaffenheit ausdrückt. Erst mit einem Vergleich unterschiedlichster Produktmerkmale und –eigenschaften ist ein Urteil bezüglich der Qualität möglich.

Die Europäische Norm DIN EN ISO 8402 definiert Qualität als „*Die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen*“ /DIN8402/. Zahlreiche Qualitätsphilosophen äußern sich zum Thema Qualität mit zum Teil visionären und zum Teil mit anschaulichen Gedanken:

- *Feigenbaum*: „*If [the quality] is based upon the customers actual experience with the product or service, measured against his or her requirements ...*“.
 - *Juran*: „*Fitness for use*“ (Gebrauchstauglichkeit).
- oder
- *Taguchi*: „*Quality is the loss a product causes to society after beeing shipped, other than any losses caused by it´s intrinsic functions*“.

Weitere pragmatische Aussagen zum Qualitätsbegriff, die immer wieder in Publikationen genannt werden, lauten:

- Qualität ist kein Ding, sondern ein Vorgang.
- Qualität ist die Erfüllung der Kundenwünsche.
- Qualität ist, wenn der Kunde wiederkommt, nicht aber die Ware ...

Folgende Grundsätze ergeben sich somit aus dem Qualitätsbegriff:

- *„Qualität ist nichts Absolutes, sondern stets die Beschaffenheit einer Einheit in bezug auf gegebene Erfordernisse und vorgegebene Forderungen.*
- *Qualität ist keine physikalische Größe, sie ist also nicht meßbar. Meßbar ist allenfalls der Grad der Erfüllung von Einzelforderungen.*
- *Man kann einer Einheit nicht das Vorhandensein bzw. Fehlen von Qualität attestieren. Vielmehr sind alle Ausprägungen zwischen „sehr gut“ und „sehr schlecht“ möglich“ /WIN86/.*

Die Aussagen belegen, wie subjektiv der Begriff „Qualität“ sein kann. Es wird immer ein Versuch bleiben, den Begriff durch eine Norm einheitlich zu interpretieren /REH96/.

Qualität wird durch Einflußgrößen, wie Mensch, Maschine, Methode, Mitwelt und Material (5 M), beeinflußt. Im Sinne einer präventiv wirkenden und effizienten Qualitätssicherung Qualität zu produzieren, bedeutet, die Einstellparameter auf bestimmte Sollwerte zu regeln. Hierbei kann z.B. die statistische Versuchsplanung sehr gewinnbringend eingesetzt werden. Somit ist in der Beherrschung und Fähigkeit von Fertigungsprozessen eine wesentliche Voraussetzung zur Produktion von Qualität zu sehen /BHO90/. Der Qualitätsbegriff kann damit von den Regelgrößen Produkt und Prozeß auf die Einflußgrößen der „5 M“ ausgedehnt werden /WST91/.

2.4 Qualität als Wettbewerbsfaktor

Den Markterfolg eines Unternehmens bestimmen Kunden dadurch, inwieweit ein Problem durch eine Angebotene Dienstleistung oder ein Produkt gelöst wird. Wettbewerbsentscheidende Faktoren sind dabei der richtige Liefertermin, ein angemessener Preis sowie die Qualität. Einen immer höheren Stellenwert nimmt bei diesen drei Anforderungen die Qualität ein, die somit immer häufiger über den Markterfolg entscheidet. Diese Aussage kann durch ein Zitat von *Frederick Henry Royce*³ untermauert werden, der sagte:

„Quality exists, when the price is long forgotten!“.

Die heutigen Käufermärkte weisen eine starke Tendenz zu kundenspezifischen Lieferungen und Leistungen einer zunehmenden Verantwortung für den effektiven Nutzen des Produktes auf. Begründet werden können diese erhöhten Qualitätsanforderungen durch die Marktentwicklung, die Gesetzgebung und des Umweltschutzes /BGG95/.

³ Mitbegründer des englischen Traditionsunternehmens Rolls Royce (* 1863 - † 1933).

Qualität als Kaufmotiv hat einen erheblichen Einfluß auf die am Markt zu erzielenden Preise, wie aus der sogenannten PIMS-Studie des Strategic Planning Institute (SPI), Cambridge, USA, hervorgeht /KRM87, SHO74/. Das PIMS-Projekt wurde 1971 mit dem Untersuchungsziel initiiert, Beziehungen zwischen Unternehmensstrategie und Unternehmenserfolg zu analysieren. Heute wird es in verbesserter Form weiterbetrieben. Es ging darum, Determinanten zu finden, die den Gewinn sowie den Cash-Flow beeinflussen. Eine der dabei analysierten Determinanten war die Qualität /KRM87/.

In Abb. 2.1 sind Ergebnisse der PIMS-Analyse /SPI81, SPI83/ aufgetragen, die den Return on Investment (ROI) als Meßgröße für den erzielenden Preis am Markt über den relativen Marktanteil und der relativen Qualität zeigt. Hieraus ist zu ersehen, daß eine hohe relative Qualität unabhängig vom relativen Marktanteil einen erhöhten Return on Investment liefert. Somit ist durch eine Qualitätsführerschaft in einem bestimmten Marktsegment eine deutlich erhöhte Preispolitik gegenüber Mitbewerbern zulässig /WST91/.

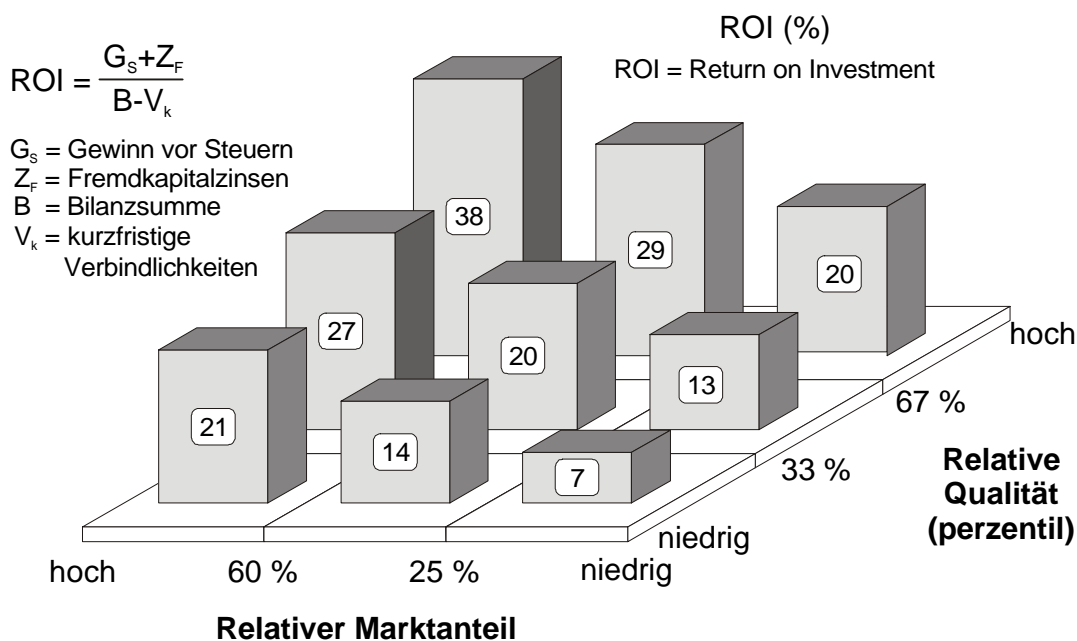


Abb. 2.2: Return on Investment über relative Qualität und relativem Marktanteil /KRM87/

Im Automobilbereich ist es sogar gelungen mit höheren Preisen einen höheren Marktanteil zu realisieren. Als Beispiele sind hier die Marken DaimlerChrysler, BMW und VW zu nennen. Eine ungünstige Qualitätspositionierung führt hingegen immer zu der Notwendigkeit einer unterdurchschnittlichen Positionierung der Preise /MCK91/. Damit ist ersichtlich, daß Qualität preisstabilisierend bzw. sogar preissteigernd wirkt.

2.5 Qualität als Kostenfaktor

Qualitätskosten⁴ haben sich bei produzierenden Unternehmen Europas als drittgrößte Kostenart nach den Materialkosten und den Personalkosten herauskristallisiert. Neben dem Wettbewerbsfaktor Qualität zeigt sich, daß Qualität auch gleichzeitig einen erheblichen Kostenfaktor darstellt /GEI98/.

⁴ „Kosten, die vorwiegend durch Qualitätsforderungen entstehen, d.h. Kosten, die durch Qualitätsprüfungen sowie durch interne oder extern festgestellte Fehler verursacht werden“ /DIN55350a/.

Im Bereich des Maschinenbaus haben Umfragen und Analysen gezeigt, daß nur etwa 10 % der Qualitätssicherungsaufwendungen für präventive Maßnahmen, d.h. Fehlerverhütungsmaßnahmen, ausgegeben wird /RAU90/. Hingegen sind ca. 40 % für Meß- und Prüfmaßnahmen sowie ca. 50 % für Fehlerfolgekosten zu veranschlagen. Demnach wird für Prüfmaßnahmen, Aussortieren und Nacharbeit der größte Teil der Kosten verbraucht.

Ein Hauptteil dieser Kosten entsteht durch Fehler in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses, d.h. in der Planungs- und Entwicklungsphase /PFE96, MIC93/. Abb. 2.3 ist zu entnehmen, daß dies ca. 75 % ausmacht. Die Behebung der Fehler erfolgt jedoch zu 80 % erst in der Fertigung, bei der Endprüfung oder während des Einsatzes des Produktes beim Kunden /WST91/. Je später die Beseitigung erfolgt, desto höher ist der finanzielle Aufwand, da sich die Fehlerbeseitigung von Phase zu Phase ca. verzehnfacht (Zehnerregel der Fehlerkosten, siehe auch Abb. 2.8) /REH96/. Ziel muß es sein, mit dem Kosteneinsparungspotential der Prüfmaßnahmen die Qualität zu verbessern. Dies erfordert allerdings neue Strategien innerhalb der Qualitätssicherung, nämlich *Qualität nicht zu erprüfen, sondern Qualität zu produzieren* /WST91/.

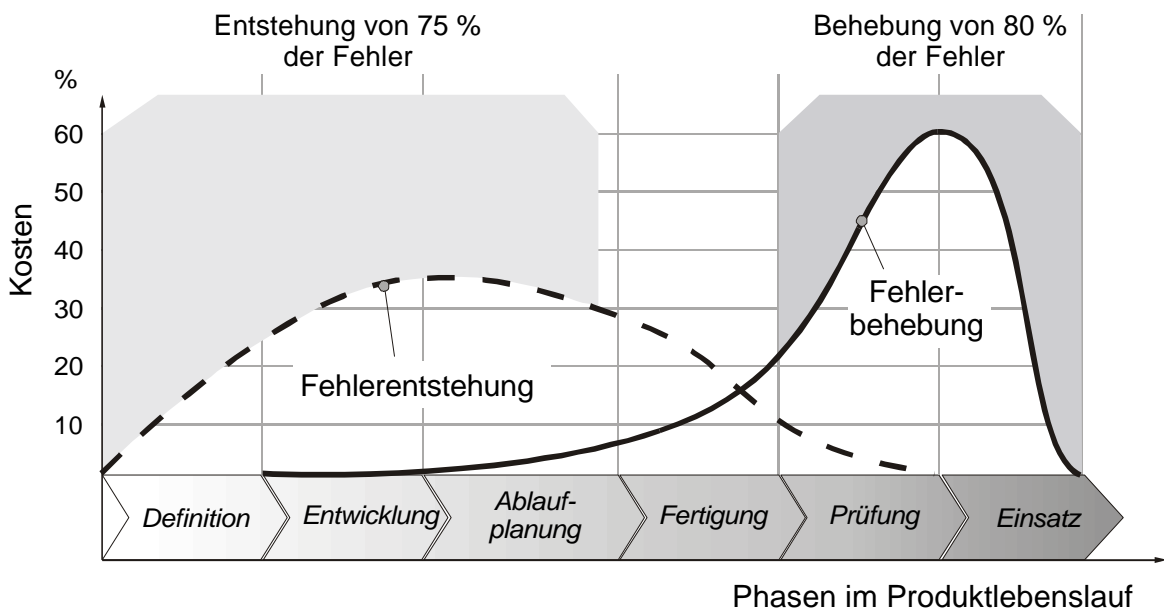


Abb. 2.3: Fehlerentstehung und Behebung /PFE96, WST91/

Qualität zu produzieren heißt, aus Erfahrungen zu lernen, um dieses Wissen präventiv und systematisch in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses berücksichtigen zu können. Unverzichtbar ist in diesem Zusammenhang die Anwendung von präventiven Quality-Engineering-Werkzeugen, die in Kapitel 3 zu finden sind /NIC92/.

2.6 Von der Qualitätskontrolle zum Qualitätsmanagement

Der Weg zum unternehmensweiten Qualitätsmanagement gelang durch den Übergang von der Ära der produktbezogenen Qualitätskontrolle über die prozeßorientierte Qualitätssicherung zum besagten Qualitätsmanagement. Dabei änderten sich ebenso die Methoden und Instrumente wie der Gegenstand der Qualitätsbetrachtung.

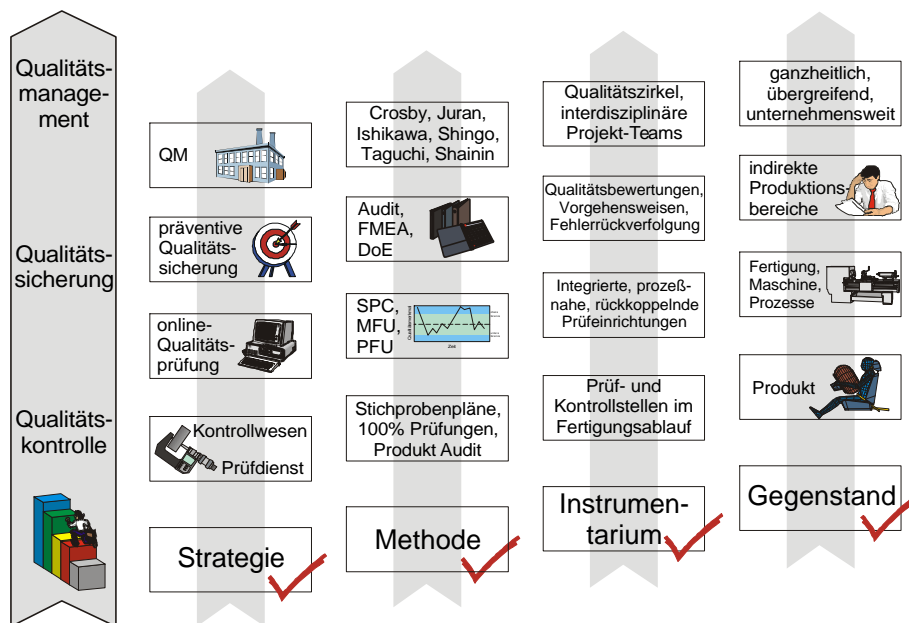


Abb. 2.4: Entwicklung des Qualitätsmanagements /WKM93/

Ausgelöst wurde dieser Wandel durch eine Reihe von Ursachen. Durch das Voranschreiten im Bereich Datenverarbeitung und der Meßtechnik sowie dem Einsatz von prozeßbegleitenden Erhebungsmethoden (z.B. SPC), war es z.B. möglich, eine online-Qualitätsprüfung in Fertigungsprozessen zu installieren.

Neue organisatorische Konzepte halfen, eine unternehmensweite Entkoppelung der tayloristischen Arbeitsteilung vorzunehmen. Durch Gruppenarbeit und die Inselfertigung wurde die Selbstkontrolle gesteigert und eine Verknüpfung in (Qualitäts-) Regelkreise ermöglicht. Aus der Erfahrung war bekannt, daß eine Kombination von Prüfung und Nacharbeit ineffizient ist, welches den Weg zu einer systematischen Qualitätssicherung ebnet. Da das Beheben von Fehlern in der Produktion viel kostspieliger ist als eine vorausschauende Verhinderung in den frühen Entwicklungsphasen, erfolgte im nächsten Schritt eine Erweiterung um präventive Methoden wie z.B. QFD, FMEA und DoE, die bereichsübergreifend Anwendung finden.

Die ständige Forderung nach kürzeren Produktentwicklungszyklen fordert dementsprechend eine bereichsübergreifende Zusammenarbeit von

- Entwicklung,
- Konstruktion
- und
- Produktion,

um alle aufeinanderfolgenden Aktivitäten zu parallelisieren (Simultaneous Engineering).

Damit verkörpert das Qualitätsmanagement einen ganzheitlichen Ansatz, der auch nicht unmittelbar an der Wertschöpfung beteiligte Bereiche und Prozesse eines Unternehmens einbezieht. Integriert sind somit das ganze Unternehmen, die Beziehungen zu Lieferanten und Kunden sowie der gesamte Produktentstehungs- und -lebenszyklus innerhalb der Qualitätsbetrachtungen /REH96/.

2.7 Ständige Verbesserung

Das Streben nach ständiger Verbesserung ist eine zentrale Idee des Qualitätsmanagements. Dabei steht das gesamte Unternehmen mit dem Ziel einer ständigen Selbsterneuerung und eine fortschreitende Anpassung an die Marktforderungen im Blickpunkt. Hilfreich ist hierzu die Anwendung des *Deming-Circle*, der die ständige Verbesserung im Plan-Do-Check-Zyklus (Planen-Durchführen-Messen-Verbessern) abbildet.

Des weiteren gilt die Maxime des präventiven Handelns, um Fehler vor ihrer Entstehung zu verhüten. Durch ständige Verbesserung und präventives Handeln soll das Ziel von Null-Fehlern realisiert werden /REH96/. Eine Null-Fehler-Produktion gilt häufig als Phantasterei. Beispiele zeigen aber, daß Fehler gravierende Auswirkungen auf die Kosten haben können. Gegenüber einer konventionellen Fertigung spart die Null-Fehler-Produktion Kosten für das Prüfen, das Sortieren, die Nacharbeit und für den Ausschußersatz. Weiterhin spart sie Sicherheitsbestände sowie die Kosten für Lagerung und Verwaltung dieser Bestände /KOE95/.

Warum ist das Ziel von Null-Fehlern so wichtig? Trifft nicht der Ausspruch zu: „*Wer arbeitet macht Fehler!*“ bzw. „*Aus Fehlern lernt man!*“? Das einer Null-Fehler-Strategie trotzdem eine entscheidende Bedeutung durch das Qualitätsmanagement beigemessen werden muß, verdeutlichen nachfolgende Beispiele, die „nur“ eine Fehlerfreiheit von 99,9 % aufweisen:

- Jede Stunde gehen durch die Post ca. 1600 Postsendungen verloren.
 - Jede Stunde werden ca. 22.000 Schecks von falschen Bankkonten abgebucht.
 - Ärzte und Schwestern lassen pro Jahr ca. 15.000 neugeborene Babies fallen.
 - Jede Woche nahezu ca. 500 fehlerhafte Operationen.
 - Täglich zwei kritische Landungen in Frankfurt.
- oder
- Pro Jahr werden zehn Beutel AIDS infiziertes Plasma verarbeitet.

Hierdurch ist ersichtlich, daß es absolut berechtigt ist, eine „Null-Fehler“-Strategie anzustreben, welche mit Six Sigma Programmen realisiert werden soll /REH96/. Dabei wird versucht, ein Fehlerniveau von 3,4 Fehlern pro 1 Million Möglichkeiten zu erreichen /RSS02, BGB03/.

2.8 Aufgaben und Umfang des Qualitätsmanagements

Ein zentrales Anliegen des Qualitätsmanagements ist die Zufriedenheit der Kunden mit der durch das Unternehmen erbrachten Leistung. Eine einfache Ausdrucksweise sagt dazu: „*Der Kunde soll wiederkommen, nicht das Produkt*“ /KOE95/.

Um dies zu erreichen und um qualitativ hochwertige Produkte zu erzeugen, wird eine systematische Vorgehensweise von der Entwicklung bis zur Entsorgung eines Produktes benötigt. Alle Phasen enthalten Aktionen, die geplant, dokumentiert und geprüft werden müssen. Ebenso sind auftretende Schwachstellen zu beseitigen. Die angesprochene Systematik des Planens, Durchführens, Messens und Verbesserns werden im Qualitätsmanagement auf der Basis der strategischen Orientierungsebenen von der Mitarbeiterorientierung bis zur ständigen Verbesserung repräsentiert.

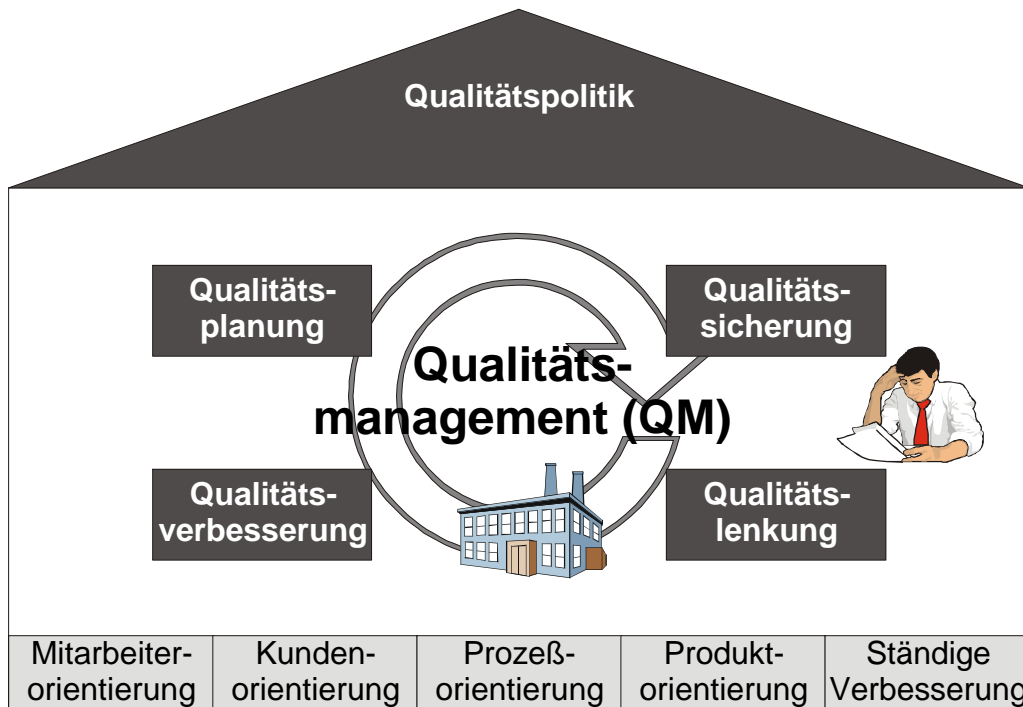


Abb. 2.5: Komponenten des Qualitätsmanagements /REH96/

Die Ziele werden dabei aus der Qualitätspolitik abgeleitet und durch die

- Qualitätsplanung,
 - Qualitätssicherung,
 - Qualitätslenkung
- und
- Qualitätsverbesserung

umgesetzt.

Im einzelnen verbirgt sich hinter den Begriffen folgendes /REH96/:

- **Qualitätsphilosophie:** Ziele (Leitlinien) für alle Tätigkeiten definieren, die anschließend umzusetzen sind.
- **Qualitätssicherung:** Bezeichnet die Darlegung aller Maßnahmen, die im Qualitätsmanagement verwirklicht sind, um „ausreichendes Vertrauen zu schaffen, daß eine Einheit die Qualitätsforderungen erfüllen wird“ /DIN8402/.
- **Qualitätslenkung:** „Arbeitstechniken und Tätigkeiten, die zur Erfüllung der Qualitätsforderungen angewendet werden“ /DIN8402/.
- **Qualitätsverbesserung:** „Innerhalb einer Organisation ergriffener Maßnahmen zur Erhöhung der Effektivität und Effizienz von Tätigkeiten und Prozessen“ /DIN8402/.
- **Qualitätsplanung:** Umfaßt alle qualitätsbezogenen Planungsaktivitäten vor Produktionsbeginn, die zur Umsetzung der Qualitätsforderungen des Kunden in ein lieferfähiges Produkt benötigt werden.

Hinter den Begriffen der strategischen Orientierungsebenen ist zu verstehen /REH96/:

- **Mitarbeiterorientierung:** Optimale Gestaltung der Arbeitsbedingungen sowie Mitarbeiterführung, qualitätsbezogene Weiterbildung, Einbeziehung des Mitarbeiterwissens und Schaffung von mitarbeitergerechten, qualitätsförderlichen Organisationsstrukturen.
- **Kundenorientierung:** Unternehmensaktivitäten aus der Sicht des Kunden optimieren bzw. auf ihn ausrichten.
- **Prozeßorientierung:** Optimale Gestaltung von Verfahren und Arbeitsschritten zur Herstellung hinsichtlich Kosten, Fertigungsverfahren, Bearbeitungsgenauigkeit sowie der Bearbeitungszeit.
- **Produktorientierung:** Entwickeln und Anwenden von Maßnahmen, mit denen sich die Produktqualität unmittelbar beeinflussen läßt.
- **Ständige Verbesserung:** Ständige Selbsterneuerung des Unternehmens sowie die fort-dauernde Anpassung an die Marktanforderungen.

2.9 Aufwand und Nutzen von Methoden zur vorbeugenden Sicherung der Qualität

Wie bereits angesprochen, eignet sich der Einsatz von Quality-Engineering-Methoden zur präventiven Qualitätssicherung bzw. zur ständigen Verbesserung /NIC92/. Nach /SON89, ISH80, ZIN89, MLL89/ erfordert sogar ein umfassendes Qualitätsmanagement regelrecht den Einsatz von Quality-Engineering-Methoden. Als Maß für die Wirtschaftlichkeit von Quality-Engineering-Methoden kann die Differenz zwischen Aufwand und Nutzen dieser Methoden zur vorbeugenden Sicherung der Qualität definiert werden, welches in *Abb. 2.6* verdeutlicht wird.

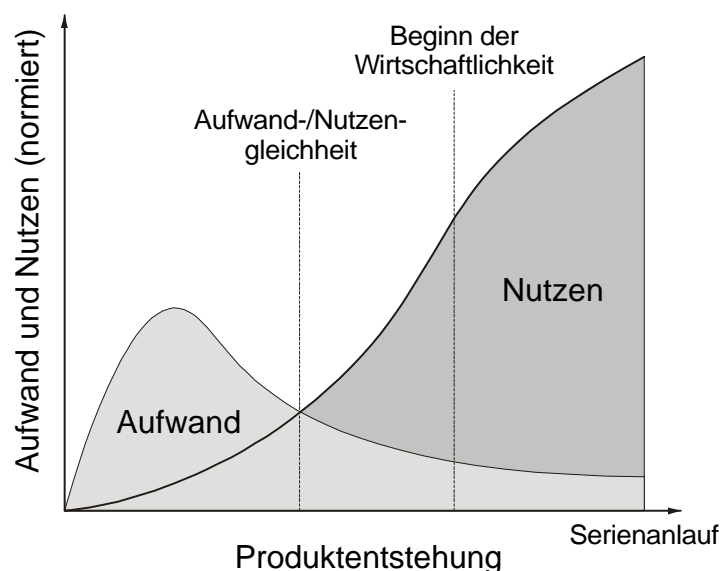


Abb. 2.6: Wirtschaftlichkeit der Anwendung von präventiven QE-Methoden /VDI04a/

Zum besseren Verständnis, werden nachfolgend einige Aufwands- und Nutzenanspekte näher diskutiert:

- Aufwand:

Im wesentlichen ist als Aufwand für den Einsatz von Methoden zur präventiven Sicherung der Qualität der Zeitaufwand der Mitarbeiter zu nennen. Dieser setzt sich zusammen aus Schulungsmaßnahmen im Vorfeld und der erhöhten Systematik bei der Durchführung. Ein weiterer, kleinerer Teil wird durch Sachkosten, wie z.B. Material, Reisekosten, usw., beigesteuert. Da das Haupteinsatzgebiet der präventiven Methoden in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses liegt, ist der Hauptaufwand hinsichtlich der Methodenanwendung auch dort zu sehen.

In der Regel ist die „Spitze des Aufwandberges“ im ersten Drittel der Produktentstehungszeit zu finden. Daher ist auch verständlich, daß die Aufwandskurve im weiteren Verlauf schnell abnimmt. Zur Minimierung des Aufwands sind ausgereifte Methodenkonzepete, geeignete Hilfsmittel zur Methodenunterstützung sowie eine klare Integration der Methoden in die Arbeitsabläufe zwingend notwendig /KRO95/.

- Nutzen/Wirksamkeit:

Der wesentliche Nutzen bzw. die wesentliche Wirksamkeit der Methoden zur präventiven Qualitätssicherung liegt in der frühestmöglichen Vermeidung von Fehlleistungen als Fehlerfolgekosten. Die Wirksamkeit von präventiv wirksamen Qualitätssicherungsmethoden läßt sich am Beispiel der Anzahl und dem Zeitpunkt von Änderungen im Konstruktionsprozeß darstellen. Dazu enthält *Abb. 2.7* einen Vergleich zwischen Japan und der westlichen Industrie, der sehr deutlich zeigt, was der Einsatz von QE-Methoden bewirken kann /SUL86, KRO95/. Als Nutzenaspekte hingegen sind anzuführen /SUL86/:

- verringerter Konstruktionsaufwand zur Fehlerbeseitigung bei Konstruktionen,
- reduzierter Aufwand bei Erprobungsläufen,
- geringere Planungsfehlerbeseitigung bei Herstellprozessen,
- verringerte Störungsanfälligkeit in den Prozeßanläufen,
- weniger Ausschuß und Nacharbeit,
- niedrigere Gewährleistungs- und Kulanzkosten

sowie

- erhöhtes Image im Vergleich zu Mitbewerbern.

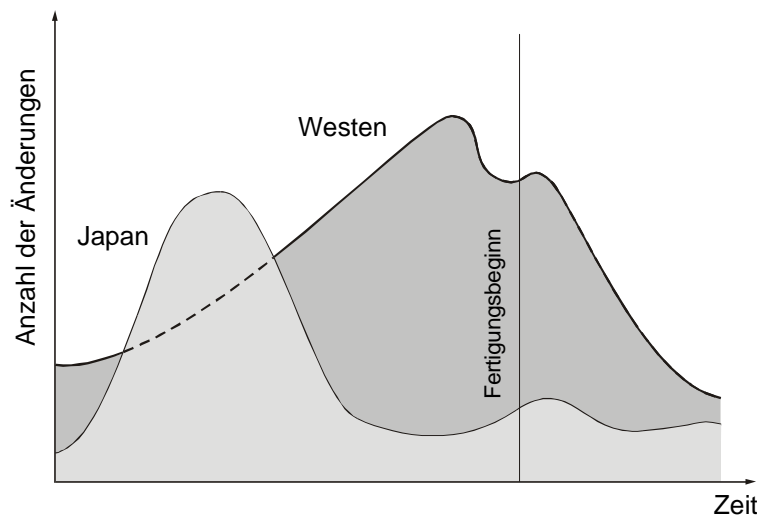


Abb. 2.7: Anzahl der Änderungen vor Fertigungsbeginn /SUL86/

Mit der Anwendung der QE-Methoden wird also die Fehlerfortpflanzung vom Lastenheft über die Produktentwicklung, Prozeßplanung, Produktion bis zum Kunden reduziert. Hierdurch ist ein riesiges Kosteneinsparungspotential gegeben, denn je später ein Fehler erkannt wird, desto teurer ist dessen Beseitigung. Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang nochmals in *Abb. 2.8*, der sogenannten „Zehnerregel der Fehlerkosten“.

Präventive QE-Methoden sollen also potentiellen Problemen vorbeugen bzw. diese vermeiden. Ihr Nutzen tritt allerdings nicht zum Zeitpunkt der Methodenanwendung ein, sondern erst in der Zukunft. Somit ist festzustellen:

*Je früher ein Fehler erkannt wird,
desto länger muß auf den Nutzen gewartet werden,
desto größer ist aber auch (nach der Zehnerregel) dieser Nutzen.*

Aufgrund der Tatsache, daß vermiedene Fehler meist nicht nachweisbar sind, können Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, wie z.B. wieviel Prozent Fehler wurden durch die Anwendung von QE-Methoden vermieden, nur schwierig bzw. gar nicht angestellt werden /VDA04a/.

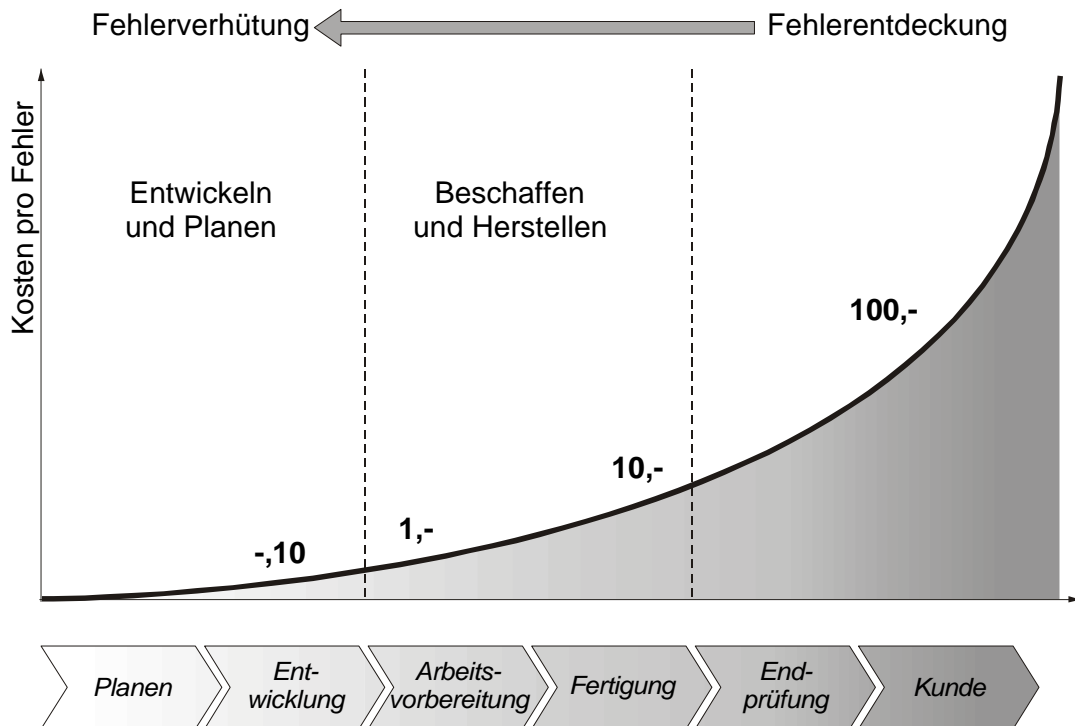


Abb. 2.8: Zehnerregel der Fehlerkosten /PFE96/

2.10 Konzepte, Methoden und Techniken zur Beherrschung der Qualitätsplanung

Für Produktentwickler ist die Bewältigung der Qualitätsplanung zu einer echten Herausforderung geworden. Heutzutage unterliegt jede Produktentwicklung einem enormen Kosten- und Zeitdruck, der den Aufwand zur Qualitätsplanung einschränkt, bzw. ihn so gering wie möglich hält. Entscheidende Limitierungen sind:

- Vom Markt wird ein fixer Preis vorgegeben.
sowie
- Die Entwicklungszeit muß möglichst kurz sein. Wünschenswert ist eine kürzere Zeit als die Mitbewerber realisieren zu können.

Werden diese Rahmenvorgaben überschritten, hat dies drastische Auswirkungen, wie Berechnungen von McKinsey zeigen, die in *Abb. 2.9* nochmals grafisch verdeutlicht sind:

- Angenommen werden soll ein Marktwachstum von 20 % sowie ein jährlicher Preisverfall von 12 %.
- Wird ein Produkt betrachtet, welches eine fünfjährige Lebensdauer aufweist, aber bei der Entwicklung (im Vergleich zum Mitbewerber) eine Überschreitung der Entwicklungszeit von einem halben Jahr hat, entsteht eine Gewinneinbuße von 33 %.
- Liegt eine Überschreitung der Produktionskosten um 9 % vor, so führt dies zu einer Gewinnminderung von 22 %.
- Im Vergleich dazu fällt eine 50 % Überschreitung der Entwicklungskosten mit nur 3,5 % Gewinneinbußen kaum ins Gewicht.

Diese Limitierungen machen eine Produktentwicklung im Hinblick auf die Qualitätsplanung schwierig. Zum einen muß eine Qualitätsplanung effektiv sein, zum anderen stehen nur begrenzte Kosten zur Erfüllung der immer umfangreicheren und höheren Kundenforderungen entgegen. Um unter diesen Rahmenbedingungen die angesprochenen Forderungen einzuhalten, bedarf es einem systematischen und interdisziplinären Arbeiten, welches durch den Einsatz entsprechender Konzepte, Methoden und Techniken unterstützt wird.

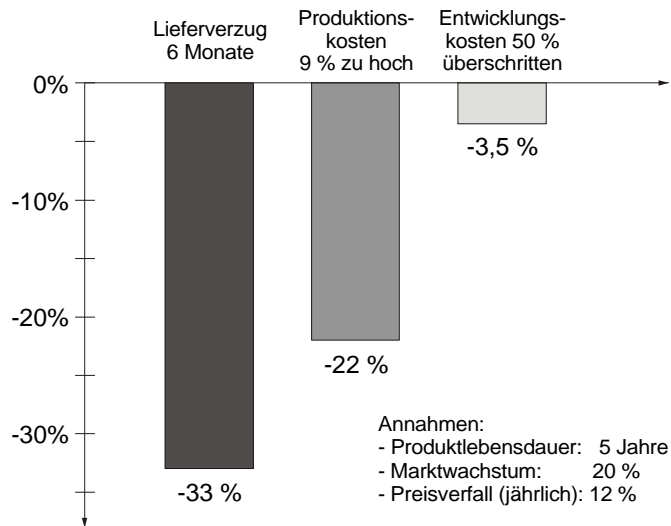


Abb. 2.9: Entwicklungskosten-Gewinn /VDI94b/

In der Literatur werden eine Vielzahl von Normen, Richtlinien, Konzepten, Methoden und Techniken zur besseren Beherrschung der Qualitätsplanung angeboten /HER96, REH96, PFE96, WEK96/. Um die unterschiedlichen Ziele der Qualitätsplanung behandeln zu können, ist eine Kombination verschiedener Konzepte, Methoden und Techniken notwendig. Damit soll gewährleistet werden, daß die Kundenforderungen zielsicher in innovative, robuste und qualitativ hochwertige Produkte integriert werden /ZIS00/.

Die wichtigsten QE-Methoden werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

3 QE-Methoden zur präventiven Produkt-/Prozeßentwicklung

Um der Bedeutung der Qualität Rechnung zu tragen, erfordern Produkte und Prozesse eine ganzheitliche Betrachtung der Einflußgrößen

- Mitarbeiter,
 - Technik
- und
- Organisation.

Zur Herausarbeitung und Umsetzung von qualitätssichernden Maßnahmen in technisch orientierten Bereichen werden Werkzeuge empfohlen, die unter den Begriff „Quality-Engineering-Methoden“ (QE-Methoden) fallen und in *Abb. 3.1* bezüglich ihres Einsatzes innerhalb der Produktwertschöpfungskette aufgeführt sind.

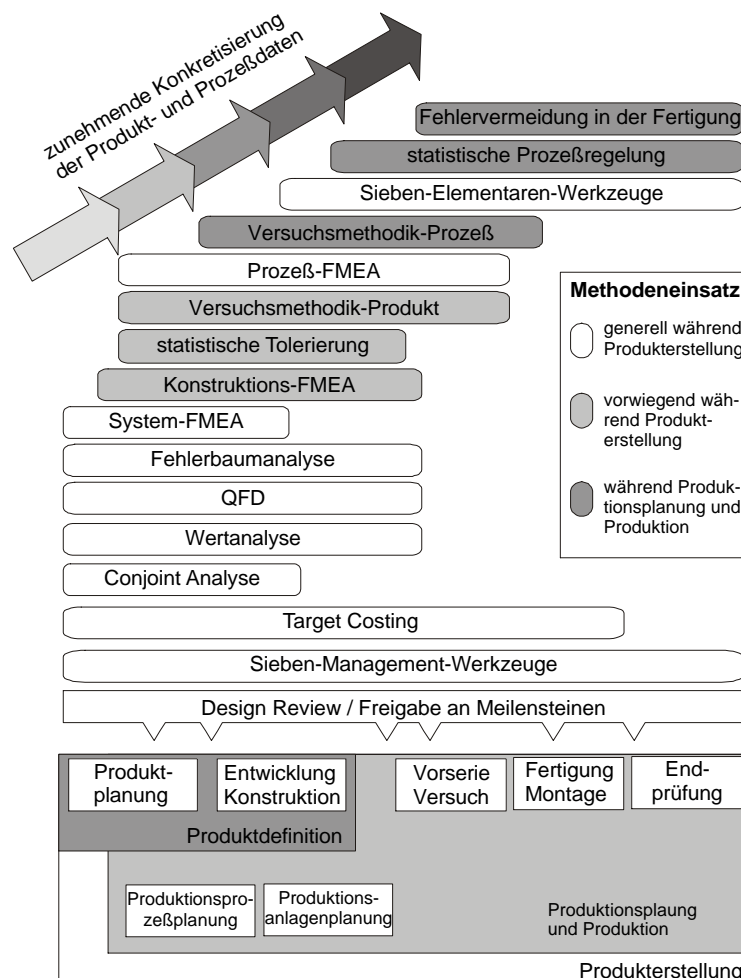


Abb. 3.1: Präventive Methoden innerhalb der Produktwertschöpfungskette (in Anlehnung an /REH96/)

Quality-Engineering-Methoden sind Instrumente, um Qualität gemäß deren Definition entwickeln, konstruieren und produzieren zu können. Weiterhin zielen sie darauf ab, Herstellkosten und die Qualitätsverlustkosten zu senken. Zusätzlich nehmen Projektmanagement, Teamarbeit und die praxisnahe Anwendung der Statistik eine tragende Rolle ein. Die QE-Methoden lassen sich grob in

- on-line
- und
- off-line

Methoden unterscheiden.

Als on-line gelten Methoden der direkten Prozeßregelung, wie z.B. SPC oder traditionelle Meß- und Prüftechniken. Methoden die off-line angewendet werden, gelten als präventiv wirksam. Dies sind z.B. QFD, FMEA oder DoE.

Nachfolgend werden die wichtigsten Methoden, die im Rahmen der QE-Methoden genannt werden, näher beschrieben¹. Ziel der Ausführungen ist es, einen kurzen Überblick über Sinn und Zweck der Methoden zu geben, nicht jedoch eine ausführliche Erklärung bzw. Beschreibung zu liefern. Eine Auswertung von Studien bezüglich des Einsatzes der QE-Methoden bildet den Abschluß dieser Betrachtungen.

3.1 Quality Function Deployment

Um die Transformation der Kundenforderungen in die unternehmensspezifischen Fähigkeiten effektiv und effizient zu realisieren, kann die Methode Quality Function Deployment (QFD) verwendet werden. Eingesetzt wird QFD dort, wo es gilt, interne oder externe Kundenanforderungen in die Entwicklung, Produktion oder Logistik, d.h. den gesamten Prozeß der Produktentstehung zu integrieren /DGQ01a/.

Das erste Konzept stammt von *Yoji Akao* aus dem Jahr 1966 /AKA78, AKA92/. Erfolgreich wird QFD seit den 70er Jahren in der japanischen Industrie praktiziert (u.a. bei Toyota) /KIN94/. Seit den 80er Jahren wird QFD auch in der US-amerikanischen Industrie (u.a. bei Ford, Kodak, Hewlett Packard) und seit den 90er Jahren auch in der deutschen Industrie angewendet. Der Begriff Quality Function Deployment ist aus der Fachliteratur nicht mehr wegzudenken und kann sinngemäß übersetzt werden als „*Instrument zur Planung und Entwicklung von Qualitätsfunktionen entsprechend der vom Kunden geforderten Qualitätseigenschaften*“ /DGQ01a/. Im weitesten Sinne kann man auch sagen, die „Stimme des Kunden“ in die „Sprache des Ingenieurs“ transferieren /GEI98/.

Ein wesentlicher Punkt bei QFD ist die strikte Trennung der Kundenanforderungen (Was?) von den technischen Lösungsmerkmalen (Wie?). Dies verhindert, daß ohne die Kundenanforderungen detailliert zu erfassen, sofort Produktmerkmale definiert werden /PFE00/. Mittels QFD werden schrittweise die Forderungen, die ein Kunde an ein Produkt hat, in

- technische Merkmale,
 - erforderliche Baugruppen,
 - Einzelteile
- und
- durchzuführende Prozesse

übersetzt, welches in *Abb. 3.2* dargestellt ist.

¹ Auf eine Kurzbeschreibung von DoE wird hier verzichtet, da sich die gesamte Publikation mit dem Thema befaßt.

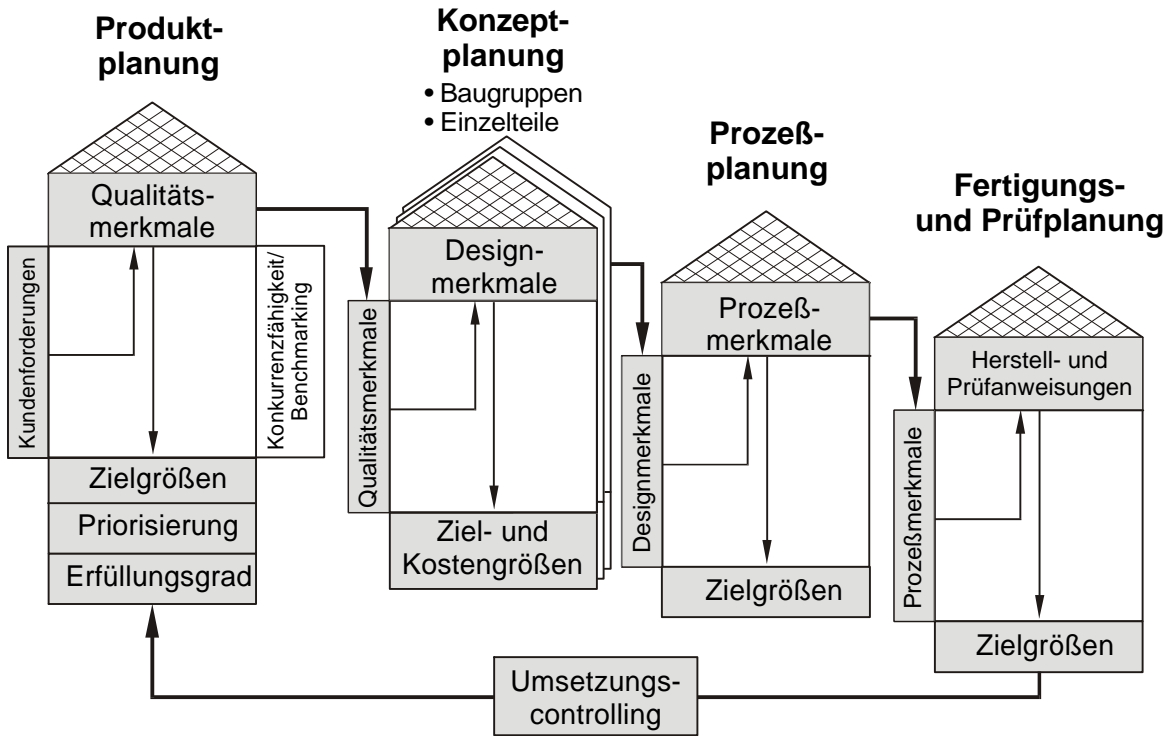


Abb. 3.2: Verknüpfung der QFD-Häuser /KLE99/

Als Hilfsmittel kommt das sogenannte „House of Quality“ (HoQ) zum Einsatz, das in Abb. 3.3 zu sehen ist und eine Kombination aus unterschiedlichen Matrizen, Listen und Tabellen darstellt.

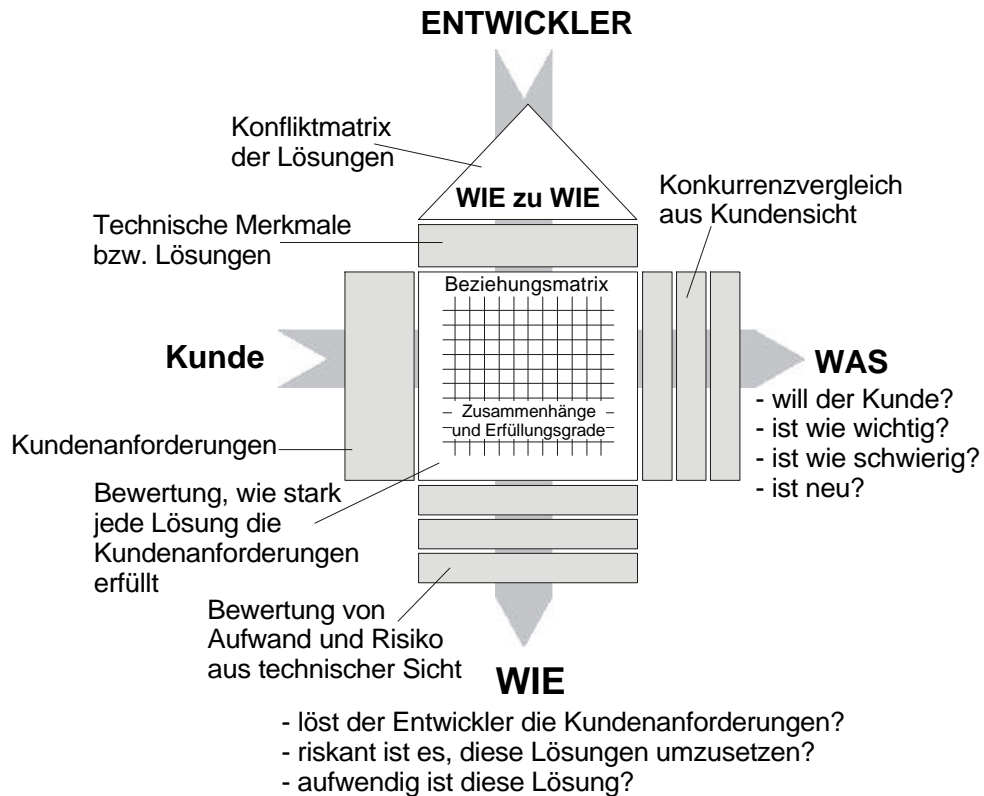


Abb. 3.3: House of Quality

Eine systematische Vorgehensweise wird erreicht, indem das HoQ fest definierte Bereiche aufweist. Es dient der Unterstützung der einzelnen Transformationsschritte innerhalb des QFD-Prozesses. Bei der Durchführung ist das HoQ eines der gängigsten Hilfsmittel. Durch gewichtete Relationen wird eine Verknüpfung der Inhalte der unterschiedlichen Matrizen und Tabellen erzielt, die die Umsetzung der Kundenforderungen in Qualitätsmerkmale sicherstellt und bewertet /PFE96/. Dieses Vorgehen läßt sich grob in die Schritte

- Kundenanforderungen ermitteln,
 - Qualitätsmerkmale ableiten,
 - Zielgrößen festlegen,
 - auf Wechselwirkungen prüfen
- sowie
- Produktbewertung (Benchmarking)

aufgliedern /KRU95/.

Ähnlich wie bei der FMEA, wird zur Ermittlung der Anforderungen und Lösungen ein interdisziplinäres und abteilungsübergreifendes Team empfohlen. Meistens wird ein neutraler QFD-Moderator eingesetzt, der auf die Einhaltung der QFD-Regeln achtet /PFE96/. Detaillierte Beschreibungen und Beispiele sind der einschlägigen Literatur wie z.B. /KIN94, AKA92, KLE99, DGQ01a/ zu entnehmen.

Anwendung findet QFD produktentwicklungsbegleitend von der Erfassung der Kundenforderungen (Marktforschung) bis hin zur Prozeßplanung /PFE00/.

3.2 Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse

Das ständig wachsende Sicherheitsbewußtsein des Kunden fordert im höchsten Maße abgesicherte Produkte. Um diesen Kundenbedürfnissen Rechnung zu tragen, sind Hersteller drauf angewiesen, ihren Prozeß zur Risikoabsicherung ständig zu optimieren /EDE02/. Mit der Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse (auch Failure Mode and Effect Analysis, kurz FMEA genannt) ist ein Werkzeug vorhanden, das hilft, durch präventive Überlegungen Fehler in frühen Phasen der Produktentwicklung und Prozeßplanung zu identifizieren und durch rechtzeitige Gegenmaßnahmen zu vermeiden. Entwickelt wurde die FMEA bereits in den 60er Jahren von der NASA im Rahmen des Apollo-Projektes. Andere Industriezweige, wie z.B. die Atomwirtschaft und die Automobilindustrie, haben die FMEA aufgegriffen. Daher findet die FMEA mittlerweile eine breite Anwendung /VDA04b/. In der QS 9000 sowie der VDA 6.1 wird die Anwendung der FMEA explizit von Lieferanten im Bereich der Automobilindustrie als vorbeugende Maßnahme gefordert.

Bei einem FMEA-Projekt, welches in fünf Stufen durchlaufen wird, werden alle kritischen Elemente innerhalb eines interdisziplinären, abteilungsübergreifenden Teams einer Analyse unterzogen. Damit ist sichergestellt, daß alle für eine fehlerfreie Produkterstellung relevanten Aspekte eine Berücksichtigung erfahren. Zu diesem Zweck wird ein Strukturbaum mit Systemelementen erstellt, dem Funktionen und alle möglichen Fehlfunktionen bzw. Fehlerursachen zugewiesen werden. Anschließend werden diese Daten in ein Formblatt übertragen und einer Risikoanalyse unterzogen. Weiterhin hilft die Erarbeitung von Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen der präventiven Fehlervermeidung /BLA02, DGQ01b, DIN25448/.

Fehlermöglichkeits - und Einflußanalyse									
■ System-FMEA Produkt					■ System-FMEA Prozess				
Typ / Modell / Fertigung / Charge:				Sach-Nr.:		Verantw.:		FMEA-NR.:	
System-Nr. / Systemelement:				Sach-Nr.:		Verantw.:		Seite von	
Funktion / Aufgabe:				Änderungsstand:		Firma:		Abt.:	
Mögliche Fehlerfolge	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursache	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	V / T
B = Bewertungszahl für die Bedeutung A = Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit E = Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit V = Verantwortlichkeit T = Termin für die Erledigung Risikopointszahl RPZ = B × A × E									

Abb. 3.4: FMEA-Formblatt

Je nach Aufgabenstellung lassen sich zwei FMEA-Arten unterscheiden:

- System-FMEA Produkt
- und
- System-FMEA Prozeß.

Die System-FMEA Produkt entstand aus einem Zusammenschluß der Konstruktions- und der System-FMEA, um einen besseren Überblick über das Gesamtsystem zu gewährleisten. Den Ursprung dabei findet die System-FMEA Produkt in der Entwicklungsphase eines Produktes und begleitet die Produktentwicklung bis hin zur Produktionsphase. Innerhalb ihres Einsatzgebietes beinhaltet die System-FMEA Produkt das Aufspüren von potentiellen Fehlfunktionen mit ihren zugehörigen Ursachen und Folgen im Hinblick auf das Gesamtprodukt.

Aus der „alten“ Prozeß-FMEA entstand die System-FMEA Prozeß, die im wesentlichen die gleiche inhaltliche Vorgehensweise wie die System-FMEA Produkt aufweist. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der weiterführenden Analyse der System-FMEA Produkt, um mögliche ungeplante Störfaktoren in der Herstellungskette offenzulegen. Dabei wird eine logische Struktur der Fehlerbetrachtung, beginnend mit der System-FMEA Produkt aufgebaut. Die Gliederung wird stufenweise von dem Produktionssystem über einzelne Prozeßschritte bis in die Auslegungsdaten von Fertigungseinrichtungen aufgeschlüsselt, um alle denkbaren Ursachen für eine Fehlfunktion zu identifizieren /DGQ01b/.

Das Einsatzspektrum der FMEA erstreckt sich von der Entwicklung über den Produktionsbeginn bis in die Produktion, um objektive und subjektive Kundenqualität mit möglichst wenigen Fehler zu erreichen /BUR01/.

3.3 Fehlerbaumanalyse

Die Fehlerbaumanalyse (auch Failure Tree Analysis, kurz FTA oder FBA genannt) verfolgt das Ziel, eine abgesicherte Aussage über das Verhalten eines Systems hinsichtlich des Auftretens eines zu definierenden Fehlers zu machen. Insbesondere wird dabei eine Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit angestrebt /PFE96/. Weiterhin dient sie zur systematischen Suche nach allen möglichen Ursachen für einen vorgegebenen Fehler /DIN25424a-b/. Dazu wird eine Systemanalyse durchlaufen, auf deren Basis ein Fehlerbaum erstellt wird /PFE96/.

Bei der Aufstellung des Fehlerbaums ist darauf zu achten, daß ein Team von Kunden und Mitarbeitern aus Entwicklung, Fertigung und Service involviert ist, um die Fehlerfolge möglichst exakt darzustellen. Dies wird solange durchgeführt, bis in allen Fehlerbaumzweigen nur noch Basisereignisse vorkommen. Die anschließende Bewertung bzw. Auswertung geschieht dann qualitativ (mathematische Berechnung der Zuverlässigkeitskenngrößen) /BUR01/.

3.4 Statistical Process Control

Bereits 1924 formulierte der Amerikaner *Walter Andrew Shewart* (* 1891 - † 1967) die Idee, eine Prozeßlenkung auf Basis von Stichprobenergebnissen durchzuführen /SHE31/. Umsetzung fand diese Idee in der Qualitätsregelkartentechnik (QRK). Im industriellen Bereich wird die statistische Prozeßkontrolle als wesentliches Hilfsmittel zur Qualitätssicherung angesehen. Mittels Verfahren, die auf Stichproben basieren, kann die Robustheit einer Produktion nachgewiesen werden

Im Rahmen der statistischen Prozeßregelung (Statistical Process Control, kurz SPC) sind die Qualitätsregelkarten die wichtigsten Werkzeuge und finden sowohl bei der Prozeßanalyse als auch bei der Prozeßregelung in der Serienphase Anwendung, um das Niveau von Qualitätsmerkmalen auf bestimmten Sollwerten oder innerhalb definierter Toleranzgrenzen zu halten /DGQ90a, DGQ90b/.

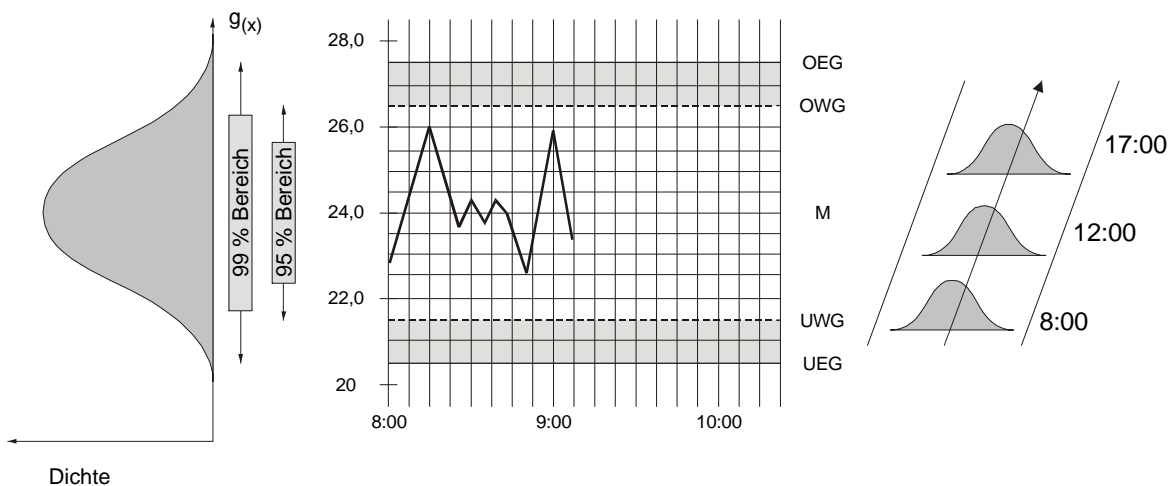


Abb. 3.5: Qualitätsregelkarte

Regelkarten stellen dabei die Ergebnisse über Mittelwert/Spannweite oder Mittelwert/Standardabweichung grafisch dar /DIE98/. Durch Warn- und Eingriffsgrenzen findet dementsprechend eine Beurteilung des Prozeßzustandes statt. Weiterhin gibt es zur Beurteilung sogenannte Maschinen- und Prozeßfähigkeitsindizes, die die Robustheit der Produktion am geprüften Qualitätsmerkmal beschreiben. Mit den Maschinenfähigkeitsindizes (capability machine) wird auf Basis von 50 aufeinanderfolgend produzierten Teilen eine Beurteilung der Fertigungsmittel ausgedrückt:

$$c_m = \frac{\text{oberer Grenzwert} - \text{unterer Grenzwert}}{\text{Maschinenstreuung}} = \frac{T_o - T_u}{6\sigma} \quad (3.1)$$

und

$$c_{mk} = \frac{\text{min. Abstand von } \mu \text{ zu Toleranzgrenze}}{\text{halbe Maschinenstreuung}} = \min\left(\frac{T_o - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - T_u}{3\sigma}\right). \quad (3.2)$$

Neben der Streuung berücksichtigt der Index c_{mk} auch die Lage des Mittelwertes im Toleranzband /DGQ90a, DGQ90b/. Bei der Serienproduktion erfolgt die Beurteilung anhand des Prozeßfähigkeitsindizes (capability process):

$$c_p = \frac{\text{oberer Grenzwert} - \text{unterer Grenzwert}}{\text{Prozeßstreuung}} = \frac{T_o - T_u}{6\sigma} \quad (3.3)$$

und

$$c_{pk} = \frac{\text{min. Abstand von } \mu \text{ zu Toleranzgrenze}}{\text{halbe Prozeßstreuung}} = \min\left(\frac{T_o - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - T_u}{3\sigma}\right). \quad (3.4)$$

Mindestanforderungen, die an diese Fähigkeitsindizes gestellt werden, lauten /DGQ90a, DGQ90b, DGQ95/:

$$c_{mk} > 1,66$$

und

$$c_{pk} > 1,33.$$

Qualitätsregelkarten (QRK) lassen sich auf alle Arten von Merkmalen (z.B. Gewicht, Länge, usw.) und somit auch auf alle Prozeßarten (z.B. Industrie, Verwaltung, usw.) anwenden. Hierzu wird ein „on-line“ Regelkreis aus

- Fertigung,
 - Prüfung,
 - Analyse
- und
- Rückkopplung

in dem Prozeß realisiert.

Anhand der Rückkopplung ist es möglich, Rückschlüsse auf die Qualität der laufenden Fertigung zu ziehen und regelnd in den Prozeß einzugreifen.

Als Ziel bei SPC kann das frühzeitige Erkennen von systematischen Abweichungen im Fertigungsprozeß angesehen werden. Voraussetzung, die dazu erfüllt sein müssen, lauten:

- fähiger und beherrschter Fertigungsprozeß,
 - meß- und regelbare Prozeßparameter,
 - ausreichendes Prozeßwissen zur Beseitigung qualitätskritischer Einflüsse,
 - ausreichend hohe Stückzahlen
- sowie
- kurze Reaktionszeit zwischen Auswertung und Regelung /REH96/.

3.5 Conjoint Analyse

Die Conjoint Analyse ist eine Methode, die das Ziel verfolgt, Kundenwünsche zu ermitteln. Wichtig ist dies, da Kunden heute nur bereit sind Produkteigenschaften zu honorieren, die sie auch wahrnehmen bzw. ihre Bedürfnisse erfüllen. Daher ist es unabdingbar, bei Produktneuentwicklungen oder –weiterentwicklungen diese Wünsche zu respektieren und dementsprechend auszulegen. Nicht nur der Kundennutzen, sondern auch einzelne Produkteigenschaften sind somit analysierbar. Weiterhin besteht noch die Möglichkeit, den Preis zu ermitteln, den der Kunde bereit ist, für das Produkt zu bezahlen.

Umgesetzt wird die Analyse mit faktoriellen Versuchsplänen, die aus Produktbeschreibenden Merkmalen und ihren Ausprägungen gebildet werden. Potentielle Käufer beurteilen diese konstruierten Kombinationen hinsichtlich bestimmter Kriterien, wie z.B. Kaufeignung, etc. Zur anschließenden Ergebnisauswertung werden varianz- bzw. regressionsanalytische Verfahren herangezogen. Mittels dieser Verfahren sollen die Beiträge einzelner Merkmalsausprägungen zur Gesamtbeurteilung ermittelt werden.

Hauptsächliche Einsatzgebiete für die Conjoint Analyse ergeben sich in den frühen Entwicklungsphasen, vor allem im Bereich der Marktforschung /PFE00/.

3.6 Target Costing

Heutiges Kosten- und Preismanagement muß sich an den Bedürfnissen der Kunden orientieren, d.h. die Preisorientierung hat sich konsequent am Markt auszurichten. Dieser Ansatz wird mit der Methode Target Costing, dem sogenannten Zielkostenmanagement, verfolgt. Die Frage: „Was darf unser Produkt kosten?“ rückt dabei in den Mittelpunkt der Betrachtung bzw. Analyse /BGG95/. Um die Vorgaben des Marktes in ein Produkt umzusetzen, ist ein Team aus den Bereichen Marketing, Vertrieb, Entwicklung und Konstruktion, Produktion sowie dem Controlling zu bilden.

Im wesentlichen sollen mit Target Costing drei Ziele verfolgt bzw. betrachtet werden /PFE00/:

- 1.) Ermittlung von Zielkosten für das Gesamtprodukt und seine Einzelteile.
- 2.) Entwicklung von Maßnahmen, die das Erreichen der Zielkosten ermöglichen.
- 3.) Überwachung der Zielkosten.

Target Costing ist entwicklungsbegleitend von der Marktforschung bis zur Fertigung einsetzbar.

3.7 Wertanalyse

Die Wertanalyse ist eine praxiserprobte Methode zur Steigerung des Wertes von

- Produkten,
 - Leistungen
- und
- Abläufen.

Entwickelt wurde die Wertanalyse von *Larry D. Miles* in den 40er Jahren zur Analyse und Lösung komplexer Probleme und Aufgabenstellungen. Im speziellen findet sie Anwendung zur Funktionsverbesserung und Kostensenkung bei Produkten sowie im Gesamtkostenbereich.

Innerhalb eines Wertanalyseprojektes erfolgt eine Funktionsanalyse, die einzelne Produktfunktionen einer Kosten/Nutzen-Analyse unterzieht. Hintergrund ist dabei, daß der Kunde nur bereit ist, für Funktionen zu zahlen, die für ihn einen Nutzen bringen.

Auch bei dieser Methode wird in einem interdisziplinären Team gearbeitet. Mittels Kreativitätstechniken werden neue Lösungen kreiert, die bei der Analyse durch ein negatives Kosten/Nutzen-Verhältnis auffallen /PFE00/. Weitere Einzelheiten zur Wertanalyse sind den Literaturstellen /DIN69910, VDI2800, VDI2801/ zu entnehmen.

Zum Einsatz eignet sich die Wertanalyse besonders im Rahmen der Produktentwicklung, um aus Kundensicht die vorhandenen Produktkonzepte unter wertmäßigen Gesichtspunkten zu analysieren und zu bewerten /PFE00/.

3.8 Statistische Tolerierung

Im Bereich der Fertigung sind Maßabweichungen trotz immer besser werdender Fertigungsverfahren unvermeidbar. Bei Konstruktionen wird diese Tatsache durch die Angabe von Toleranzbereichen berücksichtigt. Zu beachten ist hierbei, daß zu enge Toleranzbereiche Produktionskosten unnötig steigern /PFE00/.

Für den Konstrukteur ist mit der Methode der statistischen Tolerierung ein Werkzeug vorhanden, welches hilft, sinnvolle Festlegungen der Toleranzbereiche zu ermöglichen. Um dies zu gewährleisten, wird die statistische Verteilung der Prozeßergebnisse mit berücksichtigt. Mehrgliedrige Toleranzketten lassen sich z.B. aus einzelnen Toleranzen bilden. Damit ist eine Senkung der Herstellkosten möglich.

Wenn die notwendigen Fertigungsinformationen beim Konstrukteur vorliegen, kann dieser Toleranzen festlegen, die sowohl die eigne Fertigung als auch die Kundenwünsche berücksichtigen /PFE96/.

Das Einsatzspektrum hinsichtlich statistischer Tolerierung ist von der Produktentwicklung bis zur Prozeßplanung gegeben /PFE00/.

3.9 Hilfsmittel des Qualitätsmanagements

In der Diskussion um die sogenannten Qualitätstechniken tauchen immer wieder die Begriffe „Sieben-Elementare-Qualitätswerkzeuge“ (Seven-Elementary-Tools) und „Management-Werkzeuge der Qualitätssicherung“ (New-Seven-Tools for Quality Control) auf /GOG94, THE96/.

Bei den Sieben-Elementaren-Qualitätswerkzeugen² (Q7) handelt es sich um einfache Techniken, die den Problemlösungs- und Lösungsprozeß (Plan-Do-Act-Check, kurz PDAC) wirksam unterstützen /KAS95a/. Ursprünglich wurden sie von dem Japaner *Ishikawa*³ zur Anwendung in Qualitätszirkeln⁴ zusammengestellt. Teilweise sind die einzelnen Methoden nämlich schon seit Jahrzehnten bekannt oder aus anderen Wissensgebieten übernommen worden.

Der Einsatz der Q7 eignet sich besonders dann, wenn alle Daten verfügbar sind und analysiert werden müssen, d.h. sie stellen eine methodische Hilfe zur Strukturierung und Visualisierung dar /PFE96/. Das Anwendungsfeld der Q7 läßt sich in

- Fehlererfassung
und
- Fehleranalyse

unterteilen.

Die Gruppe der Fehlererfassung umfaßt

- Fehlersammelliste,
- Histogramm
und
- Qualitätsregelkarte.

Bei der Fehlersammelliste handelt es sich um ein Instrument, mit dem das Auffinden von Fehlerarten und deren Häufigkeit möglich ist. Diese Häufigkeit läßt sich anschließend mit dem Histogramm grafisch veranschaulichen, d.h. es erfolgt eine Darstellung der Fehlermenge bezogen auf die Fehlerart.

² Die Sieben-Elementaren-Qualitätswerkzeuge werden auch als sieben statistische Werkzeuge bezeichnet.

³ Der Japaner *Kaoru Ishikawa* (* 1915 - † 1989) entwickelte eine Vielzahl von Qualitätswerkzeugen. Das bekanntest ist das sogenannte Fischgräten-Diagramm, das auch unter dem Namen Ishikawa-Diagramm bekannt ist.

⁴ Unter einem Qualitätszirkel ist eine kleine Mitarbeitergruppe zu verstehen, die sich regelmäßig, z.B. wöchentlich in der Arbeitszeit trifft, um Problembereiche oder Schwachstellen zu besprechen. Ziel ist eine Verbesserung der Produkt- und Arbeitsqualität unter Ausnutzung des Wissens der Teilnehmer /TIM96/.

Qualitätsregelkarten stellen ein Werkzeug dar, um Kenn- und Meßwerte nach stichprobenartigen Kontrollen zu erfassen und bei einer Überschreitung einen Eingriff in den Prozeß zu erwirken (siehe auch *Kapitel 3.4*).

Der Gruppe Fehleranalyse werden

- Ursache-Wirkungs-Diagramm,
 - Pareto⁵-Diagramm,
 - Korrelationsdiagramm
- und
- Verlaufs-Diagramm

zugeordnet.

Mit dem Ursache-Wirkungs-Diagramm wird eine Analyse durchgeführt, um einen Sachverhalt in Form einer definierten Wirkung nach seinen Ursachen zu klären. Das Pareto-Diagramm visualisiert die wichtigsten und kostenintensivsten Fehlerquellen aus unterschiedlichen Fehlerbereichen in einem Balkendiagramm fallend nach Prioritätsanteilen. Anhand von Korrelationsdiagrammen wird die Abhängigkeit zweier Einflußgrößen veranschaulicht. Um Verläufe und Zusammenhänge aufzuzeigen, wird das Verlaufs-Diagramm herangezogen /GOG94, THE96/.

Ein Überblick bezüglich des Zusammenwirkens der Werkzeuge ist in *Abb. 3.6*. zu sehen.

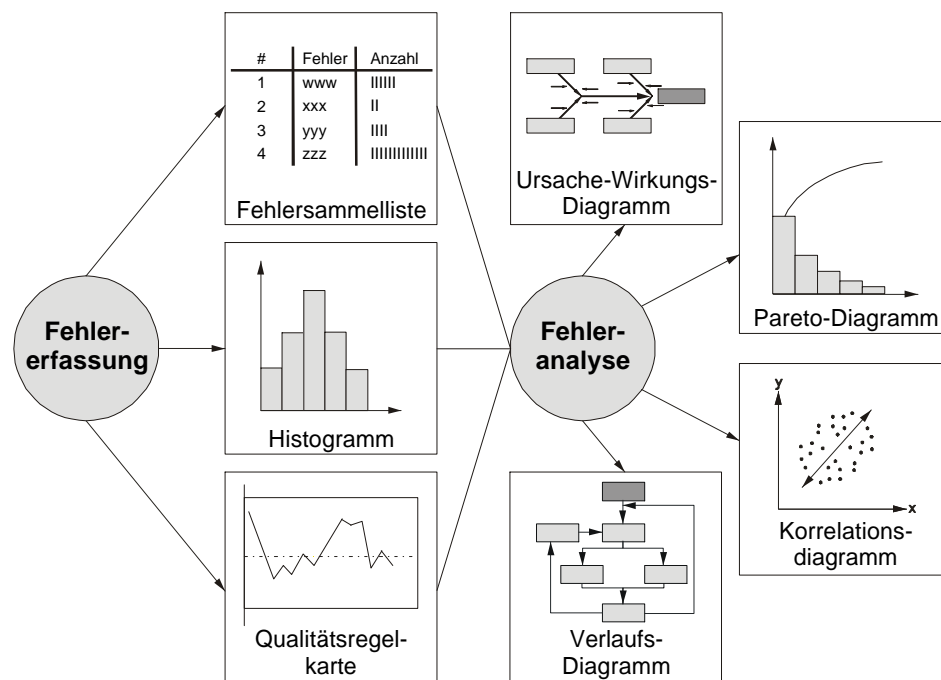


Abb. 3.6: Zusammenwirken der Q7 /THE96/

Mitte der 70er Jahre hat ein Ausschuß der Japanese Union of Scientist and Engineers (JUSE) aus zahlreichen und einschlägigen Techniken die Sieben-Management-Werkzeuge (M7) abgeleitet bzw. zusammengestellt /NAY86/.

⁵ Der italienische Nationalökonom *Vilfredo Pareto* (* 1848 - † 1923) entwickelte das Pareto-Prinzip, welches besagt, daß 80 % der Wirkungen auf 20 % der Ursachen zurückzuführen sind.

Die M7 sind eine Zusammenstellung von Werkzeugen, die einen Problemlösungsprozeß durch die Veranschaulichung und Aufgliederung von Informationen unterstützt. Im Gegensatz zu den Q7 dienen die M7 nicht zur Untersuchung von numerischen Daten, sondern zur Analyse von „verbalen Daten“. Ihr Anwendungsspektrum läßt sich in die Bereiche

- Datenanalyse,
- Lösungs- und Entscheidungsfindung
sowie
- Lösungsumsetzung

aufgliedern.

Zur Datenanalyse eignen sich die Werkzeuge

- Affinitätsdiagramm
sowie
- Relationendiagramm.

Beim Affinitätsdiagramm wird durch Gruppierung und Zuordnung von Oberbegriffen zu einzelnen Gruppen Ordnung in die vorhandenen Ideen, Meinungen und Informationen gebracht. Wechselbeziehungen zwischen unterschiedlichen Argumenten und Sichtweisen lassen sich mit dem Relationendiagramm aufzeigen. Dabei werden wichtige Ursache-Wirkungs-Beziehungen ebenfalls verdeutlicht.

Für die Lösungs- und Entscheidungsfindung ist das

- Baumdiagramm,
- Matrixdiagramm
und
- Portfoliodiagramm

entwickelt worden.

Ein Thema, Ziel oder Problem wird durch das Baumdiagramm in verschiedenen Ebenen gegliedert, wobei die Genauigkeit der Gliederung und Beschreibung mit jeder Ebene zunimmt. Verschiedene Dimensionen eines Themas werden unter Zuhilfenahme des Matrixdiagramms miteinander verglichen. Hierbei werden Merkmale in jeder Dimension aufgezählt, zwischen denen Wechselwirkungen bestehen, die sich dann bewerten lassen. Verdichten von Informationen und grafische Darstellung dieser nach zwei oder drei Kategorien ermöglicht schließlich die Portfolio- oder Matrix-Datenanalyse.

Im Bereich der Lösungsumsetzung sind die Werkzeuge

- Netzplan
und
- Problementscheidungsplan

angesiedelt.

Der Netzplan zeigt, wie einzelne Projektschritte logisch miteinander verknüpft sind, so daß kritische Punkte deutlich werden. Weiterhin ist der zeitliche Ablauf ersichtlich. Um mögliche Schwierigkeiten eines Lösungsansatzes im Voraus zu berücksichtigen, eignet sich die Anwendung des Problem-Entscheidungsplan. Dieser hält geeignete Gegenmaßnahmen in einem Flow-Chart bereit, welches mit einer positiven Lösung abschließt /BRU97, GOG94, THE96, PFE96/.

Abb. 3.7 zeigt abschließend, wie die M7 aufbauend anzuwenden sind.

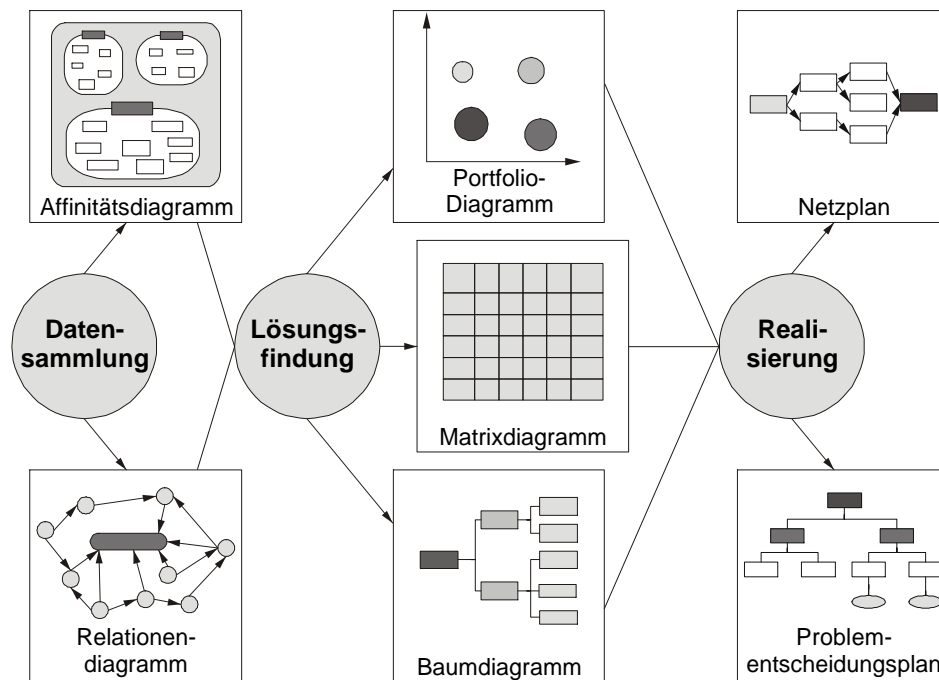


Abb. 3.7: Zusammenwirken der M7 /THE96/

3.10 Einsatzspektrum von Quality-Engineering-Methoden

Das Einsatzspektrum der präventiven Quality-Engineering-Methoden ist recht vielfältig. Den positiven Faktoren lassen sich, wie fast immer, negative Faktoren gegenüberstellen. Um der Frage nach der Anwendbarkeit sowie dem Nutzen bzw. des Verbesserungspotential, der Kosteneffizienz und anderen Charakteristiken nachzugehen, wurden in den letzten Jahren einige Studien zum Themenspektrum „präventive QE-Methoden“ angefertigt /LES01, PFE00a, ZIS00, RED99, FRH99, CZE97, KAS95a, KAS95b, TVE95, KRU95/.

Auf diesen Daten und Aussagen beruhend, zeigt Abb. 3.8 die wohl bedeutendsten und verbreitetsten Qualitätsmethoden bezüglich ihres Einsatzspektrums zur Kostensenkung, Qualitätsverbesserung, Zeiteinsparung sowie den Humanfaktoren.

Aus der Abb. 3.8 ist ersichtlich, daß „DoE“ ein hohes Zeiteinsparungspotential sowie ein mittleres Verbesserungs- und Kostensenkungspotential aufweist. Auch die anderen drei aufgeführten Methoden weisen je nach Aufgabenschwerpunkt hohe bis mittlere Potential auf. Die Quintessenz daraus lautet, daß ein umfassendes System der Qualitätsplanung eines Unternehmens für die Bereiche der Serienfertigung und besonders für die Entwicklungsphasen unverzichtbar die Komponenten QFD, FMEA, DoE und SPC beinhalten sollte.

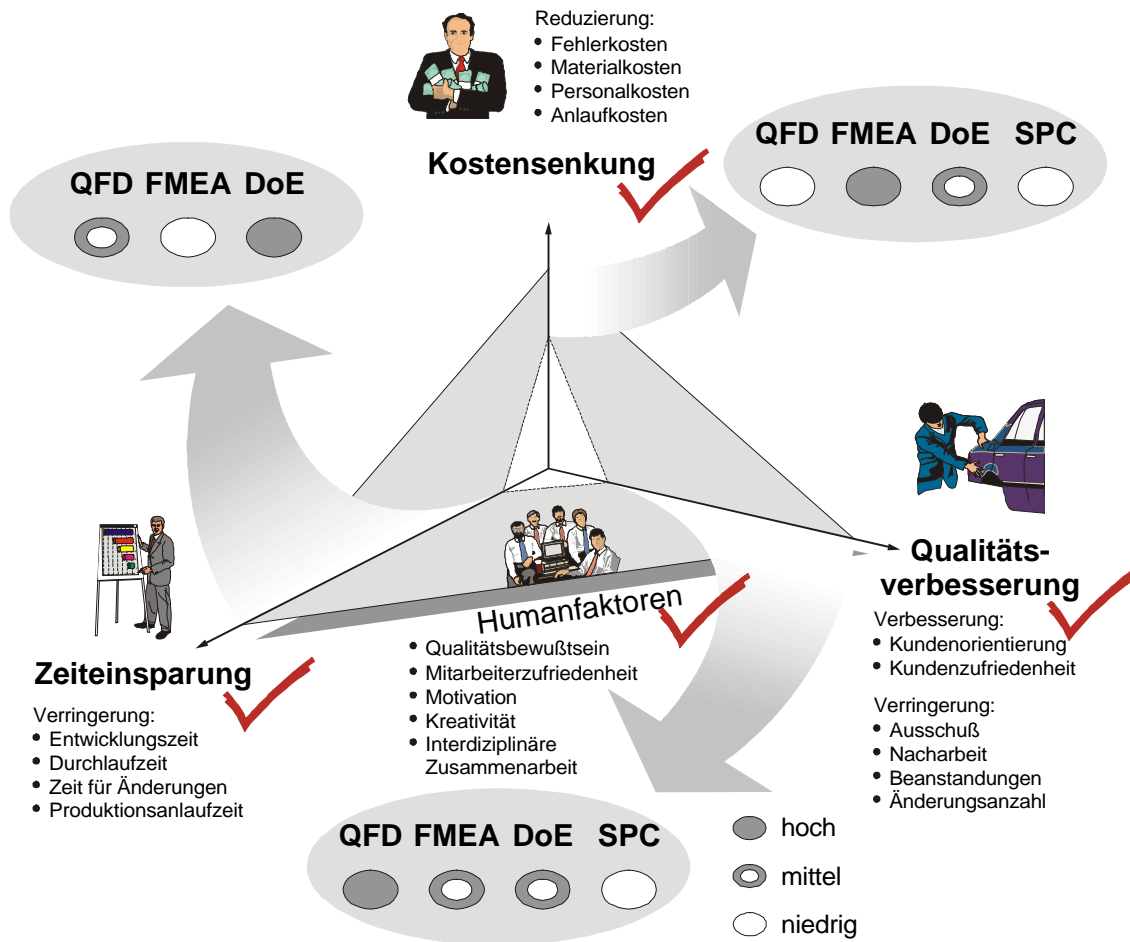


Abb. 3.8: Qualitätsmethoden im Spannungsfeld des Dreiecks „Qualität-Zeit-Kosten“

Nachfolgend wird die statistische Versuchsplanung in all ihren Facetten beschrieben. Das Vorgehen bei der Anwendung der statistischen Versuchsplanung wird dann anschließend behandelt.

4 Grundlegendes zur statistischen Versuchsplanung

4.1 Historische Entwicklung

Zurückblickend kann die historische Entwicklungsgeschichte der Versuchsplanung bis in die frühexperimentellen Untersuchungen naturphilosophischer Art durch griechisch-ionische Philosophen in Kleinasien verfolgt werden.

Bereits 1450 erkannte der Mathematiker *N. Cusanus* (* 1401 - † 1464) die Bedeutung quantitativer Untersuchungen für die Naturwissenschaft und hielt dies in seiner Schrift „*Idiota de staticis experimentis*“ (Versuche mit der Waage) fest /INT1/.

Im Bereich der experimentellen Forschung hingegen wurden primär Methodentheorien durch so bekannte Forscher wie *Galilei Galileo* (* 1564 - † 1642), *Francis Bacon* (* 1561 - † 1626) oder *René Descartes* (* 1596 - † 1650) entwickelt /KLO76, DNG52, PAR66/.

Diese angesprochenen wissenschaftlichen Methoden lassen sich im wesentlichen als induktive Verfahren bezeichnen. Dabei versucht der Experimentator von Einzelbeobachtungen zu allgemeinen Schlüssen zu gelangen.

Bacon war es, der die These vertrat, daß sich wissenschaftliche Erkenntnisse auf Beobachtungen und Experimente stützen müssen /FSC01/. Ein wahrer Wissenschaftler beobachtet seine Umgebung, stellt dementsprechend Hypothese auf und überprüft diese durch Versuche /MAC99/.

Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts wurden die Prozesse physikalischer Natur, die von einer geringen Variablenanzahl gekennzeichnet waren, mit Hilfe des „Ein-Faktor-Experiments“ sowie des „*ceteris paribus*“-Grundsatzes (alle übrigen Bedingungen werden konstant gehalten) untersucht. Diese Methode ist auch unter dem Namen „One-Factor-at-a-Time“ bekannt und sagt aus: „*Wenn in einem Experiment ein einzelner Faktor geändert wird und einen Effekt produziert, sonst alle anderen Faktoren und Randbedingungen konstant bleiben, dann ist der veränderte Faktor die Ursache des beobachteten Effektes*“ /WEK96/.

Als theoretischer Begründer der „neuzeitlichen“ Versuchsplanung kann *John Stuart Mill* (* 1806 - † 1873) genannt werden /PAR66/. Unter Verwendung der mathematischen Statistik können seitdem zunehmend komplexere und umfangreichere Systeme mit einer Vielzahl an Variableneinflüssen und zusätzlich auftretenden Störgrößen mit vergleichbaren Experimenten analysiert werden /HOL95/. Diese Methode blieb lange Zeit ein Dogma, ehe die Ära der „klassischen“ Versuchsplanung begann.

Einer der ersten Artikel, der sich mit der statistischen Versuchsplanung befaßte, die später durch *Fisher* populär wurde, ist auf *K. Smith* zurückzuführen und trägt den Titel „*On the Standard Deviations of Adjusted and Interpolated Values of an Observed Polynomial Function and its Constant and the Guidance they give towards a Proper choice of the Distribution of Observations*“ /SMI18/. Inhalt dieses Artikels ist die quantitative Bestimmung der Varianzeigenschaften von Versuchsplänen /SCH97/.

Die wichtigsten Ansätze allerdings, die das Bild der „klassischen“ Versuchsplanung prägen sollten, stammen von dem englischen Statistiker und Wissenschaftler *Sir Ronald Aylmer Fisher* (* 1890 - † 1962), der das renommierte Agricultural Field Laboratorium in Rothamsted (Großbritannien) leitete.

Er entwickelte die wesentlichen Grundsätze der faktoriellen Versuche, um eine Ertragssteigerung in der Landwirtschaft zu erreichen. Erstmals wurde 1924 dann ein Versuchsplan nach seinen Prinzipien angewendet /PFE97/. In diesem Zusammenhang wurde die Technik der Datenanalyse, die sogenannte Varianzanalyse (ANOVA) konzipiert /PHA89/. Dank seiner Untersuchungen wurden die Versuchsanordnungen einfacher und übersichtlicher. 1925 brachte *Fisher* das Buch „*Statistical Methods for Reserach Workers*“ /FIS25/ heraus, ehe er zehn Jahre später das Grundlagenwerk zur Versuchsplanung „*The Design of Experiments*“ /FIS35/ fertig stellte.

In diesem Grundlagenwerk machte er deutlich, daß die zuvor propagierte „One-Factor-at-a-Time“-Methode zumeist für die Forschung unzureichend ist, da die Problematik von Wechselwirkungen damit nicht erfaßbar ist. So zeigte *Fisher*, daß mit seinen mehrfaktoriellen Ansätzen bei gleichbleibendem Aufwand sogar genauere Ergebnisse ermittelt werden können.

L. H. C. Tippett, ein Mitarbeiter *Fishers*, benutzte bereits im Jahr 1934 hochgradig unvollständige faktorielle Anwendungen, ehe 1937 das grundlegende Werk zu diesem Thema „*Design and Anlysis of Factorial Experiments*“ von *F. Yates* erschien.

Plackett und *Burman* /PLA46/ leiteten um 1946 hochvermengte Versuchspläne aus unvollständig balancierten Plänen ab, die von verschiedenen Autoren /LAN77, DRA92/ zum Aussieben von Variablen empfohlen wurden.

Anwendungen außerhalb der Landwirtschaft wurden von *George E. P. Box*, *K. B. Wilson*, *J. S. Hunter* und *O. L. Davies* etwa im Zeitraum von 1950 bis 1960 vorgeschlagen. Insbesondere von der chemischen Industrie wurden die Faktorenpläne erster und zweiter Ordnung für Forschungszwecke benutzt /COC50, KEM52, DAV54, FED55/.

In der Publikation „*On the Experimental Attainment of Optimal Conditions*“ beschrieben *Box* und *Wilson* zum ersten Mal, wie die Antwort- und Wirkungsflächen mit der Versuchsplanung untersucht werden können. Es handelte sich hierbei um Versuchspläne für Optimierungsaufgaben /BOX51/.

Ein großer Teil der Ideen der optimalen Versuchsplanung geht auf die Arbeiten von *Jack Carl Kiefer* (* 1924 - † 1981) zurück. Zusammen mit *Jacob Wolfowitz* (* 1910 - † 1981) entwickelte er z.B. das *Kiefer-Wolfowitz*-Theorem für G- und D-Optimale Pläne, welches der Abhandlung „*The Equivalence of two Extremum Problems*“ zu entnehmen ist. Daher kann *Jack Carl Kiefer* auch als Begründer der D-Optimalen Pläne /KIE59/ genannt werden.

Versuchspläne speziell für Mischungen, die sogenannten Mixture-Designs, sind ein weiteres Untergebiet der statistischen Versuchsplanung. Im Jahre 1953 wurde diese Art Versuchspläne zum ersten Mal in einer wissenschaftlichen Arbeit von *M. H. Quenouille* mit dem Titel „*The Design and Anlysis of Experiments*“ behandelt.

Die Bearbeitung von Mischungsversuchen mit Hilfe von Simplex-Konstruktionen für drei Komponenten erläuterte *P. J. Claringbold* 1955 in seinem Artikel „*Use of the simplex design in the study of the joint action of related hormones*“ /COR90a/.

Mit dem Werk „*Experiments with mixtures*“ jedoch erschien 1958 die grundlegende Arbeit von *H. Scheffé* (* 1907 - † 1977), die sich mit der Untersuchung von Mehrkomponentensystemen befaßte /SCF58/.

In diesem Werk führte *Scheffé* die Standard-Simplex-Konstruktion und das mathematische Regressionsmodell zur Berechnung von Mischungsplänen detailliert auf. Hierin übernahm er auch weitere Anregungen aus der Literatur, z.B. die Ideen von *G. W. Gibbs* zur Darstellung von Mehrkomponentensystemen in Zusammensetzungs-Eigenschafts-Diagrammen sowie die *Gibbs'schen* Dreieckskoordinaten für ein ternäres¹ System. Ebenso übernahm er den Gedanken von *N. S. Kirnakov* von 1940, daß die Zusammensetzung eines *k*-dimensionalen Systems durch ein (*k*-1)-dimensionalen Versuchsraum, dem sogenannten Simplex, gegeben ist.

1963 erschien von *Scheffé* der Artikel „*The simplex-centroid design for experiments with mixtures*“, in dem er zum ersten Mal eine Alternative zur Standard-Simplex-Konstruktion aufführte. Den Bereich der Pseudokomponenten für die Pseudo-Simplex-Konstruktion definierte *L. S. Kurotori* 1966 in seinem Artikel „*Experiments with mixtures of components having lower bounds*“ /SCH97, COR90a/.

Eine sehr umfangreiche und ausführliche Darstellung des Themenkomplexes „*Mixture-Designs*“ ist dem Buch von *J. A. Cornell* (* 1941) /COR90a/ mit dem Titel „*Experiments with mixtures*“ zu entnehmen. Es ist sozusagen als ein Standardwerk für die Durchführung und Auswertung von Mischungsversuchen anzusehen. In der deutschsprachigen Literatur sind nur wenige Veröffentlichungen bezüglich der Mischungspläne zu finden /PET91b, SCH97, BRA94, BRA95/.

Nach dem Zweiten Weltkrieg und dem damit verbundenen Informationstransfer (Know-how) wurde die Idee der konventionellen Versuchsplanung von Amerika nach Japan exportiert. Dort wurde sie aufgegriffen und in die industrielle Forschung und Entwicklung integriert /HOL95/. Vor allem *Genichi Taguchi* (* 1924) trug entscheidend zur Weiterentwicklung bei.

Seine Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Versuchsplanung in den 50er und 60er Jahren wurden 1962 mit dem Deming Award, eine der höchsten Auszeichnungen im Qualitätsbereich, gewürdigt /KLE02/. *Taguchi* generierte eine Qualitätsphilosophie, die durch Umsetzung in eine Verlustfunktion dem Management näher gebracht wurde. Mit dieser Umsetzung trug er zur wesentlichen Verbreitung der Methode bei.

Durch den Erfolg in Japan wurde die westliche Welt auf die Versuchsplanung aufmerksam /HOL95/. In den 80er Jahren wurden seine Ideen und Methoden erstmals in den USA bei AT&T Bell Laboratories, FORD Motor Company und der XEROY Corporation angewandt /KLE02/. Seit 1982 verbreitete sich die *Taguchi*-Methode durch das American Supplier Institut in den USA /INT2/. Es entstand ein Methodenstreit zwischen den Anhängern der konventionellen Versuchsplanung und der *Taguchi*-Methodik.

¹ Aus drei Stoffen bestehendes System.

Dieser Methodenstreit wurde durch die Forschungen von *Dorian Shainin* (* 1914 - † 2000) noch weiter unterstützt. Seit den 70er Jahre existieren durch ihn weitere Verfahren, mit dessen Hilfe Qualitätsprobleme bei industriell produzierten Produkten gelöst werden können. Die nach ihm benannten „*Shainin-Methoden*“ stellen einen praktischen „Werkzeugkasten“ dar, mit dessen Hilfe es möglich ist, schwerwiegende Problem zu lösen. Seine Techniken werden vor allem in den USA in den Bereichen Produktentwicklung, Qualitätsverbesserung sowie Forschung und Entwicklung eingesetzt /INT3/.

In Europa sind die Methoden von *Taguchi* und *Shainin* erst spät, nämlich Ende der 80er Jahre, bekannt geworden. Nur große Unternehmen leisten sich einen Entwicklungsstab, der mit der Versuchsplanung und den Verfahren nach *Taguchi* und *Shainin* vertraut ist.

Auch aus den sowjetischen Gebieten wurden in der zweiten Hälfte der 60er Jahre Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Versuchsplanung bekannt. In diesem Zusammenhang wurde immer wieder der Name *V. V. Nalimov* erwähnt, der die Weiterentwicklung ständig vorantrieb. Parallel dazu versuchte *E. Weber* /WEB48/ und *A. Linder* /LIN53/ ebenfalls im deutschsprachigen Raum die Versuchsplanung zu verbreiten.

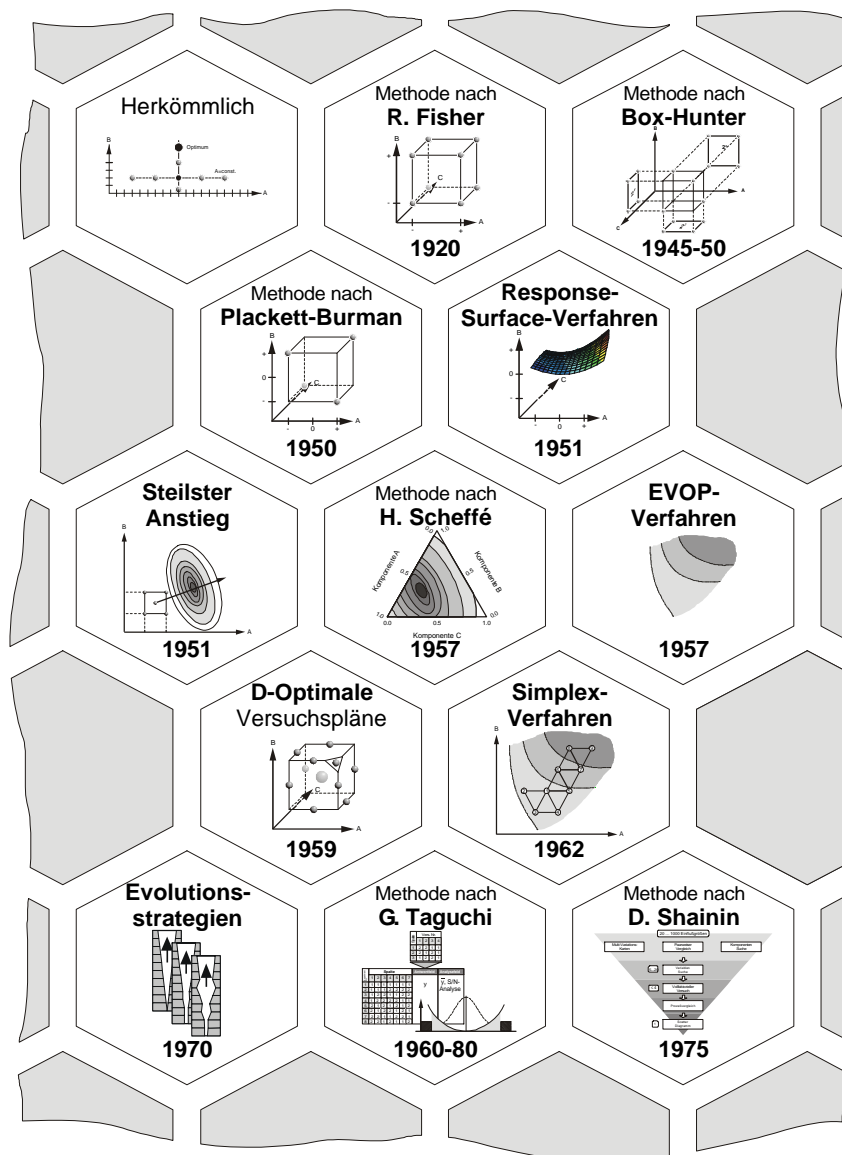


Abb. 4.1: Geschichtliche Entwicklung

4.2 Begriff „statistische Versuchsplanung“

Aufgrund der historischen Entwicklung liegt ein großer Teil der vorhandenen Literatur in englischer Sprache vor. Nur wenige Literaturstellen wurden ins Deutsche übersetzt. Aus diesem Grund hat sich im Laufe der Zeit eine englische Begriffswahl herausgebildet, die in der ISO 3534/3 /ISO3534/ wiedergegeben wird. In dieser ISO 3534/3 wurde versucht, den Begriffen eine einheitliche Bedeutung zu geben.

Seit Dezember 1988 existiert der Normentwurf DIN 55350 T32-E /DIN55350b/ mit dem Namen „Versuchsplanung“, der allerdings nie veröffentlicht wurde. Mit diesem Entwurf ist ein erster Schritt gemacht worden, die Begriffe der Versuchsplanung auch im deutschen einheitlich zu definieren, damit keine Widersprüche entstehen. Dies ist notwendig, weil die Bezeichnung des englischen Begriffs „*Design of Experiments*“ (DoE) im deutschen vielfach mit den Begriffen „Versuchsmethodik“, „statistische Versuchsmethodik“ oder „statistische Versuchsplanung“ verwendet wird.

In der Norm sind diese Unterschiede der Begriffsdefinitionen jedoch nicht ausgeräumt worden. DoE wird in der DIN 55350 T32-E mit „Versuchsplanung“ übersetzt, inhaltlich wird DoE jedoch mit „Versuchsmethodik“ und dies wiederum mit „statistischer Versuchsplanung“ gleichgesetzt. Mit „*Design of Experiments*“ wird hingegen eindeutig der Planungs- und Gestaltungscharakter betont.

Ausführlich ist im Normentwurf für Versuchsplanung zu lesen /DIN55350b/: „*Versuchsplanung mit Verwendung statistischer Methoden zur Auswertung und zur Planung.*“ In Anmerkung 1 steht: „*auch Versuchsmethodik.*“ Weiterhin findet man in Anmerkung 2 die Formulierung: „*Die statistische Versuchsplanung (Abk. SVP) ermöglicht es, mit einer festgelegten Anzahl von Einzelversuchen einen (Gesamt-) Versuch so anzulegen, daß sich die Ergebnisse mit statistischen Methoden – z.B. Varianz- und/oder Regressionsanalyse – einfach und erschöpfend auswerten lassen.*“

In der International Standard Norm, Statistics – Vocabulary and symbols – Part 3: Design of Experiments, First Edition von 1985 /ISO3534/ ist man durch die Veröffentlichung bereits einen Schritt weiter. So wurde der Begriff „*Design of Experiments*“ mit „*The arrangement in which an experimental program is to be conducted, and the selection of the levels (versions) of one or more factors combinations to be included in the experiment.*“

Eine weitere Definition ist in der Publikation VDI 2247 zu finden: „*Die statistische Versuchsplanung dient dazu, die Auswirkungen von metrischen oder attributiven Einflußfaktoren auf ein (in der Regel metrisches) Qualitätsmerkmal aufzudecken*“ /VDI2247/.

Am treffendsten formuliert es jedoch *Montgomery*, der sagt: „*A designed experiment is a test in which some purposeful changes are made to the input variables of a process or system so that we may observe and identify the reasons for change in the output response*“ /MON91/.

Wünschenswert wäre daher, die bereits angefangene deutsche Norm zu vervollständigen, um sie anschließend der Reihe DIN 55350 offiziell beizufügen, denn eine einheitliche Begriffsbildung ist bei der Verbreitung hilfreich.

4.3 Begriffe und Definitionen der Versuchsplanung

Wie bereits erwähnt, bestehen unterschiedliche Definitionen innerhalb der statistischen Versuchsplanung. Zum besseren Verständnis sollen nachfolgend einige relevante Begriffe näher spezifiziert werden /KAP90, SCH97/. Zum einen handelt es sich um grundlegende Begriffe der Versuchsplanung und zum anderen um grundlegende Prinzipien, die bei der Versuchsplanung zur Anwendung kommen. Als Hilfestellung dient *Abb. 4.2*, in der die Begriffe mit einer Grafik kombiniert sind.

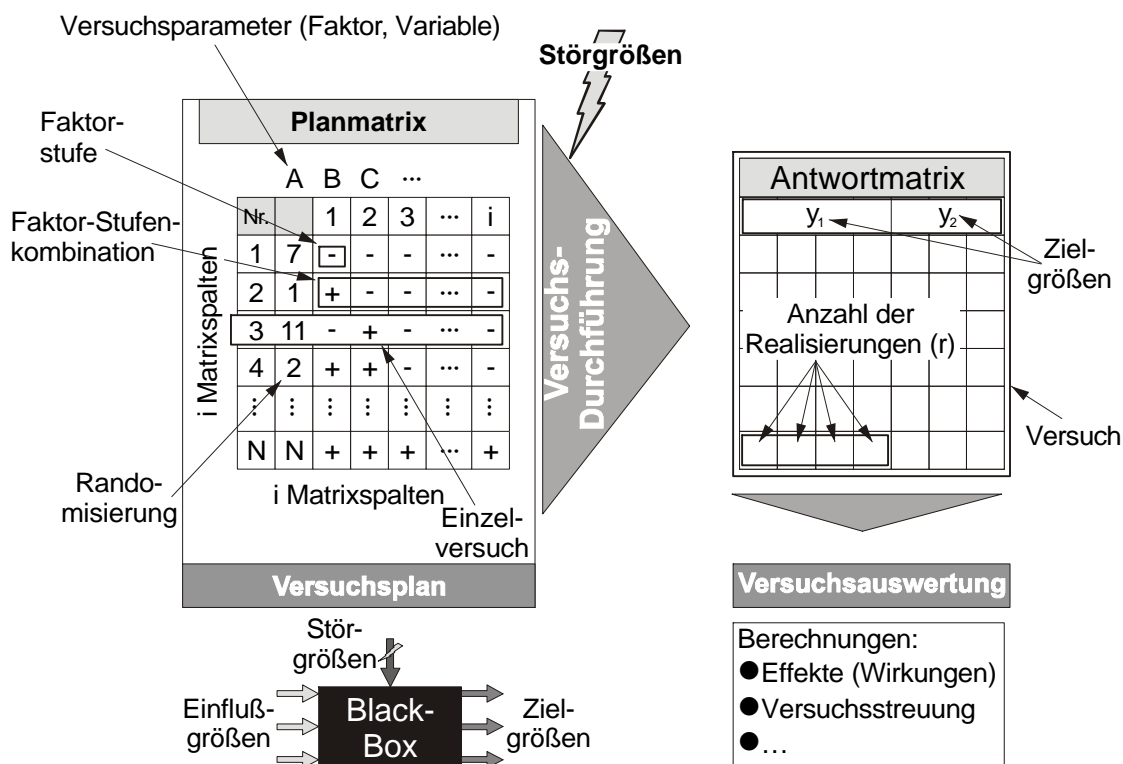


Abb. 4.2: Begriffe der Versuchsplanung (in Anlehnung an /HOL95/)

Im Anhang befindet sich eine Gegenüberstellung der Norminhalte aus der DIN 55350 Teil 32-E und der ISO 3534/3. Dabei wurden zum einen die Überschriften der Einteilungspunkte und zum anderen die Begriffe verglichen.

4.3.1 Grundlegende Begriffe der Versuchsplanung

Unter einem *Versuch* versteht man im allgemeinen die Gesamtheit aller Einzelversuche (auch: Gesamtversuch, Experiment), die in einem Versuchsplan festgelegt sind. Spätere Versuchsergebnisse lassen sich dann entsprechend zuordnen. Bei umfangreichen Untersuchungen und Projekten kann der Versuch in mehrere Teilversuche unterteilt werden.

Der *Versuchsplan* enthält die Liste der Einzelversuche mit den Faktor-Stufenkombinationen der Versuchsparameter, die in Verbindung mit der Gesamtheit der Versuchseinheiten des *Versuchsobjektes* den *Versuchsraum* (Materialien, Ausrüstung, Versuchsbedingungen einschl. Umweltbedingungen) beschreiben.

Weiterhin umfaßt ein Versuchsplan neben den Einzelversuchen Angaben über deren Reihenfolge (*Randomisierung*: Zufällige Zuordnung der Einzelversuche zu den Versuchseinheiten) sowie aller beim Versuch konstant zu haltenden Einflußgrößen.

In der *Antwortmatrix* werden die Zielgrößen (y_i), die geforderte Anzahl der *Realisierungen* (Replikationen) und die *Vervielfachung* (Duplikation) bestimmt. Diese Angaben nehmen entscheidenden Einfluß auf die Größe der Antwortmatrix.

Der Aufbau eines Versuchsplans wird durch die Anzahl der *Faktoren* (x_i) bestimmt. Als Faktor (auch bekannt unter: Versuchsparameter, Variablen oder Einflußgrößen) wird eine unabhängige, willkürlich einstellbare quantitative oder qualitative Größe bezeichnet, die einen starken Einfluß auf das Versuchsergebnis hat. Diese Einflußgrößen werden mit mindestens zwei Stufen in den Versuch einbezogen.

Zu diesen *Versuchsparametern* sind ebenfalls die *Störgrößen* zu zählen. Sie werden meistens² nicht in den Versuchsplan aufgenommen. Ihre Wirkung ist wie eine zufällige Einflußgröße zu behandeln und die damit verbundene Versuchsstreuung klein zu halten. Versuchsparameter werden meistens mit Großbuchstaben (z.B. A, B, ... oder x_1, x_2, \dots) bezeichnet.

Faktorstufen sind Einstellwerte in der Planmatrix, mit denen die Versuchsparameter im Rahmen der Versuche variiert werden. Dementsprechend ist unter *Faktor-Stufenkombination* eine Kombination aus je einer Faktorstufe eines jeden Faktors zu verstehen.

Mit *Zielgröße* wird eine quantitative oder qualitative Größe beschrieben, die das Versuchsergebnis dokumentiert. Es wird die Abhängigkeit zwischen den Versuchsparametern charakterisiert. Die Auswertung der Zielgrößen erfolgt meistens einzeln. Es können jedoch mehrere Zielgrößen zu einer abgeleiteten oder globalen Zielgröße zusammengefaßt werden. Wenn die Zielgröße und die Meßgröße nicht identisch sind, weist *Scheffler /SCH97/* auf eine Unterscheidung zwischen Ziel- und Antwortgröße hin. Diese Unterscheidung ist nicht zwingend, doch manchmal sehr ratsam, um einer Verwechslungsgefahr vorzubeugen.

Die *Effekte*, d.h. die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus der Antwortmatrix mit der Variation der Faktoren, gibt Aufschluß, wie sich die Faktoren auf die Ergebnisse auswirken bzw. welchen Einfluß sie ausüben. Hier wird zwischen *Haupteffekten* (HE) und *Wechselwirkungseffekten* (WE) unterschieden.

Unter *Haupteffekten* wird der Einfluß einer einzigen Variablen bei Variation über alle Stufen dieses Faktors auf die Zielgröße verstanden. Mit dem Begriff *Wechselwirkungseffekt* wird die Veränderung der Zielgröße bei gleichzeitiger Variation mehrerer Faktoren bezeichnet. Anders als bei Haupteffekten können Wechselwirkungseffekte nur dann auftreten, wenn zwei oder mehrere Parameter zugleich ihre Stufenhöhe verändern. Wechselwirkungseffekte werden mit Hilfe der Versuchsparametersymbole gekennzeichnet. Eine Zweifaktor-Wechselwirkung (2-FWW) des Parameters A und des Parameters B ist in der Matrix der unabhängigen Variablen mit AB zu erkennen.

² *Taguchi* propagiert, die Störgrößen im „outer array“ zu plazieren und dann robuste Einstellungen zu finden. Bei klassischen Methoden können die Störgrößen auch als „normale“ Faktoren in einen Versuchsplan integriert werden.

4.3.2 Grundlegende Prinzipien der Versuchsplanung

Die unterschiedlichen Aufgaben und grundlegenden Prinzipien der statistischen Versuchsplanung lauten /KAP90, SCH97/:

- *Wiederholen bzw. Mehrfachrealisieren* von Versuchspunkten, um Informationen über die Versuchsstreuung und des Versuchsfehlers zu bekommen. Mittelwerte sind sicherer als Einzelwerte.
- *Zufallsreihenfolge bzw. Randomisierung* der Einzelversuche, um bekannte und unbekannte Fehler aufgrund von Störeffekten (Störgrößen) oder Trends auszuschalten.
- *Blockbildung* der Versuchspunkte, um bekannte und unbekannte Störgrößen wie Chargeneinheitlichkeit und Trends zu unterdrücken oder eine Einschränkung der Randomisierung vorzunehmen.
- *Symmetrie* der Versuchspunkte, um das Auswerten im Variablenraum zu vereinfachen und das Ergebnis besser interpretieren zu können.
- *Orthogonalität* um eine Ausgewogenheit oder Balanciertheit zu erzielen, d.h. jede Faktorstufenkombination kommt in der Spalte gleich häufig vor.
- *Nutzung des gesamten Versuchsraumes* der unabhängigen Variablen, um durch gleichzeitige Variation von mehreren Variablen eine verringerte Versuchsanzahl zu erreichen und durch eine optimale Verteilung der Versuchspunkte im Variablenraum eine bessere Ergebnisaussage zu bekommen.
- *Vermengen*, um durch systematisches Überlagern von wesentlichen Effekten und unwesentlichen Wechselwirkungseffekten eine Reduzierung von Versuchen zu erhalten.

4.4 Richtlinien versus statistische Versuchsplanung

Normen bzw. Richtlinien zum Qualitätsmanagement, allen voran die, die im Bereich der Automobilbranche bestehen, heben den Einsatz statistischer Methoden hervor. Grundsätzlich geht es darum, die Aussagekraft und –sicherheit von Versuchsergebnissen zu gewährleisten, um diese quantitativ zu bewerten. So ist in der ISO/TS 16949 von 1999 zu DoE – statistische Versuchsplanung – verzeichnet: *„Eine experimentelle Technik, die zur Variation von Prozeßvorgaben mit dem Ziel verwendet wird, deren Wirkung auf die Prozeßergebnisse besser zu verstehen.“* In der Anmerkung wird weiter ausgeführt: *„Die Auswirkungen werden unter den unterschiedlichen Bedingungen bewertet, um 1.) die einflußnehmenden Bedingungen unter allen getesteten Variablen zu bestimmen, 2.) die Auswirkungen insgesamt zu quantifizieren, 3.) die kausalen Zusammenhänge im Prozeß besser zu verstehen und 4.) die Aus- und Wechselwirkungen zu vergleichen“* /TS16949/.

Ebenso weist die VDA 6.1 von 1996 auf die Wichtigkeit von statistischen Methoden hin: *„Die Anwendung statistischer Methoden ist ein wichtiges QM-Element in allen Phasen des Qualitätskreises und ist von den Produkten und eingesetzten Herstellverfahren abhängig. [...] Die Anwendung statistischer Methoden im Versuch erhöht bei geringer Anzahl von Versuchsträgern die Aussagekraft und –sicherheit [...]. Ihr Einsatz ermöglicht es, mit wirtschaftlichem Aufwand richtige Aussagen über das Qualitätsniveau und seine Veränderungen zu treffen. [...] Typische Methoden sind: Statistische Versuchsplanung [...]“* /VDA6/. In der QS 9000 wird die Anwendung des DoE nicht zwingend gefordert. Lediglich auf den Einsatz von statistischen Methoden wird verwiesen /QS9000/.

4.5 Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der statistischen Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung gilt als Hilfsmittel zur gezielten Systemanalyse und -optimierung. Im Rahmen des TQM-Konzeptes³ /KRO94, TVE95/ und der Quality-Engineering-Methoden sind die Verfahren der statistischen Versuchsplanung bereichsübergreifend in den Produktentstehungsphasen

- Definitions- und Entwurfsphase,
 - Entwicklungs- und Produktionsphase,
 - Beschaffungs- und Vorserienphase
- sowie der
- Serienphase

einsetzbar.

Überall, wo in der Produktentstehungskette der Begriff „Versuche durchführen“ fällt, besteht fast immer die Möglichkeit zum Einsatz von statistisch geplanten Versuchen /JOH95/.

Bei einer angestrebten Produkt- oder Prozeßverbesserung wird versucht, die auftretenden Prozeßstreuungen möglichst klein zu halten. Dies hängt von den Einflußgrößen, Störgrößen und der Reproduzierbarkeit ab. Zur Bestimmung und Einstellung dieser Größen kann die statistische Versuchsmethodik als Werkzeug verwendet werden.

Als Stand der Technik kann jedoch immer noch das „Trial-and-Error“-Verfahren genannt werden, bei dem die Einstellung der Einflußgrößen solange geändert werden, bis ein akzeptables Ergebnis erreicht ist. Diese Strategie ist nicht nur teuer und unsystematisch, sondern erfordert auch viel Zeit.

Die statistische Versuchsplanung bietet hingegen folgende Vorteile: Sie reduziert den Versuchsaufwand erheblich, indem für die Aufgabenstellung eine geeignete Strategie gewählt wird. Weiterhin ist es möglich, eine objektive und präzisierte Aussage und eine grobe Modellierung der Zusammenhänge aufgrund der statistischen Auswertung zu erhalten. Des weiteren ist eine komplexe Vergleichbarkeit, hohe Aussagekraft, Übersichtlichkeit und Dokumentation gewährleistet. Da die Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten so vielfältig sind, sollen nachfolgend nur exemplarisch einige Bereiche genannt werden /DRR94/:

- Chemie: Analyse der Faktoren Temperatur, Druck und Additiven auf die Ausbeute eines chemischen Prozesses.
- Medizin: Einfluß von Ernährung, Rauchen, Sport, usw. auf Gesundheitsprobleme.
- Psychologie: Bestimmung von Umweltfaktoren auf die Leistungsfähigkeit.
- Landwirtschaft: Untersuchung der Abhängigkeit des Ertrages von Sorte, Boden, Dünger, usw.
- Marketing: Erfolgsabhängigkeit von Werbemaßnahmen analysieren.
- Produktion: Abhängigkeit eines Qualitätsmerkmals von Faktoren wie Zeit, Maschine, Temperatur, usw.

³ TQM = Total Quality Management, zu deutsch umfassendes Qualitätsmanagement /DIN8402/

Erfolgreiche Anwendungsbeispiele /MEI88, BAR86, BAR90, BAU94, RAM92, ZAC84, KAM88, SCI90, EBE93, BEY85, ERD01/ HIL00, BRA94, BRA95/ der statistischen Versuchsplanung bei Auslegungs- und Optimierungsaufgaben in Forschung, Industrie sowie dem Dienstleistungsbereich sind auch zu finden in der

- Biochemie,
 - Lebensmittelindustrie,
 - Kosmetikindustrie,
 - rohstoffverarbeitenden Industrie,
 - Textilindustrie,
 - Werkzeugmaschinenbranche
- und
- Automobil-
- sowie deren
- Zulieferindustrie.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „*Untersuchung zur technologischen und wirtschaftlichen Effizienz einer systematisierten Versuchsplanungsmethodik in der Produktentwicklung*“, welches von der Stiftung Industrieforschung von 1999 - 2001 gefördert wurde, wurden innerhalb eines Arbeitskreises vielfältige Projekte abgewickelt /GUN01/, wie z.B.

- Bedruckbarkeit von Papier (Sappi),
 - Prozeßverhalten bei der Reifenherstellung (Continental),
 - Optimale Parametereinstellung beim Spritzgießen (Wegu),
 - Parameteranalyse bezüglich Bürstenstandszeiten bei Elektromotoren (VDO, Black & Decker, Hilti),
 - Sicherung einer Gewindeverbindung an Hydraulikzylindern (Hycopacoma),
 - Analyse des Prägeprozesses von Zylinderkopfdichtungen (Federal Mogul),
 - Optimierung einer Produktionsanlage (SGL),
 - Optimierung eines Pkw-Türscharniers mittels DoE und FEM,
 - DoE in der Motorenentwicklung (Opel)
- sowie
- Ablöschverhalten von Kalk (Kalk-Sand e.V., Kalk+Mörtel e.V.)
- und
- Integration der statistischen Versuchsplanung in ein QM-System (Technoform) .

Diese Projekte belegen ebenfalls, wie vielfältig das Anwendungsspektrum der statistischen Versuchsplanung ist.

Natürlich gibt es auch Anwendungsfälle, für die der Einsatz derartiger Versuchsmethoden nur eingeschränkt empfehlenswert und möglich ist. Zu nennen sind hier /SCH97/:

- Forderung nach Extrapolierbarkeit der ermittelten Funktion aus dem untersuchten Bereich hinaus,
 - Analyse des Zeit- und Antwortverhaltens von Systemen z.B. Einschwingen
- oder
- Systeme mit unstetigem oder periodischem Verhalten.

Weitere Hindernisse bzw. Grenzen bei der Anwendung von Versuchsplanungsmethoden sind in den verfügbaren Kapazitäten an

- Zeit,
 - Personal,
 - Material,
 - Maschinen
- und
- Geld

zu nennen.

Verzichtet werden kann zum Teil auf den Einsatz, wenn bei geringem Aufwand in kurzer Zeit viele Versuche abgearbeitet werden können (z.B. Gittermodell) und trotz der vielen Versuche die Übersicht erhalten bleibt sowie geringe Forderungen an die Auswertung gestellt werden /SCH97/.

4.6 Schnittstellen der statistischen Versuchsplanung

Das Einsatzspektrum der Versuchsplanungsmethoden ist, wie bereits aufgeführt, sehr umfangreich. So ist es nicht verwunderlich, wenn sich Schnittstellen bzw. Anwendungsmöglichkeiten in Verbindung mit anderen Methoden wie z.B. FEM, neuronalen Netzen, Lebensdaueruntersuchungen, FMEA, QFD oder TRIZ ergeben. Ebenso ist die statistische Versuchsplanung ein fester Bestandteil von Six Sigma Programmen /RSS02, BGB03/. Durch Six Sigma entdeckte sogar das TOP Management, wie effizient die DoE-Methoden sind. In *Abb. 4.3* sind Methoden im Spannungsfeld der Versuchsplanung aufgeführt, die immer wieder im Zusammenhang mit der statistischen Versuchsplanung genannt werden.

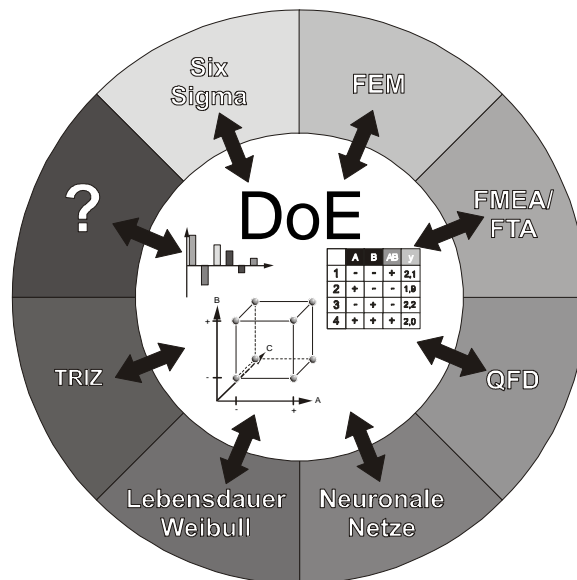


Abb. 4.3: DoE-Schnittstellen zu anderen Methoden

So kann z.B. ein Versuchsplan bei FEM-Analysen helfen, eine systematische Abschätzung des Einflusses von bestimmten Faktoren auf eine Zielgröße zu erhalten. Anhand des Versuchsplans (Faktorstufenkombinationen) werden virtuelle Modelle aufgebaut und anschließend berechnet. Somit wird eine optimale Kombination bzw. Ausprägung der Faktoren systematisch bestimmt /KRÖ01, SOI96, CEM02, KLM03/.

Bei neuronalen Netzen ist es hilfreich, auf gut strukturierte Daten zurückzugreifen. Auf diese kann dann das neuronale Netz aufgebaut werden. Denn stammen diese Daten aus einem Versuchsplan, so sind die Rahmenbedingungen und die Vermengungen bekannt. Oft werden in diesem Zusammenhang Versuchspläne aufgrund eines vermuteten Modells, sogenannte D-optimale Pläne /KRZ00, MIE00a, MIE00b, GOH99, WEL99, SRR00/, erstellt.

Der Wunsch nach Reduzierung kostenintensiver experimenteller Versuchsreihen stellt erhöhte Forderungen an zeit- und kostenminimale Ansätze der Versuchsmethodik. Die Übertragung der statistischen Versuchsplanung für mehrstufige Ermüdungsversuche von der Theorie in die Praxis zeigt einen breiten Einsatzhorizont. Bei nicht ruhender, d.h. zeitlich veränderlicher Belastung muß ein Betriebsfestigkeitsnachweis erbracht werden, um eine schwingbruchsichere Bemessung der Bauteile für deren Gebrauchsdauer zu gewährleisten. Speziell für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis unter gestufter Belastung zeigen nichtlineare Berechnungsverfahren deutliche Vorteile. Hierbei wird mittels nichtlinearer Schadensakkumulation der sogenannte Reihenfolgeeffekt unter Belastungswechsel mathematisch sehr gut beschrieben. Die statistische Versuchsplanung dient in diesem Zusammenhang als Planungs- und Auswertwerkzeug, um möglichst viele Informationen aus wenigen Versuchen zu ziehen /KÜH02/. Ebenso dient sie im Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsbereich als hilfreiches Instrument /KÜL94/.

Im Methodenverbund mit den Quality-Engineering-Methoden QFD, FMEA sowie der TRIZ-Methodik /HRB02/, wird die statistische Versuchsplanung generell da propagiert, wo Versuche durchzuführen sind /CER95, HRB98, PFE02/.

5 Klassische Versuchsmethoden

Jedes Experiment dient dem Experimentator zum Wissenserwerb bzw. zur Informationsgewinnung, um daraus eine bessere Entscheidungsfindung abzuleiten. Um jedoch eine gewisse Sicherheit bei der Entscheidung zu haben, müssen aussagefähige Daten vorliegen. Von Interesse ist diesbezüglich, wie die Daten ermittelt wurden. Einen entscheidenden Einfluß haben hierbei die Reproduzierbarkeit und der Grad der „statistischen“ Absicherung /GIM91/. Die zwangsläufig in einem Experiment bzw. Versuch vorhandenen Abweichungen innerhalb der Daten sollen durch die Anwendung von Versuchsplänen verringert werden /HIC80/.

Mit der Entwicklung der Varianzanalyse durch *Sir Ronald Fisher*, wie bereits angesprochen, als Grundlage für die Auswertung von statistischen Versuchsplänen, begann die systematische Untersuchung von Produkt- und Prozeßzusammenhängen. Als Zielsetzung verkörpert die statistische Versuchsplanung den Einsatz von mathematisch statistischen Verfahren, um Klarheit der Zusammenhänge bei Produkten oder Prozessen zu erlangen /PET91b, SCH97/.

Hierzu stehen eine Vielzahl an möglichen Verfahren bzw. Versuchsplänen bereit, die je nach Aufgabenstellung Anwendung finden.

Nachfolgend werden grundsätzliche Erklärungen bzw. Definitionen von Versuchsplänen aufgeführt, die dem Bereich der „klassischen Versuchspläne“ bzw. der „klassischen Versuchsplanung“ zuzuordnen sind. Die Versuchspläne des „klassischen“ Bereichs lassen sich in sogenannte „Einfaktorpläne“ und „faktorielle Versuchspläne“ unterteilen. Bei faktoriellen Plänen gibt es wiederum Versuchspläne erster Ordnung, die sich für den „Screening-Einsatz“ eignen und Versuchspläne zweiter oder höherer Ordnung, die für die „empirische Modellbildung“ und die „Optimierung“ Verwendung finden.

Bei der nachfolgenden Beschreibung der Versuchspläne soll weniger der mathematische Ansatz im Vordergrund stehen, sondern vielmehr die Basisstruktur mit Vor- und Nachteilen aufgeführt werden. Dazu wurde die zuvor angesprochene Unterteilung in Einfaktorpläne, Versuchspläne erster Ordnung, Versuchspläne zweiter Ordnung und Versuchspläne dritter Ordnung gewählt.

5.1 Statistische Versuchspläne für einen Einflußfaktor

Im Vergleich zu der in *Kapitel 7.3* beschriebenen „Gauss-Seidl“-Strategie bzw. der „One-Factor-at-a-Time“-Methode, sind die Versuchspläne für einen Einflußfaktor in ihrer Aussagekraft als vorteilhafter zu bewerten. Diese Plänen ermöglichen es, mit einer geschickten Versuchsanordnung vorliegende Störgrößen durch statistische oder experimentelle Kontrolle (Randomisierung, Blockbildung) auszuschalten /MON91, PET91b, HIC80/, damit diese keinen Einfluß auf die Versuchsergebnisse ausüben.

Zu diesem Zweck stehen dem Experimentator unterschiedliche Versuchspläne zur Verfügung, die sich in der Anzahl der einzubeziehenden Störgrößen unterscheiden.

Grundsätzlich lassen sich die Einfaktorpläne in zwei Gruppen einordnen /HOC88/:

- 1.) vollständige Blockpläne
und
- 2.) unvollständige Blockpläne.

Als Block ist in diesem Zusammenhang die Gruppierung eines Untersuchungsgegenstandes nach bestimmten Kriterien oder Einflüssen zu verstehen. Vollständig ist ein Blockplan dann, wenn jede Stufe eines jeden Faktors mindestens einmal im Versuchsplan enthalten ist. Werden bestimmte Stufen vernachlässigt, so handelt es sich um einen unvollständigen Blockplan. Vollständige Blockpläne können wiederum in

- vollständige Zufallspläne,
 - zufällige Blockpläne
- sowie
- Lateinische Quadratpläne

unterteilt werden, wobei die Lateinischen Quadratpläne nochmals in

- Griechisch-Lateinische Quadratpläne
und
- Hyper-Griechisch-Lateinische Quadratpläne

zu klassifizieren sind.

Bei den unvollständigen Blockpläne wird eine weitere Aufteilung in

- ausgewogene unvollständige Blockpläne
und
- Youden Quadratpläne

vorgenommen.

Der soeben beschriebene Zusammenhang ist zur besseren Übersicht nochmals in *Abb. 5.1* grafisch aufgeführt.

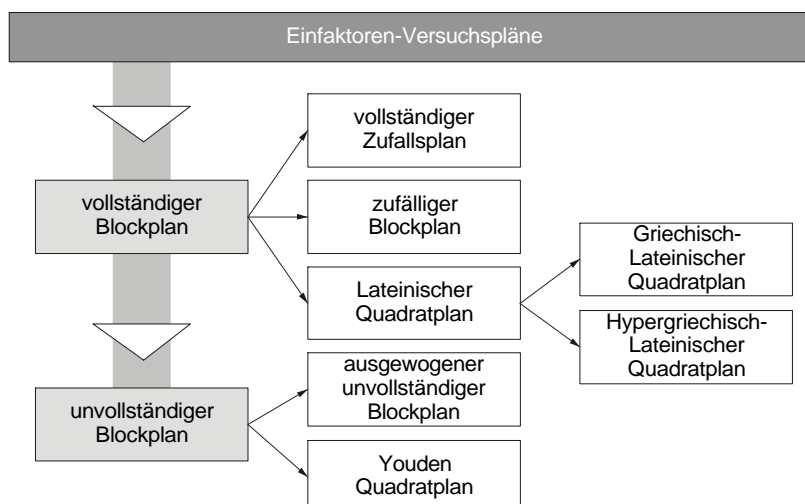


Abb. 5.1: Übersicht Einfaktorenpläne

Nachfolgend werden die Einfaktorpläne kurz vorgestellt. Ausführliche Beschreibungen zur Erstellung und Auswertung sind in /FIS74, BOX78, COC50, YAT39, YOU59, HOC88/ enthalten.

5.1.1 Vollständige Zufallspläne

Die einfachsten Einfaktorpläne sind die vollständigen Zufallspläne (completely designs), die die Wirkung eines Einflußfaktors auf eine oder mehrere Zielgrößen erfassen. Bei diesen Plänen werden von jeder Faktorstufe eine gewisse Anzahl an Einheiten untersucht. Dabei ist es möglich, die Anzahl der Einheiten bzw. Wiederholungsversuche (Replications) unterschiedlich zu wählen. Um den Einfluß von etwaigen Störfaktoren auszuschließen, wird die statistische Kontrolle angewendet. Zur Auswertung der Versuche wird die einfache Varianzanalyse in Form des mathematischen Modells

$$y_i = \mu + \xi_i + \varepsilon_i \quad (5.1)$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Faktoreinfluß + Versuchsstreuung

herangezogen.

In die Analyse können sowohl qualitative wie auch quantitative Einflußfaktoren einbezogen werden /PET91b/.

5.1.2 Zufällige Blockpläne

Mit der Versuchsanordnung eines zufälligen Blockplans (completely randomized block designs) ist es möglich, den Einfluß eines Einflußfaktors zu erkennen sowie den Einfluß einer Störgröße auszuschließen. Die vorliegenden Versuchseinheiten werden dabei so in Blöcken zusammengefaßt, daß Gruppen mit möglichst gleichartigen Versuchseinheiten entstehen. Das Ausschalten der Störgröße erfolgt hierbei durch experimentelle Kontrolle, indem „m“ Faktorstufen jeweils einem Block zugeordnet werden. Hierbei ist zu beachten, daß die Anzahl der Einheiten pro Block gleich groß ist. Die Auswertung erfolgt mit dem Modell der zweifachen Varianzanalyse /PET91b/.

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (5.2)$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Primärfaktor + Block + Versuchsstreuung

5.1.3 Lateinische Quadratpläne

Um einen Einflußfaktor und zwei weitere Störgrößen mit einem Versuchsdesign zu analysieren, eignen sich die Lateinischen Quadratpläne (latin square design), allerdings mit der Randbedingung, daß die Einfluß- wie auch die Störgrößen die gleiche Stufenanzahl aufweisen müssen. Durch die gleiche Stufenanzahl ist jedoch der praktikable Einsatzrahmen eingeschränkt, welches als Nachteil zu werten ist. Die beiden Störgrößen werden hierbei durch experimentelle Kontrolle berücksichtigt. Mögliche Lateinische Quadratpläne sind aus *Abb. 5.2* ersichtlich.

3 x 3		
A	B	C
B	C	A
C	A	B

4 x 4			
A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	B	A
D	C	A	B

4 x 4			
A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	A	B
D	C	B	A

Abb. 5.2: Beispiele Lateinischer Quadratpläne

Aus Abb. 5.2 ist weiterhin zu entnehmen, wie die Verteilung der i Buchstaben A, B, C, ... zu erfolgen hat, um ein Lateinisches Quadrat der Form $i \times i$ zu erhalten. Die Buchstaben stehen in jeder Zeile und in jeder Spalte nur einmal. Wird in der ersten Spalte die alphabetische Reihenfolge eingehalten, so liegt ein „Standard Latin Square“-Plan vor. Wird ein „Standard Latin Square“-Plan durch Permutation¹ verändert, so lassen sich weitere Lateinische Quadrate damit erzeugen /PET91b/, welches in Abb. 5.3 beispielhaft aufgeführt ist.

A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	B	A
D	C	A	B

A	B	C	D
B	C	D	A
C	D	A	B
D	A	B	C

A	B	C	D
B	D	A	C
C	A	D	B
D	C	B	A

A	B	C	D
B	A	D	C
C	D	A	B
D	C	B	A

Abb. 5.3: Durch Permutation erzeugte 4 x 4 Standard Latin Squares /PET91b/

Petersen /PET91b/ merkt in diesem Zusammenhang an, daß die Wahl der Stufenanzahl nicht kleiner als vier sein sollte, da für drei Stufen die Anzahl der Freiheitsgrade

$$DF = (3 - 1)(3 - 2) = 2 \tag{5.3}$$

so klein ist, daß die Signifikanztests nicht mehr scharf sind.

Zur mathematischen Beurteilung wird bei Lateinischen Quadratplänen die dreifache Varianzanalyse mit dem Modell

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijk} \tag{5.4}$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Faktor + Zeileneinfluß + Spalteneinfluß +
Versuchsstreuung

verwendet.

5.1.4 Griechisch-Lateinische Quadratpläne

Die Bedeutsamkeit von drei Störfaktoren und einer Einflußgröße kann mit Griechisch-Lateinischen Quadratplänen überprüft werden. Die Hinzunahme einer weiteren Störgröße im Vergleich zu einem Lateinischen Quadratplan, wird durch das Überlagern zweier orthogonaler Lateinischer Quadratpläne entwickelt.

¹ Umstellung der Reihenfolge bei der Zusammenstellung einer bestimmten Anzahl geordneter Größen bzw. Elemente.

Innerhalb des Versuchsplans werden für das Lateinische Quadrat „lateinische“ Buchstaben und für das Griechische Quadrat „griechische“ Buchstaben vergeben. Kommt jede Buchstabenkombination beim Übereinanderlegen genau einmal vor, so lautet die Planbezeichnung „orthogonaler Lateinischer Quadratplan.“, wie *Abb. 5.4* zeigt.

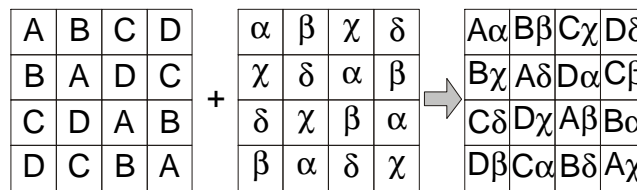


Abb. 5.4: Entstehung eines Griechisch-Lateinischen Quadratplans

Für einen Griechisch-Lateinischen Quadratplan lautet das mathematische Modell folgendermaßen:

$$y_{ijkm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \delta_m + \varepsilon_{ijkm} \quad (5.5)$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Primärfaktor + erste Störgröße + zweite Störgröße + dritte Störgröße + Versuchsstreuung

Die Freiheitsgrade für die Versuchsvarianz sind hier mit

$$DF = (m - 1)(m - 3) \quad (5.6)$$

zu bestimmen, wobei „m“ wiederum die Anzahl der Stufen darstellt und mindestens fünf aufweisen sollte /PET91b/.

5.1.5 Hypergriechisch-Lateinische Quadratpläne

Auch bei den Hypergriechisch-Lateinischen Quadratplänen findet, ähnlich wie bei den Griechisch-Lateinischen Quadratplänen, eine Überlagerung statt. Sie stellen insofern eine Erweiterung dar, daß eine weitere Störgröße in den Versuch integrierbar ist. Somit lassen sich eine Einflußgröße und vier Störgrößen berücksichtigen. Für drei orthogonale Sets (4 x 4 Quadrat) und vier orthogonale Sets (5 x 5 Quadrat) ist dies in *Abb. 5.5* zu sehen /PET91b/. Weitere orthogonale Sets sind in /FIS74/ zu finden.

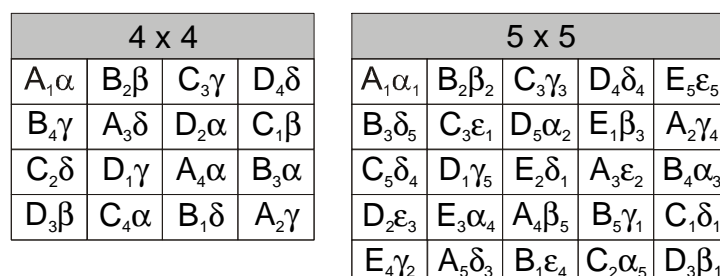


Abb. 5.5: Hypergriechisch-Lateinische Quadratpläne

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, daß faktorielle mehrstufige Versuchspläne auch zum Teil identisch mit Lateinischen Quadraten bzw. (Hyper-) Griechisch-Lateinischen Quadraten sind. Ebenso sind diese Pläne bei *Taguchi* wiederzufinden und zwar unter den Bezeichnungen L₉(3⁴), L₁₆(4⁵) sowie L₂₅(5⁶) /KLP98/.

5.1.6 Ausgewogene unvollständige Blockpläne

Falls in der Praxis der Fall auftritt, daß nicht alle Faktorstufenkombinationen unter vergleichbaren Bedingungen durchführbar sind, können die bisher diskutierten zufälligen Blockpläne und die lateinischen Quadratpläne nicht angewendet werden. Um diese Problematik dennoch zu lösen, gibt es sogenannte „ausgewogene unvollständige Blockpläne“ (balanced incomplete block design, auch ausbalancierte unvollständige Blockpläne genannt). Hierbei ist nicht jede Faktorstufe in jedem Block enthalten /HIC80, PET91b/, welches exemplarisch in *Abb. 5.6* dargestellt ist.

Block	Stufe			
	A	B	C	D
Block 1	X	X	X	
Block 2	X	X		X
Block 3	X		X	X
Block 4		X	X	X

Abb. 5.6: Beispiel eines ausgewogenen unvollständigen Blockplans

Die Auswertung erfolgt mit einem varianzanalytischen Modell, das mit dem eines vollständigen Blockplans weitestgehend übereinstimmt und wie folgt aussieht:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \tag{5.7}$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Blockeffekt + Stufeneffekt + Versuchsstreuung

5.1.7 Youden Quadratpläne

Wird aus einem kompletten Lateinischen Quadratplan eine Reihe entfernt, so entsteht auf einfachste Weise ein Youden Quadratplan. Dieses Vorgehen ist in *Abb. 5.7* praktiziert worden, um aus einem kompletten 4 x 4 Lateinischen Quadratplan einen Youden Quadratplan zu erzeugen. Liegen vier, fünf, sechs, acht, neun oder zehn Stufen vor, so kann immer nur eine Reihe aus dem kompletten Plan entfernt werden.

Stufen	Block			
1	A	B	C	D
2	B	C	D	A
3	C	D	A	B

Abb. 5.7: Youden Quadratplan

Wenn hingegen genügend Stufen vorhanden sind, können auch mehrere Reihen bzw. Spalten eliminiert werden, wie in *Abb. 5.8* gezeigt. Dies ist bei Versuchsplänen mit sieben oder elf Stufen durchführbar.

Stufen	Block						
1	A	B	C	D	E	F	G
2	B	C	D	E	F	G	A
3	D	E	F	G	A	B	C

Abb. 5.8: Youden Quadratplan

Wird der Youden Quadratplan aus Abb. 5.7 wieder zu einem Lateinischen Quadratplan ergänzt (siehe Abb. 5.9), bilden die zusätzlichen Zeilen bzw. Spalten ein sogenanntes komplementäres Youden Quadrat.

Stufen	Block			
1	A	B	C	D
2	B	C	D	A
3	C	D	A	B
4	D	A	B	C

Abb. 5.9: Erweiterung eines Youden Quadratplans zu einem Lateinischen Quadratplan

Um einen Youden Quadratplan auszuwerten, wird die mathematische Analysestrategie eines unvollständigen Blockplans herangezogen. Es muß lediglich noch die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen den Wiederholungen separiert werden /PET91b/. Das der Varianzanalyse zugrundeliegende Modell lautet daher:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijk} \quad (5.8)$$

Versuchswert = Gesamtmittelwert + Wiederholung + unvollständiger Block + Stufen + Versuchsstreuung

5.2 Faktorielle Versuchspläne

Bei den zuvor beschriebenen Versuchsplänen ging es um die Variation einer Einflußgröße und deren Auswirkung auf die Zielgröße. Nachfolgende Versuchspläne dienen hingegen der Prüfung von mehreren Faktoren auf eine oder mehrere Zielgrößen. Diese sogenannten „faktoriellen Versuchspläne“ bilden die Grundlage der statistischen Versuchsplanung. Ihr Aufbau beruht dabei auf einfach strukturierten Algorithmen, die aufgrund symmetrischer und überschaubarer Versuchsarrangierungen leicht zu entwickeln sind.

Im Gegensatz zur Einfaktormethode werden bei den faktoriellen Plänen mehrere Faktoren ausgewogen und gleichzeitig gegeneinander variiert /OTO97/. Dadurch ist es möglich, Mittelwerte über die Einstellungen zu bilden, um daraus sogenannte Effekte zu berechnen. Diese Mittelung sowie die Effektbestimmung stellt auch den wesentlichen Vorteil gegenüber der Einfaktormethode dar, da eine bessere Übertragbarkeit der Schlußfolgerungen aus den Versuchsergebnissen auf ein Produkt bzw. einen Prozeß möglich ist /GIM91/.

5.2.1 Versuchspläne erster Ordnung (Screening)

Mit Versuchsplänen erster Ordnung ist es möglich, Einflüsse aller Faktoren und ihrer Wechselwirkungen zu betrachten. Hierbei werden für jeden Einflußfaktor jeweils Zwei-Faktorstufen betrachtet, d.h. es liegen lineare Zusammenhänge vor. Haupteinsatzgebiet dieser Pläne ist die sogenannte „Screening“-Phase, wenn noch nicht bekannt ist, welche Einflußgrößen einen signifikanten Einfluß ausüben.

5.2.1.1 Vollständige 2^k -Faktorenversuchspläne

Vollständige faktorielle Versuchspläne (complete 2^k -factorial design) kommen hauptsächlich dann zum Einsatz, wenn keine genauen Kenntnisse über die Zusammenhänge eines Produkt- oder Prozeßverhaltens vorhanden sind /FLA95/. Neben quantitativen Faktoren können auch qualitative Faktoren berücksichtigt werden.

Bei ihrer Anwendung ist es möglich, alle Haupteffekte (HE) und Wechselwirkungen (WW) zu bestimmen /MAY97/. Dies geschieht durch eine vollständige Variation der Faktoren bezüglich einer oder mehrerer Zielgrößen auf zwei Stufen.

Dabei wird unter einem Haupteffekt die Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße verstanden. Eine Wechselwirkung zwischen Faktoren liegt dann vor, wenn der Einfluß des einen Faktors von der Einstellung eines anderen Faktors abhängig ist /SCH97/. Rufen zwei Faktoren eine Wechselwirkung hervor, so wird diese als Zweifaktor-Wechselwirkung, d.h. Wechselwirkung erster Ordnung, bezeichnet. Wechselwirkungen, an denen zwei oder mehrere Faktoren beteiligt sind, werden mit zweiter oder höherer Ordnung benannt und liegen bei vielen industriellen Anwendungen bei Versuchsplanungsprojekten im Bereich der Versuchsstreuung und sind daher zum größten Teil vernachlässigbar /MON91, PET91b/.

Vollfaktorielle Pläne werden allgemein als „Plantyp m^k “ bezeichnet, d.h. sie berücksichtigen „k“ Versuchsparameter auf „m“ Stufen. Somit beträgt die Anzahl der Versuche „n“ eines zweistufigen vollfaktoriellen Versuchsplan zur Untersuchung von „k“ Faktoren²

$$n = 2^k . \quad (5.9)$$

Bei einem 2^3 -Versuchsplan bedeutet das somit:

- $m = 2 =$ Anzahl der Stufen der Versuchsparameter,
 - $k = 3 =$ Anzahl der Versuche
- und
- $n = 2^3 = 8 =$ Anzahl der Versuchspunkte in einer Serie bzw. unterschiedliche Faktorstufenkombinationen.

² Anmerkung: Die Angabe der Versuchsparameter ist in der einschlägigen Literatur nicht einheitlich geregelt. So finden sich Bezeichnungen der Versuchsparameter mit Buchstaben (A, B, C, usw.) Zahlen (1, 2, 3, usw.) oder Variablen ($x_1, x_2, x_3, \text{ usw.}$).

Zur Generierung und Auswertung derartiger 2^k -Versuchspläne empfiehlt Scheffler /SCH97/ eine Gesamtmatrix, die aus

- Planmatrix (enthält die Versuchsparameter),
- Matrix der unabhängigen Variablen,
- Antwortmatrix (enthält die Antwort- bzw. Zielgrößen y_i und
- Effektmatrix

besteht und in Abb. 5.10 am Beispiel eines 2^3 -Plans dargestellt ist.

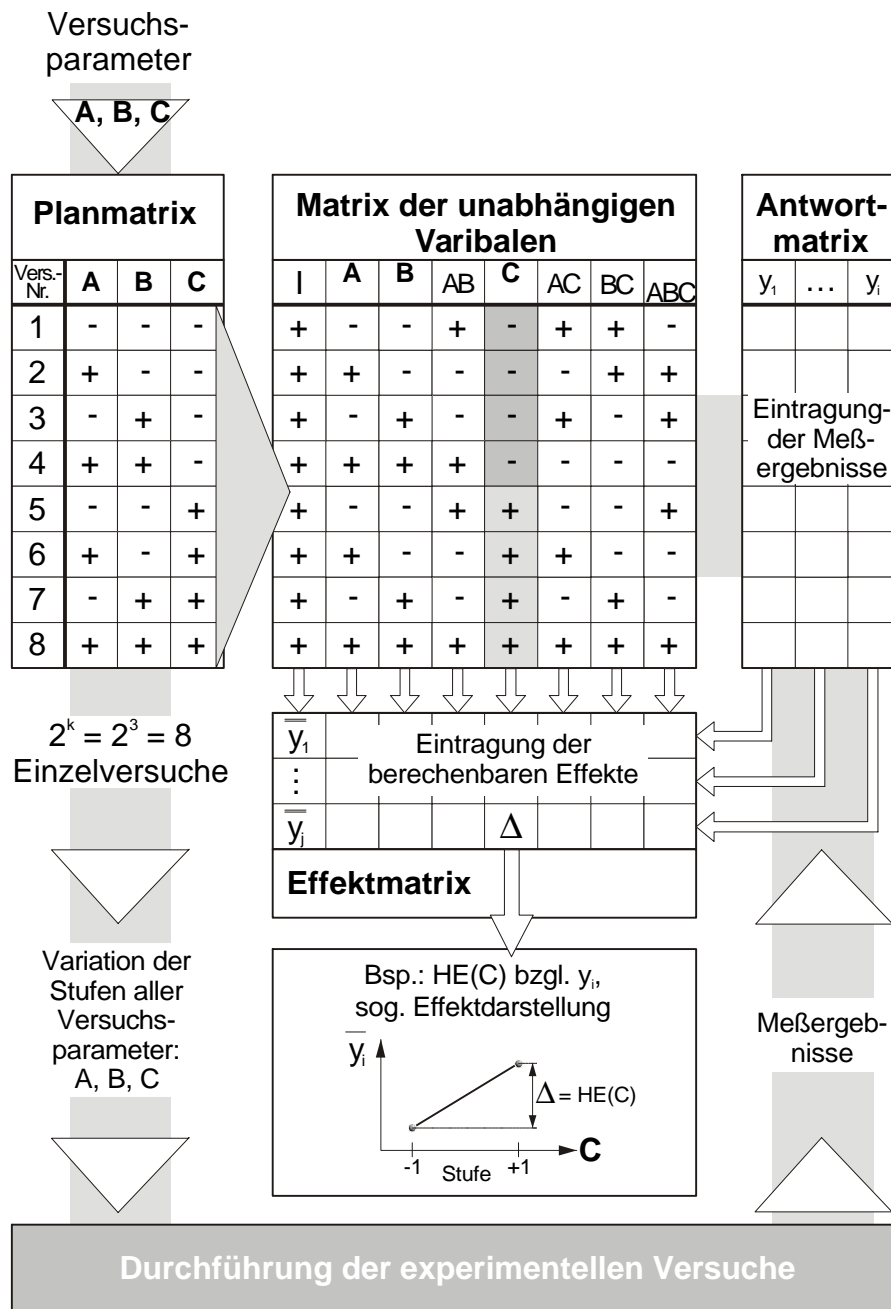


Abb. 5.10: Beispiel eines 2^3 -Versuchsplan /HOL95/

In der „Planmatrix“ werden die Einstellvorschriften für die Versuchsparameter (A, B, C), d.h. ihre Faktorstufenkombinationen, eingetragen, die dem Bildungsgesetz

$$2^{i-1} \tag{5.10}$$

gehörchen /SPE91, BOX78, PET91b/.

Werden z.B. drei Versuchsparameter auf zwei Stufen variiert, ergibt dies acht unterschiedliche Einzelversuche, wie in *Abb. 5.10* zu sehen ist. Hierin ist die untere Faktorstufe mit „-“ und die obere mit „+“ gekennzeichnet. Soll ein weiterer Parameter der Untersuchung beigelegt werden, muß die Planmatrix um eine Spalte erweitert werden.

Die „Matrix der unabhängigen Variablen“ ergibt sich aus der „Planmatrix“. Neben den Planmatrixspalten (A, B, C) und einer Identitätsspalte (I), sind in dieser Matrix Spalten der potentiellen Wechselwirkungen aufgeführt. In der Wechselwirkungsspalte werden die Vorzeichen oder Belegungen durch Multiplikation der Spaltenvektoren erzeugt (z.B. Multiplikation der Spalte „A“ und „B“ ergibt Spalte „AB“). Steigt die Anzahl der Versuchsparameter, nimmt auch die Anzahl der möglichen Wechselwirkungseffekte stark zu. Werden k-Einflußgrößen in die Untersuchung einbezogen, gibt es

2^k	Einflüsse,	
davon		
k	Einflüsse	
$\frac{k(k-1)}{1 \cdot 2} = \binom{k}{2}$	Zweifaktor-Wechselwirkungen (2-FWW)	
$\frac{k(k-1)(k-2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} = \binom{k}{3}$	Dreifaktor-Wechselwirkungen (3-FWW)	(5.11)
$\frac{k(k-1)(k-2)\dots(k-i+1)}{i!} = \binom{k}{i}$	i-Faktor-Wechselwirkungen (i-FWW)	
1	k-Faktor-Wechselwirkungen	
1	0-Faktor-Wirkung /SCH97/.	

Die Identitätsspalte ergibt sich durch die Multiplikation einer beliebigen Versuchsplan-spalte mit sich selbst. Durch diese Multiplikation entsteht eine Kolonne mit ausschließlich Pluszeichen. Notwendig ist die Identitätsspalte, um die zur Matrizen-Orthogonalitätsbe-trachtung vorgeschriebene quadratische Form zu erzielen, die im Rahmen der Versuchs-auswertung zur Berechnung des Gesamtmittelwertes je Zielgröße dient.

Nachdem die Variation der Stufen der Versuchsparameter durchgeführt wurde, werden die ermittelten Meßergebnisse je Versuchsantwortgröße (y_i) zur Dokumentation in die „Antwortmatrix“ eingetragen. Mittels der „Antwortmatrix“ werden die Einzelversuche den Meßgrößen zugeordnet. Es lassen sich beliebig viele Antwortgrößen aufnehmen.

In der „Effektmatrix“ werden den ermittelten Meßergebnissen der Antwortgrößen die ent-sprechenden Ursachen gegenübergestellt. Rechnerisch geschieht dies durch den Mittel-wertvergleich, die sogenannte „Effektanalyse“.

Beispielsweise wird der Haupteffekt des Versuchsparameters „C“ aus *Abb. 5.10* durch die Differenz des Antwortgrößenmittelwertes der Versuche fünf bis acht (alle „C“ der Stufe „+1“) und den Versuchen eins bis vier (alle „C“ der Stufen „-1“) bestimmt. Verdeutlicht wird dies durch eine beispielhafte Effektanalyse für den Versuchsparameter „C“, was ebenfalls in *Abb. 5.10* dargestellt ist /HOL95/. Wechselwirkungseffekte werden in analoger Art und Weise anhand der Vorzeichenschemata der „Matrix der unabhängigen Variablen“ in der „Effektmatrix“ ermittelt. Eine plausible Darstellung von Zweifaktor-Wechselwirkungen läßt sich durch das Auftragen einer Zielgröße über einen Faktor bei verschiedenen Einstellungen eines anderen Faktors erreichen, wie in *Abb. 5.11* zu sehen ist /BOX78/.

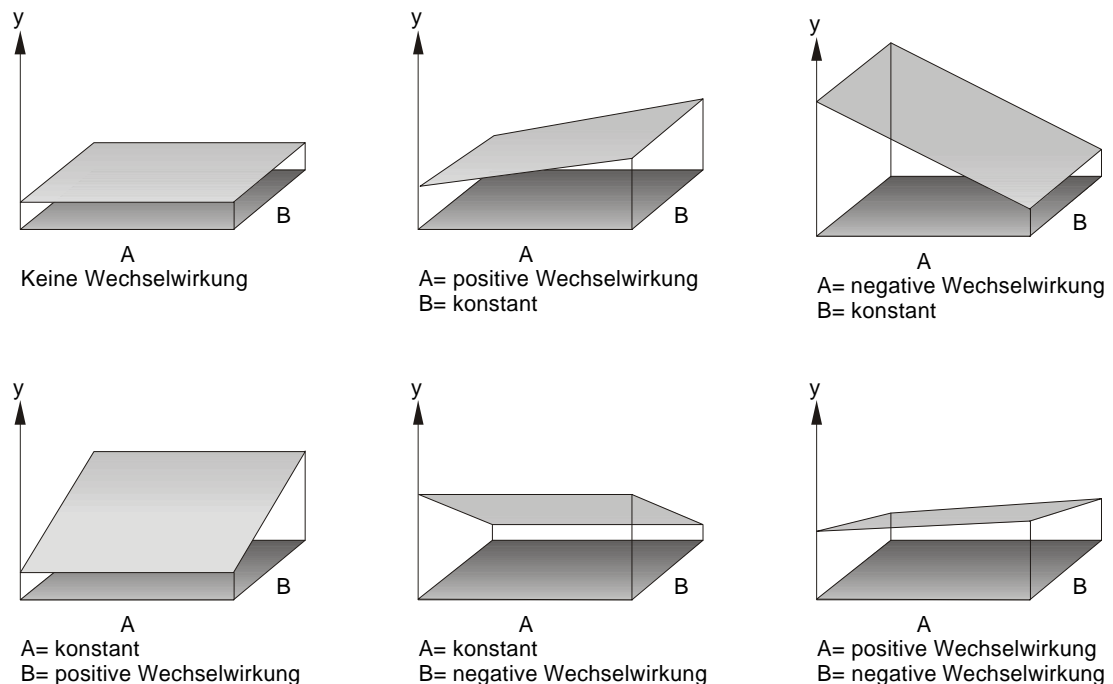


Abb. 5.11: Darstellung unterschiedlicher Wechselwirkungen /PET91b/

Den Vorteilen der vollfaktoriellen Versuchsmethode, nämlich der einfache Aufbau, die Analyse aller Effekte (Haupt- und Wechselwirkungseffekte), steht ein schwerwiegender Nachteil gegenüber. Bei größer werdender Anzahl der Versuchsparameter steigt die Anzahl der Versuche exponentiell an, wie aus *Tab. 5.1* ersichtlich ist /SPE91/. Dies kann durch die Zunahme der Wechselwirkungseffekte erklärt werden. In der Praxis werden daher vollfaktorielle Versuche mit mehr als fünf Faktoren nur selten angewendet. Aus diesem Grund wurden teilfaktorielle Versuchspläne entwickelt.

5.2.1.2 2^{k-p} -Teilfaktorenpläne

Mit steigender Anzahl der Faktoren steigt auch die Anzahl der Kombinationen eines 2^k -Plans rasch an und zwar genau um 2^{k+1} . Durch die Hinzunahme weiterer Faktoren ergeben sich schnell praktische Grenzen in puncto der Durchführbarkeit und Kosten /KLP98, SCH97/. Bei sieben Faktoren sind bereits 128 Faktorstufenkombinationen denkbar, so daß zur Bestimmung aller Haupt- und Wechselwirkungseffekte 128 Versuche durchzuführen sind. *Tab. 5.1* ist zu entnehmen, wie nicht nur die Versuchsanzahl sondern auch die Anzahl der Wechselwirkungen steigt. Bereits bei fünf Faktoren sind

- zehn Wechselwirkungen erster Ordnung (Zweifaktor-Wechselwirkungen),
 - zehn Wechselwirkungen zweiter Ordnung (Dreifaktor-Wechselwirkungen),
 - fünf Wechselwirkungen dritter Ordnung (Vierfaktor-Wechselwirkungen)
- und
- eine Wechselwirkungen vierter Ordnung (Fünffaktor-Wechselwirkung)

vorhanden.

Dies bedeutet, daß man bei einer großen Anzahl an Faktoren in einem vollfaktoriellen Versuchsplan hauptsächlich Wechselwirkungen von mehr als zwei Faktoren untersucht.

k	2 ^k	Hauptwirkungen	Wechselwirkungen der Ordnung							
			1	2	3	4	5	6	7	
2	4	2	1							
3	8	3	3	1						
4	16	4	6	4	1					
5	32	5	10	10	5	1				
6	64	6	15	20	15	6	1			
7	128	7	21	35	35	21	7	1		
8	256	8	28	56	70	56	28	8	1	

Tab. 5.1: Anzahl der Haupt- und Wechselwirkungen in Abhängigkeit der Faktoren

Um nun den Versuchsaufwand zu reduzieren, besteht die Möglichkeit, unrelevante, in der Regel höhere Wechselwirkungen eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit neuen Faktoren zu überlagern. Wechselwirkungen höherer Ordnung (ab Dreifaktor-Wechselwirkungen) sind physikalisch schwer zu deuten bzw. ohne Bedeutung /PET91b/, da ihre Effekte meist im Bereich der Streuung der Versuchsergebnisse liegen /SCH97/. Hieraus ergibt sich ein enormes Potential an Wechselwirkungen, die Einsparungspotentiale offenlegen. Auf diese Weise entstehen sogenannte teilfaktorielle Versuchspläne (fractional factorial designs), die von G. E. P. Box und H. S. Hunter /BOX61a, BOX61b/ entwickelt wurden.

Dieses Einsparungspotential von Versuchen ist allerdings mit dem Nachteil von un-schärferen Ergebnissen verbunden. Eine solche Unschärfe tritt durch die Einplanung weiterer Versuchsparameter und der damit verbundenen Effektvermischung auf. Faktorenpläne mit „n“ Versuchen liefern auch nur Informationen für n-1 Variable /HOL95/.

Teilfaktorielle Pläne werden als 2^{k-p}_R -Pläne bezeichnet, worin

- k = Anzahl der Faktoren,
 - p = neu hinzugefügte Faktoren
- und
- R = den Lösungstyp

verkörpern.

Ein Unterscheidungsmerkmal der teilfaktoriellen Pläne ist durch den Grad der Vermischung gegeben. Der Lösungstyp eines teilfaktoriellen Versuchsplans wird im allgemeinen durch eine römische Zahl angegeben. Hierbei gilt der Grundsatz, je höher die Zahl, desto unkritischer ist der jeweilige Versuchsplan.

Die römische Zahl erscheint dabei als Index zur Basis des Versuchsplans. Anhand des Lösungstyps kann der Anwender erkennen, welche Arten von Effekten miteinander vermengt sind und welche nicht /HOL95/.

Eine Übersicht der unterschiedlichen Lösungstypen ist in Tab. 5.2 aufgeführt. Aus ihr lassen sich die Trennung der Effekte, der Grad der Vernachlässigung von Faktor-Wechselwirkungen (FWW) und der Grad der Vermengung ablesen.

Lösungs- -typ	Effekte			Anzahl der Versuche					Kommentar
	getrennt	vermengt	vernachlässigt	4	8	16	32	64	
				Anzahl der Faktoren					
III	HE von HE	HE mit 2-FWW	2-FWW und höhere	3	5...7	9...15	17...31	33...63	<ul style="list-style-type: none"> • Hochvermischung • hohe Gefahr der Fehlinterpretation • Anwendung: Aussieben
IV	HE von 2-FWW	HE mit 3-FWW, 2-FWW mit 2-FWW	3-FWW und höhere		4	6...8	7...16	9...32	<ul style="list-style-type: none"> • hoher Wirkungsgrad • HE getrennt • 2-FWW getrennt
V	2-FWW von 2-FWW	HE mit 4-FWW, 2-FWW mit 3-FWW	3-FWW und höhere			5		8	<ul style="list-style-type: none"> • reduzierter Aufwand zum vollfaktoriellen Versuch
VI	2-FWW von 3-FWW	HE mit 5-FWW, 2-FWW mit 4-FWW, 3-FWW mit 3-FWW	4-FWW und höhere				6		<ul style="list-style-type: none"> • höhere Wechselwirkungen sind untersuchbar
VII	3-FWW von 3-FWW	HE mit 6-FWW, 2-FWW mit 5-FWW, 3-FWW mit 4-FWW	4-FWW und höhere					7	

Tab. 5.2: Lösungstypen von teilfaktoriellen Versuchsplänen /SCH97/

Versuchspläne vom Lösungstyp III erlauben es, die größte Anzahl an Faktoren in einen Versuchsplan einzubauen. Allerdings sind diese Pläne mit größter Sorgfalt zu behandeln, da die Haupteffekte, wie Tab. 5.2 zeigt, mit den Zweifaktor-Wechselwirkungen vermengt sind. Dieser Typus von Versuchsplänen trägt in der Literatur die Bezeichnung „Hochvermischungplan“³.

Durch die Gefahr der Fehlinterpretation dürfen sie nur angewendet werden, wenn bestimmte Wechselwirkungen von vornherein nicht relevant sind, oder weil aus einer Vielzahl von Faktoren nur wenige Starke vorliegen. Die erhaltenen Ergebnisse sind auf jeden Fall durch weitere Untersuchungen abzusichern.

Haupteffekte getrennt von Zweifach-Wechselwirkungen lassen sich mit Versuchsplänen des Lösungstyps IV und V untersuchen. Werden die Spalten beim Lösungstyp V geschickt belegt, können sogar die Effekte von Zweifach-Wechselwirkungen in die Auswertung mit einfließen. Mit diesen Versuchsplänen (2^{5-1} , 2^{6-2} , 2^{7-3} , 2^{8-4} /ORT02, KLP98, PET91b, SCH97/) wird ein gutes Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand erreicht.

Die Untersuchung weiterer Wechselwirkungen kann mit Versuchsplänen höherer Lösungstypen (V, VI, VII) bis hin zum vollfaktoriellen Versuch durchgeführt werden, was jedoch mit dem bereits angesprochenen steigendem Versuchsaufwand bezahlt wird.

³ Taguchi propagiert den Einsatz dieser Pläne, um möglichst mit wenigen Versuchen viele Faktoren zu prüfen.

In Abb. 5.12 wird beispielhaft die Einführung eines vierten Versuchsparameters (D) in dem aus Abb. 5.10 schon bekannten vollfaktoriellen 2^3 -Versuchsplan gezeigt. Dieser vierte Versuchsparameter kann dadurch eingeführt werden, daß die Wechselwirkungen höherer Ordnung vernachlässigbar sind. Es wird angenommen, daß die Wechselwirkung ABC gleich null ist. Aus diesem Grund kann die Wechselwirkungsspalte ABC für den neuen Versuchsparameter genutzt werden. Beim Erstellen fängt man dementsprechend immer mit der höchsten Wechselwirkung an, um einen neuen Versuchsparameter einzuführen.

Nicht nur in der Matrix der unabhängigen Variablen sondern auch in der Planmatrix muß dieser Parameter enthalten sein. Demnach lassen sich anstelle von drei Variablen (A, B, C) nun vier Variablen (A, B, C, D) mit acht Versuchen untersuchen /HOL95/.

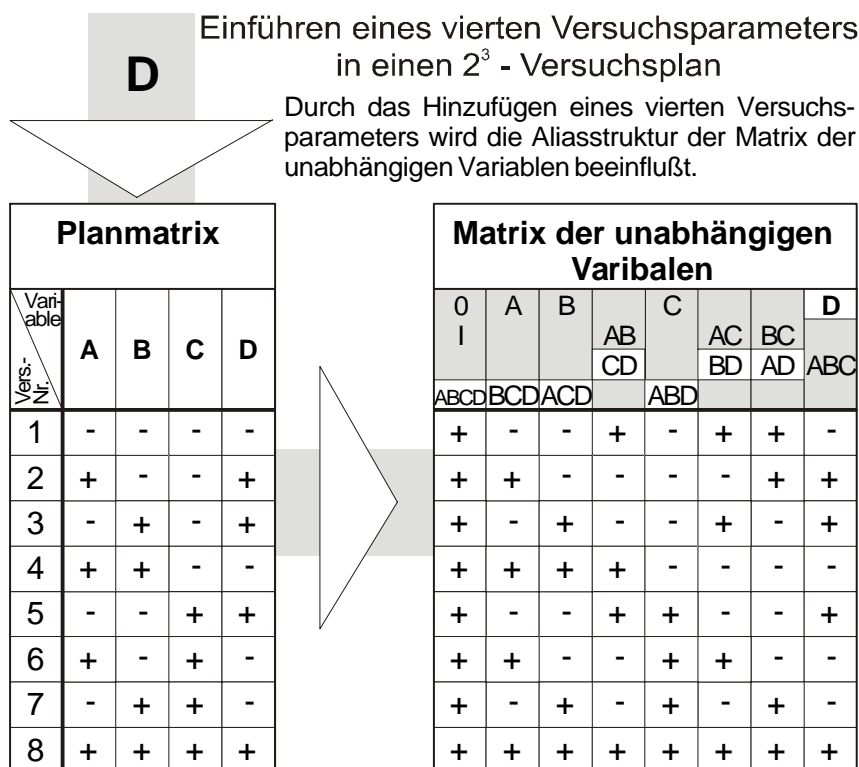


Abb. 5.12: Entstehung eines teilfaktoriellen 2^{4-1} -Versuchsplans

Somit ist ein neuer Versuchsplan entstanden, der sich 2^{4-1} -Teilfaktorenplan nennt. Um mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan vier Variablen zu bestimmen, wären 16 Versuche notwendig gewesen. Jetzt wurde aber nur ein halber 2^4 -Versuchsplan benutzt, d.h. $\frac{1}{2} \cdot 2^4 = 2^{4-1}$ -Teilfaktorenplan.

Es sind durch den Versuchsparameter D sieben neue Wechselwirkungen entstanden. Die vier Hauptwirkungen (A, B, C, D) sind dadurch mit Dreifaktor-Wechselwirkungen vermengt worden. Weitere Vermengungen sind ebenfalls bei den Zweifaktor-Wechselwirkungen aufgetreten, jedoch nur untereinander. Diese Vermengung wird in der Literatur mit dem Begriff „Aliasse“ bezeichnet.

Werden nun weitere Wechselwirkungen vernachlässigt, lassen sich zusätzliche Versuchsparameter in den Versuchsplan integrieren, z.B. wenn AB nicht vorhanden ist, kann eine neue Variable (E) hinzugefügt werden.

Des weiteren gilt dies für das Vermengen von AC mit der Variablen F und BC mit der Variablen G. Man erhält durch dieses Vorgehen 2^{5-2} -, 2^{6-3} - und 2^{7-4} -Teilfaktorenpläne /SCH97/.

Das Prinzip der Vermengung kann bis zur vollständigen Sättigung eines Versuchsplans durchgeführt werden. Eine solche vollständige Sättigung tritt bei einem 2^{7-4} -Versuchsplan auf, da nur sieben Variablen bei acht Versuchen Berücksichtigung finden /FLA95/.

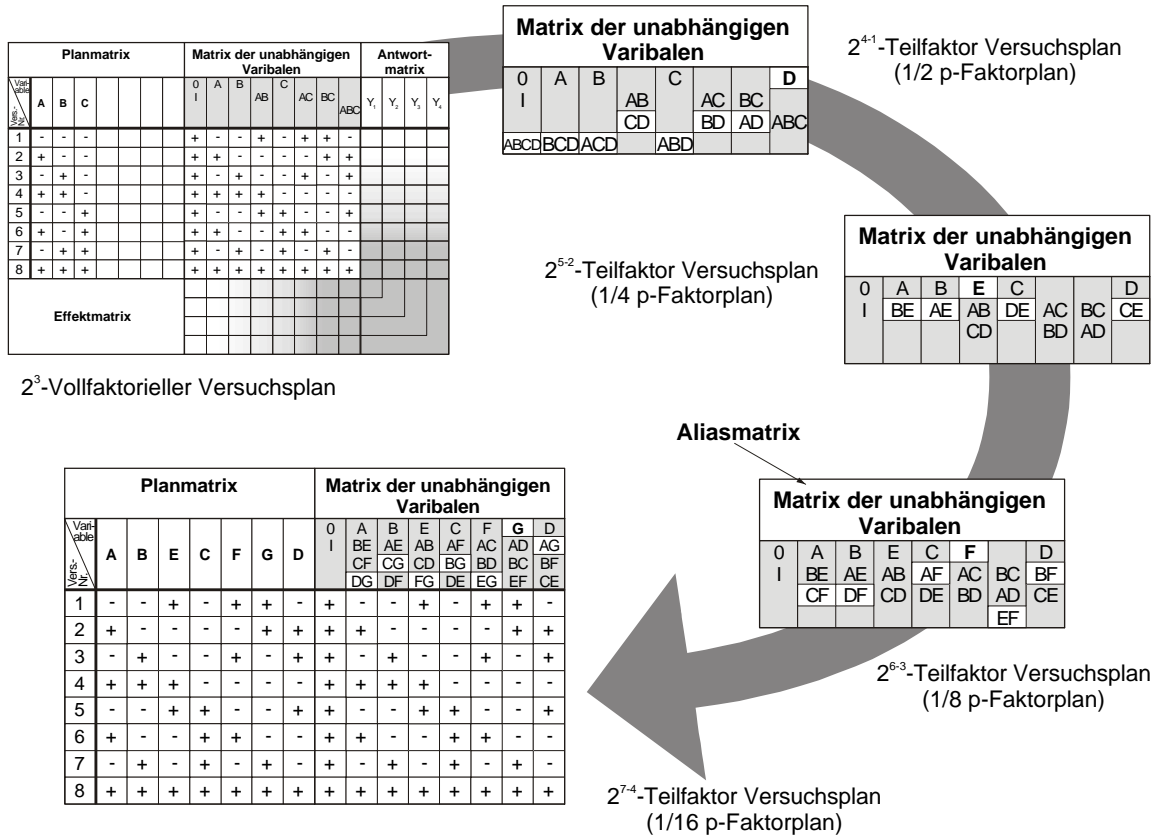


Abb. 5.13: Generierung von teilfaktoriellen Versuchspläne

Abb. 5.13 zeigt, wie die weiteren angesprochenen Versuchsparameter in einen 2^3 -Versuchsplan eingeführt werden und welche Auswirkungen dies auf die „Planmatrix“ sowie die „Matrix der unabhängigen Variablen“ (auch Aliasmatrix genannt) hat. Allgemein ergibt sich für k-Faktoren, von denen p-Faktoren zusätzlich durch Vermengen eingeführt wurden, die Anzahl der Versuchspunkte „n“ zu:

$$n = \frac{2^k}{2^p} = 2^{k-p}. \quad (5.12)$$

Diese Pläne werden dementsprechend auch noch $\frac{1}{2}$ p-Teilfaktorpläne genannt, weil nur $\frac{1}{2}$ p Versuche des vollen Faktorenplans ausgeführt werden müssen /SCH97/.

Detaillierte Konstruktionsbeschreibungen von teilfaktoriellen Versuchsplänen sind in /BXO61a, BOX61b, BOX78, BOX87, MON91, SCH97, PET91b/ enthalten.

5.2.1.3 Plackett-Burman Versuchspläne

Mit Screening-Versuchen wird geprüft, ob eine Signifikanz voraussichtlicher Einflußgrößen vorliegt. Bei dieser Vorgehensweise gelangt man schnell an die wirtschaftliche und technische Effektivität von üblichen 2^k - oder 2^{k-p} -Teilfaktorenversuchsplänen, da der experimentelle Versuchsaufwand zu stark ansteigt.

1946 wurden sogenannte Screening-Designs von *Plackett* und *Burman* /PLA46/ auf die Art erweitert, in dem sie ausgehend von 2^{k-p} -Teilfaktorenversuchsplänen eine beträchtliche Reduzierung des Versuchsaufwand geschafft haben. Sie zählen zu den bekanntesten Siebplänen und sind aufgrund ihrer Vermengungsstruktur hochvermengte Versuchspläne vom Lösungstyp III /DRE93/. Die Reduzierung von *Plackett-Burman* Plänen kann im Extremfall bei „k“ zu prüfenden Faktoren auf nur $k + 1$ Versuche⁴ minimiert werden. Bleiben im Versuchsplan Spalten leer, können diese zur Bestimmung der Versuchsstreuung herangezogen werden /HRT74, SPE91/.

Es ist ausdrücklich zu betonen, daß *Plackett-Burman*-Versuchspläne nur für die rein linearen Modelle Gültigkeit besitzen. Dies bedeutet: In der Originalform erfassen *Plackett-Burman*-Versuchspläne keine Wechselwirkungen bzw. sie sind nur dann anwendbar, wenn keine Wechselwirkungseffekte vorhanden sind. Alle Haupteffekte können mit der selben Genauigkeit erfaßt werden. Aufgrund der Orthogonalität ist keine Vermengung mehrerer Haupteffekte vorhanden, sondern nur eine Vermengung von Haupteffekten und Wechselwirkungseffekten. Wenn man die Versuchspläne einmal in Originalform (Basic Design) und einmal mit umgekehrten Vorzeichen (Fold-over oder auch Faltung genannt) durchführt, daß sogenannte Doppelpläne (Reflected Design /BOX78, BOX87, MON91/) entstehen /DRE93, SPE91/, lassen sich die Haupteffekte unvermengt erkennen. Diese Doppelpläne haben dann den Lösungstyp IV. Teilweise lassen sich hiermit auch Wechselwirkungen erkennen, diese sind jedoch nicht berechenbar /HRT74/.

Als Vorteil gegenüber den zuvor behandelten teilfaktoriellen Versuchsplänen ist die feinere Abstufung des Versuchsumfangs, der in *Tab. 5.3* aufgeführt ist, anzuführen. Es ist ersichtlich, daß die Anzahl des Versuchsumfangs nur ein Mehrfaches von vier beträgt, wobei eine Konstruktion von *Plackett-Burman* Plänen für vier bis 100 Versuchen möglich ist /PLA46/, d.h. mit 100 Versuche besteht theoretisch die Möglichkeit, 99 Faktoren zu untersuchen /PET91b, CER95/. Daher bietet sich die Anwendung von *Plackett-Burman* Plänen in Fällen an, in denen die Realisierung des nächst größeren teilfaktoriellen Versuchsplans mit einem nicht vertretbaren höheren Aufwand verbunden wäre /DRE93/. Den Plänen mit $n = 8$, $n = 16$ und $n = 32$ Versuchen sollten allerdings teilfaktorielle Versuchspläne vorgezogen werden, da hierfür die Vermengungsstruktur bekannt ist.

Methode	Versuchsumfang						
	4	8	16	32	64	128	...
teilkfaktorielle Versuche	4	8	16	32	64	128	...
Plackett-Burman	4	8	12	16	20	24	...

Tab. 5.3: Gegenüberstellung des Versuchsumfangs

Die Generierung⁵ von *Plackett-Burman* Plänen erfolgt durch zyklisches Verschieben einer vorgegebenen Ausgangszeile mit $n-1$ Elementen, die allgemein als Kolonne bezeichnet wird.

⁴ Besser ist jedoch $k + 4$.

⁵ Das Generierungsprinzip beruht auf der Verwendung sogenannter Hadamard-Matrixen /STC98/.

Für die erste Kolonne sind die Faktorstufen vorgegeben und in *Tab. 5.4* für $n = 8$ bis $n = 24$ Versuche aufgelistet. Analog dazu werden $n-2$ weitere Zeilen erstellt. Abschließend wird die letzte Zeile komplett mit Minuszeichen angefügt /DRE93/.

n	Belegung der ersten Kolonne																						
8	+	+	+	-	+	-	-																
12	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-												
16	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-								
20	+	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-						
24	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-

Tab. 5.4: Generierungsschemata für Plackett-Burman Pläne /PLA46/

In *Abb. 5.14* ist ein *Plackett-Burman* Versuchsplan exemplarisch für zwölf Versuche dargestellt. Auflistungen von Plänen und Arbeitsblättern zu *Plackett-Burman* Plänen sind in /HRT74, DRE93, PET91b-c/ enthalten.

Nr	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
1	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-
2	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+
3	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+
4	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-
5	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+
6	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+
7	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+
8	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-
9	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
10	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-
11	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 5.14: Plackett-Burmann-Versuchsplan für zwölf Versuche

Bevorzugt werden *Plackett-Burman* Versuchspläne nur für zwei Einstellungen der Einflußgrößen gebildet /SCH97/. Es existieren aber *Plackett-Burman* Versuchspläne, die eine Untersuchung für mehr als zwei Einstellung zulassen /AND75/.

Diejenigen Versuchspläne die mehr als zwei Niveaus beschreiben sind von hoher Rechenleistung geprägt und daher nur zu empfehlen, wenn Computer den Rechenaufwand abnehmen können. Anzumerken ist bei dieser Art, daß auch hier keine Wechselwirkungen vorhanden sein dürfen. Somit liegt es nahe, daß diese Plänen nur sehr eingeschränkte Anwendungsgebiete abdecken /PET91b, KLP98/.

5.2.1.4 Zentralpunktversuche

Zur Überprüfung der Linearität (linearer Ansatz) bzw. der Antwortfläche bei fraktionellen 2^k - bzw. 2^{k-p} -Versuchsplänen lassen sich Zentralpunktversuche (ZP) in den Versuchsplan einbauen. Sie stellen somit das Bindeglied zwischen Versuchsplänen erster und zweiter Ordnung dar.

Derartige Pläne gelten als die „kleinsten“ nichtlinearen Pläne, also Pläne zweiter Ordnung. Nicht selten ist bei zweistufigen Faktoren ein gekrümmter Kufenverlauf oder sogar ein Extremum im Untersuchungsgebiet vorhanden. Unter Zuhilfenahme des Zentralpunktes sind dann Abweichungen vom linearen Ansatz feststellbar, wie *Abb. 5.15* andeutet.

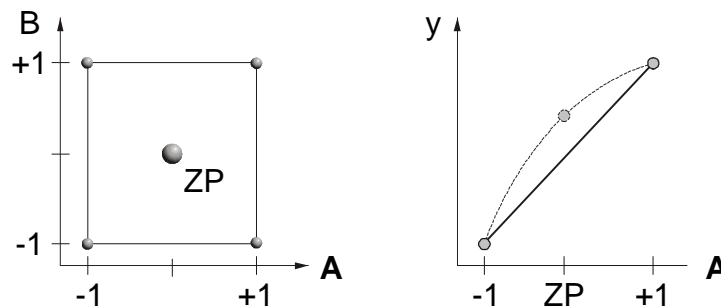


Abb. 5.15: Zentralpunktversuch

Ein Zentralpunktversuch wird realisiert, indem bei einem 2^k - oder 2^{k-p} - Plan ein Punkt, bestehend aus den mittleren Einstellungen aller Faktoren, hinzugefügt wird. Werden die Versuche im Zentralpunkt mehrfach durchgeführt, ist neben der Bestimmung der linearen Abweichung, die auch Mittelwertabweichung (MA) genannt wird, die Berechnung der Versuchsstreuung möglich /SCH97/. Die Mittelwertabweichung stellt hierbei eine Schätzung für die Abweichung der Approximation mit y_{ZP} als Zielgröße im Zentralpunkt und den verbleibenden y_i für die Eckpunkte dar.

Zur Ermittlung der Mittelwertabweichung ist in *Scheffler* /SCH97/ die Beziehung

$$MA = \frac{1}{5}(y_{ZP} + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 5y_{ZP}) \quad (5.13)$$

für einen 2^2 -Plan mit einmaliger Realisierung sowie die Beziehung

$$MA = \frac{1}{10}(y_{ZP1} + y_{ZP2} + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 - 5y_{ZP1} - 5y_{ZP2}) \quad (5.14)$$

für einen 2^3 -Plan mit zweimaliger Realisierung im Zentralpunkt aufgeführt.

Anhand des Vergleichs der MA-Effekte sowie der ermittelten Effekte für die Einflußgrößen ist eine grobe Erfassung der tatsächlichen Antwortflächenverhältnisse möglich.

Für die angesprochenen Versuchspläne mit zwei bzw. drei Faktoren ist es jedoch nicht möglich, eine Regressionsgleichung zweiter Ordnung zu erstellen, da die Versuchsanzahl kleiner als die der notwendigen Regressionskoeffizienten ist /PET91b, SCH97/.

5.2.2 Versuchspläne 2. Ordnung

Bei der Beurteilung statistischer Versuchspläne erster Ordnung wird die Antwort mit einfachen grafischen Elementen in Form von Geraden, Ebenen und Hyperebenen beschrieben. Diese Beschreibungsformen können nur mit einem linearen Regressionsmodell, sprich erster Ordnung, realisiert werden. Für viele Versuchsszenarien ist diese mathematische Näherung jedoch nicht ausreichend, d.h. es liegen oft gekrümmte Antwortflächen, sogenannte Response Surfaces, vor /PET91b/. Aus diesem Grund wird zur Auswertung meistens ein Regressionspolynom zweiten Grades der Form

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=k-1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 \quad (5.15)$$

herangezogen, welches auch quadratische Abhängigkeiten berücksichtigt /DRE93/.

Um derartige Regressionspolynome auswerten zu können, erfordert es Versuchspläne zweiter Ordnung, die einen höheren Versuchsaufwand als die zuvor besprochenen Versuchspläne erster Ordnung benötigen. Daher wird der Experimentator bestrebt sein, die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren auf ein Minimum zu reduzieren, so daß nur noch signifikante Einflußfaktoren Berücksichtigung finden.

Liegen nun viele Faktoren vor, wird im Normalfall mit einem Versuchsplan erster Ordnung in Form eines „Screenings“ begonnen, um so die wesentlichen Faktoren herauszusieben. Anschließend wird dann, um den Optimalbereich zu finden bzw. empirische Modelle aufzustellen mit Versuchsplänen zweiter Ordnung weitergearbeitet, d.h. die Untersuchungen werden im Optimalgebiet fortgesetzt. Dieses Vorgehen spiegelt eine sequentielle Vorgehensweise wieder.

Bestehen jedoch gute Vorkenntnisse über das durchzuführende Experiment bzw. über die Einflußgrößen, kann auch direkt mit einem Versuchsplan zweiter Ordnung begonnen werden.

5.2.2.1 Vollständige 3^k -Versuchspläne

Im Vergleich zu den bisher beschriebenen Plänen, erlauben es 3^k -Versuchspläne (completely 3^k factorial designs), nichtlineare Zusammenhänge zu beschreiben. Mindestens drei Stufen sind zwingend notwendig, um ein Regressionsmodell zweiter Ordnung lösen zu können. Für noch genauere Ergebnisse kann es sogar erforderlich sein, vier oder fünf Stufenpläne aufzustellen. Häufig ist jedoch zu beobachten, daß nur drei Faktorstufen realisierbar sind bzw. daß technologische Bedingungen dies erzwingen oder daß durch den Auftraggeber die Stufenwahl im Vorfeld reduziert wurde /SCH97/.

Die 3^k -Versuchspläne weisen eine analoge Nomenklatur zu den bereits beschriebenen Zweistufenplänen auf, d.h. alle möglichen Stufenkombinationen sind im Versuchsplan vertreten. Dabei werden die Stufen „-1“ und „+1“ symmetrisch um die Stufe „0“ angeordnet /PET91b/.

Beim zweidimensionalen Fall sind die Versuchspunkte im Zentralpunkt (nullte Sphäre) sowie auf zwei konzentrischen Kreisen (erste und zweite Sphäre) angeordnet, wobei die Punkte des äußeren Kreises den Versuchspunkten einer 2^2 -Anordnung entsprechen, wie in *Abb. 5.16* erkennbar. Liegen drei Faktoren vor, sind die Punkte ähnlich angeordnet, im Zentrum (nullte Sphäre) und auf drei konzentrischen Kugeloberflächen (erste bis dritte Sphäre). Punkte, die auf der äußeren Kugel positioniert sind, sind identisch mit denen einer 2^3 -Anordnung. Durch die Hinzunahme von weiteren Faktoren, kommen zusätzliche Sphären hinzu /SCH97/.

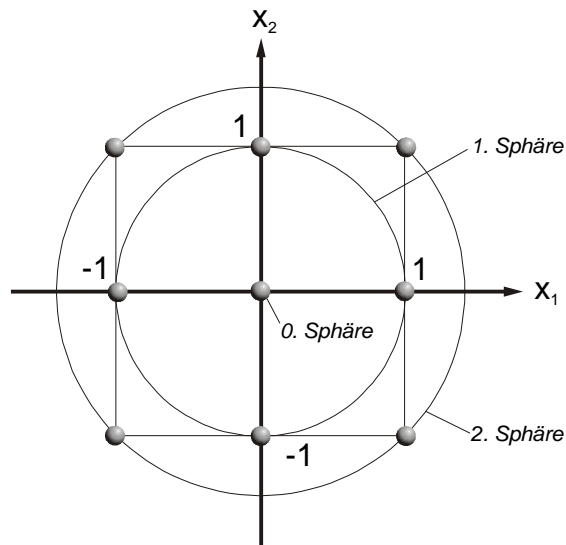


Abb. 5.16: Vollständiger symmetrischer 3^2 -Versuchsplan

Damit eine unkorrelierte Bestimmung der Regressionskoeffizienten durchgeführt werden kann, müssen Versuchspläne unter anderem der Forderung nach Orthogonalität genügen. Vollfaktorielle 2^k -Pläne erfüllen diese Voraussetzung. Bei ihnen ist die spaltenweise Addition der Kontrastkoeffizienten in der „Matrix der unabhängigen Variablen“ null, d.h. für die Einflußgrößen

$$\sum x_i = 0 \tag{5.16}$$

und für die Wechselwirkungen

$$\sum x_i x_j = 0. \tag{5.17}$$

Hingegen trifft diese Forderung bei teilfaktoriellen 2^{k-p} -Plänen nur für nichtvermengte Koeffizienten zu /MAY97/.

Auch für vollfaktorielle 3^k -Versuchspläne gilt diese Voraussetzung. Dies wird durch die Transformation

$$x_i^2 = \frac{2}{3} \tag{5.18}$$

erzielt, so daß für die Spalten mit quadratischen Elementen entsprechend

$$\sum \left(x_i^2 - \frac{2}{3} \right) = 0 \quad (5.19)$$

gilt /SCH97/.

Exemplarisch ist in *Abb. 5.17* die „Matrix der unabhängigen Variablen“ für einen 3^2 -Plan dargestellt, die die zuvor beschriebenen Forderungen nochmals zeigt.

Nr	$x_0(I)$	x_1	x_2	x_1x_2	$x_1^2-2/3$	$x_2^2-2/3$
1	1	-1	-1	+1	+1/3	+1/3
2	1	0	-1	0	-2/3	+1/3
3	1	+1	-1	-1	+1/3	+1/3
4	1	-1	0	0	+1/3	-2/3
5	1	0	0	0	-2/3	-2/3
6	1	+1	0	0	+1/3	-2/3
7	1	-1	+1	-1	+1/3	+1/3
8	1	0	+1	0	-2/3	+1/3
9	1	+1	+1	+1	+1/3	+1/3

Abb. 5.17: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines 3^2 -Plans

Da ab vier Faktoren die Versuchsanzahl bereits sehr hoch ist, wie *Tab. 5.5* verdeutlicht, ist der Einsatz von mehr Faktoren kaum noch umsetzbar. Durch den hohen Versuchsaufwand liegt das Bestreben nahe, Versuchspläne zu gestalten, die eine Reduzierung der Versuche bei gleichem Informationsgehalt beinhalten.

Anzahl Faktoren	Anzahl Versuche	Anzahl Koeffizienten für Polynome 2. Grades	Redundanzfaktor ⁶
1	3	3	1
2	9	6	1,5
3	27	10	2,7
4	81	15	5,4
5	243	21	11,6
6	729	28	26

Tab. 5.5: Gegenüberstellung Faktoren, Versuchsanzahl, benötigte Koeffizienten und Redundanzfaktor bei 3^k -Versuchsplänen /SCH97, PET91b/

5.2.2.2 3^{k-p} -Teilfaktorenpläne

Die Forderung, einen Versuchsplan zu gestalten, der eine Reduzierung der Versuche bei gleichem Informationsgehalt aufweist, wird bei 3^{k-p} -Faktorenversuchsplänen (3^{k-p} fractional factorial designs) nur teilweise erfüllt. Teilfaktorielle Versuchspläne zweiter Ordnung lassen sich nach dem gleichen Prinzip der Vermengung von Effekten reduzieren, wie dies bei teilfaktoriellen Versuchspläne erster Ordnung bereits angedeutet wurde /MCL84/.

⁶ Der Redundanzfaktor gibt das Verhältnis zwischen den durchzuführenden Versuchen und den zu bestimmenden Koeffizienten an.

So kann ein 3^3 -Faktorenplan mit 27 Versuchen auf einen 3^{3-1} -Teilfaktorenplan mit neun Versuchen verringert werden. Diese neun Versuche reichen jedoch nicht aus, um alle erforderlichen Koeffizienten des quadratischen Modells zu berechnen.

Bei einem 3^{4-1} -Teilfaktorenplan, der 27 Versuche umfaßt, ist gegenüber einem vollständigen 3^4 -Versuchsplan mit 81 Versuchen eine gewaltige Versuchsanzahlreduzierung zu verzeichnen. Jedoch geht auch hier mit der Reduzierung der Anzahl der Versuche eine Reduzierung des Informationsgehaltes einher. Je höher die Faktorenanzahl gewählt wird, je verträglicher werden die Informationsverluste, aber die Anzahl der Versuche bleibt in einem unverträglichen, nicht praxisrelevanten Maß bestehen /SCH97/.

Aus diesem Grund kann den teilfaktoriellen Versuchsplänen zweiter Ordnung keine große Bedeutung für die praktische Anwendung bescheinigt werden /PET91b, SCH97/.

5.2.2.3 Gemischte 2^k3^k -Faktorenpläne

Eine Kombination von 2^k - und 3^k -Faktorenplänen ergibt vollständige 2^k3^k -Faktorenversuchspläne, wie sie von *Conner* und *Young* /CON84/ für das US National Bureau of Standards beschrieben wurden. Gemischte Pläne erweisen sich zum Teil als sehr effizient, obwohl nicht unbedingt alle Schätzungen der Haupteffekte orthogonal sind /STC98/.

Sie finden in der Praxis dann Anwendung, wenn dem Experimentator bekannt ist, daß einige Faktoren keine quadratischen Effekte besitzen bzw. keine quadratischen Effekte erwartet werden oder einige Faktoren mit zwei Niveaustufen eingestellt werden können. Allerdings wird von den weiteren zu untersuchenden Variablen eine quadratische Abhängigkeit erwartet /PET91b, STC98/.

Zudem ist es denkbar, teilfaktorielle-gemischtelementige Versuchspläne aufzustellen, so daß etwa ein $2^{k-p}3^k$ -Plan entsteht. Beispielsweise könnte anstatt eines 2^33^2 -Plans mit 72 Versuchen ein $2^{3-1}3^2$ -Plan mit 36 Versuchen erzeugt werden. In diesem Fall treten bei dem 2^{3-1} -Plan die im Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen Vermengungen auf, die in der Praxis nicht gewünscht sind. Aus dieser Prämisse erfolgt die Anwendung eines reduzierten 2^k3^k -Versuchsplans in der Praxis nur höchst selten /SCH97/.

5.2.2.4 Box-Behnken Versuchspläne

Die von *G. E. P. Box* und *D. W. Behnken* /BOX60/ entwickelten *Box-Behnken* Versuchspläne stellen, ähnlich wie 3^{k-p} -Versuchspläne, reduzierte 3^k -Pläne dar. Im Gegensatz zu 3^{k-p} -Plänen sind sie jedoch so optimiert, daß die Zweifaktor-Wechselwirkungen erfaßt werden können, d.h. sie besitzen die Auflösung V, bei der Haupteffekte, Zweifaktor-Wechselwirkungen und quadratische Effekte unvermengt berechenbar sind.

Box und *Behnken* teilen dazu den Versuchsraum in einzelne Sphären auf. *Tab. 5.6* enthält z.B. die Besetzung der einzelnen Sphären eines 3^3 -Plans. Weiterhin sind die Faktorstufenkombinationen der drei Faktoren, die auf den Stufen „-1“, „0“ und „+1“ variiert werden, aufgeschlüsselt.

Als nullte Sphäre ist der Zentral- bzw. Mittelpunkt des Versuchsraums aufgeführt. Sechs Flächenmittelpunkte, die auf inneren Kugeloberflächen liegen, bilden die erste Sphäre. Zur zweiten Sphäre gehören dementsprechend zwölf Kantenmittelpunkte, die auf konzentrischen äußeren Kugeloberflächen angeordnet sind. Die dritte Sphäre bildet acht Würfelpunkte, die ebenfalls auf einer konzentrischen äußeren Kugeloberfläche angeordnet sind /PET91b/.

Sphäre	Anzahl der Versuche	Faktorstufenkombinationen		
0	$1 \cdot 2^{3-3} = 1$	0	0	0
1	$3 \cdot 2^{3-2} = 6$	0	0	-1
		0	0	1
		0	-1	0
		0	1	0
		-1	0	0
		1	0	0
2	$3 \cdot 2^{3-1} = 12$	0	-1	-1
		0	1	-1
		0	-1	1
		0	1	1
		-1	0	-1
		1	0	-1
		-1	0	1
		1	0	1
		-1	-1	0
		1	-1	0
		-1	1	0
		1	1	0
3	$1 \cdot 2^3 = 8$	-1	-1	-1
		1	-1	-1
		-1	1	-1
		1	1	-1
		-1	-1	1
		1	-1	1
		-1	1	1
		1	1	1

Tab. 5.6: Besetzung der Sphären bei einem vollständigen 3^3 -Versuchsplan /PET91b/

Die Konstruktion der *Box-Behnken* Pläne erfolgt durch Elimination kompletter Sphären oder Teilsphären aus den 3^k -Plänen unter (beinahe) vollständiger Erhaltung der Orthogonalität, wobei zu beachten ist, daß die Versuchspunkte nicht auf den Ecken des gedachten Versuchsraums liegen.

Die Überbestimmtheit hinsichtlich der Ermittlung der Koeffizienten einer quadratischen Regressionsgleichung im Vergleich zu den 3^k -Plänen wird durch diese Reduktion deutlich sichtbar. Somit werden praxistaugliche Redundanzfaktoren erreicht.

Bei dem angeführten 3^3 -Plan werden daher die erste Sphäre mit sechs Versuchspunkten und die dritte Sphäre mit acht Versuchspunkten weggelassen. Die Anzahl der Faktorstufenkombinationen reduziert sich somit von 27 auf 13. Zur statistischen Absicherung und zur Beibehaltung der Orthogonalität werden zwei weitere Zentralpunkte hinzugefügt, so daß insgesamt 15 Versuche durchzuführen sind. In Abb. 5.18 ist der entsprechende *Box-Behnken* Plan für drei Faktoren dargestellt.

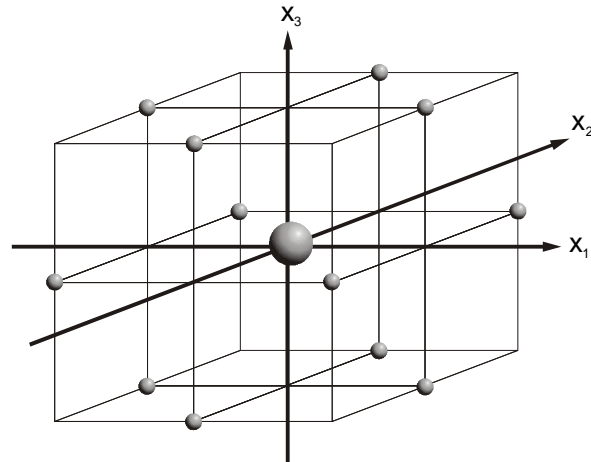


Abb. 5.18: Box-Behnken Versuchsplan für drei Faktoren

Auch bei den *Box-Behnken* Plänen gilt die Prämisse der Orthogonalität, d.h. für alle linearen Glieder wird

$$\sum x_i = 0 \tag{5.20}$$

und für alle gemischt-elementigen Glieder

$$\sum x_{ij} = 0, \tag{5.21}$$

vollkommen erfüllt.

Soll die Orthogonalitätsbedingung ebenfalls für alle quadratischen Glieder

$$\sum x_i^2 = 0 \tag{5.22}$$

gelten, so müssen eine bestimmte Anzahl von Wiederholungsversuchen im Zentralpunkt (nullte Sphäre) realisiert werden.

Durch die Einführung von

$$x_i^* = x_i^2 - \frac{\sum x_i^2}{N} \tag{5.23}$$

kann die benötigte Anzahl der Zentralpunktversuche an Stelle von x_i^2 bestimmt werden. In dieser Beziehung steht N für alle Versuche, wobei für die Orthogonalitätsbedingung

$$\sum x_i^* = 0 \tag{5.24}$$

erreicht werden muß.

In diesem Fall sind für den Zentralpunkt drei Realisierungen vorgesehen, so daß die Forderung für Orthogonalität der quadratischen Glieder mit

$$\sum \left(x_i^2 - \frac{8}{15} \right) = 0 \quad (5.25)$$

erfüllt ist /PET91b/.

In *Abb. 5.19* ist der *Box-Behnken* Plan für drei Faktoren in Form der „Matrix der unabhängigen Variablen“ aufgelistet. Weitere Pläne für $k = 2-7$, $k = 9-12$ und $k = 16$ sind in /BOX60, SDT92/ abgedruckt. Ebenso sind dort die Berechnungsvorschriften der notwendigen Koeffizienten zur Bildung von Regressionspolynomen zweiter Ordnung verzeichnet.

Nr	x_0 (I)	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1^2-8/15$	$x_2^2-8/15$	$x_3^2-8/15$
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+7/15	+7/15	-8/15
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+7/15	+7/15	-8/15
3	+1	-1	+1	0	+1	0	0	+7/15	+7/15	-8/15
4	+1	-1	-1	0	-1	0	0	+7/15	+7/15	-8/15
5	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+7/15	-8/15	+7/15
6	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+7/15	-8/15	+7/15
7	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+7/15	-8/15	+7/15
8	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+7/15	-8/15	+7/15
9	+1	0	+1	+1	0	0	+1	-8/15	+7/15	+7/15
10	+1	0	+1	-1	0	0	-1	-8/15	+7/15	+7/15
11	+1	0	-1	+1	0	0	-1	-8/15	+7/15	+7/15
12	+1	0	-1	-1	0	0	+1	-8/15	+7/15	+7/15
13	+1	0	0	0	0	0	0	-8/15	-8/15	-8/15
14	+1	0	0	0	0	0	0	-8/15	-8/15	-8/15
15	+1	0	0	0	0	0	0	-8/15	-8/15	-8/15

Abb. 5.19: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines *Box-Behnken* Plans für drei Faktoren

Für praktische Belange wird diese Art von Versuchsplänen dann interessant, wenn die Versuchseinstellungen in den Eckpunkten bzw. in den Sternpunkten bei zentral zusammengesetzten Versuchsplänen durch z.B. technische Restriktionen zu extrem werden und sich somit die Versuchseinstellungen in den jeweiligen Kantenmitten als wesentlich angenehmer darstellen oder die Eckpunkte schlichtweg nicht realisierbar sind.

Bei diesen *Box-Behnken* Plänen handelt es sich um sogenannte drehbare Versuchspläne. Dies bedeutet, daß die Präzision der Antwort, die Varianz, an allen zum Zentrum äquidistanten Punkten richtungsunabhängig gleich groß ist (sphärische Varianzfunktion) /BOX60, SCH97/.

Kleppmann /KLP98/ empfiehlt, *Box-Behnken* Versuchspläne nur in Ausnahmefällen einzusetzen, d.h. nur für drei oder vier Faktoren, wenn die Anzahl der Faktorniveaus durch die bereits angesprochenen technischen Gründe auf drei Einstellungen begrenzt ist. Weiterhin wirkt sich nachteilig aus, daß *Box-Behnken* Pläne nur für quantitative Faktoren geeignet sind /CER95/.

5.2.2.5 Zentral zusammengesetzte Versuchspläne

G. E. P. Box und K. M. Wilson entwickelten 1951 /BOX51/ sogenannte zentral zusammengesetzte Versuchspläne (central composite designs, kurz CCD). Während mit *Box-Behnken* Plänen (vgl. Kapitel 5.2.2.4) nur drei Faktoreinstellungen je Faktor analysiert werden können, erlauben die zentral zusammengesetzten Pläne die Betrachtung von fünf Faktorstufen. Hierbei handelt es sich um stark reduzierte 5^k -Versuchspläne, wie Abb. 5.20 zeigt /PET91b, SCH97, CER95/.

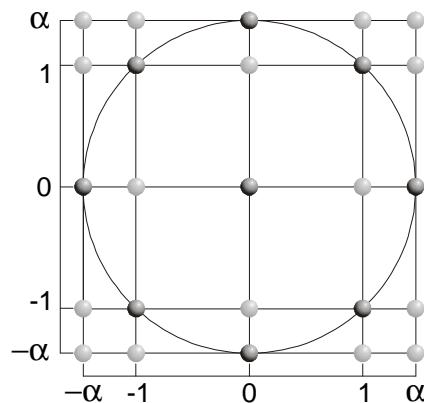


Abb. 5.20: Zentral zusammengesetzter Plan vs. 5^k -Plan /SCH97/

Ausgehend von einem vollständigen 2^k - oder einem teilfaktoriellen 2^{k-p} -Versuchsplan⁷ werden zusätzlich zu einem Zentralpunkt noch $2 \cdot k$ Sternpunkte, die für jede Achse symmetrisch zum Zentralpunkt mit einem Abstand von $\pm\alpha$ liegen, benötigt /OTO97/. Insgesamt enthält die Konstruktion also

$$n = n_W + n_{St} + n_{ZP} \quad (5.26)$$

Versuchspunkte.

Im einzelnen verbergen sich dahinter

- $n_W = 2^k$ - oder 2^{k-p} -Würfelpunktversuche,
 - $n_{St} = 2 \cdot k$ Sternpunktversuche
- sowie
- $n_{ZP} =$ ein Zentralpunkt /PET91b, DRE93, SCH97/.

Werden unterschiedliche Versuchsdurchführungen realisiert, die sich in den Indizes r_i widerspiegeln, so ergibt sich die Gesamtanzahl der Versuchspunkte zu

$$N = r_W \cdot n_W + r_{St} \cdot n_{St} + r_{ZP} \cdot n_{ZP} \quad (5.27)$$

In Abb. 5.21 ist exemplarisch der Zusammenbau eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans für zwei Faktoren abgebildet.

⁷ Bei der Anwendung von vollfaktorielle 2^k -Pläne als Kern wird die Bezeichnung „central composite design“ und bei der Anwendung von teilfaktoriellen 2^{k-p} -Plänen als Kern die Bezeichnung „small composite desing“ verwendet /CER95/.

Hieraus ist ersichtlich, daß das Zentrum der beiden Versuchspläne im selben Punkt vereint ist. Daher stammt der Name „zentral zusammengesetzt“.

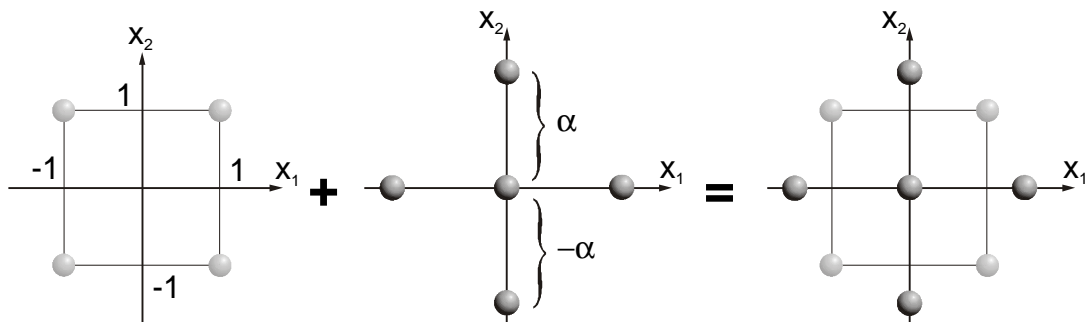


Abb. 5.21: Darstellung eines zentral zusammengesetzten Plans für zwei Faktoren

Bei zentral zusammengesetzten Plänen besteht prinzipiell eine Art sequentielle Vorgehensweise. Zuerst kann der faktorielle Plan sowie der Zentralpunkt ausgeführt werden, um anschließend, wenn sich das berechnete lineare Regressionsmodell als nicht-adäquat erweist, die Sternpunkte anzufügen.

Wie bereits bei den 3^k -Plänen erläutert, muß auch bei den zentral zusammengesetzten Plänen bezüglich der Orthogonalität eine Transformation durchgeführt werden, damit die quadratischen Glieder x_i^2 die Orthogonalitätsforderung

$$\sum x_i^* = x_i^2 - \frac{\sum x_i^2}{n} = 0 \tag{5.28}$$

erfüllen /PET91b/.

In Abb. 5.22 ist daher die „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines orthogonal zentral zusammengesetzten Versuchsplans für zwei Faktoren mit den transformierten Werten dargestellt.

	Nr	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$x_1^2 - 1/c^*$	$x_2^2 - 1/c^*$
Würfel- punkte	1	+1	-1	-1	+1	$1 - 1/c^*$	$1 - 1/c^*$
	2	+1	+1	-1	-1	$1 - 1/c^*$	$1 - 1/c^*$
	3	+1	-1	+1	-1	$1 - 1/c^*$	$1 - 1/c^*$
	4	+1	+1	+1	+1	$1 - 1/c^*$	$1 - 1/c^*$
Stern- punkte	5	+1	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2 - 1/c^*$	$-1/c^*$
	6	+1	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2 - 1/c^*$	$-1/c^*$
	7	+1	0	$-\alpha$	0	$-1/c^*$	$\alpha^2 - 1/c^*$
	8	+1	0	$+\alpha$	0	$-1/c^*$	$\alpha^2 - 1/c^*$
Zentral- Punkt	9	+1	0	+1	0	$-1/c^*$	$-1/c^*$

Abb. 5.22: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines orthogonalen zentral zusammengesetzten Plans für zwei Faktoren⁸

⁸ ($1/c^*$ ist hierin 0,667)

Zur Erreichung dieser Forderung ist zu beachten, daß der Sternpunktabstand α zum einen von der Faktorenanzahl und zum anderen von der Gesamtversuchszahl abhängig ist. Tritt der Fall $r_W = r_{St} = r_{ZP} = 1$ auf, gilt für den Sternpunktabstand

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\sqrt{n \cdot 2^{k-p}} - 2^{k-p} \right). \tag{5.29}$$

Damit ergibt sich für den zweidimensionalen Fall ein Sternpunktabstand von $\alpha = 1$. Weitere Sternpunktabstände in Abhängigkeit von der Versuchspunktanzahl sind in *Tab. 5.7* aufgeschlüsselt.

Anzahl Faktoren	Kern des Plans	n	a
2	2^2	9	1,000
3	2^3	15	1,215
4	2^4	25	1,414
5	2^{5-1}	27	1,547
6	2^{6-1}	45	1,724
7	2^{7-1}	79	1,885
8	2^{8-2}	81	2,000

Tab. 5.7: Sternpunktabstände für Orthogonalität /DRE93, SCH97/

Diese orthogonalen zentral zusammengesetzten Versuchspläne weichen jedoch vom Prinzip der Drehbarkeit ab. Drehbare Versuchspläne gewährleisten, daß die Schätzung für das mittlere Verhalten der Zielgröße in allen vom Nullpunkt gleich weit entfernten Punkten die gleiche Varianz aufweist. Damit sind alle Richtungen hinsichtlich der Genauigkeit einer Vorhersage einer Zielgröße als gleichberechtigt anzusehen /DRE93/. Mit einer Veränderung der α -Werte kann allerdings die Drehbarkeit hergestellt werden und zwar durch /SCH97/

$$\alpha = \left(\frac{r_W \cdot 2^{k-p}}{r_{St}} \right)^{0,25}. \tag{5.30}$$

Ist der Versuchsplan drehbar und orthogonal, unterscheidet er sich von einem orthogonal zentral zusammengesetzten Versuchsplan der nicht drehbar ist neben dem Sternpunktabstand noch durch die Gesamtanzahl (N) der Versuche. Beim Fall $r_W = r_{St} = 1$ bedeutet dies, daß der Zentralpunkt mehrfach zu realisieren ist, wie in *Tab. 5.8* aufgezeigt. Somit sind beide wünschenswerten Eigenschaften an die Einhaltung gewisser Forderungen bezüglich der Versuchszahl und an den Sternpunktabstand gebunden /DRE93/.

Anzahl Faktoren	Kern des Plans	r_{ZP}	N	a
2	2^2	8	16	1,414
3	2^3	9	23	1,682
4	2^4	12	36	2,000
5	2^{5-1}	10	36	2,000
6	2^{6-1}	15	59	2,378
7	2^{7-1}	22	100	2,828
8	2^{8-2}	20	100	2,828

Tab. 5.8: Anzahl Wiederholungen des Zentralpunktes bei gegebenem a /DRE93/

Für weitere ausführliche Erklärungen zur Orthogonalität und Drehbarkeit sowie der geeigneten Zahl der Zentralpunkte wird auf /DRE93, SCH97/ verwiesen.

Im Vergleich zu 3^k -Faktorenplänen wächst die Versuchsanzahl zwar nicht mehr so stark mit der Faktorenanzahl an, jedoch immer noch steiler als die Anzahl der zu schätzenden Koeffizienten (K). Diese Überbestimmtheit läßt sich durch den Redundanzfaktor ausdrücken, der sich wie folgt ergibt:

$$\text{Redundanzfaktor} = \frac{N}{K} \geq 1. \quad (5.31)$$

Tab. 5.9 stellt die Anzahl erforderlicher Versuche für zentral zusammengesetzte Pläne in Abhängigkeit von der Faktorenanzahl im Vergleich zu 3^k - und 5^k -Faktorenversuchsplänen gegenüber. Aus dieser Auflistung ist erkennbar, daß zentral zusammengesetzte Pläne einen wesentlich kleineren Versuchsumfang benötigen, obwohl sie über immerhin fünf Niveaus verfügen.

Weiterhin ist ersichtlich, daß sich die mitaufgeführten Redundanzfaktoren bei zentral zusammengesetzten Plänen bis sechs Faktoren in vernünftigen Grenzen halten, während bei den 3^k - und 5^k -Plänen eine totale Überbestimmung herrscht /PET/.

Anzahl Faktoren	2	3	4	5	6	7	8
Koeffizienten im Polynom ⁹	5	10	15	21	28	36	45
Zentral zusammengesetzter Plan ¹⁰	9	15	25	43	77	143	273
Redundanzfaktor	1,8	1,5	1,7	2,0	2,8	4,0	6,1
3^k -Plan	9	27	81	243	729	2187	6561
Redundanzfaktor	1,8	2,7	5,4	11,6	26,0	60,8	145,8
5^k -Plan	25	125	625	3125	15625	78125	390625
Redundanzfaktor	5,0	12,5	41,7	148,8	558,0	2170,1	8680,6

Tab. 5.9: Gegenüberstellung Anzahl Faktoren und Koeffizienten vs. Versuchspläne und Redundanz /PET/

Zentral zusammengesetzte Pläne existieren in drei Varianten, die sich durch die Abstände der Sternpunkte zum Mittelpunkt des Versuchsplanungsbereichs unterscheiden lassen. Im einzelnen sind dies:

- Central composite faced design (CCF): Bei diesem Typ liegen die Sternpunkte in den Außenebenen, wodurch der Versuchsaufwand reduziert wird, da nur drei Einstellungen pro Richtung benötigt werden.
 - Central composite circumscribed design (CCC): Hier liegen die Sternpunkte außerhalb der Außenebenen (des Würfels). Allerdings muß hierbei beachtet werden, daß die Ober- und Untergrenzen des Sterns noch durchführbar sein müssen. Pro Richtung stehen hier fünf Niveaus zur Verfügung, wodurch die Regressionsfunktion stabiler wird.
- und
- Central composite inscribed (CCI). Die Sternpunkte liegen bei diesem Plan auf den Grenzen und die Eckpunkte entsprechend im inneren.

⁹ zweite Ordnung

¹⁰ $(2^k+2 \cdot k+1)$

5.2.3 Versuchspläne dritter Ordnung

Wenn bei der Auswertung festgestellt wird, daß sowohl Versuchspläne erster Ordnung als auch Versuchspläne zweiter Ordnung keine ausreichenden Ergebnisse liefern, liegt der Gedanke nahe, auf Versuchspläne dritter Ordnung zurückzugreifen. Derartige Versuchspläne können durch Ergänzung von Versuchsplänen zweiter Ordnung aufgebaut werden.

Bei näherer Betrachtung wird sofort ersichtlich, daß schon bei wenigen Faktoren ein riesiger Versuchsaufwand betrieben werden muß. Da aus diesem Grund die Anwendung nur wenig sinnvoll erscheint, wird hier nicht weiter auf diese Pläne eingegangen und auf einschlägige Literatur, wie z.B. /SCH97, HRT74, BAN80, DRA62/, verwiesen.

5.3 Zusammenstellung Charakteristika klassische Methoden

Im Kapitel „klassische Versuchsmethoden“ wurden Einfaktorpläne sowie Versuchspläne erster und zweiter Ordnung¹¹ zum „Screening“ und zur „empirischen Modellbildung“ erläutert. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit, sind in *Tab. 5.10* und *Tab. 5.11* alle angesprochenen Pläne mit ihren wesentlichen Charakteristika aufgelistet. Aufgrund der Uneinheitlichkeit bezüglich Nutzen, Aufwand, Anwendungsfeld, Faktoren, usw. konnte kein einheitliches Layout der Tabellen erstellt werden. Daher sind in *Tab. 5.11* die Charakteristika der Einfaktorpläne und in *Tab. 5.10* die der Pläne erster und zweiter Ordnung aufgeschlüsselt.

Methoden	Störgrößenbehandlung	Anzahl Störgrößen	Auswertverfahren	Bemerkung zur Anzahl der Faktorstufen
Vollständig randomisierte Zufallspläne	statistisch		einfache Varianzanalyse	„m“ Faktorstufen werden berücksichtigt; Anzahl „m“ kann bei jeder Wiederholung unterschiedlich sein
Vollständig randomisierte Blockpläne	experimentell	1	zweifache Varianzanalyse	Faktorstufen werden einem Block zugeordnet; jede Faktorstufe einmal pro Block
Lateinische Quadratpläne	experimentell	2	dreifache Varianzanalyse	gleiche Stufenzahl
Griechisch-Lateinische Quadratpläne	experimentell	3	vierfache Varianzanalyse	gleiche Stufenzahl
Hypergriechisch-lateinische Quadratpläne	experimentell	≥4	mehrfache Varianzanalyse	gleiche Stufenzahl
Ausgewogene unvollständige Blockpläne	experimentell	1	vergleichbar mit Blockplänen	nicht jede Faktorstufe muß im Block enthalten sein
Youden Quadratpläne	experimentell	2	vergleichbar mit ausgew. unvollständigen Blockplänen	unterschiedliche

Tab. 5.10: Charakteristika Einfaktorpläne

Weiterhin enthält *Tab. 5.12* eine Gegenüberstellung von Faktoren und benötigten Versuchen, bei der Anwendung der unterschiedlichen Versuchspläne. Einigen teilfaktoriellen Plänen von *Tab. 5.12* weisen keine Versuchsanzahl auf. Dies liegt darin begründet, daß es für die zugehörige Auflösung keinen faktoriellen Versuchsplan gibt.

¹¹ Pläne dritter oder höherer Ordnung spielen in der Praxis eher eine untergeordnete Rolle.

Anforderungen Versuchspläne	Anzahl der Faktoren	orthogonaler Versuchsplan maximale Anzahl an Stufen	Screeningplan	Optimierungsplan	Robuste Prozesse/Produkte	lineares Modell	lineares Modell + WW	quadratisches Modell	Modelle höherer Ordnung	Linearitätsabweichungen sind erkennbar	geringer Aufwand zur Versuchsplanerstellung	geringer experimenteller Aufwand	Einfügevorsuche möglich	Restriktionen möglich	
vollständige 2^k -Faktorenversuchspläne	2 - 6	●	2	⊙	●	○	⊙	●	○	○	⊙	●	⊙	○	○
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung III	3 - 64	●	2	●	○	○	●	○	○	○	○	●	●	○	○
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung IV	4 - 32	●	2	●	○	○	●	⊙	○	○	⊙	●	●	○	○
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung V	5 - 8	●	2	●	○	○	●	⊙	○	○	⊙	●	●	○	○
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung VI	6 - 7	●	2	●	○	○	●	⊙	○	○	⊙	●	●	○	○
Plackett-Burman-Versuchspläne Auflösung III	3 - 96	●	2	●	○	○	●	○	○	○	○	⊙	●	○	○
vollständige 3^k -Faktorenversuchspläne	2 - 4	●	3	⊙	●	○	⊙	⊙	●	○	●	●	⊙	○	○
$2^k 3^k$ -Versuchspläne	2 - 4	●	3	⊙	●	○	●	●	○	○	⊙	○	○	○	○
Box-Behnken-Versuchspläne	3 - 6	●	3	○	●	○	●	●	○	○	●	⊙	⊙	○	○
Zentral- zusammengesetzte- Versuchspläne	2 - 8	⊙	5	○	●	○	●	●	○	○	●	⊙	⊙	○	○

Tab. 5.11: Charakteristika (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt, VA: Versuchsabhängig)

Anzahl der Faktoren Versuchspläne	2	3	4	5	6	7	8	9
Vollständige 2^k -Faktorenversuchspläne	4	8	16	32	64	128	256	512
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung III	-	4	-	8	8	8	-	16
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung IV	-	-	8	-	16	16	16	32
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung V	-	-	-	16	-	-	64	-
2^{k-p} -Teilfaktorenversuchspläne Auflösung VI	-	-	-	-	32	-	-	128
Plackett-Burman-Versuchspläne Auflösung III	3	4	5	6	7	8	9	10
Vollständige 3^k -Faktorenversuchspläne	9	27	81	243	729	2187	6561	19683
Box-Behnken-Versuchspläne	-	15	27	46	54	62	-	-
Zentral- zusammengesetzte- Versuchspläne CCD	9	15	25	43	77	143	273	531

Tab. 5.12: Anzahl der Versuche der Versuchspläne

6 Optimale Versuchsplanung

Bei den in *Kapitel 5.2* beschriebenen klassischen¹ Versuchsplänen sind meistens bestimmte Restriktionen, wie z.B. alle Faktorstufen sind durch den Versuchsplan vorbestimmt, die Wechselwirkungsproblematik kann nicht individuell gehandhabt werden, die Anzahl der Versuche ist vom Versuchsplan abhängig, usw., bei der Anwendung zu beachten. Durch diese Restriktionen ist die Anwendung derartiger Pläne oft nicht empfehlenswert. Somit kommt dem Bereich der optimalen Versuchsplanung eine bedeutende Rolle zu.

Bei durchzuführenden Experimenten werden daher bestimmte Forderungen an einen „optimalen“² Versuchsplan gestellt. Zum einen sollte der Gesamtaufwand relativ gering bei gleichbleibender Präzision der Ergebnisse sein (hohe Informationsausbeute). Andererseits sollte die Planung, Vorbereitung, Realisierbarkeit und Auswertung der Ergebnisse in einem angemessenen Rahmen zur Effektivität stehen. Ziel der optimalen Versuchsplanung ist es daher, die optimale Versuchsanzahl zu bestimmen und optimale Versuchspunkte zu finden. Ein Versuchsplan kann dann als optimal bezeichnet werden, wenn er es zuläßt, die Wirkungsfläche mit höchster Genauigkeit zu schätzen. Die Genauigkeit wird durch Optimalitätskriterien charakterisiert /SCH97/.

Als Begründer der optimalen Versuchsplanung sind *Jack Carl Kiefer* und *Jacob Wolfowitz* zu nennen. 1960 veröffentlichten sie in dem Fachartikel „The Equivalence of two Extremum Problems“ /KIE60/, das sogenannte *Kiefer-Wolfowitz Theorem* für G- und D-optimale Versuchspläne. *Kiefer* kann daher aufgrund seiner herausragenden Arbeiten als Vater der D-optimale Versuchsplanung bezeichnet werden.

Neben den in diesem Kapitel näher erläuterten D^3 -optimalen⁴ Versuchsplänen gibt es noch eine Reihe weiterer optimaler Pläne, auf die jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Dies sind u.a.

- A-optimale Versuchspläne,
 - C-optimale Versuchspläne,
 - E-optimale Versuchspläne,
 - G-optimale Versuchspläne
- sowie
- I-optimale Versuchspläne.

Hinter diesen optimalen Versuchsplänen verbirgt sich ein bestimmter Informationsgehalt. Bei A-optimale Versuchsplänen wird die Spur⁵ der inversen Informationsmatrix minimiert. Soll hingegen der größte Eigenwert der inversen Informationsmatrix minimiert werden, so handelt es sich um einen E-optimale Versuchsplan. Eine Minimierung der Varianz wird mit einem C-optimale Versuchsplan angestrebt.

¹ Weisen ein geordnetes Schema mit einer festen Anzahl Versuche (je nach Anzahl der Faktoren) auf.

² i. S. v. möglichst wenige Versuche, um möglichst eine maximale Informationsausbeute zu erzielen.

³ „D“ steht für Determinante.

⁴ In diesem Zusammenhang bedeutet es, daß ein Kriterium bestmöglich erfüllt ist.

⁵ Spur einer Matrix ist die Summe ihrer Hauptdiagonalelemente.

Um die durch $p(x)$ gewichtete Varianz des Modellwerts über den gesamten Prognosebereich zu minimieren, wird das Optimalitätskriterium eines I-optimalen Versuchsplans verwendet. Eine Minimierung der maximalen Varianz eines Modells über den Prognosebereich wird mit einem G-optimalen Versuchsplan angestrebt /SPE91/.

6.1 D-optimale Versuchspläne

Zur Bestimmung von Effekten bzw. Koeffizienten bei komplexeren Versuchsplänen, wie den zentral zusammengesetzten und den D-optimalen Plänen, wird eine Matrixenschreibweise verwendet. Der Grund ist darin begründet, daß diese Pläne Abweichungen von der Orthogonalität aufweisen, d.h. die Einflüsse sind nicht mehr unabhängig voneinander bestimmbar. Bei der Berechnung ist es jetzt notwendig, sämtliche Korrelationen/Kovarianzen zwischen den einzelnen zu bestimmenden Einflüssen zu berücksichtigen.

Innerhalb der Matrixenschreibweise wird die erweiterte Versuchsmatrix mit X bezeichnet. Sie enthält Spalten für jeden Faktor, jeden Wechselwirkungsterm, jeden quadratischen Term sowie für jeden Term nullter Ordnung, der im Modellansatz gewünscht ist. Weiterhin ist für jedes durchgeführte Experiment eine Zeile vorhanden. In der Versuchsmatrix werden die kodierte (bzw. umskalierte) Faktoreinstellungen verwendet /ORT00/.

$$X = \begin{matrix} & & b_0 & b_1 & b_2 & b_{12} & b_{11}^2 & \dots \\ & & 1 & x_1 & x_2 & x_{12} & x_{11}^2 & \dots \\ 1 & \left(\begin{matrix} 1 & -1 & -1 & +1 & 1 & \dots \\ 2 & 1 & +1 & -1 & -1 & 1 & \dots \\ 3 & 1 & -1 & +1 & -1 & 1 & \dots \\ 4 & 1 & +1 & +1 & 1 & 1 & \dots \\ 5 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 6 & 1 & -1,41 & 0 & 0 & 2 & \dots \\ 7 & 1 & +1,41 & 0 & 0 & 2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{matrix} \right) & \dots \\ & & & & & & & \dots \end{matrix} \tag{6.1}$$

Die Varianz-Kovarianz-Matrix

$$M = (X^T \cdot X)^{-1} \tag{6.2}$$

wird mit X bestimmt.

Anschließend lassen sich mit dem Meßwertvektor

$$Y = \begin{pmatrix} y_{1i} & y_{2i} & y_{3i} & y_{4i} \\ y_{11} & y_{21} & y_{31} & y_{41} \\ y_{12} & y_{22} & y_{32} & y_{42} \\ y_{13} & y_{23} & y_{33} & y_{43} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \tag{6.3}$$

gemäß

$$(\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} = \mathbf{B} \quad (6.4)$$

die unterschiedlichen Effekte bzw. Modellkoeffizienten b_i ermitteln.

Im Sinne der Fehlerfortpflanzung funktioniert die Berechnung von

$$(\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \quad (6.5)$$

am besten, wenn die Determinante

$$D = \det(\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X}) \quad (6.6)$$

möglichst groß ist /BAN76/, woraus auch die Bezeichnung D-optimal abgeleitet ist. Im Extremfall entsteht bei N-Versuchen für K Modellterme als Determinante $\det(\mathbf{X}^T \mathbf{X})$ die Zahl N^K . Somit ist ein D-optimaler Versuchsplan ein statistischer Versuchsplan, der die Determinante maximiert oder gleichbedeutend die Determinante der Inversen minimiert. Orth definiert einen D-optimalen Versuchsplan wie folgt: „Ein Versuchsplan heißt dann D-optimal, wenn er so ausgelegt ist, daß ein vorgegebener Satz von Einflußfaktoren „optimal“, d.h. mit geringst möglicher Fehlerstreuung, quantifiziert werden kann“ /ORT00/.

Je nach Fragestellung (kleine Konfidenzintervalle der Modellkoeffizienten oder der Vorhersagen usw.) gibt es unterschiedliche Kriterien bzw. Effizienzen für optimale Versuchspläne, die helfen, einen geeigneten Versuchsplan auszuwählen (siehe Kapitel 6.4).

6.2 Vor- und Nachteile von D-optimalen Versuchsplänen

Wie jede andere Versuchsmethodik sind auch die D-optimalen Versuchspläne mit Vor- und Nachteilen gegenüber anderen Versuchsplänen behaftet. Hierbei sind allerdings die Vorteile gegenüber den klassischen Versuchsplänen bei weitem höher zu bewerten als deren Nachteile. Die Stärken und damit auch die Einsatzgebiete der D-optimalen Pläne sind im folgenden aufgelistet /PET91b, COO80, WYN72/:

- Versuchszahl kann relativ unabhängig gewählt werden,
 - Anzahl der Stufen der Faktoren ist frei bestimmbar,
 - Versuchspläne können durch zusätzliche Faktoren erweitert werden,
 - Stufenabstand muß nicht äquidistant⁶ sein,
 - freie Modellwahl,
 - im Voraus durchgeführte Versuche können in den Versuchsplan integriert werden,
 - eine Begrenzung des Versuchsraums ist möglich
- und
- Lage der Versuchspunkte unter Einbeziehung der Optimalitätsprinzipien ist frei wählbar.

⁶ gleicher Abstand

Im Prinzip stellen die optimalen Versuchspläne eine Art „Notanker“ für besondere Situationen dar, denn der Versuchsplan kann individuell angepaßt werden /WAS01/. Neben den vielen Vorteilen der D-optimalen Versuchspläne gibt es auch ein paar Nachteile. Die Nachteile werden im folgenden aufgeführt:

- nicht hundertprozentige Orthogonalität des Versuchsplan,
 - der beste Modellansatz ist vor der Durchführung des Versuchs noch nicht bekannt,
 - die D-Optimalität gilt nur für den gewählten Ansatz
- und
- eine geeignete Software wird benötigt /KLP98/.

Die D-optimalen Versuchspläne werden hauptsächlich dann angewandt, wenn auf Grund der erwähnten Eigenschaften keine klassischen Versuchspläne eingesetzt werden können. Sie sind dabei als eine Art Alternative zu den klassischen Versuchsplänen zu sehen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, daß alle faktoriellen Versuchspläne 100%ig D-optimal sind und es keine besseren gibt.

Als Nachteile der faktoriellen Pläne kann im Vergleich zu den D-optimalen Plänen folgendes angeführt werden /ORT00/:

- Bei faktoriellen Plänen (2^k , 2^{k-p}) ist immer die durch die Faktorenanzahl vorgegebene Versuchsanzahl durchzuführen. Es gibt nur Pläne für 4, 8, 16, 32, ..., usw. Versuche.
 - Zwischen den zwei Stufen der faktoriellen Versuchspläne wird Linearität vorausgesetzt, d.h. es lassen sich nur lineare Einflüsse und deren Wechselwirkungen bestimmen.
 - Die Versuchsanzahl läßt sich zwar durch Vermengung bei 2^{k-p} -Plänen reduzieren. Jedoch bleibt die Annahme der Linearität aber weiter bestehen.
 - Es ist nicht möglich, eine Einschränkung der Versuchsbereiche zu realisieren.
- und
- Für die Untersuchung von qualitativen Faktoren mit mehr als zwei Stufen sind die faktoriellen Pläne nicht geeignet.

6.3 Modellansatz

Wie bereits angesprochen, wird, um einen optimalen Versuchsplan zu erzeugen, ein mathematisches Modell benötigt. Hierin ist allerdings auch einer der größten Unsicherheitsfaktoren im Bereich der optimalen Versuchsplanung zu nennen, denn ein Versuchsplan, den der Algorithmus erstellt, ist nur so gut, wie das Modell, welches ihm vom Anwender vorgegeben wird. Das bedeutet, daß im Vorfeld der Modellerstellung eine entscheidende Bedeutung zufällt. Daher soll der Modellgedanke näher beschrieben werden.

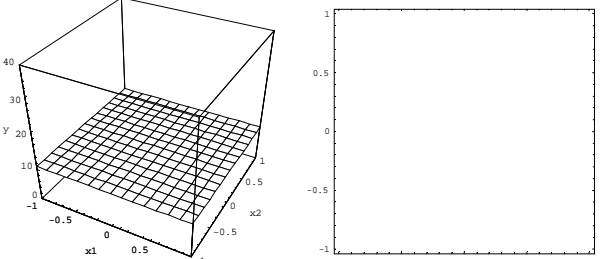
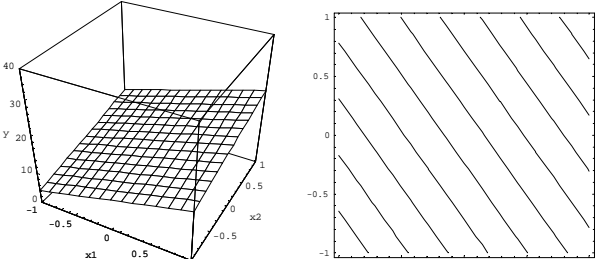
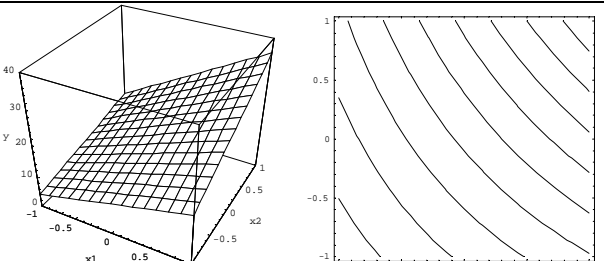
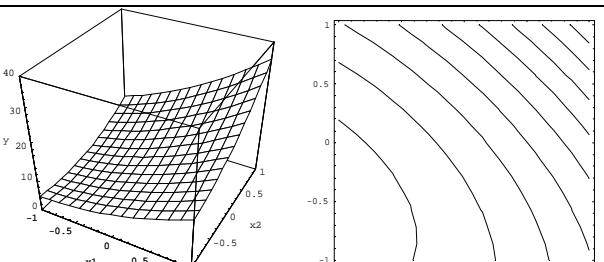
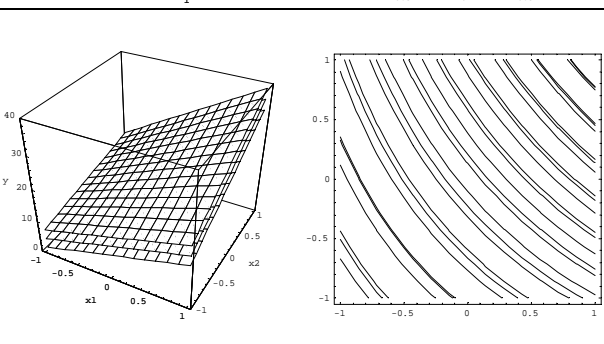
Unter einem Modell wird eine mathematische Beziehung zwischen der Zielgröße y_i und den k Faktoren x_i verstanden, deren freie Parameter b_i durch Versuche bestimmt werden sollen /KOL96/. Als einfachstes Modell ist das lineare Modell anzuführen:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (6.7)$$

Dieses Modell kann noch um quadratische und Wechselwirkungsterme erweitert werden und lautet dementsprechend:

$$y = \underbrace{b_0}_{\text{Konstante}} + \underbrace{b_1x_1}_{\text{linearer Anteil}} + b_2x_2 + \underbrace{b_{12}x_1x_2}_{\text{Wechselwirkungs-anteil}} + \underbrace{b_{11}x_1^2}_{\text{Nichtlinearer-anteil}} + b_{22}x_2^2 + \dots + \underbrace{\varepsilon}_{\text{Fehler-anteil}} \quad (6.8)$$

Die einzelne Bedeutung der Koeffizienten ist in Tab. 6.1 aufgeführt.

Visualisierung	Term
	<p>Konstante</p> <p>geometrische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Höhe <p>physikalische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mittelwert der Zielgröße
	<p>Linearanteil</p> <p>geometrische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Steigung <p>physikalische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Faktoreffekt
	<p>Wechselwirkungsanteil</p> <p>geometrische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Änderung der Steigung <p>physikalische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wechselwirkungseffekt
	<p>Nichtlinearität</p> <p>geometrische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Krümmung <p>physikalische Bedeutung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nichtlinearität
	<p>Fehleranteil</p> <ul style="list-style-type: none"> • geometrische Bedeutung: Streubreite der zufälligen Abweichungen • physikalische Bedeutung: Zufällige Streuung ε mit Erwartungswert 0 und Standardabweichung σ

Tab. 6.1: Bedeutung der Koeffizienten /ORT00/

Zur Erstellung dieser „theoretischen“ Modelle muß eine Vorstellung über den Zusammenhang zwischen Ziel- und Einflußgrößen (Faktoren) herrschen. Dies steht jedoch im Widerspruch zu dem, was durch geplante Versuche bestimmt werden soll, nämlich der angesprochene Zusammenhang.

Allerdings darf nicht verschwiegen werden, daß in vielen Betrieben in den Köpfen der Mitarbeiter eine Vorstellung über Zusammenhänge besteht, die in die Sprache der Mathematik (eines Modells) übersetzt werden muß. Orth /ORT00/ hat dazu umgangssprachliche Ausdrücke zusammengestellt, die in Tab. 6.2 aufgeführt und bei der Modellerstellung hilfreich sind. Ebenfalls hilfreich sind z.B. Vorversuche, „Screening“-Pläne, usw. die einem bestimmten Modell folgen oder einen mathematischen Zusammenhang verdeutlichen.

Umgangssprache		Modellsprache
Regelkarte reicht doch aus	⇔	nur b_0 (konstanter Term) muß ins Modell
Einfluß von x_1 und x_2 ist wichtig	⇔	lineare Terme $b_1x_1 + b_2x_2$ müssen ins Modell
x_1 und x_2 hängen voneinander ab	⇔	Wechselwirkungsterm $b_{12}x_1x_2$ muß ins Modell
wenn x_1 zu hoch geht, dann tut sich weniger als unten	⇔	nichtlinearer Term $b_{11}x_1^2$ muß ins Modell

Tab. 6.2: Umsetzung der umgangssprachlichen Ausdrücke in die Modellsprache /ORT00/

6.3.1 Potential Terms⁷

Die Auswahl der Versuchspunkte bei D-optimalen Versuchsplänen ist stark Modellabhängig, d.h. ein Modell ist nach der Durchführung nur noch mit Hindernissen zu erweitern. Wurde als Ausgangsmodell ein zu kleines Modell gewählt, liefern die Versuchspunkte bzw. die Versuchsergebnisse bei einer Modellerhöhung eine schlechtere Informationsausbeute /KOL96/.

Um dies zu verhindern, können sogenannte „Potential Terms“ hinzugefügt werden /DUM94/. Der Vorteil ergibt sich dadurch, daß die Abhängigkeit des Versuchsplans von dem im voraus gewählten Modell, durch ihre Einbeziehung verringert wird.

Aus Abb. 6.1 wird deutlich, wie sich ein Versuchsplan mit und ohne „Potential Terms“ verhält. Zuerst wird ein Versuchsplan mit dem Ausgangsmodell

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (6.9)$$

ohne „Potential Terms“ generiert.

Als Versuchspunkte ergeben sich die Eckpunkte, die dunkel markiert sind. Im Inneren des Versuchsgebiets sind keine Versuchspunkte angesiedelt.

⁷ Potential Terms können mit dem Programm Modde in den Versuchsplan integriert werden.

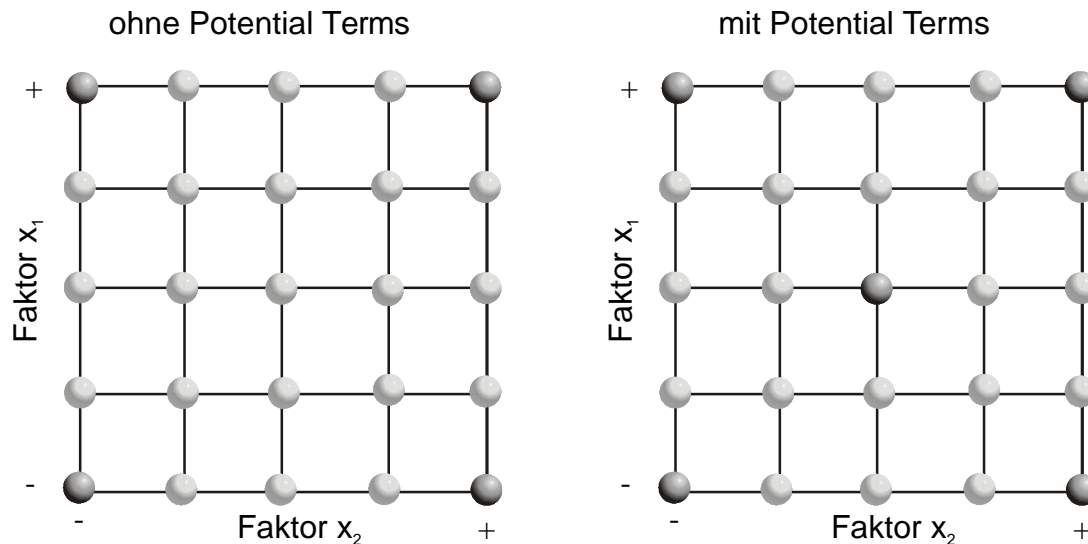


Abb. 6.1: Auswahl von Versuchspunkten „ohne“ und „mit“ Potential Terms

Soll das Modell, um eine bessere Anpassung zu gewährleisten, noch um einen quadratischen Term erweitert werden, so ist dies mit dem Plan ohne „Potential Terms“ nicht möglich. Wurden hingegen die „Potential Terms“ zu Beginn integriert, so ergibt sich ein Versuchsplan, der zusätzlich im Mittelpunkt des Versuchsraums einen Versuchspunkt enthält. Somit ist ein Modell der Form

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 \text{ oder } b_{22}x_2^2 \quad (6.10)$$

analysierbar /DUM94/.

6.4 Beurteilungskriterien zur Auswahl eines D-optimalen Versuchsplans

Um Versuchspläne und hier besonders D-optimale Pläne charakterisieren bzw. vergleichen zu können, wurden unterschiedliche Kenngrößen bzw. Effizienzen⁸ zur Beurteilung von Versuchsplänen entwickelt /KOL96, ORT00, STC98, WAS01/. Die wichtigsten lauten:

- D-Effizienz
- und
- G-Effizienz.

Weiterhin werden noch andere wichtige Unterscheidungs- und Beurteilungsmerkmale zur Auswahl von optimalen Versuchsplänen herangezogen, und zwar /KOL96/

- Konditionszahl (condition number, C),
- logarithmierte Determinante (LD)
- sowie
- normierte logarithmierte Determinante (ND).

⁸ Die Effizienz gibt den erreichten Anteil vom Idealzustand der Optimalität an. Je nach verwendeter Versuchsplanungssoftware stehen dem Anwender unterschiedliche Kenngrößen zur Verfügung. Hier wird hauptsächlich auf Modde 6.0 eingegangen.

All diese Kriterien führen zu einer möglichst geringen Unsicherheit der zu schätzenden Modellparameter bzw. zu einer möglichst guten Vorhersagegenauigkeit der Zielgröße durch das aus den Versuchsdaten ermittelte Modell. Im einzelnen verbirgt sich hinter den Kriterien folgendes / KOL96, ORT00, STC98, WAS01, BAN76, BAN94, OTO97/:

- Die D-Effizienz beruht auf der bereits in Formel (6.6) angegebenen D-Optimalität. Aufgrund der sich daraus ergebenden Ähnlichkeit zur normierten Determinanten ist ein Unterschied nur in der Nichtlogarithmierung zu finden. Statt dessen wird die D-Effizienz, wie in Formel (6.11) zu erkennen, mit 100 multipliziert, wodurch eine Angabe in Prozent erreicht wird.

$$D = 100 \frac{\sqrt[k]{\det(M)}}{N} \quad [\%] \quad (6.11)$$

Mit der D-Effizienz wird ein Maß berechnet, das als relative Anzahl von Versuchen in Prozent verstanden werden kann, die für einen orthogonalen Plan mit dem gleichen Wert der Determinante

$$(X^T X) \quad (6.12)$$

erforderlich wären.

In vielen Fällen ist jedoch ein orthogonaler Plan nicht erstellbar, so daß dies nur eine theoretische Vorgabe ist. Als Vergleichsangabe zu anderen zur Auswahl stehenden Versuchsplänen sollte die D-Effizienz daher nur dann verwendet werden, wenn die anderen Pläne die gleiche Größe und die selbe Anzahl von Kandidatenpunkten aufweisen.

- Die G-Effizienz spiegelt eine prozentuale Angabe der Vorhersagen im Vergleich zu einem vollfaktoriellen Versuchsplan wieder und zielt dabei auf möglichst kleine Konfidenzintervalle ab. Sie ist für D-optimale⁹ Pläne die wichtigste Effizienz, da mit dieser Angabe Vergleiche von Versuchsplänen unterschiedlicher Größe (Versuchszahl) möglich sind. Berechnet wird sie mit

$$G = \frac{100 \cdot K}{N \cdot d} \quad [\%] \quad (6.13)$$

wobei d das Maximum der relativen Vorhersagevarianz v repräsentiert, die sich zu

$$v = (x(X^T X)^{-1} x^T) \quad (6.14)$$

ergibt /KOL96/. Darin ist x die Zeile aus dem Versuchsplan, die gerade betrachtet wird.

Für G ergeben sich Werte im Bereich von 1 bis 100 %, wobei 100 % den besten Wert darstellt. Wünschenswert ist nach /DES00/ mindestens eine G-Effizienz von 50 % für den verwendeten Versuchsplan.

⁹ Der Äquivalenzansatz von *Kiefer* und *Wolfowitz* /KIE59/ besagt, daß ein Versuchsplan D-optimal ist, wenn er auch G-optimal ist /BAN94/.

Wheeler /WHE72/ hingegen vertritt die Auffassung, daß es in der Praxis keine allzu große Rolle spielt, ob der Plan eine G-Effizienz von 50 % oder 80 % besitzt.

Allerdings ist anzumerken, daß eine G-Effizienz ab 80 % auch bezüglich der anderen Bewertungskriterien gute Werte liefert. Vollfaktorielle Versuchspläne besitzen eine G-Effizienz von 1 bzw. 100 %, wenn die Anzahl der Koeffizienten im Modell der Summe der Versuche entspricht /KOL96/.

- Bei der Konditionszahl handelt es sich um eine Zahl zur Beurteilung der Versuchsmatrix hinsichtlich des Verhältnisses der längsten Hauptachse zur kürzesten. Sie kann auch durch das Verhältnis zwischen den schlechtesten und besten Singulärwerten¹⁰ der Matrix B ausgedrückt werden. Ihr Wert ist immer größer als 1. Idealerweise kann sie höchstens die 1 erreichen.

Eine niedrige Konditionszahl ermöglicht eine hohe Vorhersagegenauigkeit des Regressionsmodells sowie eine gute Schätzung der Effekte. Die Bestimmung wird mit Formel (6.15) durchgeführt, worin $\| \cdot \|$ die Norm einer Matrix darstellt /OTO97/.

$$\text{condition number}(B) = \| B \| \cdot \| B^{-1} \| \quad (6.15)$$

Faktorielle orthogonale Versuchspläne besitzen die Konditionszahl 1. Eine Auswahl von Versuchsplänen mit quadratischer Modellwahl, deren Konditionszahl 100 übersteigt, ist zu vermeiden /WAS01/.

- Logarithmierte Determinante und normierte logarithmierte Determinante sind Werte für Vergleiche zwischen Versuchsplänen, die unterschiedliche Dimensionen in der Designmatrix aufweisen. Ihre Berechnung erfolgt mit

$$LD = \log(\det M) = \log(\det X^T X) \quad (6.16)$$

und

$$ND = \log \frac{\sqrt[k]{\det(X^T X)}}{N}. \quad (6.17)$$

Sie können für die Auswahl von Versuchsplänen mit unterschiedlichen Versuchszahlen und Modelltermen verwendet werden, d.h. sie sind unabhängig von N .

Je nach betrachtetem Design bzw. vorgegebener Informationsmatrix ergeben sich für ND Zahlen zwischen 0 und $-\infty$. ND ist daher fast immer negativ, im Idealfall eines orthogonalen Versuchsplans höchstens 0 /KOL96/.

Durch die zuvor beschriebenen Effizienzen und Beurteilungskriterien entstehen eine Menge Informationen, um einen geeigneten D-optimalen Versuchsplan auszuwählen bzw. zu erstellen. Als Hilfestellung dazu sollen nachfolgend noch einige praktische Empfehlungen angegeben werden /KOL96/:

¹⁰ Quadratsumme aus den Eigenwerten.

- Aufgrund der relativ glatten Abhängigkeit von der Versuchsanzahl, eignet sich die normierte logarithmierte Determinante am besten für eine vergleichende Beurteilung der unterschiedlichen Designs, da sie von der Versuchsanzahl unabhängig ist.
- Durch eine Wiederholung der Designgenerierung lassen sich Aussagen über die Streubreite der Maßzahlen durchführen. Selbst bei einer minimalen Streuung der G-Effizienz und der D-Effizienz, sind immer noch stärkere Abweichungen der Konditionszahlen ersichtlich. Daraufhin ist die Verwendung des Designs mit der kleinsten Konditionszahl zu empfehlen. Die generierten Pläne sollten aber vor der letztendlichen Auswahl auf jeden Fall abgespeichert werden.
- Ab einer bestimmten Versuchsanzahl spielt die Verwendung von „alten“ Versuchspunkten (Inclusions) oder Teilfaktorenplänen nur noch eine untergeordnete Rolle.
- Weiterhin läßt sich in diesem Bereich feststellen, daß die Maßzahlen der normierten Determinante (zum Teil auch die G-Effizienz) in einen stationären Bereich übergehen.
 - Unterhalb sind beim Verzicht von Versuchen deutliche Verluste an Informationen zu verzeichnen.
 - Bei hohen Versuchsanzahlen ist erst spät wieder ein Anstieg von ND oder G zu beobachten.
- Trotz der geringfügigeren Maßzahlen ist es empfehlenswert, Terme, die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren berücksichtigen (Potential Terms), in das Modell mit einzubeziehen. Dadurch ist es bei der späteren Anwendung möglich, hinsichtlich der Modellanpassung mehr Freiheitsgrade zu erhalten.
- Durch die heute zur Verfügung stehenden Softwareprogramme zur Planung von Versuchen ist es nicht sehr zeitaufwendig, unterschiedliche Szenarien durchzuspielen, um einen geeigneten Plan auszuwählen.

6.5 Versuchspunkte

Bei der Erstellung eines D-optimalen Plans benötigt der Algorithmus eine Art Punktwolke (Versuchspunkte), die auch als Kandidatensatz bezeichnet wird, aus denen er eine zuvor festgelegte Anzahl von Punkte unter „optimalen“ Gesichtspunkten für den Versuchsplan auswählt.

Je nach verwendeter Software (Algorithmus), besteht die Möglichkeit, diese Punktwolke durch Hinzufügen oder Weglassen von sogenannten

- Zentralpunkten (Centroid),
 - Flächenmittelpunkten (Face Center),
 - Eckpunkten (Vertice)
- oder
- Kantenmittelpunkten (Edge Centers)

zu verändern.

Anhand dieser Einteilung lassen sich die Versuchspunkte wesentlich besser klassifizieren bzw. grafisch darstellen, welches in *Abb. 6.2* zu sehen ist.

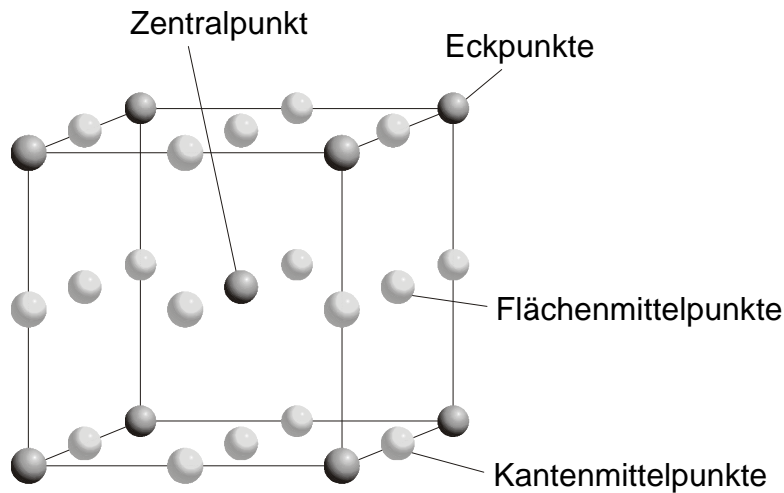


Abb. 6.2: Klassifizierung der Versuchspunkte

Im einzelnen verbirgt sich hinter den Bezeichnungen folgendes:

- **Zentralpunkt:** Der Zentralpunkt ist der Punkt, dessen Koordinaten über eine Durchschnittsberechnung aller Eckpunkte des durch die Faktoren zur Verfügung stehenden Versuchsraums bestimmt werden kann, also der Mittelpunkt.
- **Flächenmittelpunkte:** Unter Flächenmittelpunkten werden die Punkte verstanden, die auf einer Grenzlinie entlang des Faktorraums liegen. Die Flächenmittelpunkte ergeben sich daher aus dem Mittel aller Eckpunkte, die auf der selben Fläche der Grenzlinie beruhen.
- **Eckpunkte:** Als Eckpunkte werden die Versuchspunkte des begrenzten Faktorraums bezeichnet. Sie sind Punkte im Versuchsraum, bei denen sich verschiedene Randbedingungen in diesem Punkt schneiden.
- **Kantenmittelpunkte:** Der Kantenmittelpunkt ist ein Punkt auf der Grenzlinie des Versuchsraums, also der Mittelpunkt zwischen zwei Eckpunkten, die auf der selben Kante des Begrenzungsbereichs liegen.

6.5.1 Einbeziehung von Versuchspunkten

Zuvor wurden bereits die Vorteile D-optimaler Versuchspläne aufgelistet. Ein Punkt dabei war die Integration von Versuchspunkten bzw. Einfügapunkten, die im englischen mit „Inclusions“ bezeichnet werden und in *Abb. 6.3* dargestellt sind.

„Inclusions“ können z.B. aus einem vorhergehenden „Screening“-Versuchsplan oder aus einem kleineren Versuchsplan stammen. Weiterhin kann es vorkommen, daß bestimmte Versuchspunkte oder Faktorkombinationen auf jeden Fall im Versuchsplan enthalten sein sollen.

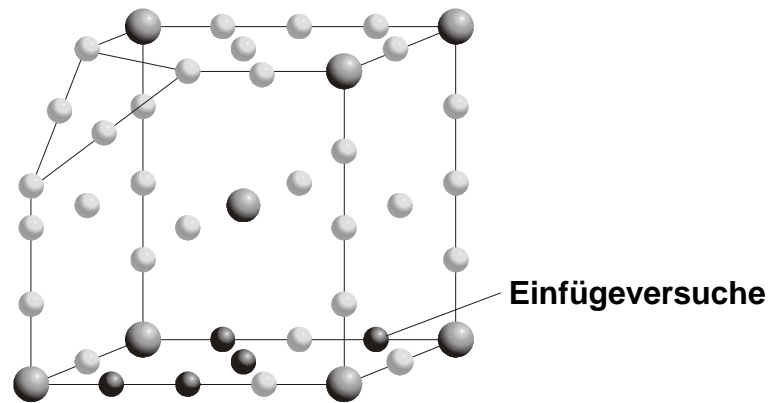


Abb. 6.3: Inclusions eines D-optimalen Versuchsplans

Als großer Vorteil kann hierbei aufgeführt werden, daß der endgültige Versuchsplan um die „Inclusions“ erzeugt wird. Allerdings ist zu erwähnen, daß die Qualitätszahlen eines Versuchsplans mit Einfügeversuchen schlechter als bei einem Versuchsplan gleicher Größe ohne Einfügeversuche ist, da die Gütezahlen bei Versuchsplänen mit „Inclusions“ von deren Lage abhängen.

Stammen die Einfügeversuche aus geplanten Versuchen (Versuchsplänen), weisen die Gütezahlen bessere Werte auf, als bei völlig ungeplanten Versuchen.

6.5.2 Einschränkung des Versuchsgebiets

Gegenüber den faktoriellen Versuchsplänen haben D-optimale Versuchspläne einen großen Vorteil und zwar die Einschränkung des Versuchsbereichs, der durch die Einflußgrößen aufgespannt wird. Diese Beschränkung des Versuchsgebiets wird auch als „Constraints“ bezeichnet. Dabei ist es möglich, einzelne Versuchspunkte oder ganze Regionen des Versuchsraums auszuschließen, wie in Abb. 6.4 zu sehen ist. Bei technischen Fragestellungen kommt es z.B. häufig vor, daß bestimmte Faktorstufenkombinationen nicht zu realisieren sind.

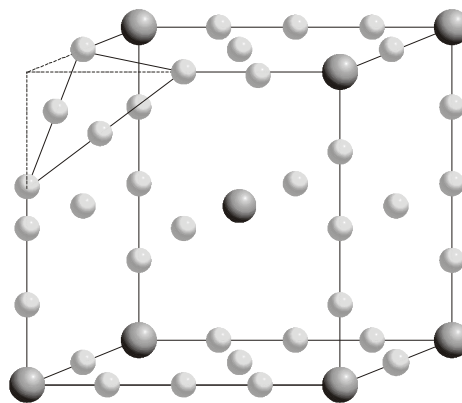


Abb. 6.4: Eingeschränkter Versuchsraum

Zur Beschränkung des Versuchsbereichs sind zwei Varianten möglich. Zum einen wird die Form des Versuchsraums beibehalten, welches eine deutliche Verkleinerung des Versuchsraums zur Folge hat. Abb. 6.5 zeigt einen derart verkleinerten Versuchsraum anhand zweier Faktoren.

Darin ist der Bereich dunkelgrau unterlegt, der keine Versuchspunkte beinhalten darf. Durch dieses Abschneiden folgt, daß auch im hellgrauen Bereich keine Versuchspunkte liegen können. Es ist ersichtlich, daß ein enormer Versuchsraum wegfällt. Daher ist das Festhalten an der Form des klassischen Versuchsraums nicht zu empfehlen.

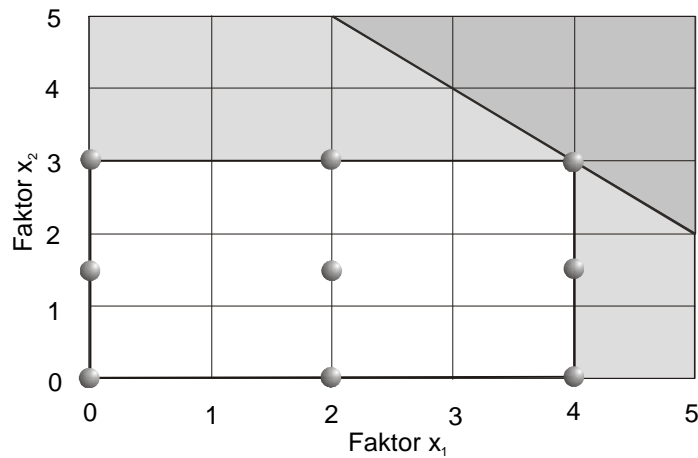


Abb. 6.5: Versuchspunkte im verkleinerten Versuchsbereich /WAS01/

Eine bessere Möglichkeit besteht darin, die Versuchspunkte im gesamten restringierten Bereich zu verteilen, welches in Abb. 6.6 dargestellt ist. Der Versuchsraum weist darin nicht mehr die Form eines klassischen Versuchsraums auf, sondern eine durch die Begrenzung bedingte Gestalt. Weiterhin ist ersichtlich, daß die Versuchspunkte wesentlich besser über den Versuchsraum verteilt sind /WAS01/.

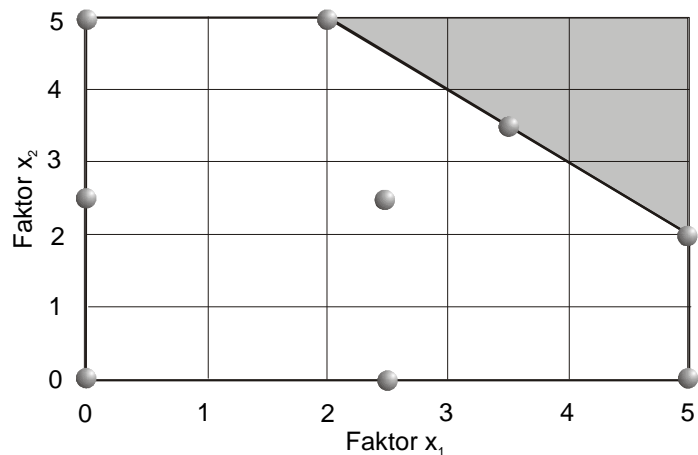


Abb. 6.6: Versuchspunkte im gesamten Versuchsbereich /WAS01/

Eine Beschränkung für ein Modell mit zwei Faktoren wird in Form von linearen Ungleichungen der Form

$$a_1x_1 + a_2x_2 \leq c \tag{6.18}$$

beschrieben /WEM99/

Anhand Abb. 6.6 soll die Ermittlung der Ungleichung für die beiden Faktoren x_1 und x_2 näher erläutert werden. Zuerst sind die Vorzeichen v_i der auszuschließenden Bereiche zu bestimmen und zwar wie folgt:

- „+“ als Vorzeichen, wenn der Faktor oder Versuchspunkt vom oberen Faktor und
- „-“ als Vorzeichen, wenn der Bereich vom unteren Wert

abgeschnitten werden soll.

Auf *Abb. 6.6* bezogen ergibt sich damit für

- $v_1 = +$ (Faktor x_1 ist nach oben begrenzt) sowie
- $v_2 = +$ (Faktor x_2 ist ebenfalls nach oben begrenzt).

Die Koordinaten des kritischen Punktes belaufen sich auf $x_1 = 5$ und $x_2 = 5$. Somit läßt sich der Abstand (d_i) vom kritischen Punkt angeben, der da lautet:

$$\begin{aligned} d_1 &= 5 - 2 = 3, \\ d_2 &= 5 - 2 = 3. \end{aligned} \tag{6.19}$$

Jetzt wird die Gleichung der Geraden, welche für die Begrenzung verantwortlich ist, ermittelt:

$$\frac{v_1 x_1}{d_1} + \frac{v_2 x_2}{d_2} = r \tag{6.20}$$

Die Gleichung (6.20) entspricht dann deren Steigung. Bedingt durch das Einsetzen der bekannten Werte ergibt sich

$$\frac{x_1}{3} + \frac{x_2}{3} = r \tag{6.21}$$

für die sogenannte „rechte Seite“ der Gleichung.

Einsetzen der Koordinaten eines der beiden Endpunkte (hier Punkt mit den Koordinaten $x_1 = 5$ und $x_2 = 2$) der Geraden in Gleichung (6.21) liefert den Wert „r“.

$$\frac{x_1}{3} + \frac{x_2}{3} = \frac{5}{3} + \frac{2}{3} = \frac{7}{3} = r \tag{6.22}$$

Im letzten Schritt muß angegeben werden, ob der Bereich abgeschnitten oder zugelassen wird. In diesem Fall soll der Bereich abgeschnitten werden, so daß die Gleichung (6.22) sich wie folgt darstellt:

$$\frac{v_1 x_1}{d_1} + \frac{v_2 x_2}{d_2} \geq r \Rightarrow \frac{x_1}{3} + \frac{x_2}{3} \geq \frac{7}{3} \tag{6.23}$$

Die endgültige Form der Ungleichung ergibt sich durch die Multiplikation mit drei zu

$$1x_1 + 1x_2 \geq 7 / \text{ORT00, WAS01/} \tag{6.24}$$

6.6 Anzahl erforderlicher Versuche in Abhängigkeit vom Modell

Die Versuchsanzahl bzw. -punkte werden weitestgehend durch die Koeffizienten des vermuteten mathematischen Modells bestimmt. Eine Grundregel hierbei ist, daß die Anzahl der Versuche (N) größer als die Anzahl der Koeffizienten (K) sein muß. In einigen Literaturstellen werden sogenannte Faustregeln angegeben, die bei der Bestimmung der Versuchsanzahl behilflich sein sollen. Eine Faustregel besagt, daß

$$\text{optimale Anzahl der Versuche} \quad (\sim) < \quad 1,5 \cdot \text{Zahl der Koeffizienten im mathematischen Modell} \quad (6.25)$$

sein sollte /PET91b/.

Bei einer anderen Literaturstelle wird angegeben, daß mindestens die Anzahl der Koeffizienten im mathematischen Modell + fünf Versuche notwendig sind /ORT00/.

Im allgemeinen werden lineare Modelle mit Wechselwirkungen sowie ggf. die Erweiterung um quadratische Terme für praxisrelevante Problemstellungen ausreichend sein. Allerdings ist es z.B. im Bereich der Kennfeldermittlung von Motorensteuergeräten keine Seltenheit, wenn kubische Modelle Verwendung finden /WAS01, MIE00a, HDT01/. Ebenso ist bei Mischungsanalysen mit kubischen Modellansätzen zu rechnen /ORT00b, SPE91, SCH97, BRA94/.

Für den linearen und für den quadratischen Modellansatz läßt sich die Anzahl der Koeffizienten, welche dann Rückschlüsse auf den Versuchsumfang zulassen, leicht bestimmen. Dies wird durch Formel (6.26) und (6.27) mathematisch ausgedrückt:

$$\text{linearer Ansatz:} \quad K = k + 1 \quad (6.26)$$

$$\text{quadratischer Ansatz:} \quad K = \frac{(k+1)(k+2)}{2}. \quad (6.27)$$

Um die Effizienz von D-optimalen Plänen nochmals darzustellen, enthält *Tab. 6.3* eine Übersicht über die Versuchsumfänge bei verschiedenen Modellen und Standardplänen bezüglich der Anzahl der Faktoren.

Versuchsplan	Anzahl der Faktoren				
	2	3	4	5	6
2^k (mit WE)	4	8	16	32	64
3^k (mit WE)	9	27	81	243	729
zentral zus. gesetzt.	9	15	25	43	77
Box-Behnken		15	27	46	54
D-Pläne					
• linear minimal	3	4	5	6	7
• linear maximal	4	6	7	9	10
• quadr. minimal	6	10	15	21	28
• quadr. optimal	9	15	23	32	42

Tab. 6.3: Verschiedene Modelle und deren Versuchsumfänge /PET91b/

6.7 Vorgehensweise zur Erstellung D-optimaler Pläne

Die Erstellung D-optimaler Versuchspläne ist nicht mehr so einfach durchzuführen wie bei den faktoriellen Versuchsplänen. Zur Generierung sind folgende vier Schritte erforderlich /KOL96/:

1. Aufstellen eines Kandidatensatzes
(Menge möglicher Kombinationen bzw. Versuchspunkte)
2. Randbedingungen einbeziehen
(bestimmte Punkte werden gestrichen bzw. ausgeschlossen)
3. Einbeziehung von vorgegebenen Versuchspunkten oder zuvor durchgeführter Versuche (Inclusions)
 - Beschränkung der Freiheitsgrade
 - zusätzliche Versuche erhöhen das D-Optimalitätskriterium
 - Güte des/der Pläne wird erhöht
4. Auswahl eines/einiger D-Optimalen Versuchspläne
(Unterschiedliche Verfahren bzw. Algorithmen)

Aus dem angedeuteten Schema einer Vorgehensweise läßt sich bereits erkennen, daß im Vorfeld der Erzeugung eines optimalen Versuchsplans je nach vorliegender Problemstellung bestimmte Festlegungen und Überlegungen anzustellen sind. Mit nachstehenden Fragen lassen sich diese ergründen:

- Wie viele Faktoren sollen analysiert werden?
- Welche Faktoren sind zu untersuchen?
- Wie lautet die Zielgröße(n)?
- Welche Terme soll das Modell haben?
- Wie viele Versuche sind im Höchstfall durchführbar?
- (Sind sogenannte „potential terms“ (Modde) mit in das Modell einzubeziehen?)
- Liegen Randbedingungen bzw. eine Einschränkung des Versuchsraums vor?
- Wie lauten diese Randbedingungen?
- Müssen bestimmte Versuche auf jeden Fall ermittelt bzw. durchgeführt werden?
- Lassen sich Versuche aus vorherigen Untersuchungen, Versuchen oder Versuchsplanungsprojekten einbeziehen (Inclusions)?
- Sind Versuchen aufgrund nicht reproduzierbarer Ergebnisse zu wiederholen?

6.8 Suchalgorithmen

Wie bereits bei der Vorgehensweise zur Erstellung von optimalen Versuchsplänen erwähnt, gibt es unterschiedliche Suchalgorithmen, zur Erstellung dieser Pläne /DUM94/. Nachfolgend sollen diese Suchverfahren aufgelistet und näher beschrieben werden. Die Auflistung erfolgt nach der Geschwindigkeit des Sucherfolges. Nähere Einzelheiten zu den einzelnen Verfahren sind dem Artikel von *Cook* und *Nachtsheim* /COO80/ zu entnehmen.

Die zur Anwendung kommenden Algorithmen lauten im einzelnen /STC98/:

- Sequentielle Methode (*Dijkstra*)
 - Einfacher Austausch (*Wynn-Mitchell*)
 - Detmax-Algorithmus (Austausch mit Extrusionen)
 - Modifizierte *Fedorov*-Methode (simultaner Austausch)
- und
- *Fedorov*-Methode (simultaner Austausch).

Bis auf die sequentielle Methode handelt es sich bei den übrigen Methoden um Iterationsverfahren. Die sequentielle Methode ist das schnellste Verfahren. Es liefert aber auch den schlechtesten Versuchsplan. Alle übrigen Verfahren sind nach ihrer Geschwindigkeit aufgeführt.

6.8.1 Sequentielle Methode (*Dijkstra*)

Dieser mathematische Algorithmus ist auf die Arbeit von *Dijkstra* /DYK71/ zurückzuführen. Der Algorithmus beginnt mit einem leeren Plan und sucht anhand des gewählten Kriteriums diejenigen Punkte aus, die dieses Kriterium maximieren.

Dabei findet allerdings keine Iteration statt, denn der Algorithmus wählt einfach nacheinander die Punkte aus. Folglich ist dies die schnellste Methode, die angesprochen wird.

6.8.2 Einfacher Austausch (*Wynn-Mitchell*)

Der Algorithmus „Einfacher Austausch“ beruht auf den Entwicklungen von *Mitchell*, *Miller* und *Wynn* /MTC74b/. Als Startpunkt wird ein Anfangsplan gewählt der, die geforderte Größe beschreibt (z.B. zuvor durch eine sequentielle Methode erstellt). Beim weiteren Vorgehen wird iterativ ein Versuchspunkt aus dem Plan entfernt und durch einen neuen ersetzt. Das Entfernen oder Hinzufügen hängt von den Beiträgen der Punkte auf das gewählte Optimalitätskriterium (D oder A) ab. Versuchspunkte, die einen kleinen Beitrag leisten, werden durch Werte, die einen großen Beitrag beisteuern, ausgewechselt. Beendet wird der Algorithmus dann, wenn keine Verbesserungen mehr erzielt werden.

6.8.3 Detmax-Algorithmus (Austausch mit Extrusionen)

Einer der wohl am bekanntesten und am häufigsten verwendeten Algorithmen zur Suche nach einem D-optimalen Versuchsplan, ist der „Detmax-Algorithmus“ von *Mitchell* /MTC74a/.

Ähnlich wie der „Einfache Austausch“ beginnt auch der „Detmax-Algorithmus“ mit einem Anfangsplan, dem sich der bereits beschriebene Austausch von Versuchspunkten, die keinen Beitrag leisten, anschließt. Falls sich das Kriterium (D oder A) nicht verbessert, führt der Algorithmus sogenannte Exkursionen durch, d.h. in einem Schritt wird mehr als nur ein Punkt gleichzeitig ausgetauscht. Ist keine Verbesserung zu erkennen, bricht der Algorithmus ab.

6.8.4 Fedorov-Methode (simultaner Austausch).

Diese Methode stellt den Ursprung für die später generierte „modifizierte Fedorov“-Methode /COO80/ dar. Als Unterschied zwischen den beiden Methoden ist bei der herkömmlichen „Fedorov“-Methode während jedem Iterationsschritt nur ein einzelner Austausch möglich. Das bedeutet, daß alle Paare von Punkten innerhalb des Plan mit allen anderen möglichen Paaren verglichen und bewertet werden. Daraufhin tauscht der Algorithmus nur diejenigen Paare aus, die zu einer Verbesserung hinsichtlich des Kriteriums beitragen. Somit ist auch ersichtlich, daß dieser Algorithmus mehr Zeit in Anspruch nimmt.

6.8.5 Modifizierte Fedorov-Methode (simultaner Austausch)

Wie bereits angesprochen ist dieser Algorithmus modifiziert worden und ist somit eine Erweiterung der bereits beschriebenen „Fedorov“-Methode /COO80/. Ebenfalls wie einige andere Algorithmen auch, beginnt die „modifizierte Fedorov“-Methode mit einem Anfangsplan der geforderten Größe.

Diese Methode unterscheidet sich durch das Austauschverfahren. Innerhalb der Iteration werden die Versuchspunkte des Plans mit denen aus der Startliste verglichen, aber nicht nacheinander, sondern gleichzeitig. Folglich wird nacheinander jeder Punkt des Plans mit jedem Punkt der Startliste einem Vergleich unterzogen.

Auch hier wird nur dann ein Punkt in den endgültigen Versuchsplan integriert, wenn er das Kriterium verbessert bzw. maximiert. Es wird so oft ausgetauscht, wie Versuchspunkte im Plan vorhanden sind. Lassen sich keine Verbesserungen mehr erzielen, bricht der Algorithmus ab.

6.9 Zusammenstellung Charakteristika D-optimaler Pläne

Wie bereits bei den klassischen Methoden, enthält Tab. 6.4 eine Auflistung von charakteristischen Eigenschaften und deren Bewertung bezüglich D-optimaler Versuchspläne.

Anforderungen Versuchspläne	Anzahl der Faktoren	orthogonaler Versuchsplan	maximale Anzahl an Stufen	Screeningplan	Optimierungsplan	Robuste Prozesse/Produkte	lineares Modell	lineares Modell + WW	quadratisches Modell	Modelle höherer Ordnung	Linearitätsabweichungen sind erkennbar	geringer Aufwand zur Versuchsplanerstellung	geringer experimenteller Aufwand	Einfügeversuche möglich	Restriktionen möglich
D-optimal-Versuchspläne	2 - 12	⊙	VA	●	●	⊙	●	●	●	●	●	○	⊙	●	●

Tab. 6.4: Charakteristika (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt, VA: Versuchsabhängig)

Weiterhin wurde für drei Modellbeispiele (linear, quadratisch, kubisch) Mindestversuchsanzahlen in Abhängigkeit von der Faktorenanzahl ermittelt, die in *Tab. 6.5* aufgeführt sind.

Anzahl der Faktoren	2	3	4	5	6	7	8	9
D-optimal-Versuchspläne lineares Modell	3	4	5	6	7	8	9	10
D-optimal-Versuchspläne quadratisches Modell	6	10	15	21	28	36	45	55
D-optimal-Versuchspläne kubisches Modell	10	20	35	56	84	120	165	220

Tab. 6.5: Anzahl der Versuche der Versuchspläne

7 Experimentelle Optimumsuche

In der betrieblichen Praxis besteht das Ziel, mit möglichst geringem Aufwand das Optimum eines Produktes bzw. Prozesses zu erreichen. Hierzu ist es notwendig, die Beziehungen zwischen Zielgrößen und Einflußgrößen zu ermitteln. Häufig wird das Erzielen von kleinen Verbesserungen irreführend als Optimierung bezeichnet. Von einer wirklichen Optimierung kann jedoch nur dann gesprochen werden, wenn mittels geeigneter Verfahren das wahre Optimum weitestgehend getroffen wird /SCH97/.

Die Beziehung zwischen einer Zielgröße (z.B. Ausbeute eines Prozesses) und zwei Einflußgrößen (z.B. Temperatur und Zeit) läßt sich durch eine Fläche im Raum darstellen. In der nahen Umgebung ähnelt diese Fläche einem Hügel, dessen Höhe die Zielgröße für bestimmte Werte von Zeit und Temperatur veranschaulicht. Soll diese Fläche zweidimensional dargestellt werden, so kann dies, ähnlich wie auf einer Landkarte, mit sogenannten Höhenlinien erfolgen, wie dies in *Abb. 7.1* dargestellt ist /BOX75/. Derartige Darstellungen von Zusammenhängen werden in der Literatur auch als Isolinien- oder Antwortkonturendiagramme bezeichnet /SCH97/.

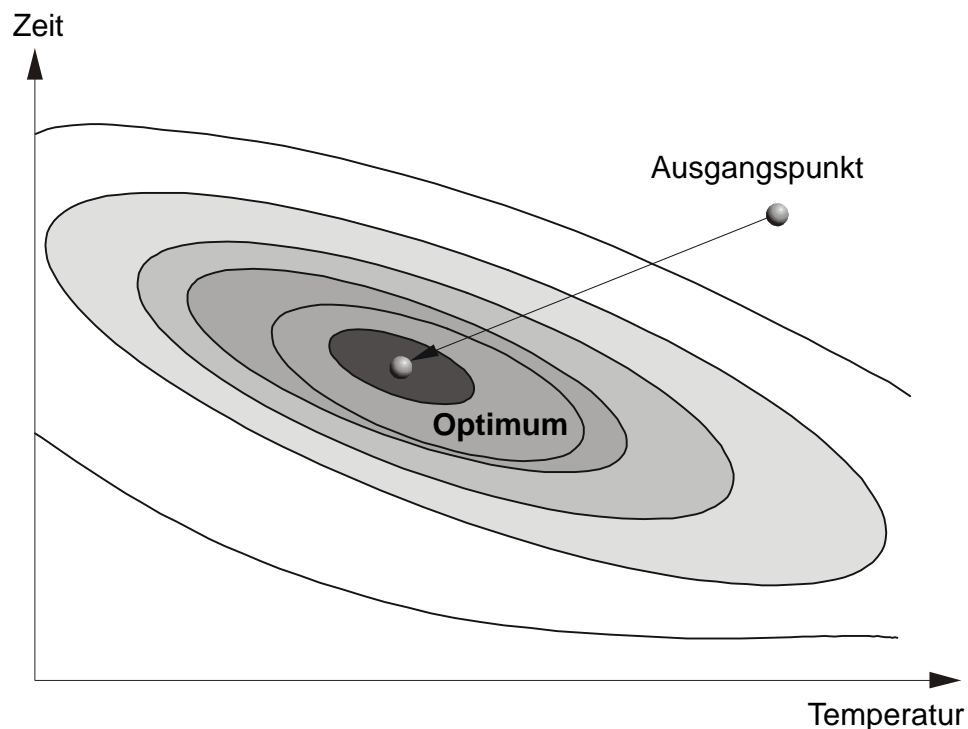


Abb. 7.1: Ziel von Optimierungsverfahren

Zur Erreichung von optimalen Produkten bzw. Prozessen existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Optimierungsstrategien. Nachfolgend werden nur die Verfahren angesprochen, die immer wieder im Zusammenhang mit der statistischen Versuchsplanung in der Literatur genannt werden. Dazu gehören Gradientenverfahren (steilster Anstieg), Simplex-Verfahren und die Gauss-Seidl-Strategie sowie die evolutionären Optimierungsstrategien wie Evolutionary Operation (EVOP) und Evolutionäre Algorithmen (EA), zu denen Genetische Algorithmen (GA) und die Evolutionsstrategien (ES) zählen. Bei Verfahren wie EVOP, Simplex, steilster Anstieg und Gauss-Seidel bleibt der quantitative Zusammenhang unbekannt. Das Optimum wird nur durch „blindes“ Absuchen der Antwortfläche ermittelt /OTO97/.

7.1 Gradientenverfahren (steilster Anstieg)

Um optimale Bedingungen bei Produkten bzw. Prozessen aufzufinden, stehen eine Vielzahl von Gradientenverfahren zur Verfügung, die alle davon ausgehen, daß bereits Ergebnisse aus einer bestimmten Menge geplanter Versuche (minimaler Anfangsplan) vorliegen und für die weitere Planung verwendet werden können. Damit ist es möglich, sich schrittweise deterministisch dem Gebiet der größten Qualitätsdichte bzw. dem Extremum einer Zielgröße zu nähern, unabhängig davon, ob das gesuchte Extremum ein Maximum oder Minimum ist.

Eines der gebräuchlichsten Gradientenverfahren, welches in der Praxis angewendet wird, ist die Methode des steilsten Anstiegs, die hauptsächlich in der Entwicklung und Fertigungsvorbereitung zum Einsatz kommt /SCH97/. Entwickelt wurde die Methode des steilsten Anstiegs von *G. E. P. Box* und *K. B. Wilson* /BOX51/, um die ungefähre Lage des Optimum zu bestimmen, wenn der Startpunkt sehr weit vom Optimum entfernt liegt /BOX75/.

Zu Beginn wird ein Startpunkt gewählt, um den symmetrisch ein 2^k -Versuchsplan konstruiert wird. Weisen die Faktoren einen linearen Zusammenhang ohne Wechselwirkungen auf, so wird ein lineares Regressionsmodell erstellt. Mit diesem mathematischen Approximationsmodell ist es möglich, Höhenlinien gleicher y -Werte zu berechnen, auf denen dann senkrecht ein Vektor (steilster Anstieg) in Richtung des Optimum errichtet werden kann. Entlang dieses steilsten Anstiegs werden so lange Versuche durchgeführt, bis eine Verschlechterung der Ergebnisse eintritt. Um diesen Punkt wird anschließend wiederum ein 2^k -Versuchsplan erzeugt. Eine erneute Bestimmung des Regressionsmodells ergibt eine neue Richtung des steilsten Anstiegs, auf der Versuche durchzuführen sind. Diese Prozedur setzt sich fort, bis die Nähe des Optimalgebiet erreicht ist, d.h. die Zielgröße nur noch geringfügige Änderungen aufweist. Im Optimalgebiet helfen dann Versuchspläne höherer Ordnung, ein Modell höheren Grades zu entwickeln und dementsprechend das Optimum zu bestimmen. Schematisch ist das Vorgehen in *Abb. 7.2* aufgezeigt /PET91b/.

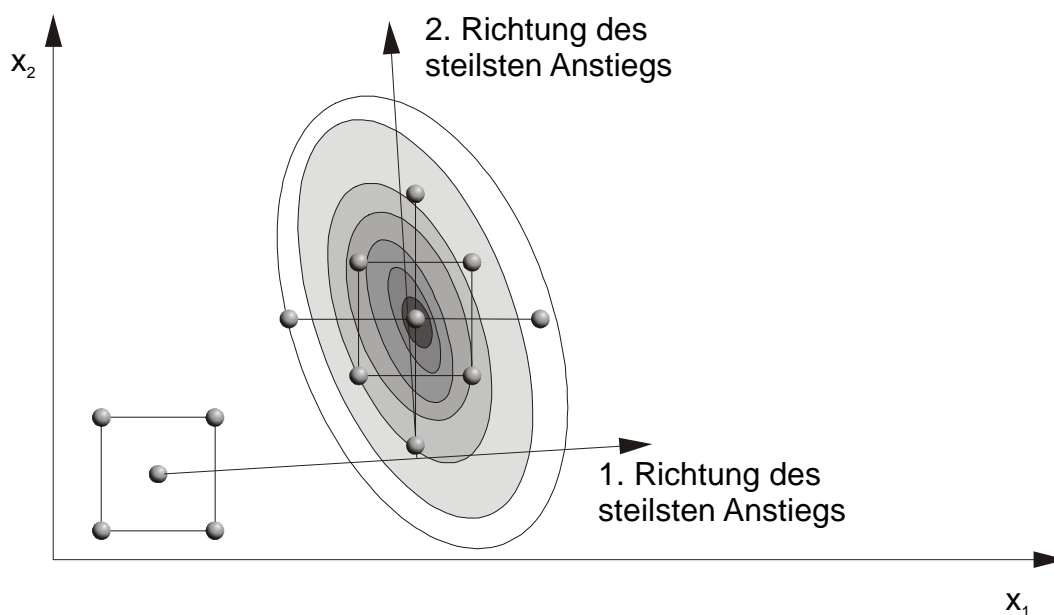


Abb. 7.2: Auffinden eines Optimums mit der Methode des steilsten Anstiegs

7.2 Simplex-Methode

Die Strategie des Simplexsuchverfahren wurde 1962 von *W. Spenley, G. R. Hext* und *F. R. Himsowth* als Optimierungsmethode veröffentlicht /SPN62/. *J. A. Nelder* und *R. Mead* haben die Simplex-Methode¹ von *Spenley, Hext* und *Himsworth* durch Reflexionskontraktion- und Expansionsvorschriften erweitert. Da dieses Verfahren von mehreren Startpunkten gleichzeitig beginnt, ist es eigentlich vom Ursprung her den evolutionären Verfahren zuzuordnen, welche den steilsten Anstieg zur Optimumsuche benutzt (siehe *Abb. 7.3*) /SPN62/.

Anwendung findet das Simplexverfahren in der Praxis hauptsächlich dann, wenn die Richtung von Verbesserungen mit möglichst wenigen Faktorstufenkombinationen erkannt werden soll /KLP98/. Hierbei genügen $k+1$ Versuchspunkte, um ein lineares Polynom für k Einflußgrößen zu ermitteln. Ein Simplex² für den k -dimensionalen Raum besitzt demnach $k+1$ Ecken, welche um einen Mittelpunkt „gleichmäßig“ angeordnet sind. Bei zwei Einflußgrößen ist der Simplex ein gleichseitiges Dreieck, für drei Einflußgrößen ein Tetraeder usw. /SCH97/.

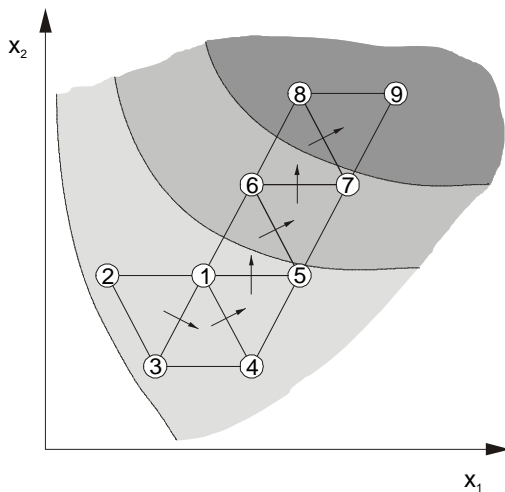


Abb. 7.3: Simplexoptimierung steilster Anstieg

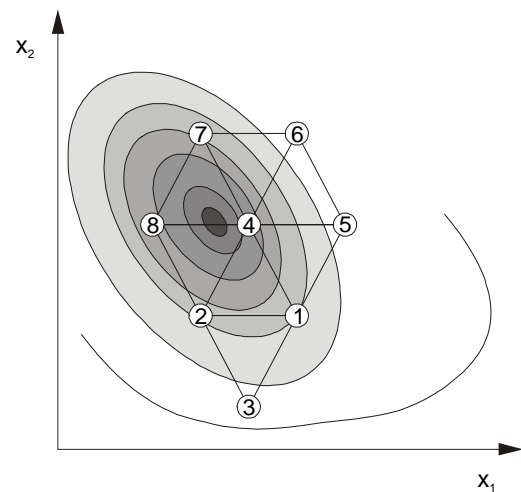


Abb. 7.4: Rotation um den Optimalpunkt

Von einem aus drei Punkten bestehenden Startsimplex beginnt unter Zuhilfenahme der „Spiegelungstechnik“ (Spiegelung des schlechtesten Punktes/Ergebnisses) die schrittweise Optimierung /OTO97/. Dabei wird der Wahl der Schrittweite eine große Bedeutung beigemessen. Bei zu kleiner Schrittweite müssen unter Umständen zu viele Versuche durchgeführt werden. Ist die Schrittweite zu groß, besteht die Gefahr, daß ein kleines Zielgebiet nicht entdeckt wird /ZWE89/. Fängt der Simplex an zu pendeln, so führt die Spiegelung des zweitschlechtesten Punktes zu einer Fortsetzung. Wenn der Simplex um einen Punkt rotiert, ist davon auszugehen, daß das Optimalgebiet erreicht ist. Wird der Drehpunkt einmal vollständig umlaufen (dazu werden sieben Versuchspunkte benötigt), kann der Punkt als Optimum anerkannt werden. Entspricht das Ergebnis nicht den Anforderungen, können Versuchspläne höherer Ordnung herangezogen werden, um sich dem Optimum noch weiter zu nähern /RET78, SCH97, PET91b/.

¹ Nicht zu verwechseln mit dem Simplex-Verfahren von Dantzig /DAT51/, welches grundsätzlich nur zur Lösung linearer Optimierungsprobleme anwendbar ist.

² Simplex = geometrisches Gebilde für Versuchspunkte, deren Anzahl um eins höher ist, als die Anzahl der Faktoren.

Da das gefundene Optimum ein lokales Optimum darstellen kann, sollte der Versuch von einem anderem Startpunkt wiederholt werden, der nicht in der Nähe des ersten Startpunktes liegt. Wird bei dieser Versuchsreihe ebenfalls der Punkt der ersten Optimumsuche erreicht, so handelt es sich mit höchster Wahrscheinlichkeit nicht um ein lokales, sondern um ein absolutes Optimum /SCH97/.

7.3 Gauss-Seidl-Strategie

Bereits namhafte Wissenschaftler wie *G. Galilei*³ und *I. Newton*⁴ sollen schon mit der Gauss-Seidl-Methode experimentiert haben, d.h. die Ursprünge dieser Methode gehen weit in die Vergangenheit zurück /PFE96, KRO94/. Bezüglich der Gauss-Seidl-Methode treten immer wieder Namenskonflikte zu Tage. In manchen Literaturstellen wird von „One-Factor-at-a-Time“-Methode gesprochen /PET91b, KLP98/. *Spenhoff* /SPE91/ hingegen spricht von einer „Einfaktormethode“. Im Buch von *Heistermann* /HEI94/ ist die Gauss-Seidl-Methode unter der Namen „Hillclimbing“ verzeichnet, wohingegen *Quentin* /QUE94/ den Begriff „One-by-one Faktor“-Methode“ gebraucht. Es zeigt sich somit, daß fünf Begriffsausbildungen für dieses eine Verfahren stehen.

Lange Zeit war die Gauss-Seidl-Methode als eine Vorgehensweise bekannt, die sich zum Auffinden von optimalen Prozeßläufen eignet und als eine von vielen Technikern favorisierte Methode angesehen wurde. Bei den Untersuchungen wurde stets großer Wert darauf gelegt, nur eine Einflußgröße zu variieren, da ansonsten nicht nachvollziehbar war, welche Änderung letztlich die entscheidende war /QUE94/.

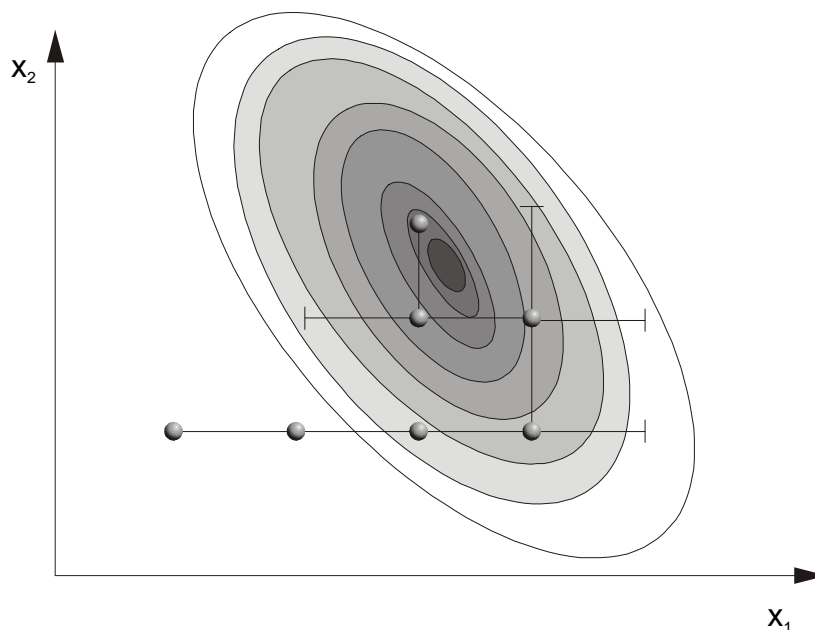


Abb. 7.5: Prinzip der Gauss-Seidl-Strategie

³ *Galileo Galilei* (* 1564 - † 1642), italienischer Physiker und Mathematiker. Er gilt als Begründer der modernen, auf Erfahrung und Experiment beruhenden Physik /BER91/.

⁴ *Sir Isaac Newton* (* 1643 - † 1727), englischer Astronom, Mathematiker und Physiker, entdeckte u. a. die gegenseitige Anziehung von Massen (Gravitation) sowie (unabhängig von *Leibniz*) die Grundlagen der Differential- und Integralrechnung /BER91/.

Das Prinzip dieser Methode beruht auf einer linearen schrittweisen Annäherung an die Zielgröße mit einer sehr kleinen Fortschrittsgeschwindigkeit. Liegen mehrdimensionale Problemstellungen vor, so werden diese in eindimensionale Schritte zerlegt, indem parallel zu den Achsen der Einflußgrößen versucht wird, das Optimum zu finden, wie in *Abb. 7.5* zu sehen.

Begonnen wird dabei an einem willkürlichen Startpunkt, von dem aus nur eine Einflußgröße variiert wird. Alle anderen bleiben konstant. In Richtung der Verbesserung werden so lange Versuche durchgeführt, bis sich die Zielgröße nicht mehr verbessert. Tritt dies ein, so wird die nächste Einflußgröße gewählt, mit der die gleiche Prozedur wiederholt wird. Anhand dieser Vorgehensweise werden nach und nach alle Einflußgrößen einzeln optimiert, bis letztendlich ein globales Optimum erreicht ist /KRO94/.

Von allen Optimierungsstrategien ist die *Gaus-Seidl-Methode* die am einfachsten durchzuführende Vorgehensweise, die weder mathematische noch statistische Vorkenntnisse benötigt, um optimale Einstellungen von Einflußgrößen zu finden. Allerdings ist es nicht bzw. nur schwer möglich, Wechselwirkungen zu erfassen.

7.4 Evolutionäre Optimierungsstrategien

Unter diesem Punkt werden Optimierungsmethoden zusammengefaßt, welche sich am Optimierungsprozeß der Natur, der sogenannten Evolutionstheorie⁵, orientieren. Zur Optimierung werden dementsprechend Mechanismen der Mutation und Selektion angewendet. Das Prinzip aller evolutionären Optimierungsmethoden liegt in der Übertragung der natürlichen Optimierungsmethoden (Mutation und Selektion) auf technische Prozesse.

Zu den evolutionären Methoden sind das EVOP-Verfahren⁶, die Genetischen Algorithmen und die Evolutionsstrategien zu zählen, wobei EVOP als einziges Verfahren die laufende Produktion optimieren kann. Um Genetische Algorithmen und die Evolutionsstrategien anzuwenden, müssen Lösungsalgorithmen programmiert werden /CLE96, HRR98/.

7.4.1 Evolutionary Operation (EVOP)

Bei der Übertragung von optimierten Prozessen vom Labor oder einer Versuchsanlage auf die letztendliche Betriebsanlage bleiben erfahrungsgemäß die Einflüsse der Faktoren sowie deren Wechselwirkungen bestehen, aber des öfteren tritt auch eine Verschiebung dieser optimalen Faktorstufen auf. Im Gegensatz zu anderen Optimierungsstrategien ist das EVOP-Verfahren eine vorsichtige Methode, um Prozesse während der laufenden Produktion zu optimieren /KLP98/. *Box* und *Drapper* bezeichnen EVOP auch als „Dynamische Produktionsmethode“ /KAP90/. Eine Definition von EVOP nach *Box* lautet:

⁵ Als Begründer der Evolutionstheorie gilt der englische Naturforscher *Charles Robert Darwin* (* 1809 - † 1882). Allerdings sind die Grundzüge etwa ein Jahrhundert älter. Ein Name der hier zu nennen ist, lautet *Jean-Baptiste Lamarch* (* 1744 - † 1829) /NIS97/.

⁶ EVOP gilt als Weiterentwicklung des experimentellen Gradientenverfahrens. Eine genauere Betrachtung ist in /BOX69/ enthalten.

„Die grundlegende Philosophie besteht darin, daß es wenig wirkungsvoll ist, einen industriellen Vorgang nur zur Herstellung eines Produktes zu nutzen, vielmehr sollte ein Prozeß so betrieben werden, daß er nicht nur das Produkt zur Verfügung stellt, sondern auch Informationen über die Art und Weise liefert, wie das Produkt zu verbessern ist“ /PET91b/.

Anwendung findet das EVOP-Verfahren hauptsächlich in der chemischen Industrie sowie in anderen Fertigungsbereichen während der laufenden Produktion. Dazu ist kein spezielles Team von Experten notwendig. Nach einer kurzen Schulung aller Mitarbeiter kann dieses Verfahren von fast jedem durchgeführt werden. Für die Betriebsleitung steht mit EVOP ein Verfahren bereit, bei dem die normale statische Betriebsweise durch eine von vornherein auf zusätzliche Informationsgewinnung ausgerichtete Betriebsweise ersetzt wird.

Mit EVOP lassen sich die Einstellungen von nur zwei oder drei Prozeßparametern optimieren /BOX69, BOX75/. Eine höhere Anzahl von Faktoren wäre zwar denkbar, würde das Hantieren aber erheblich erschweren. Für jede Einflußgröße werden zwei Einstellstufen festgelegt. Dementsprechend ergeben sich für zwei Faktoren (A und B) vier verschiedene und für drei Faktoren (A, B und C) acht Kombinationsmöglichkeiten, wie Abb. 7.6. veranschaulicht /BRE98/.

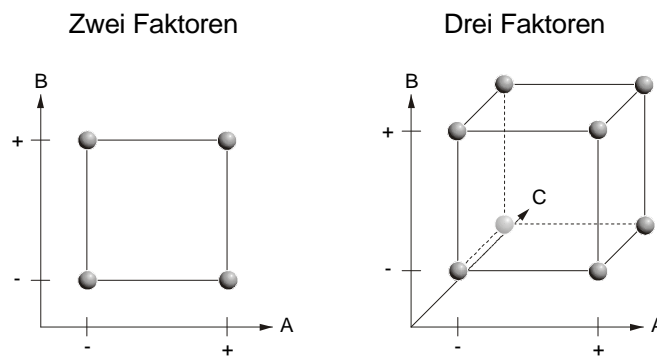


Abb. 7.6: Anordnung der Versuche für zwei bzw. drei Faktoren

Zunächst sollte ein 2^k - bzw. 2^{k-p} -Faktorenversuchsplan, mit oder ohne Zentralpunkt erstellt werden. Die sich daraus ergebenden Faktorstufenkombinationen werden während der laufenden Produktion in mehreren Zyklen immer in der selben Reihenfolge verändert, wobei nach jedem Zyklus eine Auswertung anhand eines Formblattes, welches in Abb. 7.7 dargestellt ist, erfolgt. Je mehr Zyklen durchlaufen werden, desto genauer ist die Berechnung des Mittelwertes und der Streuung, d.h. erst durch Wiederholung der Versuche des Versuchsplans ist es möglich, die Wirkungen der Faktoren im Hinblick auf den Rauschpegel als signifikant nachzuweisen (Selektion), da mit größerer Anzahl der Versuchswiederholungen eine Senkung des Rauschpegels zu beobachten ist. Der Stufenabstand wird dabei so klein gewählt (Mutation), daß die Produktion nicht nennenswert gestört wird, d.h. die Spezifikationen des Produktes kaum verändert werden.

Zu Beginn der EVOP-Anwendung muß der Experimentator einen Faktor bestimmen, um den die Gesamtvarianz die Versuchsstreuung übertreffen soll, d.h. welche Erhöhung der Gesamtvarianz bei der Analyse als signifikant erkannt werden soll. Hierzu ist folgender Zusammenhang wichtig:

- 1.) Ist der Faktor klein, müssen viele Zyklen durchlaufen werden.
- 2.) Bei einem großen Faktor genügt hingegen eine kleine Zyklenzahl.

Als Maß kann die Beziehung

$$\gamma^2 = \frac{\sigma^2 (\text{Gesamt})}{\sigma^2 (\text{Versuchsstreuung})} \tag{7.1}$$

genannt werden /MAY97/

Sind beispielsweise Effekte zu erkennen, die den Standardfehler um 20 % bis 40 % erhöhen, ist γ mit 1,2 bis 1,4 festzulegen. Weiterhin sind noch die Festlegung für die fälschliche Anerkennung eines Effektes α sowie das Risiko für die fälschliche Ablehnung eines Effektes β zu treffen, die in der Regel $\alpha = 5\%$ ($\alpha = 0,05$) und $\beta = 10\%$ ($\beta = 0,10$) umfassen. Mit diesen Werten ist eine Ermittlung der durchzuführenden Zyklen c möglich. *Tab. 7.1* weist eine Auflistung der Zyklen in Abhängigkeit der Werte γ , α und β auf, wobei immer der Grundsatz gilt, daß bei der Durchführung von mehreren Zyklen die Ergebnisse genauer werden /SCH97/.

Plan	a	b	g						
			1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
2 ² -Plan	0,10	0,10	5,6	3,6	2,6	2,0	1,6	1,3	1,1
	0,10	0,05	6,8	4,4	3,1	2,4	1,9	1,6	1,3
	0,05	0,10	6,9	4,4	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4
	0,05	0,05	8,2	5,2	3,8	2,9	2,3	1,9	1,6
2 ³ -Plan	0,10	0,10	3,2	2,1	1,5	1,1	0,9	0,8	0,6
	0,10	0,05	3,9	2,5	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
	0,05	0,10	3,9	2,5	1,8	1,4	1,1	0,9	0,8
	0,05	0,05	4,6	3,0	2,1	1,6	1,3	1,1	0,9

Tab. 7.1: Anzahl der Zyklen c in EVOP-Programmen in Abhängigkeit von a , b und g /SCH97/

Wie zuvor bereits angesprochen, eignet sich zur Durchführung und Auswertung von EVOP-Programmen die Anwendung von vorgefertigten Formularen, wie in *Abb. 7.7* am Beispiel eines 2²-Versuchsplans mit Zentralpunkt gezeigt.

Zunächst sind im ersten Zyklus ($c = 1$) die Werte für die betrachtete Zielgröße in die Zeilen C, E und F einzutragen. Die Effekte lassen sich mit den angegebenen Beziehungen bestimmen. Oben rechts im Formblatt ist die Schätzung für die Standardabweichung σ zu dokumentieren. Entweder basiert die Standardabweichung auf einer Schätzung des Experimentators oder aus früheren Meßreihen. Weiterverwendung findet die Standardabweichung bei der Berechnung der Vertrauensbereiche, die im Formblatt mit zweifacher Standardabweichung bezeichnet ist /PET91b/.

Beim zweiten Zyklus wird ein neues Auswertungsformular verwendet, in das die vorherigen Ergebnisse übertragen werden müssen, d.h. die Ergebnisse des ersten Zyklusses in die Zeile A (Summe vorheriger Zyklen) sowie B (Durchschnitt des vorherigen Zyklus). Neue Meßwerte sind nun in Zeile C einzutragen. Dementsprechend läßt sich die Differenz der Zeilen B und C berechnen und in Zeile D dokumentieren.

		Evolutionary Operation (EVOP) 2²-Faktorenversuchsplan Zielgröße: Zyklus c =					Faktoren A = B =		
Berechnung der Durchschnitte pro Fahrweise/Versuchsbedingung						Berechnung der Standardabweichung			
Fahrweise		(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	Vorschätzung von σ		
A	Zyklus-Summe (aus letztem Zyklus)						Bisherige Summe für s (in Zyklus 1 und 2 nicht vorhanden)		
B	Zyklus-Mittel (aus letztem Zyklus)						Bisheriger Durchschnitt für s (in Zyklus 1 und 2 nicht vorhanden)		
C	Neue Meßwerte (aus diesem Zyklus)						Neues s = Spannweite $\cdot f_{5,c}$ (in Zyklus 1 nicht vorhanden)		
D	Differenzen (B)-(C)						Spannweite (der Werte (0)-(4) dieser Zeile)		
E	Neue Summen (A) + (C)						Neue Summe für s (bisherige Summe s + neues s)		
F	Neue Durchschnitte (E)/c	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	Neuer Durchschnitt s = Neue Summe s/(c-1)		
Berechnung der Effekte						Berechnung der zweifachen Standardabweichung			
Mittelwert der Untersuchungsphase (Phasendurchschnitt)		$\frac{\bar{y}_0 + \bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4}{5}$					Für neuen Durchschnitt		
Haupteffekt A		$\frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_3 - \bar{y}_1 - \bar{y}_4}{2}$					Für neue Effekte		
Haupteffekt B		$\frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4 - \bar{y}_1 - \bar{y}_3}{2}$					Für Änderung des Mittelwertes		
Wechselwirkung A*B		$\frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 - \bar{y}_4}{2}$					Anmerkungen		
Änderung des Mittelwertes bzw. Phasenverschiebung		Phasendurchschnitt $-\bar{y}_0$							

Tabelle mit Multiplikationsfaktoren (zur Vereinfachung der Berechnungen)										
c	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{c,5}$		0,30	0,35	0,37	0,38	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41
1/c	1,00	0,50	0,33	0,25	0,2	0,17	0,14	0,12	0,11	0,10
1/(c-1)		1,00	0,50	0,33	0,25	0,20	0,17	0,14	0,12	0,11
$2/\sqrt{c}$	2,00	1,41	1,15	1,00	0,89	0,82	0,76	0,71	0,67	0,63
$1,79/\sqrt{c}$	1,79	1,26	1,03	0,89	0,80	0,73	0,68	0,63	0,60	0,57

Abb. 7.7: EVOP-Formblatt /WEM99/

Mittels dieser Differenz ist es möglich, Abweichungen des laufenden Experiments vom Durchschnitt der vorangegangenen Experimente zu erkennen. Zeile E (neue Summe) weist das Ergebnis der Addition aus Zeile C mit den entsprechenden Werten aus Zeile A auf. Somit ist mit den Werten aus Zeile E und unter Zuhilfenahme des multiplikativen Faktors $1/c$ die Bestimmung der neuen Durchschnittswerte möglich. Diese sind in Zeile F festzuhalten /PET91b, SCH97, BOX69, BOX75/.

Die Spannweite aus minimaler und maximaler Differenz (Zeile D) wird zur Berechnung der Standardabweichung s verwendet. Um s zu berechnen, muß die Spannweite R mit dem Faktor $f_{5,c}$ (Tabelle der Multiplikationsfaktoren) multipliziert werden. Im betrachteten zweiten Zyklus ist der neue Wert für s gleich dem Wert neue Summe für s . Die Berechnung der zweifachen Standardabweichung für die Durchschnitte sowie für die Effekte wird anhand der Werte neuer Durchschnitt (= neue Summe $s/(c-1)$) sowie der Formeln des Formblattes durchgeführt.

Im dritten Zyklus wiederholt sich dieses Vorgehen, jedoch wird ab hier der Wert „neuer Wert von s “ zur vorherigen Summe s hinzuaddiert. Eingetragen wird der Wert in das Feld neue Summe von s . Zusätzlich wird dieser Wert gemittelt (neuer Durchschnitt) und dementsprechend dokumentiert. Das beschriebene Vorgehen wird erst dann unterbrochen, wenn der Effekt eines Faktors oder die Wechselwirkung die Spannweite des entsprechenden Vertrauensbereiches übersteigt. Tritt dieser Fall ein, so ist ein Faktor signifikant und ein neuer Versuchsplan muß aufgestellt werden. Ein weiteres Abbruchkriterium könnte eine zuvor festgelegte Anzahl Zyklen sein /PET91b, SCH97/.

Wie anhand des beschriebenen Vorgehens zu erkennen ist, werden zur Auswertung nur geringe statistische Kenntnisse benötigt. Daher sind die Berechnungen leicht durchzuführen.

Scheffler /SCH97/ weist auf folgende Schlußfolgerungen hin:

- 1.) Es wurde keine signifikante Zielgrößenänderung entdeckt.
und
- 2.) Es stellt sich eine signifikante Zielgrößenänderung ein.

Aus Fall eins folgt, daß entweder keine weiteren Versuche notwendig sind, da der Arbeitspunkt bereits im Optimum liegt oder ein neuer EVOP-Versuch mit größerer Stufenweite benötigt wird, weil das Optimum noch nicht erreicht ist. Bei Fall zwei wird das Optimum entweder mit dem besten Versuchspunkt als neuem Arbeitspunkt erreicht oder aber der beste Versuchspunkt wird mit anderen Stufenniveaus als Startpunkt für einen neuen EVOP-Versuch verwendet. Auch hier ist das Optimum noch nicht erreicht /SCH97/.

Anzumerken ist, daß sich EVOP in der Praxis bisher nicht durchsetzen konnte. Dies liegt daran, daß die Anwendung von EVOP nicht unbedingt für jeden Fertigungsprozeß gleich gut geeignet ist. Ein Fertigungsprozeß eignet sich um so eher, je kürzer die Zeit zwischen der Veränderung der Einflußgröße und der Messung der Ergebnisse ist. Da jede Prozeßveränderung mit Risiken verbunden ist, vermeidet in der Praxis die Fertigung normalerweise jede Änderung, um die Produktion nicht zu gefährden. Gerade das EVOP-Verfahren sieht jedoch kleinste Prozeßänderungen als Chance für Verbesserungen zur Optimierung der laufenden Fertigung /KLP98/.

7.4.2 Evolutionäre Algorithmen (EA)

Die Funktionsweise und die Lösungseigenschaften evolutionärer Optimierungsstrategien wurden von *John Holland* /HLL75/ in den 70er Jahren an der Universität von Michigan, USA, entwickelt. Der Forschungsauftrag bestand damals darin, zum einen Naturgesetze zu erklären und zum anderen self-learning Computersoftware (künstliche Intelligenz) zu erstellen /CLE96/. Im gleichen Zeitraum entwickelt *Ingo Rechenberg* /REC73/ unabhängig davon eine Optimierungsstrategie, die gleiche Funktions- bzw. Lösungseigenschaften aufweist und den Namen Evolutionsstrategien trägt.

Unter dem Begriff „evolutionäre Algorithmen“ werden stochastische Optimierungsstrategien zusammengefaßt, die auf Erkenntnissen der Evolutionstheorie beruhen. Grundgedanke ist die gerichtete Suche der Evolution, die das Prinzip des „Überlebens des Besten“, d.h. eine natürliche Auslese darstellt /KRO94/. Im Vergleich zu anderen Optimierungsstrategien operieren evolutionäre Algorithmen typischerweise auf einer Menge bzw. Population von Lösungen. In abstrahierter Form werden dabei Mechanismen der evolutionären Molekularbiologie wie Mutation und Rekombination zur Lösungserzeugung eingesetzt. Die Qualität der Lösungen wird anhand eines sogenannten Fitneß-Wertes beurteilt. Durch eine sukzessive Generierung neuer Lösungen durch Variation, Bewertung sowie anschließender Selektion wird ein evolutionärer Fortschritt zum Optimum entwickelt /LOD98, HRR98/.

Einer der wichtigsten Vorteile der evolutionären Algorithmen ist der, daß selbst bei komplexen Randbedingungen sehr robuste Lösungen erzielt werden können, insbesondere dann, wenn wenige Versuchspunkte vorhanden sind /KRZ00/.

Anwendungsgebiete der Evolutionären Algorithmen liegen in der Elektronik, der Chemie und sogar in der modernen Finanzwelt, wenn vielgipfelige Probleme (Probleme mit vielen relativen Optima, jedoch nur einem absoluten Optimum) zu optimieren sind. Als Grund für diese Anwendungsgebiete ist die leichte Programmierbarkeit und der steile Gradient hinsichtlich geplanter Verbesserungen zu nennen. Für Ingenieure stellen diese Methoden eine äußerst effiziente Möglichkeit dar, entscheidende Verbesserungen im Prozeßablauf herauszuarbeiten. Ausführliche Informationen sind in dem Buch „Einführung in Evolutionäre Algorithmen“ von *V. Nissen* /NIS94/ sowie in /LOD98, NIS97/ zu finden.

7.4.2.1 Genetische Algorithmen (GA)

Das Konzept der genetischen Algorithmen geht, wie bereits angesprochen auf die Arbeiten von *Holland* /HLL75/ in den 70er Jahren zurück, die von *David E. Goldberg* /GOL89/ und anderen weiterentwickelt wurden. Genetische Algorithmen arbeiten mit einer Suchtechnik, die auf grundlegenden Prinzipien der Genetik beruhen und den Evolutionsprozeß nachahmen /RAI99/.

Bei einem vorliegenden Optimierungsproblem wird eine Menge möglicher Lösungen als Fortpflanzungsgemeinschaft von Individuen, der sogenannten Population, einem Evolutionsprozeß ausgesetzt. Durch diesen Prozeß soll sich die Population (zum Überleben) an die gegebenen Umweltbedingungen anpassen /OTO97/.

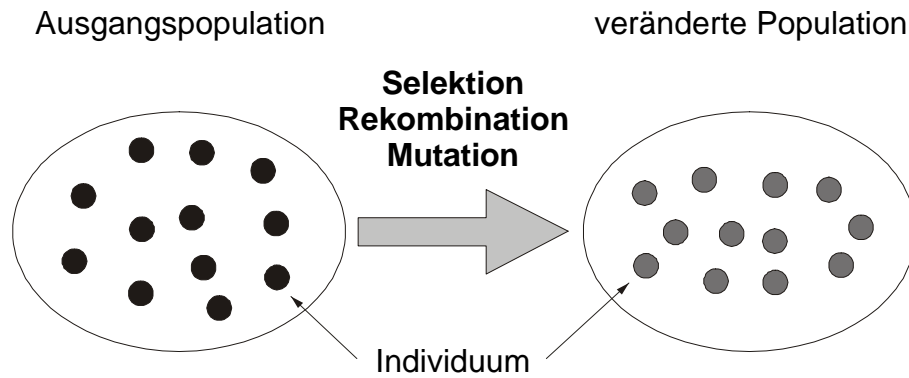


Abb. 7.8: Schema eines genetischen Algorithmus

Hinter dem Begriff „natürliche Auslese“ verbirgt sich in diesem Zusammenhang, daß sich alle Individuen in ihren Fähigkeiten und ihrem Verhalten leicht voneinander unterscheiden, wobei die Stärkeren überleben und die Schwachen nicht. Dadurch erhalten die stärkeren mehr Gelegenheit sich fortzupflanzen und somit Erbinformationen weiterzugeben, um sich den gegebenen Umweltbedingungen anzupassen. Abhängig ist die Adaption der Population dabei von einer Fitneßbewertung, die sich an dem Zielfunktional des vorhandenen Optimierungsproblems orientiert /LOD98/. Mittels Anwendung von genetischen Operatoren auf die Population wird der Evolutionsprozeß vollzogen. Unter Operatoren werden Mechanismen der natürlichen Selektion, der Rekombination sowie der Mutation verstanden. Die Selektion richtet sich dabei nach der Fitneß der Individuen.

Nach Festlegung eines Abbruchkriterium erfolgt eine Kodierung, die dazu dient, das Optimierungsproblem so aufzubereiten, daß eine Lösung mit Hilfe der genetischen Algorithmen angestrebt werden kann. Gewöhnlich wird zur Kodierung ein binärer Zahlencode verwendet. Anschließend ist eine Startpopulation auszuwählen. Jeweils von der Startpopulation bzw. von dem Populationsmodell hängt der Einsatz der genetischen Operatoren ab /CER95/.

Aus der Startpopulation oder aus der Elterngeneration werden in der Phase der Selektion zwei geeignete Individuen (z.B. großer Fitneßwert), ein Vater- und ein Mutterindividuen, ausgewählt, die zwei Kinderindividuen als Nachkommen erzeugen. Durch Rekombination entstehen so neue Individuen als Nachkommen der zuvor ausgewählten Start- bzw. Elternpopulation. Es besteht die berechnete Annahme, daß die Nachkommen eine höhere Fitneß als die Eltern haben. Nun wird in den kodierten Strings der beiden Eltern der sogenannte „Cross-over“-Punkt bestimmt, um an dieser Stelle die beiden Strings zu teilen und über Kreuz wieder zusammenzuführen, wie es in Abb. 7.9 zu sehen ist /LOD98, NIS97/.

Im Anschluß sollen die dadurch erhaltenen Nachkommen durch Mutation zufällig geändert werden. Jede Stelle der Nachkommen wird dazu schrittweise durchgegangen und mit einer zuvor festgelegten, geringen Wahrscheinlichkeit, durch einen anderen zufälligen Wert ersetzt. Der repräsentative Wert eines Individuums kann auf diese Weise stark verändert werden. Analog der Anfangspopulation ist die neu entstandene Population einer Bewertung zu unterziehen. Wird das definierte Abbruchkriterium erreicht, kann der genetische Algorithmus beendet werden. Ansonsten ist das Vorgehen so lange zu wiederholen, bis das Abbruchkriterium erreicht ist.

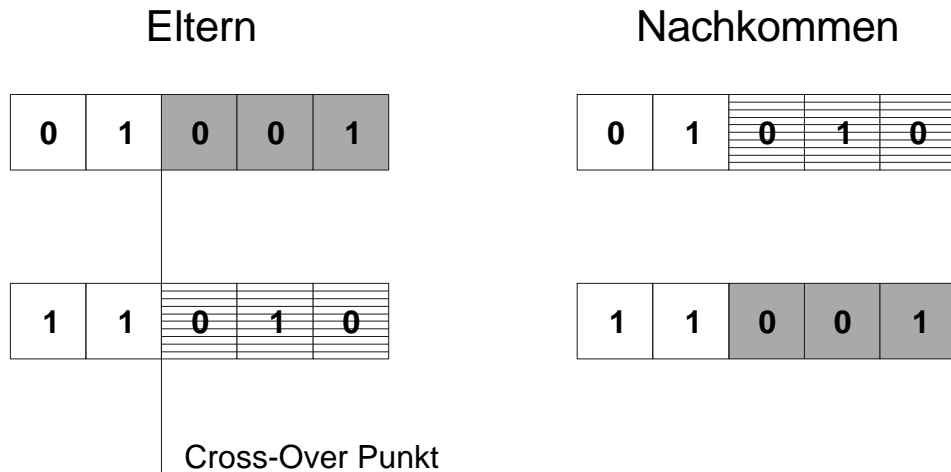


Abb. 7.9: Rekombination im genetischen Algorithmus /NIS94/

Für die Zusammensetzung der nächsten Generation gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Zum einen erzeugt jedes Elternpaar zwei Kinder, die beide übernommen werden. Dies hat zur Folge, daß die neue Generation zur Hälfte aus Eltern und Kindern besteht. Eine andere Möglichkeit ist, nur das „fittere“ Kind eines Elternpaares zu übernehmen. Welche Möglichkeit letztendlich verwendet wird, kann der Experimentator frei wählen /NIS97, OTO97, LOD98/.

Als Vorteil der Anwendung von genetischen Algorithmen kann das Auffinden von absoluten Maxima genannt werden, wobei sogar ein schnelles Fortschreiten in Richtung Optima möglich ist /OTO97/. Im Gegensatz zu herkömmlichen Optimierungsmethoden ist auch mit bis zu hundert Parametern noch ein effizientes Arbeiten möglich. Als Voraussetzung für einen derartigen Ablauf muß die Population von Versuchsdurchlauf zu Versuchsdurchlauf unverändert groß sein /CLE96/. Ein Nachteil bei der Anwendung ist in der aufwendigen Problemanalyse sowie in der aufwendigen Kodierung zu sehen. Ausführliches zu genetischen Algorithmen ist in /HEI94, SCÖ94/ zu finden.

7.4.2.2 Evolutionsstrategie (ES)

Der Wunsch biologische Strukturen und Prozesse nachzuahmen, mit dem Ziel technische Problemstellungen zu lösen, ist so alt wie die Technik selbst /BER91/. Aus diesem Wunsch entstand im Zuge der Verwissenschaftlichung eine eigene Wissenschaft mit dem Namen Bionik (= Biologie + Technik). Bioniker gehen von der Vermutung aus, daß die Evolution besonders gute, wenn nicht sogar optimale Lösungen bereit hält, was sich in vielen Fällen als richtig erwiesen hat /SCW75, SCW77/. Innerhalb der Bionik werden zwei Methoden propagiert:

1. Direktes Kopieren aus der Natur (z.B. Konstruktion eines Schiffsrumpfes nach der Form eines Delphins).
2. Nachahmung der Natur beim Optimieren mit den Mechanismen der Mutation und Selektion.

Der zweite Fall kann wiederum in die Bereiche genetische Algorithmen (der zuvor beschrieben wurde) und Evolutionsstrategien unterteilt werden.

Im Bereich der Biologie ist unter Mutation eine zufällige Veränderung des Erbgutes (der Gene) zu verzeichnen. Übertragen auf einen technischen Prozeß stellt die Mutation die zufällige Änderung von freien Systemparametern dar. Mit Selektion ist im biologischen Sinne die Auslese der Individuen, die sich am besten an die Umweltbedingungen angepaßt haben, gemeint. Auf die Technik bezogen, ist damit das am besten eingestellte System gemeint.

Die auf diesem Gedanken basierende Evolutionsstrategie läßt sich auf die Entwicklung von *Hans Paul Schwefel* /SCW75/ und *Ingo Rechenberg* /REC73/ aus den 60er Jahren an der Technischen Universität Berlin zurückführen. Sie versuchten experimentelle Probleme zu lösen, die sich nicht analytisch beschreiben ließen und für die es auch keine konventionellen Lösungsmethoden gab. Deshalb entwickelten sie einen Algorithmus, der auf zufälligen Veränderungen basiert. Erbrachten die neuen experimentellen Ergebnisse eine Verbesserung, wurden diese als Ausgangspunkt für ein neues Experiment genutzt. Anhand dieses einfachen Verfahrens, haben *Schwefel* und *Rechenberg* Probleme wie z.B.

- Widerstandsoptimierung einer Gelenkplatte im Windkanal /REC73/,
 - Optimierung eines Rohrkrümmers /REC73/
- oder
- Strukturoptimierung einer Zweiphasen-Überschalldüse /SCW68/

gelöst.

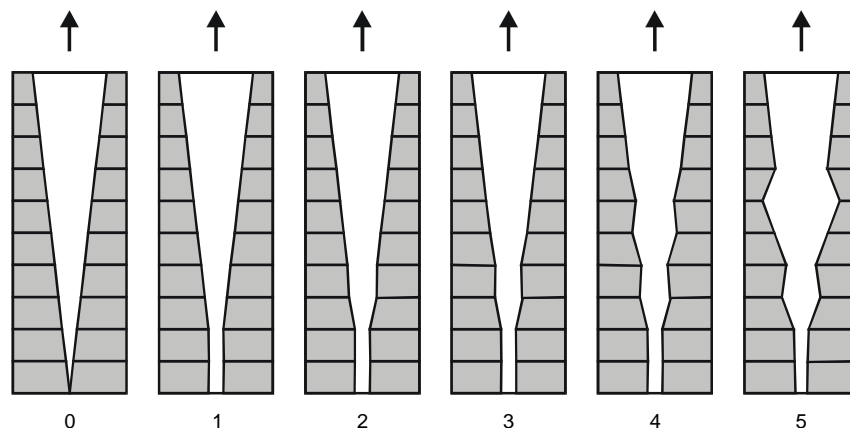


Abb. 7.10: Experimentelle Optimierung eines Düsenreaktors /REC73/

Im Vergleich mit genetischen Algorithmen verbergen sich jedoch hinter den Mechanismen Mutation, Selektion und Rekombination im Sinne der Evolutionsstrategie andere Vorgehensweisen, auf die allerdings nicht näher eingegangen werden soll /NIS97/.

Grundlegende Unterschiede der beiden Optimierungsverfahren⁷ lauten /LOD98/:

- Für unabhängige Faktoren wird bei der Evolutionsstrategie grundsätzlich keine Kodierung vorgenommen.
 - Bei der Evolutionsstrategie erfolgt die Auswahl der Eltern nicht proportional zur Fitness, d.h. nur die besten Individuen werden zur Nachkommenserzeugung genutzt.
 - In der Evolutionsstrategie spielt „Cross-over“ keine entscheidende Rolle.
- sowie

⁷ Ein ausführlicher Vergleich dazu ist in *Hofmeister* /HFM92/ zu finden.

- Der Ablauf von Evolutionsstrategien wird hauptsächlich durch die Art und Durchführung der Mutation geprägt, während bei den genetischen Algorithmen die Mutation lediglich zur theoretisch vollständigen Erfassung des Suchraums dient.

Anwendung finden die Evolutionsstrategien vorwiegend in technischen, volkswirtschaftlichen und naturwissenschaftlichen Bereichen. Gerade in Deutschland ist eine große Verbreitung dieser Methode zu erkennen. Weiterführende Informationen sind /HEI94, NIS97, SEE85, SCÖ94, POL98/ zu entnehmen.

7.5 Zusammenstellung Charakteristika der Experimentellen Optimumsuche

Da die Experimentelle Optimumsuche hier eine untergeordnete Rolle einnimmt, wurde auf eine tiefere Betrachtung der Eigenschaften verzichtet. Vielmehr wurde nur eine kurze Zusammenstellung in Tab. 7.2 vorgenommen, die Aussagen zum Versuchsumfang, Aussagekraft und Handhabung enthält.

Methode	Versuchsumfang	Aussagekraft	Handhabung
Methode des steilsten Anstiegs	(iteratives Verfahren)	⊙	⊙
Simplex-Verfahren	(iteratives Verfahren)	⊙	●
Gauß-Seidel-Strategie	(iteratives Verfahren)	○	●
EVOP-Verfahren	(iteratives Verfahren)	⊙	⊙
Genetische Algorithmen	(iteratives Verfahren)	⊙	○
Evolutionsstrategie	(iteratives Verfahren)	⊙	○

Tab. 7.2: Charakteristika (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt)

8 Versuchspläne für Mischungsexperimente

Die im *Kapitel 5.2* angesprochenen Versuchspläne beschäftigen sich ausschließlich mit der Analyse von Faktoren wie Temperatur, Reaktionszeiten, Drücke, usw. Hierbei sind die Faktoren unabhängig voneinander einstellbar. Bestimmte Industriezweige benötigen jedoch Versuchspläne, sogenannte Mixture-Designs, die sich mit der Untersuchung von mehreren Inhaltsstoffen (Komponenten) auseinandersetzen, um eine Verbesserung ihrer Produkte und eine Kosteneinsparung zu realisieren. Diese Komponenten ergeben zusammen jeweils eine Mischung. Als Anwendungsbereiche bzw. -beispiele sind zu nennen:

- Darstellung des Schmelzverhaltens in der Nickecke des Systems Ni-Al-Nb /SCH97/,
 - Zusammensetzung eines Pestizids zur Bekämpfung von Milben in einem Erdbeerfeld /COR90a/,
 - Erzeugen eines pharmazeutischen Präparats aus drei Komponenten /INT4/,
 - Analyse der Abhängigkeit der Oktanzahl von Benzin von sieben unterschiedlichen Bestandteilen /COR90a/,
 - Einschmelzen von Metallabfällen /SCH97/,
 - Herstellung eines tropischen Fruchtgetränks /COR90a/,
 - Optimierung der Viskosität eines Klebstoffes /BRA95/,
 - Gewinnung von Mangansalzen /SCH97/,
 - Herstellung einer Fischpastete /COR90b/
- oder
- Herstellung einer Dispersionsfarbe /ORT00b/.

Die Auflistung soll einen ersten Einblick über die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Mischungsexperimenten in der Wirtschaft und Industrie geben, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Zwei der wichtigsten Personen auf dem Gebiet der Mischungsversuchsplanung sind *Henry Scheffé* /SCF58, SFC63/, der die erste grundlegende Arbeit über Mischungsexperimente 1958 verfaßte sowie *John A. Cornell* /COR90a, COR90b/, der zahlreiche Publikationen zu Mischungsexperimenten und deren Auswertung veröffentlichte.

Mischungsversuche stellen ein Untergebiet der statistischen Versuchsplanung dar. Derartige Versuchspläne werden immer dann angewandt, wenn die zu untersuchenden Eigenschaften nicht von der Menge der einzelnen Anteile des Produktes abhängen, sondern nur von dessen Zusammensetzungsverhältnis. Da sich die Komponenten des Versuches zu 1 bzw. 100 % aufsummieren müssen, was auch die fundamentale Restriktion der Versuchsplanung mit Mischungen darstellt, wurden anstatt faktorieller Versuchspläne spezielle Pläne für Mischungsexperimente entwickelt. Für den allgemeinen Fall lautet die Restriktion

$$\sum_i^k x_i = 1. \quad (8.1)$$

Da die Summe der k Komponenten immer eins betragen muß, reichen $k-1$ Komponenten zur Bestimmung des Versuchspunktes aus. Anhand einer Dreikomponentenmischung wird nachstehend die Entstehung des sich durch die fundamentale Restriktion ergebenden Versuchsraum bezüglich eines Mischungsversuchs betrachtet.

Bei einem nichtrestringierten Versuch, wie dies z.B. bei einem faktoriellen Versuchsplan der Fall wäre, ist der Versuchsraum ein Würfel. Dies ist in *Abb. 8.1* zu sehen. Aufgrund der Tatsache, daß die Summe der drei Komponenten eins betragen muß, ergibt sich das grau unterlegte Dreieck als Versuchsraum für Mischungsexperimente. Der hier dargestellte unbegrenzte Versuchsraum wird gewöhnlich auch als Simplex bezeichnet. Dabei stellen die Eckpunkte des Simplex die Anteile der reinen Mischungskomponente, die Kanten die binären Mischungen aus zwei Komponenten und die Fläche die ternären Mischungen aus allen drei Komponenten dar. *Abb. 8.1* zeigt weiterhin ein Beispiel für eine Dreikomponentenmischung, in der der Versuchsraum aufgrund der unbegrenzten Faktoren ein Dreieck darstellt. Komponente eins weist hierin einen Anteil von 27 %, Komponente zwei einen Anteil von 53 % und Komponente drei einen Anteil von 20 % auf. Der sich aus dem Beispiel ergebende Versuchspunkt ist der Schnittpunkt der drei Werte und beträgt nach der fundamentalen Restriktion 100 %.

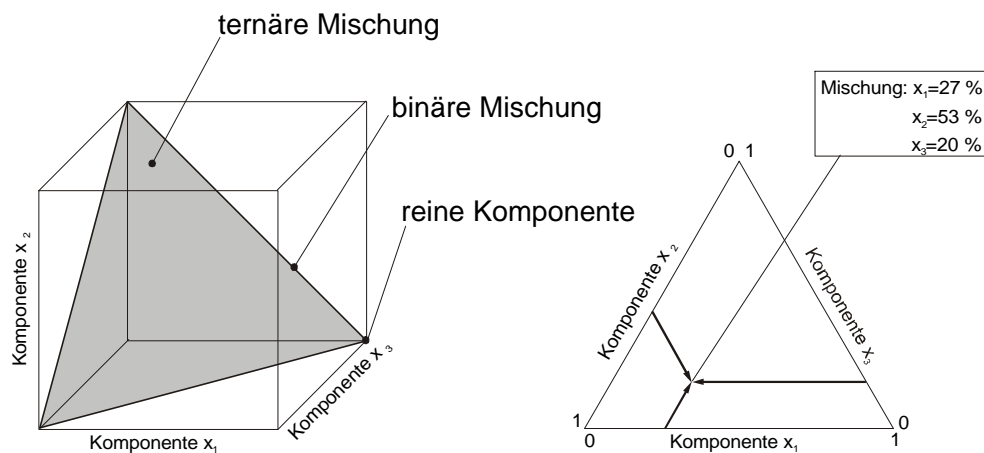


Abb. 8.1: Versuchsraum bei Mischungen für drei Komponenten /SPE91/

Mit relativ wenigen Mischungsversuchen ist es mit diesen Plänen möglich, eine verhältnismäßig genaue Aussage über die gewünschte Mischung und deren Eigenschaften zu tätigen. Im Vergleich zu ungeplanten Mischungsversuchen ergibt sich durch die Planung eine Verringerung der Versuchsanzahl und somit eine Zeit- und Kostenersparnis.

Als Hauptziel der Mischungsversuche ist die Ermittlung eines Regressionspolynoms anzusehen, das die Wirkung der Komponenten einer Mischung widerspiegelt. Mit Hilfe des Regressionspolynoms ist anschließend eine statistische und grafische Auswertung möglich /BRA94/.

Versuchspläne für Mischungen werden nach sogenannten Konstruktionsregeln bzw. nach ihrem Anwendungszweck unterschieden:

- Standard-Simplex-Konstruktion,
 - Simplex-Centroid-Konstruktion,
 - Simplex-Axial-Konstruktion,
 - Mischungsversuche mit unterer Begrenzung,
 - Mischungsversuche mit oberer Begrenzung,
 - Mischungsversuche mit unterer und oberer Begrenzung,
 - Ratio-Konstruktion,
 - Mischungsversuch mit einer Hauptkomponenten
- und

- kombinierte Versuchspläne
sowie
- D-optimale Versuchspläne (siehe dazu *Kapitel 6*).

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Mischungspläne kurz erläutert.

8.1 Mathematische Modelle

Im allgemeinen erfolgt die Analyse von Mischungsversuchen unter Zuhilfenahme eines mathematischen Modells, welches nach *Scheffé /SCF58/* oder nach *Cox /ORT00b/* beschaffen sein kann. Die Koeffizienten werden mittels der Regressionsanalyse bestimmt, allerdings entfallen einige Koeffizienten aufgrund der fundamentalen Restriktion. Da Mehrkomponentensysteme äußerst komplexer Art sein können, ist es bei ihnen notwendig, mathematische Modelle dritten oder vierten Grades zu verwenden.

Nachfolgend sind die mathematischen Modelle für eine Dreikomponentenmischung für ein Standard-Simplex-Modell vom ersten Grad bis zum vierten Grad aufgeführt:

1. Grad (linear):

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (8.2)$$

2. Grad (quadratisch):

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (8.3)$$

3. Grad unvollständig (kubisch):

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (8.4)$$

3. Grad (kubisch):

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + c_{12}x_1x_2(x_1 - x_2) + c_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + c_{23}x_2x_3(x_2 - x_3) + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (8.5)$$

4. Grad unvollständig (quartic¹):

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{1123}x_1x_1x_2x_3 + b_{1223}x_1x_2x_2x_3 + b_{1233}x_1x_2x_3x_3 \quad (8.6)$$

¹ Bei Polynomen vierten Grades wird der englische Begriff „quartic“ verwendet, da kein passender deutscher Begriff zu finden war.

4. Grad (quartic):

$$\begin{aligned} \hat{y} = & b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + c_{12}x_1x_2(x_1 - x_2) + \\ & c_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + c_{23}x_2x_3(x_2 - x_3) + d_{12}x_1x_2(x_1 - x_2)^2 + \\ & d_{13}x_1x_3(x_1 - x_3)^2 + d_{23}x_2x_3(x_2 - x_3)^2 + b_{1123}x_1x_1x_2x_3 + \\ & b_{1223}x_1x_2x_2x_3 + b_{1233}x_1x_2x_3x_3 \end{aligned} \quad (8.7)$$

Für mehr als drei Komponenten sind die mathematischen Modelle auch allgemein in symbolischer Schreibweise darstellbar:

1. Grad (linear):

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i \quad (8.8)$$

2. Grad (quadratisch):

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j \quad (8.9)$$

3. Grad unvollständig (kubisch):

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijh} x_i x_j x_h \quad (8.10)$$

3. Grad (kubisch):

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijh} x_i x_j x_h + \sum_{1 \leq i < j \leq k} c_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) \quad (8.11)$$

4. Grad unvollständig (quartic):

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijh} x_i^2 x_j x_h + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijhh} x_i x_j^2 x_h + \\ & \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijhh} x_i x_j x_h^2 \end{aligned} \quad (8.12)$$

4. Grad (quartic):

$$\begin{aligned} \hat{y} = & \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijh} x_i^2 x_j x_h + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijhh} x_i x_j^2 x_h + \\ & \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijhh} x_i x_j x_h^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} c_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{1 \leq i < j \leq k} d_{ij} x_i x_j (x_i - x_j)^2 + \\ & \sum_{1 \leq i < j < h < l \leq k} b_{ijhl} x_i x_j x_h x_l \end{aligned} \quad (8.13)$$

In den vorhergehenden Gleichungen ist \hat{y} die Modellantwort, x_i die Komponenten des Mischungsversuches, i, j, h, l die Indizes der Komponenten, k die Anzahl der Komponenten und b, c, d die Regressionskoeffizienten.

Das vollständige und das unvollständige Modell vierten Grades ist zwar aufgeführt, sie werden aber nur selten verwendet. Dies ist auch daran zu erkennen, daß sie in den meisten Versuchsplanungsprogrammen nicht enthalten sind /BRA94/.

Beim Simplex-Centroid-Modell ist kein Grad des Modells vorhanden, d.h. die Modellgleichung ist nur von der Anzahl der Komponenten abhängig. Zum Einsatz kommt hierbei das allgemeine mathematische Modell der Form

$$\hat{y} = \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < h \leq k} b_{ijh} x_i x_j x_h + \dots + b_{12\dots k} x_1 x_2 \dots x_k. \quad (8.14)$$

Darin bedeuten:

- b_i = lineare Koeffizienten der i Komponenten,
- b_{ij} = quadratische Mischungskomponenten der Komponenten i und j ,
- b_{ijh} = kubische Koeffizienten der Komponenten i , j und h .

Die Indizierung des Simplex-Centroid-Modells geht jeweils bis zur Anzahl der Komponenten /SCF63/.

Bei den Simplex-Axial-Plänen entsprechen die Modellgleichungen denen der Simplex-Centroid-Pläne. So ist z.B. für eine drei Komponentenmischung ein quadratisches Modell, wie z.B.

$$\hat{y} = b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (8.15)$$

zu verwenden.

Die Koeffizienten des Pseudo-Simplex-Plans für untere und obere Begrenzungen werden entsprechend dem Standard-Simplex-Plan oder eines sonst gewählten Mischungsplans ermittelt. Für die Berechnung der Regressionskoeffizienten des Pseudo-Simplex-Plans werden sogenannte Pseudo-Komponenten verwendet. Analog zu den Pseudo-Simplex-Plänen erfolgt die Berechnung der Koeffizienten eines Mischungsplans mit unterer und oberer Begrenzung.

Wird zur Ermittlung von Mengenverhältnissen eine Ratio-Konstruktion angewendet, brauchen keine Regressionskoeffizienten eines Mischungsmodells berechnet zu werden, da hierzu ein faktorieller Versuchsplan angewendet wird.

8.2 Scheffé und Cox-Modell

Wie bereits erwähnt, wird zur Analyse von Mischungen ein mathematisches Regressionsmodell benötigt. Jeweils am Beispiel eines quadratischen Modells wird das *Scheffé* sowie das *Cox*-Modell betrachtet. Das *Scheffé*-Modell ist das am häufigsten verwendete Modell und lautet für den quadratischen Fall

$$\hat{y}(x) = \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j. \quad (8.16)$$

Gegenüber dem *Cox*-Modell

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_i^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad b_{ij} = b_{ji} \quad (8.17)$$

ist im *Scheffé*-Modell kein konstantes Glied b_0 und auch keine quadratischen Terme b_{ii} aufgeführt. Beide Terme sind beim *Scheffé*-Modell in den übrigen Termen enthalten. Anhand *Abb. 8.2* werden die Koeffizienten der beiden unterschiedlichen Modelle unter Zuhilfenahme von binären Mischungen mit den Komponenten x_i und x_j verglichen.

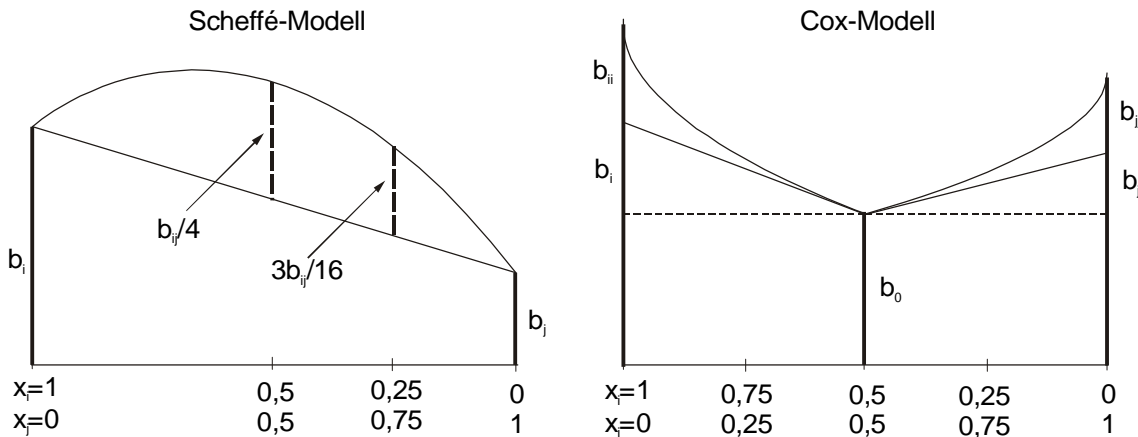


Abb. 8.2: Bedeutung der Koeffizienten beim Scheffé- und Cox-Modell /ORT00b/

Aus *Abb. 8.2* ist ersichtlich, daß beim *Cox*-Modell zum festen Wert der Referenzmischung b_0 noch die linearen Terme b_i bzw. b_j sowie die quadratischen Terme b_{ii} bzw. b_{jj} hinzu addiert werden. Ebenfalls hinzu addiert wird der quadratische Term b_{ij} zu den linearen Termen b_i beim *Scheffé*-Modell.

Durch die unterschiedliche Vorgehensweise der beiden Modelle haben die Koeffizienten auch verschiedene Bedeutungen und somit unterschiedliche Werte, was ebenfalls aus *Abb. 8.2* ersichtlich ist. Die Wirkungen der Modelle sind dagegen gleich, d.h. daß bei einem Mischungsversuch mit exakt den selben Versuchspunkten die Wirkungen der beiden Modelle gleich groß wären. Allerdings weisen die Koeffizienten andere Werte auf.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird nur noch das *Scheffé*-Modell verwandt, da es das am weitesten verbreitete Modell ist /SCH97/.

8.3 Nichtlineare Wirkungen

Wie bereits angesprochen, sind der konstante Term b_0 und die quadratischen Terme b_{ii} in den Hauptwirkungen enthalten. Da durch die fundamentale Restriktion (siehe Formel 8.1) die Komponenten nicht unabhängig voneinander geändert werden können, bedeutet dies, daß die Regressionskoeffizienten $b_{ij}x_i x_j$ nicht mehr als Wechselwirkung im Sinne der Versuchsplanung zu interpretieren sind. Sie stellen vielmehr den nichtlinearen Mischungseffekt dar. Bei Mischungsversuchen trifft dies auf alle mathematischen Modelle nach *Scheffé* zu.

Es gibt zwei Arten von quadratischen nichtlinearen Wirkungen. Zum einen handelt es sich um eine synergistische² Wirkung, die einen positiven Effekt hat und zum anderen um eine antagonistische³ Wirkung, die einen negativen Effekt aufweist. Um diese Wirkungen zu veranschaulichen, wird mindestens ein Modell zweiten Grades benötigt. Am Beispiel von zwei Benzinsorten sollen die beiden Wirkungen näher erläutert werden.

Als Annahme soll gelten, daß beide Benzinsorten unterschiedliche Oktanzahlen sowie Preise haben. Benzinsorte x_1 soll die höhere Oktanzahl aber den niedrigeren Preis, Sorte x_2 das Gegenteil haben /BRA94, PET91b/. Es soll überprüft werden, ob durch eine Mischung der beiden Benzinsorten eine gleichbleibende oder sogar höhere Oktanzahl als nur mit Benzinsorte x_1 zu erreichen ist. Ein quadratisches Regressionsmodell

$$\hat{y} = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (8.18)$$

wurde zur Verdeutlichung gewählt.

Bei einer negativen Wirkung ergibt die Mischung beider Benzinsorten einen geringeren Wert der Oktanzahl als dies allein mit der ersten Benzinsorte zu erreichen wäre. Dementsprechend ist auch der quadratische Term des zugehörigen Regressionspolynoms negativ. Liegt hingegen eine positive Wirkung vor, d.h. ergibt die Mischung der beiden Benzinsorten eine höhere Oktanzahl, so ist der quadratische Regressionsterm positiv. Durch das Auffinden einer derartigen Mischung, ist eine höhere Oktanzahl zu niedrigeren Kosten (Benzinsorte x_2 ist kostengünstiger) zu realisieren. *Abb. 8.3* verdeutlicht die beiden Zusammenhänge nochmals.

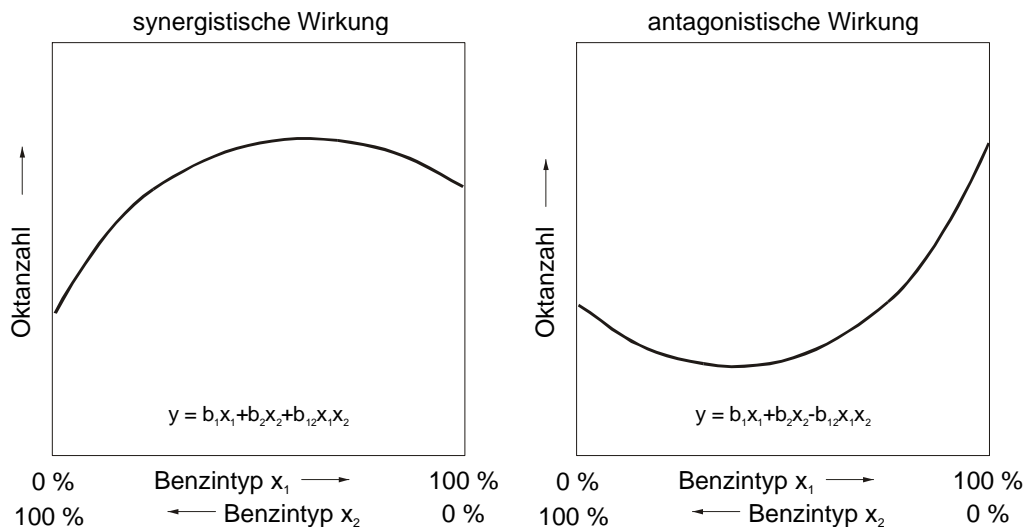


Abb. 8.3: Nichtlineare Wirkungen /PET91b/

8.4 Statistische und grafische Analyse von Mischungsplänen

Nach der Durchführung der geplanten Mischungsversuche wird anhand einer statistischen Analyse untersucht, ob die verwendeten Modelle der Wirklichkeit entsprechen. Hierzu wird zum größten Teil die multiple Regressionsanalyse genutzt.

² Zusammenwirken von Substanzen oder Faktoren, die sich gegenseitig fördern.

³ Gegeneinanderwirken von Substanzen oder Faktoren, die das Ergebnis vermindern.

Aufgrund der teilweise sehr komplexen Modelle geschieht dies fast nur noch durch Analysesoftware, wie z.B. Modde, Statistica, Design Expert, usw., die spezielle Mischungsmodulare aufweisen. Weiterhin werden sogenannte t-, F-, R^2 -Tests durchgeführt, die ebenfalls zur Kontrolle der Modellvoraussetzungen dienen. Diese Tests überprüfen den Mangel an Anpassung bzw. Fehlanpassung (engl. Lack of Fit) und werden in der ANOVA-Tabelle zusammengefaßt und dort auf Signifikanz untersucht /BRA95/. Abschließend lassen sich die angepaßten Modelle grafisch darstellen, um optimale Mischungsbereiche zu identifizieren, wie es in *Abb. 8.4* zu sehen ist.

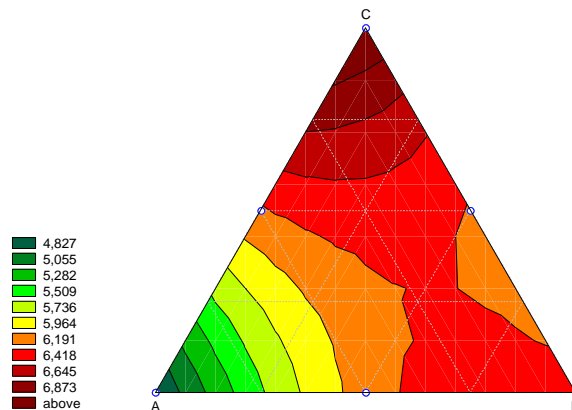


Abb. 8.4: Beispiel eines Contour-Plots

Allgemeine Auswertungsmethoden, die im Bereich der statistischen Versuchsplanung zur Anwendung kommen, werden im „ProStaV“ (*Kapitel 11*) behandelt. Eine Vielzahl der dort angesprochenen Verfahren wird auch bei den Mischungsanalysen verwendet. Da diese Arbeit nicht speziell auf Mischungsanalysen abzielt, wird zur Auswertung von Mischungsplänen auf Literaturstellen, wie z.B. /ORT00b, SPE91, PET91b, BRA95, COR90a, COR90b/ verwiesen, die den Themenkomplex der Auswertung ausführlich behandeln.

8.5 Mischungsversuchspläne

Ähnlich wie bei den faktoriellen Plänen, existieren auch im Bereich der Mixture-Designs unterschiedliche Versuchspläne, die für bestimmte Problemstellungen Anwendung finden und in *Abb. 8.5* dargestellt sind. Als wichtigstes Anwendungsgebiet ist die Optimierung von Mischungen anzusehen. Diese Mischungspläne werden z.B. bei dem schon erwähnten Benzinsortenbeispiel verwandt. Zu diesem Bereich gehören der Standard-Simplex-Plan, der Simplex-Centroid-Plan, der Simplex-Axial-Plan sowie die Mischungspläne mit unterer, oberer sowie unterer und oberer Begrenzung.

Ein weiteres Einsatzfeld der Mischungspläne ist das „Screening“, also das Herausfiltern der wichtigsten Komponenten einer Mischung. Dieses wird mit dem Simplex-Screening-Plan durchgeführt.

Weiterhin gibt es noch Versuchspläne, die mit Verhältnissen arbeiten und die Bezeichnung Ratio-Pläne tragen. Hierbei kann das Verhältnis vorgegeben sein, bzw. es muß berechnet werden. Des weiteren bestehen noch Versuchspläne, die eine Hauptkomponente aufweisen.

Den Schluß bilden die kombinierten Versuchspläne, bei denen die Mischungspläne mit Versuchsplänen für Prozeßvariablen kombiniert sind, so daß ein einheitliches Modell entsteht.

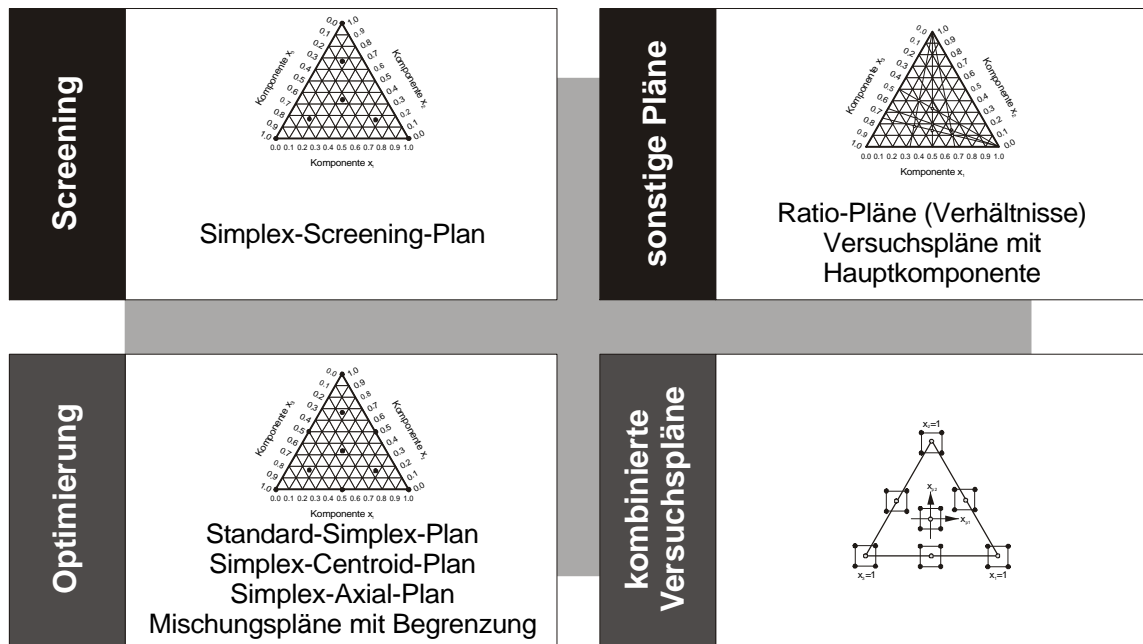


Abb. 8.5: Übersicht Mischungspläne und deren Einsatzgebiete

8.5.1 Standard-Simplex-Versuchspläne

Die Standard-Simplex-Konstruktionen waren die ersten Mischungsversuchspläne und wurden, wie bereits erwähnt, von *Henry Scheffé* im Jahr 1957 entwickelt /SCF58/. Sie gehören zu den sogenannten Gitterplänen, und werden im englischen als „Lattice-Pläne“ bezeichnet. Bei ihnen werden die Versuchspunkte gleichmäßig verteilt über den Versuchsraum angeordnet. Tab. 8.1 enthält eine Aufstellung über die Lage der Versuchs- und Kontrollpunkte vom ersten bis zum vierten Grad. Mit dem Grad g des Simplexgitterplans wird die Anzahl der Teile, in die jede Simplexseite unterteilt wird, bezeichnet. Entspricht die Anzahl der Komponenten dem Grad der Standard-Simplex-Konstruktion, so müssen die Kontrollpunkte des nächst höheren Grades gewählt werden.

Grad des Polynoms	Gitterpunktabstände	Empfohlene Einstellung der Kontrollpunkte
1. Grad	0, 1	1/k
2. Grad	0, 1/2, 1	1/k
3. Grad unvollständig	0, 1/3, 1/2, 1	1/k
3. Grad	0, 1/3, 2/3, 1	1/k
4. Grad unvollständig	0, 1/4, 1/2, 1	1/k
4. Grad	0, 1/4, 1/2, 3/4, 1	1/k

Tab. 8.1: Abstände der Gitterpunkte /SPE91/

Je höher der Grad des Versuchsplans ist, um so dichter liegen die Versuchspunkte im Simplex nebeneinander und um so höher ist der Grad des zu ermittelnden Regressionspolynoms. Das Versuchsgitter läßt sich aus der Anzahl der Komponenten k und dem Grad des Regressionspolynoms g bestimmen. Es wird als $\{k, g\}$ -Simplexgitter bezeichnet.

Das Gitter der Versuchspunkte eines vollständigen Polynoms setzt sich aus der Anzahl der Regressionskoeffizienten

$$K = \binom{g+k-1}{g} = \frac{(k+g-1)!}{g!(k-1)!} = \frac{k(k+1)(k+2)\dots(k+g-1)}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot g} \quad (8.19)$$

und den zusätzlichen Kontrollpunkten

$$KP \geq 1 \quad (8.20)$$

zusammen.

Die Gesamtzahl der durchzuführenden Versuche ergibt sich anschließend mit Formel (8.21) aus der Summe der Versuchs- und Kontrollpunkte, wobei die Zahl der Kontrollpunkte (siehe Formel 8.20) immer größer gleich eins sein sollte.

$$N = K + KP \quad (8.21)$$

Eine Standard-Simplex-Konstruktion zweiten Grades für eine Dreikomponentenmischung zeigt *Abb. 8.6*. Zu erkennen ist, daß drei Versuche mit reinen Komponenten, drei Versuche mit binären und der Kontrollversuch mit einer ternären Mischung durchzuführen sind.

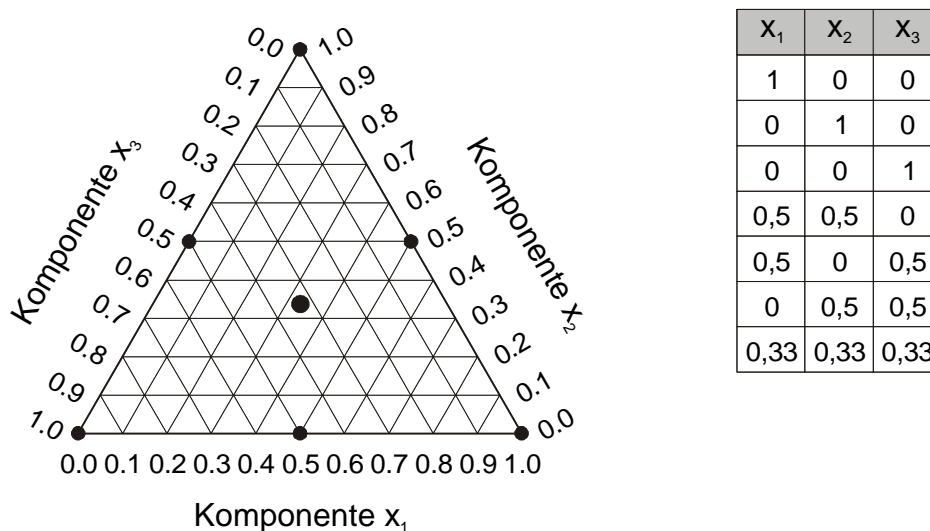


Abb. 8.6: Standard-Simplex zweiten Grades

Tab. 8.2 enthält eine Auflistung der Anzahl der Versuchspunkte für zwei bis zehn Komponenten, vom ersten bis zum vierten Grad, die sich aus den vorstehenden Gleichungen ergeben. In der Praxis werden fast ausschließlich die grau unterlegten Versuche eingesetzt, da die nicht unterlegten an praktische Grenzen der Versuchsdurchführung stoßen. Allerdings müssen hier noch die zusätzlichen Kontrollpunkte hinzugefügt werden.

Weiterhin ist aus *Tab. 8.2* ersichtlich, daß mit Polynomen unvollständigen Grades eine erhebliche Reduzierung der Versuchsanzahl möglich ist. Je höher der Grad des Regressionsmodells und die Zahl der Komponenten, desto größer ist die Einsparung von Versuchen.

Anzahl der Komponenten k	Grad des Polynoms g					
	1. Grad	2. Grad	3. Grad unvollst.	3. Grad	4. Grad unvollst.	4. Grad
2	2	3	-	4	-	5
3	3	6	7	10	9	15
4	4	10	14	20	22	35
5	5	15	25	35	45	70
6	6	21	41	56	81	126
7	7	28	63	84	133	210
8	8	36	92	120	204	330
9	9	45	129	165	297	495
10	10	55	175	220	415	715

Tab. 8.2: Anzahl der Gitterpunkte in einem {k,g}-Simplexgitter /SCH97/

Abb. 8.7 zeigt nochmals deutlich die sequentielle Erweiterung der Standard-Simplex-Pläne vom ersten bis zum vierten Grad anhand einer Dreikomponentenmischung, allerdings ohne Kontrollpunkte.

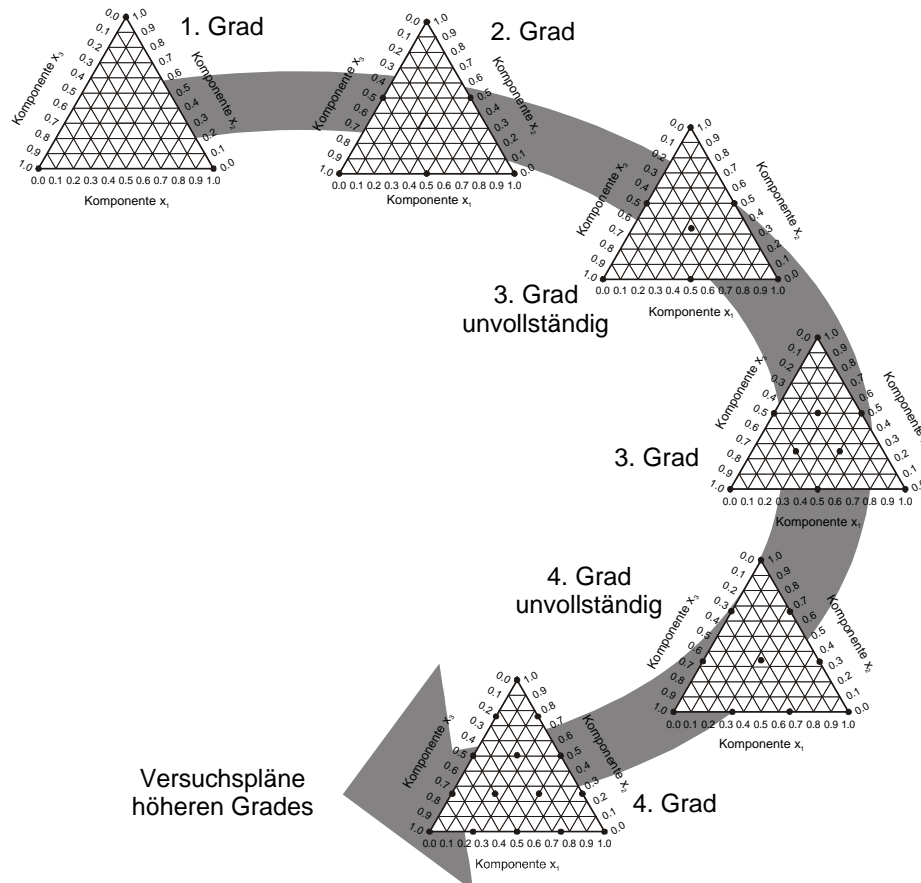


Abb. 8.7: Sequentielle Erweiterung von Standard-Simplex-Plänen

Zusätzlich ist noch zu erwähnen, daß bei einer Standard-Simplex-Konstruktion die Anzahl der unterschiedlichen Gitter- bzw. Versuchspunkte n_M des $\{k, g\}$ -Simplexgitters gleich der Anzahl der Koeffizienten K im Regressionspolynom ist. Liegt dieser Fall vor, so weist der Versuchsplan keine Redundanz⁴ auf und ist somit vollständig gesättigt.

Zur Überprüfung des Versuchsplans und um ihn gegebenenfalls zu ändern, muß der Redundanzfaktor in jedem Fall größer eins sein /SPE91/. Die Bestimmung der Redundanz erfolgt aus der Division der Anzahl der unterschiedlichen Mischungsversuche n_M durch die Anzahl der Koeffizienten des Regressionspolynoms K .

$$\text{Redundanzfaktor} = \frac{n_M}{K}. \quad (8.22)$$

Daraus ergibt sich, daß die Anzahl der Kontrollpunkte im kleinsten Fall eins betragen darf.

8.5.2 Simplex-Centroid-Versuchspläne

Eine weitere Möglichkeit, Mischungen zu analysieren, besteht in der Anwendung von Simplex-Centroid-Konstruktionen. Im Gegensatz zu den zuvor besprochenen Standard-Simplex-Konstruktionen, bestehen bei den Centroid-Plänen keine unterschiedlichen Modellgrade /SPE91/. Für eine bestimmte Anzahl Mischungskomponenten existiert jeweils nur ein Plan. Vor allem dann, wenn bei Standard-Simplex-Plänen mehr als drei Komponenten in die Analyse einfließen sollen und sich damit die Versuchsanzahl bei einem hohen Analysegrad stark erhöhen würde, werden Simplex-Centroid-Konstruktionen angewendet /PET91b/. Auch für diese Art von Mischungsplänen läßt sich die Zahl und Lage der unterschiedlichen Versuchspunkte in *Tab. 8.3* zusammenfassend darstellen.

Anzahl der Versuchspunkte	Lage der Versuchspunkte	Kodierung
k	Eckpunkte	Permutation ⁵ (1, 0, ..., 0)
$\binom{k}{2}$	Kantenmittelpunkte	Permutation (1/2, 1/2, 0, ..., 0)
$\binom{k}{3}$	Flächenmittelpunkte	Permutation (1/3, 1/3, 1/3, ..., 0) usw.
1	Zentralpunkt	(1/k, 1/k, ..., 1/k)

Tab. 8.3: Versuchspunkte in einem Simplex-Centroid-Plan /PET91b/

Gleichung (8.23) gibt Auskunft darüber, wie sich die Gesamtzahl der Versuchspunkte bestimmen läßt:

$$n_M = 2^k - 1. \quad (8.23)$$

Tab. 8.4 enthält eine Aufstellung bezüglich der Anzahl von Versuchspunkten der verschiedenen Mischungskombinationen für zwei bis sechs Komponenten. Aus der Summe der unterschiedlichen Kombinationen ist die Gesamtzahl der Versuchspunkte pro Anzahl der Komponenten zu bilden, was ebenfalls in *Tab. 8.4* aufgeführt ist.

⁴ Überfluß an Versuchspunkten.

⁵ Umstellen der Reihenfolge.

Anzahl der Mischungen mit i Komponenten	Anzahl der Komponenten k				
	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
2	1	3	6	10	15
3	-	1	4	10	20
4	-	-	1	5	15
5	-	-	-	1	6
6	-	-	-	-	1
Gesamtanzahl der Versuche	3	7	15	31	63

Tab. 8.4: Anzahl der benötigten Mischungsversuche bei Simplex-Centroid-Plänen

Beispielhaft enthält Abb. 8.8 eine Darstellung von einer Drei- und einer Vierkomponentenmischung, inklusive der dazugehörigen Versuchspläne. Bei der Dreikomponentenmischung sind sieben Versuchspunkte und bei der Vierkomponentenmischung immerhin schon 15 Versuchspunkte von Nöten. Ebenfalls kommen bei diesen Versuchsdesigns noch zusätzliche Kontrollpunkte hinzu.

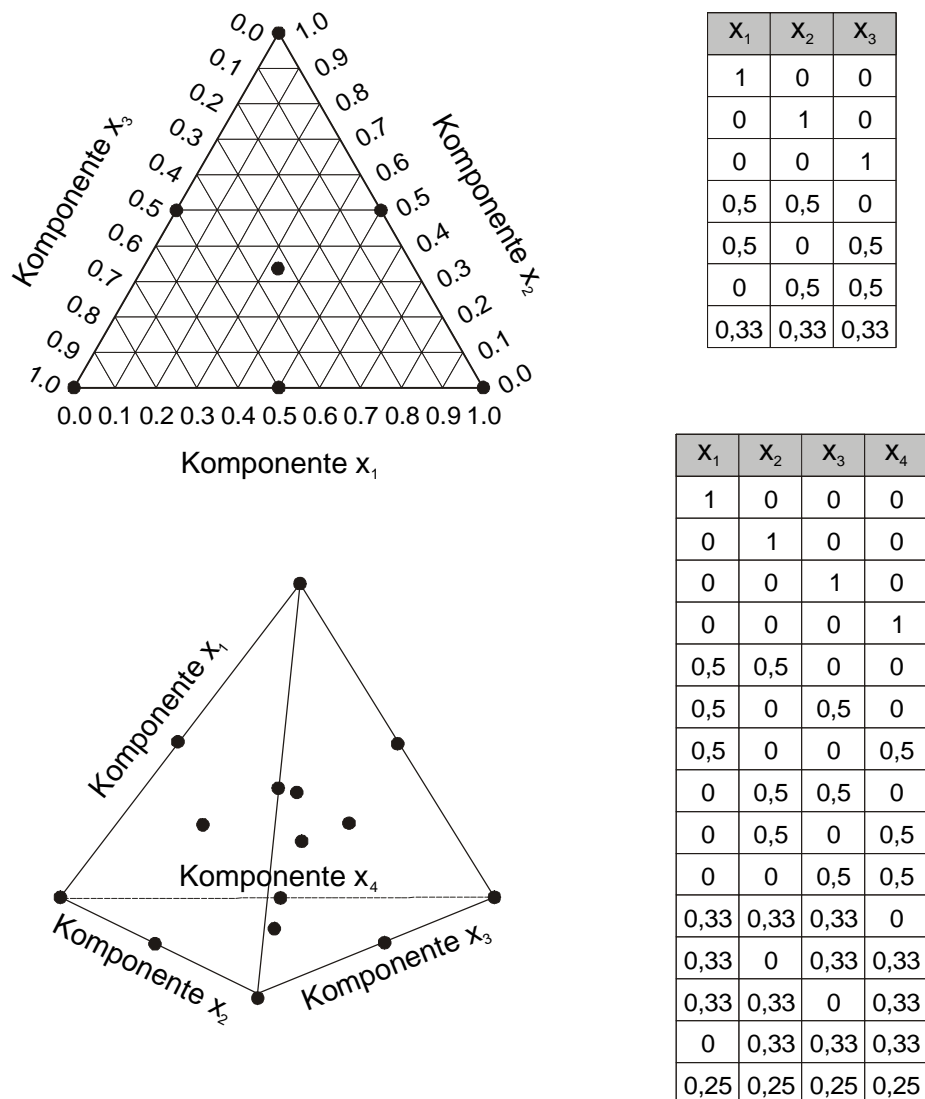


Abb. 8.8: Darstellung einer Drei- und Vierkomponentenmischung inkl. Versuchsplan /COR90a/

8.5.3 Simplex-Axial-Versuchspläne

Analog zur Simplex-Centroid-Konstruktion gibt es beim Simplex-Axial-Design keinen Grad. Allerdings sind die Versuchspunkte, entgegen den beiden bis jetzt erläuterten Mischungsplänen, bei denen die Versuchspunkte fast ausschließlich auf den Vertices und den Kanten lagen, mehr über den Versuchsraum verteilt.

Am Beispiel einer Dreikomponentenmischung in *Abb. 8.9* ist das anschaulich zu sehen.

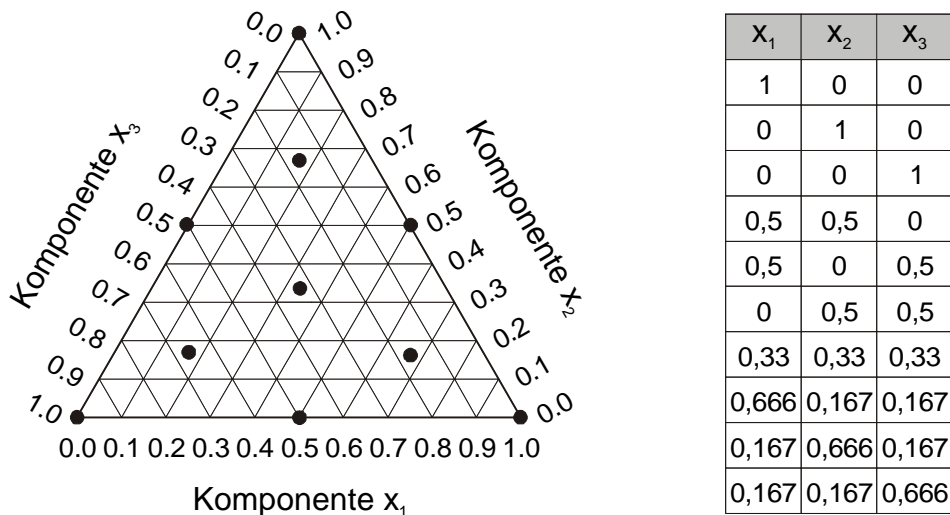


Abb. 8.9: Simplex-Axial-Plan einer Dreikomponentenmischung

Bei reinen Simplex-Axial-Plänen liegen die Versuchspunkte auf den Komponentenachsen *i*. Diese Achsen werden auch als imaginäre Linien bezeichnet, die von den Eckpunkten $x_i = 1$ zu den gegenüberliegenden Kanten $x_i = 0$ und $x_j = 1/(k-1)$ für alle $j \neq i$ verlaufen. Der Index *j* steht hier für die übrigen Komponenten des Mischungsversuchs.

Aufgrund der Aussage, daß es auch bei Simplex-Axial Konstruktionen keinen Grad des Modells gibt, sondern immer nur einen Plan für eine bestimmte Anzahl von Komponenten, enthält *Tab. 8.5* die Informationen, um die Anzahl und die Lage der Versuchspunkte zu bestimmen /PET91b, COR90a/.

Anzahl der Versuchspunkte	Lage der Versuchspunkte	Kodierung
k	Eckpunkte (Vertices)	$x_i = 1$ $x_j = 0$ für alle $j \neq i$
k	Interior ⁶ Punkte	$x_i = (k + 1)/2k$ $x_j = 1/2k$ für alle $j \neq i$
1	Zentralpunkt	$x_i = 1/k$ für alle <i>i</i>
k	End Effekt Punkte	$x_i = 0$ $x_j = 1/(k - 1)$ für alle $j \neq i$

Tab. 8.5: Versuchspunkte in einem Simplex-Axial-Plan /PET91b/

Die Gesamtversuchsanzahl läßt sich mit Gleichung (8.24) ermitteln.

$$n_M = 3 \cdot k + 1. \tag{8.24}$$

⁶ Innenliegende Versuchspunkte, die jeweils den gleichen Abstand zu dem zugehörigen Eckpunkt aufweisen.

Je nach Lage der Versuchspunkte lassen sich die Axial-Pläne nochmals unterteilen. Der normale Axial-Plan, der auch als Standard-Axial-Plan (AXN) bezeichnet wird, umfaßt alle Versuchspunkte außer den reinen Komponenten (Vertices).

Beim erweiterten Axial-Plan handelt es sich um den am meisten verwendeten Axial-Plan, der alle Versuchspunkte einschließt. Ab und zu wird er auch als Extended-Axial-Plan (AXE) bezeichnet.

Weiterhin existiert noch der Reduced-Axial-Plan (AXR), der die Vertices, den Zentralpunkt sowie ausgewählte Interior-Punkte beinhaltet /ORT00b/.

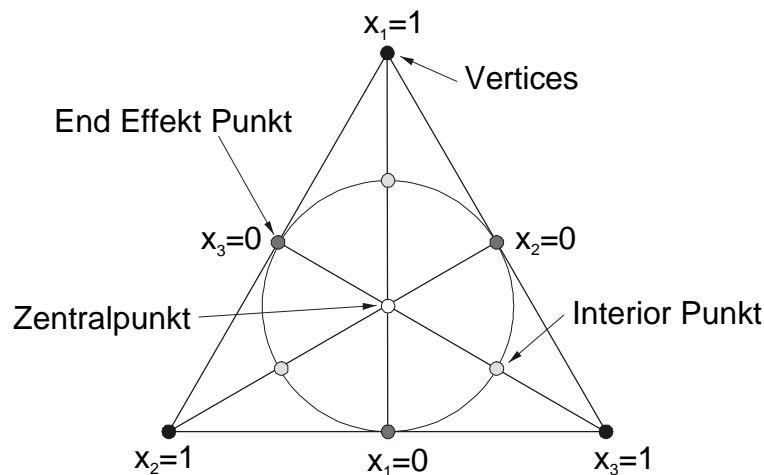


Abb. 8.10: Erweiterte Simplex-Axial-Konstruktion /PET91b/

8.5.4 Simplex-Screening-Versuchspläne

Im Prinzip ist, von der Wahl der Versuchspunkte aus betrachtet, die Simplex-Screening-Konstruktion, die von *Snee* und *Marquart* stammt, ein erweiterter Axial-Plan ohne Endeffekt-Punkte (siehe *Abb. 8.11*). Anwendung finden diese „Screening“-Pläne dann, wenn aus einer Vielzahl von Komponenten die wichtigsten erkannt werden sollen. Vor allem dann sind „Screening“-Pläne relevant, wenn mehr als sechs Komponenten an der Mischung beteiligt sind, da ansonsten sehr viele Versuche für ein Modell höherer Ordnung durchzuführen wären /COR90b/.

Um die wichtigen von den unwichtigen Komponenten zu trennen, wird ein Modell erster Ordnung gewählt, welches sich wie folgt darstellt:

$$\hat{y}(x) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k = \sum_{i=1}^k b_ix_i \quad (8.25)$$

Die Anzahl der Versuchspunkte ergibt sich bei einem Screening-Plan zu:

$$n_M = 2 \cdot k + 1. \quad (8.26)$$

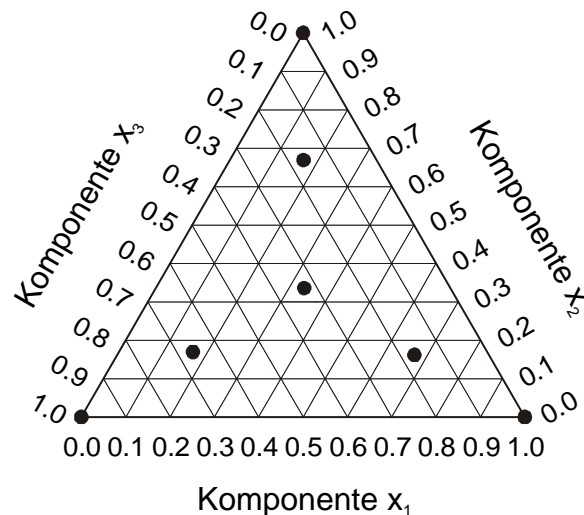


Abb. 8.11: Beispiel eines „Screening“-Plans

Zur Ermittlung der Bedeutung der Komponenten kann näherungsweise der t-Test herangezogen werden /COR90b/. Dabei wird ein Vergleich des Wertes des Koeffizienten b_i mit dem Standardfehler durchgeführt.

$$t - \text{Test} = \frac{b_i}{\text{Std}f(b_i)} \quad (8.27)$$

Des weiteren läßt sich noch der Effekt der einzelnen Komponenten bestimmen.

$$E_i = b_i - (k-1)^{-1} \sum_{j \neq i}^k b_j \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8.28)$$

Ist das Verhältnis der Komponenten nicht gleich groß, so kann der Effekt auch mit der Spannweite der Grenzen gewichtet werden. Vor allem bei begrenzten Mischungsversuchen tritt dieser Fall auf. Die einzelnen Effekte werden dann ebenfalls mit dem t-Test untersucht.

$$t - \text{Test} = \frac{E_i}{\text{Std}f(E_i)} \quad (8.29)$$

8.5.5 Mischungspläne mit Begrenzung

Bei vielen Mischungsexperimenten kommt es in der Praxis vor, daß der Versuchsraum Begrenzungen aufweist. Sind bei einer oder mehreren Mischungskomponenten diese Restriktionen vorhanden, so wird zur Ermittlung eine sogenannte Pseudo-Simplex-Konstruktion angewandt. Der Versuchsraum kann dabei

- untere Begrenzungen,
 - obere Begrenzungen
- sowie
- untere und obere Begrenzungen

aufweisen.

In Abb. 8.12 ist am Beispiel einer möglichen Mischungssituation mit drei Komponenten zum einen der Fall bei unterer Begrenzung für eine Komponente und zum anderen der Fall bei unterer Begrenzung aller Komponenten dargestellt.

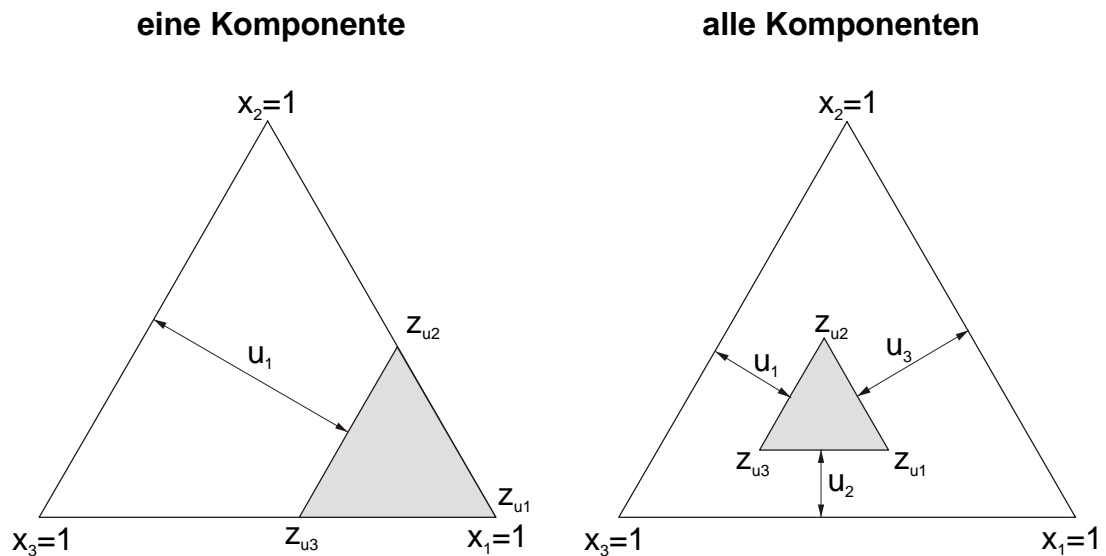


Abb. 8.12: Mischungsanalyse mit unterer Begrenzung /COR90a/

Wie anhand der beiden Abbildungen zu erkennen ist, bleibt der Versuchsraum trotzdem immer ein Simplex. Die Untergrenzen der beschränkten Komponenten weisen hierbei immer einen Wert größer null auf.

$$0 \leq u_i \leq x_i \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8.30)$$

Um einen nach den bisher beschriebenen Verfahren und durch Untergrenzen restringierten Versuchsraum analysieren zu können, wird eine Transformation der Originalkomponenten (x_i) in sogenannte Pseudokomponenten (z_{ui}) vorgenommen.

$$z_{ui} = \frac{x_i - u_i}{1 - \sum_{i=1}^k u_i} = \frac{x_i - u_i}{1 - U} = \frac{x_i - u_i}{R_u} \quad (8.31)$$

Nach dieser Transformation reichen die unteren Pseudokomponenten (z_{ui}) wieder von null bis eins.

Die Restriktion lautet somit:

$$0 \leq z_{u_i} \leq x_i = 1 \quad \sum_{i=1}^k z_{u_i} = 1. \quad (8.32)$$

Zur Rücktransformation der Pseudo- in die Originalkomponenten wird Gleichung (8.32) benutzt:

$$x_i = u_i + (1 - U)z_{ui}. \quad (8.33)$$

Zum Durchführen der beschränkten Mischungsversuche werden die Originalkomponenten und zur späteren Analyse die Pseudokomponenten verwendet. Vorteile, die sich durch die Verwendung der Pseudokomponenten ableiten lassen, sind:

- Anwendung aller Standardversuchspläne,
- Verwendung aller Standardregeln,
- genauere numerische Analyse,
- Erfüllung der Optimalitätskriterien,
- einfache Umrechnung zwischen Originalkomponenten und Pseudokomponenten sowie
- grafische Darstellung der untersuchten Bereiche und nicht der durch die Begrenzung entfallenen Bereiche.

Durch Obergrenzen beschränkte Mischungsversuche haben hingegen einen maximalen Wert der restringierten Komponenten, der immer kleiner als eins ist.

$$x_i \leq o_i < 1 \tag{8.34}$$

Auch hier besteht die Möglichkeit, daß ein oder mehrere Komponenten beschränkt sind.

Obere Pseudokomponenten können allerdings nur bei mehr als einer restringierten Komponente eingesetzt werden. Liegt nur eine begrenzte Komponente vor, so ist ein anderes Verfahren, z.B. D-optimale Pläne, zu verwenden.

Wie *Abb. 8.13* zeigt, ist der durch Obergrenzen eingeschränkte Versuchsraum dem bisherigen Originalversuchsraum entgegengesetzt. Eine Analyse mit oberen Pseudokomponenten läßt sich nur dann realisieren, wenn der beschränkte Versuchsraum komplett im Originalsimplex liegt. Dies ist in *Abb. 8.13* der Fall.

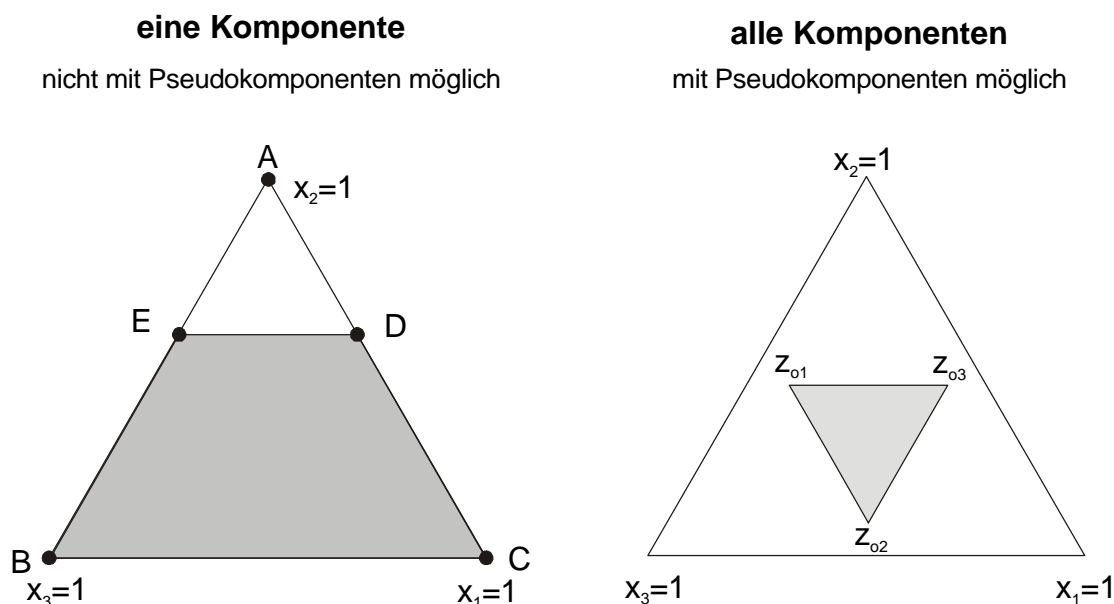


Abb. 8.13: Mischungsanalyse mit oberer Begrenzung /COR90a/

Gehen die oberen Grenzen über den Originalsimplex hinaus, ist ein Verfahren für Unter- und Obergrenzen zu nutzen.

Zur Kontrolle, ob der komplette Versuchsbereich innerhalb des Originalsimplex liegt, d.h. das Verfahren der oberen Pseudokomponenten anwendbar ist, wird Gleichung (8.35) angewendet /COR90a/.

$$\sum_{i=1}^k o_i - o_{\min.} \leq 1 \quad (8.35)$$

Darin stellt $o_{\min.}$ die vom Wert der Komponente geringste Obergrenze dar. Der durch obere Grenzen beschränkte Mischungsversuch kann dann durchgeführt werden, wenn die Summe der Subtraktion kleiner bzw. gleich eins ist.

Wenn der gesamte o-Simplex im Originalversuchsraum liegt, ist die experimentelle Entfernung

$$R_o = \sum_{i=1}^k o_i - 1. \quad (8.36)$$

Nach /COR90a/ darf R_o hierbei nicht größer als 0,5 sein.

Die experimentelle Entfernung wird zur Transformation der Originalkomponenten in die oberen Pseudokomponenten und umgekehrt benötigt. Zur Transformation in die oberen Pseudokomponenten wird Formel (8.37) herangezogen.

$$z_{o_i} = \frac{o_i - x_i}{O - 1} = \frac{o_i - x_1}{R_o} \quad (8.37)$$

Die Rücktransformation in die Originalkomponenten erfolgt anschließend mit

$$x_i = o_i - z_{o_i} (O - 1) = o_i - z_{o_i} R_o. \quad (8.38)$$

Tritt der Fall ein, daß der Versuchsraum durch mehrere untere und obere Grenzen eingeschränkt ist, ergibt der Versuchsraum keine Simplex mehr /KHU96/.

$$0 \leq u_i \leq x_i \leq o_i \leq 1 \quad (8.39)$$

Abb. 8.14 stellt diesen Sachverhalt anhand einer Dreikomponentenmischung mit Ober- und Untergrenzen dar.

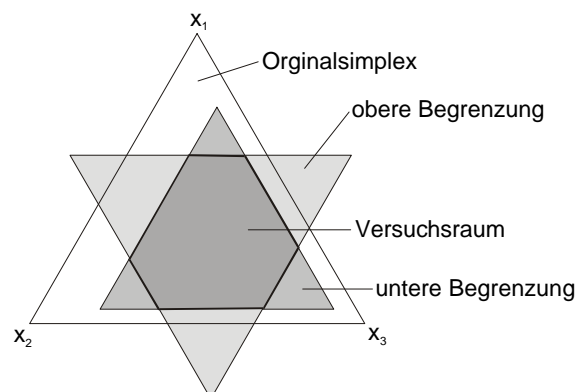


Abb. 8.14: Versuchsraum durch Unter- und Obergrenzen beschränkt /KHU96/

Darin ist die obere Begrenzung hellgrau und die untere Begrenzung dunkelgrau unterlegt. Die Schnittflächen der beiden Grenzen ergeben den neuen begrenzten Versuchsraum, der sich bei einer Dreikomponentenmischung aus maximal sechs Seiten und sechs Ecken zusammensetzt.

Zur Wahl der Versuchspunkte gibt es unterschiedliche Verfahren, wie z.B. das Extremwert- und das XVERT-Verfahren. Eine ausführliche Beschreibung würde aufgrund der Komplexität den Umfang sprengen. Daher sei auf Spezialliteratur wie /SCH97, COR90a, COR90b, SPE91/ verwiesen.

8.5.6 Ratio-Versuchspläne

Im Vergleich zu den bisher beschriebenen Pläne ist die Ratio-Konstruktion kein Mischungsplan, sondern es wird mit Verhältnissen zweier oder mehrerer Komponenten in restriktiven Versuchsräumen gearbeitet. So wird dieses Verfahren z.B. bei der Herstellung von Glas für die Verhältnisse Sand zu Soda, Soda zu Kalk oder bei der Herstellung von Klebstoffen, bei den Verhältnissen von Polymeren eingesetzt /SPE91/. Mögliche Verhältnisse einer Dreikomponentenmischung lauten:

$$V_1 = \frac{x_1}{x_2}, V_2 = \frac{x_1}{x_3} \text{ bzw. } V_2 = \frac{x_2}{x_3} \quad (8.40)$$

$$V_1 = \frac{x_1}{x_2 + x_3}, V_2 = \frac{x_2}{x_3} \quad (8.41)$$

oder

$$V_1 = \frac{x_3}{x_1}, V_2 = \frac{x_2}{x_3}. \quad (8.42)$$

Die Pläne, die hier zur Anwendung kommen, sind voll-, teilfaktorielles oder zentral zusammengesetzte Versuchspläne. Als Restriktion ist hierbei zu nennen, daß bei den Verhältnissen einer Mischung immer alle Komponenten einzubeziehen sind. Weiterhin muß mindesten eine Komponente des ersten Verhältnisses im folgenden Verhältnis enthalten sein /BRA94/.

In *Abb. 8.15* ist als Beispiel ein Strahl mit konstantem Verhältnis zwischen den Komponenten x_1 und x_2 sowie einem begrenzten Versuchsraum dargestellt. Betrachtet werden sollen die Verhältnisse der äußeren Versuchspunkte (1 und 2). Aus der *Abb. 8.15* ist zu erkennen, daß beide Punkte ein Verhältnis von eins besitzen. Wird die Steigung des Strahls größer, so wird das gesuchte Verhältnis kleiner. Bei einer kleineren Steigung wird das Verhältnis hingegen größer.

Ratio-Konstruktionen werden durch zwei unterschiedliche Methoden charakterisiert:

- 1.) Verhältnisse werden berechnet
sowie
- 2.) Verhältnisse werden vorgegeben.

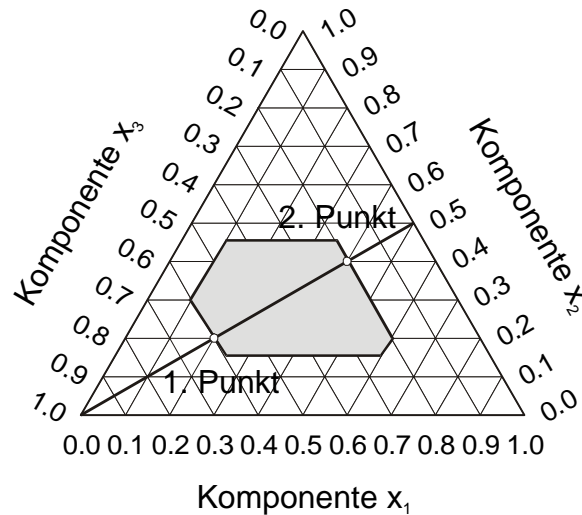


Abb. 8.15: Verhältnisse von Komponenten /SPE91

Bei der Berechnung der Verhältnisse gilt es, die Bedingung

$$\sum_{i=1}^k u_i < 1 < \sum_{i=1}^k o_i \quad (8.43)$$

auf jeden Fall einzuhalten, da sich die sonst ergebenden Versuchspunkte zum Teil außerhalb des erlaubten Versuchsgebietes befinden. Auch wenn Formel (8.43) erfüllt ist, kann es trotzdem vorkommen, daß Versuchspunkte außerhalb liegen.

Innerhalb der Verhältnisberechnung ist es möglich, drei unterschiedliche Verhältnisse zu bilden. Dabei handelt es sich um das

- obere,
- untere
- und
- mittlere

Verhältnis, welches mit nachfolgenden Formeln geschieht:

$$\text{Oberes Verhältnis: } V_{c+} = \frac{o_i}{m_j}, \quad (8.44)$$

$$\text{Unteres Verhältnis: } V_{c-} = \frac{u_i}{m_j}, \quad (8.45)$$

$$\text{Mittleres Verhältnis: } V_{c0} = \frac{m_i}{m_j}. \quad (8.46)$$

Abb. 8.16 enthält ein Beispiel mit drei Verhältnissen. Aus diesen drei Verhältnissen lassen sich maximal neun Versuchspunkte bestimmen, die in Tab. 8.6 aufgelistet sind.

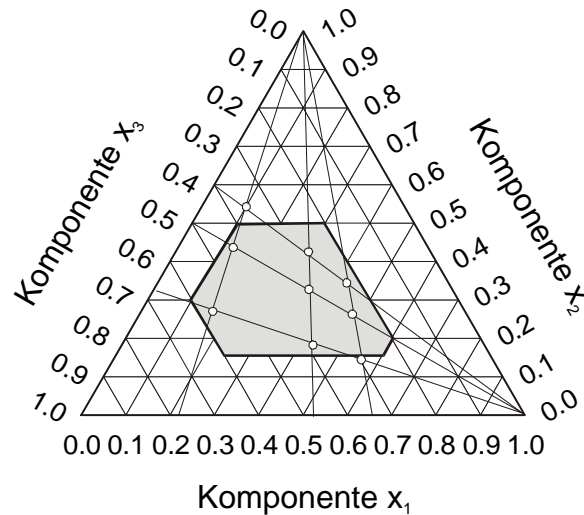


Abb. 8.16: Ratio-Konstruktion

Nr.	normierte Verhältnisse		natürliche Verhältnisse		Anteile der Komponenten		
	z_1	z_2	V_1	V_2	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	0,308	0,462	0,174	0,261	0,565
2	1	-1	1,846	0,462	0,558	0,140	0,302
3	0	-1	1,077	0,462	0,424	0,182	0,394
4	-1	1	0,308	1,538	0,108	0,541	0,351
5	1	1	1,846	1,538	0,421	0,351	0,228
6	0	1	1,077	1,538	0,298	0,425	0,277
7	-1	0	0,308	1,0	0,133	0,433	0,433
8	1	0	1,846	1,0	0,480	0,260	0,260
9	0	0	1,077	1,0	0,350	0,325	0,325

Tab. 8.6: Faktorieller Versuchsplan /SPE91/

Zuerst werden die normierten Verhältnisse ermittelt. Daraus ergeben sich mit Hilfe der Gleichungen (8.44) bis (8.46) die natürlichen Verhältnisse. Die Anteile der Mischungskomponenten werden wiederum durch die Rücktransformation der Verhältnisse errechnet. Mit diesen Werten können dann die Mischungsversuche durchgeführt werden.

Wie bereits angedeutet, können Versuchspunkte außerhalb des vorgegebenen Versuchsbereichs liegen, wie es auch in diesem Beispiel für zwei Versuchspunkte der Fall ist. Diese könnten aufgrund der Restriktion aus Formel (8.43) nicht realisiert werden.

Sind die Verhältnisse vorgegeben, so ist ein anderes Vorgehen erforderlich. Angenommen es sind die beiden Verhältnisse

- $V_1 = 0,5, 1 \text{ und } 1,5 \left(V_1 = \frac{x_3}{x_1} \right)$

sowie

- $V_2 = 1, 2 \text{ und } 3 \left(V_2 = \frac{x_3}{x_2} \right)$

vorhanden.

Jedes dieser Verhältnisse entspricht dabei einem Strahl aus *Abb. 8.16*. Die Versuchspunkte ergeben sich schließlich aus den einzelnen Schnittpunkten. Um die Anteile der Komponenten für die Versuchseinstellungen zu erhalten, ist wieder eine Rücktransformation der Form

$$x_1 = \frac{V_2}{V_1 + V_1 V_2 + V_2}, \quad (8.47)$$

$$x_2 = \frac{V_1 V_2}{V_1 + V_1 V_2 + V_2} \quad (8.48)$$

und

$$x_3 = \frac{V_1}{V_1 + V_1 V_2 + V_3} \quad (8.49)$$

erforderlich, wenn, wie in diesem Beispiel, ein Regressionspolynom zweiten Grades

$$y = b_0 + b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_{12} V_1 V_2 + b_{11} V_1^2 + b_{22} V_2^2 \quad (8.50)$$

gewählt wurde.

Allerdings ist hierbei zu beachten, daß nicht die Komponentenanteile, sondern die Verhältnisse im Polynom vorhanden sind. Um die Anteile der Komponenten in das Regressionspolynom einzufügen, wird eine Substitution der Verhältnisse durch die Verhältnisgleichung durchgeführt.

$$y = b_0 + b_1 \left(\frac{x_1}{x_3} \right) + b_2 \left(\frac{x_2}{x_3} \right) + b_{12} \left(\frac{x_1}{x_3} \right) \left(\frac{x_2}{x_3} \right) + b_{11} \left(\frac{x_1}{x_3} \right)^2 + b_{22} \left(\frac{x_2}{x_3} \right)^2 \quad (8.51)$$

Damit ist es nun möglich, im Rahmen von vorgegebenen Verhältnissen die beste Mischung zu finden⁷.

8.5.7 Mischungspläne mit einer Hauptkomponente

Wenn der Anteil einer Komponente größer als 90 % ist, wird von einer Mischung mit einer Hauptkomponente gesprochen. Es werden dabei zwei Verfahren unterschieden, die in *Abb. 8.17* aufgeführt sind.

Beim ersten Verfahren stellt die Hauptkomponente einen Wirkstoff dar. Ist dies der Fall, wird zur Analyse ein faktorieller Versuchsplan verwendet. Im zweiten Fall ist die Hauptkomponente kein Wirkstoff, d.h. sie wird nicht berücksichtigt. Die Summe der übrigen Komponenten wird daher gleich eins gesetzt. Anschließend kann ein normaler Mischungsplan angewandt werden /SPE91/.

⁷ Bei Formel (8.51) handelt es sich um ein Cox-Modell und nicht wie bisher üblich um ein Modell nach Scheffé.

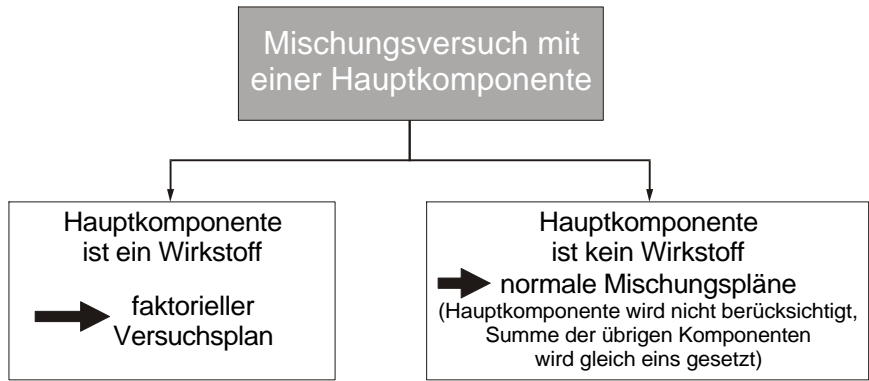


Abb. 8.17: Umgang mit einer Hauptkomponente

8.5.8 Kombinierte Versuchspläne

Unter kombinierten Versuchsplänen werden Prozeßvariablen und Mischungskomponenten zusammen in einem Versuchsplan untersucht /ORT00b, PET91b, COR90a, COR90b/. Abb. 8.18 enthält einen 2^2 -Faktorenversuchsplan, der an jedem Versuchspunkt von einem Standard-Simplex-Plan zweiten Grades überlagert wird.

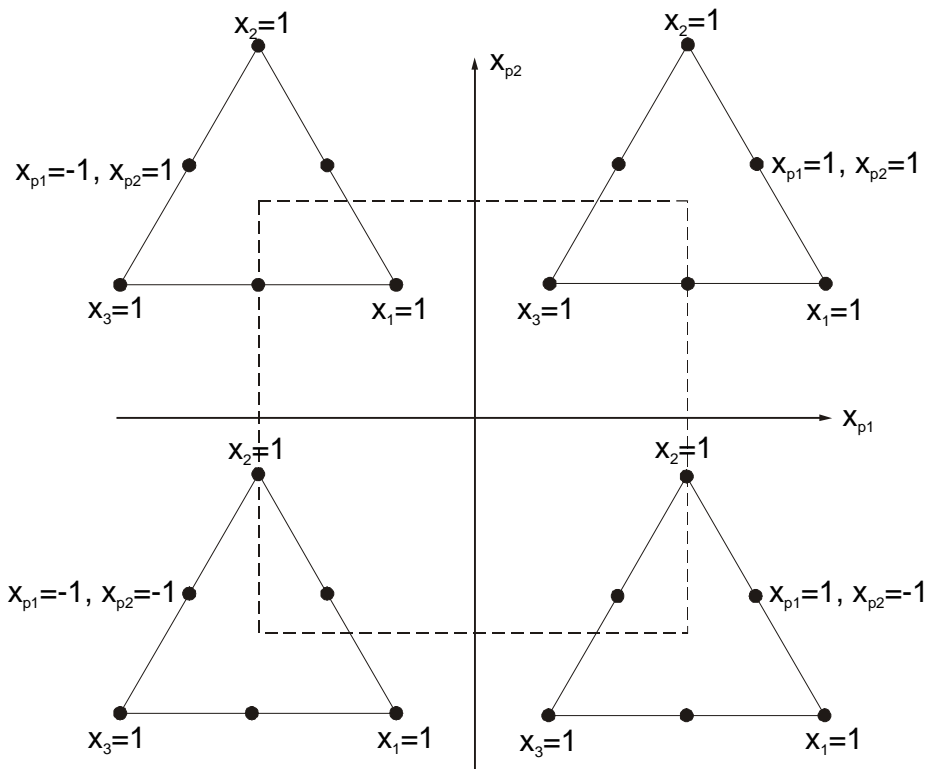


Abb. 8.18: $\{3,2\}$ -Standard-Simplex auf Versuchspunkt des 2^2 -Faktorenplans /COR90a/

Der umgekehrte Fall ist in Abb. 8.19 dargestellt, nämlich die Überlagerung eines Simplex-Centroid-Mischungsplans mit einem 2^2 -Faktorenplan. In diesem Fall wird an jedem Versuchspunkt eines Simplex-Centroid-Plans einer Dreikomponentenmischung ein 2^2 -Faktorenplan realisiert. Das Mischungsmodell lautet hierbei:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3. \quad (8.52)$$

Einfacher stellt sich das Prozeßmodell dar:

$$y = b_{p0} + b_{p1}x_{p1} + b_{p2}x_{p2} + b_{p12}x_{p1}x_{p2}. \quad (8.53)$$

Die Anzahl der Versuchspunkte ergibt sich nach /COR90a, COR90b/ aus der Multiplikation der Simplex-Centroid-Konstruktion

$$n_M = 2^k + 1 = 7 \quad (8.54)$$

und dem Prozeßmodell

$$N = 2^k = 4 \quad (8.55)$$

zu einer Gesamtversuchszahl von 28. Beide aufgeführten Verfahren sind adäquat.

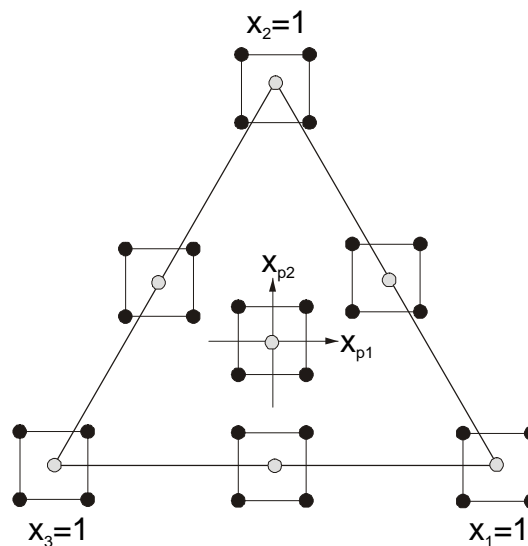


Abb. 8.19: 2^2 -Faktorplan auf jedem Punkt des Simplex-Centroid-Plans /COR90a/

8.6 Zusammenstellung Charakteristika von Mischungsplänen

In den vorhergehenden Unterkapiteln wurden, bis auf die D-optimalen Pläne, die einzelnen Mischungskonstruktionen beschrieben. In Tab. 8.7 sind alle beschriebenen Pläne mit deren charakteristische Eigenschaften⁸ gegenübergestellt.

Auf die Angabe von durchzuführenden Versuchen in Abhängigkeit von der Faktorenanzahl wird verzichtet, da bei vielen Plänen eine starke Abhängigkeit vom gewählten Modell besteht.

⁸ Die charakteristischen Eigenschaften von D-optimalen Plänen sind in Kapitel 6.9 zu finden.

Anforderungen Versuchspläne										
	Anzahl der Mischungs-komponenten	Versuchsumfang	unterschiedliche Polynomgrade möglich	Mischungsmodell frei wählbar	Screening	Optimierung	Verhältnisse	Begrenzung des Versuchsraums möglich	Versuchspunkte über den Versuchsraum verteilt	Aufwand zur Versuchsplan-erstellung
Standard Simplex Modell	2-6	$\binom{g+k-1}{g}$	●	○	⊙	●	○	○	⇨	⇩
Simplex Centroid Modell	3-6	2^k-1	○	○	○	●	○	○	⇨	⇩
Simplex Axial Modell	3-6	$3k+1$	○	⊙	⊙	●	○	○	⇧	⇩
Simplex Screening	>6	$2k+1$	●	○	●	○	○	⊙	⇩	⇨
Mischungsmodell mit unterer Begrenzung	2-6	*1)	●	●	○	●	○	●	*1)	⇨
Mischungsmodell mit oberer Begrenzung	2-6	*1)	●	●	○	●	○	●	*1)	⇧
Mischungsmodell mit unterer und oberer Begrenzung	2-6	*1)	●	●	○	●	○	●	*1)	⇧
Ratio-Modell	3-6	*1)	●	●	○	●	●	●	*1)	⇩
Mischungsmodell mit einer Hauptkomponente	3-6	*1)	●	●	○	●	○	●	*1)	⇨
Kombinierte Versuchspläne	2-6	*1)	●	●	○	●	○	●	*1)	⇨
D-optimale Versuchspläne	3-6	*1)	●	●	●	●	○	●	*1)	⇧

Tab. 8.7: Charakteristika von Mischungsplänen (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt, VA: Versuchsabhängig, ⇧ hoch bzw. gut, ⇨ mittel, ⇩ gering bzw. schlecht, *1) vom gewählten Mischungsmodell abhängig)

9 Taguchi-Methodik

Der Begriff des „robusten Design“ ist eng mit dem japanischen Elektroingenieur Dr. *Genichi Taguchi* (*1924) verbunden /MRK92/, der weltweit durch seine neuartigen Erkenntnisse und Ansätze zum Quality-Engineering /TAG89/ bekannt wurde. *Taguchi*¹ schaffte es, die Techniken des Quality-Engineering, wie sie von *J. M. Juran*, *W. E. Deming*, u.a. auf der Basis von vorhandenen statistischen Methoden verfolgt wurden, zu einem aktiven und vor allem attraktiven Werkzeug für Ingenieure zu gestalten /MRK92/. *K. Bhote* merkte sehr treffend dazu an: „*Der größte Segen, den Taguchi der Industrie gebracht hat, ist der, daß er die Versuchsmethodik aus dem Elfenbeinturm der Universitätsprofessoren und Statistiker in die Entwicklungslabors und die Produktionshallen der Industrie geführt hat. Seine Methoden können unter dem Motto zusammengefaßt werden, sitz nicht herum, sondern tue etwas!*“ /BHO90/. Seine Verfahren sollen helfen, Produkte höchster Qualität und Funktionalität zu niedrigen Kosten in kürzester Zeit zu entwickeln.

Taguchi hat sich früh darum gekümmert, neuartige off-line QS-Methoden (Prävention) zu erzeugen, da er ahnte, daß die sogenannten on-line QS-Methoden (Kuration) bald an die Grenzen des wirtschaftlichen vertretbaren stoßen würden /KLE02, PHA89/.

Nachfolgend werden die zum Umfeld der *Taguchi*-Methode gehörende Philosophie, Grundsätze und Werkzeuge kurz skizziert. Dazu zählen:

- Qualitäts-Philosophie von *Taguchi*,
- Quantifizierung der Verlustfunktion,
- Theorie des Robust Designs,
- Prinzip der Nichtlinearität,
- selektive Parameteridentifikation,
- Matrixexperimente mit orthogonalen Feldern,
- Wechselwirkungsanalyse mittels linearer Graphen und Wechselwirkungstabellen sowie
- S/N-Verhältnisse /HOL95, KLE02/.

Für detaillierte Informationen sei auf einschlägige Literatur, wie z.B. /PHA89, BAK90, KRO94, NED92a-c, TAG86, TAG88, TAG91, TAG92, QUE94, TOU97, ELA88, ROS88, ROY90, PEA93, KAC86, BEN89a, BEN89b/, verwiesen.

9.1 Historisches

Nach dem zweiten Weltkrieg war *Taguchi*² von 1949 bis 1961 im Leitungsstab der Entwicklungsabteilung der japanischen Telefon- und Telegrafengesellschaft beschäftigt. Der damalige Chef der amerikanischen Militärregierung in Japan, General *Douglas Mc Arthur* verfolgte das Ziel, das am Boden liegende japanische Telefonsystem auf den amerikanischen Stand zu bringen /DOA95/.

¹ Die von *Taguchi* entwickelten Methoden werden heute von seinem Sohn *Shin Taguchi* proklamiert bzw. im American Supplier Institute (ASI) in Dearborn, USA gelehrt.

² *Taguchi* war Schüler von *C. R. Rao* und Prof. *Masuyama*, zwei der wohl besten Statistiker ihrer Zeit /TOU97, INT5/.

Allerdings betragen die Entwicklungskapazitäten der japanischen Gesellschaft nur ca. 2 % im Vergleich zu der amerikanischen Telefongesellschaft AT&T. Somit entstand ein Zwang, die Entwicklungsarbeit möglichst effizient zu gestalten /DOA95/.

Nachdem er Mängel am traditionellen Vorgehen fand, entwickelte *Taguchi* seine eigene Methodologie zur Gestaltung von Versuchen. Durch diese Systematik war es möglich, Qualitätsprodukte zu niedrigen Kosten anzubieten, wodurch es mit der japanischen Industrie stetig bergauf ging.

Seine Bemühungen wurden im Jahre 1960 mit dem *Deming-Award*³ geehrt, der eine der höchsten Auszeichnungen in Japan im Bereich des Qualitätsmanagements verkörpert /INT5/. Ab 1962 war *Taguchi* dann als selbständiger QS-Berater in Japan und Ländern wie Chile, China, usw. tätig /KLE02/. 1982 holte ihn das American Supplier Institute (ASI) in die USA, wodurch die *Taguchi-Methoden*⁴ eine starke Verbreitung erfuhren. Firmen wie AT&T, Ford und XEROX fingen an, die *Taguchi-Methoden* mit Erfolg anzuwenden. In Europa wurden die Methoden erst in den 80er Jahren bekannt.

Im Laufe der Zeit erhielt *Taguchi* eine Vielzahl der begehrtesten Auszeichnungen die es gibt, darunter den bereits angesprochenen „*Deming-Preis*“ und die „*Willard F. Rockwell* Medaille“. Weiterhin erhielt er den „*Blue Ribbon Award*“ vom japanischen Kaiser im Jahr 1990 /INT5/.

9.2 Qualität-Philosophie von Taguchi

Im Vergleich zu den bisher bekannten Definitionen und Bedeutungen der Qualität (z.B. nach *Juran*, *Deming*, *Crosby*, *Feigenbaum*, siehe auch *Kapitel 2*) eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung verknüpft *Taguchi* die Qualität eng mit dem Verlust, der durch die Abweichung der Werte der Merkmale, die die Qualität des Produktes charakterisieren, vom geforderten Sollwert verursacht wird /WAL94/. *Taguchi* gibt daher folgende Definition von Qualität an:

„*Qualität entspricht dem Verlust, den ein Produkt für die Gemeinschaft nach seiner Bereitstellung verursacht, im Gegensatz zu jenen Verlusten, die durch seine eigentlichen Funktionen hervorgerufen werden*“ /TAG89/.

Dies impliziert, daß die Qualität eines Produktes anhand des gesellschaftlichen Gesamtverlustes aufgrund von Abweichungen (Streuungen) in der Produktleistung und aufgrund gefährlicher Nebenwirkungen gemessen wird /STE94/. Bei einer idealen Qualität⁵ hingegen ist der Qualitätsverlust gleich null. Je größer somit die meßbaren Verluste sind, desto geringer ist die Qualität /PHA89/.

³ Prof. Deming fand als QS-Statistiker in den USA kein Gehör und ging nach dem zweiten Weltkrieg nach Japan. Ihm zu Ehren wird von der JUSE (Union of Japanese Scientists and Engineers) jährlich der Demingpreis verliehen.

⁴ *Taguchi*[®] ist ein eingetragenes Warenzeichen.

⁵ Die ideale Qualität ist wie folgt definiert: Wenn ein Produkt zu jedem Zeitpunkt seiner Verwendung die vorgegebene Leistung erbringt und zwar unter allen vorgesehenen Betriebsbedingungen und während der gesamten Lebensdauer, ohne Nebenwirkungen hervorzurufen /PHA89/.

Somit ist auch ersichtlich, warum *Taguchi* vordringlich das Ziel verfolgt, die Streuung zu minimieren (Streuung null) und das Qualitätsmerkmal auf den Nominalwert auszurichten. Dies verdeutlichte er durch die Einführung der sogenannten Verlustfunktion. Anhand dieser Verlustfunktion soll das bisher vorherrschende Denken in Toleranzen ersetzt und der durch Abweichungen vom Nominalwert entstehende Verlust in Währungseinheiten (€ \$, usw.) ausgedrückt werden /QUE89a/.

9.3 Verlustfunktion

Bei der Angabe von Toleranzbereichen wird davon ausgegangen, daß alle Teile die innerhalb des Toleranzbereiches liegen gleich gut und alle Teile außerhalb gleich schlecht sind /QUE89b/. Abweichungen vom Zielwert werden bei der konventionellen Qualitätsüberwachung nicht berücksichtigt. Liegt ein Wert außerhalb des Toleranzbereiches, wird das Teil entweder nachbearbeitet oder als Ausschuß deklariert. Wenn sich der Wert innerhalb der erlaubten Grenzen bewegt, wird das Teil akzeptiert, wie in *Abb. 9.1* dargestellt ist /CAN00/.

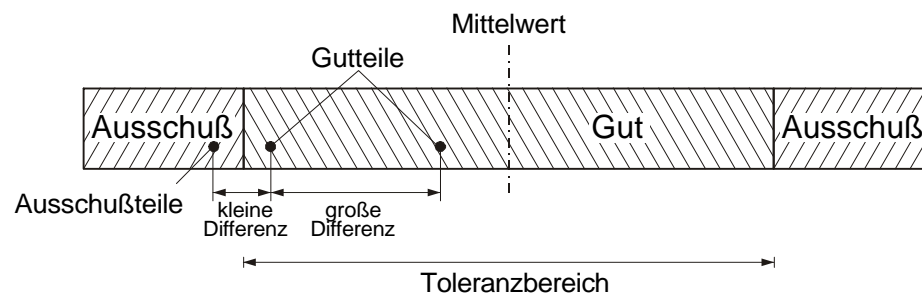


Abb. 9.1: Bewertung nach Toleranzvorgabe /QUE89a/

Taguchi vermutete, daß diese konventionelle Herangehensweise nicht der Realität entspricht und entwickelte daher eine parabolische (einfach quadratische) Funktion, die das Verlustverhalten näherungsweise beschreibt /BRU89/. Seine Verlustfunktion hat ihr Minimum am Sollwert und steigt nach beiden Seiten quadratisch an, d.h. je weiter ein Wert vom Zielwert entfernt liegt, um so stärker steigen die Verluste an. Somit läßt sich die Forderung begründen, daß die Streuung des Qualitätsmerkmals innerhalb der Toleranzgrenzen weiter zu reduzieren ist. Die wird auch als „never ending improvement“ bezeichnet /QUE89b/.

Die einfachste Form der Verlustfunktion (in €) lautet

$$L(y) = c_0(y - t)^2, \quad (9.1)$$

worin c_0 als konstanter Koeffizient definiert ist, der ein Maß für die Kosten darstellt, die durch die Abweichung vom Nominalwert verursacht werden und aus dem vorhandenen Ingenieurwissen abgeschätzt werden muß /SCH97/. Eine Darstellung der Verlustfunktion ist in *Abb. 9.2* zu sehen.

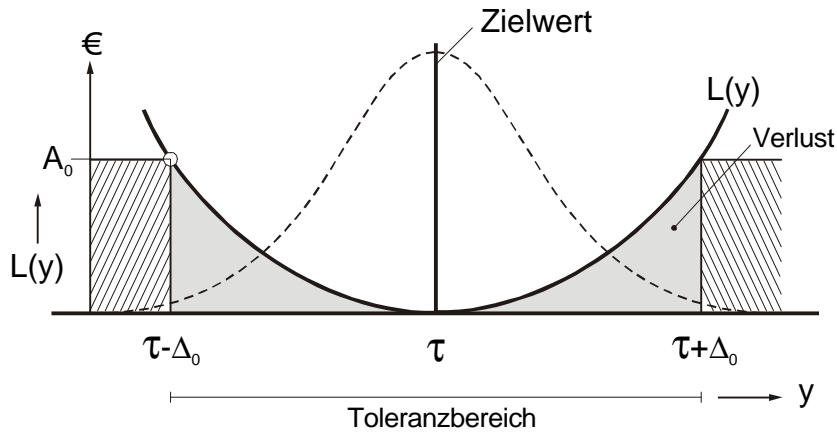


Abb. 9.2: Verlust $L(y)$ steigt mit dem Quadrat der Abweichung vom Zielwert τ

Unter y ist ein an einer kontinuierlichen Skala meßbares Qualitätsmerkmal, das den Zielwert τ besitzt, zu verstehen. Wenn $\tau - \Delta_0$ bzw. $\tau + \Delta_0$ eine Funktionsgrenze ist, die die Kunden im Mittel nicht mehr akzeptieren (50 % mindestens reklamieren) und die Kosten für eine Reparatur oder ein Ersatz im Mittel A_0 sind, dann ist

$$A_0 = c_0 \cdot \Delta_0^2 \quad (9.2)$$

und der daraus folgende Kostenkoeffizient

$$c_0 = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (9.3)$$

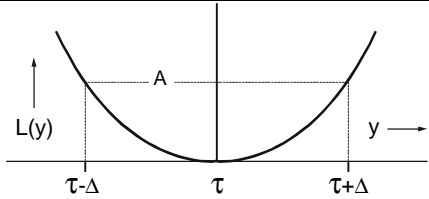
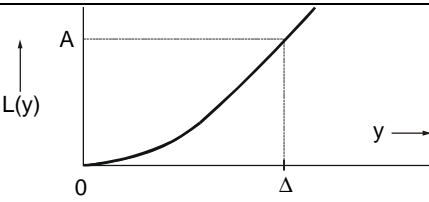
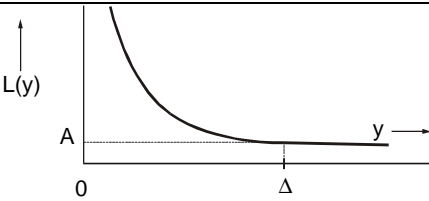
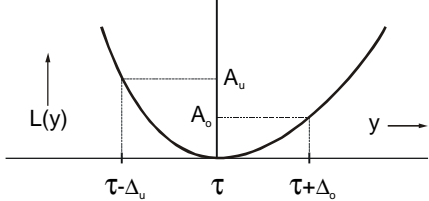
Im Bezug auf den vorgegebenen Zielwert τ ist der mit den möglichen Kosten von y verbundene Durchschnittsverlust also proportional zu dem mittleren Fehlerquadrat von y . Daher sollten die Vorgaben stets in einem nominalen Zielwert und einer temporär gültigen, möglichst engen Bandbreite um den Zielwert bestehen und nicht durch Intervalle und Toleranzen, die teilweise aus Tradition festgeschrieben sind /BRU89/.

Die quadratische Verlustfunktion setzt Qualitätsmerkmale voraus, die einen endlichen, von Null verschiedenen Sollwert τ und einen symmetrisch zu τ verlaufenden Verlust aufweisen. Derartige Merkmale tragen die Bezeichnung Zielwert-Qualitätsmerkmal („nominal-the-best type characteristic“). Weiterhin gibt es noch andere Typen von Zielvorgaben, die in Tab. 9.1 aufgeführt sind und eine Modifikation der quadratischen Verlustfunktion darstellen /WAL94/.

9.4 Robustheit/Robust Design

Taguchi erkannte weiterhin, daß die Einflußgrößen eines Produktes oder eines Prozesses so gewählt werden können, daß sich das Qualitätsmerkmal nur gering ändert /QUE89b/. Diese geringe Änderung hat auch dann Bestand, wenn die Einflußgrößen starken Schwankungen unterworfen sind. Einen solchen Fall bezeichnet er als Robustheit⁶ (Minimierung der Streuung) /QUE89a/.

⁶ Robustheit = Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, auch bei Verletzung der spezifizierten Randbedingungen vereinbarte Funktion zu erfüllen bzw. ihre Funktionsfähigkeit zu erhalten /BOS90/.

Verlustfunktion	Typ	Anwendung
 $L(y) = c_0(y - \tau)^2$	Zielwert- Qualitätsmerkmal („nominal-the-best type characteristic“)	<ul style="list-style-type: none"> • Länge von Schrauben • Widerstand eines Transistorelements • Durchmesser eines Dichtungsringes
 $L(y) = \begin{cases} \frac{A}{\Delta^2} & \text{für } y \geq 0 \\ 0 & \text{für alle anderen} \end{cases}$	Minimierungsmerkmal („smaller-the-better type characteristic“)	<ul style="list-style-type: none"> • Abrieb von Verschleißteilen • Austritt von Strahlung bei Bildschirmen • Bremsweg eines PKWs • Leckrate von Ventilen
 $L(y) = \begin{cases} A \cdot \Delta^2 \frac{1}{y^2} & \text{für } y \geq 0 \\ 0 & \text{für alle anderen} \end{cases}$	Maximierungsregel („larger-the-better type characteristic“)	<ul style="list-style-type: none"> • Lebensdauer eines Bauteils • Auflösung einer Grafik • Ausbeute eines (chemischen) Prozesses • Festigkeit von Schweißpunkten
 $L(y) = \begin{cases} c_1(y - \tau)^2 & \text{für } y > \tau \\ c_2(y - \tau)^2 & \text{für } y < \tau \end{cases}$ $c_1 = \frac{A_o}{\Delta_o^2}; \quad c_2 = \frac{A_u}{\Delta_u^2}$	Asymmetrischer Qualitätsverlust	<ul style="list-style-type: none"> • Ausschuß-/Nacharbeits-Probleme

Tab. 9.1: Typen von Verlustfunktionen (in Anlehnung an /WAL94/)

Robust eingestellte Produkte oder Prozesse weisen nur geringe Qualitätsschwankungen auf und sind außerdem noch unempfindlich auf äußere Störgrößen /BOU93/. Aus diesem Grund wird beim „Robust-Design“ auch darauf verzichtet, vorhandene Störgrößen explizit zu eliminieren. Vielmehr wird versucht, Einstellungen der Steuer- und Stellgrößen zu identifizieren, die eine möglichst große Stabilität der Zielgrößen gegen die Störgrößen zur Folge hat /NED92a/.

Angenommen der Idealwert für die Zielgröße y soll bei y_0 liegen. Wird nun genau auf dem Niveau von $x_{1(-)}$ produziert, wird die Zielgröße mit dem Wert y_0 erreicht. Aus Abb. 9.3 ist jedoch zu erkennen, daß kleine Abweichungen (Streuungen) von $x_{1(-)}$ zu erheblichen Änderungen von y_0 führen.

Wird hingegen der Einflußfaktor auf das Niveau $x_{1(+)}$ eingestellt, so haben die gleichen Schwankungen wesentlich geringere Auswirkungen. Dies ist durch das nichtlineare Verhalten der Einflußgröße zu begründen. Allerdings weist die Zielgröße y_1 bei dieser Einstellung einen zu hohen Wert auf.

Läßt sich nun ein weiterer Faktor, wie z.B. x_2 identifizieren, der jedoch einen linearen Einfluß auf die Zielgröße ausübt, wie dies in *Abb. 9.3* dargestellt ist, kann x_1 so eingestellt werden, daß y_1 nach y_0 verschoben wird und das bei minimalem Streuverhalten, obwohl für den ersten Faktor x_1 auf dem Niveau von $x_{1(+)}$ produziert wird /PET95/.

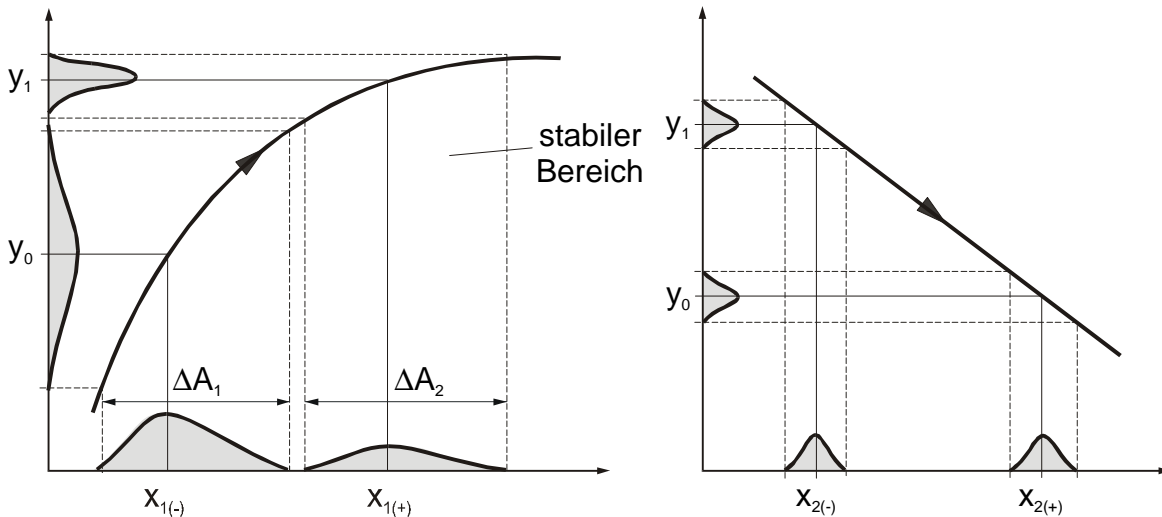


Abb. 9.3: Einstellung robuster Bereiche /KRO94, WAL94/

9.5 Ursachen für Variation

Eine Vielzahl von Ursachen sind maßgebend dafür verantwortlich, Veränderlichkeiten der Produkt- bzw. Prozeßleistung hinsichtlich des Qualitätsmerkmals auszulösen /PHA89/. *Taguchi* bezeichnet diese Ursachen als Störgrößen, Störeinflüsse oder Fehlfaktoren und klassifiziert sie wie folgt /PHA89, WAL94/:

1.) Externe Störungen:

Als externe Störungen werden Faktoren aus dem Gebrauchsumfeld des Produktes oder Belastungsbedingungen bezeichnet, die eine funktionale Variabilität verursachen.

2.) Interne Störungen:

Bei den internen Produktkonstanten treten Streuungen auf, die für die funktionale Variabilität verantwortlich sind. Dabei kann es sich um eine zeitlich oder räumlich bedingte Variation handeln. Die internen Störungen lassen sich wiederum nochmals unterteilen.

a.) Abnutzung oder Leistungsabbau:

Hierbei handelt es sich um eine zeitliche Veränderung des ursprünglich exakten Qualitätskennwertes, der durch Abnutzung ausgelöst wird und dazu führt, daß der Sollwert nicht mehr eingehalten werden kann, welches eine Minderung der Produktleistung zur Folge hat.

b.) Qualitätsschwankungen in der Produktion:

Durch Variabilitäten innerhalb der Herstellungsprozesse entstehen unterschiedliche Ausprägungen des Qualitätsmerkmals bei Produkten mit gleichem Sollwert.

Das Ziel sollte daher sein, die angeführten Streuungen zu reduzieren, um die funktionale Qualität eines Produktes bzw. Prozesses zu gewährleisten. Zur Erreichung dieses Ziels propagiert *Taguchi* einen Drei-Stufen-Prozeß, der nachfolgend beschrieben wird.

9.6 Taguchis Drei-Stufen-Methode zur Produkt- bzw. Prozeßentwicklung

Anstatt des Übergangs vom System-Design zum Toleranz-Design empfiehlt *Taguchi* beim ersten auftreten eines Qualitätsproblems einen Zwischenschritt durchzuführen, das sogenannte Parameter-Design /WAL94/. Letzteres stellt das eigentliche Kernstück der *Taguchi*-Methode dar, welches nichts anderes ist, als die Anwendung von Techniken der klassischen Versuchsmethodik.

Somit fügt sich das Parameter-Design zwischen die traditionelle Produktentwicklung (System-Design) und die Festlegung von Toleranzen (Toleranz-Design) ein /FKM92/.

Diese Stadien fügte *Taguchi* zu einer Drei-Stufen-Methode zusammen, die im einzelnen folgende Inhalte aufweisen:

- System-Design: Systematische Entwicklung, Konzipierung und Festlegung der Eigenschaften des Produktes, Art des Herstellprozesses, usw.
- Parameter Design: Festlegung der Werte der Steuergrößen des Produktes/Prozesses zur Erreichung der Produktmerkmale, DoE-Einsatz zur optimalen Parameter-Gestaltung hinsichtlich kritischer Qualitätsmerkmale, usw.

und

- Toleranz-Design: Toleranzfestlegung der Steuergrößen des Produktes/Prozesses, Ver- bzw. Entschärfung der Spezifikationen, usw.

Das in der westlichen Industrie ein Nachholbedarf bezüglich der unterschiedlichen Gewichtungen zu Gunsten des Parameter-Designs besteht, geht aus dem Vergleich Japan-USA in *Abb. 9.4* hervor /WAL94, ELA88/.

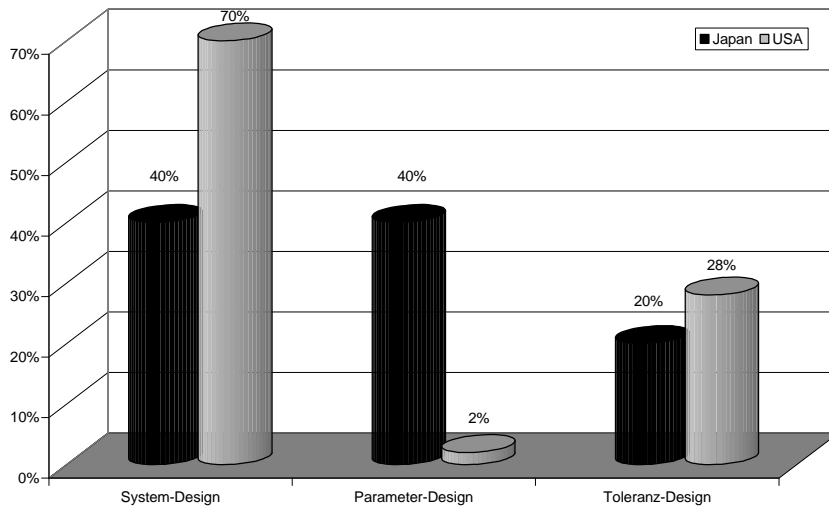


Abb. 9.4: „Design“-Aufwand im Vergleich /ELA88, ASI88/

Häufig hat das Parameter-Design den größten Verbesserungsanteil an der Produkt- bzw. Prozeßqualität. Im ersten Fall werden optimale Werte der Produktparameter und im zweiten Fall ein optimales Niveau für die kontrollierbaren Prozeßparameter der Produktion gesucht /CAN00/.

Innerhalb des Parameter-Designs sind folgende Punkte explizit zu bearbeiten:

- Kenngrößenfestlegung als Ergebnisgrößen der Versuche, Festlegung der Steuergrößen (Versuchsparameter) bzw. der Störgrößen, Ermittlung der Variationsstufen der Faktoren,
- Aufbau eines Versuchsplans zur Variation der Parameter, eventuelle Minimierung der Versuchsanzahl, Berücksichtigung von Steuer- und Störgrößen,
- Durchführung der Versuche und Auswertung (Varianzanalyse, Antwortanalyse, Störanalyse, Verlustanalyse), Ermittlung optimaler Versuchseinstellungen der Faktoren und
- Vorhersage von Ergebnissen bei Anwendung optimaler Einstellkombinationen, Durchführung von Bestätigungsexperimenten /FKM92/.

9.7 Parameter-Klassifikation

Um die Produkt- und Prozeßschwankungen sowie die Kosten zu reduzieren (minimal), sollen innerhalb des Parameter-Designs die Parameter, die das Produkt oder den Prozeß beschreiben, optimiert werden. Dabei werden neben den Steuergrößen auch die Störgrößen berücksichtigt. Lassen sich die Störgrößen nicht mit einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand ausschließen, so besteht das maßgebliche Ziel in der robusten Auslegung gegen diese Störungen.

Neben den Steuer- und Störgrößen nennt *Taguchi* noch sogenannte Stellgrößen. Symbolisch lassen sich diese Bezeichnungen in einem P-Diagramm darstellen, wie in *Abb. 9.5* zu sehen ist.

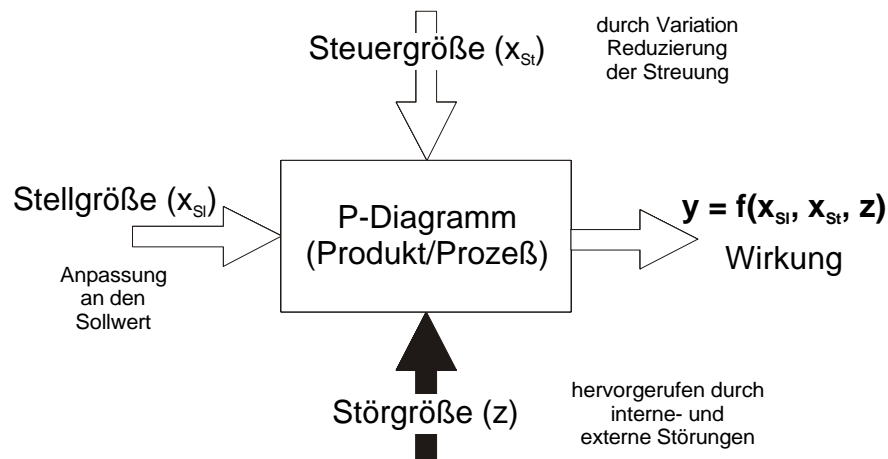


Abb. 9.5: P-Diagramm /PHA89/

Im einzelnen verbirgt sich hinter den drei Parameterarten folgendes:

- **Stellgröße:** Diese Parameter werden vom Anwender eingestellt. Sie sind dafür verantwortlich, den gewünschten Wert für die Wirkung eines Produktes hervorzurufen. Ihre Einstellung wird nach dem entwicklungs-technischen Kenntnisstand über das Produkt vorgenommen, bzw. sie sind optimal zu ermitteln.
 - **Steuergrößen:** Sie lassen sich frei wählen. Durch ihre Variation lassen sich optimale Werte für die Produkte und Prozesse erzielen. Mit dieser Variation können sich entweder die Herstellkosten ändern oder konstant bleiben. Für die Bearbeitung eines Projekts im Rahmen des Robust-Designs ist es wichtig, die Steuergrößen mit Einfluß auf die Herstellkosten von denen ohne Einfluß zu unterscheiden.
- und
- **Störgrößen:** Durch sie wird eine Abweichung der Wirkungsgröße y von der durch x_{Sl} spezifizierten Zielgröße verursacht. Auf Störgrößen kann meistens nur ein geringer Einfluß genommen werden /PHA89, KLE02/.

Aus der Beschreibung der Parameter ist ersichtlich, daß neben der Schwankungsminimierung auch die Kostenminimierung eine wesentliche Rolle spielt. Bei Faktoren, die sich anhand der Versuchsergebnisse als nicht qualitätsrelevant herauskristallisieren, wird eine Einstellung gewählt, die am wirtschaftlichsten ist.

Hingegen ist bei relevanten Faktoren davon auszugehen, daß bei den Einstellungen, die die geringste Streuung hervorrufen, sowohl die Herstellkosten, als auch die Kosten, die das Produkt während seiner Lebensdauer verursacht, am geringsten sind.

Begründet werden kann dies dadurch, daß ein Produkt, welches bei der Herstellung nur geringe Schwankungen um den Zielwert aufweist, auch geringe Leistungsschwankungen beim Einsatz hat /FKM92/.

9.8 Taguchis orthogonale Felder/orthogonale Versuchspläne

Taguchi entwickelte, ausgehend von klassischen Versuchsplänen, 18 neue Versuchsanordnungen, die sogenannten standardisierten orthogonalen Felder⁷, in denen die Stufen der verschiedenen zu untersuchenden Produkt- und Prozeßfaktoren (Steuergrößen) von Experiment zu Experiment verändert werden /PHA89/. Mit diesen orthogonalen Feldern ist es möglich, eine maximale Zahl an Haupteffekten auf unverfälschte (orthogonale⁸) Weise mit einer minimalen Versuchsanzahl zu schätzen /STC98/. Allerdings ist nicht nachvollziehbar, woher genau die orthogonalen Felder stammen /BHO90, KUH90, GIM91, KRO91, HER96/. Ein großer Teil der Felder ist jedoch in differenzierter Form in Literaturstellen, wie z.B. /ADD62, BOX78, KEM52, PLA46/, zu finden. Anhand dieser Literaturstellen ist auch ersichtlich, daß viele der von Taguchi aufgeführten orthogonalen Felder tatsächlich mit fraktionierten zweistufigen Faktorplänen, Plackett-Burman-Plänen, Box-Behnken-Plänen, Lateinischen Quadraten, Griechisch-Lateinischen Quadraten, usw. identisch sind /STC98, PET95/.

Ausgehend von hochvermengten klassischen Versuchsplänen hat Taguchi die Spalten anders belegt. Diese Belegung ist in Abb. 9.6 am Beispiel der Gegenüberstellung eines 2³-Versuchsplans mit einem orthogonalen Feld L₈(2⁷) dargestellt. Die Faktorstufen sind nicht, wie bei klassischen Plänen, mit „-“ und „+“ sondern mit „1“ und „2“ usw. bezeichnet /HOL95/. Daher ist es von besonderer Bedeutung, bei der Anwendung von orthogonalen Feldern die Problematik der Wechselwirkungen genau zu kennen bzw. zu wissen, wie sich hochvermengte Pläne verhalten.

Exper. Nr.	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	vollfaktorierter 2 ³ -Versuchsplan
1	-	-	+	-	+	+	-	
2	+	-	-	-	-	+	+	
3	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	+	-	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	-	+	
6	+	-	-	+	+	-	-	
7	-	+	-	+	-	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	

Exper. Nr.	1	2	3	4	5	6	7	orthogonales L ₈ (2 ⁷) Feld
1	1	1	1	1	1	1	1	
2	1	1	1	2	2	2	2	
3	1	2	2	1	1	2	2	
4	1	2	2	2	2	1	1	
5	2	1	2	1	2	1	2	
6	2	1	2	2	1	2	1	
7	2	2	1	1	2	2	1	
8	2	2	1	2	1	1	2	

Abb. 9.6: Gegenüberstellung klassischer 2³-Plan mit einem L₈-Feld

⁷ Werden auch orthogonaler Versuchsplan, orthogonale Matrix oder orthogonale Tafel genannt.

⁸ Kommen für jedes Spaltenpaar alle Faktorstufen mit gleicher Häufigkeit vor, dann sind die Spalten eines orthogonalen Feldes paarweise orthogonal /PHA89/.

Jedes standardisierte orthogonale Feld ist durch ein Kurzzeichen eindeutig beschrieben. In dem Kurzzeichen $L_n(m^k)$ bedeutet:

- n = Anzahl der Zeilen,
 - m = Anzahl der Faktorstufe
- und
- k = Anzahl der Faktoren.

Die Anzahl der Versuche wird durch die Zeilenzahl festgelegt, d.h. ein geeignetes Feld für ein Problem muß mindestens in der Zeilenzahl mit den Freiheitsgraden übereinstimmen. Bei den Faktoren ist dies ähnlich, denn sie werden durch die Spaltenzahl bestimmt.

Um ein Feld einsetzen zu können, muß die Stufenzahl der Faktoren zu der Stufenzahl des Feldes passen. Da Versuche im allgemeinen teuer sind, sollte stets das kleinste orthogonale Feld gewählt werden /PHA89, KLE02/.

	Orthogonales Feld	Anzahl der Zeilen	Maximale Anzahl der Faktoren	Maximale Anzahl der Spalten bei diesen Stufen			
				2-St.	3-St.	4-St.	5-St.
2-stufige Felder	L_4	4	3	3	-	-	-
	L_8	8	7	7	-	-	-
	L_{12}	12	11	11	-	-	-
	L_{16}	16	15	15	-	-	-
	L_{32}	32	31	31	-	-	-
	L_{64}	64	63	63	-	-	-
3-stufige Felder	L_9	9	4	-	4	-	-
	L_{27}	27	13	-	13	-	-
	L_{81}	81	40	-	40	-	-
mehr-stufige Felder	L'_{16}	16	5	-	-	5	-
	L'_{25}	25	6	-	-	-	6
	L'_{64}	64	21	-	-	21	-
Gemischte 2- und 3-stufige Felder	L'_{18}	18	8	1	7	-	-
	L'_{32}	32	10	1	-	9	-
	L'_{36}	36	23	11	12	-	-
	L'_{36}	36	16	3	13	-	-
	L'_{50}	50	12	1	-	-	11
	L'_{54}	54	26	1	25	-	-

Abb. 9.7: Standardisierte Felder nach Taguchi⁹ /PHA89/

9.9 Konzept der inneren und äußeren Felder

Innerhalb der orthogonalen Felder wird nochmals zwischen dem inneren („inner-array“) für die Steuergrößen und dem äußeren Feld („outer-array“) für die Störgrößen unterschieden /PET95, WAL94/. Durch Multiplikation der Zeilenzahl des inneren Feldes mit denen des äußeren Feldes ergibt sich die Anzahl der durchzuführenden Versuche.

⁹ Aufgrund des Versuchsumfanges sind in der industriellen Praxis nur einige der 18 standardisierten Pläne, nämlich L_4 , L_9 , L_{16} , L_{27} und L_{32} von Bedeutung.

Die ermittelten Meßwerte der Zielgröße werden nach der Versuchsdurchführung in das Antwortfeld eingetragen. Als Analysegrößen lassen sich die Mittelwerte verwenden, die sich aus den Einzelwerten unter verschiedenen Störgrößeneinstellungen ergeben. Weiterhin lassen sich noch die sogenannten Signal-/Rausch-Werte (Signal-/Noise-Ratio) anwenden, die aus einer logarithmischen Transformation herrühren und in *Abschnitt 9.13* beschrieben sind /HOL95/.

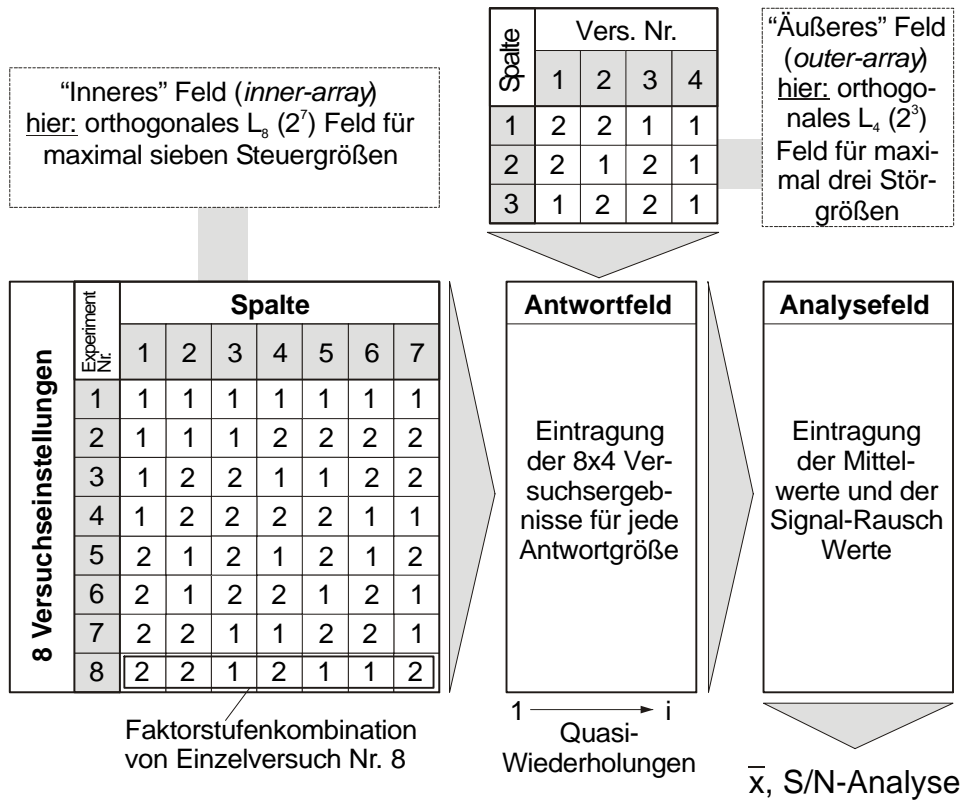


Abb. 9.8: Versuchsanordnung mit einem inneren und einem äußeren Feld

9.10 Bestimmung der Freiheitsgrade

Um ein orthogonales Feld konstruieren bzw. auswählen zu können, muß zuvor die Summe der Freiheitsgrade (DF) des Problems bekannt sein, da durch sie der Versuchsumfang (Mindestanzahl von Versuchen) bestimmt wird. Bei der Bestimmung unterscheidet man /KLE02, KRO94, PHA89, TOU97/:

- Freiheitsgrade für den gesamten Mittelwert (ist unabhängig von der Anzahl der zu untersuchenden Steuergrößen, i.d.R. $DF_{\mu} = 1$),
 - Freiheitsgrade für die einzelnen Faktoren (der Freiheitsgrad eines Faktors ist stets um eins kleiner als die Zahl der Faktorstufen)
- und
- Freiheitsgrade der Wechselwirkungen, z.B. $DF_{A \times B} = (DF_A - 1)(DF_B - 1)$.

9.11 Modifikation der orthogonalen Felder

Zur Modifikation der standardisierten orthogonalen Felder werden verschiedene Techniken von *Taguchi* bereitgestellt, die es ermöglichen, Faktoren mit höherer oder niedrigerer Stufenzahl in die entsprechenden Felder zu integrieren. Zu diesen Techniken zählen /KRO94, PHA89/:

- Scheinstufen-Methode (Dummy-Design),
 - Methode der mehrfachen Spaltenbenutzung (Kombinations-Design),
 - Spaltenzusammenlegung (Multilevel-Design),
 - Leerspalten-Design
- und
- Problemverzweigung.

In der Praxis treten vermehrt Problemstellungen auf, die nicht mehr mit den Standardplänen zu bearbeiten sind. Daher kommt den Modifikationstechniken eine erhöhte Bedeutung zu. Sie werden nachfolgend kurz erläutert.

Tritt beispielsweise der Fall auf, daß ein Faktor m-Stufen aufweist, so kann dieser auch einer Spalte mit $m + 1$ -Stufen zugewiesen werden. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, wird ein $L_9(3^4)$ Feld verwendet, an dem die Scheinstufen-Methode sowie die Methode der mehrfachen Spaltenbenutzung demonstriert wird /KLE02, PHA89/.

Exp. Nr.	Spalten-Nr.				Exp. Nr.	Spalten-Nr.				Exp. Nr.	Spalten-Nr.			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
1	1	1	1	1	1	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	1	A ₁ E ₁	B ₁	C ₁	D ₁
2	1	2	2	2	2	A ₁	B ₂	C ₂	D ₂	2	A ₁ E ₁	B ₂	C ₂	D ₂
3	1	3	3	3	3	A ₁	B ₃	C ₃	D ₃	3	A ₁ E ₁	B ₃	C ₃	D ₃
4	2	1	2	3	4	A ₂	B ₁	C ₂	D ₃	4	A ₂ E ₁	B ₁	C ₂	D ₃
5	2	2	3	1	5	A ₂	B ₂	C ₃	D ₁	5	A ₂ E ₁	B ₂	C ₃	D ₁
6	2	3	1	2	6	A ₂	B ₃	C ₁	D ₂	6	A ₂ E ₁	B ₃	C ₁	D ₂
7	3	1	3	2	7	A' ₁	B ₁	C ₃	D ₂	7	A ₁ E ₂	B ₁	C ₃	D ₂
8	3	2	1	3	8	A' ₁	B ₂	C ₁	D ₃	8	A ₁ E ₂	B ₂	C ₁	D ₃
9	3	3	2	1	9	A' ₁	B ₃	C ₂	D ₁	9	A ₁ E ₂	B ₃	C ₂	D ₁
	A	B	C	D		A	B	C	D		AE	B	C	D
	Faktorzuweisung					Faktorzuweisung					Faktorzuweisung			

a) Feld L_9

b) Versuchsplan mit Scheinstufenmethode

c) Versuchsplan mit Spaltenmehrfachbenutzung

Abb. 9.9: Scheinstufen-Methode und Spaltenmehrfachbenutzung an einem $L_9(3^4)$ Feld /PHA89/

Mit dem Ausgangsfeld in *Abb. 9.9a* können vier Faktoren A, B, C, D mit drei Stufen behandelt werden. Liegt jetzt ein Problem vor, bei dem ein Faktor nur in zwei Stufen vorliegt, ist durch Anwendung der Scheinstufen-Methode (siehe *Abb. 9.9b*) trotzdem das L_9 -Feld anwendbar, da die Versuchszahl ($n = 9$) größer ist, als die Summe der benötigten Freiheitsgrade ($DF = 8$).

Der ersten Spalte des Feldes L_9 (Abb. 9.9a) wird der zweistufige Faktor zugeordnet. Gleichzeitig wird die dritte Ausprägung $A_3 = A_1$ (gekennzeichnet mit A'_1) gesetzt. Das resultierende Feld $L_9(2^1 \times 3^3)$ in Abb. 9.9b bleibt durch die Anwendung der Scheinstufen-Methode trotzdem orthogonal /KRO94, WAL94/.

Die Wahl solcher Scheinstufen (z.B. $A_3 = A_1$ oder $A_3 = A_2$) hängt in der Praxis von vielen Gesichtspunkten ab /PHA89/:

- Wenn $A_3 = A_1$ gesetzt wird, so wird A_1 doppelt so genau bestimmt wie A_2 . Man sollte aus diesem Grund die Faktorstufe als Scheinstufe wählen, von der man genauere Informationen haben möchte.

oder

- Man sollte die Stufe als Scheinstufe wählen, die den geringsten Aufwand macht, da der Versuchsaufwand ebenso zu berücksichtigen ist.

Wenn der Fall auftritt, daß in einem orthogonalen Feld mehr Faktoren untersucht werden sollen, als Spalten in der Matrix vorhanden sind, kommt das Prinzip der Spaltenmehrfachbenutzung zur Anwendung, allerdings nur dann, wenn wechselwirkungsfreie Faktoren geeignet zusammengefaßt werden können.

In Abb. 9.9b wurde bereits gezeigt, wie zweistufige und dreistufige Faktoren zusammen in ein orthogonales Feld einzutragen sind. Nun sollen zwei zweistufige Faktoren (A, E) mit drei dreistufigen Faktoren (B, C, D) in einem L_9 -Feld verknüpft werden /PHA89, KLE02/.

Um das orthogonale Feld anwenden zu können, wird AE als ein neuer zusammengefaßter Faktor gebildet, der nur eine Spalte des L_9 -Feldes benötigt. Weiterhin wird zusätzlich noch angenommen, daß zwischen diesen beiden Faktoren keine Wechselwirkung besteht. Für die Spalte der beiden zweistufigen Faktoren ergibt sich sodann folgende Zuordnung /TOU97/,

- $1 \Rightarrow A_1E_1 := (A_1E_1)_1$,
- $2 \Rightarrow A_2E_1 := (A_2E_1)_2$,
- $3 \Rightarrow A_1E_2 := (A_1E_2)_3$,

die in Abb. 9.9c als erste Spalte dargestellt ist.

Nachteilig hierbei ist, daß die Eigenschaft der Orthogonalität verloren geht, da die beiden kombinierten Faktoren zueinander nicht mehr ausgewogen und somit nicht mehr orthogonal sind /WAL94/.

Eine weitere Möglichkeit orthogonale Felder anzupassen bzw. zu modifizieren, besteht in der Zusammenlegung von Spalten, dies ist auch unter dem Namen „Multilevel-Design“ bekannt /PHA89/. Dabei werden, im Gegensatz zur Scheinstufen-Methode, Kombinationen von Ausprägungen niedriger Stufenzahl zu einem Faktor höherer Stufenzahl zusammengelegt /WAL94/. Es lassen sich hierbei aus mehreren zweistufigen Spalten eine vierstufige Spalte, aus zwei- und dreistufigen Spalten eine sechsstufige und aus mehreren dreistufigen eine neunstufige Spalte herleiten. Damit die vierstufige Spalte aus zweistufigen Spalten konstruiert werden kann, müssen zwei Spalten sowie die zugehörige Wechselwirkungsspalte zusammengelegt werden. Aus den ersten drei Spalten eines $L_8(2^7)$ Feldes, welches in Abb. 9.10 dargestellt ist, lassen sich vier Kombinationsmöglichkeiten

- (1, 1, 1),
 - (1, 2, 2),
 - (2, 1, 2)
- sowie
- (2, 2, 1)

bilden.

Diese treten jeweils zweimal auf. Hieraus lassen sich nun die vier Ausprägungen eines vierstufigen Faktors ableiten. Aus dem $L_8(2^7)$ Feld wird dadurch ein $L_8(4^1 \times 2^4)$ Feld. Die Orthogonalität und die Zahl der Freiheitsgrade bleibt bei diesem Vorgehen erhalten /WAL94/.

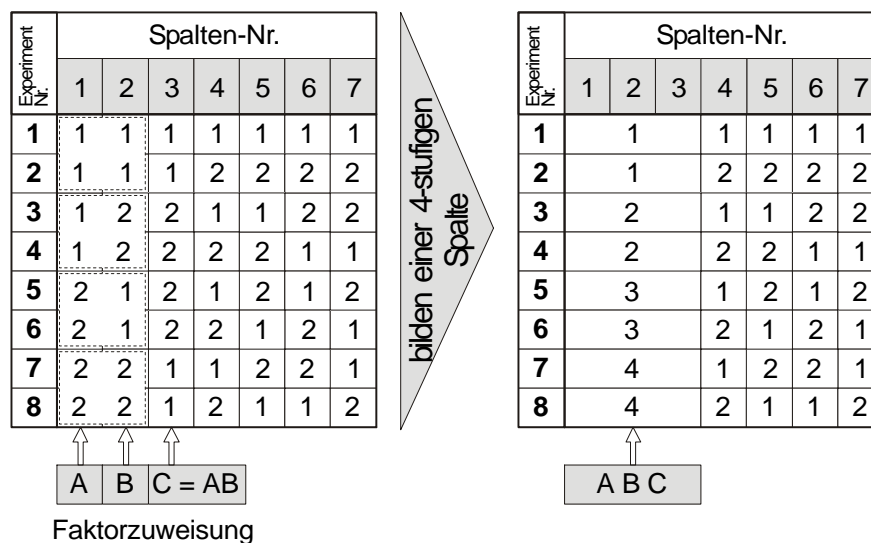


Abb. 9.10: Spaltenzusammenlegung /PHA89/

Durch das Leerspalten-Design lassen sich Probleme an die orthogonalen Felder anpassen, die es verlangen, Faktoren mit drei Ausgangsstufen in zweistufigen Matrizen unterzubringen. Wenn z.B. ein dreistufiger Faktor A (A_1, A_2, A_3) in eine zweistufige Spalte integriert werden soll, so ist A gemäß der Einstellungen/Stufen einer Referenzspalte, der sogenannten Leerspalte, aufzuspalten. Weiterhin wird noch die Spalte, die die Wechselwirkung zwischen den Leerspalten und A enthält, aus der Matrix entfernt, um die Anzahl der Freiheitsgrade konstant zu halten. Die Leerspalte dient somit als Referenzspalte für beliebig viele dreistufige Faktoren /TOU97/. Anschließend darf die Leerspalte nicht mehr benutzt werden.

Sind z.B. vier Faktoren (A, B, C, D), von denen A, B dreistufig und C, D zweistufig sind, mit einem minimalen Versuchsaufwand zu untersuchen, kann das $L_8(2^7)$ Feld unter Zuhilfenahme des Leerspalten-Designs angewendet werden. Zunächst wird Spalte 1 als Leerspalte gewählt. Anschließend wird A Spalte 2 zugewiesen und Spalte 3, die die Wechselwirkung zwischen A und der Leerspalte enthält, entfernt. B wird sodann Spalte 4 zugeordnet. Wiederum wird die Wechselwirkung zwischen B und der Leerspalte (Spalte 5) gestrichen. Dieses Vorgehen ist in Abb. 9.11 durch den modifizierten Standardgraphen¹⁰ dargestellt.

¹⁰ Standardgraphen sowie deren Modifikationsregeln werden in Kapitel 9.12 behandelt.

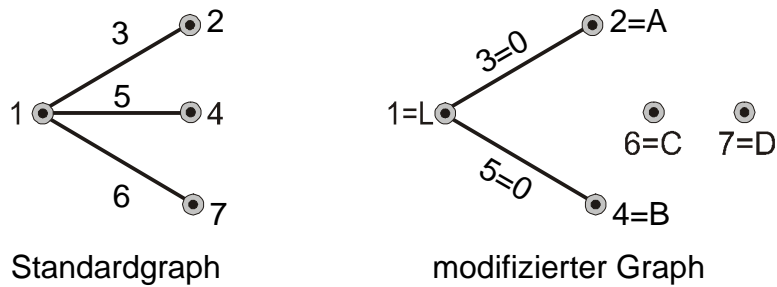


Abb. 9.11: Standardgraph für $L_8(2^7)$ und modifizierter Graph

Wenn die Referenzspalte (L) auf der Stufe 1 steht, werden die Stufen der Spalten 2 (A) und 4 (B) als 1 und 2 behandelt. Hingegen wird bei Stufe 2 der Referenzspalte die Stufen der Spalten 2 und 4 nun als 2 und 3 behandelt. Aus 1 wird 2 und aus 2 wird 3. Das sich ergebende Design ist in Abb. 9.12 zu sehen.

Experiment Nr.	Spalten-Nr.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

➔

Experiment Nr.	Spalten-Nr.				
	1	2	4	6	7
	(L)	A	B	C	D
1	1	A ₁	B ₁	1	1
2	1	A ₁	B ₂	2	2
3	1	A ₂	B ₁	2	2
4	1	A ₂	B ₂	1	1
5	2	A ₂	B ₂	1	2
6	2	A ₂	B ₃	2	1
7	2	A ₃	B ₂	2	1
8	2	A ₃	B ₃	1	2

Abb. 9.12: Durch Leerspalten angepasste Matrix eines $L_8(2^7)$ Feldes

Durch die Anwendung des Leerspalten-Designs bleibt die Orthogonalität gewährleistet. In diesem Fall werden die Faktoren A₂ und B₂ sogar intensiver untersucht /TOU97/.

In der Praxis kommen Problemstellungen vor, bei denen zwei oder mehrere Alternativen möglich sind. Die betrachteten Probleme liefen bisher immer hintereinander ab. Bei Alternativmöglichkeiten spielt daher die sogenannte Problemverzweigung eine entscheidende Rolle. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, bei dem mögliche Lösungsvarianten in die Untersuchung einbezogen werden können. Liegen z.B. sieben zweistufige Faktoren (A, B, C, D, E, F, G) vor, von denen C ein sogenannter Verzweigungsfaktor ist, d.h. von seiner Stufe sind noch andere Faktoren (D, E, F, G) abhängig, ergibt sich der Modellgraph aus Abb. 9.13.

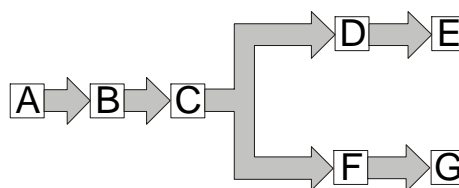


Abb. 9.13: Problemstellung

Je nach vorliegendem Problem lassen sich dann lineare Graphen (siehe *Kapitel 9.12*) erstellen, aus denen die angepaßte Versuchsmatrix erstellt werden kann. Aus dem dargestellten Modellgraph läßt sich dementsprechend der geforderte Graph ableiten, was in *Abb. 9.14* dargestellt ist.

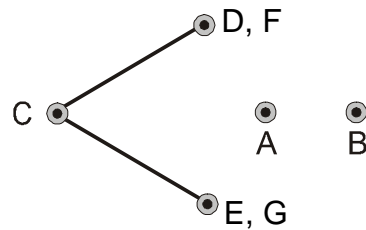
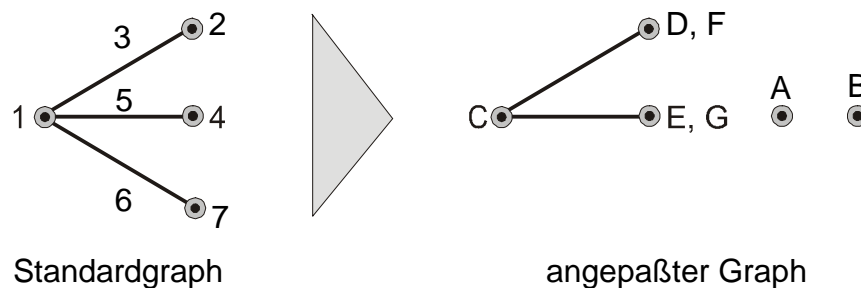


Abb. 9.14: Geforderter Graph

Wird nun der Standardgraph des Feldes L_8 auf das Problem angepaßt, so folgt daraus *Abb. 9.15*.



Standardgraph

angepaßter Graph

Abb. 9.15: Problemrelevanter Graph

Aus dem problembeschreibenden linearen Graph kann jetzt die entsprechende Versuchsmatrix aufgestellt und ausgewertet werden /PHA89/.

9.12 Analyse von Wechselwirkungen mittels Wechselwirkungstabellen und linearen Graphen

In der Praxis spielen neben den Haupteffekten die Wechselwirkungen eine erhebliche Rolle. Um Wechselwirkungen in die Untersuchung einzubeziehen, hat *Taguchi* die zwei Hilfsmittel „Wechselwirkungstabellen“ und „lineare Graphen“ entwickelt /TOU97/.

Innerhalb der Wechselwirkungstabelle wird für jedes zweistufige orthogonale Feld die Vermengungsstruktur der einzelnen Versuchsspalten angegeben. Es handelt sich bei der Wechselwirkungsmatrix um eine obere Dreiecksmatrix, da die Wechselwirkungen zueinander symmetrisch sind /WAL94/. Die Diagonalelemente sind in Klammern gesetzt, da es keine reale Wechselwirkung zwischen den Spalten i und i gibt /TOU97/. Allerdings sind nur die Zweifach-Wechselwirkungen aufgeführt, da *Taguchi* davon ausgeht, daß in der Regel höhere Wechselwirkungen keine drastischen Vermengungsbeiträge liefern.

Mit dieser Annahme liegt er auf gleicher Linie wie viele Praktiker und Wissenschaftler vor ihm. Diese Faustregel findet man sogar schon bei *Yates* /YAT37/, *Kemphorne* /KEM52/ oder *Davies* /DAV54/. *Scheffler* stellte sogar fest:

„Bei richtiger Wahl der Faktorstufen sollten aber bereits die Zweifaktor-Wechselwirkungseffekte merklich kleiner sein, als die wesentlichen Haupteffekte. Die Dreifaktor-Wechselwirkungseffekte sind dann so klein, daß sie in den Bereich der Streuung, d.h. den Bereich der zufälligen Fehler fallen und damit vernachlässigbar werden können. Das gilt um so mehr für die noch höheren Wechselwirkungen ...“ /SCH97/.

Als Beispiel wird in Abb. 9.16 das Standardfeld $L_8(2^7)$ mit seiner Wechselwirkungstabelle angeführt. Anhand dieser Wechselwirkungstabelle ist z.B. zu erkennen, daß die Wechselwirkung von Spalte 1 und 2 in Spalte 3 zu finden ist. Analoges gilt für die Spalten 3 und 5, deren Wechselwirkung in Spalte 6 steht /PHA89/.

Experiment Nr.	Spalten-Nr.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

$L_8(2^7)$ Spalten-Nr. nach Taguchi	1	2	3	4	5	6	7
1	(1)	3	2	5	4	7	6
2		(2)	1	6	7	4	5
3			(3)	7	6	5	4
4				(4)	1	2	3
5					(5)	1	2
6						(6)	1
7							(7)

Abb. 9.16: Orthogonales Feld $L_8(2^7)$ mit Wechselwirkungstabelle /PHA89/

Eine weitere Möglichkeit Wechselwirkungen zu erkennen, besteht darin, sie aus den linearen Graphen abzulesen. Taguchi stellte dazu für jedes Standardfeld eine kleine Zahl von Standardgraphen und zusätzliche Regeln zur Modifikation dieser Graphen bereit /TOU97/. Die Graphen drücken ebenfalls die Wechselwirkungen zwischen den Spalten eines orthogonalen Feldes aus. Mit den zwei Graphen aus Abb. 9.17 lassen sich die Wechselwirkungen eines orthogonalen L_8 Feldes beschreiben. Die Spalten werden durch Punkte und Linien in einem linearen Graphen ausgedrückt. Sind zwei Punkte durch eine Linie verbunden, so bedeutet dies, daß eine Wechselwirkung zwischen den beiden Spalten besteht. Jeder Linie bzw. jedem Punkt wird stets eine bestimmte Spaltenzahl zugewiesen. außerdem taucht eine Feldspalte in einem Graphen nur einmal auf.

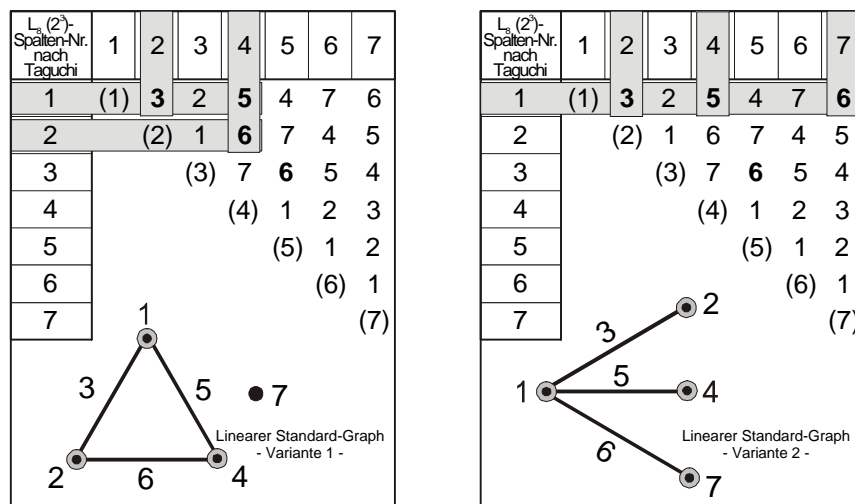


Abb. 9.17: Lineare Graphen von L_8 mit Wechselwirkungstabelle /HOL95/

Aus Abb. 9.17 ist gut zu erkennen, welche Spalten Wechselwirkungen aufweisen. Diese stimmen selbstverständlich mit denen der Wechselwirkungstabelle überein. Im linken Graphen entsprechen die vier Punkte den Spalten 1, 2, 4 und 7 und die Linien den Spalten 3, 5 und 6. Die Linien geben die Wechselwirkungen zwischen den Spalten 1, 2; 2, 4 und 4, 1 wieder. Der rechte Graph ist etwas anders konstruiert und gibt ergänzende Informationen.

Ein weiteres Anwendungsfeld besteht darin, daß man mit Hilfe der linearen Graphen aus gegebenen orthogonalen Feldern weitere Felder ableiten kann. Diese neu abgeleiteten Felder sind auf ein spezielles Problem zugeschnitten. Um die Graphen anzupassen, gibt es folgende allgemeine Regeln, die in Abb. 9.18 noch einmal grafisch dargestellt sind /PEA93, PHA89/:

- **Linientrennung:** Bei Graphen von zweistufigen Feldern kann die Linie zwischen den Punkten a und b durch einen Punkt ersetzt werden. Wird dies bei dreistufigen Feldern durchgeführt, muß die Linie durch zwei Punkte ersetzt werden.
- **Linienbildung:** Wenn der mit der Wechselwirkung assoziierte Punkt c wegfällt, können in Graphen von zweistufigen Feldern die zwei Punkte a, b mit einer Linie verbunden werden. Bei Graphen von dreistufigen Feldern müssen ebenfalls die Wechselwirkungen (c, d) der Punkte a, b weggelassen werden. Mit der Wechselwirkungstabelle sollte man dies allerdings überprüfen.

und

- **Linienverschiebung:** Die Linienverschiebung ist eine Kombination aus den beiden vorstehenden Regeln. Wenn die Wechselwirkungen $a \times b$ und $f \times g$ in der selben Spalte c enthalten sind, kann eine Linie zwischen den Punkten a, b auch die Punkte f, g verbinden /KLE02/.

Modifikationsregel	zweistufige orthogonale Felder a, b und c sind 2-stufige Spalten. Die Wechselwirkung der Spalten a und b ist in Spalte c enthalten, ebenso die Wechselwirkung der Spalten f und g.	dreistufige orthogonale Felder a, b, c und d sind 3-stufige Spalten. Sowohl die Wechselwirkung der Spalten a und b als auch die der Spalten f und g sind in den Spalten c und d enthalten.
Linientrennung	(a) 	(b)
Bildung einer Linie	(c) 	(d)
Verschieben einer Linie	(e) 	(f)

Abb. 9.18: Modifikationsregeln für lineare Graphen /PHA89/

9.13 Signal/Rausch-Verhältnisse

Das Signal/Rausch-Verhältnis schätzt den Effekt des Rauschfaktors für die Zielgröße. In der Literatur wird dies auch unter dem Namen „Performance Statistics“, „S/N-Ratio“ oder kurz „S/N“ geführt. Für jede Zielgröße ist es erforderlich, mindestens ein S/N-Verhältnis zu formulieren.

Der Rauschabstand gibt das Verhältnis von der Signalleistung (S) zur Rauschleistung (R) an. Wenn der Rauschabstand groß ist, liegt ein gutes Signal vor, das durch Rauschen kaum gestört wird. *Taguchi* definiert den Rauschabstand S/N entweder als logarithmierten Mittelwert oder als logarithmierte Standardabweichung /HER96/.

Weiterhin kann zwischen S/N-Verhältnissen für statische und dynamische Probleme unterschieden werden. Je nachdem, wie das Ziel bzw. die Zielfunktion lauten soll, läßt sich aus *Tab. 9.2* ein Problemtyp auswählen und berechnen. D.h. beim Auswerten wird der ausgewählte Problemtyp im Analysefeld verwendet. Nähere Beschreibungen der Problemtypen sowie der Mittelwert/Zielwert-Einstellung sind in /PHA89, TAG91, TOU97, MAL94, KRO91/ enthalten.

Problemtyp	Bereich der Beobachtungen	Idealwert	Einstellung	Signal/Rausch-Verhältnis und Kommentare
Minimierungsproblem	$0 \leq y < \infty$	0	keine	$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$
Zielwertproblem	$0 \leq y < \infty$	ungleich 0, endlich	Stellgröße	$\eta = 10 \log_{10} \frac{\mu^2}{\sigma^2}$ $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$
Maximierungsproblem	$0 \leq y < \infty$	∞	keine	$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$
Signed-target	$-\infty < y < \infty$	endlich, in der Regel 0	an-gleichen	$\eta = 10 \log_{10} \sigma^2$ $\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2$
Ausschußanteil	$0 \leq p \leq 1$	0	keine	$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{p}{1-p} \right)$

Tab. 9.2: Signal/Rausch-Verhältnisse: statische Problemtypen /PHA89/

9.14 Zusammenstellung Charakteristik Taguchi-Versuchspläne

Auch für *Taguchi*-Versuchspläne wurde versucht, eine Wertung bezüglich der zuvor bei klassischen- und D-optimalen Versuchsplänen verwendeten Charakteristik vorzunehmen, die in *Tab. 9.3* zu sehen sind.

Anforderungen Versuchspläne	Anzahl der Faktoren <100	orthogonaler Versuchsplan	maximale Anzahl an Stufen	Screeningplan	Optimierungsplan	Robuste Prozesse/Produkte	lineares Modell	lineares Modell + WW	quadratisches Modell	Modelle höherer Ordnung	Linearitätsabweichungen sind erkennbar	geringer Aufwand zur Versuchsplanerstellung	geringer experimenteller Aufwand	Einfügeversuche möglich	Restriktionen möglich
	Taguchi-Versuchspläne	VA	●	VA	○	○	●	●	⊙	⊙	○	⊙	○	⊙	○

Tab. 9.3: Charakteristika (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt, VA: Versuchsabhängig)

Bezüglich der benötigten Versuche sind konkrete Aussagen sehr schwierig zu treffen, da sie eine starke Abhängigkeit von der Problemsituation aufweisen. Es stehen dem Anwender daher 18 standardisierte orthogonale Felder zur Verfügung, die je nach Problemstellung ausgewählt und angepaßt werden können.

10 Shainin-Methodik

*Dorian Shainin*¹, ein amerikanischer Unternehmensberater, entwickelte ebenfalls Methoden zur Planung, Durchführung und Parameterreduzierung von Versuchen (sogenannte Homing-in-Techniken²), die einem größeren Publikum durch das Buch „*World Class Quality*“ von *Keki R. Bhote* /BHO88/ bekannt wurden. Gedacht war das Buch anfangs nur für Mitglieder der American Management Association, ehe es einem breiten Interessentenkreis zugänglich gemacht und sogar ins Deutsche übersetzt wurde /BHO90/. *Bhote* wurde später die weitere „Vermarktung“ untersagt, die nun nur noch lizenzierten Unternehmen zur Verfügung standen /QUE01b/.

Nachstehend werden die Philosophie sowie die Werkzeuge der *Shainin*-Methodik³ kurz erläutert, zu denen Informationen in den einschlägigen Literaturstellen, wie z.B. /BHO90, BHO99, QUE92a-b, QUE94, QUE01a-b, KRO94, MIT90/, verfügbar sind. Konkrete Anwendungsbeispiele sind z.B. in /BRE96, GFQ91, DOA95, GRS95/ aufgeführt.

10.1 Historisches

Nach Abschluß eines Studiums für Raumfahrttechnik am Massachusetts Institut für Technologie (MIT) im Jahre 1936, begann *Dorian Shainin* bei der United Aircraft Corp. (heute: United Technologies Corp.) seine Karriere als Ingenieur. Später war er in diesem Unternehmen für den Bereich der Qualitätskontrolle verantwortlich.

1952 wechselte er zu der Beraterfirma *Rath and Strong Management Consultants*, die er als Vizepräsident verließ, um 1975 sein eigenes Beratungsunternehmen (*Shainin LLC Consultants*) zu eröffnen. Die Leitung dieses Unternehmens liegt heute bei *Dorian Shainin*'s Söhnen *Peter* und *Richard*.

Von 1950 bis 1983 war *Dorian Shainin* außerdem an der Universität Connecticut beschäftigt, wo er das Programm zur Weiterbildung für Angestellte der Industrie entwickelte und auch leitete. Während dieser Seminare knüpfte er Kontakte zum Newington Childrens Hospital (heute: Connecticut Childrens Medical Center), wo er zwischen 1957 und 1994 statistischer Berater des medizinischen Personals wurde. Durch diese Berater-tätigkeit ergab sich für *Shainin* ferner die Möglichkeit, seine Methoden auf sozialen und humanistischen Gebieten anzuwenden.

Eines der weltweit bekanntesten Projekte an deren Realisierung *Dorian Shainin* mitwirkte war sicherlich das Apollo Projekt der NASA Anfang der 60er Jahre. *Shainin* war bei der Grumman Aerospace als Zuverlässigkeitsberater tätig und dafür verantwortlich, die Einheiten und Baugruppen, aus denen der Prototyp des Mondmodul besteht, empirisch zu testen. Die NASA vergab den Auftrag an Grumman, da kein anderer Mitbewerber in der Lage war, die gleichen Sicherheitsstandards (selbst der kleinsten Bauteile) zu realisieren.

¹ Geboren wurde *Dorian Shainin* am 26.09.1914 in San Francisco, USA. Er wurde 85 Jahre alt und verstarb am 07.01.2000 in Manchester, Connecticut, USA /INT6/.

² Minimierung der Einflußgrößen sowie der Streuungsreduzierung /KRO94/.

³ *Shainin*® ist ein eingetragenes Warenzeichen.

Shainin schrieb mehr als 100 Artikel und ist Autor bzw. Co-Autor von mehreren Büchern. Die bekanntesten darunter sind:

- *Managing Manpower in the Industrial Enviroment*,
- *Tool Engineers Handbook*,
- *Quality Control Handbook*,
- *New Decision Making Tools for Managers*,
- *Quality Control for Plastics Engineers, Manufacturing and Estimating Handbook*
sowie
- *Statistics in Action*.

Fast 60 Jahre arbeitete *Dorian Shainin* daran, einen professionellen Ansatz zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Qualitätsprobleme bei industriell produzierten Produkten gelöst werden können. Die nach ihm benannten „*Shainin-Methoden*“ stellen praktische Werkzeuge dar, mit deren Hilfe es möglich ist, Probleme zu lösen, die bisher als unlösbar angesehen wurden. Seine Techniken werden vor allem in den USA /INT7/ erfolgreich in den Bereichen Produktentwicklung, Qualitätsverbesserung sowie Forschung und Entwicklung eingesetzt.

Während seiner langen Karriere konnte *Shainin* auch einige bedeutende Auszeichnungen entgegennehmen. Die wichtigsten waren /INT6/:

- ASQC Brumbaugh Award (1952),
 - Edwards Medal (1970),
 - Eugene L. Grant Award (1982)
- sowie
- Shewart Medal (1989).

Dorian Shainins eigene Firma, die *Shainin Consultants*, spezialisierte sich darauf, für die Unternehmen die sie beraten, Strategien zu gestalten, die es den Ingenieuren der jeweiligen Firma ermöglichen, qualitätsrelevante Probleme entdecken und beheben zu können /INT6/.

10.2 Shainins Philosophie

Im Gegensatz zur *Taguchi-Methodik* sowie den klassischen Versuchsplänen, stellt die *Shainin-Methodik* ein gestuftes Vorgehen dar /KRO91/. Bei dieser Vorgehensweise werden die relevanten Größen Schritt für Schritt eingegrenzt /BHO90, PFE96/.

Auf den ersten Blick scheinen die *Shainin-Werkzeuge* aus den Augen eines planenden Ingenieurs mit „gesundem Menschenverstand“ hervorgegangen zu sein, allerdings verknüpft mit Analysemöglichkeiten der Statistik. Durch diese Mischung aus statistischem und ingenieurmäßigem Denken lassen sich die einzelnen Werkzeuge leicht anwenden, weil sie den Praktiker ansprechen und damit ein großer Anwenderkreis erreicht wird /QUE92a/. Dies wird nochmals durch *Shainins* Wahlspruch bzw. die Philosophie

„*Laßt nicht die Ingenieure raten -
laßt die Teile sprechen*“

untermauert /BHO90/, d.h. die Ergebnisse sollen nicht auf Annahmen oder Vermutungen seitens der Techniker oder Ingenieure beruhen, sondern auf meßbaren Begebenheiten und Bestätigungen.

In diesem Zusammenhang propagiert *Shainin* die Suche nach dem „Red X⁴“ und dem „Pink X“, die erfahrungsgemäß ca. 80 % des Problems verursachen, was im Einklang mit dem Pareto-Prinzip („the trivial many - the vital few“ /PFE96/) steht /KUH90/. Dieses besagt, daß es eine oder wenige Steuergrößen (sogenannte Hauptfaktoren) gibt, die die Produkt- oder Prozeßparameter entscheidend beeinflussen. *Shainin* verwendet zur Klassifizierung hierzu folgende Begrifflichkeiten: Hauptfaktoren werden mit „Red X“ („Rotes X“), Sekundärgrößen mit „Pink X“ („Rosa X“) und Tertiärgrößen mit „Pale Pink X“ („Blaßrosa X“) bezeichnet. Die Einflüsse aller übrigen Steuergrößen sind vernachlässigbar /MIT90/.

10.3 Werkzeuge von Shainin

Shainin verfolgte die Strategie, das Lösen von vorhandenen Problemen zu optimieren. Dazu hat er im Laufe der Jahre einen Werkzeugkasten von Methoden zusammengestellt, die in der Literatur zwar als Versuchsmethodik nach *Shainin* aufgeführt werden, aber nicht alle von ihm selbst entwickelt worden sind /DOA95, INT3/. Weiterhin spielt die Tatsache eine Rolle, daß viele Informationen zum Vorgehen und den Werkzeugen nur lizenzierten Unternehmen zur Verfügung stehen, so daß nicht zu allen Werkzeugen detaillierte Beschreibungen frei zugänglich sind.

So ist ein Vorgehensmodell von *Shainin* in dem Buch von *Bhote* /BHO90/ abgedruckt, welches aus sieben Werkzeugen besteht und in *Abb. 10.1* aufgeführt ist.

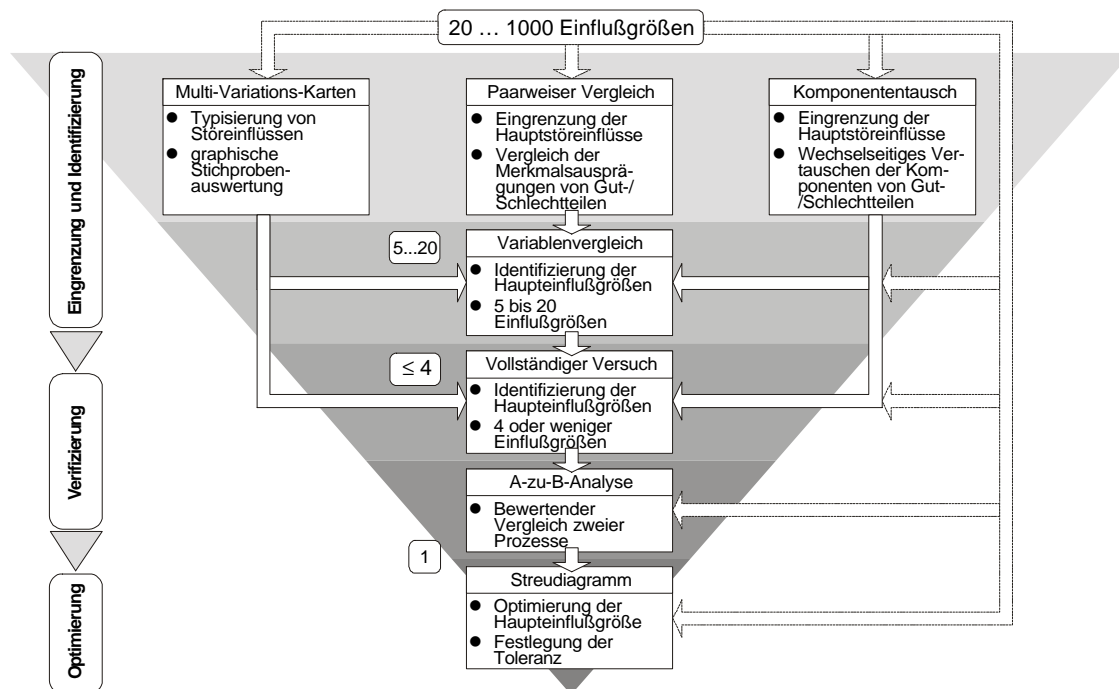


Abb. 10.1: Schematische Anwendung der Shainin-Werkzeuge /BHO90/

⁴ Red X[®] ist ein eingetragenes Warenzeichen.

Als grundsätzliche Idee hinter dieser Vorgehensweise ist

- die Ermittlung von wesentlichen Ursachen für Abweichungen und Variationen der Qualitätsmerkmale
- sowie
- die Konzentration auf entscheidende Steuergrößen bei der Bestimmung der optimalen Werte für die Produkt- bzw. Prozeßparameter

zu nennen, die sich durch die Stufen

- Identifizierung der Hauptfaktoren,
- Validierung der Ergebnisse
- und
- Optimierung der Zielgröße

widerspiegeln /MIT90/.

Eine andere Darstellung und ergänzende Auflistung der *Shainin*-Werkzeuge zeigt *Abb. 10.2*. Hier sind weitere Werkzeuge wie

- Isoplot[®],
- Prozeßabschnittstausch,
- Konzentrationsdiagramm,
- Run-Test
- sowie
- Multi-Spec-Analyse

neu aufgeführt /DOA95, BLÄ95/.

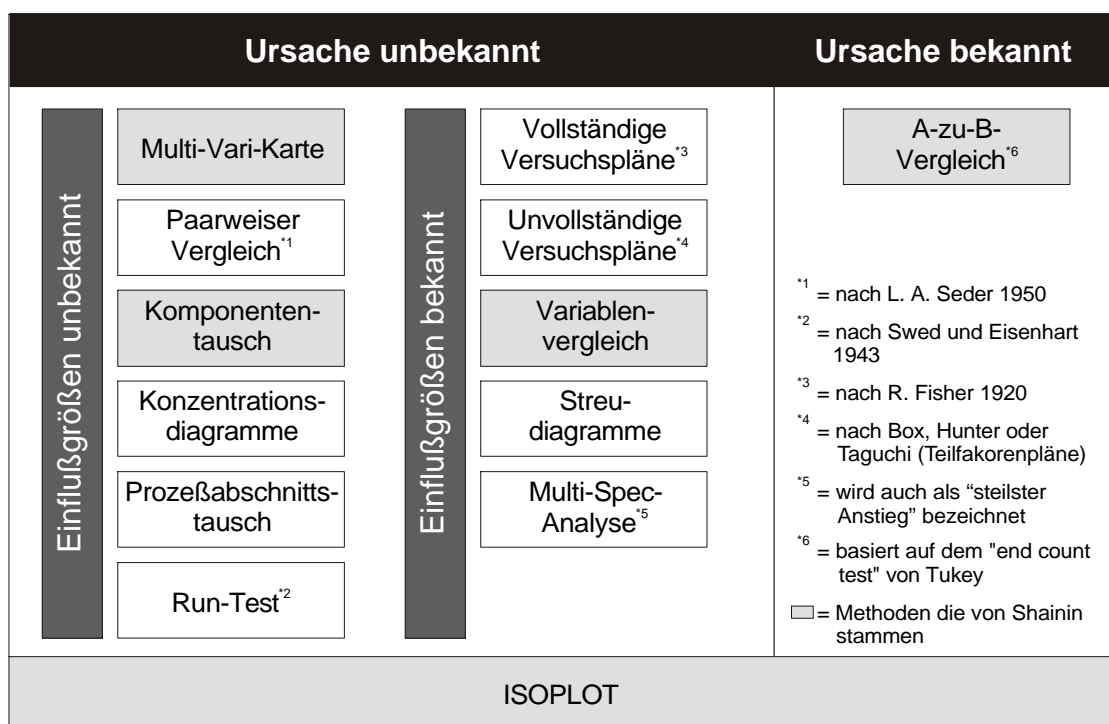


Abb. 10.2: Ergänztes Shainin-Methodenspektrum (in Anlehnung an /DOA95/)

Anhand von *Abb. 10.2* ist auch zu erkennen, welche Werkzeuge aus der Feder von *Shainin* stammen und welche dem Werkzeugkasten zugeführt wurden. Weiterhin wird deutlich, zu welcher Problemstellung die Werkzeuge Verwendung finden. Der Bereich „Ursache unbekannt“ und hier wiederum die Unterteilung „Einflußgrößen unbekannt“ nehmen einen großen Stellenwert nach *Shainin* ein. Werkzeuge dieser Gruppe werden als sogenannte „Hinweisgeneratoren“ bezeichnet und dienen der schrittweisen Elimination der Einflußgrößen. Ist die Anzahl der Einflußgrößen auf eine handhabbare Anzahl geschrumpft, treten Werkzeuge des Bereichs „Einflußgrößen bekannt“ in den Vordergrund. Sind alle Ursachen ermittelt und eine Verbesserung erreicht, wird der A-zu-B-Vergleich abschließend zur Überprüfung angewendet. Der Isoplot nimmt in diesem Methodenspektrum eine übergeordnete Rolle ein, da er zur Überprüfung von Meßmitteln Anwendung findet.

Nachfolgend werden die einzelnen Werkzeuge erläutert.

10.4 Isoplot®

Der Isoplot wurde 1972 von *Shainin* und *John Polland* zur Überprüfung der Meßmittel entwickelt. Wenn ein Meßmittel den Test nicht besteht, ist das dafür ausgegebene Geld defacto zum Fenster hinausgeworfen. Hauptsächlich geht es beim Isoplot darum, die Variationen des Qualitätsmerkmals aufgrund der Ungenauigkeit der Meßwerte von der Produktvariation zu trennen. Nicht nur die Instrumentenungenauigkeit, sondern auch die durch das Verhalten des Bedieners oder der Umgebungsbedingungen entstehenden Ungenauigkeiten spielen dabei eine gewichtige Rolle.

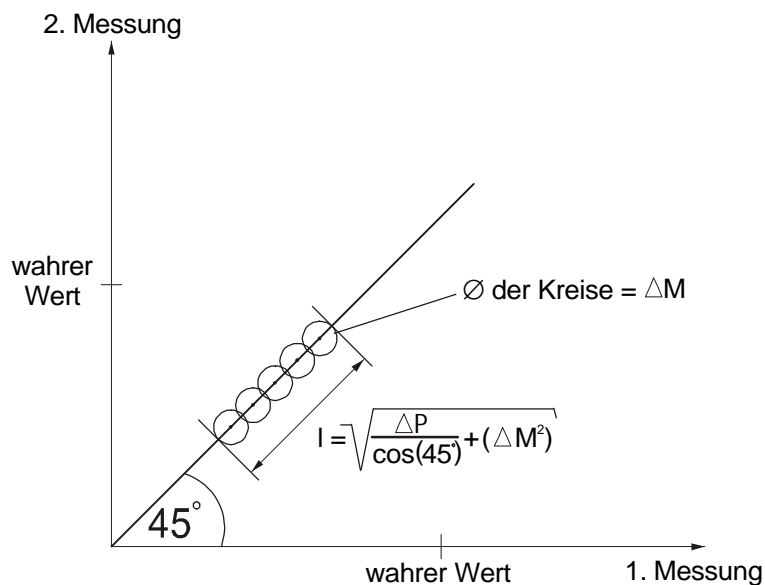


Abb. 10.3: Isoplot mit Meßungenauigkeit und Produktvariation /INT8/

Grundsätzlich werden beim Isoplot 30 Teile zweimal gemessen und gegeneinander grafisch aufgetragen. Dies ist in *Abb. 10.3* dargestellt. Als Bedingung für ein geeignetes Meßsystem wird das Verhältnis

$$\frac{\text{Produktvariation}}{\text{Meßungenauigkeit}} = \frac{\Delta P}{\Delta M} \geq 6 \quad (10.1)$$

angeführt /DOA95, INT8/.

10.5 Multi-Variations-Karte

Die Darstellung der Multi-Variations-Karte (auch Multi-Vari-Karte, Streuungsanalysekarte oder Multi-Vari-Chart genannt) wurde 1950 von *L. Seder*⁵ /SED50/ entwickelt und ermöglichte damit eine Typisierung der im Prozeß vorhandenen Streuungseinflüsse /PFE96/. Für *Shainin* ist das Multi-Vari-Verfahren nach dem Isoplot das am häufigsten angewandte Verfahren /DOA95/. Hierzu werden dem Prozeß in festen Zeitabständen wenige Einheiten nacheinander entnommen, vermessen (eventuell auch an verschiedenen Stellen, wie dies in *Abb. 10.4* zu sehen ist) und graphisch dargestellt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis mindestens 80 % der nichtbeherrschten Streuung des untersuchten Prozesses erfaßt sind /BHO90/.

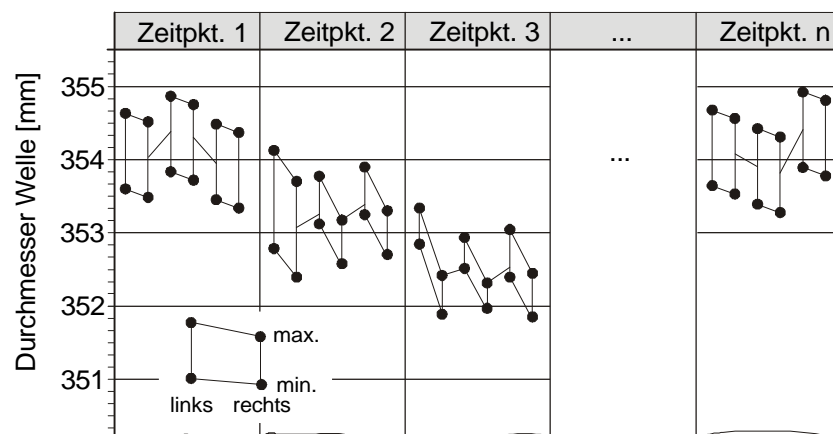


Abb. 10.4: Darstellung einer Multi-Vari-Karte /KRO94, RED97/

Bei diesem Vorgehen ist eine gewisse Ähnlichkeit mit Qualitätsregelkarten unverkennbar. Allerdings testet die Regelkarte einen aus der Streuung innerhalb der Teile einer Stichprobe berechneten Zufallsstrebereich gegen die Streuung zwischen den Stichproben /PFE96/. Die Multi-Variations-Karte hingegen zerlegt die Streuung⁶ in drei Anteile, um somit die teilweise große Anzahl möglicher Ursachen von Streuungen auf eine wesentlich kleinere Anzahl von Variablen zu reduzieren /BHO90/. Dies geschieht durch eine Analyse, ob das Hauptstreuungsmuster /QUE92b, BHO90, ZEL97, KRO94/

- lagebedingt ist, d.h. die Variation innerhalb einer Einheit, eines Teils, eines Prozesses oder von Maschine zu Maschine auftritt,
- zyklisch bedingt ist, d.h. die Variation zwischen aufeinanderfolgenden Einheiten, Teilen, Gruppen von Einheiten, Charge zu Charge oder von Los zu Los auftritt
oder
- zeitlich bedingt ist, d.h. die Variation von Stunde zu Stunde, Schicht zu Schicht, Tag zu Tag, Woche zu Woche, usw. auftritt.

⁵ Chef Qualitätsingenieur bei Gillette Safety Razor

⁶ grafische Varianzanalyse

Ein Vergleich der Streuungsanteile untereinander soll den stärksten Anteil ermitteln, um schließlich die Hauptursachen einzugrenzen, die anschließend mit anderen Verfahren weiter verringert werden können, bis zur letztendlichen Identifizierung des „Roten X“.

In Abb. 10.5 sind die aufgeführten Unterschiede zwischen den Streuungsvarianten nochmals grafisch herausgestellt.

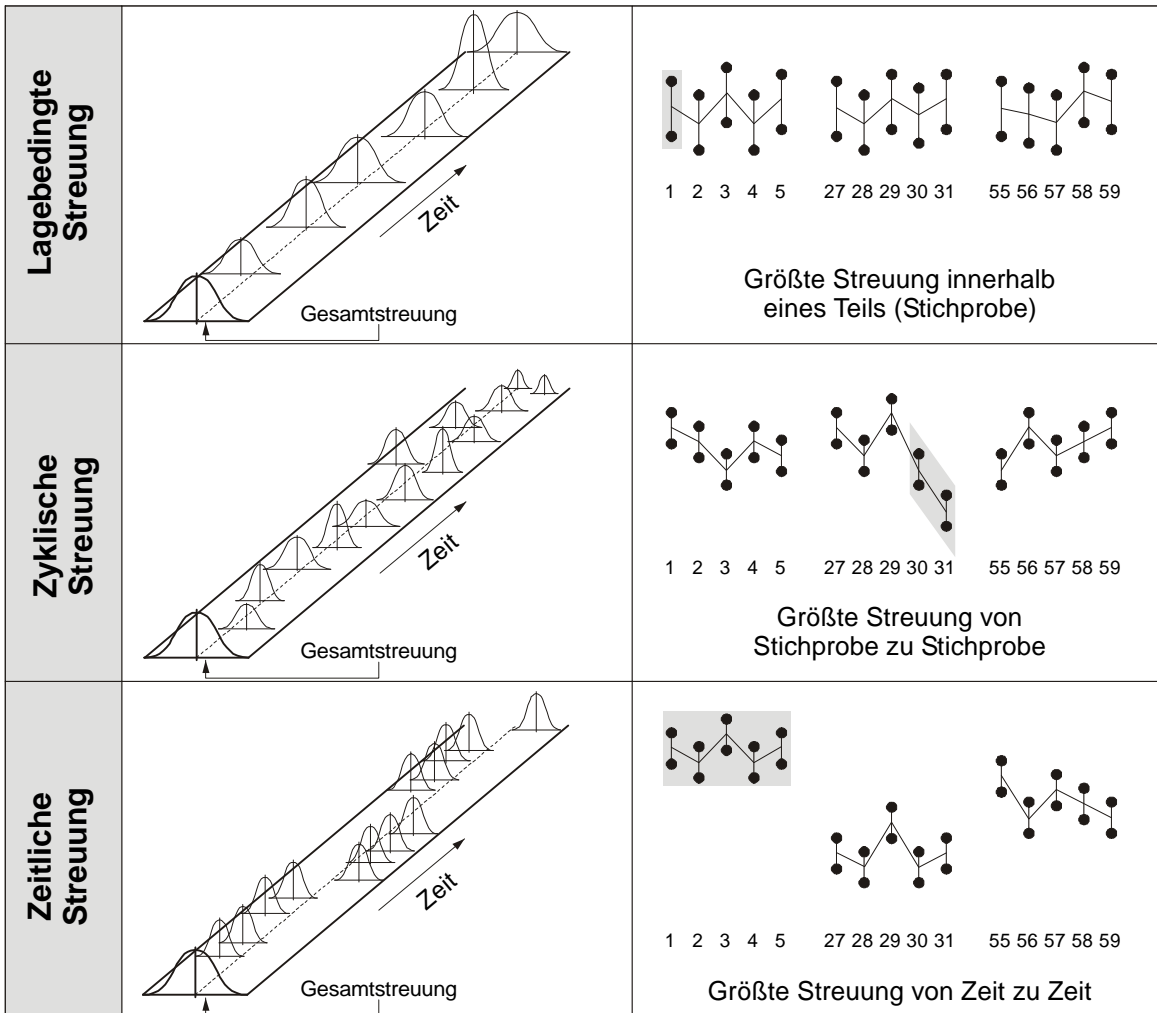


Abb. 10.5: Unterschiedliche Formen der Streuung bei Multi-Vari-Karten /QUE92b/

Mit dem Multi-Vari-Verfahren hat Shainin eine Methode entwickelt, die ein intelligentes Beobachten eines Prozesses ermöglicht, bei der jede Einflußgröße so variiert, wie sie im normalen Prozeß vorkommt, d.h. der Prozeß muß so ablaufen, als wäre niemand da, der eingreift /DOA95/.

SPC oder andere regelnde statistische Methoden sollen nicht ersetzt werden. Vielmehr wird eine Multimomentaufnahme aufgenommen, die Hinweise geben soll. Daher dürfen auch Probenentnahmen und Wartezeiten nicht nach Zufallsgesetzen gesteuert werden /BRN92/.

10.6 Komponententausch

Mit dem Komponententausch (auch Komponetensuche oder Components Search genannt) wird das rasche Ermitteln der Hauptfaktoren in einer Baugruppe wie beispielsweise einem Motor, der ja aus dem Kurbelgehäuse, dem Zylinderkopf, der Kurbelwelle, den Pleueln, der Nockenwelle, usw. besteht /DOA95/ ermöglicht. Die Methode ist seit 1971 in der Praxis erprobt /PFE96/ und basiert dabei auf dem Vergleich zwischen einer „guten“ und einer „schlechten“ Einheit /QUE92b/. Die Idee, die hinter dem Komponententausch steht, ist, daß unter den gefertigten Einheiten einige nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen, die Ursache für diese Mängel jedoch nicht im Zusammenwirken aller Komponenten liegt, sondern gewöhnlich nur an einer Komponente /DOA95/.

„Schlecht“ bedeutet in diesem Zusammenhang, daß der Meßwert für eine bestimmte Zielgröße außerhalb der Toleranz liegt. Ziel ist es, die Komponente zu ermitteln, die den Ausfall des „schlechten“ Produktes verursacht hat /KLP98/. Voraussetzung hierfür ist ein

- meßbares und reproduzierbares Ergebnis,
 - zerlegbare und wieder zusammenbaubare Einheiten
- und
- mindestens zwei Baugruppen oder Einheiten (eine gute und eine schlechte) /ZEL97, BHO90/.

Die eigentliche Untersuchung besteht darin, eine Reihe von Versuchen durchzuführen, bei denen einzelne Komponenten wechselseitig ausgetauscht werden, um den Einfluß auf das Qualitätsmerkmal zu ermitteln /PFE96/. Ergibt sich beim Austauschen einer oder mehrerer Komponenten eine starke Verschlechterung bei der „guten“ Einheit (g) und eine Verbesserung der „schlechten“ Einheit (s) oder sogar eine vollständige Umkehrung, dann handelt es sich um eine oder mehrere entscheidende Einflußgrößen. Shainin würde diese als „Rotes X“ oder „Rosa X“ bezeichnen /BHO90/.

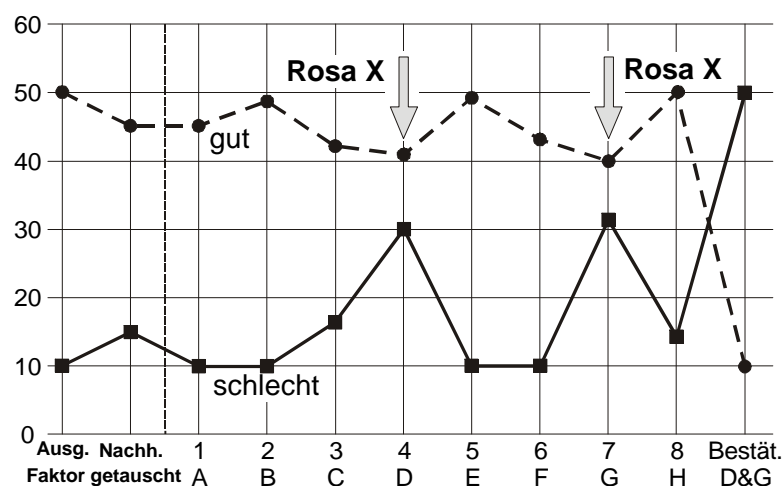
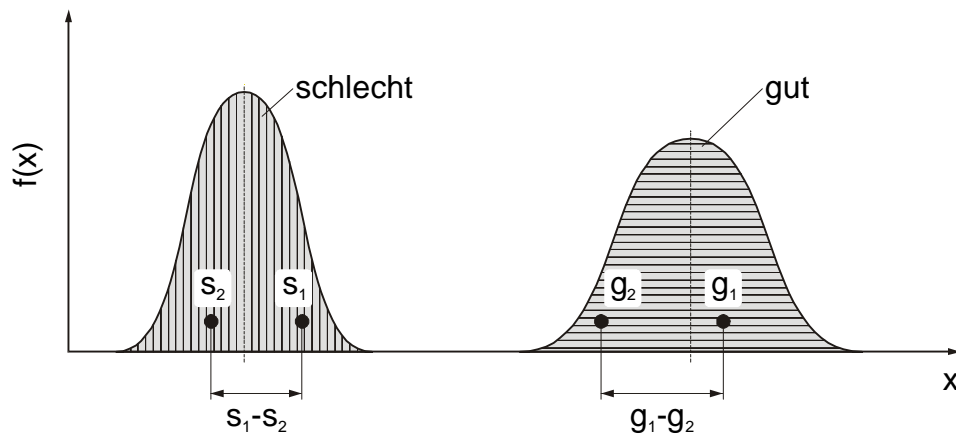


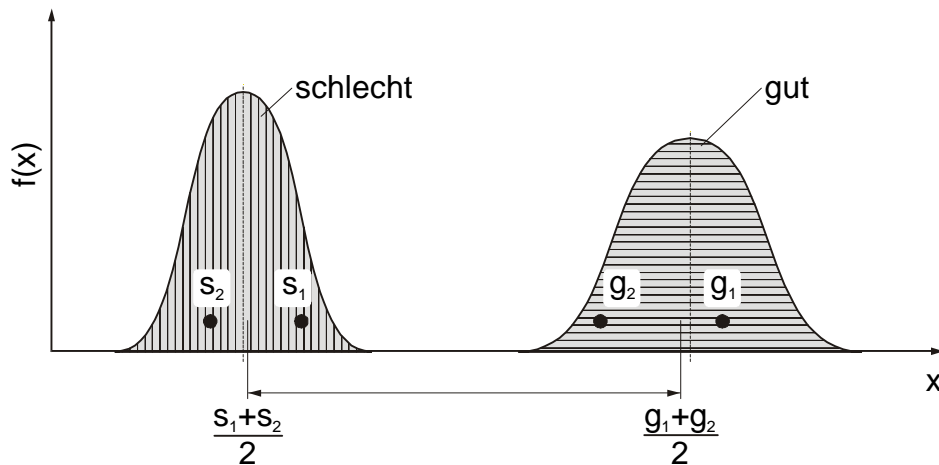
Abb. 10.6: Komponententausch /QUE92b/

Die Analyse, welche Komponente(n) an dem Problem beteiligt ist (sind), kann grafisch unterstützt werden. Dazu werden alle Ergebnisse (Vorversuche und Hauptversuche) über der Nummer des Vorversuchs sowie der jeweils getauschten Komponente aufgetragen (siehe Abb. 10.6) /DOA95/. Mit diesem Verfahren ist es somit leicht möglich, wichtige Einflußgrößen zu erkennen /BHO90/.

Vernünftige Ergebnisse sind nur dann zu erwarten, wenn ein signifikanter Unterschied zwischen „guten“ und „schlechten“ Einheiten besteht, wie in *Abb. 10.7* angedeutet ist.



„Durchschnittliche Differenz“
der Wiederholungen: $d = \frac{g_1 - g_2}{2} + \frac{s_1 - s_2}{2}$



Differenz zwischen gutem
und schlechtem Durchschnitt: $D = \frac{g_1 + g_2}{2} - \frac{s_1 + s_2}{2}$

Abb. 10.7: Signifikante und wiederholbare Differenz zwischen guten und schlechten Einheiten /QUE92a/

Dazu müssen an beiden Einheiten Messungen durchgeführt werden (Ergebnisse: g_1 bzw. s_1). Danach werden die Einheiten zerlegt, wieder zusammgebaut und erneut vermessen (Ergebnisse: g_2 bzw. s_2), um den Montageeinfluß zu berücksichtigen. Für die Signifikanz wird dann das Verhältnis zwischen

- der Differenz der Mittelwerte (D),
- der Messungen beider Einheiten
und
- der Differenz der Wiederholungen (d)

untersucht /RED97/.

$$D = \left| \frac{g_1 + g_2}{2} - \frac{s_1 + s_2}{2} \right|; \quad d = \left| \frac{g_1 - g_2}{2} \right| + \left| \frac{s_1 - s_2}{2} \right| \quad (10.2)$$

Dieses Verhältnis $D:d^7$ sollte größergleich 5:1 sein, sonst ist hier der Komponententausch der ungeeignete Ansatz.

Weiterhin ist es möglich, auch eine qualitative Auswertung der Haupt- und Wechselwirkungen durchzuführen. Dabei werden die Ergebnisse in eine Matrix eingetragen, um aus den Mittelwerten die Haupteinflußgrößen und die Wechselwirkungen⁸ zu berechnen /QUE92b/. Dabei werden die vorhandenen Wechselwirkungen von zwei Einflußgrößen in einer orthogonalen Tafel mit je zwei Feldern, wie dies in *Abb. 10.8* zu sehen ist, aufgeschlüsselt.

Faktoren	D (s)	D (g)
G (s)	Alle Ergebnisse, bei denen die beiden Faktoren (G, D) minderwertig sind.	Die Ergebnisse, bei denen D gut und G schlecht ist.
	$y_1 = \text{Mittelwert}$	$y_3 = \text{Mittelwert}$
G (g)	Die Ergebnisse, bei denen G gut und D schlecht ist.	Alle Ergebnisse, bei denen die beiden Faktoren (G, D) hochwertig sind.
	$y_2 = \text{Mittelwert}$	$y_4 = \text{Mittelwert}$

Abb. 10.8: Orthogonale Tafel zur Haupt- und Wechselwirkungsanalyse /BHO88/

Abgeleitet aus den Werten der Wirkmatrix lassen sich die Haupt- und Wechselwirkungen wie folgt bestimmen.

- Hauptwirkung:

$$D = \frac{y_3 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_2}{2}, \quad (10.3)$$

$$G = \frac{y_2 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_3}{2}. \quad (10.4)$$

- Wechselwirkung:

$$DG = \frac{y_1 + y_4}{2} - \frac{y_2 + y_3}{2}. \quad (10.5)$$

Anhand des grafischen Verlaufs der Wirkungslinien kann die Bewertung der Wechselwirkung erfolgen. Verlaufen beide Wirkungslinien annähernd parallel, ist keine nennenswerte Wechselwirkung vorhanden. Je unparalleler die Linien verlaufen, desto stärker ist die Wechselwirkung. Im Extremfall überschneiden sich sogar die Linien.

⁷ Mathematische Begründung für die Wahl des Verhältnisses ist in /WEK96/ enthalten.

⁸ Einflüsse, die nicht durch einen Faktor allein, sondern durch Zusammenwirken von zwei oder mehreren Faktoren bestimmt werden.

10.7 Prozeßabschnittstausch

Der Prozeßabschnittstausch verfolgt daß Ziel, den Prozeßschritt zu erkennen, der ein Qualitätsmerkmal am stärksten beeinflusst bzw. für die „schlechte“ Qualität verantwortlich ist, d.h. Teile von der einen Linie mögen konsistent besser sein, als Teile der parallelen Linie. Dazu wird ein Teil nach einem Prozeßschritt mit einem anderen Teil einer parallelen Fertigung/Linie getauscht, wie in *Abb. 10.9* angedeutet.

Auch hier, wie bereits zuvor beim Komponententausch, ist davon auszugehen, daß wieder das Pareto-Prinzip gilt und einer der Prozeßschritte in den Linien für die Unterschiede verantwortlich ist. Allerdings ist es nicht offensichtlich, um welchen Prozeßschritt es sich dabei handelt. Das Ziel besteht nunmehr, diesen Prozeßschritt durch die Methode des Prozeßabschnittstausches zu identifizieren.

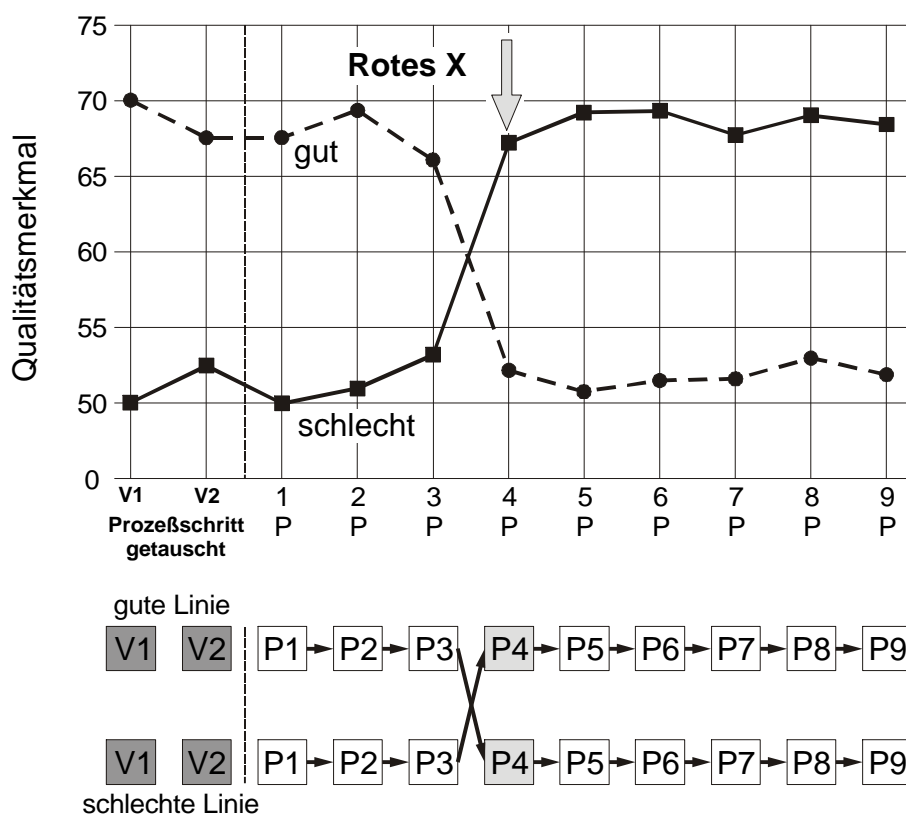


Abb. 10.9: Prozeßabschnittstausch

Der Ablauf sowie die Grundregeln sind dem Komponententausch sehr ähnlich (siehe *Kapitel 10.6*). Der einzige Unterschied zum Komponententausch besteht darin, daß es dort einen „guten“ und einen „schlechten“ Bereich gibt, aus dem die Meßergebnisse heraus-treten, wenn die jeweilige Komponente für das Qualitätsproblem von Bedeutung ist. Wird dann die nächste Komponente getauscht, springen die Ergebnisse in den Ursprungsbereich zurück, falls diese Komponente keinen Einfluß ausübt. Beim Prozeßabschnittstausch ist ein Prozeßschritt dann als bedeutend einzuordnen, wenn sich das aktuell gemessene Ergebnis signifikant vom vorherigen Ergebnis unterscheidet.

Störungen die eventuell ein Produktionsleiter durch diesen Austausch empfindet, sind nur geringfügig /DOA95/. Ansonsten gelten die gleichen Bedingungen und Voraussetzungen wie beim Komponententausch.

10.8 Run-Test

Der Run-Test (auch Test auf Zufälligkeit genannt) ist ein einfaches objektives Verfahren, um zu erkennen, ob eine Größe schwankt. Entwickelt wurde der Run-Test von *Swed* und *Eisenhart* im Jahre 1943.

Zuerst wird die Anzahl der Runs in jeder Meßwertreihenfolge bestimmt. Unter „Run“ ist eine Folge von gleichgerichteten Abweichungen der Meßwerte vom Median gemeint /PET91a/.

Zur Ermittlung der Run-Zahl werden die Meßwerte miteinander verbunden, um anschließend die Mediandurchgänge der sich ergebenden Kurve zu zählen. Ein Run wird zu dieser Zahl noch hinzuaddiert, um die Gesamt-Run-Zahl zu erhalten. *Tab. 10.1* gibt Auskunft, welche Zahl von Runs „durchschnittlich“ zu erwarten ist, wenn die Anordnung der Meßwerte einem reinen Zufallsprozeß gehorcht. Der Kandidat für das „Rote X“ kann anhand der größten Abweichung vom Tabellenwert ermittelt werden.

Anzahl Teile	Durchschnittlich zu erwartende Anzahl der Runs bei zufälliger Anordnung der Meßwerte
10	5 bis 6
12	6 bis 7
14	7 bis 8
16	8 bis 9
18	9 bis 10
20	10 bis 11

Tab. 10.1: Durchschnittlich zu erwartende Analyse als Funktion der Anzahl der zurandomisierenden Teile /DOA95/

Ist die Anzahl der Runs größer als der zu erwartende Durchschnitt, ist mit einer zyklisch wirkenden Störgröße zu rechnen. Wenn hingegen die Anzahl der Runs kleiner als der zu erwartende Durchschnitt ist, gehorcht die Störgröße einem Trend. Ein plötzliches Umkippen ist auch möglich /DOA95/.

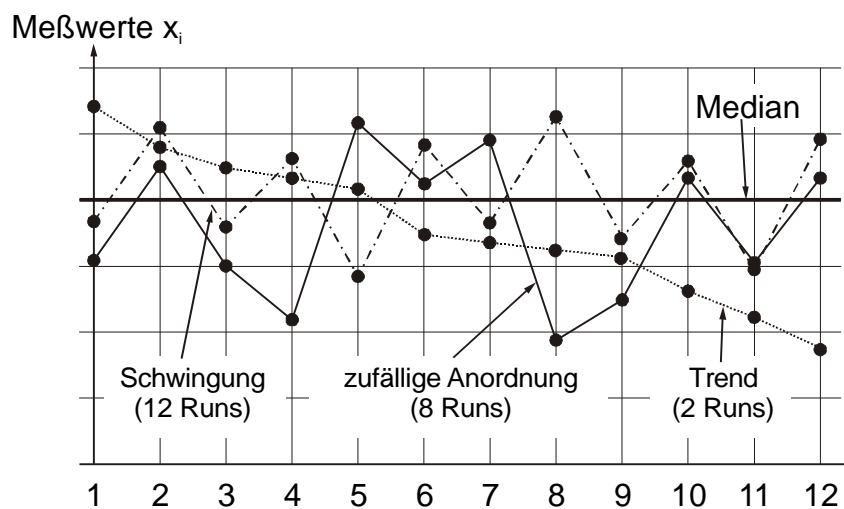


Abb. 10.10: Run-Test

10.9 Paarweiser Vergleich

Die Methode des paarweisen Vergleichs (auch Gut-Schlecht-Vergleich oder Paired Comparison genannt) stammt aus dem Jahr 1971 und weist ebenfalls Ähnlichkeiten mit dem Komponententausch auf. Er dient auch der Eingrenzung einer großen Anzahl möglicher Streuungsursachen auf die Familie des „Roten X“, indem detaillierte Hinweise aus Vergleichen zwischen paarweise „guten“ und „schlechten“ Einheiten⁹ im Hinblick auf visuelle, elektrische, mechanische, chemische, usw. Unterschiede /DOA95/ gewonnen werden, wie dies in *Abb. 10.11* angedeutet ist. Dieses Verfahren läßt sich anwenden, wenn

- Komponenten oder Untergruppen einer Einheit nicht zerlegbar oder wiederzusammenbaubar sind (im Gegensatz zum Komponententausch),
 - mindestens fünf verschiedene gute und schlechte Einheiten vorhanden sind, die in Paaren zusammengefaßt werden können,
- und
- „gut“ und „schlecht“ quantifizierbar ist, d.h. ein geeignetes Merkmal zur Unterscheidung gefunden werden kann /BHO90, ZEL97/.

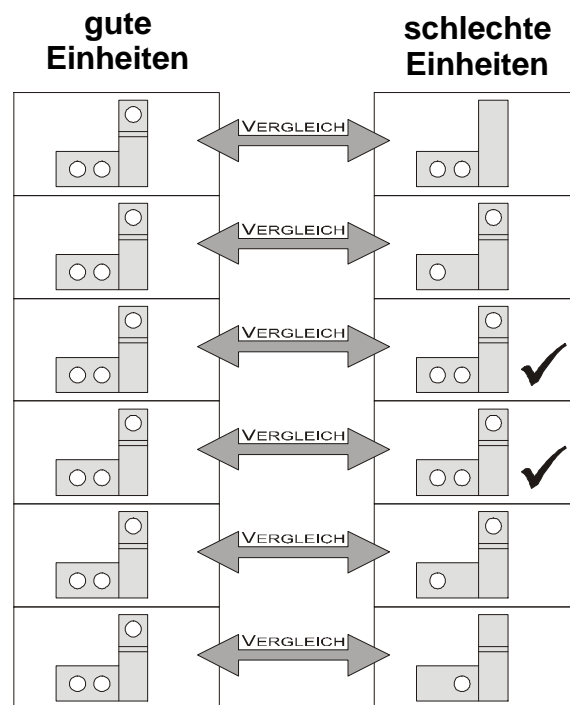


Abb. 10.11: Paarweiser Vergleich /TÖN97/

Mit dem paarweisen Vergleich lassen sich Montagearbeitsgänge, Prozesse oder Prüfausrüstungen, bei denen gleichartige Einheiten, Arbeitsfolgen bzw. Geräte vorhanden sind, untersuchen /BHO90/. Bei der Fehlerursachenanalyse ist der paarweise Vergleich daher ein wirksames Hilfsmittel in Form einer Pareto-Analyse von Fehldaten /PFE96/. Anschließend wird untersucht, welches Merkmal die beiden Kategorien „gut/schlecht“ am hartnäckigsten unterscheidet.

⁹ Üblicherweise werden fünf oder sechs Paare von je einer „guten“ und einer „schlechten“ Einheit untersucht /MIT90/.

10.10 Konzentrationsdiagramme

Bei Konzentrationsdiagrammen (auch Masernkarten oder Krankheitsbilder /DOA95/ genannt) wird eine örtliche Verteilung von Fehlern (Häufigkeitsauswertung) angestrebt, bei welchen Fehlerorten bestimmte Fehlerarten am häufigsten auftreten. Jeder gefundene Fehler wird in einer Zeichnung/Skizze des Teils als Punkt verzeichnet, um die Fehlerhäufigkeit in Form einer Punktwolke zu visualisieren.

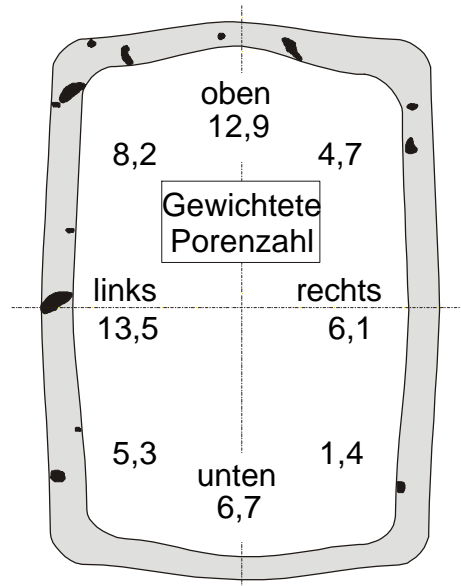


Abb. 10.12: Beispiel Konzentrationsdiagramm fehlerhafter Dichtringe einer Gießerei /TRA95/

Mit einem Konzentrationsdiagramm wird der Einstieg in die Problemlösung ermöglicht, weil diese Methode Hinweise liefert, worauf bei Folgebetrachtungen der Schwerpunkt der Aufmerksamkeit zu lenken ist /DOA95/. Dabei wirkt das Konzentrationsdiagramm fokussierend, d.h. es werden nicht unmittelbar die Fehlerursachen aufgezeigt, jedoch werden Bereiche identifiziert, die eine besondere Aufmerksamkeit erfordern.

Dies stellt eine Verfeinerung der Betrachtung der Streuung innerhalb eines Teiles dar, wie es auch bei Multi-Variations-Karten mit dem Ziel geschieht, eine bestimmte Verteilung bzw. Änderung der Verteilung mit einer Ursache in Verbindung zu bringen. Hierdurch ist eine Eingrenzung der Ursachen sowie die Auswahl von Faktoren für weitere detaillierte Versuche möglich /KLP98/.

10.11 Variablenvergleich

Um eine systematische Reduzierung der Streuung zu erreichen, beginnt man nach *Shainin* mit einer Multi-Vari-Karte, einem Komponententausch oder einem paarweisen Vergleich. Ziel ist es, eine sehr große Anzahl von zusammenhanglosen Ursachen auf eine kleine Familie zusammenhängender Ursachen zurückzuführen. Generell sind dies zwischen fünf und fünfzehn.

Anschließend folgt dann der Variablenvergleich (auch Variablensuche oder Variables Search genannt), der aus dem Jahr 1973 stammt. Zweck des Variablenvergleichs ist:

- Ermittlung, welche Wertestufen der einzelnen Komponenten zu einer „guten“ bzw. „schlechten“ Einheit führen.
- Bestimmung des „Roten X“, des „Rosa X“ oder anderer sich gegenseitig beeinflussender Variablen. Möglich ist ebenfalls, daß das „Rote X“ oder „Rosa X“ eine starke Wechselwirkung zwischen zwei Variablen ist.

und

- Trennung der wichtigen von den unwichtigen Einflußgrößen, um die wichtige zu regeln und die Toleranzen der unwichtigen zu erweitern, um Kosten zu senken /BHO90/.

Der Variablenvergleich läßt sich grundsätzlich in zwei Phasen gliedern. Zuerst wird allerdings durch ein Team von Spezialisten eine Liste der wichtigsten Einflußgrößen sortiert nach ihrer Wichtigkeit erstellt und eine „gute“ und eine „schlechte“ Wertestufe festgelegt. Das Sortieren soll ermöglichen, die Versuchsanzahl zu begrenzen, da die wichtigsten Einflußgrößen als erste durch Versuche analysiert werden sollen. Eine Reduzierung ist nur dann möglich, wenn die Sortierung mit größter Sorgfalt durchgeführt wird /QUE92b/.

In der ersten Phase werden anschließend bei der einen Einheit alle Faktoren auf der „guten“ und bei der anderen Einheit alle Faktoren auf der „schlechten“ Stufe gepaart /QUE92b/, wobei auf wirtschaftlich mögliche und realistische Wertestufen geachtet werden muß /PFE96/. Ein „signifikanter“ Unterschied läßt sich durch wiederholtes Messen des Qualitätsmerkmals beider Einheiten und deren Vergleich miteinander erkennen. Abgeschlossen ist die erste Phase erst dann, wenn der Unterschied zwischen einer „guten“ und einer „schlechten“ Einheit erwiesen und das Ergebnis wiederholbar ist. Überprüft werden kann dies durch die Anwendung der bereits aus dem Komponententausch bekannten Regel $D:d = 5:1$. Ist dies der Fall, muß die „Null-Hypothese“ verworfen werden /BHO90, QUE92b/.

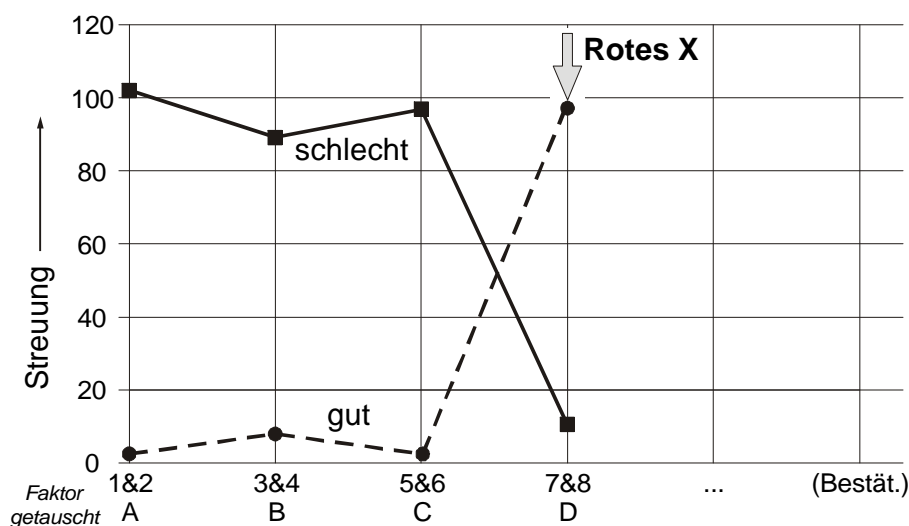


Abb. 10.13: Variablensuche /QUE92b/

Die zweite Phase des Variablenvergleichs kann erst nach Bestätigung dieser Voraussetzung angegangen werden und entspricht im weitesten dem zuvor beschriebenen Komponententausch, d.h. der eigentliche Variablentausch beginnt.

Die Variablen werden einzeln von „gut“ und „schlecht“ vertauscht (ähnlich „One-Factor-at-a-Time“) /KLP98/. Stellt sich bei einer Einflußgröße eine komplette Umkehr der Ergebnisse ein, wenn jeweils ein Versuch mit einer Einflußgröße auf der „guten“, alle anderen auf der „schlechten“ Stufe und ein gegensätzlicher Versuch durchgeführt wird, so ist die wichtigste Einflußgröße („Rote X“) ermittelt. Damit wird die Untersuchung für diese Variablen abgeschlossen. Dies ist auch der große Vorteil des Variablenvergleichs. Sobald die wichtigste Einflußgröße durch eine Ergebnisumkehr gefunden ist, kann die Versuchsreihe beendet werden /BHO88/, wie dies in *Abb. 10.13* nach der Einflußgröße D zu erkennen ist, da hier eine komplette Umkehrung der Ergebnisse vorliegt.

Wird nur eine teilweise Verbesserung bzw. Verschlechterung erzielt, handelt es sich um „eine“ der wichtigen Größen. Unwichtige werden an einem unveränderten Ergebnis erkannt /QUE92b/. Aufgrund des guten Verhältnisses zwischen Aufwand und Wirtschaftlichkeit wird der Variablenvergleich auch als „Rolls Royce“ der Versuchsplanung bezeichnet /BHO88/.

10.12 Vollständiger Versuch

Die Ziele der Variablensuche, die zuvor behandelt wurden, sind den Zielen des vollständigen Versuchs sehr ähnlich. Vollständige Versuche bilden den Kern der *Shainin*-Versuchsmethoden /QUE92b/. Die Zielsetzung des vollständigen Versuchs besteht darin:

- Bestimmung der wichtigen Variablen („Rotes X“, „Rosa X“) nach der Eingrenzung durch Multi-Vari-Karte, Komponententausch oder paarweisen Vergleich.
- Quantitative detaillierte Bestimmung der Haupt- und Wechselwirkungen der wichtigsten Variablen.

sowie

- Schrittweise Erweiterung der Toleranzen von unwichtigen Variablen.

Als Hauptunterschied zum Variablenvergleich kann die Variablenanzahl angeführt werden. Während bei der Variablensuche fünf oder mehr Variablen betrachtet werden, sind es beim vollständigen Versuch vier oder weniger (dies hängt mit der Anzahl der Versuche zusammen, die exponentiell zur Faktorenanzahl steigt) /BHO90/. Der vollständige Versuch ist bereits unter dem Namen vollfaktorieller Versuch näher beschrieben. Daher wird an dieser Stelle auf *Kapitel 5.2.1.1* verwiesen.

10.13 Validieren der Ergebnisse mit der A-zu-B-Analyse

Die Methode der A-zu-B-Analyse (auch Prozeßvergleich oder B(better) versus C(current) genannt) basiert auf dem „end count test“ von *John Tukey* aus dem Jahr 1968 und dient im allgemeinen zur abschließenden Bestätigung der vorangegangenen Verfahren, mit denen das „Rote X“ identifiziert wurde. Dabei bedeuten die Symbole „A“ und „B“, daß zwei Prozesse verglichen werden sollen. „A“ steht gewöhnlich für den aktuellen (A) und „B“ für den vermutlich besseren (B) Prozeß. Anwendbar ist diese Methode als vielseitiges Hilfsmittel, das über den Bereich von Entwicklung und Fertigung hinaus auf fast allen Gebieten einen Nutzen bringt.

Prozeßfähigkeitsuntersuchungen würden normalerweise einen Umfang von 50 bis 100 Meßwerten aus jedem Prozeß benötigen, um eine der vier in *Abb. 10.14* dargestellten Verteilungen zu ermitteln. Da dieses Vorgehen mindestens 50 Werte benötigt, kann der Vorteil der A-zu-B-Analyse leicht ausgemacht werden, da er nur wenige Einheiten, meistens drei A-Einheiten und drei B-Einheiten, benötigt, um festzustellen, ob die Grundgesamtheit ähnliche Verteilungen aufweist.

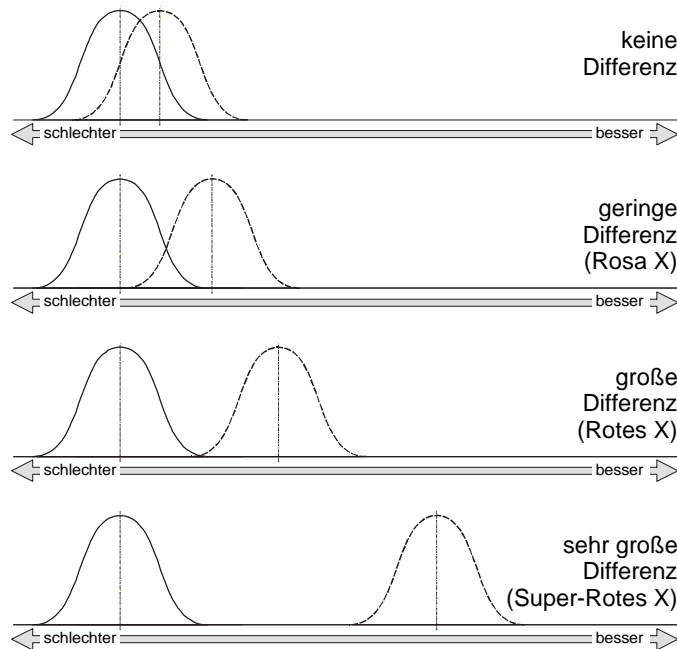


Abb. 10.14: Verteilungsformen von Prozessen /QUE92a/

Abb. 10.14 zeigt, wie bereits angesprochen, vergleichend unterschiedliche Verteilungsformen von Prozeßergebnissen. Ist zwischen den beiden Prozessen nur ein geringer Unterschied in ihren Mittelwerten erkennbar, so handelt es sich bei der dafür verantwortlichen Einflußgröße vermutlich um das „Rosa X“. Sind hingegen deutlichere Unterschiede vorhanden, wird vom „Roten X“ bzw. sogar vom „Super Roten X“ gesprochen.

Die Theorie, die hinter der A-zu-B-Analyse steht, basiert auf den Formeln der Kombinatorik¹⁰. Wenn z.B. drei A-Einheiten und drei B-Einheiten vorliegen, so gibt es folgende Möglichkeiten, sie in einer Rangfolge (hier senkrecht) anzuordnen, wie *Abb. 10.15* zeigt.

Sehr gut	↑	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		B	B	B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
		B	B	B	B	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A
		B	A	A	A	B	B	B	A	A	A	B	B	B	A	A	A	B	B	B	A
		A	B	A	A	B	A	A	B	B	A	B	A	A	B	B	A	B	B	A	B
		A	A	B	A	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	B	A	B	B
		A	A	A	B	A	A	B	A	B	B	A	A	B	A	B	B	A	B	B	B
Sehr schlecht	↓																				

Abb. 10.15: Kombinationsmöglichkeiten von A und B, die je dreimal vorliegen /BHO00/

¹⁰ Zweig der Mathematik, in dem untersucht wird, auf welche und auf wie viele Arten endliche Mengen angeordnet und zu Teilmengen zusammengestellt werden können.

Von diesen 20 Möglichkeiten sind nur bei einer die drei B-Einheiten oben und die drei A-Einheiten unten, d.h., es besteht ein Risiko von 1:20 oder von 5 %, daß die drei B-Einheiten zufällig oben und die drei A-Einheiten zufällig unten angeordnet sind. Daher besteht eine statistische Sicherheit von 95 %, daß die A-Probe schlechter ist als die B-Probe, auch bekannt als Risiko einen Fehler erster Art zu machen.

Die A-zu-B-Analyse stellt somit eine Art „Ranking“ von Versuchsergebnissen aus einem aktuellen (A) und einem vermeintlich besseren (B) Prozeß dar. Nach der Versuchsdurchführung werden die Ergebnisse geordnet. War die Verbesserungsmaßnahme erfolgreich, sind die B-Werte vor den A-Werten angeordnet. Wenn die Maßnahme hingegen nicht erfolgreich war, stehen die A-Werte vor den B-Werten. Bei einem teilweisen Erfolg, stehen gewöhnlich ein paar B-Werte oben, gefolgt von einem gemischten Bereich aus B- und A-Werten und abschließend folgen die restlichen A-Werte.

Detaillierte Unterscheidungen bzw. Interpretationen der Reihenfolge werden mit der sogenannten Entscheidungsregel verfolgt, die /BHO90, BHO99/ zu entnehmen ist.

Um die Anzahl der Kombinationen zu bestimmen, wird folgende Formel angewendet:

$$\text{Anzahl Kombinationen} = \frac{(n_A + n_B)!}{n_A! \cdot n_B!} \quad (10.6)$$

Darin sind:

n_A = Anzahl der A-Einheiten und n_B = Anzahl der B-Einheiten.

Demnach errechnet sich der Fehler erster Art mit

$$\frac{1}{\text{Gesamtzahl aller Kombinationen}} = \frac{1}{\frac{(n_A + n_B)!}{n_A! \cdot n_B!}} = \frac{n_A! \cdot n_B!}{(n_A + n_B)!} \quad (10.7)$$

Die möglichen Beziehungen zwischen zwei Entscheidungen, die man beim experimentieren treffen kann, sind in der nachstehenden Matrix aufgeführt.

Entscheidung auf Grund der Versuchsanalyse	aktuelle (unbekannte) Situation	
	B ist besser als A Verbesserung: ja	B ist so gut wie A Verbesserung: nein
B ist besser als A Verbesserung: ja	i. O. ✓	Fehler 1. Art α -Risiko
B ist so gut wie A Verbesserung: nein	Fehler 2. Art β -Risiko	i. O. ✓

Abb. 10.16: Entscheidungsmatrix /BHO88/

Mit Hilfe von Tab. 10.2 ist es möglich, die richtige Stichprobengröße für die A-zu-B-Analyse mit entsprechenden Fehlerrisiken auszuwählen /BHO90/.

Aussage-sicherheit	Stichproben-größe A	Stichproben-größe B
90%	1	9
	2	3
	3	2
95%	1	19
	2	5
	3	3
99%	2	13
	3	7
	4	5
	5	4
99,9%	2	43
	3	16
	4	10
	5	8
	6	6

Tab. 10.2: A-zu-B-Stichprobengröße /BHO90, ZEL97/

10.14 Optimierung der Zielgröße mit dem Streudiagramm

Wie bereits bei den meisten anderen Verfahren die *Shainin* propagiert, sind die Vorzüge der Streudiagramme (auch Scatter Plots genannt) in ihrer Einfachheit und ihrem grafischen, nicht mathematischen Verfahren, zu nennen /BHO90/.

Nachdem durch die vorhergehenden Werkzeuge die wichtigsten Größen identifiziert worden sind, können unter Zuhilfenahme von Streudiagrammen Werte und Toleranzen dieser Variablen bestimmt werden. Mittels Streudiagrammen

- läßt sich überprüfen, ob die richtigen Haupteinflußparameter erkannt wurden,
- werden Haupteinflußparameter optimal eingestellt
sowie
- Toleranzgrenzen festgelegt, wodurch Kostensenkungen möglich sind /KRO94/.

Im Vergleich zu anderen Methoden von *Shainin* ist eine vergleichsweise hohe Anzahl von Meßwerten (mindesten 30 /QUE92a/) notwendig, da Streudiagramme zur Interpretation korrelativer Zusammenhänge zwischen einer Einflußgröße und einer Zielgröße dienen. *Abb. 10.17* zeigt zwei Streudiagramme, aus denen hervorgeht, daß der Einfluß auf die Zielgröße von x_2 und nicht von x_1 ausgeht.

Die „senkrechte Streuung“ dient hierbei als Maß für den Einfluß einer unabhängigen Variablen. Sie ist die Streubreite der abhängigen Variablen /RED97/. Je geringer die senkrechte Streuung ist, desto wichtiger ist die Wirkung der aufgetragenen unabhängigen Variablen /QUE92b/. Weiterhin lassen sich mit den Streudiagrammen die Haupteinflußparameter so einstellen, daß die Zielgröße an ihr Optimum heranreicht.

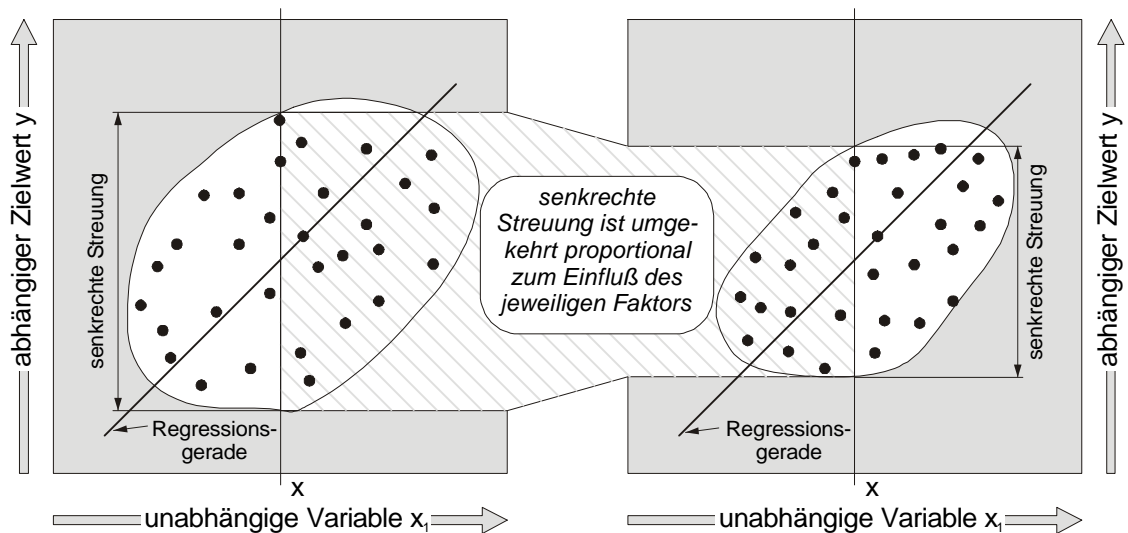


Abb. 10.17: Streudiagramme zum Auswerten korrelativer Zusammenhänge /RED97/

Des weiteren eignen sich die Streudiagramme dazu, ausgehend von den Kundenanforderungen an die Zielgröße y „realistische Toleranzen“ für den Einflußfaktor x festzulegen. Ebenso können Streuungen weiterer Einflußfaktoren mit in die Betrachtung einbezogen werden /RED97/. Dies führt allerdings dazu, daß die Zielgröße das gesamte Toleranzintervall in Anspruch nimmt, d.h., der Prozeßfähigkeitsfaktor liegt bei einem im eigentlichen Sinne „unbefriedigenden“ Wert von $c_{pk} = 1,0$. Vielfach muß auch heute noch in der Praxis mit diesem Wert gearbeitet werden /BHO90/. Eine Verbesserung ist nun mit einem um die Mitte $M = \frac{1}{2} (OSG+USG)$ zentrierten Intervall mit der Länge $\leq 0,75 (OSG-USG)$ zu erzielen, das in Abb. 10.18 dargestellt ist ($c_{pk} = 1,33$) /RED97/. Wird hingegen das maximale Toleranzintervall geviertelt und lediglich die mittlere Hälfte als Toleranz zugelassen, so ergibt sich ein c_{pk} -Wert von 2,0 /MIT90/.

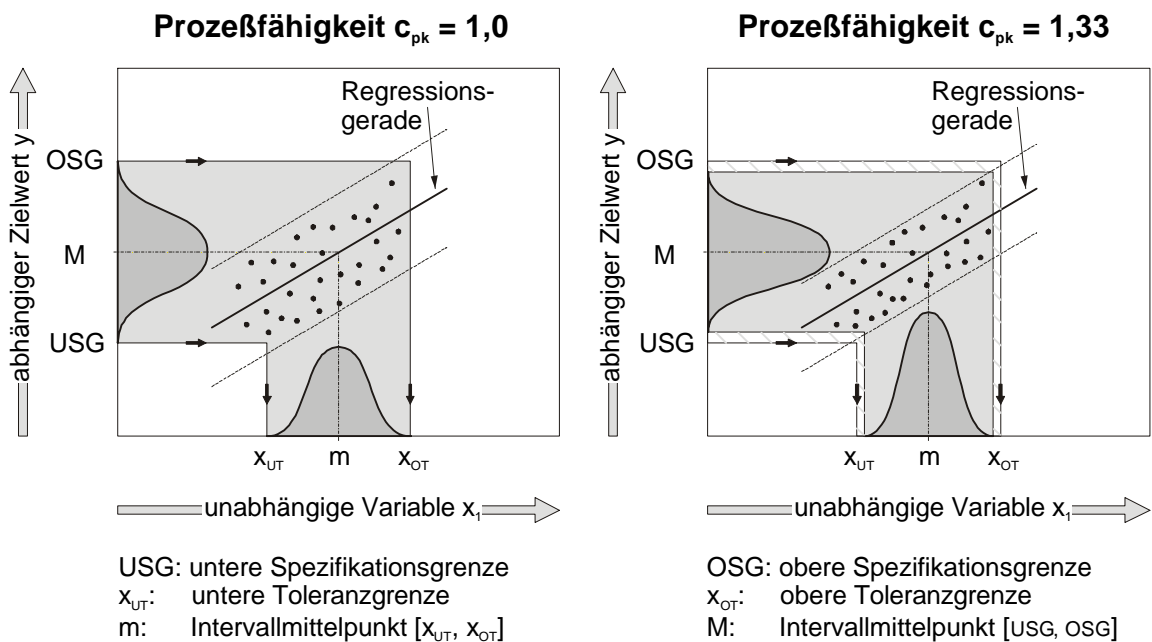


Abb. 10.18: Ermittlung realistischer Toleranzen /RED97/

Das Optimieren der Toleranzen, die von wichtigen Variablen stammen sowie die Öffnung der Toleranzen von unbedeutenden Größen ermöglicht neben der sicheren Erfüllung der Kundenanforderungen eine Steuerung und Reduzierung der Kosten /MIT90/.

10.15 Multi-Spec-Analyse

Mit der Multi-Spec-Analyse sollen optimale Einstellungen für Produkte und Prozesse gefunden werden. Im Vergleich zum Streudiagramm, bei dem die funktionale Abhängigkeit des Qualitätsmerkmals nur von einer Einflußgröße abhängen darf, lassen sich mit der Multi-Spec-Analyse mehrere Einflußgrößen optimieren. Dies wird auch durch den Begriff „Multi-Spec“ ausgedrückt, bei dem „Spec“ für „Analyse der Sollwerte“ und „Multi“ für „mehrere Einflußgrößen“ steht.

Inhaltlich ist die Multi-Spec-Analyse identisch und daher mit der Methode des „steilsten Anstiegs“ gleichzusetzen, die bereits in *Kapitel 7.1* erläutert wurde. Aus diesem Grund wird hier nicht mehr näher auf die Technik eingegangen /DOA95/.

10.16 Zusammenstellung Charakteristika Shainin-Methode

Bei den *Shainin*-Methoden konnte das Schema der Charakteristika so nicht verwendet werden. Daher zeigt *Tab. 10.3* eine Darstellung, die versucht, eine Wertung bezüglich der Anzahl zu bearbeitender Einflußgrößen sowie dem Anwendungszweck vorzunehmen.

Methode	Anzahl Einflußgrößen	Identifizierung	Verifizierung	Optimierung	Hinweis-generator
Isoplot	-				
Multi-Vari-Bild* ¹⁾	20 - 100	●			●
Paarweiser-Vergleich	20 - 100	●			●
Komponententausch	20 - 100	●			●
Prozeßabschnittstausch	k. A.	⊙			●
Konzentrationsdiagramme	k. A.	⊙			●
Run-Test	k. A.	⊙			
Variablenvergleich	2 - 20	●			
Vollständige Versuchspläne	2 - 6		●	⊙	
Streudiagramme	1			●	
Multi-Spec-Analyse	mehrere			●	
A-zu-B-Vergleich	k. A.		●		

Tab. 10.3: Charakteristika (●: sehr gut erfüllt, ⊙: bedingt erfüllt, ○: nicht erfüllt, k. A.: keine Angabe, *¹⁾ Serie muß vorhanden sein)

11 Problemlösungszyklus der statistischen Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung ist in den letzten Jahren nicht zuletzt durch die Computerentwicklung enorm verbessert und weiterentwickelt worden, so daß sie vielseitig einsetzbar ist. Jedoch ist die Computer- bzw. Softwareanwendung nicht der ausschlaggebende Faktor, um statistisch geplante Versuche durchzuführen. Zu dieser Durchführung gehört noch viel mehr. Gerade der Planungs- und Dokumentationscharakter spielt bei der heutigen Methodenanwendung eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Klein- und mittelständische Unternehmen wenden vermehrt immer noch das Prinzip des „Trial-and-Error“ an, da sie im Vergleich zu Großunternehmen nicht über eine eigenständige Qualitätsabteilungen verfügen. Aufgrund der Kosten und des höheren Versuchsaufwandes sowie mangelnder Dokumentationsmöglichkeiten ist das „Trial-and-Error“ Prinzip heute nicht mehr vertretbar. Bei Versuchen kleinerer Firmen ohne fremde Hilfe die vielfältigen Möglichkeiten der statistischen Versuchsplanung allein zu bewältigen, treten allerdings immer wieder eine Vielzahl von Problemen auf. Diese Probleme können sich negativ auf das Versuchsergebnis auswirken. Zu ihnen sind

- Überbelastung und Demotivierung der Mitarbeiter,
 - fehlende ganzheitliche Zielorientierung,
 - fehlende Systematik,
 - unnötige Zeitverluste,
 - mangelhafte Dokumentation des Bearbeitungsfortschritts und der Versuchsergebnisse,
 - vorhandenes Wissen ist nicht sofort greifbar,
 - Koordinationsprobleme aufgrund der arbeitsteiligen Organisation,
 - unzureichende Schulung der Mitarbeiter,
 - Vernachlässigung der Randbedingungen
- und
- mangelhafte Kennzeichnung und Fehlen von Versuchsteilen

zu zählen.

Durch diese Umstände erscheint es sinnvoll, die statistische Versuchsplanung zu systematisieren bzw. ein *ganzheitliches Vorgehenskonzept* zu beschreiben, um den zuvor aufgeführten Problempunkten *präventiv* entgegenzuwirken /GUN01/. Mit einer solchen Systematisierung wird weiterhin ein Grundstein gelegt, um die statistische Versuchsplanung und die zu beachtenden Arbeitsschritte in klein- und mittelständischen Unternehmen zu integrieren. Dieser Anwendungsleitfaden wird im weiteren „Problemlösungszyklus statistische Versuchsplanung“, kurz ProStaV, genannt. Er beinhaltet ein „Sieben-Phasen-Modell“, welches den Projektstart bis hin zur Validierung beschreibt.

Vor allem die Vorbereitungsphasen, die zur Durchführung von statistischen Versuchsplanungsprojekten (SVP-Projekten) erforderlich sind und in vielen Literaturstellen nur unzureichend behandelt werden, sollen im ProStaV ausführlich dargelegt werden. Eine gezielte und ausführliche Versuchsvorbereitung und -planung kann den Versuchsaufwand sowie Zweifel an den Versuchsergebnissen erheblich verringern. Dabei kommen unter anderem auch Aspekte der Systemtechnik und des allgemeinen Projektmanagements zum Tragen.

In Abb. 11.1 ist eine Übersicht des „Sieben-Phasen-Modells“ des ProStaV abgebildet. Weiterhin ist ersichtlich, daß begleitend zu den „Sieben-Phasen“ eine Projektmappe erstellt und gepflegt werden muß, denn der Dokumentation wird durch die heute gebräuchlichen Normen und Richtlinien (DIN ISO 9000:2000, QS 9000, TS 16949) eine große Bedeutung beigemessen. Diese Projektmappe enthält die Unterlagen, die während der Bearbeitung der einzelnen Phasen und deren Teilschritten erstellt oder zusammengetragen werden.

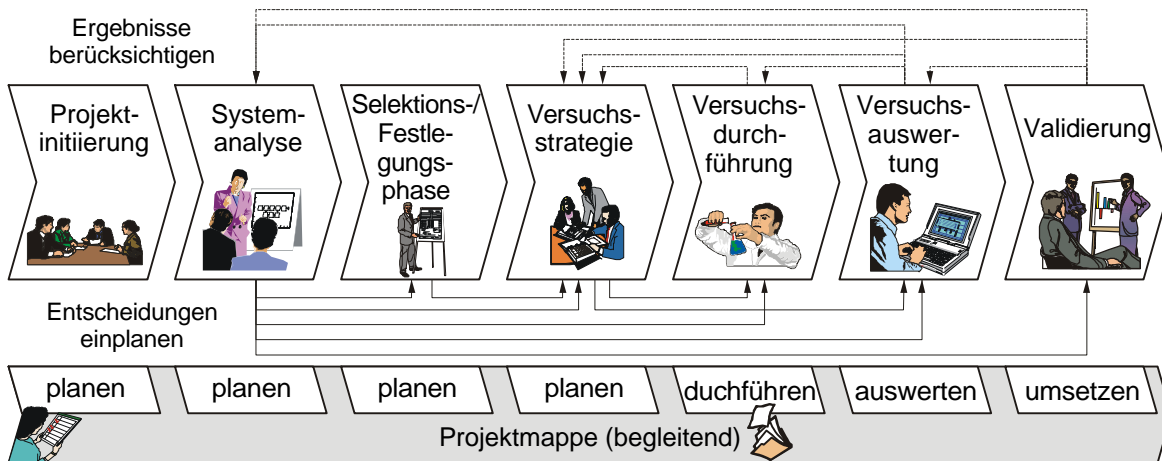


Abb. 11.1: Phasenübersicht des ProStaV

Aus Abb. 11.1 ist noch ersichtlich, welche Phasen einen planenden, durchführenden, auswertenden sowie umsetzenden Charakter aufweisen. Da die einzelnen Phasen nicht unabhängig voneinander agieren, enthält Abb. 11.1 vorwärts und rückwärts gerichtete Pfeildarstellungen, die zum einen aufzeigen, welche Auswirkungen die einzelnen Phasen bei der Bearbeitung aufweisen und zum anderen, wie die späteren Ergebnisse Rückschlüsse auf das Projekt und die Strategie ermöglichen.

Anzumerken bleibt noch, daß jedes Ende einer Phase einen sogenannten Meilenstein darstellt. An dieser Stelle sollte immer wieder überlegt und überprüft werden, ob das zuvor erarbeitete und durchgeführte plausibel und konsistent zum Problem bzw. zur Aufgabenstellung ist.

Nachfolgend werden nun die einzelnen Phasen und deren Teilschritte detailliert erörtert.

11.1 Projektdefinition/Projektinitiierung

Die Projektinitiierungsphase beinhaltet den Start sowie die ersten Vorbereitungsmaßnahmen zur erfolgreichen Durchführung eines SVP-Projektes. Zunächst ist (von der Unternehmensleitung) ein Projektleiter zu bestimmen, der über Fach-, Methoden- und Sozialkompetenz verfügt, um das Projekt und das Projektteam betreuen zu können.

Zur Bearbeitung der Schritte des ProStaV sollte außerdem ein Projektteam gebildet werden. Die Zusammensetzung ist so zu wählen, daß alle projektbezogenen Bereiche im Team vertreten sind. Die Teamfähigkeit der Mitglieder ist auf jeden Fall zu beachten.

Weiterhin ist eine grobe Beschreibung der Ausgangssituation und der quantifizierbaren Ziele vorzunehmen. Dabei sollte das gesamte Projektteam anwesend sein, damit etwaige Probleme, Fragen und Definitionen allen bekannt sind.

Anschließend ist festzustellen, ob es bereits ähnliche Projekte gegeben hat. Ist dies der Fall, sollte auf die dort vorhandenen Informationen zurückgegriffen werden, um doppelte Arbeit zu vermeiden und um mit Hilfe der Unterlagen Zeit und Kosten einzusparen.

11.1.1 Projektstart/Freigabe

Zu Beginn eines SVP-Projektes sollte eine Projektmappe angelegt werden. In diese Mappe werden während des Projektes sämtliche Schriftstücke eingeklebt. Dazu gehören z.B. Formblätter, Skizzen, Zeichnung, usw. Die Pflege und Erweiterung der Projektmappe wirkt begleitend über alle Phasen des ProStaV, wie *Abb. 11.1* entnommen werden kann.

Auf dem Projektdatenblatt sollten alle projektidentifizierenden Daten enthalten sein. Hierzu zählen

- Projektnummer,
 - Projektkurzbezeichnung,
 - Projektbezeichnung
- sowie
- charakterisierende Schlagworte.

Anhand dieser Projektschlagworte ist zum einen eine spätere Wiederauffindbarkeit leichter und zum anderen die Suche nach ähnlichen Projekten möglich.

11.1.2 Teambildung

Nachdem ein Projektleiter ernannt wurde, ist mit der Bildung eines interdisziplinären Teams fortzufahren. Gegenüber der Einzelarbeit hat die Projektarbeit in interdisziplinär besetzten Teams einige Vorteile. So werden auf diese Weise Wissen und Erfahrungen aller projektübergreifenden Arbeitsbereiche bzw. Abteilungen im Projekt integriert. Allein durch die Zusammenarbeit solcher Teams können interessante Effekte und sogar Verbesserungen erzielt werden. Zumeist handelt es sich um (erwünschte) Synergieeffekte, die die Lösungssuche und Ideenfindung qualitativ und quantitativ unterstützen. Somit wird auch die Gefahr, relevante Dinge außer Acht zu lassen, stark reduziert. Unklarheiten bezüglich der Aufgabe können weiterhin sofort beseitigt werden /DAE94, REH96/.

Wie bereits angedeutet, sollte das Projektteam aus Mitarbeitern bestehen, die bei der Aufgaben- bzw. Problemlösung hilfreich sein können. Dazu gehören meistens Mitarbeiter aus der

- Konstruktion,
 - Fertigung,
 - Vertrieb/Marketing
- und des
- Qualitätsmanagements bzw. der Qualitätssicherung.

Auch sollten Maschinenbediener oder Anlagenführer hinzugenommen werden, da diese oft spätere Versuche durchführen und bereits im Vorfeld abschätzen können, ob geplante Versuche oder Versuchskombinationen realisierbar sind.

Da es sich hier um Projekte der statistischen Versuchsplanung handelt, ist es empfehlenswert, einen „Experten“ aus den Bereichen „Statistik“ und „statistische Versuchsplanung“ beizuziehen, falls kein anderes Projektmitglied Erfahrungen bzw. Kenntnisse dazu vorweisen kann. Dieser „Experte“ kann sowohl bei der Selektion der Ziel- und Einflußgrößen als auch bei der Festlegung der Versuchsstrategie und späteren Auswertung wichtige Hinweise geben (siehe dazu auch *Kapitel 13.5*).

Die Teamgröße sollte auf sechs bis acht Mitglieder begrenzt werden, da bei größeren Teams die Gefahr besteht, nicht mehr Effektiv zu sein. Sinnvoll ist hierbei die Bildung eines sogenannten Kernteams, dem nur die wichtigsten Mitglieder angehören. Andere Mitglieder, die nicht im Kernteam sind, zählen zum erweiterten Kreis, wie *Abb. 11.2* zeigt. Je nach Fortschritt des Projektes oder dem Status der einzelnen Phasen, werden Mitglieder aus dem erweiterten Kern ein- bzw. ausgeklint. Ebenso kann es von Vorteil sein, Zulieferer und Kunden dem Kreis beizufügen /REH96, QSB99/.

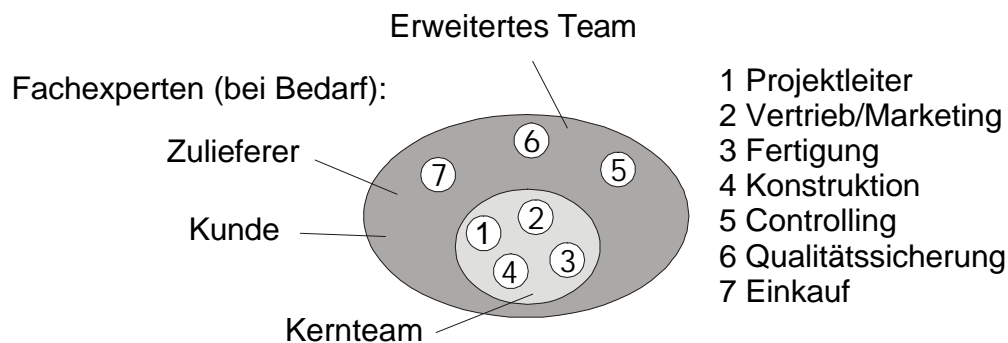


Abb. 11.2: Teamzusammensetzung

Bei der Bestimmung des Projektleiters sollte darauf geachtet werden, daß er aus einer höheren Stufe der Unternehmenshierarchie stammt. Ausreichende Kompetenz ist ebenso wichtig, um Teamentscheidungen nach außen gegen Widerstände vertreten zu können. Außerdem muß er sich bei der Übertragung der Versuchsergebnisse in die Praxis behaupten können. Innerhalb des Teams allerdings, sollte sich der Projektleiter eher als Moderator verstehen und nicht als Vorgesetzter. Weiterhin ist er für die Effektivität des Teams verantwortlich /KRÜ00/.

11.1.3 Beschreibung der Ausgangs- bzw. Problemsituation

Nach der Bildung des Projektteams, ist im nächsten Schritt die Ausgangssituation zu formulieren. Hierzu wird eine schriftliche Skizzierung des Problems bzw. der Aufgabe vorgenommen. Eine schriftliche Fixierung ist dahingehend wichtig, da sie als Ausgangspunkt für die weiteren Schritte dient und jederzeit nachvollziehbar sein muß.

Als Problem ist allgemein die Differenz zwischen der derzeitigen (IST-Zustand) und einer gewünschten (SOLL-Zustand) Situation zu verstehen /DAE94, STN00, KRL99/. Innerhalb eines Unternehmen machen sich Probleme durch Zustände wie beispielsweise

- höherer Kostenbedarf,
- größerer Arbeitsaufwand,
- erhöhter Ausschuß,
- vermehrte Gewährleistungsfälle,
- usw.

bemerkbar /STN00/.

11.1.4 Zieldefinition

Der Zieldefinition sollte ein großer Stellenwert beigemessen werden, um damit bereits einen Fokus auf die Lösungssuche zu legen, d.h. eine Zielorientierung einzuleiten. Das Ziel ist eindeutig zu formulieren und allen Beteiligten deutlich zu machen. Wenn möglich, sollte die Zielvorgabe quantifiziert werden.

Die genaue Zielvorstellung läßt sich meistens aus der Aufgabenstellung ableiten, d.h. sie steht mit der Aufgabenstellung sehr oft in direktem Zusammenhang. Welche expliziten Probleme oder Teilprobleme mit der Lösung des Projektes zusammenhängen, wird später in der Phase „Systemanalyse“ detailliert herausgestellt /DAE94, KRL99/.

Neben einer klaren Zieldefinition sind weiterhin noch die Projektziele gegenüber dem Projektumfeld abzugrenzen. Dabei müssen sowohl inhaltliche Ziele (z.B. angestrebte Funktionalität und Qualität des Projektergebnisses), als auch formale Ziele (Projektlaufzeit, -termine, Ressourcenbedarf und Wirtschaftlichkeit) festgelegt werden /ETZ00/. Aufgrund der interdisziplinären Teamzusammenstellung kann es zu unterschiedlichen Zielvorstellungen kommen. Diese sind innerhalb der Teamsitzungen auf einen gemeinsamen Nenner zu bringen, da die „Systemanalyse“ darauf aufbaut.

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung sind eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden, Verfahren und Versuchsplanungstypen vorhanden, die je nach Aufgaben- bzw. Problemstellung in Frage kommen. Nach *Kleppmann* /KLP98/ sind folgende grundsätzliche Möglichkeiten bei der Festlegung des Untersuchungsziels hilfreich:

- Optimale Lage des Mittelwertes (klassische Pläne, D-optimale Pläne),
 - Reduzierung der Streuung/Robustheit (*Taguchi*, klassische Pläne, D-optimale Pläne),
 - Erkennen der wichtigsten Störgrößen in der Fertigung bzw. eines Produktes (*Shainin*),
 - gleichzeitig fertigen, lernen und optimieren (experimentellen Optimumsuche)
- sowie
- Optimale Mischungsverhältnisse (Mischungsversuchspläne).

Anhand dieser Untersuchungsziele lassen sich oft bereits Hinweise auf eine anzuwendende Versuchsstrategie ableiten, die exemplarisch in Klammern mit aufgeführt sind.

11.1.5 Ähnliche Projekte suchen

Erfahrungsgemäß liegen der Projektbearbeitung zeitliche Limitierungen zugrunde. Vor allem, wenn laufende Prozesse oder fehlerhafte Produkte verbessert werden müssen, wird eine schnelle Realisierung des Projektes angestrebt.

Vielfach sind bereits Informationen und Daten aus vergleichbaren früheren Projekten vorhanden. Um Zeit und somit auch Kosten einzusparen, sollten diese früheren Informationen beschafft und zum Projekt hinzugezogen werden.

Bei der Suche nach ähnlichen Projekten sind projektbezogene, charakteristische Schlagworte hilfreich. Dazu sind bereits Schlagworte für das aktuelle Projekt erstellt worden (siehe 11.1.1), die hier zur Suche nach ähnlichen Projekten Verwendung finden. Dem Bearbeitungsstand entsprechend sollte das Projektteam die Schlagwortliste ergänzen bzw. abgleichen.

11.2 Systemanalyse

Bei der Systemanalyse¹ geht es hauptsächlich um eine „Lagebeurteilung“ bzw. „Diagnose“ der Aufgabe oder des Problems. Das Team soll sich hierbei mit der Aufgabe- bzw. Problemstellung vertraut machen und diese ggf. konkretisieren. Dazu müssen sie das Problem und dessen Auswirkungen verstehen und die Ursachen dafür ermitteln.

Das Ziel besteht darin, eine systematische Ermittlung aller Zielgrößen mit den entsprechenden Einflußgrößen zu erhalten. Wichtig ist hierbei, daß alle Einflußgrößen ermittelt und dokumentiert werden. Als Grundlage für die Ermittlung gilt die Problemanalyse, die wiederum in die Schritte detaillierte Problembeschreibung und Systemabgrenzung untergliedert wird. Dazu sind alle verfügbaren Informationen, die die Aufgabenstellung betreffen, zusammenzutragen. Alle durchzuführenden Schritte sind in Abb. 11.3 zusammengestellt.

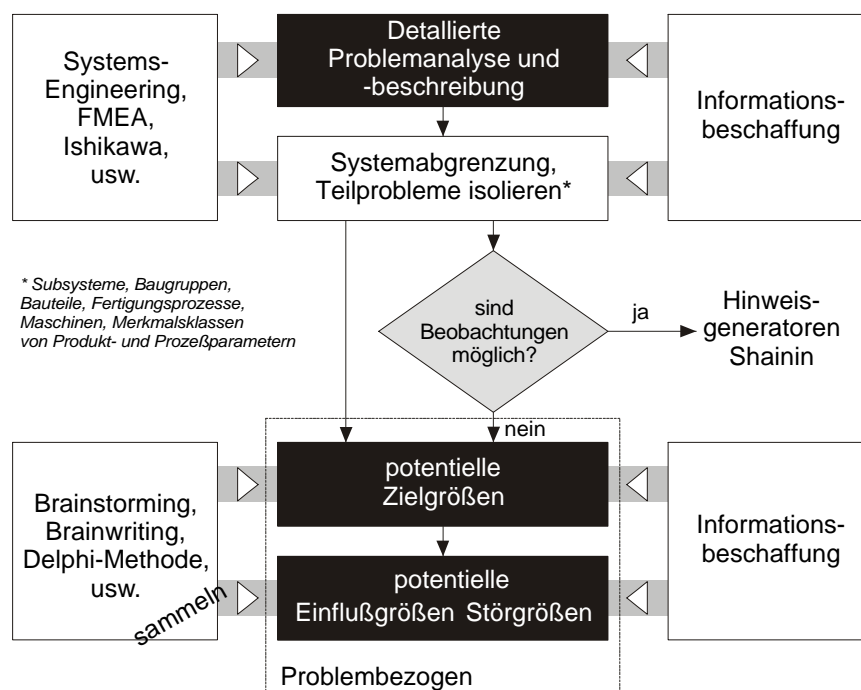


Abb. 11.3: Schritte der Systemanalyse

¹ Der ProStaV erfolgt hier, wie auch in einigen anderen Literaturstellen, in Anlehnung an die systematische Vorgehensweise der Systemtechnik. Vor allem trifft dies auf den Abschnitt der System- und Problemanalyse zu. Diese Analysen sind wesentliche Bestandteile der Systemtechnik und werden bei herkömmlichen SVP-Projekten oft nur unzureichend behandelt.

11.2.1 Detaillierte Problemanalyse

Im vorliegenden PoStaV ist die „detaillierte Problemanalyse²“ als Teil der „Systemanalyse“ anzusehen.

Zunächst muß dazu die Problemstellung genauer beschrieben werden. Alle relevanten Daten, die sich auf die Aufgabe bzw. das Problem beziehen, sind hierzu erforderlich. Diese Daten müssen im Einklang mit der bereits erfolgten Zieldefinition stehen.

Aufgrund der interdisziplinären Teamausrichtung entstammen die zusammengetragenen Daten aus unterschiedlichsten Bereichen. Sie sind so aufzubereiten, daß ein allgemeines Systemverständnis vorherrscht. Alle Problempunkte und deren Erscheinungsformen müssen verständlich sein, so daß deren Ursachen erkannt werden können. Oftmals besteht das Ziel einer Untersuchung nämlich nur in der Abschaffung von Symptomen, deren Ursachen aber an dieser Stelle erst ergründet werden müssen.

Da manche Probleme eine enorme Komplexität aufweisen, ist es ratsam, das Problem bzw. Untersuchungsfeld zu strukturieren und ggf. abzugrenzen, d.h. Teilprobleme zu definieren. Zudem sollte eine Klärung erfolgen, ob es sich um ein Produkt oder um einen Prozeß handelt. Wenn es sich um ein Produkt handelt, ist es ggf. wichtig, eine Analyse des Herstellprozesses mit in die Betrachtung einfließen zu lassen. Diese Betrachtung kann auch als Teilproblem erfolgen.

Die Problembeschreibung sollte auf vorhandenen Unterlagen/Informationen beruhen. Bei einem Prozeß sind daher z.B. Prozeßflußdiagramme und Fertigungsunterlagen hilfreiche Informationsquellen. Für Produktanalysen lassen sich dementsprechend z.B. Zeichnungen, Arbeits- und Prüfpläne als Unterlagen verwenden. Wenn möglich, sind diese Unterlagen der Projektmappe beizufügen, zumindest sollte nachvollziehbar sein, wo diese Unterlagen zu finden sind /KRL99, DAE94 /.

Zur detaillierten Problembeschreibung können Methoden der Systemtechnik (siehe dazu /DAE94/) angewendet werden. Der Methodeneinsatz ist jedoch nur als Hilfsmittel zur Strukturierung der Produkt- oder Prozeßdaten zu verstehen. Vielmehr muß der Methodeneinsatz problemorientiert und –angepaßt erfolgen. Er sollte kein Mittel zum Selbstzweck sein. Gegebenenfalls ist eine Kombination aus verschiedenen Methoden/Hilfsmitteln erforderlich, um eine detaillierte Problemabbildung zu erhalten /FLA95/.

11.2.1.1 Systemabgrenzung

Als Bestandteil eines jeden Problemlösungsprozesses müssen sinnvolle Systemgrenzen definiert werden, denn nur innerhalb des Untersuchungsgebietes ist eine Aufteilung des Systems in Subsysteme und Elemente ratsam. Werden die Systemgrenzen zu weit gezogen, steigt der Aufwand zur Problemlösung schnell an. Dies kann sogar soweit führen, daß eine Problemlösung unmöglich wird, da der Komplexitätsgrad des Problems zu umfangreich wird.

² In einigen Literaturstellen wird die hier beschriebene „detaillierte Problemanalyse“ inhaltlich mit der „Systemanalyse“ gleichgesetzt. Da der PoStaV einen höheren Detaillierungsgrad aufweist, wird die „Systemanalyse“ als Oberbegriff für die Phase gewählt. Die „detaillierte Problemanalyse“ stellt somit einen Unterschritt dar.

Hierbei sind auch die benötigten bzw. zur Verfügung stehenden Ressourcen (Zeit, Mensch, Material, Mittelbedarf, usw.) zu berücksichtigen, um unnötigen Aufwand zu vermeiden.

Erfolgt hingegen eine zu enge Ziehung der Systemgrenzen, kann die Lösung des Problems auch gefährdet sein, da eventuell einige wichtige Elemente unbeachtet bleiben. Wenn ein Element für die Untersuchung nicht relevant erscheint, wird es der irrelevanten Umwelt zugeordnet und nicht weiter betrachtet. Ein Element, das für das Zielsystem wichtig ist, aber nicht beeinflusst wird oder werden kann, gehört zur relevanten Umwelt. Soll oder kann das Element beeinflusst werden, so wird es in die weitere Analyse einbezogen /KRL99, DAE94/.

11.2.2 Informationsbeschaffung

Als Grundlage für die Problemanalyse und die spätere Ermittlung der Ziel- und Einflußgrößen ist die Beschaffung und Erfassung aller verfügbaren Informationen über das Produkt oder den Prozeß anzuführen. Ohne die notwendigen Informationen kann das Problem zwar bekannt und auch nachvollziehbar sein, jedoch ist eine Lösungsfindung nur schwer realisierbar.

Informationen spielen in (fast) allen Phasen des ProStaV eine Rolle. Hier ist die Informationsbeschaffung als separater Schritt aufgeführt, um eine detaillierte Ablagemöglichkeit in der Projektmappe zu erhalten.

Die Informationsbeschaffung wirkt begleitend, d.h. je nach Fortschritt kommen immer mehr Daten und Fakten zusammen. Als Startvektor dient die bereits unter „Beschreibung der Ausgangssituation“ skizzierte Problemstellung (siehe 11.1.3), die anhand der Informationsbeschaffung durch die Phase „Systemanalyse“ vervollständigt wird.

Bei der Zielsuche sollte die Informationsbeschaffung problemorientiert erfolgen, d.h. sie soll bei der Erkennung und Abgrenzung, bei der Erarbeitung realistischer Zielsetzungen und bei der Abklärung über Eingriffs- und Lösungsmöglichkeiten die Projektbearbeitung unterstützen. Hingegen ist bei der Lösungssuche darauf zu achten, daß die Informationsbeschaffung lösungsorientiert erfolgt /DAE94 /.

Unterlagen, die zur Informationsbeschaffung herangezogen werden können, lassen sich in drei Kategorien unterteilen, die in *Tab. 11.1* zusammengestellt sind. Diese Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da Unternehmen auch auf individuelle und interne Unterlagen zurückgreifen.

Firmeninterne Unterlagen	Externe Informationen	Methodische Unterlagen
<ul style="list-style-type: none"> • Lastenheft/Pflichtenheft • Zeichnungen • Reklamationen • Arbeitspläne • Prüfpläne • Systembeobachtungen • Fehlerstatistiken • Fertigungsunterlagen • vorherige Untersuchungen • usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Expertenbefragung • Kundenforderungen • Literaturstudium • Internetrecherche • usw. 	<ul style="list-style-type: none"> • Benchmarking • QFD • FTA • FMEA • DoE • QRK • usw.

Tab. 11.1: Unterlagen und Methoden zur Informationsbeschaffung

11.2.2.1 Allgemeine Hilfsmittel

Neben der Informationsbeschaffung und den Techniken des Systems-Engineerings gibt es weitere Werkzeuge bzw. Hilfsmittel, die die Problem- bzw. Systemanalyse und die Ermittlung sämtlicher potentieller Ziel-, Einfluß- und Störgrößen unterstützen. Dazu sind die Seven Tools (Q7) und die New Seven Tools (M7) (siehe Kapitel 3.9) sowie eine Reihe weiterer Werkzeuge zu zählen, die in Tab. 11.2 nach

- Einsatzmöglichkeiten/Aufgabe,
 - personelle Anforderung,
 - Aufwand
- und
- Handhabung

charakterisiert sind.

Charakteristika Methoden	Einsatzmöglichkeiten/Aufgabe							personelle Anforderungen			Aufwand		Handhabung			
	Projektmanagement	Arbeitsmittel	Produkt gestalten	Verfahren verbessern	Analyse des Ist-Zustandes	Problemlösungen suchen	Problemlösung bewerten	Problemlösung präsentieren	Moderator	Zahl der erforderl. Personen	Methodische Erfahrung	Sachkenntnisse	Dauer	Werkzeug/Material	Formalisierungsgrad	Flexibilität
Affinitätsdiagramm		✓	✓	✓					⊙	●	●	⊙	⊙	⊙	⊙	●
Brainstorming		✓	✓	✓		✓		✓	●	⊙	●	○	○	○	○	●
Brainwriting		✓	✓	✓		✓		✓	●	⊙	●	○	○	○	○	●
Delphi-Methode				✓	✓			✓	●	●	●	●	⊙	⊙	⊙	⊙
Dokumentenstudium		✓	✓	✓	✓				○	○	⊙	⊙	●	○	○	●
Gewinnverlustrechnung			✓				✓		○	⊙	●	○	○	⊙	⊙	○
Histogramm				✓	✓				○	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
Interview		✓	✓	✓	✓				⊙	⊙	○	○	○	○	⊙	●
Konzentrationsdiagramm					✓		✓		○	○	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○
Mindmapping			✓	✓	✓	✓	✓		○	○	⊙	○	○	⊙	●	●
Morphologischer Kasten		✓	✓	✓		✓			○	⊙	●	⊙	○	○	●	⊙
Nutzwertmatrix		✓	✓	✓			✓		○	⊙	●	○	○	○	●	⊙
Pareto-Analyse			✓	✓	✓		✓		○	⊙	●	⊙	⊙	●	○	○
Radardiagramm			✓				✓	✓	○	⊙	●	⊙	⊙	○	●	○
Regelkarten				✓	✓				○	⊙	●	⊙	⊙	○	●	○
Relationsdiagramm			✓	✓		✓			○	⊙	●	⊙	⊙	○	●	○
Streudiagramm		✓		✓	✓		✓		○	⊙	●	⊙	⊙	○	●	○
Stufenweise Zielgewicht.	✓	✓	✓				✓	✓	○	○	●	○	○	○	●	○
Ursache-Wirkungs-Diagr.			✓	✓		✓		✓	⊙	●	⊙	⊙	○	⊙	○	●
Ursachenanalyse		✓	✓	✓	✓				⊙	●	⊙	⊙	○	⊙	○	●

Tab. 11.2: Charakteristika von Werkzeugen und Hilfsmitteln (●: hoch, ⊙: mittel, ○: niedrig, ✓: zutreffend) /WEK96/

Auf eine Beschreibung dieser allgemeinen Hilfsmittel wird hier verzichtet, da sie den Rahmen dieser Darlegung sprengen würden. Vielmehr wird auf gängige Literaturstellen, wie z.B. /PFE96, TIM96, BRU99, VDA04a/, verwiesen.

11.2.3 Ermittlung aller potentiellen Ziel-, Einfluß- und Störgrößen

Wie bereits erwähnt, ist das allgemeine Ziel einer Systemanalyse die Ermittlung von Lösungsmöglichkeiten /DAE94/. Auf den ProStaV übertragen bedeutet dies die Auflistung sämtlicher potentieller Ziel-, Einfluß und Störgrößen.

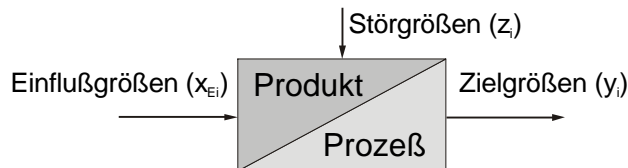


Abb. 11.4: Wirkgrößen

11.2.3.1 Potentielle Zielgrößen

Als erstes erfolgt die Ermittlung aller potentiellen Zielgrößen. Hierzu sollte die „Systemanalyse“ soweit fortgeschritten sein, daß die Zielgrößen aus dem vorhandenen Informationspool benannt werden können. Je nach Umfang und Komplexität des Projektes bzw. der Problemstellung sind eine oder mehrere Zielgrößen vorhanden /SCH97/.

11.2.3.2 Potentiellen Einfluß- und Störgrößen

Anschließend sind alle potentiellen Einflußgrößen zu erfassen. Hierbei handelt es sich um Größen, die möglicherweise einen Einfluß auf die Zielgröße(n) haben. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, daß an dieser Stelle alle Einflußgrößen erfaßt werden, auch wenn ihnen im ersten Moment keine große Bedeutung beigemessen wird. Eine systematische Sortierung erfolgt später.

Werden wesentliche Einflußgrößen vergessen, so kann dies den Erfolg des Projektes gefährden, da Einflüsse von Größen, die keine Betrachtung erfahren, nicht feststellbar sind. Außerdem besteht die Möglichkeit, daß sie die Versuche unbemerkt beeinflussen, was wiederum die Versuchsergebnisse verfälscht. Die bisher in der Systemanalyse erlangten Informationen sind hier auf jeden Fall heranzuziehen.

Des weiteren können noch bereits bekannte Störgrößen in einer eigenständigen Liste aufgeführt oder aber in der Liste der potentiellen Einflußgrößen markiert werden. Als Störgrößen sind Größen zu verstehen, deren Wert nicht oder nur mit hohem und damit kostspieligen Aufwand verändert bzw. beherrscht werden kann. Je nach Intensität des Einflusses auf die Zielgröße ist die Störgröße bei späteren Versuchen mitzuprotokollieren. Außerdem sind statistische und experimentelle Möglichkeiten vorhanden, dem Einfluß der Störgrößen handhabbar zu werden /KLP98, FLA95/.

11.3 Selektion und Festlegung von Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen

Hauptbestandteil dieser Phase ist die „Selektion und Festlegung“ von Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen aus den in der „Systemanalyse“ erarbeiteten Informationen. Bei der Festlegung durch das Projektteam sollte immer das Versuchsziel im Vordergrund stehen (siehe 11.1.4). Neben der Ermittlung vermuteter und bekannter Zusammenhänge spielen auch die Ergebnisse aus eventuell vorhandenen Systembeobachtungen³ oder gezielten Vorversuchen bei der Festlegung eine wesentliche Rolle /FLA95/. Es handelt sich hierbei um ein „heuristisches Screening“, womit sich die Anzahl der Ziel-, Einfluß- und Störgrößen reduzieren läßt.

Der Ablauf innerhalb der Selektions- und Festlegungsphase sieht zunächst die Auswahl der Zielgrößen aus der Liste der potentiellen Zielgrößen vor, da die festgelegten Zielgrößen die Auswahl der Einflußgrößen maßgeblich beeinflusst. Nach dieser Festlegung erfolgt die Auswahl von Faktoren aus der Liste der potentiellen Einfluß- und Störgrößen. Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung ist eine Unterscheidung der Einflußgrößen in Faktoren, Steuer- und Störgrößen üblich /KLP98/.

Alle Schritte, die bei der „Selektion und Festlegung“ zu durchlaufen sind, werden vorab in Abb. 11.5 aufgeführt.

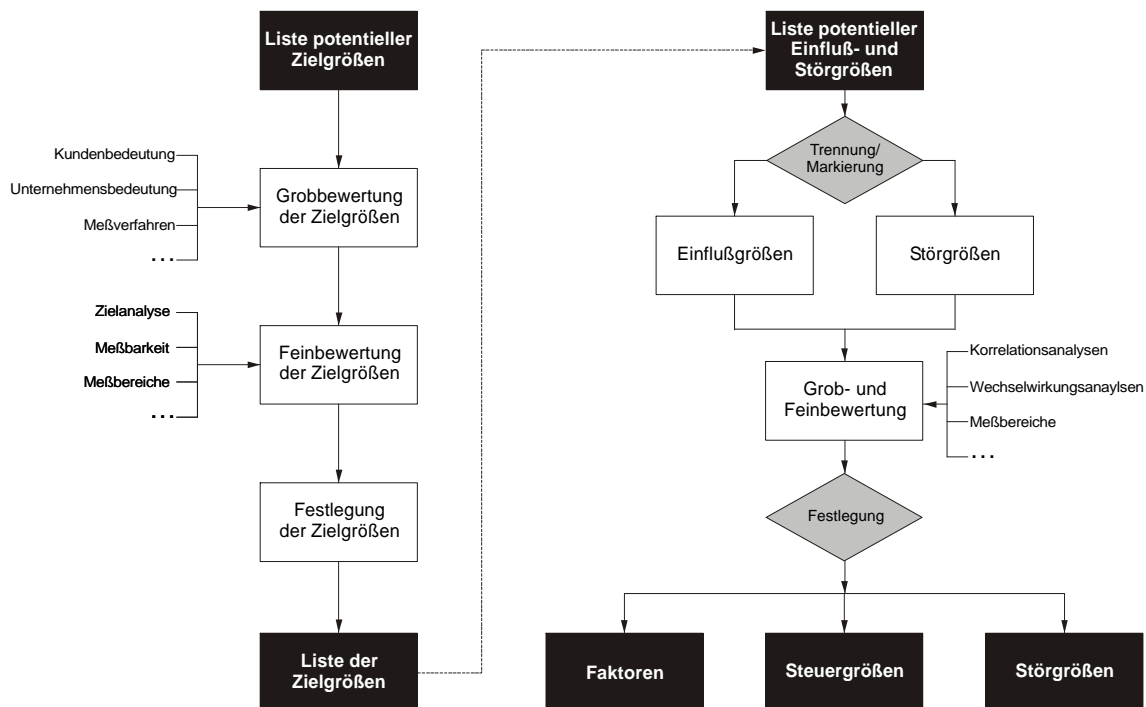


Abb. 11.5: Ablauf „Selektion und Festlegung“

11.3.1 Selektion und Festlegung der Zielgröße(n)

In der Regel umfaßt die Liste der potentiellen Zielgrößen mehrere Zielgrößen. Aufgrund des hohen Meßaufwandes ist es fast unmöglich, alle Zielgrößen mit dem Versuchsplan zu erfassen. Daher sollte eine Auswahl der wichtigsten Zielgröße(n) erfolgen.

³ z.B. durch die Hinweisgeneratoren von Shainin (siehe Kapitel 10).

Bei der Festlegung der Zielgröße(n) sollte idealerweise mit einer Vorselektion anhand einer Zielgrößenbewertungszahl (ZBZ) begonnen werden. Diese ZBZ wird durch Kriterien wie z.B. Kundenbedeutung, Meßverfahren, usw., die vom Projektteam definiert werden, gebildet. Da bei der Berechnung immer nur eine Zielgröße betrachtet wird, sollte im Anschluß die Abhängigkeit untereinander mit in die Selektion einfließen /FLA95/.

11.3.1.1 Grobbewertung aller potentiellen Zielgrößen

Bei der Grobbewertung werden für die Zielgrößen Bewertungskennzahlen ermittelt, die auf Auswahlkriterien des Projektteams beruhen. Dazu sind beispielsweise

- Kundenbedeutung,
- Unternehmensbedeutung,
- Meßverfahren,
- usw.

zu zählen, die sich für gewöhnlich aus problem- bzw. firmenspezifischen Gesichtspunkten ableiten lassen /ULR96/.

In *Abb. 11.6* ist eine mögliche Grobbewertung der Zielgrößen angedeutet. Für jedes Auswahlkriterium wird, ähnlich der RPZ-Zahl bei der FMEA, eine Bewertungszahl von eins bis zehn vergeben /HOL95/. Somit ergibt sich für jede Zielgröße eine individuelle, aus Sicht des Projektteams errechnete, Zielgrößenbewertungszahl.

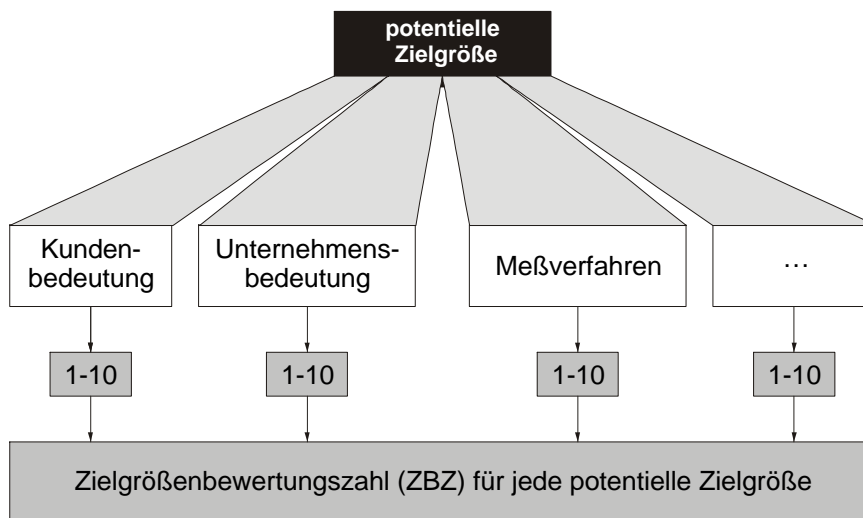


Abb. 11.6: Grobbewertung von Zielgrößen

Mit der ZBZ erhält das Team eine erste abteilungsübergreifende Einschätzung, welche Zielgröße(n) als wichtig erachtet werden. Besondere Beachtung sollte auf eine Zielgröße auch dann gelegt werden, wenn nur ein Auswahlkriterium mit einer hohen Bewertung belegt ist. In diesem Fall kann es trotz der niedrigen ZBZ sinnvoll sein, die Zielgröße für den Versuchsplan zu verwenden.

11.3.1.2 Feinbewertung aller potentiellen Zielgrößen

Um auch untereinander vorhandene Abhängigkeiten der potentiellen Zielgrößen zu erkennen, muß noch eine Zielgrößenanalyse erfolgen /MAY97/. Mit der Zielgrößenanalyse findet eine Korrelationsanalyse bzw. -abschätzung zwischen den Zielgrößen statt. Dabei wird zum einen der Kenntnisstand über die analysierte Beziehung und zum anderen die Art der Beziehung anhand einer Matrix bestimmt, deren Größe sich aus der Anzahl betrachteter Zielgrößen ergibt.

Eine solche Zielgrößenanalysematrix ist in *Abb. 11.7* exemplarisch zu sehen. Um sowohl den Kenntnisstand als auch die Beziehungsart erfassen zu können, ist jedes Matrixfeld in zwei Bereiche unterteilt, wobei der linke Teil den Kenntnisstand und der rechte Teil die Beziehungsart widerspiegelt. Zur Dokumentation werden Symbole verwendet, die ebenfalls in *Abb. 11.7* aufgeführt sind.

	y ₁		y ₂		y ₃		y ₄		y ₅		y ₆		y ₇		y ₈		y ₉	
	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
y ₁	■	■	●	↗	●	X	●	X	●	X	●	↗	●	↗	●	X	●	↗
y ₂	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	↗
y ₃	■	■	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X
y ₄	■	■	■	■	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X
y ₅	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X	●	↘
y ₆	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X
y ₇	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	●	X	●	↘
y ₈	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	○	X
y ₉	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Legende:

K: Kenntnisstand der Abschätzung über Beziehungen zwischen y _i	B: Art der Beziehung zwischen den y _i
● : gesichert	↗ : komplementäre Beziehung
◎ : vermutet	↘ : konkurrierende Beziehung
○ : keine Informationen	X : indifferente Beziehung

Abb. 11.7: Zielgrößenmatrix

Die möglichen Beziehungsarten der Zielgrößen werden anhand dreier Beziehungsarten dokumentiert:

1. Führt eine erhöhte (gesteigerte) Erfüllung einer Zielgröße zu einer erhöhten Erfüllung einer anderen Zielgröße, liegt eine komplementäre (↗) Beziehung zwischen diesen beiden Zielgrößen vor. In diesem Fall ist zu überprüfen, ob nicht Operationalisierungen ein und desselben Zieles vorliegen.
2. Eine konkurrierende (↘) Beziehung zwischen zwei Zielgrößen ist dann vorhanden, wenn eine gesteigerte Erfüllung der einen Zielgröße die Erfüllung der anderen Zielgröße vermindert.
3. Beeinflußt hingegen eine gesteigerte Erfüllung der einen Zielgröße die Erfüllung einer anderen nicht, wird dies als indifferente (X) Beziehung bezeichnet /MAY97/.

Auch beim Kenntnisstand stehen drei Dokumentationsmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Die Beziehungsart beruht auf gesicherten (●) Informationen, da beispielsweise zwei Zielgrößen in anderen Versuchen unter nahezu gleichen Bedingungen in einer Versuchsreihe betrachtet wurden.
2. Beruht die angegebene Beziehungsart hingegen nur auf Vermutungen, wird dies durch die Angabe vermutete (⊙) Information ausgedrückt.
3. Liegen keinerlei Kenntnisse über die Beziehung vor, ist die Angabe keine (○) Information zu verwenden /MAY97/.

11.3.1.3 Meßbarkeit der Zielgröße(n)

Neben den zuvor angesprochenen Aspekten folgt nun die Betrachtung eines Kriteriums, das häufig außer Acht gelassen wird. Dabei handelt es sich um die Sicherstellung der Meßbarkeit der Zielgröße, denn die Aussagequalität und –genauigkeit der Versuche steht und fällt mit der Genauigkeit und den zur Verfügung stehenden Meßverfahren /FLA95/.

Zur Sicherstellung der Meßbarkeit, d.h. Erfassung der Versuchsergebnisse, sind Fragen wie

- qualitative oder quantitative Zielgröße(n),
- Meßbereich der Zielgrößen,
- Meßmethode der Zielgrößen,
- Reproduzierbarkeit der Zielgröße,
- usw.

zu beachten und ggf. zu überprüfen.

11.3.1.3.1 Qualitative oder quantitative Zielgrößen

Aus der Art der Zielgröße lassen sich bereits einige Informationen zur Meßbarkeit der Zielgrößen herausarbeiten. So müssen Zielgrößen nicht zwangsläufig direkt meßbar sein, sondern es ist auch möglich, diese aufgrund bekannter funktionaler Zusammenhänge zu berechnen. Es findet also eine Unterscheidung in direkte und indirekte Zielgrößen statt. Sowohl direkte als auch indirekte Zielgrößen lassen sich weiter in qualitative und quantitative Zielgrößen unterscheiden.

In *Tab. 11.3* ist eine Übersicht zu sehen, in der Zielgrößenarten aufgeführt sind. Soweit bekannt, sind in dieser Tabelle Beispiele angegeben. Es ist zu erkennen, daß für qualitative Zielgrößen nur direkte Zielgrößen aufgeführt sind, die nicht von anderen Zielgrößen abhängen.

Für den Bereich der abhängigen, direkten Zielgrößen sind keine Beispiele bekannt, für indirekte Zielgrößen existieren sie nicht. Dies ist durch die schwarz hinterlegten Tabellenfelder angedeutet.

Innerhalb der statistischen Versuchsplanung sollten vorzugsweise quantitative Zielgrößen zur Betrachtung genutzt werden, da ihr Informationsgehalt gegenüber den qualitativen Zielgrößen größer ist.

Funktionaler Zusammenhang	direkte Zielgröße								indirekte Zielgröße							
	unabhängige Zielgröße				abhängige Zielgröße				unabhängige Zielgröße			abhängige Zielgröße				
	qualitativ		quantitativ		qualitativ		quantitativ		qualitativ		quantitativ	qualitativ		quantitativ		
Skalentyp	Nominalskala	Ordinalskala	Intervallskala	Verhältnisskala	Nominalskala	Ordinalskala	Intervallskala	Verhältnisskala	Nominalskala	Ordinalskala	Intervallskala	Verhältnisskala	Nominalskala	Ordinalskala	Intervallskala	Verhältnisskala
Beispiel	Farbe	Beurteilung	Temperatur	Abmessung				Ebenheit			Temperaturdifferenz	Dichte				Schwindung
Beispiel für statistische Kennwerte	Modalwert, Häufigkeiten	Median, Quartile	arithm. Mittelwert Standardabweichung	geom. Mittelwert, Variationskoeffizient	Modalwert, Häufigkeiten	Median, Quartile	arithm. Mittelwert Standardabweichung	geom. Mittelwert, Variationskoeffizient	Modalwert, Häufigkeiten	Median, Quartile	arithm. Mittelwert Standardabweichung	geom. Mittelwert, Variationskoeffizient	Modalwert, Häufigkeiten	Median, Quartile	arithm. Mittelwert Standardabweichung	geom. Mittelwert, Variationskoeffizient

Tab. 11.3: Übersicht über die Zielgrößenarten /CER95/

11.3.1.3.2 Meßbereich der Zielgrößen

Der Meßbereich, auch als Meßspanne bezeichnet, ist der Bereich, in dem die Werte für die Zielgröße liegen. Die Grenzen des Meßbereichs sind der Meßanfang und das Meßende. Für alle Meßwerte, die innerhalb des Meßbereichs liegen, darf der Meßwert der Meßeinrichtung einen angegebenen maximalen Fehler, die sogenannte Fehlergrenze, nicht überschreiten. Somit beeinflusst der Meßbereich einer Zielgröße die Auswahl des Meßmittels, da der Anzeigebereich des Meßmittels in vielen Fällen in etwa dem Meßbereich der Zielgröße entspricht.

11.3.1.3.3 Meßmethode der Zielgröße in Verbindung mit Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Meßwerte

Die Wahl der Meßmethode erfolgt häufig branchenspezifisch. Im Maschinenbau finden sich völlig andere Spektren an Meßmethoden als beispielsweise in der chemischen Industrie. Die unterschiedlichen Meßmethoden sind im wesentlichen durch die unterschiedlichen Produktspektren der jeweiligen Branchen begründet /PFE01/.

Das Ziel der Untersuchung, d.h. die Zielgröße des Versuchs bestimmt die Meßmethode. In der Produktionstechnik werden beispielsweise die Messung von

- geometrischen Größen (Längenmaße, Winkelmaße usw.),
- elektrische Größen (elektrische Leistung, Spannungen usw.),
- usw.

unterschieden /BRU99/.

Sind die wichtigsten Zielgrößen ermittelt, muß nun insbesondere der Meßgenauigkeit und der Fähigkeit der Meßmittel zur Messung der jeweiligen Zielgröße Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Die Genauigkeit und Fähigkeit eines Meßmittels beeinflussen die Versuchsergebnisse und die Versuchsstreuung in einem hohen Maße. Besonders die Versuchsstreuung darf nicht zu groß werden, da sie die Grundlage für Signifikanztests bildet. Nicht fähige Meßmittel können im schlimmsten Falle die Versuchsergebnisse so stark verfälschen, daß völlig falsche Schlüsse aus den Ergebnissen gezogen werden können.

11.3.1.4 Festlegung der Zielgröße(n)

Anhand der zuvor durchgeführten Grob- und Feinbewertung der potentiellen Zielgrößen wurden systematisch Informationen zur Beschaffenheit der Zielgrößen zusammengetragen. An dieser Stelle ist die Zielgröße bzw. sind die Zielgrößen festzulegen, die für die Aufgabenstellung relevant ist/sind. Hilfreich ist dazu, die zuvor erhaltenen Aussagen zu den Meßmethoden mit in die Auswahl einzubeziehen.

11.3.2 Selektion und Festlegung von Faktoren und Störgrößen

Idealerweise umfaßt die Liste der potentiellen Einflußgrößen bereits alle Größen, die nach Meinung des Projektteams aufgrund der „Systemanalyse“ und mit Hilfe von Informationen und weiteren Hilfsmitteln Einfluß auf die Zielgröße(n) nehmen. Diese Liste stellt nur eine Aufzählung ohne weitere Informationen bzw. Unterteilungen dar. Lediglich eine Markierung etwaiger Störgrößen ist eventuell bereits vorhanden.

Für die weitere Selektion wird eine detaillierte Spezifikation empfohlen. Einflußgrößen werden dazu in

- Stell-
und
- Störgrößen

unterteilt, wobei die Stellgrößen nochmals in

- Faktoren
und
- konstante Faktoren, sogenannte Steuergrößen,

aufgesplittet werden.

Unter Berücksichtigung von *Abb. 11.5* wird jetzt die Grob- und Feinbewertung bis zur letztendlichen Festlegung der Faktoren, Steuergrößen und Störgrößen gestartet. Dieser Analyseprozeß umfaßt die Ermittlung bekannter und vermuteter Zusammenhänge, die zum größten Teil auf Informationen oder Systembeobachtungen aus der Systemanalyse zurückgreifen.

11.3.2.1 Trennung von Stell- und Störgrößen

Im wesentlichen basiert die Trennung in Stell- und Störgrößen auf der Einschätzung der

- Einstellbarkeit vorgegebener Werte (Stufen),
- Kontrollierbarkeit der Einstellungen,
- zeitlicher Aufwand für Einstellungen bzw. Einstelländerungen und dem
- Kostenaufwand zur Kontrolle eingestellter Werte /SCL91, KLP98/.

In der Regeln erhöht sich durch diese Strukturierung die Transparenz der Aufgabe.

Wurde die Markierung von Störgrößen bereits in der Systemanalyse vollzogen, so sind diese Markierungen hier nochmals zu überprüfen, bzw. wenn noch nicht geschehen, ist dies jetzt durchzuführen.

Die anschließende Grob- und Feinbewertung dient der Bewertung und Eingrenzung der Einflußgrößen, um für die späteren Versuchsmethode die relevanten Faktoren systematisch zu ermitteln.

11.3.2.2 Bewertung und Eingrenzung

Bei der Bewertung und Eingrenzung wird neben der Klärung der Frage, welchen Einfluß sowohl Stell- als auch Störgrößen auf die Zielgröße(n) ausüben, auch die Abschätzung der Korrelationen und Faktorwechselwirkungen betrachtet. Um die Gefahr von möglichen Informationsverlusten zu minimieren, empfiehlt sich eine zusammenhängende Durchführung für Stell- und Störgrößen. Dabei wird nochmals zwischen einer

- Grob-
und
- Feinbewertung

unterschieden, wobei in der Grobbewertung eine isolierte Betrachtung jeder einzelnen Stell- und Störgröße erfolgt. Mit der Feinbewertung werden dann Korrelations- und Wechselwirkungsabschätzungen angestrebt.

Beide Bewertungsschritte weisen eine hohe Relevanz auf, da nicht nur die Bedeutung jeder einzelnen Größe, sondern auch deren Beziehung untereinander bzw. in Relation zur betrachteten Zielgröße zur Auswahl der Faktoren beitragen /FLA95, MAY97/.

11.3.2.2.1 Grobbewertung von Stell- und Störgrößen

Ziel der Grobbewertung ist die Wichtigkeit der Stell- und Störgrößen bezüglich der Zielgröße(n) einzustufen. Gleichmaßen sollte der erforderliche Einstellaufwand in die Betrachtung einfließen. Als dritter und wesentlicher Punkt ist die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit abzuschätzen. Durch all diese Punkte wird eine Bewertung gebildet, die einer Kosten- und Aufwandsabschätzung ähnelt.

Für die Durchführung der Bewertung empfiehlt sich der Einsatz von Bewertungszahlen, wobei für jeden Bewertungsaspekt Punkte zwischen eins und zehn zu vergeben sind. Dabei bedeutet

- ein Punkt = besonders ungünstig (z.B. Bedeutung und Genauigkeit = gering, Aufwand = hoch)
- und
- zehn Punkte = besonders günstig.

Anhand der einzelnen Kriterien ist aus ihrem Produkt eine Bewertungsziffer zu bilden. Größen, die eine hohen Bewertungsziffer aufweisen, sind für den späteren Versuchsplan als Faktor besonders geeignet /SCL91/.

In *Abb. 11.8* ist die Entstehung der Bewertungszahl nochmals dargestellt. Es ist auf jeden Fall zu beachten, daß diese Grobbewertung für jede Zielgröße explizit durchzuführen ist.

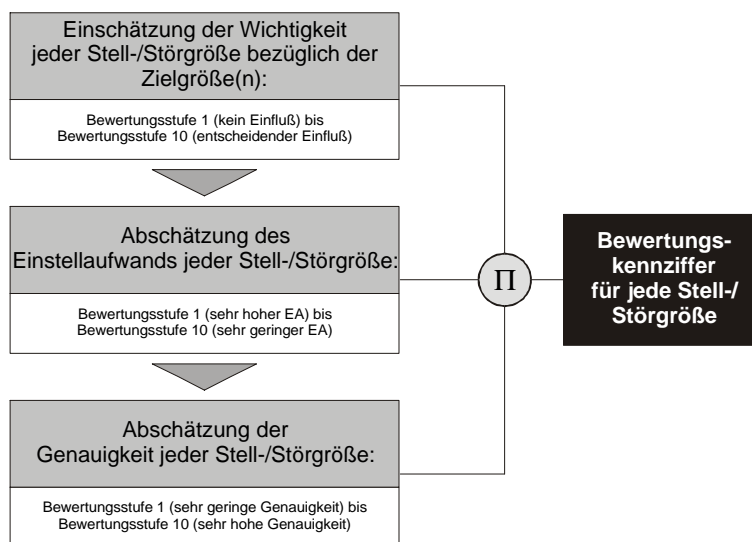


Abb. 11.8: Grobbewertung

11.3.2.2.2 Feinbewertung von Stell- und Störgrößen

Der Feinbewertung der Stell- und Störgrößen sollte größte Sorgfalt beigemessen werden, denn die letztendliche Faktorauswahl beruht zum größten Teil auf diesen Ergebnissen. Durch die Auswahl und Beschaffenheit der Faktoren wird dementsprechend die Versuchsstrategie und Versuchsanzahl beeinflusst.

Die Feinbewertung umfaßt dabei drei Betrachtungen:

- Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen,
 - Wechselwirkungen zwischen Stell-/Störgrößen
- und
- Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und Zielgrößen.

Statt der aufgeführten drei Betrachtungsansätze eignet sich auch der Einsatz des sogenannten „Papiercomputers“⁴ nach *Frederic Vester* /VES80, ULR96/. In *Mayers* /MAY97/ findet sich eine Erweiterung des „Papiercomputers“ zur Intensitäts-Beziehungsmatrix mit anschließender Ergebnisdarstellung in einem Portfolio-Diagramm. Mit der Intensitäts-Beziehungsmatrix wird eine Abschätzung von Haupteffekten und Wechselwirkungen realisiert.

11.3.2.2.1 Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen

Anhand der Korrelationsabschätzung soll geklärt werden, ob Abhängigkeiten zwischen Stell-/Störgrößen vorhanden sind. Eventuell können solche Abhängigkeiten durch bekannte Korrelationskoeffizienten konkretisiert werden.

Falls Korrelationen vorhanden sind, ist eine unabhängige Einstellung von zwei Stellgrößen nicht möglich. Somit ist eine Betrachtung beider Stellgrößen als systematisch zu variierende Faktoren nicht zulässig. Entweder es darf nur eine der beiden Stellgrößen als Faktor in einen Versuchsplan aufgenommen werden (die andere wird dann zur Steuergröße) oder die Stellgrößen sind als Faktoren mit einem Mischungsplan zu analysieren⁵.

Die Verwendung von zwei korrelierenden Stellgrößen als Faktoren in einem „normalen“ Versuchsplan hat zur Folge, daß die Eindeutigkeit des Versuchsmodells nicht mehr gewährleistet ist, d.h. es ist nicht möglich festzustellen, welcher Faktor für eine Zielgrößenänderung zuständig war /WAS01/. Eine Korrelationsmatrix zur Abschätzung von Korrelationen zwischen Stell-/Störgrößen ist in *Abb. 11.9* dargestellt.

	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅		X ₆		X ₇		X ₈		X ₉		
	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	
X ₁	■	■	×	○	×	⊙	/	●	×	●	×	●	×	●	?		×	●	
X ₂			■	■	×	⊙	/	⊙	×	●	×	●	×	●	?		×	●	
X ₃					■	■	/	⊙	×	●	×	●	×	●	?		×	●	
X ₄							■	■	×	●	×	●	×	●	?		×	●	
X ₅									■	■	×	●	×	●	?		×	●	
X ₆											■	■	×	●	?		×	●	
X ₇													■	■	?		×	●	
X ₈																■	■	×	●
X ₉																		■	■

Legende:

K: Kenntnisstand der Abschätzung	B: Art der Beziehung
● : sicher	/ : positive Korrelation
⊙ : vermutet	\ : negative Korrelation
○ : keine Informationen	×
	? : keine Aussage möglich

Abb. 11.9: Korrelationsmatrix Stell-/Störgrößen

⁴ Die Ursprünge des „Papiercomputers“ liegen in der Methodik des vernetzten Denkens zur Lösung komplexer Probleme /JOH95, ULR96, VES80/.

⁵ Es ist auch eine Kopplung zwischen Mischungs- und Prozeßfaktoren möglich (siehe dazu *Kapitel 8.5.8*).

Wie aus *Abb. 11.9* hervorgeht, sollte neben der Art der Korrelation durch ein entsprechendes Symbol in Form von positive (↗), negative (↘) oder keine (X) Korrelation auch noch der Kenntnisstand der Aussage dokumentiert werden. Dazu ist die Angabe vermuteter (⊙) oder sicherer (●) Einfluß einzutragen. Durch Betrachtung des Punktes „Kenntnisstand“ erhält das Projektteam Anhaltspunkte, ob Vorversuche notwendig sind, um unsichere Beziehungen abzuklären /FLA95, MAY97/.

11.3.2.2.2 Wechselwirkungsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen

Wechselwirkungen nehmen im Bereich der statistischen Versuchsplanung eine entscheidende Rolle im Vergleich zu anderen Versuchsmethoden ein. Da die Anzahl zu erwartender bzw. vermuteter Faktor-Wechselwirkungen einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Versuchsanzahl bzw. Versuchsstrategie ausübt, ist die Wechselwirkungsabschätzung mit größtmöglicher Sorgfalt durchzuführen, denn eine Nichtbeachtung von Wechselwirkungen kann zu völlig falschen Versuchsergebnissen bzw. zu deren falscher Interpretation führen.

Zur Abschätzung der Wechselwirkungen zwischen den Stell-/Störgrößen ist für jede Zielgröße eine, wie in *Abb. 11.10* gezeigte, Matrix auszufüllen. Auch in dieser Matrix kann wieder die Beziehung und der Kenntnisstand der Aussage erfaßt werden.

	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		X ₅		X ₆		X ₇		X ₈		X ₉	
	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K
X ₁	■	■	✓	●	✓	●	?	■	✓	⊙	×	⊙	?	■	✓	●	×	●
X ₂	■	■	■	■	✓	●	?	■	✓	⊙	×	⊙	?	■	✓	⊙	×	●
X ₃	■	■	■	■	■	■	?	■	✓	⊙	×	⊙	?	■	✓	●	×	●
X ₄	■	■	■	■	■	■	■	■	✓	⊙	×	⊙	?	■	✓	⊙	×	●
X ₅	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	×	⊙	?	■	✓	●	×	●
X ₆	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	?	■	✓	⊙	×	●
X ₇	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	✓	●	×	●
X ₈	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	×	●
X ₉	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Legende:

K: Kenntnisstand der Abschätzung	B: Art der Beziehung
● : sicherer	✓ : Wechselwirkung liegt vor
⊙ : vermutet	×
	? : keine Aussage möglich

Abb. 11.10: Wechselwirkungsmatrix

Sind mehrere Zielgrößen an der Untersuchung beteiligt, schlägt *Flamm /FLA95/* folgendes Vorgehen vor, welches in *Abb. 11.11* dargestellt ist:

Innerhalb der einzelnen Wechselwirkungsmatrizen (je nach Zielgröße) werden die Symbole in Bewertungsziffern umgewandelt. Nach der Umwandlung wird aus allen Matrizen die Summe gebildet. Anschließend wird aus der Ergebnismatrix für jedes Element, das größer Null ist, eine eins gesetzt. Elemente die Null betragen, bleiben Null. Alle Elemente, die ungleich Null sind, stellen eine Wechselwirkung dar, die in einen Versuchsplan eingebaut werden sollten.

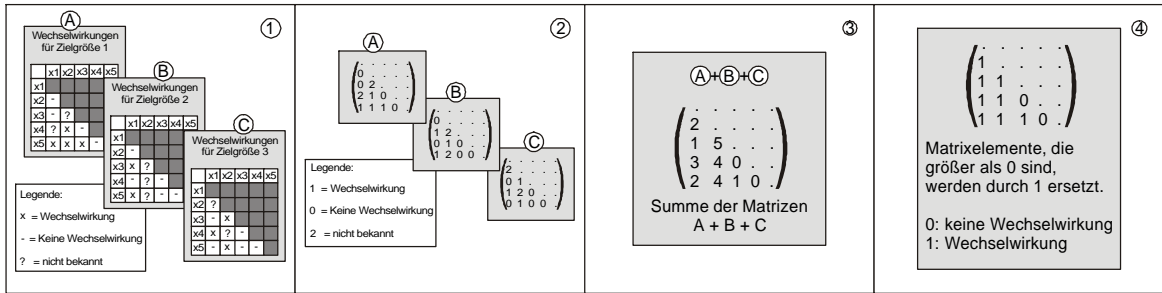


Abb. 11.11: Wechselwirkungsabschätzung für mehrere Zielgrößen /FLA95/

11.3.2.2.3 Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und Zielgröße(n)

Die Korrelationsabschätzung verfolgt zwei Ziele. Zum einen geht es um die Reduzierung von Stell-/Störgrößen und zum anderen um Hinweise, wie die Faktorstufen der späteren Faktoren beschaffen sein sollten.

Durch diese Abschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und der Zielgröße(n)matrix, die in Abb. 11.12 zu erkennen ist, kann auf Größen verzichtet werden, wenn aufgrund dieser und vorhergehender Analyseschritte kein Zusammenhang erkennbar ist. Falls Korrelationen vermutet oder bekannt sind, ist dies durch Symbole kenntlich zu machen, wie dies bereits bei vorherigen Abschätzungen der Fall war. Weiterhin lassen sich bereits Rückschlüsse ableiten, wie viele Faktorstufen der spätere Faktor aufweisen sollte /FLA95/.

	y ₁		y ₂		y ₃		y ₄		y ₅		y ₆		y ₇		y ₈		y ₉	
	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K
X ₁	/	●	\	⊙														
X ₂	\	⊙	\	●														
X ₃	/	⊙	\	●														
X ₄	X	●	X	⊙														
X ₅	\	⊙	/	⊙														
X ₆	∧	●	\	●														
X ₇	\	●	∧	●														
X ₈	∧	⊙	∧	●														
X ₉																		
...																		

Legende:

K: Kenntnisstand der Abschätzung
 ● : sicher ⊙ : vermutet

B: Art der Beziehung
 / : Erhöhung von x bewirkt Erhöhung von y (linear)
 \ : Erhöhung von x bewirkt Verringerung von y (linear)
 X : kein Zusammenhang
 ∧ : bei Erhöhung von x durchläuft y ein Maximum (nichtlinear)
 ∨ : bei Erhöhung von x durchläuft y ein Minimum (nichtlinear)

Abb. 11.12: Korrelationsabschätzung Stell-/Störgröße auf Zielgröße

Ist beispielsweise bekannt, daß zwischen einer Stell- und einer Zielgröße eine nichtlineare Abhängigkeit besteht, genügt die Betrachtung von zwei Faktorstufen nicht, um diese Abhängigkeit zu beschreiben. Demzufolge sind mehr als zwei Faktorstufen dem Versuchsplan beizugeben. Hingegen reicht bei einer linearen Abhängigkeit die Betrachtung von zwei Faktorstufen aus /ORT01/.

11.3.2.2.4 Intensitäts-Beziehungsmatrix und Portfolio-Diagramm

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung relevanter Stellgrößen und deren potentieller Wechselwirkungen besteht in der Anwendung der Intensitäts-Beziehungsmatrix. Anschließend lassen sich die Ergebnisse mit einem Portfolio-Diagramm darstellen. In Abb. 11.13 sind eine einfache Intensitäts-Beziehungsmatrix und ein Portfolio-Diagramm exemplarisch abgebildet.

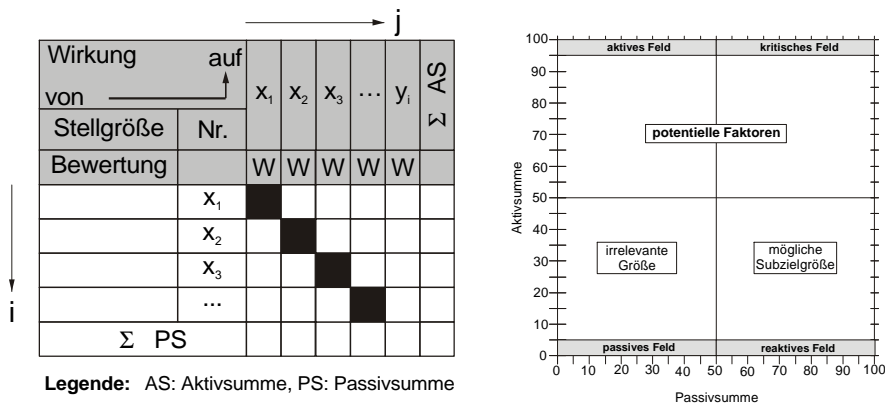


Abb. 11.13: Intensitäts-Beziehungsmatrix mit Portfolio-Diagramm /MAY97, ULR96/

Der Intensitäts-Beziehungsmatrix liegt eine zweidimensionale Matrix zugrunde, bei der beide Dimensionen mit den zu analysierenden Stellgrößen belegt werden. Zusätzlich enthält die Matrix eine Spalte zur Erfassung einer Zielgröße.

Neben der einfachen Intensitäts-Beziehungsmatrix, die wie bereits erwähnt auf Vester zurückgeht, besteht noch eine erweiterte Form, die von Mayers /MAY97/ entwickelt wurde. Während mit einer einfachen Form nur die Abschätzung des Einflusses durchführbar ist, gestattet die erweiterte Form Angaben zur Sicherheit der Schätzungen. Eine erweiterte Intensitäts-Beziehungsmatrix mit ihrer zugehörigen Legende ist in Abb. 11.14 dargestellt.

Beim Ausfüllen der Intensitäts-Beziehungsmatrix ist zur Ermittlung von wichtigen Stellgrößen maßgebend, wie bei einer Veränderung einer Stellgröße unmittelbar oder über Veränderungen der Wirkung einer weiteren Stellgröße der Wert der Zielgröße beeinflusst wird, um Korrelationen zwischen Stellgrößen auszuschließen. Denn anhand der Matrix soll keine Korrelationsbetrachtung, sondern eine Abschätzung der Haupteffekte und Faktor-Wechselwirkungen erhalten werden /JOH95, ULR96, MAY97/.

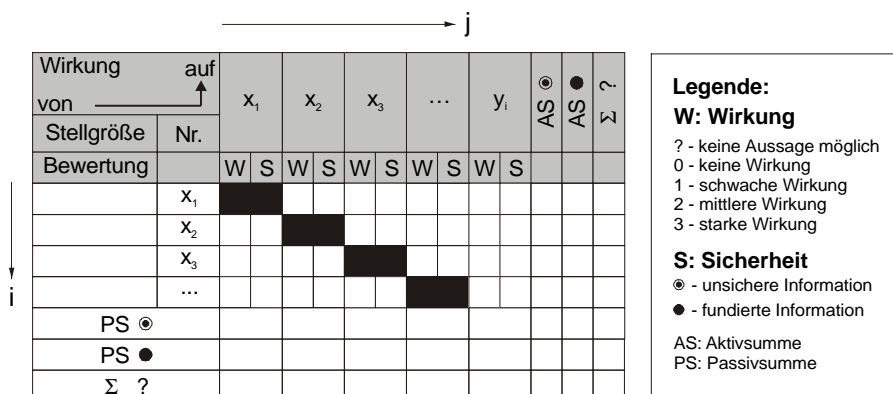


Abb. 11.14: Erweiterte Intensitäts-Beziehungsmatrix /MAY95/

Das Projektteam hat zum Ausfüllen der Matrix folgende Fragestellung zu beantworten: „Welchen Einfluß hat eine Stellgröße „i“ direkt auf die Zielgröße und welchen Einfluß hat diese Stellgröße „i“ über eine andere Stellgröße „j“ auf die Zielgröße“ /MAY97/. Somit wird eine betragsmäßige Abschätzung der Wechselwirkungen sichtbar.

Zur Abschätzung der Wirkungen wird ein festgelegtes Punktesystem nach Wirkstufen der Form

- 0 = keine Wirkung erwartet,
 - 1 = schwache Wirkung erwartet,
 - 2 = mittlere Wirkung erwartet
- sowie
- 3 = starke Wirkung erwartet

verwandt.

Falls keine Einigkeit herrscht oder keine Einschätzung möglich ist, ist die Eintragung eines „Fragezeichens“ legitim /JOH95, ULR96, MAY97/.

Da jede Matrix nur Gültigkeit für eine Zielgröße verkörpert, ist für jede Zielgröße eine gesonderte Matrix zu erstellen. Hierdurch ist es möglich, Aussagen über die Bedeutung einzelner Stellgrößen zu bekommen, die nur Einfluß auf eine Zielgröße ausüben, auch wenn andere Stellgrößen im Gesamtumfang einen größeren Einfluß auf alle Zielgrößen verkörpern /MAY97/.

Da es sich bei den Intensitäten um Wechselwirkungen handelt, müßte rein theoretisch demnach das Feld der Zeile „i“ und Spalte „j“ den gleichen Schätzwert aufweisen, wie das Feld „j“ der Spalte „i“, da es sich um die gleiche Wechselwirkung handelt. Durch vollständiges Ausfüllen der Matrix lassen sich nun Unsicherheiten bezüglich der getroffenen Abschätzungen aufschlüsseln. Je größer die Abweichung zwischen Feld „ij“ und „ji“, desto größer ist auch die Unsicherheit. Daher sollte die Matrix immer vollständig ausgefüllt werden. Beim Ausfüllen der Felder z.B. unterhalb der Diagonalen mit anschließender Spiegelung, würden diese Informationen verloren gehen.

Nach der Abschätzung der Intensitäten wird die Aktivsumme durch spaltenweises Aufsummieren sowie die Passivsumme durch zeilenweises Aufsummieren der dokumentierten Werte berechnet. Durch die Erweiterung kann nochmals zwischen Aktiv- und Passivsumme für fundierte und ungesicherte Informationen unterschieden werden. Zusammen stellen sie dann die Gesamtsumme der einfachen Intensitäts-Beziehungsmatrix dar /JOH95, MAY97/. Hierin beschreibt die Aktivsumme die Einflußnahme einer Stellgröße auf eine Zielgröße, wohingegen die Passivsumme nur die geschätzte Gesamtwirkung aller in der jeweiligen Spalte erfaßten Stellgrößen auf den Effekt der Stellgröße repräsentiert, d.h. die Beeinflussbarkeit einer Größe /URL96, MAY97/.

Zur grafischen Auswertung bzw. Aufbereitung der Summenwerte wird ein „Aktiv-Passiv-Diagramm“ (auch Portfolio-Diagramm genannt) gebildet, indem die Passivsumme eine horizontale und die Aktivsumme eine vertikale Achse repräsentiert und in *Abb. 11.15* exemplarisch zu sehen ist. Mit einer weiteren senkrechten und waagerechten Achse wird das Portfolio-Diagramm dann in vier Quadranten zerteilt. Die Festlegung der Grenzen innerhalb des Portfolio-Diagramms kann weiterhin flexibel und je nach Aufgabenschwerpunkt gehandhabt werden, wie *Abb. 11.15* ebenfalls zeigt.

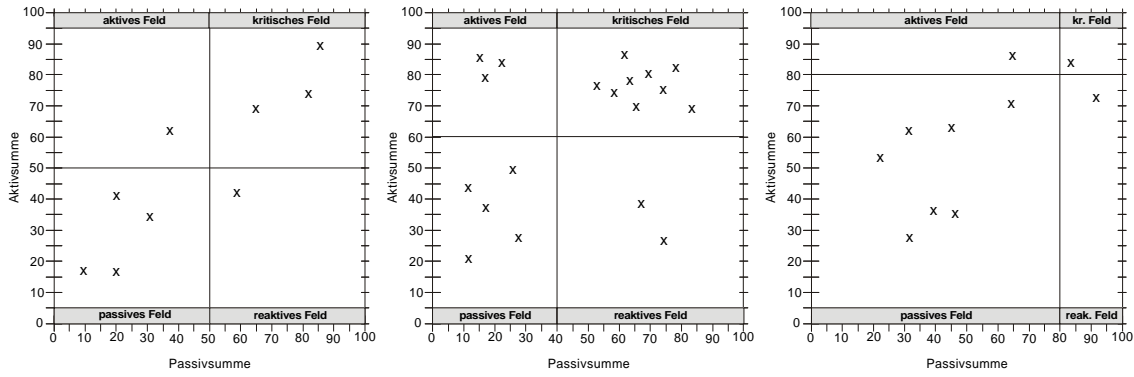


Abb. 11.15: Mögliche Grenzen im Portfolio-Diagramm /MAY97/

Somit besteht die Möglichkeit, jedem Punkt aufgrund seiner Lage im Portfolio-Diagramm eine Bedeutung beizumessen. Die vier Quadranten weisen dabei folgende Bedeutung auf:

- hohe Aktivsumme, hohe Passivsumme \Rightarrow kritisches Feld,
- hohe Aktivsumme, niedrige Passivsumme \Rightarrow aktives Feld,
- niedrige Aktivsumme, hohe Passivsumme \Rightarrow reaktives Feld
sowie
- niedrige Aktivsumme, niedrige Passivsumme \Rightarrow passives Feld.

Potentielle Faktoren sind im aktiven oder kritischen Feld abgebildet. Punkte des reaktiven Feldes repräsentieren mögliche Störgrößen, während Punkte im passiven Feld in der Regel irrelevante Größen darstellen /JOH95, ULR96, MAY97/.

Die zuvor bereits angedeuteten Unsicherheiten in den Aussagen durch Wertunterschiede der Felder „ij“ und „ji“, zeigen sich im Portfolio-Diagramm durch Abweichungen von der Winkelhalbierenden zwischen Aktiv- und Passivsumme. Sind alle Abschätzungen korrekt, so liegen die Punkte in der Nähe der Winkelhalbierenden. Bei der Anwendung der erweiterten Intensitäts-Beziehungsmatrix werden weitere Punkte dem Portfolio-Diagramm zugefügt. Diese Punkte stellen die Aktiv- und Passivsummen für

- fundierte Informationen
- sowie
- unsichere Informationen

für jede betrachtete Größe dar, was in Abb. 11.16 schematisch gezeigt wird /MAY97/.

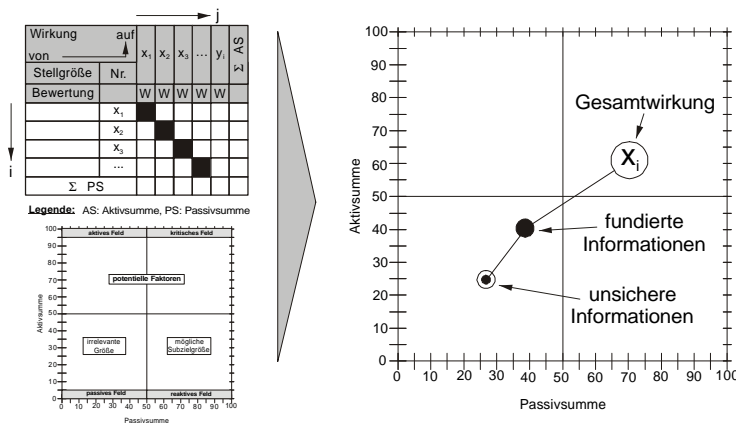


Abb. 11.16: Portfolio-Darstellung der erweiterten Intensitäts-Beziehungsmatrix /MAY97/

11.3.2.3 Festlegung von Faktoren, Steuer- und Störgrößen

Sukzessiv wurde mit den vorherstehenden Analysemethoden und der damit verbundenen Informationsbeschaffung viele Unterlagen zusammengetragen, die nun dazu dienen, eine Einteilung in Faktoren, Steuer- und Störgrößen vorzunehmen.

Dieser Schritt steht in starker Wechselbeziehung zur Festlegung/Auswahl der Versuchsstrategie (*Kapitel 11.4*). Es ist möglich, die Anzahl von Faktoren festzulegen, um dann bei der Wahl der Versuchsstrategie zu erkennen, daß die Versuchsanzahl zu hoch erscheint. An dieser Stelle sollten ggf. Faktoren gestrichen oder auch ausgetauscht werden, d.h. es ist manchmal ein iteratives Vorgehen zwischen den Phasen notwendig.

Nach erfolgter Festlegung ist zu beachten, daß nur die Faktoren eine „aktive“ Rolle im Versuchsplan einnehmen. Sowohl die Steuer- als auch die Störgrößen werden, falls die Störgrößen nicht explizit, wie z.B. bei *Taguchi*, variiert werden sollen, konstant gehalten. Jegliche Abweichungen der Steuer- und Störgrößen vom eingestellten bzw. geforderten Wert sind im Versuchsprotokoll zu dokumentieren.

Begründet werden kann diese Maßnahme durch die Zufallsstreuung. Bleiben Steuer- und Störgrößen konstant, ergibt sich im Allgemeinen eine kleine Zufallsstreuung. Damit lassen sich auch kleinste Effekte der Faktoren erkennen. Bei unkontrollierter Variation der Stell- und Störgrößen hingegen wird die Zufallsstreuung vergrößert /KLP98/.

11.3.2.3.1 Wahl der Faktorstufen

Die „richtige“ Wahl der Faktorstufen ist teilweise mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, da in der Regel nur wenige Faktorstufen festgelegt werden. Als Faustregel kann hier angeführt werden, daß bei fünf oder mehr Faktoren ($k > 6$) nur zwei Faktorstufen in die Betrachtung einfließen sollten, weil ansonsten der Versuchsumfang zu groß würde. Bei der Untersuchung von weniger Faktoren sind auch mehrere Stufen denkbar /SCH97, KLP98/.

Aufgrund von Vorkenntnissen über die Aufgaben- bzw. Problemstellung und die Teamkenntnisse lassen sich jedoch häufig sinnvolle Faktorstufengrenzen festlegen, die zum Teil durch

- apparative Gegebenheiten,
- Stoffkennwerte,
- usw.

begründet sind.

Häufig ist der Verlauf der Abhängigkeit zwischen Faktor und Zielgröße(n) nicht bekannt sondern beruht auf Vermutungen (*Abb. 11.12*), so daß folgende Zusammenhänge von Bedeutung sind:

- Mit zwei Faktorstufen wird eine Linearisierung vorgenommen. Damit kann identifiziert werden, welcher Faktor wichtig ist, wie groß der lineare Effekt bezüglich der Zielgröße ist und welche Faktorstufe günstig ist.
- und

- Mit drei (oder mehr) Faktorstufen ist es zusätzlich möglich, ein Minimum oder Maximum zu finden /SCH97, KLP98/.

Als Hilfestellung enthält *Abb. 11.17* Skizzen zur Auswahl/Festlegung eines geeigneten Stufenabstandes.

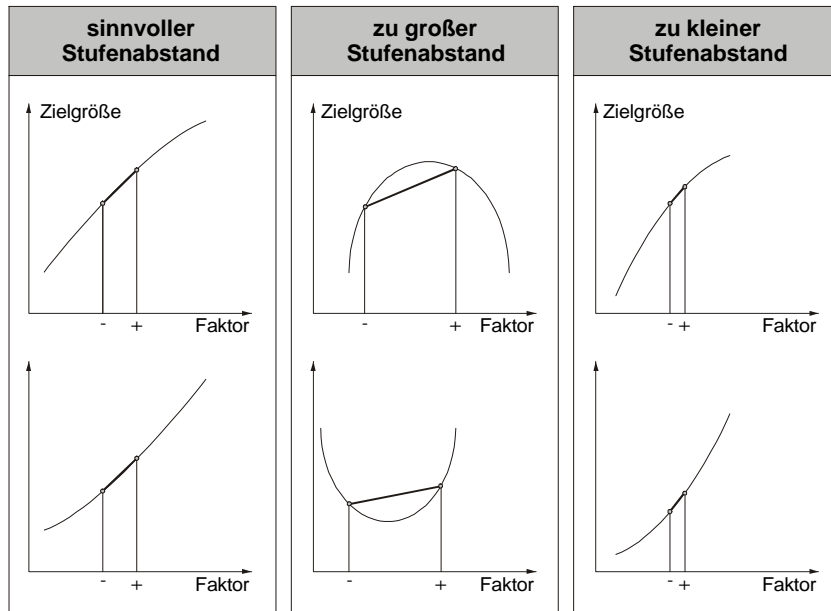


Abb. 11.17: Wahl des Faktorstufenabstandes /FLA95/

11.3.2.3.2 Störgrößenbehandlung

Es wurde bereits angesprochen, daß Störgrößen nur mit erhöhtem technischen oder wirtschaftlichen Aufwand oder aber in vielen Fällen gar nicht zu kontrollieren sind. Da häufig die Auswirkungen nicht vorhersehbar und eher zufällig auftreten, sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um den Einfluß möglichst gering zu halten.

Verschiedene Möglichkeiten im Umgang mit Störgrößen sind in *Tab. 11.4* aufgelistet. Sollen Störgrößen nicht explizit in einen Versuchsplan eingebaut werden (als Faktor oder bei *Taguchi* im „outer-array“), lassen sich Störgrößen experimentell bzw. statistisch ausschalten oder miterfassen.

Störfaktor	Kontrolle	
	experimentell	statistisch
ausschalten	konstanthalten	Randomisierung
miterfassen	Blockbildung	Kovarianzanalyse

Tab. 11.4: Behandlung von Störgrößen /PET91b/

11.4 Versuchsstrategie

Bei der Phase „Versuchsstrategie“ handelt es sich um die Auswahl einer Methode, eines Verfahrens oder eines Versuchsplans aus dem vielfältigen Spektrum der statistischen Versuchsplanung. Beruhend auf den zuvor durchgeführten Phasen wurden systematisch Zielgrößen, Faktoren, Steuer- und Störgrößen erarbeitet.

Aufbauend auf dieser Strukturierung und Informationsbeschaffung soll nun ein geeigneter Versuchsplan bzw. ein Verfahren identifiziert werden, welches bei einem gewissen Nutzen-/Aufwand-Verhältnis eine Lösung der Aufgaben- bzw. Problemstellung liefert.

Um eine „optimale“ Versuchsmethode auszuwählen, müssen Aspekte wie

- Anzahl der Zielgrößen,
- Anzahl, Art und Beschaffenheit der Faktoren,
- Informationsgehalt der Versuchsmethode,
- maximal durchzuführende Anzahl der Versuche,
- usw.

bekannt sein, bzw. hier diskutiert werden.

Aus diesen Kenntnissen ist die Erstellung eines Versuchsplans abzuleiten, wobei noch Punkte wie

- Blockbildung,
- Randomisierung,
- Versuchsreihenfolge,
- Durchführbarkeit der Stufenkombinationen,
- Anzahl der Realisierungen,
- usw.

in die Überlegungen bzw. Erstellung einbezogen werden sollten.

Allgemein läßt sich festhalten, daß ein „optimaler“ Versuchsplan neben der Anzahl der Faktoren und deren Stufenanzahl noch vom Ziel der Untersuchung, der gewünschten Genauigkeit der Ergebnisse sowie der Größe der Zufallsstreuung abhängig ist /KLP98/.

Der wichtigste Schritt, nämlich die Überprüfung auf technische Machbarkeit des Versuchsplans erfolgt nach der Versuchsplanerstellung. Insbesondere sollte hierbei überprüft werden, ob die Faktorstufenkombinationen in der Realität auch tatsächlich einstellbar und durchführbar sind, denn die Versuche verursachen gewöhnlich die meisten Kosten bei einem Versuchsplanungsprojekt (siehe auch *Kapitel 13.8* bzw. *Abb. 13.6*).

Weitere wichtige Aspekte, die ebenfalls zu prüfen sind, lauten:

- Meß- bzw. Prüfmittelfähigkeit,
- Personalbedarf zur Versuchsdurchführung,
- Materialbedarf zur Versuchsdurchführung,
- Einhaltung der Budgetplanung,
- usw.

11.4.1 Auswahl einer Versuchsmethode

Nachdem zuvor viele Informationen zusammengetragen worden sind, geht es nun um die Wahl einer Versuchsstrategie aus einem reichhaltig bestückten Werkzeug- bzw. Methodenbaukasten. Eins muß zugleich angemerkt werden. Es gibt nicht das beste Verfahren oder die beste Methode. Vielmehr richtet sich die Auswahl nach der Aufgaben- bzw. Problemstellung. Die statistische Versuchsplanung ist daher als eine Art Sammlung vieler Verfahren und Ideen zu verstehen, aus denen selektiert werden kann.

In den Kapiteln 5–10 wurden

- klassische Verfahren⁶,
 - D-optimale Versuchspläne,
 - Mischungsversuchspläne,
 - Verfahren zur experimentellen Optimumsuche,
 - die Taguchi-Methode
- sowie
- die Shaninin-Methodik

beschrieben.

Diese Gliederung und Auswahl wurde gewählt, da es sich bei diesen Verfahren und Methoden um die gängigsten und gebräuchlichsten des Themenkomplexes der statistischen Versuchsplanung handelt.

Zum besseren Verständnis und Veranschauung des Anwendungsfeldes enthält *Abb. 11.18* ein Flow-Chart, d.h. einen schematischen Einstiegspunkt in eine entwickelte „Versuchsplanungslandkarte“, die sich über die *Abb. 11.19–Abb. 11.26* erstreckt und immer feiner unterteilt wird. Damit soll ein geeignetes Verfahren, beruhend auf den vorhandenen Informationen und der „Selektions- und Festlegungsphase“, identifiziert werden. Leitfragen innerhalb der „Versuchsplanlandkarte“ wirken hierbei unterstützend.

Weiterhin ist in jedem der Kapitel 5-10 eine Zusammenstellung von Charakteristika der Verfahren, Methoden und Versuchspläne in Tabellenform, teilweise mit Angabe von durchzuführenden Versuchen, abgedruckt:

- Charakteristika Einfaktorpläne *Tab. 5.10*,
 - Charakteristika klassische Pläne *Tab. 5.11*,
 - Versuchsanzahl klassischer Pläne *Tab. 5.12*,
 - Charakteristika D-optimaler Pläne *Tab. 6.4*,
 - Versuchsanzahl D-optimaler Pläne *Tab. 6.5*,
 - Charakteristika Experimentelle Optimumsuche *Tab. 7.2*,
 - Charakteristika Mischungspläne *Tab. 8.7*,
 - Charakteristika *Taguchi* *Tab. 9.3*
- sowie
- Charakteristika *Shainin* *Tab. 10.3*.

⁶ Hierzu zählen: Einfaktor Versuchspläne, statistische Versuchspläne erster Ordnung für „Screening“-Anwendungen und statistische Versuchspläne zweiter und dritter Ordnung für Untersuchungen im Optimalgebiet.

Diese Tabellen stellen Hilfsmittel dar, um schnell einen Eindruck über die verschiedensten Verfahren, Methoden und Versuchspläne zu erhalten. Sie stellen allerdings eine subjektive Betrachtung dar, die je nach Betrachter Abweichungen aufweisen kann.

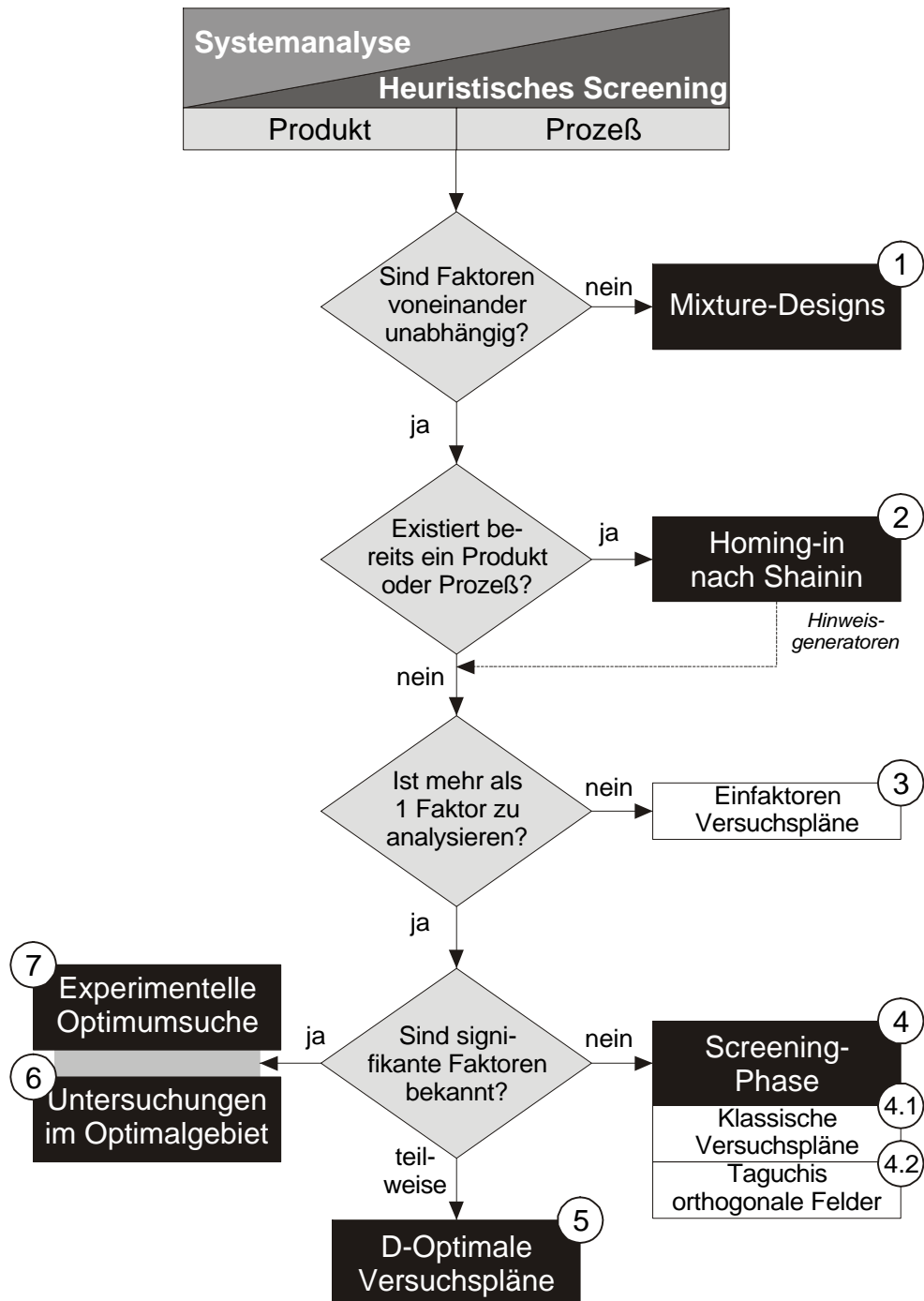


Abb. 11.18: Übersicht und Einstiegspunkt zur „Versuchsplanlandkarte“

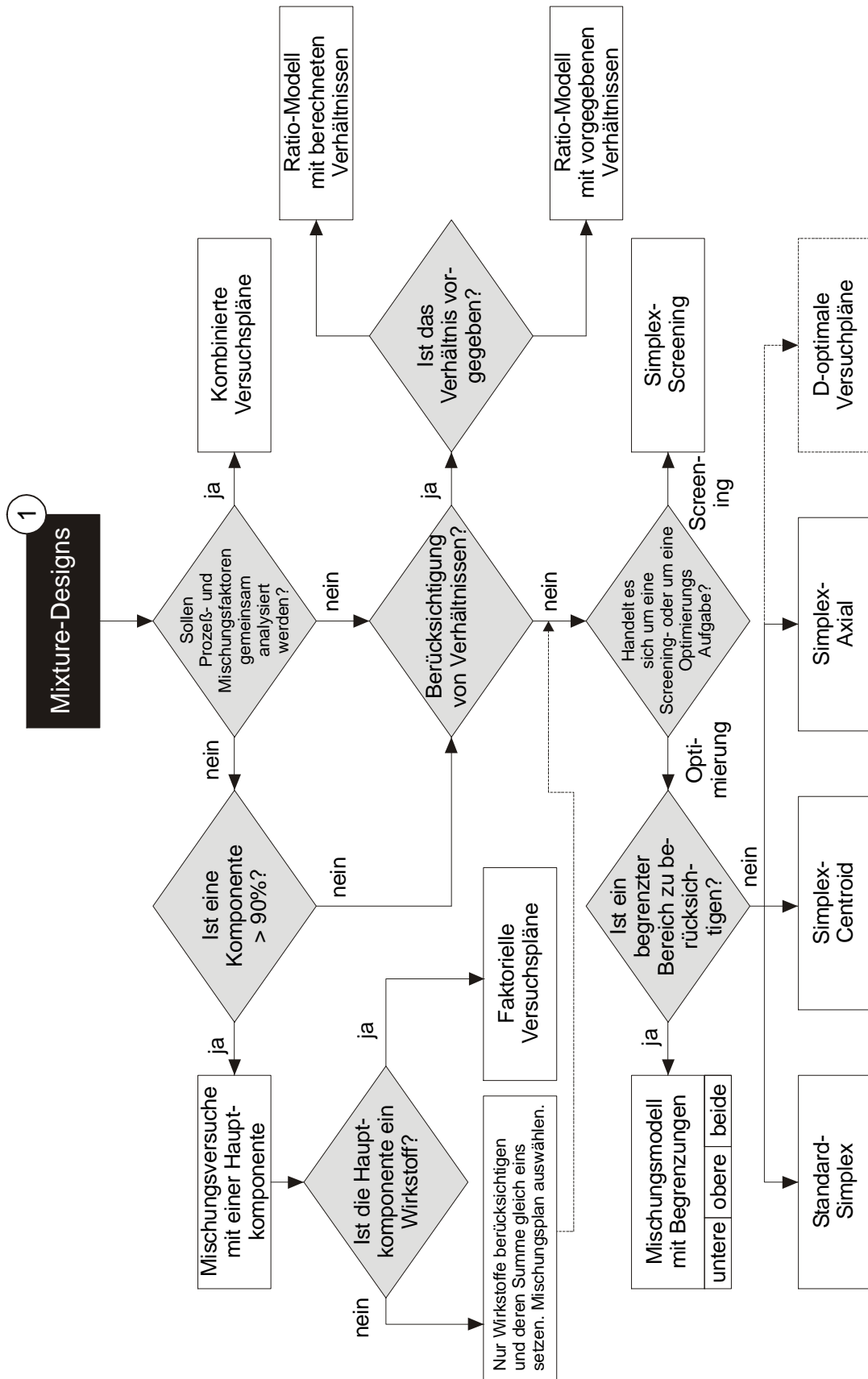


Abb. 11.19: Versuchsplanlandkarte Teil „Mixture-Designs“

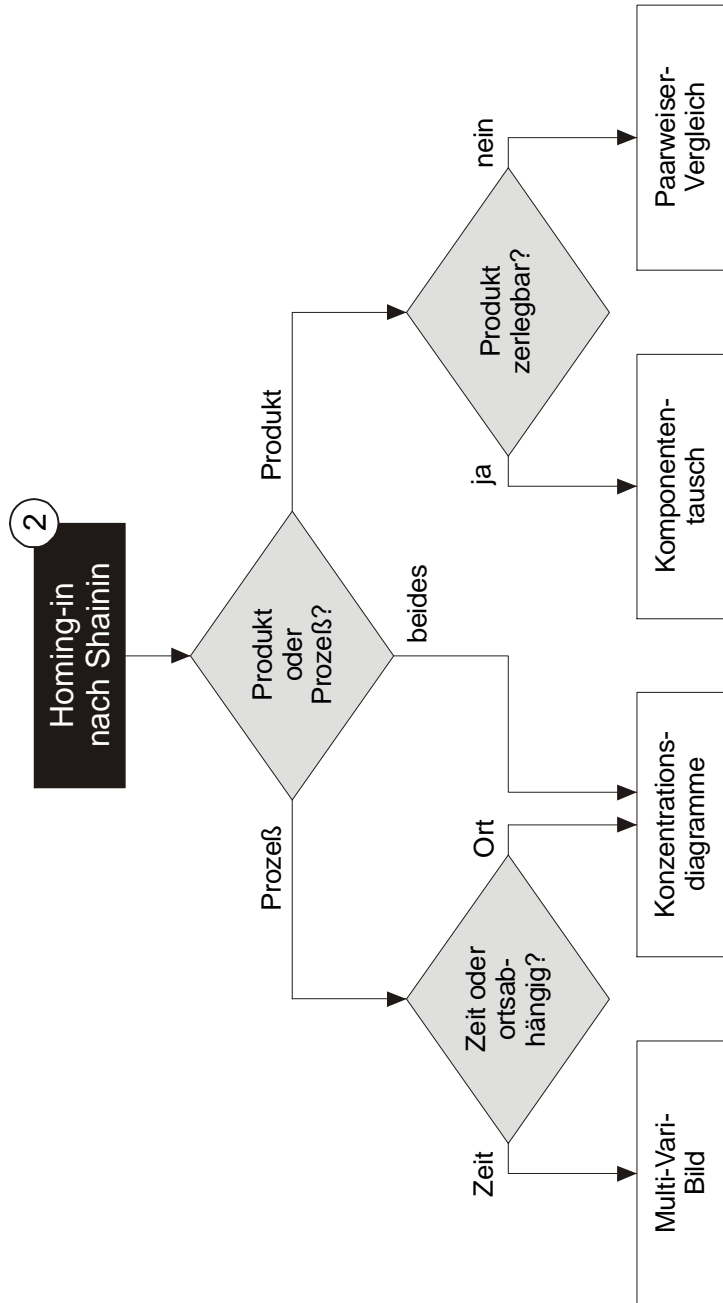


Abb. 11.20: Versuchsplanlandkarte Teil „Homing-in nach Shainin“

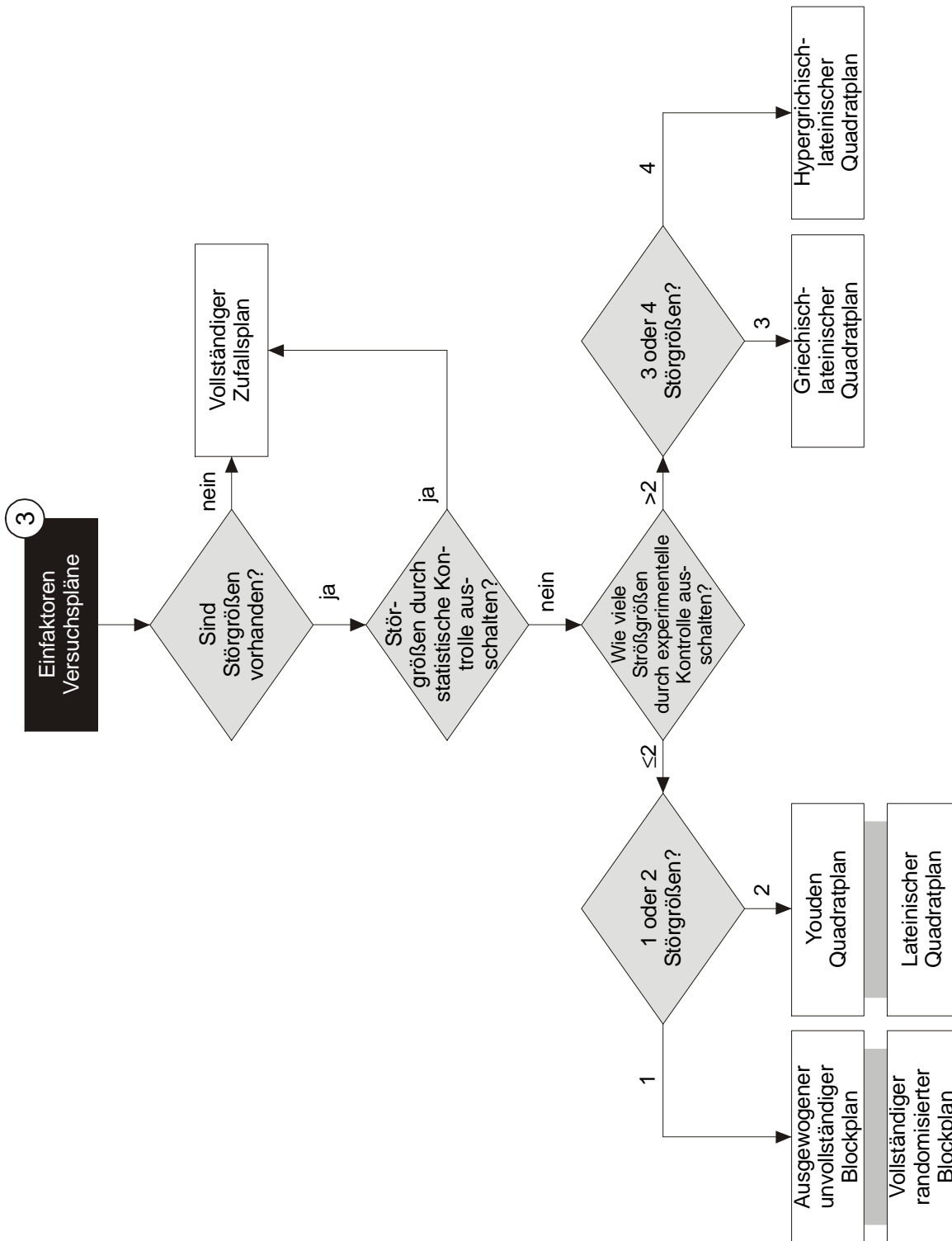


Abb. 11.21: Versuchsplanlandkarte Teil „Einfaktoren Versuchspläne“

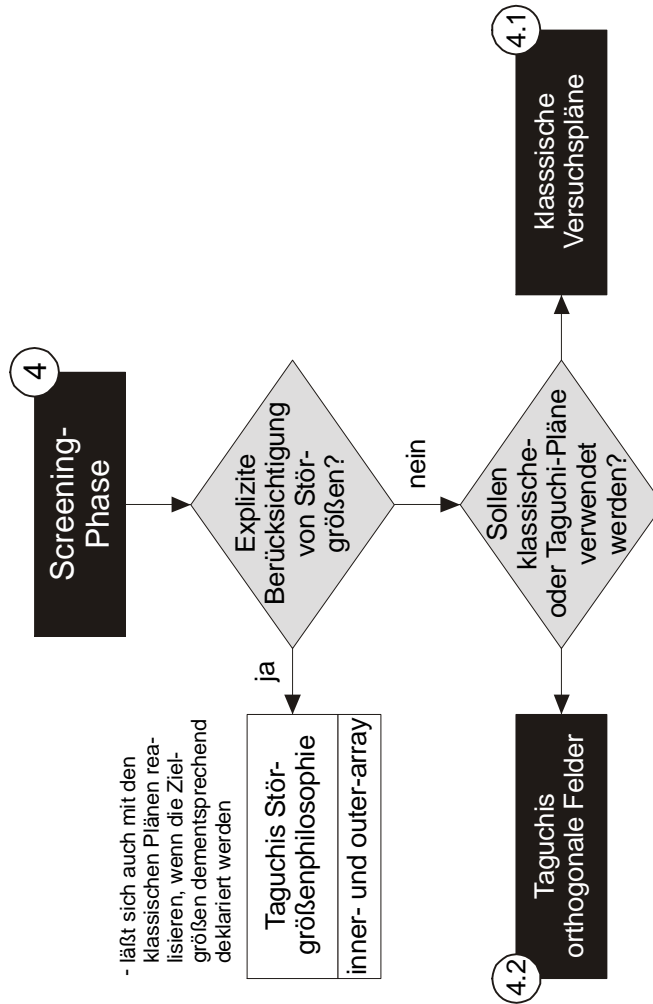


Abb. 11.22: Versuchsplanlandkarte Teil „Screening-Phase“

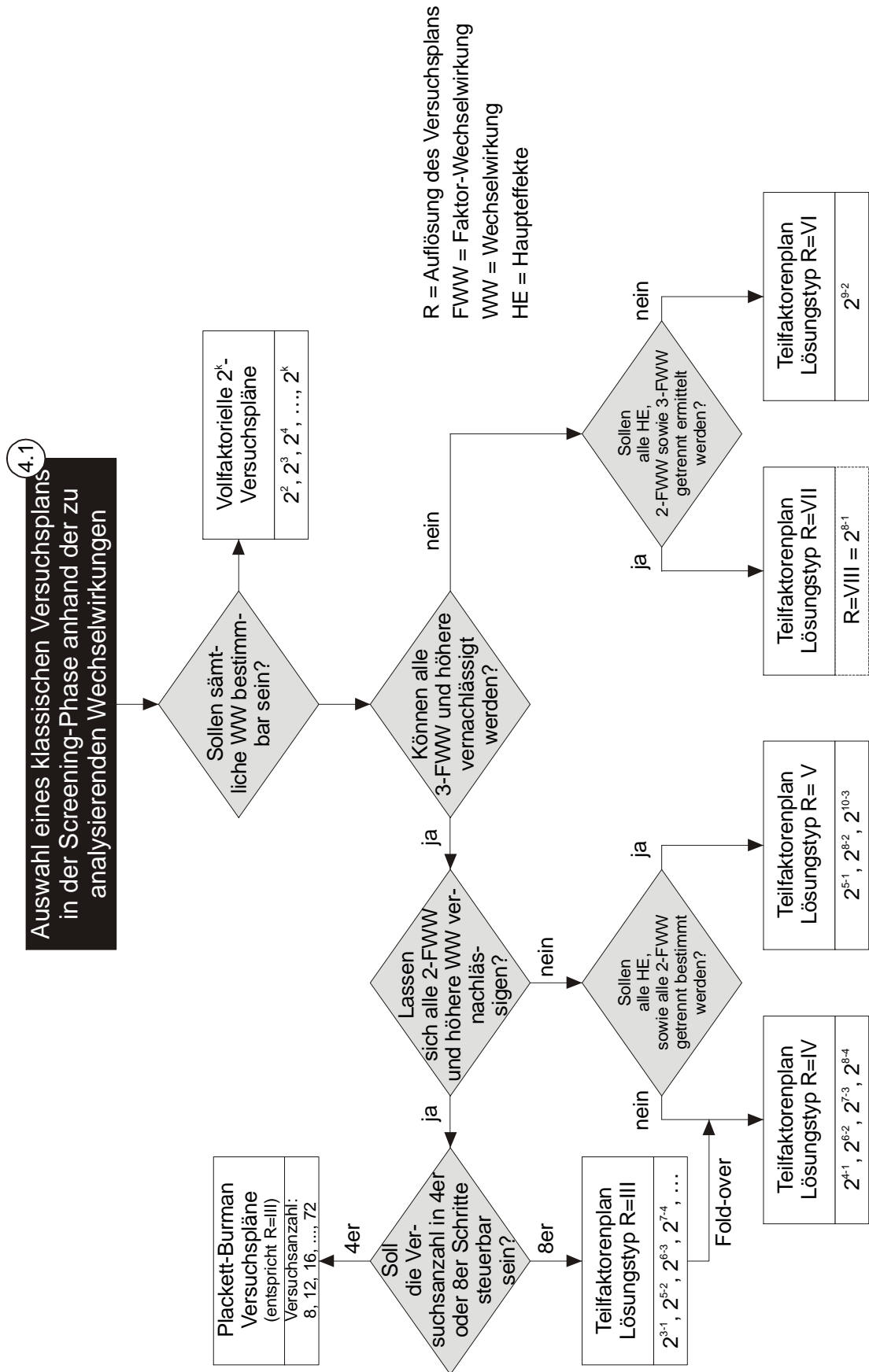


Abb. 11.23: Versuchsplanlandkarte Teil „klassische Versuchspläne“

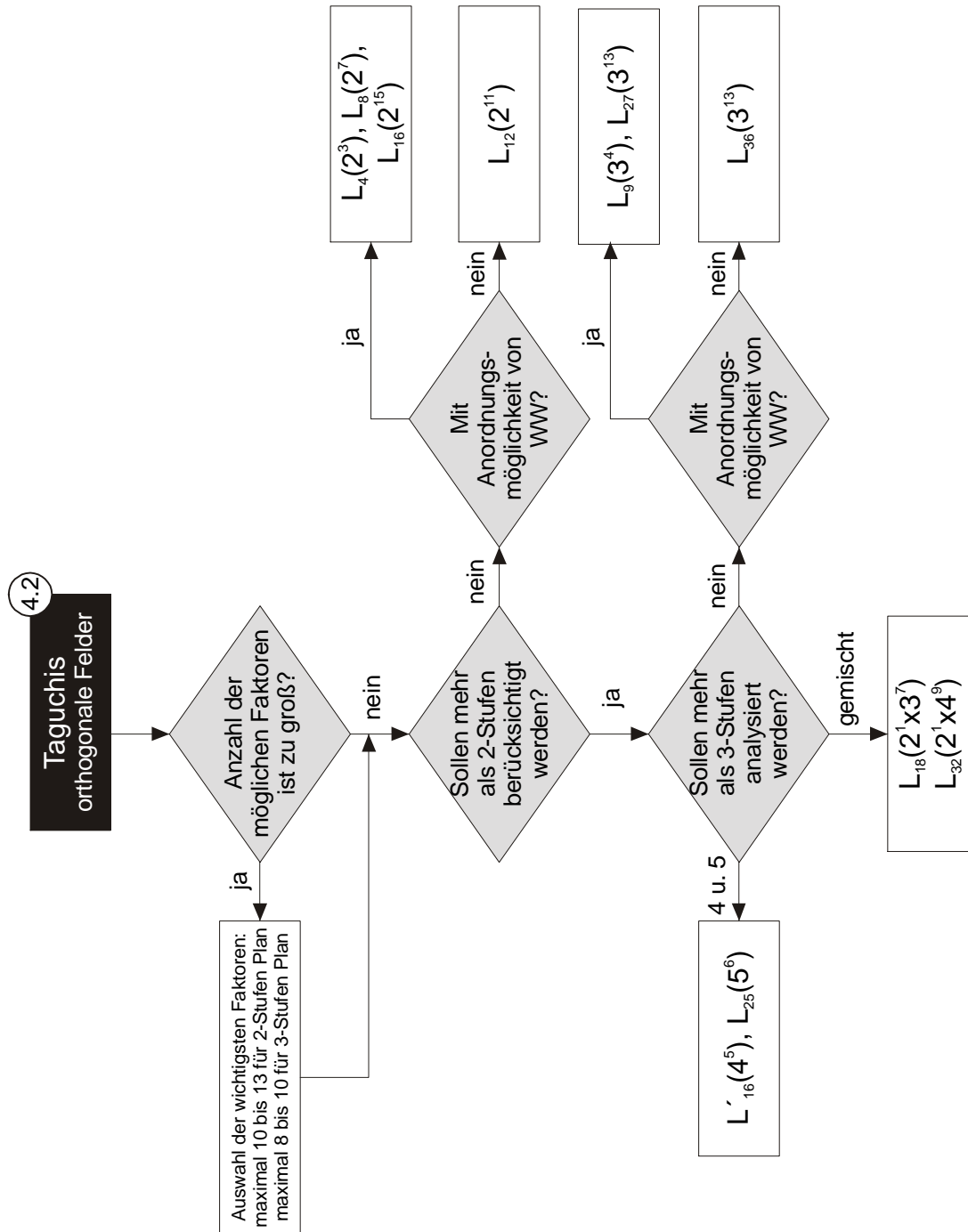
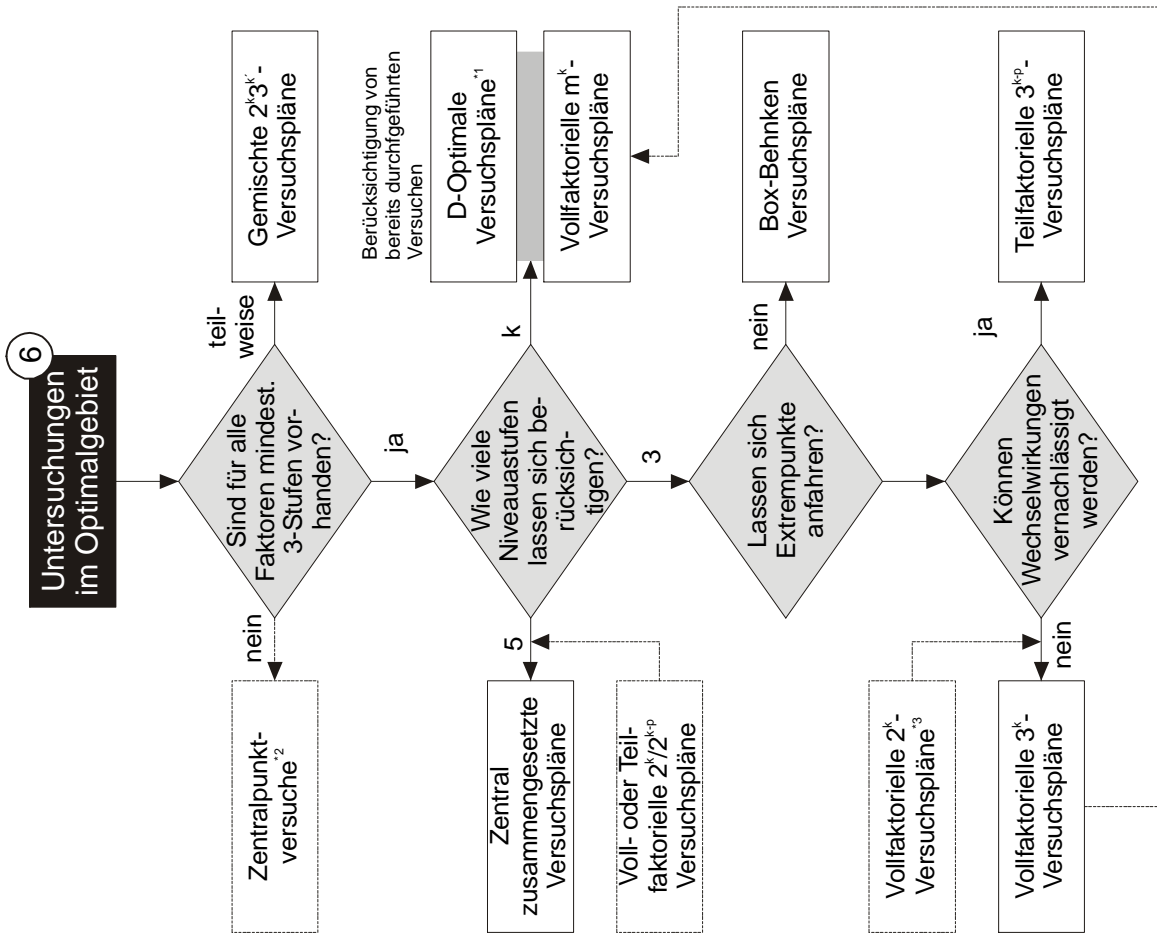


Abb. 11.24: Versuchsplanlandkarte Teil „Taguchis orthogonale Felder“



- nur sauber durchführbar, wenn "quantitative" Faktoren
- Regressionsansatz zur Beschreibung der Zielgröße(n)

¹ = beliebige Anzahl Stufen; Modellgleichung muß vorhanden sein bzw. aufgestellt werden; qualitative und quantitative Stufen können bearbeitet werden

² = Ergänzung und Abschätzung von eventuell vorhandenen Nicht-linearitäten sowie der Versuchsstreuung

³ = wenn reproduzierbare Versuchsbedingungen vorliegen

Abb. 11.25: Versuchsplanlandkarte Teil „Untersuchungen im Optimalgebiet“

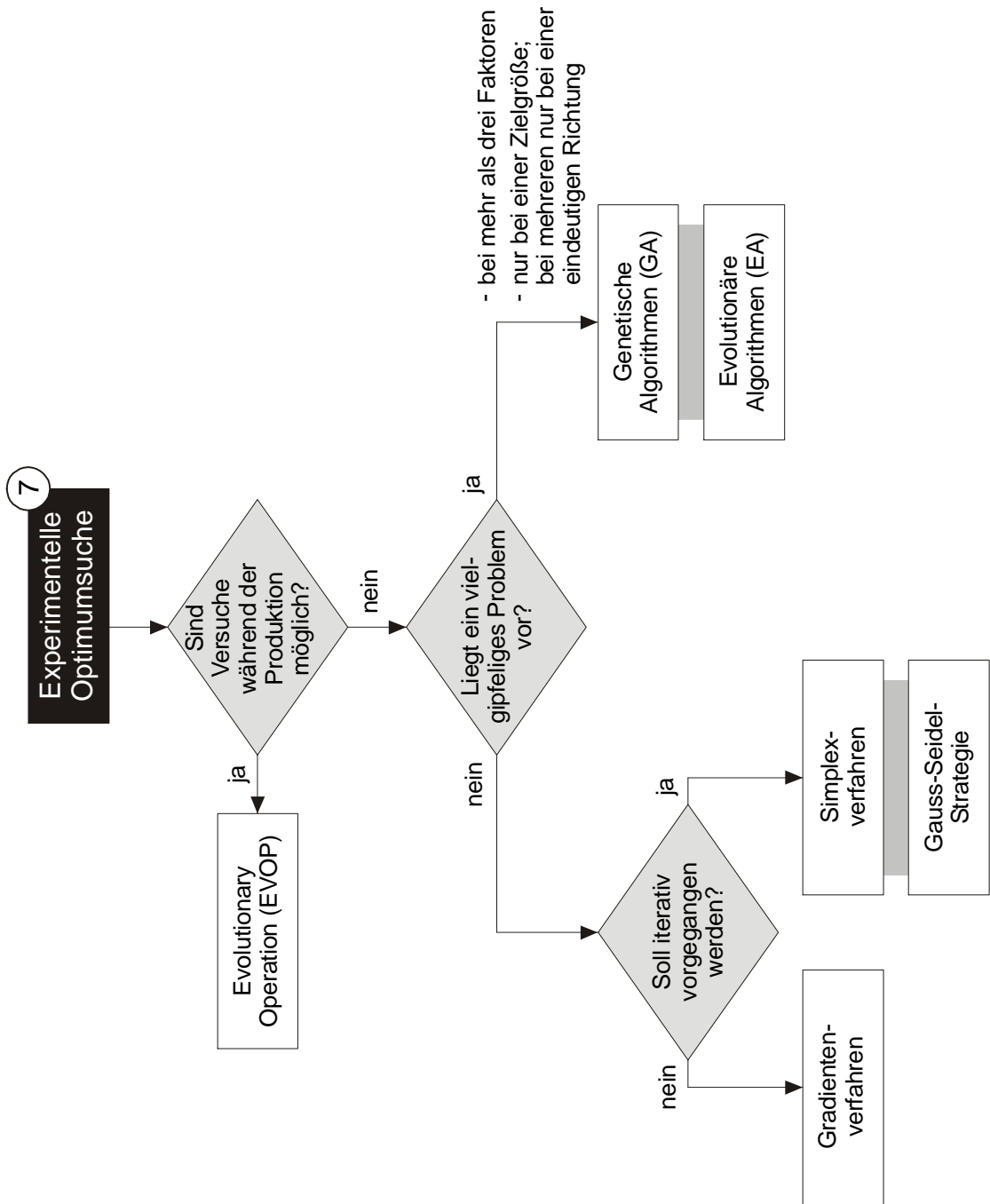


Abb. 11.26: Versuchsplanlandkarte Teil „Experimentelle Optimumsuche“

11.4.2 Versuchsplanerstellung

Die Versuchsplanerstellung schließt sich an die „Auswahl einer Versuchsstrategie bzw. –methode“ an. Dabei besteht, wie ausgeführt, eine starke Abhängigkeit vom Untersuchungsziel sowie von der Anzahl der Faktoren und Faktorstufen /KLP98/.

Der nun zu erstellende Versuchsplan stellt sozusagen die Versuchsvorschrift für die durchzuführenden Experimente dar. Zu dessen Erstellung wird meistens auf Softwareprogramme⁷ zurückgegriffen, die unterschiedliche Vor- aber auch Nachteile aufweisen.

Handelt es sich um Standardpläne, *Shainin*- oder *Taguchi*-Anwendungsfälle, können tabellierte Pläne bzw. Versuchsvorschriften aus /PET91c, PHA89, BHO90/ verwendet werden.

11.4.2.1 Umfang des Versuchsplans

Bei der Frage nach dem Gesamtumfang eines Versuchsplans drängt sich die Diskrepanz zwischen den

- notwendigen Kosten für die Versuche (möglichst gering) und
- der statistisch sinnvollen Stichprobengröße

in den Vordergrund.

Ein Fehler der häufig gemacht wird, ist, daß aus Zeit- und Kostengründen auf Versuche verzichtet wird, und anschließend die Enttäuschung groß ist, wenn die Aussagekraft der Versuchsergebnisse dementsprechend gering ausfällt. Allgemein sollte folgende Leitregel verinnerlicht werden:

- Je größer die Versuchsstreuung ist, desto mehr Versuche sind durchzuführen. sowie
- Je kleiner das Fehlerrisiko ausfallen soll, desto mehr Versuche sind durchzuführen.

In *Kleppmann* /KLP98/ und *Scheffler* /SCH97/ ist eine Daumenregeln verzeichnet, die zur Bestimmung der mindestens notwendigen Einzelversuche verwendet werden kann. Diese lautet:

$$N \approx 60 \cdot \left(\frac{\sigma}{\Delta\mu} \right)^2. \quad (11.1)$$

Darin steht σ für die Standardabweichung und $\Delta\mu$ für den technologisch relevanten Effekt. Mit Hilfe der Beziehung

$$N \approx r \cdot n \quad (11.2)$$

⁷ z.B.: Modde, Statistica, Design Expert, RS/1, Cornerstone, usw.

läßt sich im weiteren noch die Anzahl der Realisierungen „r“ bestimmen, die neben der Anzahl der benötigten Einzelversuche „N“ noch von der Anzahl der Faktorstufenkombinationen „n“ abhängig ist.

11.4.2.2 Festlegung der Versuchsreihenfolge

Durch die Festlegung einer Versuchsreihenfolge soll erreicht werden, daß Versuchsbedingungen vergleichbar sind, um beispielsweise Schwankungen der Faktoreffekte, Wechselwirkungen, usw. möglichst gering zu halten. Diese Schwankungen können aus unterschiedlichen Materialchargen, Maschinen, usw. resultieren.

Tritt aufgrund uneinheitlicher Versuchsbedingungen eine Vergrößerung der Versuchsstreuung auf, so besteht die Gefahr, daß kleine Effekte der Faktoren nicht mehr erkannt werden. Darüber hinaus kann es vorkommen, daß z.B. die Materialcharge nicht für alle Versuche ausreicht und eine zweite hinzugenommen werden muß. Auch dadurch können Verfälschungen entstehen. In *Abb. 11.27* sind beide Problemstellungen mit Lösungsansätzen abgebildet.

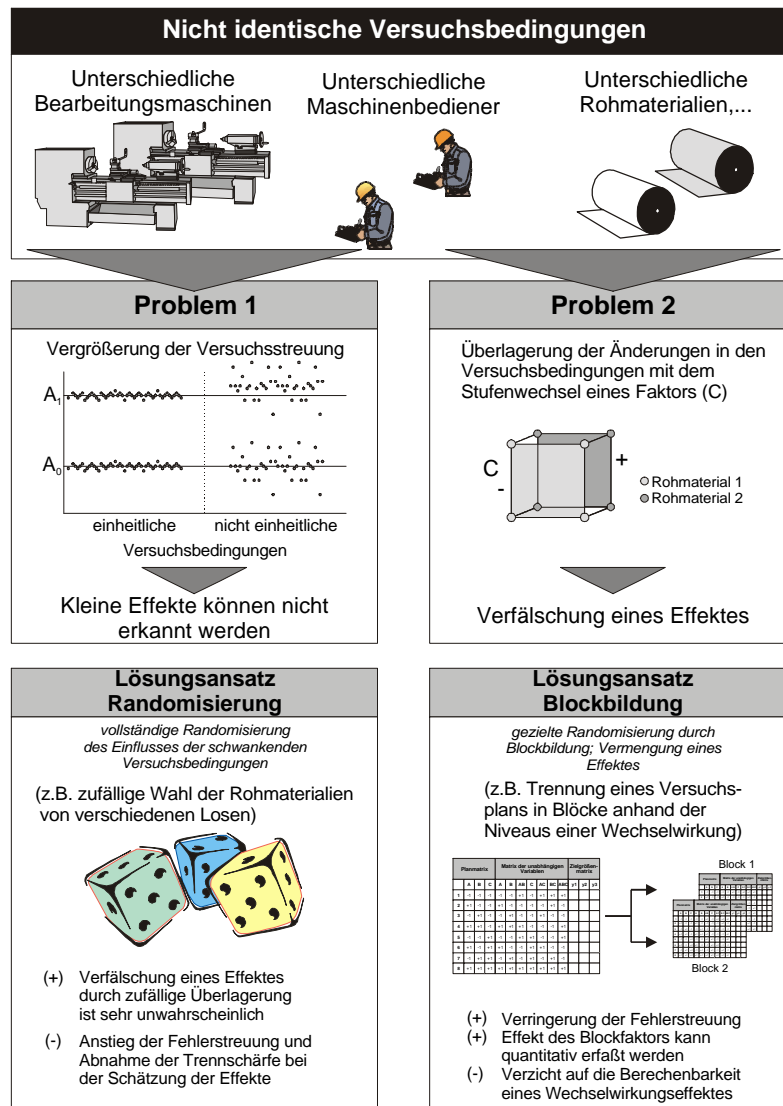


Abb. 11.27: Nichtidentische Versuchsbedingungen /CER95/

Zum einen handelt es sich um die Randomisierung. Unter Randomisierung ist eine zufällige Durchführung der Versuche zu verstehen, die verhindern soll, daß Trends, Unterschiede in der Beschaffenheit der Rohmaterialien, usw. die Schätzung von Faktoreffekten verfälschen. Die anhand von Zufallszahlen festgelegte Reihenfolge ist unbedingt einzuhalten, da eine nachträgliche Veränderung der Reihenfolge das Risiko einer Ergebnisverfälschung hervorruft.

Bei der anderen Lösungsmöglichkeit handelt es sich um die Blockbildung, die eine Unterteilung eines Versuchsplans in kleinere Gruppen, sogenannte Blöcke, ermöglicht. Durch diese Blöcke ist die Chance gegeben, daß jeder Block unter identischen Versuchsbedingungen realisiert werden kann /CER95/.

11.4.3 Überprüfung auf praktische Umsetzbarkeit

Die Überprüfung auf praktische Umsetzbarkeit ist (einer) der wichtigsten Schritte, da die bisher verursachten Kosten vergleichsweise gering sind, denn die anschließende Versuchsdurchführung stellt häufig den größten Kostenfaktor dar (siehe auch *Kapitel 13.4*). Anhand von Aspekten, wie

- Einhaltung des Budgets,
- Personalbedarf,
- Materialbedarf,
- Durchführung aller Stufenkombinationen,
- Fähigkeit der Meß- und Prüfmittel,
- usw.,

sollte überprüft werden, ob Probleme bei der Versuchsdurchführung auftreten können, was wiederum eine Verschlechterung der Versuchsergebnisse zur Folge haben könnte. Änderungen lassen sich hier ggf. noch ohne größeren Aufwand oder Kosten durchführen.

11.5 Versuchsdurchführung

Nachdem der Versuchsplan erstellt wurde, steht jetzt die Versuchsdurchführung bevor. Zuvor sind jedoch noch vorbereitende Maßnahmen zu treffen.

Zur Durchführung der Versuche muß genügend Versuchsmaterial vorhanden sein bzw. beschafft werden. Die Spezifika des Versuchsmaterials wie z.B. Hersteller, Herkunftsort, Charge, usw., sind auf jeden Fall in der Projektmappe zu dokumentieren. Es ist weiterhin darauf zu achten, daß nur einwandfreies Versuchsmaterial verwendet wird, um zweifelhaften Ergebnissen vorzubeugen. Wenn das Versuchsmaterial aus Stichproben einer laufenden Fertigung besteht, so ist sicherzustellen, daß es sich um eine zufällige wie auch um eine repräsentative Entnahme handelt.

Vielfach sind später ergänzende Versuche oder Bestätigungsversuche erforderlich. Daher sind ausreichend Referenzmuster und Rücklagen einzuplanen, vor allem, wenn es sich um spezielle Materialien handelt, die nicht jederzeit verfügbar sind. Außerdem sollten sie unverwechselbar gekennzeichnet sein.

Zudem sind Protokollblätter anzufertigen, die passend zum Versuch, alle Meßergebnisse und Beobachtungen aufnehmen können, falls der Versuchsplan dazu keinen Platz bietet.

Weiterhin ist es sinnvoll, nur qualifiziertes Fachpersonal zur Versuchsrealisierung einzusetzen. Falls kein ausreichend qualifiziertes Personal verfügbar ist, sind frühzeitig Schulungen abzuhalten, um eine reibungslose und fehlerfreie Durchführung und Maschinenbedienung zu gewährleisten /TÜV00/

11.5.1 Kennzeichnung der Versuchsteile

Ebenfalls zu den vorbereitenden Maßnahmen gehört die Kennzeichnung der Versuchsteile. Diese sind so zu kennzeichnen, daß sie eindeutig identifizierbar sind und dem Versuchsplan zugeordnet werden können. Die Kennzeichnung sollte sich auf die Versuchsbedingungen und die -reihenfolge beziehen.

Während der Versuche oder auch später besteht die Gefahr, daß die Kennzeichnung Schaden nimmt oder sogar verloren geht. Daher ist die Kennzeichnung so anzubringen bzw. zu wählen, daß sie unter allen Bedingungen vorhanden bleibt. Wird eine Verschlüsselung zur Kennzeichnung verwendet, ist diese den Versuchsunterlagen beizufügen /TÜV00/.

11.5.2 Meßmittelüberprüfung

Zur Vorbereitung der Versuchsdurchführung gehört auch die Überprüfung und Inbetriebnahme der Meßmittel bzw. Meßeinrichtung, d.h. die Meßinstrumente und -geräte müssen vorschriftsmäßig aufgestellt und angeschlossen werden /HAT89/.

Außerdem sollte nochmals validiert werden, ob die Meßmittel richtig gewählt worden sind. Aspekte die dazu wichtig sind, lauten:

- Bestimmungsgröße und Beanspruchung,
- Empfindlichkeit und Genauigkeit,
- Fremdeinflüsse, Sauberkeit, Vermeidung von unerwünschten Korrelationseffekten,
- sichere Handhabung (Verminderung von unerwünschten Fehlern)

sowie

- rationelles Arbeiten bei größeren Serien /TÜV00/.

Vor Beginn der eigentlichen Versuchsreihen müssen alle Meßgeräte noch einmal überprüft und ggf. kalibriert werden, damit sich keine systematischen Fehler einschleichen. Auch eine Funktionsüberprüfung ist durchzuführen.

Zur Überprüfung der Meßgeräte können auch Testversuche gemacht werden. Diese sind allerdings unter gleichen Bedingungen zu realisieren, wie die nachfolgenden Versuchsreihen /TÜV00/.

11.5.3 Durchführung aller Versuche (wie festgelegt)

Die Durchführung des Versuchsplan sollte streng nach den Vorgaben geschehen. Jede neue Versuchseinstellung ist mit dem generierten Versuchsplan zu vergleichen, um Fehlern vorzubeugen. Wenn Änderungen am Versuchsplan oder an der Versuchsreihenfolge während der Versuchsdurchführungen gemacht werden, können die Ergebnisse der gesamten Versuchsreihe in Frage gestellt werden bzw. verfälscht sein. Daher ist sich strikt an den Versuchsplan zu halten, denn die spätere statistische Auswertung ist kein Ersatz für fehlende Sorgfalt.

Verursacht ein Mitarbeiter bei der Versuchsdurchführung einen Fehler, so sollte, wenn möglich, der Versuch wiederholt werden. Voraussetzung ist allerdings, daß genügend Material vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall, muß der Versuchs- bzw. Projektleiter entscheiden, was getan werden soll. Gegebenenfalls werden die Versuche weitergeführt, aber später einer gesonderten Betrachtung unterzogen. Der fehlerhafte Versuch ist auf jeden Fall kenntlich zu machen /TÜV00/.

Um Streuungen zu vermeiden, sollten die Umgebungsbedingungen konstant bleiben. Es kann auch hilfreich sein, die Versuche von ein und der selben Person durchführen zu lassen, denn ein Mitarbeiterwechsel führt ggf. zu fehlerhaften Ergebnissen bzw. zu Streuungen. Ist ein Wechsel unumgänglich, ist dieser der Dokumentation beizufügen oder der Effekt durch Blockbildung mitzuerfassen /KLP98/.

Werden große Versuchsreihen abgearbeitet, sollte der Versuchs- und Meßaufbau regelmäßig kontrolliert werden. Um dies sicherzustellen, kann es hilfreich sein, einen Überwachungsplan, bezogen auf den Versuchsplan, zu erstellen /TÜV00/.

11.5.4 Meßdatenerfassung

Heutzutage stehen oft modernste Geräte und Anlagen zur Verfügung, die Möglichkeiten zur automatischen Datenerfassung und –ablage bieten. Meßwerte, die nicht aus Datenbanken oder online-Aufzeichnungen stammen, müssen explizit abgelesen und in das Datenblatt bzw. in die im Versuchsplan vorgesehenen Spalten eingetragen werden. Diese Werte werden später mit Softwareprogrammen zur statistischen Versuchsplanung ausgewertet. Bei der Übertragung von Hand ist größte Sorgfalt geboten, damit Versuchsergebnisse auch dem richtigen Versuch zugeordnet werden.

Neben der Auswahl eines Meßmittels ist bei der Meßdatenerfassung die „Fähigkeit“ des Meßgerätes ein entscheidender Faktor. Forderungen an Meßgeräte hinsichtlich

- Wiederholbarkeit,
- Genauigkeit,
- usw.

gehören ebenso zum Anforderungsprofil, wie z.B.

- geringer Aufwand zur Neujustierung,
 - hohe Verfügbarkeit
- oder
- hohe Zuverlässigkeit /BRU99, PFE01/.

Letztgenannte Punkte spielen bei der Anschaffung eine wesentliche Rolle. Hingegen ist die

- Wiederholbarkeit,
- Präzision,
- Stabilität
- usw.

für den täglichen Einsatz ausschlaggebend /DGQ98/.

Die Fähigkeit von Meßmitteln läßt sich mit unterschiedlichen Methoden nachweisen. Dazu sind zu zählen:

- Isoplot (siehe *Kapitel 10.4*),
 - Meßmittelfähigkeitsindizes,
 - Range-Methode (RM-Methode),
 - Repeatability & Reproducibility-Methode (R&R-Methode),
 - Average Range Methode (ARM-Methode)
- sowie
- Prüfmitteleignung.

Auf diese Methoden und Indizes wird nicht näher eingegangen. Vielmehr wird hier auf Fachpublikationen, wie z.B. /FKM92, DIE98, DGQ98, QSB99/, verwiesen.

11.5.5 Abweichungen jeglicher Art festhalten

Wenn während der Versuchsdurchführung Dinge geschehen, welche im Vorfeld nicht geplant waren (siehe Murphys Gesetz), ist allerhöchste Achtung geboten. Abweichungen jeglicher Art sollten im Versuchsplan vermerkt werden, auch wenn ihr Einfluß nicht sofort erkennbar ist. Bei der späteren Auswertung können sie sich als sehr nützlich erweisen.

Hierzu zählt auch die Erfassung von Faktoren, die von den vorgegebenen Werten abweichen, denn oft kann es vorkommen, das die geplanten Faktorwerte (Stufen) nicht genau eingestellt oder gehalten werden können, obwohl es so geplant war. Schwankungen können ebenfalls auftreten. Die realen Ist-Werte sind entsprechend festzuhalten.

Durch die genaue Versuchsbeobachtung und die Dokumentation jeglicher Besonderheiten oder Abweichungen ist es bei der Auswertung leichter möglich, potentielle Ausreißer zu erkennen, um diese ggf. aus den Daten zu entfernen /TÜV00/.

11.5.6 Aufbewahrung der Versuchsteile

Mindestens bis zum Abschluß des Projektes sollten die Versuchsteile aufgehoben werden. Falls nämlich bei der Versuchsauswertung oder der Validierung Ungereimtheiten auftreten, können diese Versuchsteile nochmals einer Begutachtung unterzogen werden.

Es kann durchaus sinnvoll sein, die Versuchsteile und die Meßwerte über einen längeren Zeitraum nicht zu entsorgen, damit die Daten für zukünftige Projekte, die eine ähnliche Aufgabe- bzw. Problemstellung aufweisen, Verwendung finden können.

Die Versuchsteile und deren Daten sind so aufzubewahren, daß sie keinen Schaden nehmen. Sie sind in der Art zu archivieren, daß der Aufenthaltsort jederzeit nachvollziehbar ist /TÜV00/.

11.6 Versuchsauswertung

Nach der Versuchsdurchführung sind nun Daten vorhanden, die unter Zuhilfenahme statistischer Methoden ausgewertet, analysiert und dargestellt werden können. Zur Versuchsauswertung ist es ratsam, geeignete Softwaretools zu verwenden, da manche Auswertungsschritte per Hand sehr aufwendig sind. Die hier nachfolgend beschriebene Vorgehensweise ist nicht in jeder Einzelheit zu durchlaufen, da sich je nach Versuchsmethode, Versuchsplan oder Faktorbeschaffenheit Unterschiede bezüglich der Auswertung ergeben können.

Weiterhin ist die Vorgehensweise nicht sequentiell abzuarbeiten, vielmehr ist ein iteratives Vorgehen zu empfehlen.

Nachdem die Auswertvoraussetzungen überprüft worden sind, stehen Analyseverfahren sowie die grafische und numerische Auswertung im Vordergrund. Bei der Interpretation sind die bereits in den Planungsphasen beschriebenen Systemkenntnisse und die korrekte Versuchsdaten-Versuchsobjekt-Zuordnung entscheidend. Je nachdem, wie die Ergebnisse ausfallen, kann ein Rücksprung in die Planungsphasen hilfreich sein, um eine Optimierung des Versuchsplans durch z.B. zusätzliche Versuche zu erzielen (siehe dazu auch Phasenübersicht ProStaV, *Abb. 11.1*).

Aufgrund der Vielfalt der Auswertmethoden, deren mathematischen Background sowie der zahlreichen Darstellungsmethoden kann hier nur ein Überblick gegeben werden, d.h. detaillierte Ausführungen sind in einschlägigen Publikationen, wie z.B. /PET91b, SCH97, KLP98, BOX78, BOX87, ORT01/, verzeichnet. *Tab. 11.5* enthält daher eine Gegenüberstellung der grundlegenden Verfahren zur Auswertung der Versuchsergebnisse.

Methode	Zweck
<ul style="list-style-type: none">• Effektberechnung	<ul style="list-style-type: none">• Quantifizierung von Faktoreinflüssen, Wechselwirkungen und Signifikanzbeurteilung
<ul style="list-style-type: none">• Varianzanalyse	<ul style="list-style-type: none">• Zuordnung von Streuungsursachen
<ul style="list-style-type: none">• Regressionsanalyse	<ul style="list-style-type: none">• Empirische Modellbildung
<ul style="list-style-type: none">• Residuenanalyse	<ul style="list-style-type: none">• Überprüfung der Modellqualität und Identifizierung potentieller Ausreißer

Tab. 11.5: Grundlegende Auswertverfahren und ihr Anwendungszweck /ORT01/

Ebenso bestehen noch grundlegende Darstellungsmethoden zur Beurteilung der ausgewerteten Daten, nach dem Motto: „*Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte!*“.

Methode	Zweck
<ul style="list-style-type: none"> • Korrelationsdiagramme 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufzeigen von Zusammenhängen zwischen zwei oder mehreren Größen
<ul style="list-style-type: none"> • Haupteffekt- und Wechselwirkungsdiagramme 	<ul style="list-style-type: none"> • Herausstellung von Faktoren- und Wechselwirkungseffekten
<ul style="list-style-type: none"> • Histogramm der Effekte, Wahrscheinlichkeitsnetz der Effekte 	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung und Signifikanzbeurteilung von Faktoren- und Wechselwirkungseffekten
<ul style="list-style-type: none"> • 3D-Diagramme, Höhenliniendiagramme 	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung von empirischen Modellen
<ul style="list-style-type: none"> • Wahrscheinlichkeitsnetz für Residuen 	<ul style="list-style-type: none"> • Beurteilung des Modells

Tab. 11.6: Grundlegende Darstellungsmethoden und ihr Anwendungszweck /ORT01/

Nachfolgend werden die wichtigsten Punkte zur Auswertung statistisch geplanter Versuche kurz erläutert.

11.6.1 Datenaufbereitung

Bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen wird, sollten die vorhandenen Daten auf ihre Konsistenz überprüft werden. Dabei ist zu berücksichtigen, ob die Daten ordnungsgemäß mit den Versuchseinstellungen ermittelt wurden und diesen richtig zugeordnet sind. Auch sollte darauf geachtet werden, daß bei einer handschriftlichen Übertragung keine Zahlendreher oder Kommafehler entstanden sind. Alle Auffälligkeiten sind nochmals zu überprüfen, denn nur dann ist eine reale Auswertung sinnvoll.

11.6.2 Modellsicherheit und Fehlersignifikanz festlegen

Je nachdem, wie schwerwiegend die Entscheidung ist, die aufgrund des Versuchsergebnisses gefällt werden soll, muß eine Irrtumswahrscheinlichkeit angenommen werden. Die Auswahl der Modellsicherheit und Fehlersignifikanz ist kein mathematisches Problem. Sie hängt nur von der Art der Anwendung ab. Es muß also geklärt werden, wie groß das Risiko einer falschen Aussage sein darf.

Üblicherweise wird in technischen Bereichen eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$ angenommen /PET91a/. Das Vertrauensniveau beträgt also 95 %. Dies bedeutet, daß die berechneten Vertrauensbereiche in 95 % aller Fälle den gesuchten Parameter überdecken.

In speziellen Fällen kann es auch vorkommen, daß eine wesentlich kleinere Irrtumswahrscheinlichkeit gefordert ist. Diese beträgt dann üblicherweise $\alpha = 1\%$ oder $\alpha = 0,1\%$. Je kleiner allerdings die Irrtumswahrscheinlichkeit gewählt wird, desto mehr Versuche werden benötigt.

11.6.3 Überprüfung der Auswertvoraussetzungen

11.6.3.1 Test auf Normalverteilung

Die meisten Verfahren zur Auswertung von statistischen Versuchsplänen sind nur anwendbar, wenn die Versuchsdaten (y_i) normalverteilte Zufallsgrößen sind /SCH97/. Als normalverteilt werden Meßwerte dann bezeichnet, wenn sie sich um einen zentralen Punkt ballen, wenn sie im gleichen Maße positiv und negativ von diesem zentralen Punkt abweichen und deren Häufigkeit mit zunehmender Abweichung von dem zentralen Punkt abnimmt.

Zur Überprüfung kann zum einen ein überschlägiger Test oder numerische Prüfverfahren nach *Shapiro* und *Wilk* /PET91a/ angewendet werden. Bei der grafischen Variante werden die Meßwerte der Größe nach geordnet und ihre zugehörigen %-Werte nach der Formel

$$\text{Prozentwert} = \frac{i - 0,5}{N} \cdot 100 \% \quad (11.3)$$

bestimmt.

Diese Werte werden anschließend im Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen. Wenn alle Punkte näherungsweise auf der durch die Punkte

- $\mu = 50 \%$,
 - $\mu - \sigma = 15,9 \%$
- und
- $\mu + \sigma = 84,1 \%$

festgelegten Gerade liegen, gilt die Meßreihe als normalverteilt, wie *Abb. 11.28* verdeutlicht.

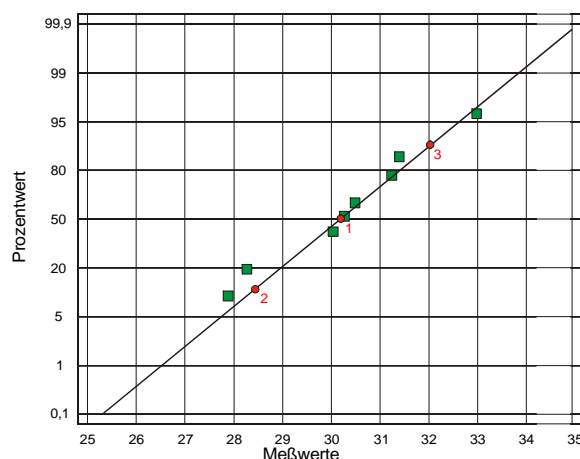


Abb. 11.28: Wahrscheinlichkeitsnetz

Liegt ein Wert weitab von der Geraden der restlichen Meßwerte, so handelt es sich vermutlich um einen Ausreißer. Sind die Meßwerte so angeordnet, daß sie deutlich von der Geraden abweichen, entstammen sie höchstwahrscheinlich aus einer nicht normalverteilten Grundgesamtheit /PET91a/. Eine Transformation kann jetzt hilfreich sein.

11.6.3.2 Transformation von Meßwerten

Wie bereits angeführt, werden für die Analyse normalverteilte Versuchsergebnisse benötigt. Sollten diese nicht vorliegen, d.h. starke Abweichungen der Versuchsanwort von der Normalverteilung vorhanden sein oder eine Abhängigkeit der Standardabweichung von den Modellschätzern bestehen, müssen die Meßwerte der Normalverteilung angepaßt werden. Bei der Transformation der Daten werden die ursprünglichen Versuchs-/Zielgrößen durch neue, mit Hilfe von mathematischen Funktionen erzeugte, Werte ersetzt. Diese transformierten Daten werden anschließend an Stelle der ursprünglichen Versuchsanworten bei der Auswertung eingesetzt /KLP98/. In Tab. 11.7 ist eine Übersicht möglicher Transformationen wiedergegeben, die je nach Ausgangslage Anwendung finden.

Transformationen	l	Einsatzgebiet	Gleichung
Power-Transformation	$-\infty - +\infty$	Alle Gebiete in denen <i>l</i> vorkommt	$y_{T_i} = (y_i + K_0)^\lambda$
Quadratwurzel	0,5	Poisson-Verteilung	$y_{T_i} = \sqrt{y_i + K_0}$
Natürlicher Logarithmus	0	Logarithmische Normalverteilung	$y_{T_i} = \ln(y_i + K_0)$
Zehnerlogarithmus	0	Logarithmische Normalverteilung	$y_{T_i} = \log(y_i + K_0)$
inverse Quadratwurzel	-0,5	Keinen bestimmten Einsatzzweck	$y_{T_i} = \frac{1}{\sqrt{y_i + K_0}}$
inverse Versuchsdaten	-1	Zeitabhängige Daten	$y_{T_i} = \frac{1}{y_i + K_0}$
Logit-Transformation	-	Daten mit Ober- und Untergrenze	$y_{T_i} = \ln\left(\frac{y - u}{o - y}\right)$
Arcussinus der Quadratwurzel	-	Binomialverteilung	$y_{T_i} = \arcsin \sqrt{y}$

Tab. 11.7: Tabelle der Transformationen

Diese Auflistung ist nicht vollständig, gibt aber die in Softwareprogrammen gebräuchlichsten Transformationen wieder.

11.6.4 Ausreißeranalyse

Innerhalb der Versuchsdaten können Werte auftreten, die sich deutlich von den anderen Werten unterscheiden, was in Abb. 11.29 exemplarisch dargestellt ist. Es stellt sich dann die Frage, ob diese Extremwerte zur normalverteilten Meßreihe gehören oder ob es sich um Ausreißer handelt. Ausreißer können unterschiedliche Ursachen haben, wie z.B.

- Meßfehler,
- Rechenfehler,
- Übertragungsfehler,
- unterschiedliche Meßbedingungen
- Störungen,
- usw.

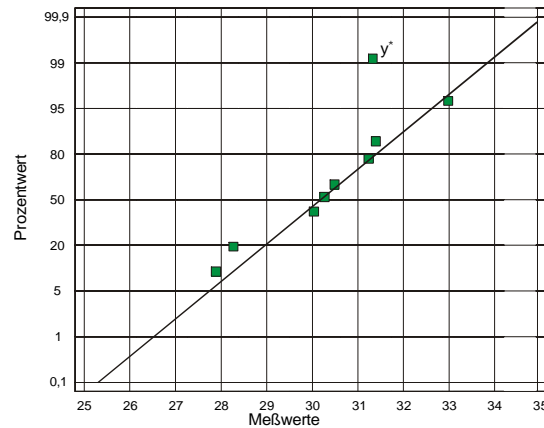


Abb. 11.29: Augenscheinlicher Ausreißer y^*

Werte, die potentielle Ausreißer darstellen, sind ggf. zu korrigieren, zu streichen oder wenn möglich ist der Versuch zu wiederholen. Zum Erkennen von Ausreißern gibt es neben der grafischen Analyse rechnerische Verfahren, wie

- Ausreißertest nach *Dixon*,
 - Ausreißertest nach *Grubbs*
- sowie
- Ausreißertest nach *David, Hartley* und *Pearson*,

auf die nicht weiter eingegangen wird /PET91a, SCH97/. Grafische Möglichkeiten zur Erkennung von potentiellen Ausreißern sind die Eintragung in einen Normalverteilungsplot oder die folgende Residuenanalyse.

11.6.5 Residuenanalyse

Zur Ausreißerüberprüfung oder zur Güteüberprüfung der Anpassung bei einer Regressionsanalyse sollte eine Residuenanalyse durchgeführt werden. Als Residuum e_i wird die Abweichung der Meßwerte y_i (tatsächlicher Wert) von dem Regressionswert \hat{y}_i (Modellschätzer) bezeichnet /KLP98/.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \tag{11.4}$$

Im allgemeinen sollten Residuen folgendermaßen beschaffen sein:

- klein,
 - normalverteilt,
 - keine Ausreißer,
 - unabhängig voneinander,
 - unabhängig von den geschätzten Werten,
 - unabhängig von den Faktoren
- sowie
- unabhängig von der Zeit.

Die Überprüfung dieser Forderungen erfolgt mittels numerischer (statistischer) Analysen sowie mit geeigneten grafischen Darstellungen. Diese sind:

- Normalverteilungsplot der Residuen,
 - Residuen gegen Modellschätzer,
 - Residuen gegen Faktoren,
 - Residuen gegen Versuchsreihenfolge
- und
- Beobachtungen gegen Vorhersagen.

11.6.5.1 Normalverteilungsplot der Residuen

Wie bereits erwähnt, sind normalverteilte Werte eine wichtige Voraussetzung zur Auswertung. Werden die Residuen mit einem Histogramm⁸ dargestellt, sollte sich annähernd eine Glockenkurve einstellen. Allerdings kann oft aufgrund der kleinen Anzahl von Versuchswerten und der Größe der Klassenbreite nur von einer Häufigkeitsdichte gesprochen werden. Durch Integration der Glockenkurve ergibt sich die sogenannte kumulative Gaußsche Normalverteilung⁹.

Die gleiche Kurve ergibt sich auch, wenn die Versuche der Reihenfolge nach addiert werden. Dabei liegt der Mittelwert der Daten μ , analog zum Histogramm, in der Mitte der Grafik. Das Aussehen der Verteilungsfunktion entspricht dabei einer S-Form, wobei die Ordinate eine Prozenteilung aufweist.

Da diese Analysen der Normalverteilung nicht sehr genau sind, werden die Residuen in ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm eingetragen (Residual Normal Probability Plot). Die Prozentangaben der Ordinaten werden dadurch umskaliert, um die S-Form in eine Ausgleichsgerade zu überführen. Damit ist eine einfachere Beurteilung der Normalverteilung möglich, da die Residuen annähernd auf einer Geraden liegen müssen. In *Abb. 11.30* ist exemplarisch ein Normalverteilungsplot der Residuen abgebildet.

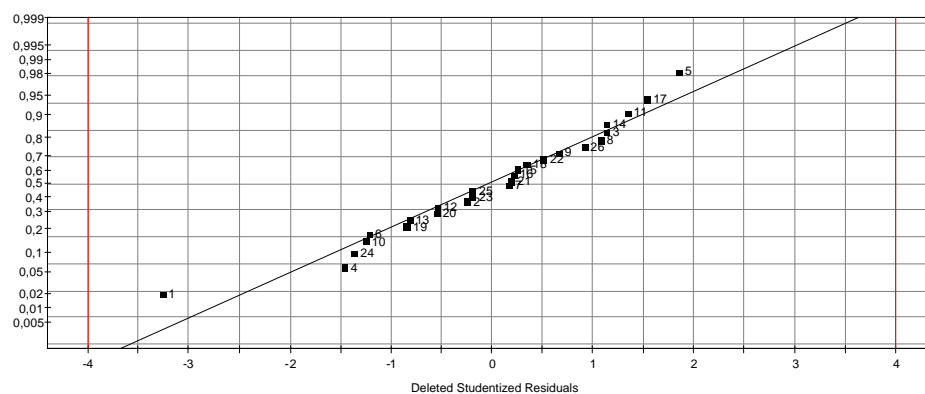


Abb. 11.30: Normalverteilungsplot der Residuen

⁸ Häufigkeitsgrafik

⁹ auch Verteilungsfunktion genannt

11.6.5.2 Residuen gegen Faktoren

Die Darstellung der Residuen vs. Faktoren (Residuals vs. Variables), gibt einen Einblick, ob das gewählte Modell (Regressionsmodell/Versuchsplan) konsistent mit den ermittelten Versuchswerten ist /KLP98/. Dazu werden alle Faktoren einzeln gegen die Residuen betrachtet, was in *Abb. 11.31* zu erkennen ist. Ist das Modell nicht stabil, sollte es um entsprechende Terme erweitert werden /ORT00a/.

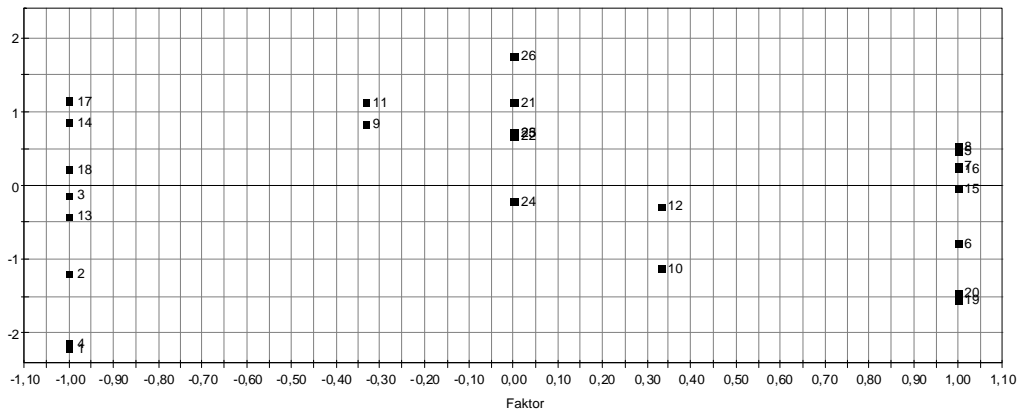


Abb. 11.31: Residuen vs. Faktor

Bei einem normalen Verlauf liegen die Residuen verhältnismäßig gleichverteilt um die Nulllinie. Ist dies nicht der Fall, beschreibt das Modell die Versuchsdaten nicht korrekt. Weiterhin ist mit der Darstellung eine Kontrolle möglich, die zeigt, ob die Versuche geplant oder ungeplant sind. Bei geplanten Versuchen treten nur bestimmte Stufen der Faktoren auf. Entgegengesetzt dazu entsteht bei ungeplanten Versuchen eine Art Punktewolke, also beliebige Faktorstufen /KLP98/.

11.6.5.3 Residuen gegen Versuchsreihenfolge

Unter Zuhilfenahme der Darstellung Residuen vs. Versuchsnummern (Residuals vs. Run Order) soll ein möglicher Trend erkannt werden. Hierbei wird die Reihenfolge der randomisierten Versuchsdurchführungen auf der Abszisse aufgetragen. Wenn kein Trend vorhanden ist, müssen die Residuen in einem horizontalen Streifen um die Nulllinie verteilt sein (siehe *Abb. 11.32* links). Ist ein Trend vorhanden, nehmen die Residuen mit ansteigender Versuchsnummer zu bzw. ab (siehe *Abb. 11.32* rechts).

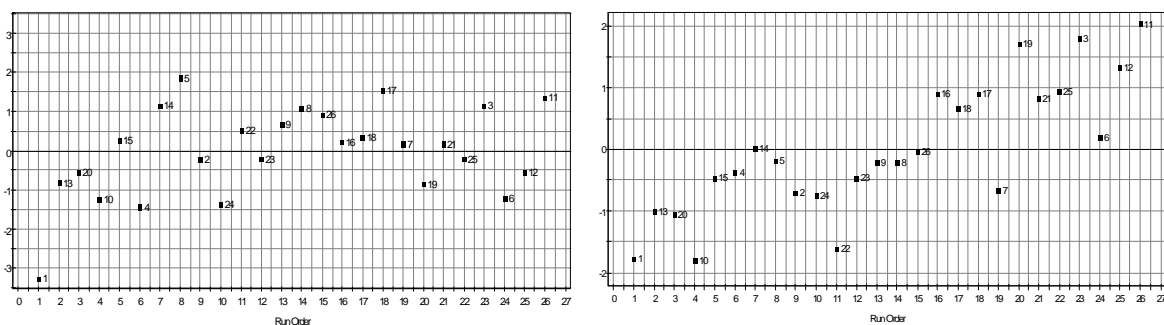


Abb. 11.32: Residuen vs. Run Order (links: kein Trend, rechts: Trend)

11.6.5.4 Residuen gegen Modellschätzer

Der Zusammenhang zwischen der Standardabweichung bzw. der Varianz und den berechneten Zielwerten läßt sich anhand der Residuen vs. Modellschätzer (Residuals vs. Predicted Response) analysieren. Ist eine Beziehung zwischen beiden Größen festzustellen, wird von Heteroskedastizität¹⁰ gesprochen /OTO97/. So kann z.B. der Fall eintreten, daß die Standardabweichung mit dem Anwachsen der Modellschätzer ebenfalls zunimmt. Die Darstellung nimmt sodann die Form eines angenäherten Trichters oder einer Trompete ein (siehe *Abb. 11.33* rechts).

In diesem Fall haben die großen Fehler der großen Modellschätzer eine enorme Hebelwirkung gegenüber kleinen Fehlern der kleinen Vorhersagewerte /ORT00a/. Ist keine Abhängigkeit festzustellen, bilden die Residuen eine horizontale Punktewolke (siehe *Abb. 11.33* links).

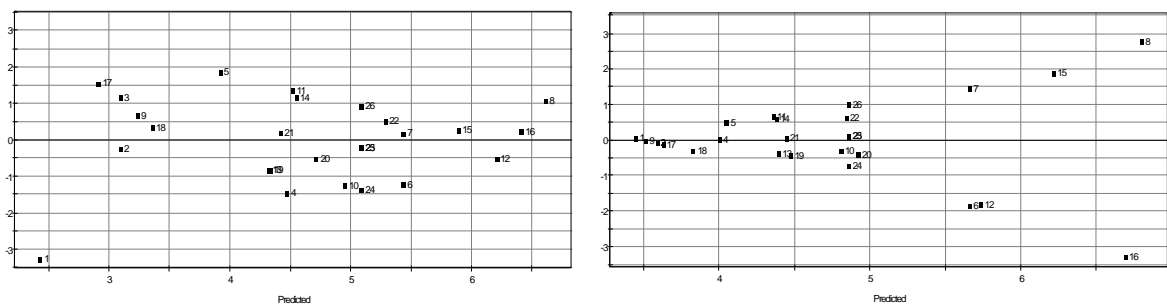


Abb. 11.33: Residuen vs. Modellschätzer (links: keine Abhängigkeit, rechts: Trompetenform)

11.6.5.5 Beobachtungen gegen Vorhersagen

Die Darstellung Beobachtungen vs. Vorhersagen (Observed vs. Predicted) steht nicht im direkten Zusammenhang mit den Residuen. Hiermit ist allerdings eine gute Identifikation von potentiellen Ausreißern möglich. Dazu werden die Versuchswerte über die berechneten Versuchswerte aufgetragen. Weichen die Punkte in der Darstellung weit von der eingezeichneten Geraden ab, sind die Werte der zugehörigen Residuen groß. Befinden sie sich hingegen auf der Geraden, sind kleine Residuen vorhanden, wie in *Abb. 11.34* zu sehen.

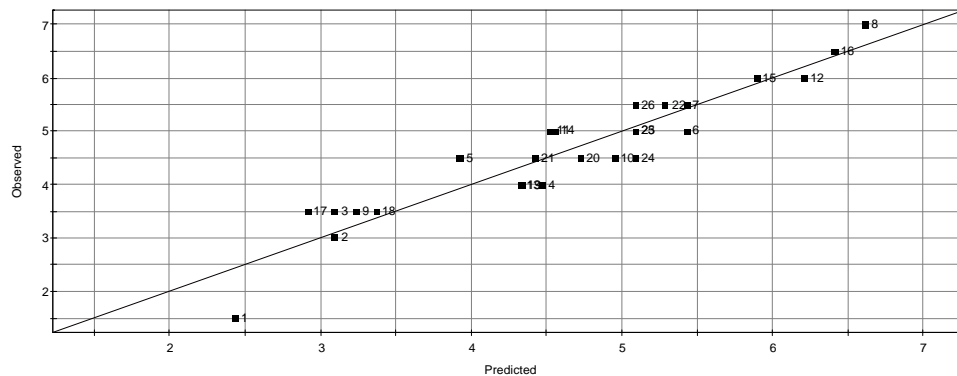


Abb. 11.34: Beobachtungen vs. Vorhersagen

¹⁰ un stetige Varianz der Versuchswerte

Wenn potentielle Ausreißer nicht im Normalverteilungsplot erkannt werden, zeigen sie sich hier als Werte, die weit von den übrigen entfernt sind. Diese Punkte besitzen dann aufgrund ihrer Entfernung eine wesentlich größere Hebelwirkung /ORT00a/.

11.6.6 Effektanalyse (Haupt- und Wechselwirkungseffektanalyse)

Durch die gleichzeitig gegeneinander durchgeführte Variation der Faktoren bzw. der Faktorstufen ist es möglich, Mittelwerte über diese Einstellungen zu bilden. Daraus lassen sich wiederum sogenannte Effekte berechnen, bei denen zwischen Haupt- und Wechselwirkungseffekten unterschieden wird.

11.6.6.1 Haupteffektanalyse

Die Effekte der Faktoren werden üblicherweise als Haupteffekte /PET91b/ oder Faktoreffekte /ORT00a/ bezeichnet. Dabei hängt die Veränderung der Zielgröße ausschließlich von einem Faktor ab. Um den Effekt ermitteln zu können, muß die Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Mittelwert gebildet werden. Allgemein geschieht dies mit

$$\text{Effekt}(x_i) = \frac{\sum_{i=1_+}^{N_+} y(x_i)}{N_+} - \frac{\sum_{i=1_-}^{N_-} y(x_i)}{N_-}. \quad (11.5)$$

Hierin steht N_+ für die Anzahl bzw. die Versuchsnummern der oberen Faktorstufen (+1) und N_- für die der unteren Faktorstufen (-1). Bei der Summation der Versuche auf den positiven Stufen wird jeweils von der ersten positiven 1_+ bis zur letzten positiven N_+ Stufe addiert. Analog verhält es sich mit der negativen Stufe.

Werden bei der Regression normierte Faktoreinstellungen¹¹ gewählt, lassen sich die Haupteffekte auch mit der Formel

$$\text{Effekt}(x_i) = 2 \cdot b_i \quad (11.6)$$

bestimmen.

Für andere Effekte, wie z.B. Wechselwirkungseffekte oder quadratische Effekte, gilt das gleiche. Ihr Wert ergibt sich immer als der doppelte Wert des zugehörigen Koeffizienten des Regressionspolynoms /KLP98, ORT00a/.

11.6.6.2 Wechselwirkungseffektanalyse

Im Gegensatz zu den Haupteffekten geht es bei Wechselwirkungseffekten um die Abhängigkeit der Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße von einem zweiten Faktor. Der Wechselwirkungseffekt wird dazu aus der Steigung der Zielgröße ($\Delta y / \Delta x_i$) bei der hohen Einstellung von x_j minus der Steigung ($\Delta y / \Delta x_i$) bei der niedrigen Einstellung von x_j gebildet. Eine allgemeingültige Formel zur Berechnung lautet:

¹¹ siehe dazu auch *Kapitel 11.6.6.4*

$$\text{Effekt}(x_i, x_j) = \frac{\sum_{i=1_+}^{N_+} \sum_{j=1_+}^{N_+} y(x_i, x_j)}{N_+} - \frac{\sum_{i=1_-}^{N_-} \sum_{j=1_-}^{N_-} y(x_i, x_j)}{N_-} \quad (11.7)$$

Hierbei muß zuerst die Summe der Wechselwirkungen der oberen Stufe durch deren Versuchsanzahl dividiert werden, um anschließend die gleiche Operation mit der unteren Stufe durchzuführen. Der Wechselwirkungseffekt ergibt sich dann durch die Subtraktion der beiden Summen. Da es sich um Wechselwirkungen zwischen zwei Summen handelt, dürfen die Indizes i und j in diesem Fall nicht gleich sein.

11.6.6.3 Interpretation der Effekte

Eine übersichtliche Zusammenstellung der Effekte wird mit einem Effekteplot erreicht. Dieser beinhaltet alle im Modell vorhandenen Koeffizienten nach ihrer Größe sortiert in einem Balkendiagramm. Dabei spiegelt die Höhe der Balken die Größe des Effektes wieder, wie *Abb. 11.35* zu entnehmen ist.

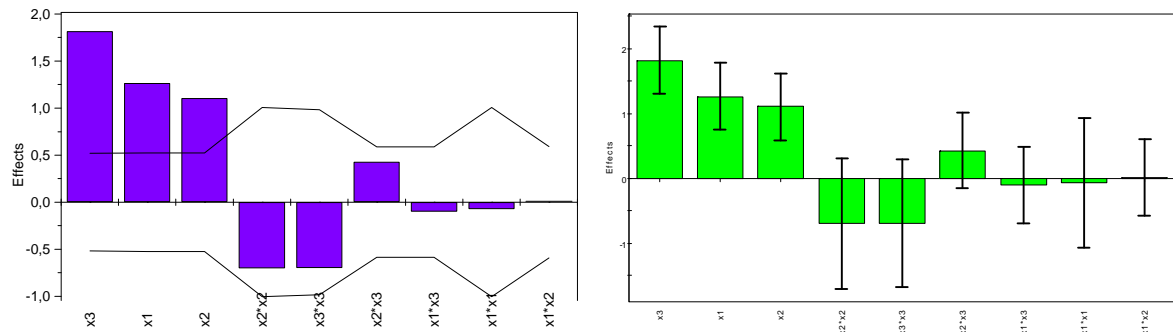


Abb. 11.35: Effekteplots (links: Signifikanzschwelle, rechts: Konfidenzintervalle)

Analog dazu besteht die Möglichkeit, den gleichen Plot für die Koeffizienten des Regressionsmodells zu generieren. Dies ist aber nicht zwingend notwendig, da, wie bereits angedeutet, die Koeffizienten bei normierten Faktoren halb so groß sind, wie die Effekte.

Wie in *Abb. 11.35* (links) weiterhin zu erkennen, ist noch eine Signifikanzschwelle der Effekte sichtbar (eingezeichnete Linie). Anhand dieser Linie lassen sich die signifikanten Faktoren identifizieren. Signifikant sind Effekte, welche oberhalb der Linie der Signifikanzschwelle liegen. *Abb. 11.35* (rechts) hingegen zeigt eine andere Darstellung, nämlich mit Konfidenzintervallen, womit ebenfalls signifikante Faktoren erkannt werden können. Übertagen die Konfidenzbereiche einen Balken, so weist dieser Effekt keine Signifikanz auf.

Haben Effekte nur einen kleinen Wert, können sie aus dem Modell eliminiert werden. Dies geschieht anhand der Signifikanzschwelle, die die halbe Breite des Konfidenzintervalls darstellt. Die Signifikanzschwelle berechnet sich mit dem t-Test¹², wobei kontrolliert wird, ob

$$|\text{Effekt}| \geq \text{SS}_{\text{Effekt}} \cdot t_{\frac{\gamma+1}{2}} \quad (11.8)$$

¹² Tabellenwerte sind u.a. in /KRY91/ oder gängigen Statistikbüchern zu finden.

für alle Effekte der Fall ist. Ist der Effekt größer, sollte er im Modell verbleiben.

SS_{Effekt} ist hierin die Standardabweichung der Effekte, welche unter Zuhilfenahme der Standardabweichung der Residuen SS_{residual} sowie dem Aufbau des Versuchsplans berechnet wird /ORT00a/. Die Berechnung von Hand ist relativ kompliziert und sollte geeigneter Software überlassen werden.

Des weiteren ist es noch möglich, Verbesserungen des betrachteten Versuchs direkt abzuleiten. Hierzu ist es wichtig zu wissen, welche Faktoreffekte positiv und welche negativ sind. *Tab. 11.8* enthält eine Aufstellung, wie Faktoreffekte einzustellen sind, wenn die Zielgröße maximiert oder minimiert werden soll.

	Zielgröße maximieren	Zielgröße minimieren
Faktoreffekt positiv	Faktor erhöhen	Faktor verringern
Faktoreffekt negativ	Faktor verringern	Faktor erhöhen

Tab. 11.8: Einstellung der Effekte zur Optimierung der Zielgröße /ORT00a/

11.6.6.4 Zentrierung und Skalierung

Um vergleichbare Effekte und Koeffizienten zu erhalten, werden die Faktoren (z.B. x_1 und x_2) skaliert und zentriert, welches in *Abb. 11.36* skizziert ist /ORT00/.

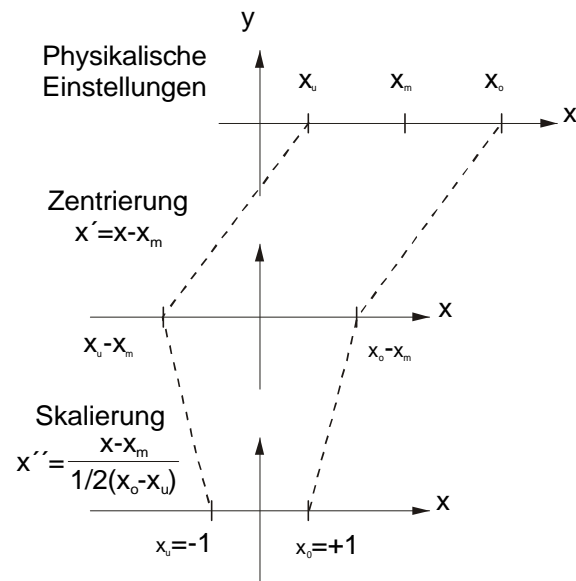


Abb. 11.36: Umwandlung der physikalischen Einstellbereiche in die zentrierte und skalierte Form /ORT00/

Dies geschieht durch die Umformung der Einstellbereiche auf gleiche Länge. Der Einstellbereich bekommt eine dimensionslose Länge von -1 bis $+1$ (Skalierung). Zusätzlich wird das Koordinatensystem in das Zentrum des Untersuchungsbereiches verlegt (Zentrierung). Diesen Vorgang zeigt *Abb. 11.37*.

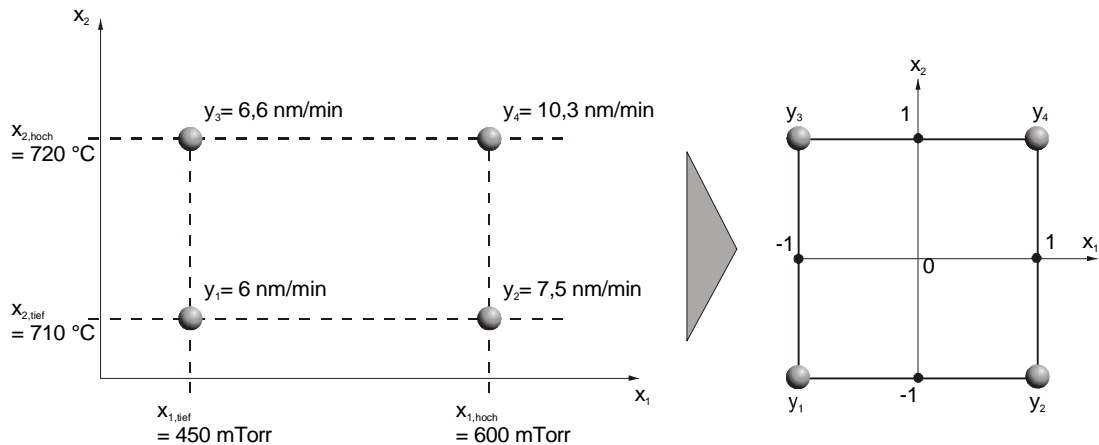


Abb. 11.37: Zentrierung und Skalierung /ORT00/

Durch die Skalierung und Zentrierung werden stabilere Koeffizienten gebildet, was wiederum bedeutet, daß kleine Veränderungen in den Meßdaten auch nur zu kleinen Veränderungen in den Koeffizienten führen. Der Versuchsraum nimmt bei zwei Faktoren somit die Gestalt eines Quadrates an. Natürlich können die x-Werte auch wieder rücktransformiert werden. Die Rücktransformation geschieht mit Formel

$$x'' = \frac{x - x_m}{\frac{1}{2}(x_o - x_u)} \Rightarrow x = x'' \cdot \frac{1}{2}(x_o - x_u) + x_m. \quad (11.9)$$

11.6.7 Regressionsanalyse

Um ein mathematisches Modell (Vorgabe durch Versuchsplan) zwischen den Zielgrößen y_i und den Faktoren x_i , beruhend auf den ermittelten Daten, erstellen zu können, wird die Regressionsanalyse eingesetzt. Es geht dabei hauptsächlich darum, eine funktionale Beziehung zwischen den Faktoren und der Zielgröße aufzubauen. Damit überhaupt eine sinnvolle Regressionsanalyse durchgeführt werden kann, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein /WAS01/. Diese Grundannahmen lauten:

- die Residuen sind normalverteilt,
 - die Einzelbeobachtungen sind unabhängig voneinander,
 - die Standardabweichung der Residuen ist konstant über die Schätzwerte,
 - es liegen keine Korrelationen zwischen den Faktoren vor,
 - es gibt keine Ausreißer,
 - es gibt keine Versuchspunkte mit stärkerer Gewichtung
- und
- das Modellpolynom stimmt in etwa.

Leider ist die Regressionsanalyse nur bei quantitativen Merkmalen ohne weiteres einsetzbar¹³. Mit ihrer Hilfe wird ein mathematisches Modell für den Zusammenhang zwischen Zielgrößen und Faktoren an vorhandene Daten angepaßt. In den Formeln werden außer den Faktoren x_i noch Regressionsparameter $b_0, b_1, b_{12}, ..$ verwendet.

¹³ Ein Beispiel für qualitative Zielgrößen ist in /ERD01/ enthalten.

Diese Parameter müssen während der Anpassung der Modelle abgeschätzt werden. Meistens geschieht das durch die Methode der kleinsten Quadrate¹⁴ /KLP98/.

Neben der am weitesten verbreiteten Methode der kleinsten Quadrate gibt es noch weitere Vorgehensweisen der Regression, wie z.B. die Hauptkomponentenregression, die auch PCR¹⁵-Methode genannt wird oder das PLS¹⁶-Verfahren. Beide Verfahren beruhen auf der verzerrten Schätzung der Dimension des Regressionspolynoms. Auf beide wird nicht weiter eingegangen. Weiterführende Informationen sind in /OTO97/ aufgeführt.

Bei der Methode der kleinsten Fehlerquadrate geht es darum, die Modellkoeffizienten so zu bestimmen, daß die Modellschätzer (\hat{y}_i) für die im Versuchsplan eingestellten Versuchseinstellungen möglichst nahe bei den realen Versuchswerten y_i liegen.

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \Leftarrow \text{Minimum} \quad (11.10)$$

Dieses Vorgehen ist in *Abb. 11.38* schematisch abgebildet.

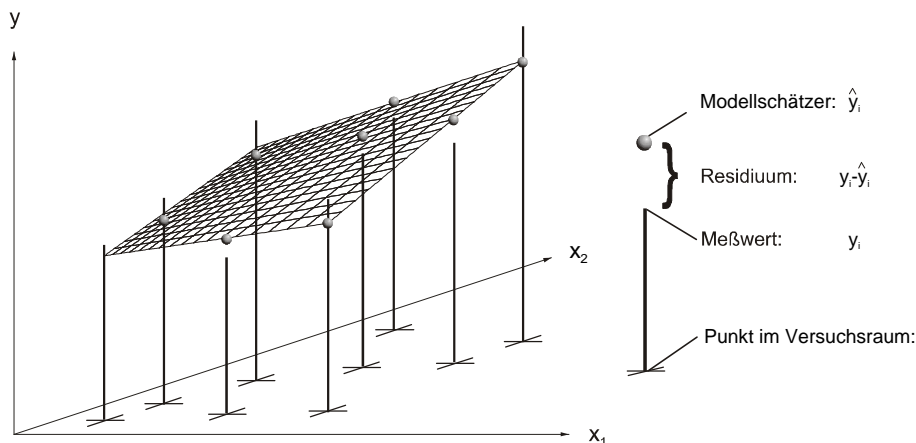


Abb. 11.38: Modellanpassung durch „Least Squares Fit“ /ORT00/

Um die Summe der quadratischen Abweichungen der Schätzer von den Meßwerten zu minimieren, muß ein lineares Gleichungssystem gelöst werden. Hierzu ist die Formel (11.10) nach den Koeffizienten b_i des Versuchsplanmodells abzuleiten und anschließend null zu setzen¹⁷.

Wenn die Modellkoeffizienten b_i bekannt sind,

- läßt sich die Modellqualität überprüfen (Residuenanalyse),
- lassen sich Einstellungen vorhersagen, die nicht durchgeführt wurden
oder
- es lassen sich grafische Abbildungen in Form von Höhenlinienplots anfertigen.

¹⁴ Wird auch mit „Least Squares Regression“ /RSC97/, „Least Square Methode“ /PET91a/, „Ordinary Least Squares“ /OTT97/ oder „Least Square Fit“ bezeichnet.

¹⁵ Principal Component Regression

¹⁶ Partial Least Squares

¹⁷ In Matrixschreibweise $b = (X^T X)^{-1} X^T y$.

11.6.8 Varianzanalyse

Um einen Vergleich zwischen den durch die Regressionsanalyse ermittelten Modellwerten und den in den Versuchen bestimmten Versuchswerten zu ermöglichen, wird die Varianzanalyse eingesetzt. Oft wird auch der Name Streuungsanalyse oder Analysis of Variance (ANOVA) benutzt. Durch ihre Anwendung kann neben der Signifikanzbeurteilung von Effekten auch die Güte der Regression in Form von Modelladäquatheitstests und Gütemaßen angegeben werden. Auf den Bereich der Signifikanzbeurteilung der Effekte, der z.B. bei *Taguchi* zur Anwendung kommt, wird hier nicht näher eingegangen. Ausführliche Informationen dazu sind in /PHA89, PET91a-b, SCH97, HOC88/ aufgeführt.

Bei der Varianzanalyse zur Beurteilung der Güte der Regression spielen die bereits erwähnten Quadratsummen bzw. Summen der quadratischen Abweichungen eine entscheidende Rolle. Hierbei bauen alle Quadratsummen aufeinander auf, wie in *Abb. 11.39* zu erkennen ist, so daß sich eine Art Ordnungsschema für die Varianzanalyse ergibt.

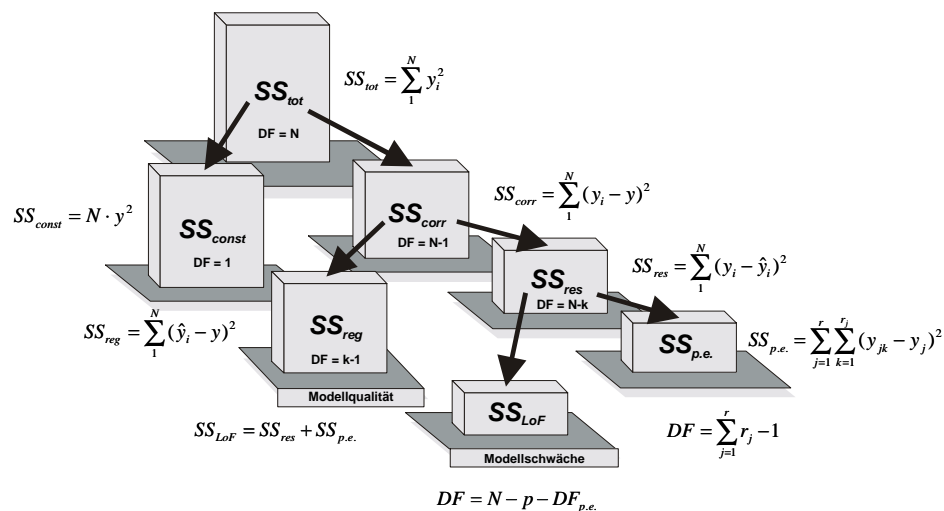


Abb. 11.39: Aufspaltung der Quadratsummen /OTO97, ORT00/

Zuerst wird der Mittelwert abgespalten, indem die Quadratsumme der Meßwerte (SS_{total}) in einen Anteil SS_{constant} (Quadratsumme des Mittelwerts) und SS_{corrected} (Summe der quadratischen Abweichungen vom Mittelwert) zerlegt wird.

Nun kommt der eigentlich wichtige Teil, nämlich nochmaliges Zerlegen von SS_{corrected} in die Quadratsumme, welche das Regressionsmodell beschreibt (SS_{regression}) und den Rest, welcher vom Modell nicht erklärt wird (SS_{residual}).

Wurden zusätzlich für Punkte Wiederholungsversuche realisiert, kann die SS_{residual} nochmals aufgespalten werden, und zwar in die Quadratsumme von nicht erfaßten systematischen Anteilen (SS_{Lack of fit}) und in die Quadratsumme von rein zufälligen Anteilen (SS_{pure error}) /ORT00/.

11.6.8.1 Modelladäquatheitstests

Um die Modellschwäche zu ermitteln, gibt es zwei unterschiedliche Modelladäquatheitstests. Zum einen handelt es sich um einen Test für die Signifikanz der Regression und zum anderen um einen Test auf Mangel an Anpassung der Regression.

Da die einfachen Quadratsummen (SS) nicht miteinander verglichen werden können, werden für die Adäquatheitstests die mittleren Quadratsummen (MS) benötigt. Sie werden nach

$$MS = \frac{SS}{DF} \tag{11.11}$$

berechnet.

Die dazu benötigten Freiheitsgrade (DF) sind *Tab. 11.9* zu entnehmen.

Quadratsumme SS	SS _{tot}	SS _{const}	SS _{corr}	SS _{reg}	SS _{res}	SS _{p.e.}
Freiheitsgrad DF	N	1	N-1	p-1	N-p	$\sum_i^r (r_i - 1)$

Tab. 11.9: Freiheitsgrade der SS /ORT00/

11.6.8.1.1 Modellsignifikanztest

Der Test auf Signifikanz der Regression wird auch als „Goodness of Fit“ deklariert. Bei ihm wird die mittlere Quadratsumme der Regression mit der mittleren Quadratsumme der Residuen verglichen.

$$F_{\text{emp}}(DF_{\text{reg}}, DF_{\text{res}}) = \frac{SS_{\text{reg}} / DF_{\text{reg}}}{SS_{\text{res}} / DF_{\text{res}}} = \frac{MS_{\text{reg}}}{MS_{\text{res}}} \tag{11.12}$$

Aus Gleichung (11.12) ist ersichtlich, daß der berechnete F-Wert von den beiden Freiheitsgraden der Quadratsummen der Regression und der Residuen abhängig ist. Der Index „emp“ steht dabei für „empirisch“. Um das verwendete Regressionspolynom nutzen zu können, sollte der berechnete F_{emp} -Wert größer als der tabellierte F_{krit} -Wert sein. Der tabellierte Wert wird mit „krit“ indiziert, da es sich bei ihm um den kritischen, also um den gerade noch zulässigen, Wert handelt.

11.6.8.1.2 Modellschwächentest

Für den Test auf Mangel an Anpassung ist häufig ein anderer Name gebräuchlich, nämlich „Lack of Fit“-Test. Hierbei wird die mittlere Quadratsumme der Modellschwäche durch die mittlere Quadratsumme des experimentellen Fehlers dividiert.

$$F_{\text{emp}}(DF_{\text{LoF}}, DF_{\text{p.e.}}) = \frac{MS_{\text{LoF}}}{MS_{\text{p.e.}}} \tag{11.13}$$

Anhand von *Abb. 11.39* ist zu erkennen, daß der „Lack of Fit“ nur bei Versuchswiederholungen ermittelbar ist. Auch der F-Test auf Mangel an Anpassung ist, wie zuvor der F-Test für die Güte der Anpassung, von den Freiheitsgraden der beteiligten mittleren Quadratsummen abhängig. Um zu untersuchen, ob dieser Test signifikant ist, wird der berechnete F_{emp} -Wert mit dem tabellierten F_{krit} -Wert verglichen. Ist dieser Tabellenwert kleiner als der berechnete Wert, so ist der Test auf Mangel an Anpassung signifikant. Dies ist, im Gegensatz zum Test der Güte der Anpassung allerdings gerade nicht erwünscht, da, wie der Name des Tests bereits ausdrückt, damit ein Mangel an Anpassung vorliegt /OTO97/.

11.6.8.2 Gütemaße des Modells

Zur Beurteilung, wie gut eine Regressionsmodell die Versuchsdaten beschreibt, eignen sich einige Gütemaße, die nachstehend kurz angesprochen werden.

11.6.8.2.1 Bestimmtheitsmaß

Mit dem Bestimmtheitsmaß liegt eine Maßgröße vor, die beurteilt, wie gut die ermittelten Daten an das Modell angepaßt sind. Dazu wird die Quadratsumme der Regression durch die Quadratsumme des korrigierten Mittelwertes dividiert /KLP98/.

$$R^2 = \frac{SS_{\text{reg}}}{SS_{\text{corr}}} \quad (11.14)$$

Der Wert des Bestimmtheitsmaßes kann sich aufgrund des Zusammenhangs der beiden Quadratsummen

$$SS_{\text{reg}} \leq SS_{\text{corr}} \quad (11.15)$$

immer nur zwischen

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (11.16)$$

bewegen.

Als Idealwert ist also 1 anzusehen. Ein annehmbarer Wert liegt bereits bei $R^2 > 0,8$ vor /ORT00a/.

Neben dem Bestimmtheitsmaß existiert noch ein um die Freiheitsgrade korrigiertes Bestimmtheitsmaß

$$R^2_{\text{adj}} = \frac{SS_{\text{reg}}}{SS_{\text{corr}}} - \frac{N-1}{N-K} \quad (11.17)$$

Dieses korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} , auch adjustiertes Bestimmtheitsmaß genannt, ist durch die Berücksichtigung der Freiheitsgrade der beteiligten Quadratsummen immer kleiner als das nicht korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2 .

Vor allem bei Regressionsmodellen kommt das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{adj} zum Einsatz, denn im Gegensatz zum unkorrigierten Bestimmtheitsmaß steigt der Wert des korrigierten Bestimmtheitsmaßes bei der Hinzunahme von Koeffizienten in das Modell nicht automatisch an. Es kann sogar vorkommen, daß das korrigierte Bestimmtheitsmaß fällt und zwar dann, wenn der Quotient der Freiheitsgrade aus Formel (11.17) stärker fällt als der Quotient der Quadratsummen, wenn dieser gleichzeitig steigt /ORT00/. Weichen die Werte des korrigierten und unkorrigierten Bestimmtheitsmaßes stark voneinander ab, so deutet dies auf ein „Overfitting“ hin, d.h. ein zu gutes oder zu schlechtes Modell /WAS01/.

11.6.8.2.2 Vorhersagepotential

Anhand des Q^2 -Maßes zeigt sich, wie gut Vorhersagen mit dem Regressionsmodell getätigt werden können. Dazu wird das Q^2 -Maß mit

$$Q^2 = 1 - \frac{\text{PRESS}}{\text{SS}_{\text{corr}}} = \quad (11.18)$$

bestimmt, wobei PRESS der sogenannte PRESS-Wert¹⁸ ist. PRESS stammt aus dem englischen und bedeutet soviel wie Quadratsumme des Vorhersagefehlers.

Zur Berechnung des PRESS-Wertes wird das Modell ohne den ersten Versuchspunkt kalkuliert, um anschließend mit dem „neuen“ Regressionsmodell einen Schätzwert für diesen Punkt zu berechnen. Dies wird für alle Versuchspunkte durchgeführt. Somit ergibt sich der PRESS-Wert zu

$$\text{PRESS} = \sum_{i=1}^N \hat{e}_i^2 = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (11.19)$$

Die logische Konsequenz daraus lautet, daß der PRESS-Wert so klein wie möglich und das Vorhersagepotential Q^2 so groß wie möglich sein sollte /DES00/. Normalerweise ist mindestens ein Q^2 -Wert von 0,5 anzustreben /ORT00a/. Weiterhin ist Q^2 immer kleiner als der Wert des Bestimmtheitsmaßes und kann in Ausnahmefällen auch negativ sein.

11.6.8.2.3 Reproduzierbarkeit

Wiederholungsversuche werden oftmals nur in der Mitte des Versuchsplans, d.h. als Zentralpunkt, ausgeführt. Trotzdem sollte die Abweichung der Zentralpunkte mit der gesamten Abweichung der Versuchsantworten vergleichbar sein. Hierzu wird die Reproduzierbarkeit

$$1 - \frac{\text{MS}_{\text{p.e.}}}{\text{MS}_{\text{corr}}} \quad (11.20)$$

ermittelt.

¹⁸ Prediction Error Sum of Square

Liegt eine Reproduzierbarkeit von eins vor, ist die mittlere Quadratsumme des reinen experimentellen Fehlers bzw. des wahren Fehlers null. Ist der Wert der Reproduzierbarkeit hingegen null, so entspricht der wahre Fehler der gesamten Abweichung der Versuchsanwort /MOD01/.

11.6.8.2.4 Modellvalidität

Die Validität beschreibt ein Maß für die Gültigkeit des Modells. Wenn der Wert größer als 0,25 ist, liegt kein Mangel an Anpassung vor, d.h. ist der Wert kleiner, ist der „Lack of Fit“-Test signifikant. Somit ist der Modellfehler, also die Modellanpassung, signifikant größer als der reine experimentelle Fehler /MOD01/.

11.6.9 Korrelationsanalyse

Korrelationsanalysen sind eine beschreibende Methode, um Abhängigkeiten zwischen stetigen Meßgrößen zu identifizieren. Besteht ein Datensatz aus mehr als zwei Meßgrößen, was in der Regel vorkommt, sind dementsprechend eine Vielzahl an Korrelationen zu berechnen. Hierbei handelt es sich um eine multiple Korrelationsbetrachtung, bei der paarweise alle Zusammenhänge von Meßgrößen im Datensatz überprüft werden. Dazu wird üblicherweise eine Korrelationsmatrix verwendet, bei der alle Korrelationen in einem quadratischen Schema angeordnet sind /WEM99/.

Innerhalb der statistischen Versuchsplanung werden nicht nur Meßgrößen (Zielgrößen) sondern auch die Faktoren mitbetrachtet. Es wird dazu der lineare Korrelationskoeffizient zwischen den Modelltermen und den Zielgrößen in Form einer Korrelationsmatrix abgebildet. Dazu werden die Faktoren transformiert, skaliert und zentriert (siehe 11.6.6.4), um eine Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten

Anhand der Korrelationsmatrix läßt sich überprüfen, ob der Versuchsplan orthogonal ist, d.h. die Faktoren unkorreliert zueinander sind, also unabhängig voneinander. Sind zwei Faktoren unabhängig, ist der Korrelationskoeffizient zwischen diesen beiden null. Dies sollte bei allen Faktorkombinationen vorliegen. Bei der Auswertung können dann alle Faktoren getrennt voneinander betrachtet werden.

Wenn bestimmte Versuchseinstellungen nicht auf den Stufen eingehalten werden konnten und die realen Werte anstatt der geplanten in die Versuchsauswertung einbezogen werden, so ist der Plan nicht mehr 100%ig orthogonal. Es können Korrelationen zwischen einzelnen Faktoren zum Vorschein, was allerdings bei Werten kleiner 0,2 nicht schlimm ist. Der Wertebereich des Korrelationskoeffizienten reicht von -1 bis +1, wobei ein Wert von null auf eine Unkorreliertheit hinweist.

Tab. 11.10 zeigt beispielhaft die Korrelationsmatrix eines 2^3 -Versuchsplans mit Wechselwirkungen und zwei Zielgrößen. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Faktoren untereinander keine Korrelationen aufweisen. Allerdings sind Korrelationen zwischen den Faktoren und den Zielgrößen vorhanden, was auch gewünscht ist. Am Vorzeichen des Korrelationswertes ist ersichtlich, ob es sich um eine positive oder negative Korrelation handelt.

	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	y_1	y_2
x_1	1	0	0	0	0	0	0,457	-0,651
x_2	0	1	0	0	0	0	0,736	0,651
x_3	0	0	1	0	0	0	0,448	-0,224
x_1x_2	0	0	0	1	0	0	0,125	-0,161
x_1x_3	0	0	0	0	1	0	0,061	-0,044
x_2x_3	0	0	0	0	0	1	0,059	-0,07
y_1	0,457	0,736	0,448	0,125	0,060	0,059	1	0,039
y_2	-0,651	0,650	-0,224	-0,161	-0,044	-0,070	0,039	1

Tab. 11.10: Korrelationsmatrix eines 2^3 -Versuchsplan

11.6.10 Graphische Auswertung

Grafische Auswertungen sind als sehr wichtig einzuschätzen, da sie die erhaltenen Zahlenwerte verständlicher darstellen. Mit Grafiken ist die Interpretation um ein vielfaches leichter und damit nicht zuletzt übersichtlicher.

Bei den meisten zuvor behandelten Auswertverfahren wurden bereits viele Grafiken aufgezeigt. Hier soll jetzt noch auf zwei Darstellungsvarianten hingewiesen werden, die Zusammenhänge, beruhend auf der ermittelten Regressionsgleichung, visualisieren.

Dabei handelt es sich zum einen um sogenannte Kontur- oder Höhenliniendiagramme (Contur-Plots) und zum anderen um 3D-Darstellungen dieser Diagramme (3D-Plots).

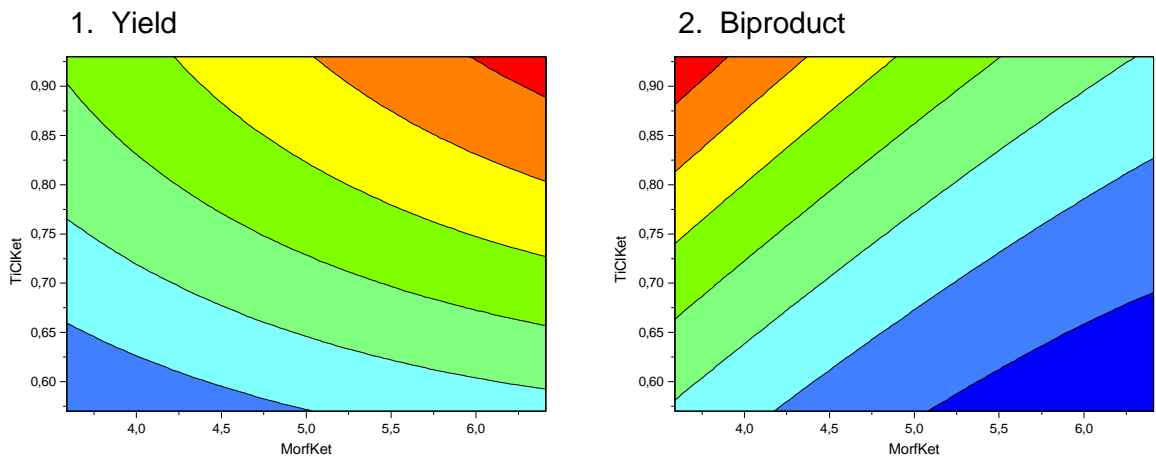
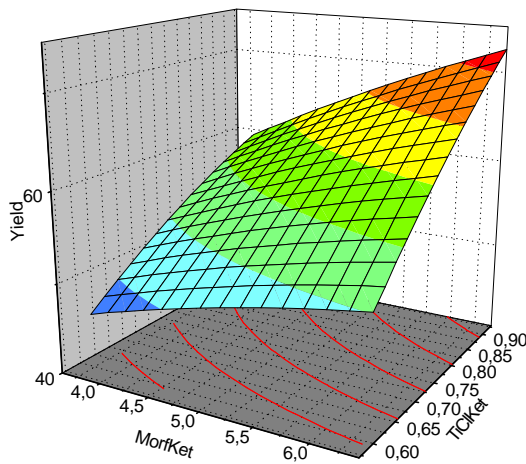


Abb. 11.40: Konturliniendiagramm

Bei diesen Diagrammen, die in Abb. 11.40 und Abb. 11.41 zu sehen sind, werden die Zielgrößen in Abhängigkeit verschiedener Faktoren gegenübergestellt.

Hieraus können optimale Einstellungen der dargestellten Faktoren abgelesen werden, mit denen bestimmte Werte der Zielgrößen erreicht werden. Es lassen sich auch mehrere Zielgrößen gegenüberstellen, um geeignete KompromißEinstellungen zu identifizieren.

1. Yield



2. Biproduct

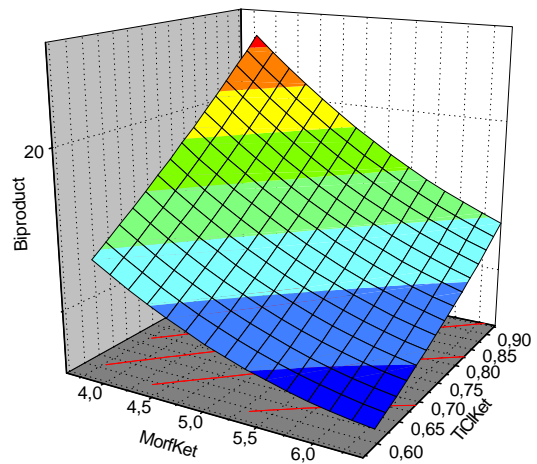


Abb. 11.41: 3D-Plot

11.6.11 Optimale Einstellungen bei mehreren Zielgrößen

Bei vielen Prozessen sollen mehrere Zielgrößen gleichzeitig optimiert werden. So muß zum Beispiel neben den technisch ausgerichteten Zielgrößen auch noch Zielgrößen Rechnung getragen werden, die wirtschaftliche Aspekte beinhalten. Einstellungen, die für eine Zielgröße von Vorteil sind, können andere Zielgrößen nachteilig beeinflussen. Nachfolgend werden dazu drei Lösungsvarianten erläutert:

- Schrittweise Optimierung,
- Wunschfunktion nach *Harrington* und
- Wunschfunktion nach *Derringer* und *Suich*.

11.6.11.1 Schrittweise Optimierung

Ein Vorteil der schrittweisen Optimierung ist, daß man die Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge sehr gut nachvollziehen kann /KLP98/. Hierdurch ergeben sich ggf. Verbesserungsmöglichkeiten, wie zum Beispiel eine Verschiebung der Gewichtung der Zielgrößen. Bei der schrittweisen Optimierung wird zunächst für jede einzelne Zielgröße ein Modell an die Daten angepaßt, wobei nur signifikante Abhängigkeiten der Zielgrößen von den Faktoren berücksichtigt werden.

Anschließend wird iterativ die optimale Einstellung der Faktoren ermittelt. Auch die Wechselwirkungen, falls welche im Modell vorhanden sind, werden dabei einbezogen.

Folgende Punkte lassen sich bei der Optimierung analysieren:

- Die Abhängigkeit der einzelnen Zielgrößen von den einzelnen Faktoren,
- die Wichtigkeit der einzelnen Zielgrößen im Bezug auf das Versuchsziel sowie

- die Änderung der Zielwerte jeder Zielgröße durch die Optimierung der anderen Zielgrößen.

Ein Nachteil der schrittweisen Optimierung ist die große Anzahl von zu berücksichtigten Faktoren und Zielgrößen. Es kann daher sinnvoller sein, die vielen Zielgrößen zu einer Größe zusammenzufassen

11.6.11.2 Wunschfunktion nach Harrington

Bei der Lösungsvariante nach *Harrington* werden zunächst die einzelnen Zielgrößen zu einer gemeinsamen mehrkritiellen Optimierungsgröße zusammengefaßt. Hierzu müssen zuerst die Grenzbereiche der einzelnen Zielgrößen festgelegt werden, wie dies in *Tab. 11.11* zu dargestellt ist.

Zielgröße	untere Grenze	obere Grenze
	y_i^0	y_i^1
y_1	-3	4
y_2	0	5
...
y_i	-0,6	-0,3

Tab. 11.11: Grenzbereichsdefinition

Mit diesen Grenzwerten und den gemessenen Werten der einzelnen Zielgrößen werden die Größen $y_{z1}, y_{z2}, \dots, y_{zi}$ ermittelt.

$$y_{zi} = \frac{y_i - y_i^0}{y_i^1 - y_i^0} \quad (11.21)$$

Daraufhin werden die Optimierungsgrößen nach Formel

$$D_L = \exp \left[- \exp \left(- \sum_{i=1}^{y_i} w_i \cdot y_{zi} \right) \right] \quad (11.22)$$

berechnet, wobei w_i die Gewichtung der Zielgrößen ist.

An diese Optimierungswerte wird ein Modell angepaßt, in dem alle Faktoren und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Anschließend wird, anhand der Wechselwirkungen, die Zielgröße in Abhängigkeit von zwei Faktoren dargestellt und mittels Konturliniengrafiken die optimale Einstellung der Faktoren gesucht /MAY97/.

11.6.11.3 Wunschfunktion nach Derringer und Suich

Bei der Lösungsvariante nach *Derringer* und *Suich* wird zunächst für jede einzelne Zielgröße ein Modell angepaßt und die Signifikanz der Faktoren überprüft. Hierauf folgt die Zusammenfassung der einzelnen Zielgrößen in der Wunschfunktion.

Für jede Zielgröße wird eine „Erwünschtheit“ festgelegt. Die Wunschfunktion liegt immer zwischen 0 = unerwünscht und 1 = erwünscht/optimal. In Tab. 11.12 sind Erwünschtheiten als Funktion der Zielgröße aufgelistet /KLP98, MAY97/.

Erwünschtheit	Skizze
Minimierung der Zielgröße	
Maximierung der Zielgröße	
Zielgröße soll möglichst nahe bei einem vorgegebenen Wert liegen	

Tab. 11.12: Wunschfunktionen

Mit Hilfe der Wunschfunktion erhält man zunächst die Erwünschtheit für die Werte der einzelnen Zielgrößen. Die Gesamterwünschtheit ist dann der geometrische Mittelwert der Erwünschtheiten aller Zielgrößen. Sie beschreibt somit, wie nahe alle Zielgrößen am Optimum liegen. Für die Erwünschtheiten in Tab. 11.12 gilt:

- Jeder Wert einer Zielgröße im optimalen Bereich wird als gleich gut bewertet,
 - eine Gesamterwünschtheit = 1 bedeutet, daß alle Zielgrößen in ihrem jeweiligen optimalen Bereich liegen,
 - bereits eine Zielgröße im nicht zulässigen Bereich bewirkt, daß die Gesamterwünschtheit = 0 ist (nicht zulässig),
 - je schmaler der Übergangsbereich in der Wunschfunktion einer Zielgröße ist, desto größeres Gewicht hat diese Zielgröße bei der Optimierung
- und
- die Verwendung des geometrischen Mittelwertes bewirkt, daß das Gewicht einer Zielgröße in der Nähe des nicht zulässigen Bereichs zunimmt.

Mit der Erwünschtheit wird direkt nach optimalen Faktorstufenkombinationen gesucht. Somit lassen sich mit der Wunschfunktion auch noch Ergebnisse erzielen, wenn graphische Verfahren alleine zu unübersichtlich werden /KLP98/.

11.7 Validierung

Die in der vorherigen Phase ermittelten Versuchsergebnisse beruhen auf einer Reihe statistischer Analysen, d.h. Zahlenwerten und Grafiken für Effekte, Vertrauensbereiche, usw. und sollten daher auf ihre praktische Relevanz überprüft werden. Dabei ist zu beachten, daß die große Variationsvielfalt während der Versuchsdurchführung durch das verwendete technische System oder die Randbedingungen eingeschränkt worden ist (im Sinne von Auswahl relevanter Faktoren und nicht alle!). Daher reicht es nicht aus, nur die Versuchsdaten auszuwerten und zu interpretieren. Sie müssen auch verstanden werden.

Die Versuchsergebnisse sollten unter realen Betriebsbedingungen auf ihre Gültigkeit überprüft und getestet werden. Daraus ergeben sich weitere Nachversuche, die ebenfalls zu planen, durchzuführen und auszuwerten sind, damit reale Vergleichswerte vorliegen.

Nach der Verifizierung der Versuchsergebnisse ist mit allen Verantwortlichen über geeignete Standardisierungsmaßnahmen zu diskutieren, um sie später in den Betrieb und ggf. in das QM-System zu übernehmen.

Des weiteren sollte das Ziel sein, die Ergebnisse in die Praxis umzusetzen und für weitere Produkte und Prozesse Erfahrungen zu sammeln. Es ist auch möglich, neue Versuche mit den erhaltenen Ergebnissen in Richtung eines noch nicht bekannten optimalen Bereiches anzustreben (Untersuchungen im Optimalbereich oder experimentelle Optimunsuche).

Zum Abschluß ist die bisher erfolgte Dokumentation zu vervollständigen, damit die Projektmappe als „Wissen“ für andere Projekte zur Verfügung steht und komplett archiviert werden kann.

11.7.1 Interpretation und Rückschlüsse

Anhand der Ergebnisse der Versuchsauswertung sollte das Team versuchen, die sicherlich vielfältige Informationsaussagen in Form von Zahlenwerten und Grafiken zu interpretieren und zu verstehen.

Gerade im Hinblick auf die Relevanz einiger Faktoren sowie vorhandener Wechselwirkungen treten immer wieder „Glaubensfragen“ und „Verständnißprobleme“ auf. Diese sind hier zu klären, um eine optimale Faktoreinstellung zu finden, welche die gewünschte Zielvorstellung erfüllt.

Da gerade bei der Versuchsauswertung zumeist nicht das komplette Team involviert ist, sind die erhaltenen Ergebnisse der Auswertung zusammenzufassen und dem Team verständlich darzulegen. Wichtig ist in jedem Fall, daß das Ergebnis technisch plausibel erscheint. Dies sollte sich dann in einem folgenden Bestätigungsversuch zeigen.

11.7.2 Maßnahmen

Da die Abhängigkeit der einzelnen Zielgrößen von den untersuchten Faktoren jetzt bekannt sein sollte, lassen sich hieraus Maßnahmen zur Problem- bzw. Aufgabenlösung ableiten. Selbst für Zielkonflikte, die durch mehrere Zielgrößen auftreten, lassen sich Einstellungen finden, die für alle Beteiligten günstige Ergebnisse liefern. Gerade hierzu ist die quantitative Kenntnis der Abhängigkeit essentiell wichtig.

Aus diesen Betrachtungen läßt sich schließlich ein Maßnahmenpaket für konkrete Produkt- bzw. Prozeßverbesserungen ableiten. Diese sind jedoch zwingend mit einem Bestätigungsversuch zu überprüfen, bevor sie übernommen werden. Aufgrund der Zielvorgabe, sollten die Maßnahmen gezielt auf die Erfüllung dieser oder etwaiger Verbesserungen abzielen.

11.7.3 Absicherung und weiteres Vorgehen

Mit der Aufstellung eines Maßnahmenpaketes ist der ProStaV noch nicht beendet. Die Gewährleistung, daß die Verbesserungen tatsächlich erreicht werden und auf Dauer Bestand haben, ist noch sicherzustellen.

Dazu ist, bevor die Maßnahmen endgültig am Produkt oder Prozeß umgesetzt werden, ein Bestätigungsversuch zwingend durchzuführen.

Zum weiteren Vorgehen ist anzuführen, daß aufbauend auf den erhaltenen Ergebnissen der ProStaV erneut durchlaufen werden kann bzw. ein Rücksprung in vorherige Phasen neue Verbesserungsmaßnahmen zu Tage fördert. Dazu können z.B.

- andere Stufen,
- andere Faktoren,
- andere Zielgrößen,
- usw.

betrachtet werden.

Schritt für Schritt wird somit neues Wissen ermittelt und strukturiert zur Verfügung gestellt.

11.7.4 Bestätigungsversuch

Die Durchführung eines Bestätigungsversuches ist ein entscheidender Schritt bei der Problemlösung mittels statistischer Versuchsplanung. Er soll verifizieren, daß die aus dem Versuchsplan ermittelten Optimalkombinationen der Faktoreinstellungen tatsächlich zu den prognostizierten Verbesserungen führen. Wenn die beim Bestätigungsversuch beobachteten Ergebnisse nahe bei den jeweiligen Voraussagen liegen, hat der Versuchsplan eine gute Approximation der Wirklichkeit geliefert. Folglich können dann die ermittelten Optimalkombinationen für die Produkt bzw. Prozeßbetrachtung verwendet werden. Falls der Bestätigungsversuch weit von den prognostizierten Werten entfernt liegt, kann dies manigfaltige Gründe haben, wie z.B.

- falsche Faktorenauswahl,
- falsche Stufenwahl,
- falsche Modellwahl,
- usw.

Ein Bestätigungsversuch wird daher durch zwei wichtige Aspekte gekennzeichnet:

- 1.) Die Prognosen müssen unter Versuchsbedingungen gelten.
und
- 2.) Die Prognose sollte auch unter tatsächlichen Herstellbedingungen für die Prozeßentwicklung und unter tatsächlichen Gebrauchsbedingungen für die Produktentwicklung gültig sein.

Die Übertragung in die Praxis sollte letztendlich auf einer sachlichen Entscheidung beruhen, die als Basis die Versuchsergebnisse und deren Auswertung sowie einen Bestätigungsversuch enthält.

11.7.5 Dokumentation abschließen und vervollständigen

Den Abschluß bildet die Beendigung der Dokumentation, d.h. das Schließen der Projektmappe. Zuvor sollte das gesamte Projekt nochmals durchgesprochen werden, um Feedback und Verbesserungsvorschläge der Teammitglieder zu erfragen.

Ein Kosten-/Nutzen-Vergleich kann zur Rekapitulation sehr aussagekräftig sein, um den Aufwand mit dem erhaltenen Nutzen zu vergleichen. Dies schließt eine Rentabilitäts- und Budgetbeurteilung ein.

Mit der Überprüfung der charakteristischen Schlagworte, die zu Beginn festgelegt wurden, und einer Erweiterung dieser Schlagworte beruhend auf den letzten Phasen, wird der ProStaV abgeschlossen.

Zusammenfassend sind in *Abb. 11.42* nochmals alle durchgeführten Schritte in Form eines Flow-Charts vom Projektstart bis zur Validierung aufgezeigt.

Änderungen am Ablauf oder das Auslassen einiger Schritte oder ganzer Phasen kann für geübte Anwender bzw. bei der einen oder anderen Aufgabe durchaus Sinn machen. Daher ist der ProStaV bzw. die *Abb. 11.42* so aufgebaut, daß die Phasen auch einzeln angewendet werden können.

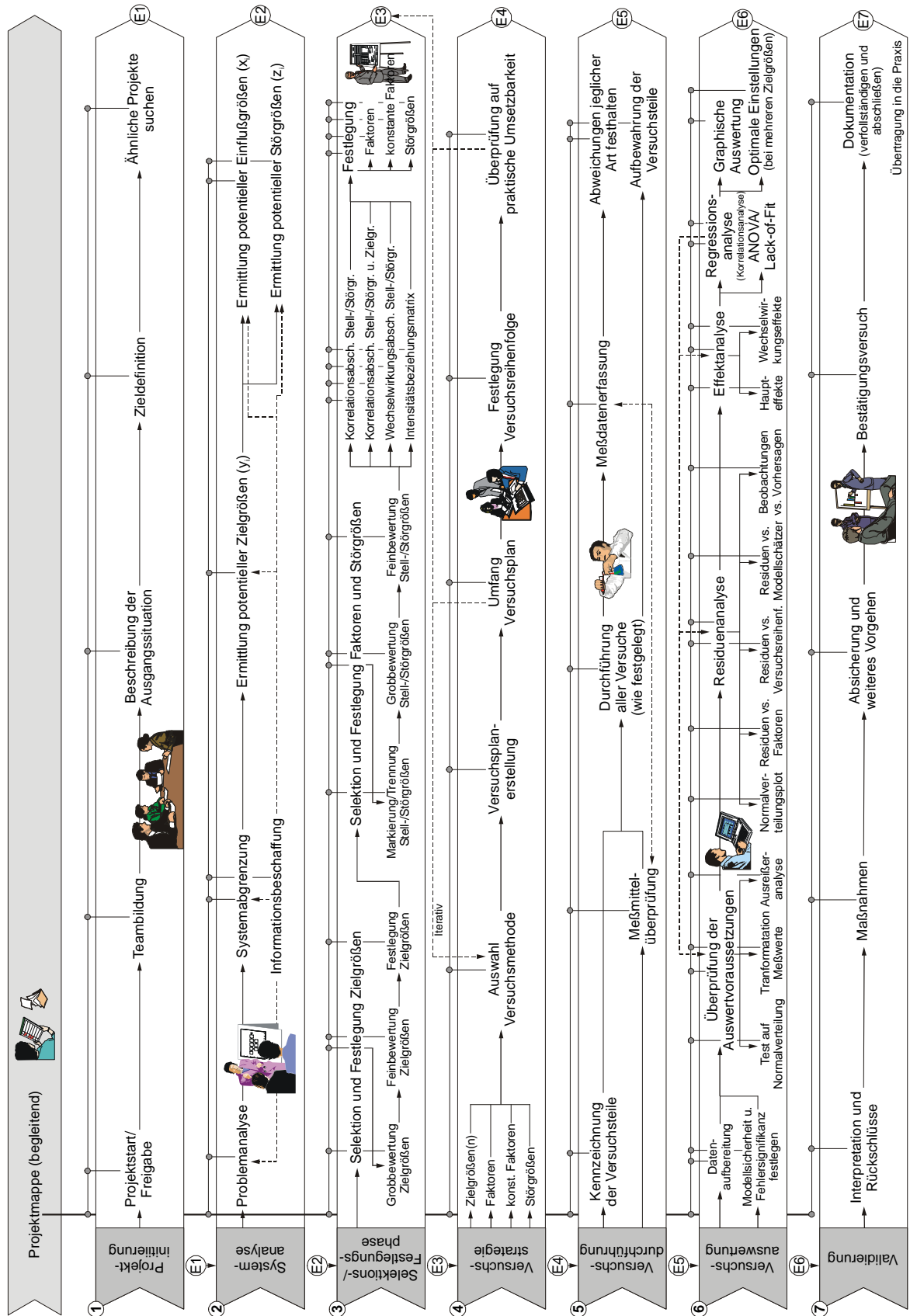


Abb. 11.42: Komplettübersicht der Phasen und Einzelschritte des ProStAv

12 Praxisbeispiel ProStaV

Die nachfolgend beschriebene Beispielanwendung des ProStaV entstammt dem Forschungsvorhaben „*Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen*“ /AIF03/, das von der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover und der Forschungsgemeinschaft Kalk + Mörtel e.V., Köln durchgeführt wurde. Die statistische Planung, Auswertung und Ergebnisinterpretation der Versuchspläne erfolgte in Kooperation mit dem Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion der Universität Kassel.

Gefördert wurde das Projekt aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „*Otto von Guericke*“ e.V. (AiF).

12.1 Projektdefinition/Projektinitiierung

12.1.1 Projektstart/Freigabe

Der Start des Projektes erfolgte im Jahr 2001 mit einer vorgesehenen Laufzeit bis zum Frühjahr 2003, die jedoch um drei Monate verlängert wurde. Die genau Bezeichnung des Forschungsvorhabens lautet: *Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen* (AiF-Nummer: 13106-N).

12.1.2 Teambildung

Zur Durchführung des Forschungsvorhabens wurde ein Kernteam gebildet, welches sich aus Personen

- der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover,
 - der Forschungsgemeinschaft Kalk + Mörtel e.V., Köln,
 - der Universität Kassel, Fachgebiet für Leichtbau-Konstruktion, Kassel
- sowie
- der Universität Hannover, Institut für Mineralogie, Hannover

zusammensetzte und je nach Fortschritt und Tätigkeit durch weitere Personen ergänzt wurde.

12.1.3 Beschreibung der Ausgangs- bzw. Problemsituation

Zur Produktion von Kalksandsteinen wird neben Brunnen- bzw. Oberflächenwasser in manchen Fällen auch Trinkwasser verwendet. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen wird zunehmend anstelle des Frischwassers das stets mit Fremdionen befrachtete Härtekesselkondensat als Anmachwasser für die Mischungszusammensetzung eingesetzt.

Wegen der sich ständig verschärfenden Umweltauflagen und der damit einhergehenden Kostensteigerung kommt der Weiterverwendung von Abwässern innerhalb der Kalksandsteinindustrie ohnehin eine wachsende Bedeutung zu.

Frisch- und Abwassermengen können nicht zuletzt durch eine vermehrte Schließung von Stoffkreisläufen und der damit verbundenen Rückführung von Wärmeenergie weiter reduziert werden. Auch bei den Produktionskosten läßt sich hiermit eine Reduzierung erreichen. Allerdings war bis dato unbekannt, wie sich bei der Kalksandstein-Technologie Wasserkreisläufe durch die Verwertung von Härtekesselkondensaten¹ als Anmachwasser ohne Einbußen der Qualitätskriterien der Steine schließen lassen.

Die Anwendung von Kondensaten² als Mischwasser wird heute bereits praktiziert. Die Anforderungen an die chemische Zusammensetzung von Anmachwässern sind jedoch noch nicht genau ergründet. Auch konnten Normfestigkeiten der Steine bei Verwendung von Kondensaten nicht durchgängig sicher geplant werden. Daraufhin traten häufig Fragen bezüglich zulässiger Maximalkonzentrationen von Kondensatinhaltsstoffen auf, deren abgesicherte Beurteilungsgrundlage bislang nicht vorhanden war.

12.1.4 Zieldefinition

Das Hauptziel der Untersuchungen war darin zu sehen, direkt anhand der Löschwasserzusammensetzung Aussagen über die zu erwartende Qualität der Kalksandsteine treffen zu können. Daher bestand das Ziel des Forschungsvorhabens in *der systematischen Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung von Härtekesselkondensaten aus der Kalksandsteinproduktion und deren Auswirkung auf das Löschverhalten handelsüblicher Branntkalke. Zudem sollten Rückschlüsse auf die Eigenschaftswerte gefertigter Kalksandsteine gezogen werden.* Ein weiteres Ziel war es, aus diesen Erkenntnissen mögliche Grenzwerte bezüglich der Fremdionen³ abzuleiten.

Die einzelnen Einflußgrößen des Löschvorgangs sollten anhand der geplanten Untersuchungen isoliert betrachtet und deren Wichtung erkannt werden. Des weiteren war ein Prognosemodell zu erarbeiten, aus dem eine Ableitung eines Maßnahmenkatalogs für die Umsetzung der Erkenntnisse in die betriebliche Praxis möglich werden sollte.

Ebenso bestand ein weiteres Ziel in der Vermeidung von Produktschäden bzw. dem Auftreten minderer Steinqualitäten infolge nicht ausreichend bekannter Eigenschaften von Härtekesselkondensaten als Anmachwasser. Darüber hinaus war die Schließung der Stoffkreisläufe ein wichtiges ökologisches und ökonomisches Ziel neben der Reduzierung der Abwassermenge bei der Herstellung der Kalksandsteine.

Zudem sollte geprüft werden, ob die Methoden bzw. Verfahren der statistischen Versuchsplanung im Bereich der Kalksandsteinindustrie aussagefähige Ergebnisse und eine Verringerung des Versuchsumfangs erbringen würden.

¹ Der Härtekessel wird mit Dampf, der unter hohem Druck steht, beschickt. Beim Abkühlen kondensiert der Dampf an den Kesselwänden und Steinen wieder zu Wasser, das als Härtekesselkondensat bezeichnet wird.

² Wurde im Forschungsbericht /AIF03/ als Kurzform von Härtekesselkondensat verwendet.

³ Fremdionen ist ein zusammenfassender Begriff für alle Stoffe, die das Kondensat aufgenommen hat.

12.1.5 Ähnliche Projekte suchen

Projekte und Forschungsvorhaben innerhalb der Industriesparte Kalksandsteinproduktion, die sich mit der statistischen Versuchsplanung und dem Thema Inhaltsstoffe in Härtekesselkondensaten, Ablöschverhalten, u.ä. befassen, waren nicht bekannt. Allgemeine Informationsquellen sind unter 12.2.2 aufgeführt.

12.2 Systemanalyse

12.2.1 Detaillierte Problemanalyse

Kalksandsteine gelten als Mauersteine, die aus den natürlichen Rohstoffen Branntkalk, Quarzsand und Wasser bestehen und dementsprechend aus ihnen gefertigt werden. Nach erfolgter Dosierung sowie Mischung der Rohstoffe gelangt die Masse in die Reaktoren, in denen dann der Branntkalk $[CaO]$ mit dem Wasser unter Wärmeentwicklung zu Calciumhydroxid $[Ca(OH)_2]$ reagiert. Die Formgebung der Rohmasse erfolgt sodann in den Pressen. Anschließend werden im nächsten Schritt die Rohlinge von vollautomatischen Abnehmern auf Härtewagen gestapelt und über ein Schiebebühensystem für die Dampfhärtung in die Autoklaven transportiert. Nach Beendigung der Hydrothermalbehandlung sind die Kalksandsteine fertig zum Gebrauch. Der Entstehungsprozeß ist nochmals in *Abb. 12.1* aufgeführt.

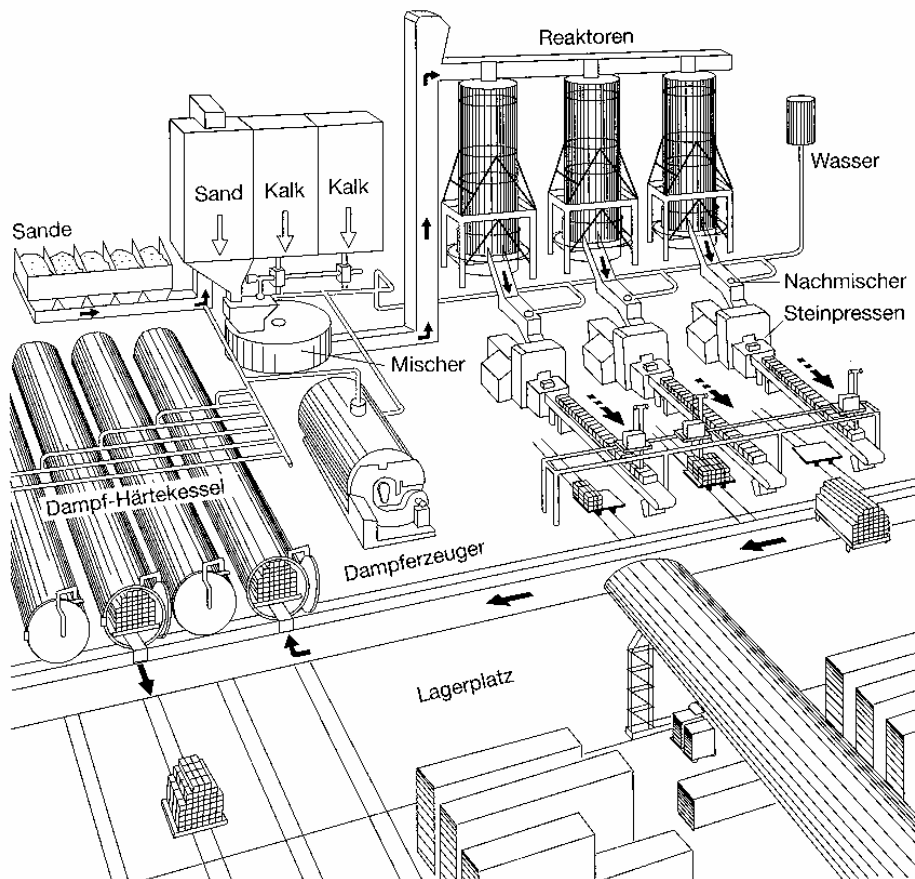


Abb. 12.1: Kalksandsteinentstehung /INT9/

Innerhalb der DIN 1045 der Betontechnologie ist die chemische Zusammensetzung von Anmachwässern streng geregelt. Im Wasser dürfen keine Stoffe enthalten sein, die das Erhärten oder andere Eigenschaften des Betons ungünstig beeinflussen. In der Porenbetonindustrie sind aufgrund der dortigen wesentlich empfindlicheren Verfahrensprozesse ebenfalls strenge Bedingungen für die Anmachwässer festgeschrieben.

Voruntersuchungen der Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. und der Forschungsgemeinschaft Kalk-Sand e.V. an mehreren (Original-) Kondensatproben zeigten, daß deren chemische Zusammensetzung einen überraschend deutlichen Einfluß auf das Ablöschverhalten von Branntkalken hatte. Aufgrund der sehr hohen Anzahl an potentiellen Einflußgrößen und deren Vernetzung waren aus den Voruntersuchungen allein keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen der Art der Fremdionen, deren Konzentration und der Beeinflussung der Löschreaktion erkennbar.

Der Ablöschprozeß des Kalkes hat auf den Herstellprozeß und die letztendliche Qualität von Kalksandsteinen einen entscheidenden Einfluß. Bei diesem Hydratationsprozeß handelt es sich um einen chemisch-mineralogisch sehr komplizierten Vorgang, dessen Einzelheiten bezüglich der Kalksandsteinproduktion noch nicht ausreichend ergründet sind. Im einzelnen geschieht dabei folgendes: Bei der Berührung des Branntkalkpulvers mit Wasser setzt sich dieses unter stark exothermen Bedingungen in Calciumhydroxid um. Zahlreiche Zusammenhänge sind lediglich qualitativ bekannt. Außerdem spielen mehrere Einflußgrößen eine entscheidende Rolle.

12.2.1.1 Systemabgrenzung

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in drei Stufen: In der ersten Stufe sollte systematisch der qualitative und quantitative Einfluß von Kationen und Anionen auf das Löschverhalten von handelsüblichen Branntkalken sowie die Teilchengröße ermittelt werden. Die zweite Stufe diente dann dazu, den Einfluß von Fremdionen in systematisch dotierten Anmachwässern auf die Qualität von Kalksandsteinen zu untersuchen. Bei der dritten Stufe sollte analysiert werden, ob bei zyklischer Verwendung von Härtekesselkondensaten als Anmachwasser eine Aufkonzentrierung auf die Produktqualität eintreten könnte. Alle drei Stufen sind in *Abb. 12.3* nochmals dargestellt.

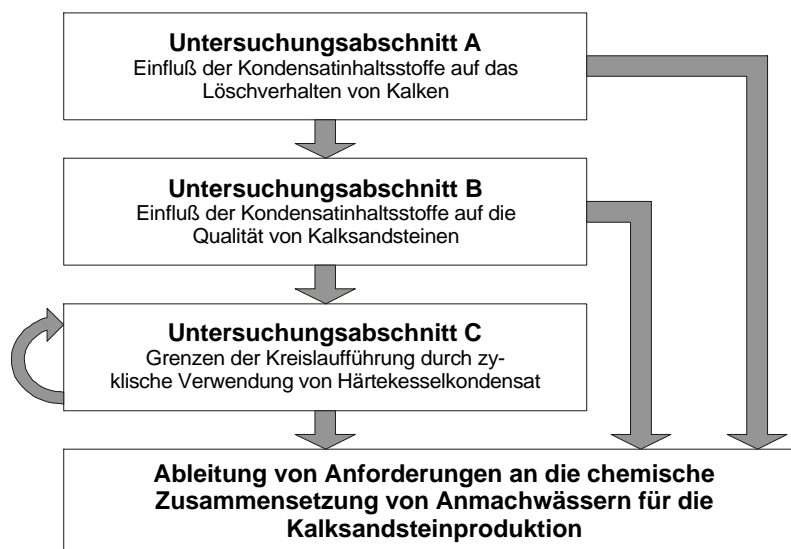


Abb. 12.3: Aufbau des Forschungsvorhabens

Innerhalb der Untersuchungsabschnitte A und B wurden statistische Versuchspläne verwendet, um die Anzahl der Versuche zu reduzieren und gleichzeitig die Informationsausbeute zu erhöhen. Exemplarisch wird nachfolgend nur der Untersuchungsabschnitt A betrachtet, da sonst der Umfang zu groß würde. Ausführlich ist das Forschungsvorhaben in /AIF03/ dokumentiert.

Anmerkung: Zur Vorabüberprüfung, ob der Einsatz von statistischen Versuchsplänen akzeptable und interpretierbare Ergebnisse liefert, wurde ein „kleiner“ Versuchsplan bestehend aus drei Faktoren durchgeführt. Dabei handelte es sich um die Salze Kaliumchlorid [KCL] und Kaliumsulfat [K₂SO₄] sowie um die Mischungstemperatur⁴. Um weiterhin zu überprüfen, ob gewisse Nichtlinearitäten auftreten, wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan gewählt, bei dem die Faktoren auf fünf Stufen analysiert wurden. Insgesamt gab es dementsprechend 17 Versuche (15 für den zentral zusammengesetzten Plan + zwei Zentralpunkt wiederholungen). Als Zielgrößen wurden die Naßlöschkurve sowie die Partikelgrößenverteilung gewählt.

Bei der Auswertung zeigte sich, daß statistische Versuchspläne gut geeignet sind, um die gewünschten Analysen innerhalb des Forschungsvorhabens detailliert zu untersuchen und das mit einem durchführbaren Aufwand. Es konnte anhand des zentral zusammengesetzten Versuchsplans ein Regressionsmodell (Prognose-Modell) entwickelt werden, das bei der Überprüfung nur geringe Abweichung aufwies. Somit wurde beschlossen, die statistische Versuchsplanung für weitere Untersuchungen mit mehreren Faktoren einzusetzen. Insgesamt wurden in dem Forschungsvorhaben fünf Versuchspläne erstellt (Umfang insgesamt 117 Versuche) und ausgewertet. Im Anhang ist eine kurze Übersicht vorhanden.

12.2.2 Informationsbeschaffung

Zum Löschverhalten von Kalken existieren mehrere allgemein gehaltene bzw. in sich geschlossene Untersuchungen. In keiner dieser Literaturstellen sind jedoch systematische Untersuchungen zu den hier zu untersuchenden Zusammenhängen zwischen den Löschwassereigenschaften und den Eigenschaftswerten von Kalksandsteinen aufgelistet.

Als treffendste Informationsquellen galten daher die Dissertation von *Wittneben* /WIT80a/ sowie eine im Zusammenhang stehende Veröffentlichung über die Teilchengrößenverteilung in Kalkhydratsuspensionen /WIT80b/. Die Inhalte dieser Untersuchungen sind zwar nicht direkt auf die Kalksandsteinproduktion adaptierbar, allerdings waren die grundlegenden Erkenntnisse aufgrund zahlreicher Hinweise auf löschbeeinflussende Faktoren für dieses Forschungsvorhaben sehr hilfreich.

Weitere Hinweise auf Einflußgrößen beim Löschvorgang sind in /FNK77, LYC77, KON63, POH55/ aufgeführt.

12.2.2.1 Allgemeine Hilfsmittel

Es wurden keine „allgemeinen Hilfsmittel“ verwendet.

⁴ Im Forschungsvorhaben wurde die Mischungstemperatur auch als Starttemperatur deklariert.

12.2.3 Ermittlung aller potentiellen Ziel-, Einfluß- und Störgrößen

12.2.3.1 Potentielle Zielgrößen

Die Grundlage für die Betrachtung des Einflusses der Fremdionen auf die Reaktionsfähigkeit (tu_{80}^5) und die Temperaturzeitentwicklung (Tu_{80}^6 , T_{max}^7) der Kalke bildete die Ermittlung der sogenannten Naßlöschkurve nach EN 459-2 sowie die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der Naßlöschkurve bei der Entstehung des Kalkhydrates. Zur Beschreibung der Partikelgrößenverteilung wurden die Partikeldurchmesser⁸ für die Massenanteile von 10, 50 und 90 % der Gesamtmasse angegeben (bezeichnet als d_{10} , d_{50} und d_{90}).

12.2.3.2 Potentiellen Einfluß- und Störgrößen

Um Hinweise auf die chemische Zusammensetzung der Härtekesselkondensate zu bekommen, wurden in vier Kalksandsteinwerken Proben während der laufenden Produktion entnommen und analysiert.

Ziel dieser Charakterisierung realer Kondensate war die Sicherstellung, daß die Fremdionenkonzentrationen der synthetischen Kondensate der anschließenden Untersuchungen in den Werken anzutreffenden Bedingungen entsprachen.

Anhand dieser Ergebnisse konnten die potentiellen Einflußgrößen identifiziert werden, die in *Tab. 12.2* aufgelistet sind.

Parameter	Einheit	Wertebereich
pH-Wert	-	8,8 bis 12,2
Leitfähigkeit	[mS/cm]	0,12 bis 2,27
Härte	[°dH]	0,8 bis 5,5
Calcium	[mg/l]	1,57 bis 6,65
Magnesium	[mg/l]	< 0,01 bis 2,44
CSB ⁹	[mg/l]	k.A.
Nitrat	[mg/l]	0,4 bis 11,3
Ammonium	[mg/l]	4,5 bis 164
Phosphat	[mg/l]	< 0,2 bis 10,5
Chlorid	[mg/l]	0,5 bis 390
Sulfat	[mg/l]	0,31 bis 87
Natrium	[mg/l]	3,2 bis 279
Kalium	[mg/l]	2,7 bis 288

Tab. 12.2: Einflußgrößen

⁵ tu_{80} beschreibt die Zeit, bis zu der 80 % des Kalkes gelöscht sind.

⁶ Tu_{80} ist die Temperatur die erreicht wird, wenn 80 % des Kalkes umgesetzt sind.

⁷ T_{max} ist die maximal gemessene Temperatur.

⁸ Die „d“-Werte beschreiben den Durchmesser, den 10, 50 bzw. 90 Summe-% der Kurve ausmachen. Es sind drei Werte notwendig, um die Lage der Kurve zu beschreiben.

⁹ **Aufgrund der Geheimhaltung werden detaillierte Angaben zum CSB-Wert unkenntlich gemacht. Im folgenden Versuchsplan finden sich nur die normierten Angaben -1 und +1 oder aber keine Angaben. Bei Grafiken, in denen CSB vorkommt, wurden die Werte der Abszisse daher entfernt.**

12.3 Selektion/Festlegung von Zielgrößen, Faktoren und Störgrößen

12.3.1 Selektion und Festlegung der Zielgröße(n)

12.3.1.1 Grobbewertung aller potentiellen Zielgrößen

Aufgrund der Formulierung des Forschungsprojektes konnte dieser Punkt entfallen, da die Zielgrößen dort bereits aufgeführt wurden, d.h. auf den Punkt Festlegung der Zielgrößen konnte verzichtet werden.

12.3.1.2 Feinbewertung aller potentiellen Zielgrößen

Bei der Feinbewertung der Zielgrößen in *Tab. 12.3* zeigte sich, daß gewisse Abhängigkeiten bestanden und das diesbezüglich ein „vermuteter“ Kenntnisstand vorlag.

	tu80		Tu80		Tmax		d ₁₀		d ₅₀		d ₉₀	
	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
tu80			⊙	/	⊙	/	○		○		○	
Tu80					●	/	⊙	/	⊙	/	⊙	/
Tmax							⊙	/	⊙	/	⊙	/
d ₁₀									⊙	/	⊙	/
d ₅₀											⊙	/
d ₉₀												

Tab. 12.3: Feinbewertung der potentiellen Zielgrößen¹⁰

12.3.1.3 Meßbarkeit der Zielgröße(n)

Aufgrund der speziellen Fragestellung dieses Forschungsvorhabens mußte eine von der Norm abweichende Meßbedingung geschaffen werden, so daß eine Anpassung und Modifizierung des Verfahrens zur Ermittlung der Naßlöschkurve unumgänglich war.

Dazu sollte nach der EN 459-2 in einem Dewargefäß 600 ± 1 g destilliertes Wasser von $20 \pm 0,5$ °C vorgelegt werden, ehe anschließend $150 \pm 0,5$ g der Probenmenge hinzukamen. Die Temperaturentwicklung über die Zeit sollte dann erfaßt und der 80%ige Umsatz des Kalkes – auf Zeit (tu80 [min]) und Temperatur (Tu80 [°C]) bezogen – sowie die maximal erreichte Temperatur Tmax [°C] abgelesen werden.

Zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung konnte das Verfahren der „Lasergranulometrie“ eingesetzt werden. Bei beiden Zielgrößen handelte es sich um quantitative Größen.

Weiteres ist auch unter 12.5.4, 12.5.5 sowie /AIF03/ verzeichnet.

¹⁰ Legende siehe *Abb. 11.7*

12.3.2 Selektion von Faktoren und Störgrößen

12.3.2.1 Trennung von Stell- und Störgrößen

Alle Einflußgrößen, die in *Tab. 12.2* aufgelistet sind, konnten als Stellgrößen angenommen werden, d.h. es wurden im weiteren Verlauf des Beispiels keine Störgrößen behandelt.

12.3.2.2 Bewertung und Eingrenzung

Als Restriktion ist anzuführen, daß durch die Aufgabenstellung die Kalksorte sowie die Mischungstemperatur immer mit betrachtet werden mußten, d.h. sie waren als Faktoren gesetzt. Die Mischungstemperatur sollte die Verhältnisse im Kalksandsteinwerk nachstellen, da dort das Kondensat auch mit unterschiedlichen Temperaturen zugegeben wird.

Unterscheidungsmerkmale der beiden Kalksorten waren in der Reaktionsgeschwindigkeit zu finden. Damit sollte sichergestellt werden, daß keine Effekte überbewertet werden, die auf einen speziellen Kalk zurückzuführen sind.

12.3.2.2.1 Grobbewertung von Stell- und Störgrößen

Aus *Tab. 12.4* ist ersichtlich, daß von den 13 aufgeführten Einflußgrößen nur acht eine Relevanz bezüglich der Aufgaben- bzw. Problemstellung aufwiesen.

Parameter	Wichtigkeit ¹¹	Einstellaufwand ¹²	Genauigkeit ¹³	Summe
pH-Wert	3	1	2	6
Leitfähigkeit	1	1	1	3
Härte	3	1	2	6
Calcium	1	1	2	4
Magnesium	1	1	2	4
Chemischer Sauerstoffbedarf	10	5	5	20
Nitrat	8	10	10	28
Ammonium	8	10	10	28
Phosphat	8	10	10	28
Chlorid	10	10	10	30
Sulfat	10	10	10	30
Natrium	5	10	10	25
Kalium	5	10	10	25

Tab. 12.4: Grobbewertung der Einflußgrößen

Anmerkung: Calcium und Magnesium waren im Kondensat in Konzentrationen vorhanden, die vernachlässigbar sind, da durch den Kalk selber eine viel größere Menge dieser beiden zugegeben wurde. Die Zusammensetzung eines Branntkalkes lag bei 70-98 % Calciumoxid und 0,3-5 % Magnesiumoxid.

¹¹ Wichtigkeit: 1 Punkt = unwichtig; 10 Punkte = sehr wichtig

¹² Einstellaufwand: 1 Punkt = sehr schwierig; 10 Punkte = sehr leicht

¹³ Genauigkeit: 1 Punkt = sehr ungenau; 10 Punkte = sehr genau

Die (Wasser-)härte stellte einen Summenparameter dar, in den Calcium und Magnesium miteinfließen und die (elektrische) Leitfähigkeit ergab sich aus der Konzentration der gelösten Ionen im Wasser, unabhängig von der Art der Ionen. Die Parameter Leitfähigkeit und Härte wurden nur zur Überprüfung der gemessenen Konzentrationen der einzelnen Fremdionen verwendet.

Dem pH-Wert kam ebenfalls eine beschreibende Funktion zu, außerdem wurde der pH-Wert bei Zugabe von Branntkalk ausschließlich durch diesen bestimmt.

12.3.2.2.2 Feinbewertung von Stell- und Störgrößen

Für die nachfolgenden Bewertungen und Abschätzungen wurden folgende Einflußgrößen verwendet:

- Kalksorte \Rightarrow KS,
 - Mischungstemperatur \Rightarrow MT,
 - Chemischer Sauerstoffbedarf \Rightarrow CSB,
 - Nitrat \Rightarrow NO₃,
 - Ammonium \Rightarrow NH₄,
 - Phosphat \Rightarrow PO₄,
 - Chlorid \Rightarrow CL,
 - Sulfat \Rightarrow SO₄,
 - Natrium \Rightarrow NA
- sowie
- Kalium \Rightarrow K.

12.3.2.2.2.1 Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen

Anhand Tab. 12.5 zeigte sich, daß die Einflußgrößen unabhängig voneinander betrachtet und eingestellt werden konnten. Somit eigneten sich alle Einflußgrößen als Faktor für einen späteren Versuchsplan. Diese Aussagen galten als sicher bis vermutet.

	KS		MT		CSB		NO ₃		NH ₄		PO ₄		CL		SO ₄		NA		K	
	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
KS	■	■	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X
MT	■	■	■	■	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X	●	X
CSB	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X
NO ₃	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X
NH ₄	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X
PO ₄	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X	⊙	X	⊙	X
CL	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X	⊙	X
SO ₄	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X	⊙	X
NA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	⊙	X
K	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tab. 12.5: Korrelationsabschätzung¹⁴

¹⁴ Legende siehe Abb. 11.9

12.3.2.2.2 Wechselwirkungsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen

	KS		MT		CSB		NO ₃		NH ₄		PO ₄		CL		SO ₄		NA		K	
	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
KS	■	■		?		?		?		?		?		?		?		?		?
MT			■	■		?		?		?		?		?		?		?		?
CSB					■	■		?		?		?		?		?		?		?
NO ₃							■	■		?		?		?		?		?		?
NH ₄									■	■		?		?		?		?		?
PO ₄											■	■		?		?		?		?
CL													■	■		?		?		?
SO ₄															■	■		?		?
NA																	■	■		?
K																			■	■

Tab. 12.6: Wechselwirkungsabschätzung bezüglich Naßlöschkurve¹⁵

	KS		MT		CSB		NO ₃		NH ₄		PO ₄		CL		SO ₄		NA		K	
	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
KS	■	■		?		?		?		?		?		?		?		?		?
MT			■	■		?		?		?		?		?		?		?		?
CSB					■	■		?		?		?		?		?		?		?
NO ₃							■	■		?		?		?		?		?		?
NH ₄									■	■		?		?		?		?		?
PO ₄											■	■		?		?		?		?
CL													■	■		?		?		?
SO ₄															■	■		?		?
NA																	■	■		?
K																			■	■

Tab. 12.7: Wechselwirkungsabschätzung bezüglich Partikelgröße¹⁵

Da keine Vorstellungen und Erfahrungen bezüglich der Wechselwirkungen vorhanden waren, wurden überall Fragezeichen aufgeführt, d.h. es mußten alle potentiellen Wechselwirkungen in dem Versuchsszenario berücksichtigen werden.

12.3.2.2.3 Korrelationsabschätzung zwischen Stell-/Störgrößen und Zielgröße(n)

	Naßlöschkurve		Partikelgröße	
	B	K	B	K
KS	?		?	
MT	↗	⊙	↗	⊙
CSB	↘	⊙	↗	⊙
NO ₃	↘	⊙	?	⊙
NH ₄	↘	⊙	x	⊙
PO ₄	↘	⊙	x	⊙
CL	∪	⊙	x	⊙
SO ₄	↘	⊙	↗	⊙
NA	x	⊙	x	⊙
K	x	⊙	x	⊙

Tab. 12.8: Korrelationsabschätzung Stellgrößen auf Zielgrößen¹⁶

¹⁵ Legende siehe Abb. 11.10

¹⁶ Legende siehe Abb. 11.12

Bei der Abschätzung, welche Auswirkungen eine Veränderung der Einflußgrößen auf die Zielgrößen ausüben würde, zeigte sich, daß hauptsächlich lineare Abhängigkeiten vermutet wurden. Für das spätere Versuchsszenario kamen somit Pläne mit zwei Stufen in Betracht, auch wenn für eine Einflußgröße ein nichtlinearer Zusammenhang prognostiziert wurde.

12.3.2.2.3 Intensitäts-Beziehungsmatrix und Portfolio-Diagramm

Die Intensitäts-Beziehungsmatrix wurde in diesem Forschungsvorhaben nicht verwendet.

12.3.2.3 Festlegung von Faktoren, Steuer- und Störgrößen

Es wurden alle Faktoren mit in die Untersuchung einbezogen, d.h. es war für acht Fremddionen sowie zwei Kalksorten und die Mischungstemperatur ein Versuchsprogramm zu generieren. Die Faktoren sind in *Tab. 12.9* nochmals mit ihren Stufen aufgelistet.

12.3.2.3.1 Wahl der Faktorstufen

Faktoren	KB	min.	max.	Einheit	quali/quant.
Kalksorte	KS	A	B	-	quali.
Mischungstemperatur	MT	20	50	°C	quanti.
Chemischer Sauerstoffbedarf	CSB	-1	+1	mg/l	quanti.
Nitrat	NO ₃	0,5	20	mg/l	quanti.
Ammonium	NH ₄	4,5	400	mg/l	quanti.
Phosphat	PO ₄	0,2	20	mg/l	quanti.
Chlorid	CL	0,5	650	mg/l	quanti.
Sulfat	SO ₄	0,3	200	mg/l	quanti.
Natrium	NA	3,2	850	mg/l	quanti.
Kalium	K	2,7	600	mg/l	quanti.

Tab. 12.9: Faktoren mit Faktorstufen

12.3.2.3.2 Störgrößenbehandlung

Die Versuche sollten in einer randomisierten Reihenfolge durchgeführt werden.

12.4 Versuchsstrategie

12.4.1 Auswahl einer Versuchsmethode

Aus *Tab. 12.9* geht hervor, daß für zehn Faktoren ein Versuchsprogramm zu erstellen war. Da anhand der Wechselwirkungsabschätzungen (*Tab. 12.6*, *Tab. 12.7*) keine Reduzierung möglich war, bestand die Aufgabe darin, für diese zehn Faktoren und deren Zweifach-Wechselwirkungen einen geeigneten Versuchsplan zu erstellen. Weiterhin war zu beachten, daß der eine oder andere Faktor auch nichtlinear wirken konnte.

Da davon ausgegangen werden konnte, daß nicht alle Faktoren einen signifikanten Einfluß ausüben und der Versuchsaufwand sich in einem akzeptablen Verhältnis bewegen sollte, kam bei der Untersuchung von zehn Faktoren ein Versuchsplan aus dem „Screening“-Bereich in Frage. Tab. 12.10 enthält daher eine Aufstellung von möglichen Versuchsplänen.

Bezeichnung	Terme	Versuche	DF	G-Eff.	LogDet	LogDet Norm	Cond. No.	Modell
Vollfaktorieller 2^{10} -Plan	56^{17}	1024	968	-	-	-	1	linear + alle WW
Teilfaktorieller 2^{10-3} -Plan (V)	56^{13}	128	72	-	-	-	1	linear + alle 2-FWW
Teilfaktorieller 2^{10-5} -Plan (IV)	11	32	21	-	-	-	1	linear + einige 2-FWW
Teilfaktorieller 2^{10-6} -Plan (III)	11	16	5	-	-	-	1	linear
Plackett-Burman Plan	11	16	5	-	-	-	1	linear

Tab. 12.10: Gegenüberstellung potentieller Versuchspläne aus dem „Screening“-Bereich

Die Anwendung von D-optimalen Plänen wäre für die Fragestellung ebenfalls in Betracht gekommen. Im Vergleich zu den Plänen des „Screening“-Bereichs sind in Tab. 12.11 zwei mögliche D-optimale Pläne mit ihren charakteristischen Maßzahlen für ein komplettes und für ein reduziertes Modell aufgeführt.

Bezeichnung	Terme	Versuche	DF	G-Eff.	LogDet	LogDet Norm	Cond. No.	Modell
D-optimal (kompl. Modell)	56	89	33	64	-0,02	107,8	1,88	linear + alle 2-FWW
D-optimal (red. Modell)	11	14	3	86	-0,015	12,43	1,41	linear

Tab. 12.11: Gegenüberstellung potentieller Versuchspläne

Um, wie durch die Aufgabenstellung gefordert, alle Zusammenhänge zu erkennen, war es notwendig, die Haupteffekte sowie alle Zweifaktor-Wechselwirkungen mit einem entsprechenden Versuchsplan zu analysieren.

Möglich wäre dies durch die Anwendung eines teilfaktoriellen 2^{10-3} -Plans mit 128 Versuchen gewesen, der die Auflösung V besitzt. Denkbar wäre ebenfalls die Anwendung eines D-optimalen Plans gewesen, der im Vergleich ca. 89 Versuche benötigt hätte. Allerdings lag das Bestreben darin, einen „klassischen“ Plan (siehe Kapitel 5.2) zu verwenden, da bisher kaum Erfahrungswerte bezüglich der Anwendung der statistischen Versuchsplanung im Bereich der Kalksandsteinherstellung vorlagen.

Eine weitere Möglichkeit bestand darin, die zehn Faktoren aufzuteilen, um somit zwei Pläne zu erzeugen, was letztendlich auch umgesetzt wurde. Dabei war zu berücksichtigen, daß der Kalk und die Mischungstemperatur in jedem Einzelplan vorhanden sein mussten. Daraus folgte, daß acht Faktoren in zwei Gruppen aufgeteilt werden mußten und somit zweimal sechs Faktoren mit geeigneten Versuchsplänen zu analysieren waren.

Damit ergaben sich zwei 2^{6-1} -Pläne, mit denen die Haupteffekte sowie alle Zweifaktor-Wechselwirkungen getrennt ermittelt werden konnten.

¹⁷ Auf Hauptfaktoren und Zweifaktor-Wechselwirkungen bezogen.

12.4.2 Versuchsplanerstellung

Pro Versuchsplan waren somit 32 Versuche notwendig. Die Hinzunahme von je drei Zentralpunkten zur Streuungsanalyse bzw. zur Linearitätsüberprüfung haben den Versuchsumfang auf insgesamt 70 anwachsen lassen. Die Versuchspläne wurden unter Zuhilfenahme der Software Modde 6 erstellt und sind in *Abb. 12.4* und *Abb. 12.5* sowie im Anhang dargestellt.

Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Kalksorte	Temperatur	LN	Phosphat	Nitrat	Ammonium
1	N1	01	Incl	A	20	-1	0,5	0,5	0,5
2	N2	02	Incl	B	20	-1	0,5	0,5	0,5
3	N3	03	Incl	A	50	-1	0,5	0,5	0,5
4	N4	04	Incl	B	50	-1	0,5	0,5	0,5
5	N5	05	Incl	A	20	0	0,5	0,5	0,5
6	N6	06	Incl	B	20	0	0,5	0,5	0,5
7	N7	07	Incl	A	50	0	0,5	0,5	0,5
8	N8	08	Incl	B	50	0	0,5	0,5	0,5
9	N9	09	Incl	A	20	0,5	0,5	0,5	0,5
10	N10	10	Incl	B	20	0,5	0,5	0,5	0,5
11	N11	11	Incl	A	50	0,5	0,5	0,5	0,5
12	N12	12	Incl	B	50	0,5	0,5	0,5	0,5
13	N13	13	Incl	A	20	0	0,5	0,5	0,5
14	N14	14	Incl	B	20	0	0,5	0,5	0,5
15	N15	15	Incl	A	50	0	0,5	0,5	0,5
16	N16	16	Incl	B	50	0	0,5	0,5	0,5
17	N17	17	Incl	A	20	0,5	0,5	0,5	0,5
18	N18	18	Incl	B	20	0,5	0,5	0,5	0,5
19	N19	19	Incl	A	50	0,5	0,5	0,5	0,5
20	N20	20	Incl	B	50	0,5	0,5	0,5	0,5
21	N21	21	Incl	A	20	0	0,5	0,5	0,5
22	N22	22	Incl	B	20	0	0,5	0,5	0,5
23	N23	23	Incl	A	50	0	0,5	0,5	0,5
24	N24	24	Incl	B	50	0	0,5	0,5	0,5
25	N25	25	Incl	A	20	0,5	0,5	0,5	0,5
26	N26	26	Incl	B	20	0,5	0,5	0,5	0,5
27	N27	27	Incl	A	50	0,5	0,5	0,5	0,5
28	N28	28	Incl	B	50	0,5	0,5	0,5	0,5
29	N29	29	Incl	A	20	0	0,5	0,5	0,5
30	N30	30	Incl	B	20	0	0,5	0,5	0,5
31	N31	31	Incl	A	50	0	0,5	0,5	0,5
32	N32	32	Incl	B	50	0	0,5	0,5	0,5
33	N33	33	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35
34	N34	34	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35
35	N35	35	Incl	A	35	0	10,25	180,15	0,00

Abb. 12.4: Teilplan 1

Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Kalksorte	Temperatur	Nitrat	Chlorid	Natrium	Kalium
1	N1	1	Incl	A	20	0,5	0,5	3,2	2,7
2	N2	2	Incl	B	20	0,5	0,5	3,2	600
3	N3	3	Incl	A	50	0,5	0,5	3,2	600
4	N4	4	Incl	B	50	0,5	0,5	3,2	2,7
5	N5	5	Incl	A	20	20	0,5	3,2	600
6	N6	6	Incl	B	20	20	0,5	3,2	2,7
7	N7	7	Incl	A	50	20	0,5	3,2	2,7
8	N8	8	Incl	B	50	20	0,5	3,2	600
9	N9	9	Incl	A	20	0,5	0,5	3,2	600
10	N10	10	Incl	B	20	0,5	0,5	3,2	2,7
11	N11	11	Incl	A	50	0,5	0,5	3,2	2,7
12	N12	12	Incl	B	50	0,5	0,5	3,2	600
13	N13	13	Incl	A	20	20	0,5	3,2	2,7
14	N14	14	Incl	B	20	20	0,5	3,2	600
15	N15	15	Incl	A	50	20	0,5	3,2	600
16	N16	16	Incl	B	50	20	0,5	3,2	2,7
17	N17	17	Incl	A	20	0,5	0,5	0,5	600
18	N18	18	Incl	B	20	0,5	0,5	0,5	2,7
19	N19	19	Incl	A	50	0,5	0,5	0,5	600
20	N20	20	Incl	B	50	0,5	0,5	0,5	600
21	N21	21	Incl	A	20	20	0,5	0,5	2,7
22	N22	22	Incl	B	20	20	0,5	0,5	600
23	N23	23	Incl	A	50	20	0,5	0,5	600
24	N24	24	Incl	B	50	20	0,5	0,5	2,7
25	N25	25	Incl	A	20	0,5	0,5	0,5	2,7
26	N26	26	Incl	B	20	0,5	0,5	0,5	600
27	N27	27	Incl	A	50	0,5	0,5	0,5	600
28	N28	28	Incl	B	50	0,5	0,5	0,5	2,7
29	N29	29	Incl	A	20	20	0,5	0,5	600
30	N30	30	Incl	B	20	20	0,5	0,5	2,7
31	N31	31	Incl	A	50	20	0,5	0,5	2,7
32	N32	32	Incl	B	50	20	0,5	0,5	600
33	N33	33	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35
34	N34	34	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35
35	N35	35	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35

Abb. 12.5: Teilplan 2

12.4.3 Überprüfung auf praktische Umsetzbarkeit

Die Überprüfung ergab keine negativen Hinweise, daß bei der Umsetzung des Versuchsprogramms bestimmte Faktorstufenkombinationen nicht funktionieren würden.

12.5 Versuchsdurchführung

12.5.1 Kennzeichnung der Versuchsteile

Da es sich um ein Chargenprodukt handelte, gab es keine Versuchsteile, sondern nur eine Menge. Vor den Versuchen war feinkörniger Branntkalk vorhanden, nach den Versuchen eine Suspension aus Kalkhydrat und Fremdlionenwasser.

Der abgelöschte Kalk wurde nach der Messung der Korngrößenverteilung noch einige Tage bis zu zwei Wochen in Zentrifugenröhrchen (kleine Plastikröhrchen), die mit Edding mit Projekt- und Versuchsnummer beschriftet wurden, aufbewahrt.

12.5.2 Meßmittelüberprüfung

Aufgrund von Erfahrungswerten wurde auf eine Meßmittelüberprüfung verzichtet.

12.5.3 Durchführung aller Versuche (wie festgelegt)

Die Versuche wurden nicht wie geplant nach der „Run Order“, d.h. einer randomisierte Reihenfolge, durchgeführt.

12.5.4 Meßdatenerfassung

Abb. 12.6 und Abb. 12.7 zeigen Fotos von den Versuchsaapparaturen. Das Gefäß der Naßlöschapparatur (Dewargefäß) ist wärmeisoliert, damit möglichst wenig Wärme abgegeben wird. Über dem Gefäß befindet sich der Rührer mit dem Motor und hinter dem Rührer der Temperaturmeßfühler, der die Daten an den Computer überträgt. Im Gefäß sind 600 ml Wasser definierter Temperatur. Dazu werden 150 g Branntkalk hinzugegeben, um die Wärmeentwicklung während des Löschvorgangs zu messen.



Abb. 12.6: Naßlöschapparatur



Abb. 12.7: Partikelgröße

Bei dem Gerät zur Messung der Korngrößenverteilung/Partikelgrößenverteilung läßt sich von außen nicht viel erkennen. Im Inneren arbeitet es mit Laseroptiken, die abgeschirmt werden müssen. Unter den Klappen befinden sich die Linsen und dazwischen, etwas höher aufgetragen, ein kleines Becken mit eingesetzter Rührvorrichtung. In dieses mit Flüssigkeit gefüllte Becken wird die Probe hineingegeben, mit Ultraschall dispergiert, mit einem Laserstrahl durchleuchtet und gemessen, wie stark der Strahl abgelenkt wird.

12.5.5 Abweichungen jeglicher Art festhalten

Bei der Durchführung der Versuche mit den höheren Temperaturen traten kleinere Probleme auf. Die Ermittlung der Werte für die Naßlöschkurve nach der Normvorschrift mußte etwas angepaßt werden, damit der Kalk aus dem Gefäß nicht überkockte, aber die Möglichkeit des Vergleiches mit der Normmessung erhalten blieb. Dazu wurde eine Umrechnungsformel erarbeitet, die dem Forschungsbericht /AIF03/ zu entnehmen ist.

Weiterhin konnten die Versuche 29 - 35 des ersten Teilplans nicht realisiert werden, da nicht genügend Material des Faktors „CSB“ vorhanden war und dieser im Nachhinein nicht mehr herstellbar war. Ebenso mußten beim ersten Teilplan Abweichungen der hohen Stufe des Faktors „CSB“ erkannt werden. Der Faktor veränderte sich im Laufe der Zeit¹⁸.

¹⁸ Anmerkung: Die Reduzierung der Konzentration hat mit einer Veränderung der Lösung (vermutlich durch Oxidation) durch die Zeit zu tun.

12.5.6 Aufbewahrung der Versuchsteile

Der abgelöschte Kalk wurde nach der Messung der Korngrößenverteilung noch einige Tage in Zentrifugenröhrchen, die mit Edding mit Projekt- und Versuchsnummer beschriftet wurden, aufbewahrt. Die Proben wurde nach zwei Wochen entsorgt, da keine Kenntnisse über eventuelle Veränderungen der Korngröße dieser Kalkhydrat-Fremdionen-Suspensionen über einen längeren Zeitraum vorlagen.

12.6 Versuchsauswertung

Im Anhang befinden sich beide Versuchsplanteile mit den entsprechenden Ergebnissen, auf deren Basis die nachfolgenden Auswertungsschritte beruhen.

12.6.1 Datenaufbereitung

Da bei der Naßlöschkurve die Werte umgerechnet werden mußten, war dabei größte Sorgfalt geboten. Die berechneten Werte wurden daraufhin zweimal kontrolliert.

Ebenfalls wurde die Übertragung der Werte in den Versuchsplan einer Kontrolle unterzogen.

12.6.2 Modellsicherheit und Fehlersignifikanz festlegen

Als Irrtumswahrscheinlichkeit wurde $\alpha = 5 \%$ gewählt.

12.6.3 Überprüfung der Auswertvoraussetzungen

Durch Eintragung der Meßwerte in ein Wahrscheinlichkeitsdiagramm sowie durch Anwendung des „Box-Plots“ in Modde 6 konnten nur kleine Abweichungen von der Normalverteilung erkannt werden. Daher wurde auf eine Transformation verzichtet.

12.6.4 Ausreißeranalyse

Die Ausreißeranalyse wurde bei dieser Auswertung nicht explizit behandelt. Vielmehr zeigte sich bei der Residuenanalyse, daß keine Ausreißer vorhanden waren.

12.6.5 Residuenanalyse

Exemplarisch wurden bei der Residuenanalyse nur einige der möglichen Grafiken abgebildet, da eine vollständige Darstellung den Umfang dieses Beispiels überstiegen hätte. Festzuhalten ist, daß keine Auffälligkeiten zu erkennen waren.

12.6.5.1 Normalverteilungsplot der Residuen

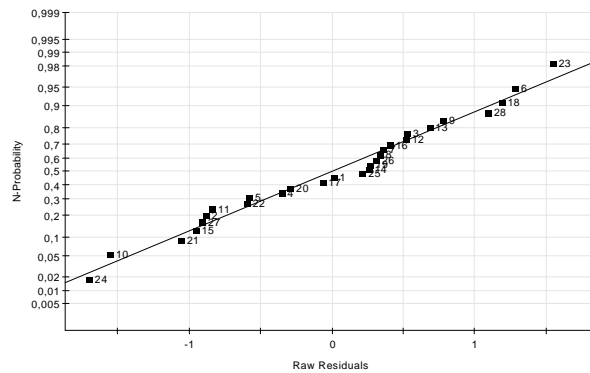


Abb. 12.8: Normalverteilungsplot der Residuen für tu80, Teilplan 1

12.6.5.2 Residuen gegen Faktoren

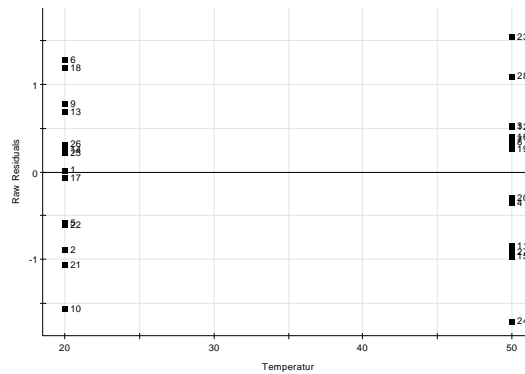


Abb. 12.9: Darstellung Residuen vs. Temperatur für tu80, Teilplan 1

12.6.5.3 Residuen gegen Versuchsreihenfolge

Auf die Darstellung der „Residuen vs. Versuchsreihenfolge“ wird verzichtet, da die vorgegebene „Run Order“ nicht eingehalten wurde.

12.6.5.4 Residuen gegen Modellschätzer

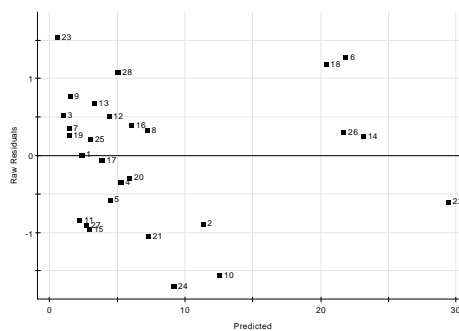


Abb. 12.10: Residuen vs. Modellschätzer für tu80, Teilplan 1

12.6.5.5 Beobachtungen gegen Vorhersagen

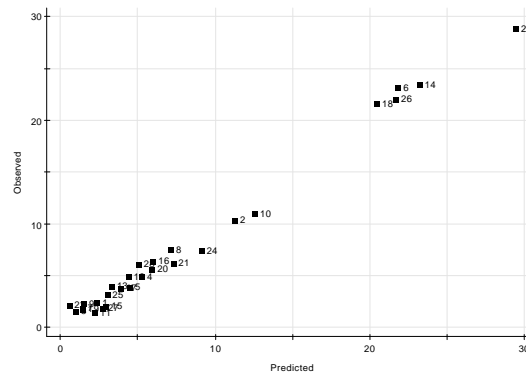


Abb. 12.11: Beobachtungen vs. Vorhersagen für tu80, Teilplan 1

12.6.6 Effektanalyse (Haupt- und Wechselwirkungseffektanalyse)

12.6.6.1 Haupteffektanalyse

Auswertung für tu80 [min]. Auswirkungen der Einzelparameter: Aus den Darstellungen in Abb. 12.12 und Abb. 12.13 ist der erwartungsgemäß starke Einfluß der Mischungs-temperatur deutlich erkennbar. Sulfat, Huminstoffe (auch als CSB bezeichnet), Natrium, Kalium und Ammonium stellten verzögernde Faktoren dar, wobei die Aussage für Ammonium aufgrund der Breite der Vertrauensbereiche nur unter Vorbehalt getroffen werden konnte. Für Chlorid war eine Beschleunigung des Reaktionsablaufes zu erkennen. Lediglich zu Phosphat und Nitrat waren unter anderem aufgrund der breiten Vertrauensbereiche keine Aussagen möglich.

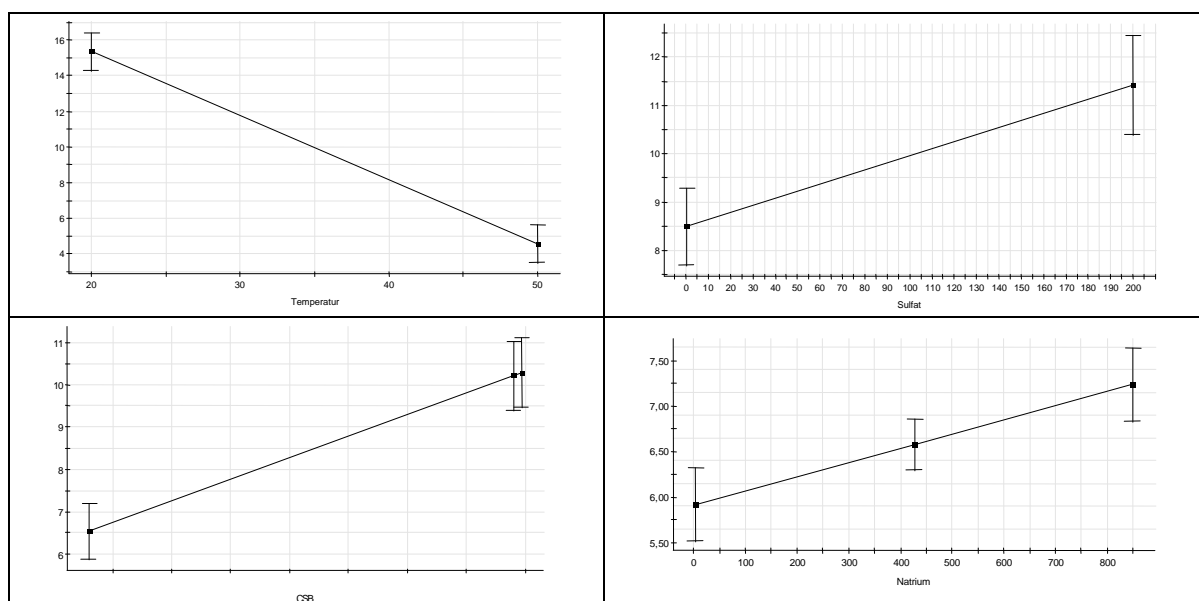


Abb. 12.12: Darstellung der Haupteffekte von tu80, Teilplan 1

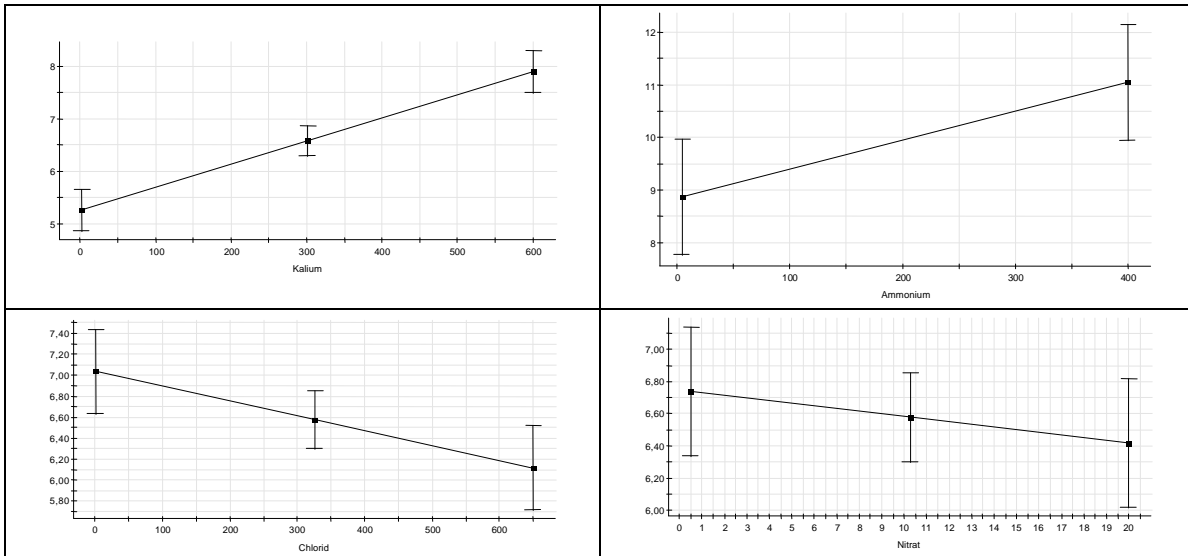


Abb. 12.13: Darstellung der Haupteffekte von tu80, Teilplan 2

Auswertung für Tu80 [°C] und Tmax [°C], Auswirkungen der Einzelparameter: Durch Fremdionen verursachte Auswirkungen auf die Temperaturen Tu80 und Tmax waren nicht nachweisbar. Die Ergebnisse der Einzelparameter bewegten sich für die verschiedenen Konzentrationsbereiche mit einer maximalen Spannweite von 0,5 °C im Bereich der Meßungenauigkeit des Verfahrens. Hinzu kamen die sehr breiten Vertrauensbereiche, die selbst bei größeren Spannweiten konkrete Aussagen nicht zugelassen haben. Abb. 12.14 verdeutlicht dies am Beispiel von Tmax und der Sulfatkonzentration.

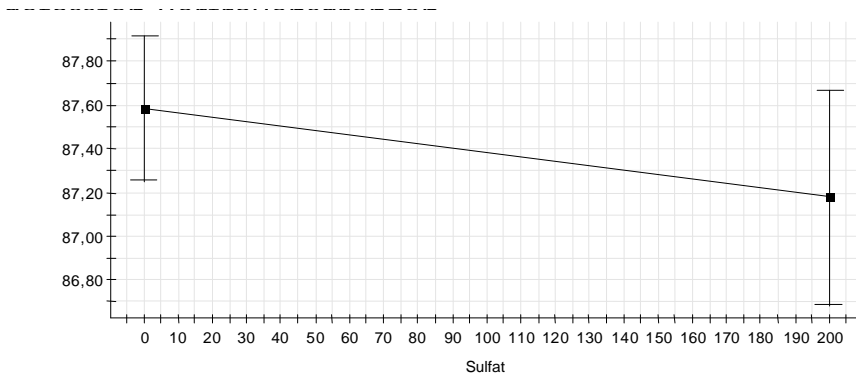


Abb. 12.14: Sulfatkonzentration für Tmax, Teilplan 1

Einzig die Mischungstemperatur führte bei Tu80 und Tmax erwartungsgemäß zu deutlichen Auswirkungen mit eng gefaßten Vertrauensgrenzen, wie Abb. 12.15 verdeutlicht.

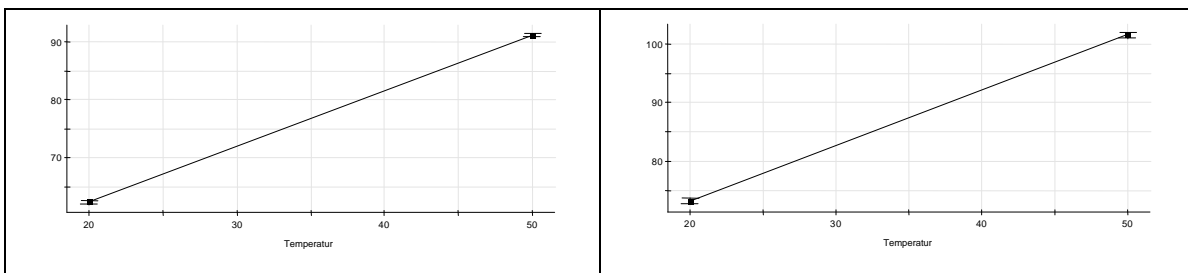
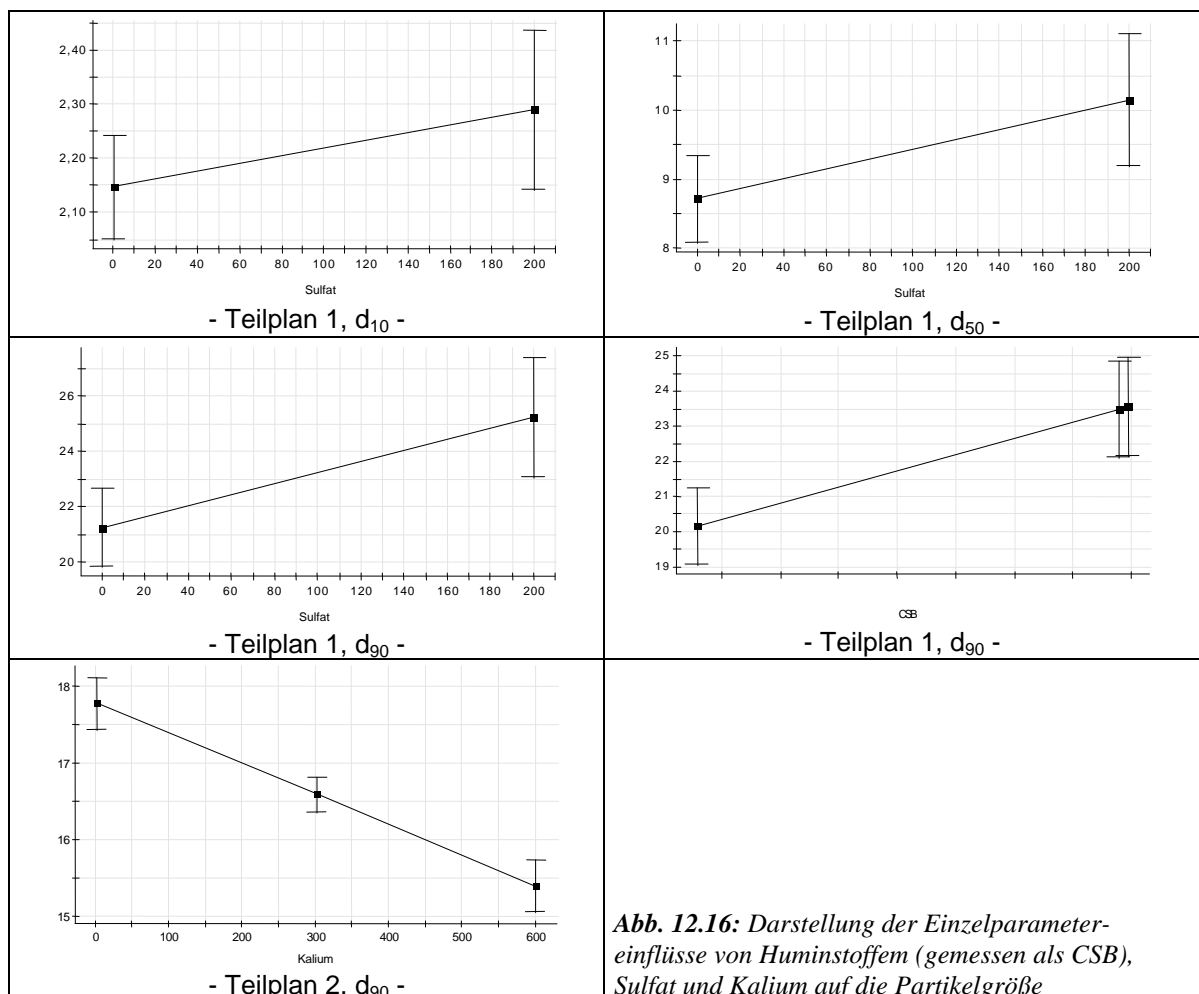


Abb. 12.15: Effekt der Starttemperatur auf Tu80 und Tmax

Auswertung Partikelgröße (d_{10} , d_{50} , d_{90}), Auswirkungen der Einzelparameter: Die isolierte Betrachtung der Parameter Sulfat, Huminstoffe und Kalium für d_{10} und d_{50} führte zu der Annahme, daß die Fremdionen in den Konzentrationen, wie sie für diese Untersuchungen eingesetzt wurden, keine signifikanten Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung hatten. Die Differenzen zwischen den Ergebnissen der jeweiligen Konzentrationsbereiche lagen innerhalb der Messungenauigkeit der Laserdiffraktometrie.

Anders war es bei d_{90} : Huminstoffe und Sulfat führten mit zunehmender Konzentration in diesem Fall zu einer tendenziellen Zunahme der Partikelgrößen, wobei die breiten Vertrauensbereiche zu beachten waren, durch die möglicherweise in der Darstellung ein stärkerer Effekt vorgetäuscht wurde, als tatsächlich vorhanden war. Kalium führte dagegen mit zunehmender Konzentration zu einer Abnahme der Partikelgröße, wie *Abb. 12.16* zeigt.



12.6.6.2 Wechselwirkungseffektanalyse

Auswertung für t_{u80} [min], Auswirkungen der Wechselwirkungen: Von den möglichen Parameterkombinationen innerhalb der beiden Teilpläne zeigten nur die Kombinationen Ammonium–Phosphat sowie Ammonium–CSB für t_{u80} eine Wechselwirkung (siehe *Abb. 12.17*), d.h. die Art des Einflusses des einen Faktors war abhängig von der Konzentration des zweiten Faktors. Eine Zunahme der Phosphatkonzentration führte in Anwesenheit einer gleichfalls hohen Ammoniumkonzentration zu einer anderen Auswirkung auf den t_{u80} -Wert, als wenn die Menge des Ammoniums im Löschwasser geringer gewesen wäre.

Die Darstellung der Effekte für die Kombination zwischen dem beschleunigenden Chlorid und dem verzögernden Natrium bzw. Kalium (nicht aufgeführt) zeigten einen quasi parallelen Verlauf der beiden Geraden. Eine Zunahme der Chlorid-Konzentration führte immer zu einer Beschleunigung der Reaktion. Der verzögernde Einfluß der Kationen war noch erkennbar durch die Verschiebung der Geraden hoher Konzentration zu langsameren Werten, aber die Beschleunigung durch zunehmende Chlorid-Konzentrationen blieb erhalten. Eine Wechselwirkung war damit nicht gegeben. Diese wäre vorhanden gewesen, wenn bei hoher Kationen-Konzentration eine Verzögerung der Reaktion eingesetzt hätte, die beiden Geraden also eine entgegengesetzte Steigung aufwiesen hätten.

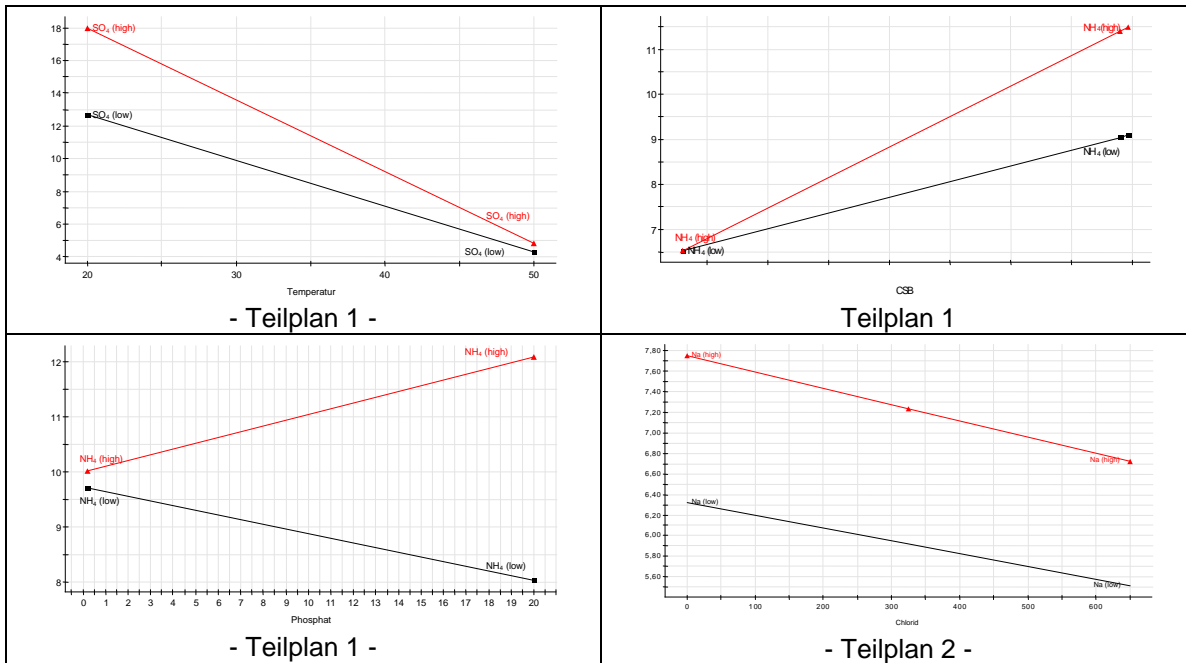


Abb. 12.17: Darstellung der Auswirkungen durch Fremdionenkombinationen von tu80

Auswertung für Tu80 [°C] und Tmax [°C], Auswirkungen durch Wechselwirkungseffekte: Die Diagramme (siehe Abb. 12.18) für die Kombinationen von Huminstoffe–Phosphat, Sulfat–Phosphat und Nitrat–Natrium zeigten zwar für Tu80 und Tmax Wechselwirkungseffekte, allerdings mit Auswirkungen von maximal $T = 1,0\text{ °C}$. Sie lagen somit noch im Bereich der Meßunsicherheit des Verfahrens und stellten keinen signifikanten Effekt dar.

Für die Fremdionen in den betrachteten Kombinationen und Konzentrationen wurde somit für Tu80 und Tmax keine Wechselwirkungen nachgewiesen.

Auswertung Partikelgröße (d_{10} , d_{50} , d_{90}), Auswirkungen durch Wechselwirkungseffekte: Innerhalb der beiden Teilpläne zeigten nur die Kombinationen Sulfat–Huminstoffe, Nitrat–Natrium und Chlorid–Natrium eine Wechselwirkung. Die Kombination von Sulfat mit Huminstoffen führte zu Wechselwirkungen bei allen drei Summenparametern, die Darstellung für d_{90} verdeutlichte aber eine sichtbare Abschwächung der Ausprägung des Effektes, erkennbar daran, daß für d_{90} beide Graden eine positive Steigung besaßen, während dies bei d_{10} und d_{50} noch nicht der Fall war.

Ein gegensätzliches Verhalten war bei den Kombinationen von Natrium mit Nitrat bzw. Natrium mit Chlorid zu beobachten, bei denen die Wechselwirkung mit größeren Massenanteilen der Partikeldurchmesser zunahm (siehe Abb. 12.19, Abb. 12.20 und Abb. 12.21).

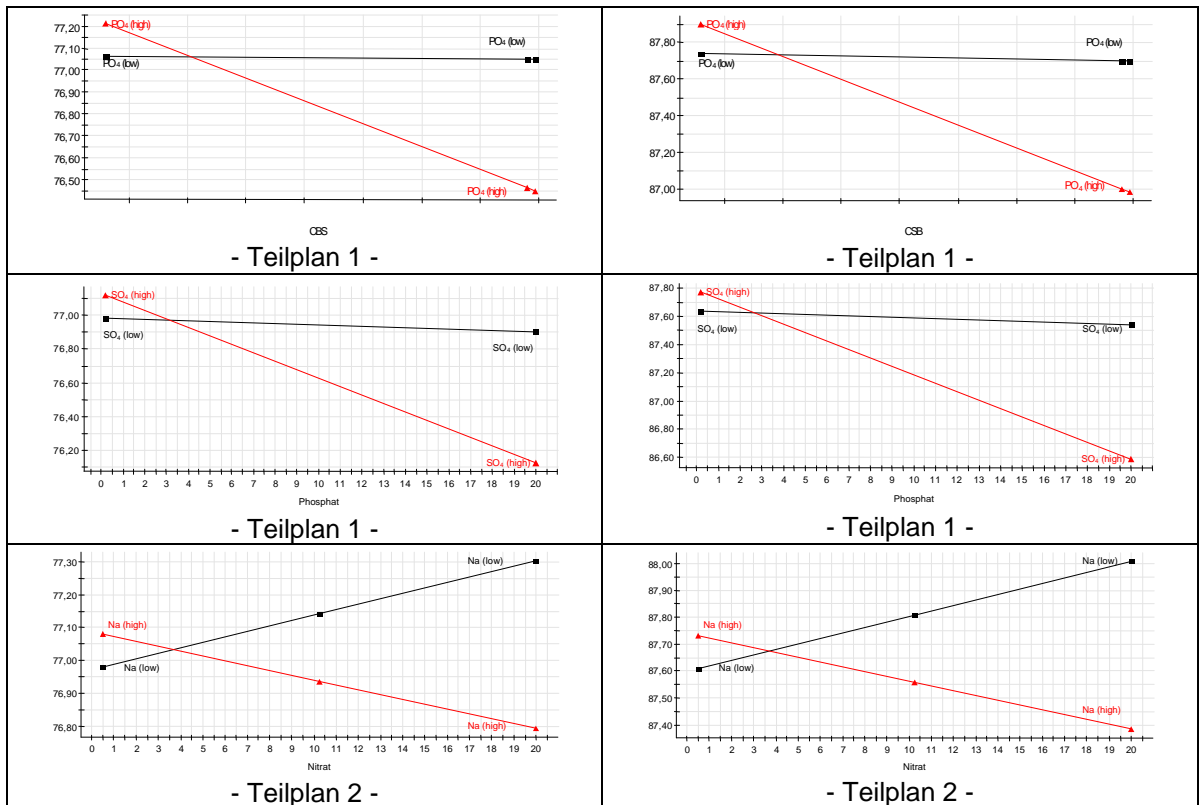


Abb. 12.18: Wechselwirkungseffekte für Tu80 und Tmax

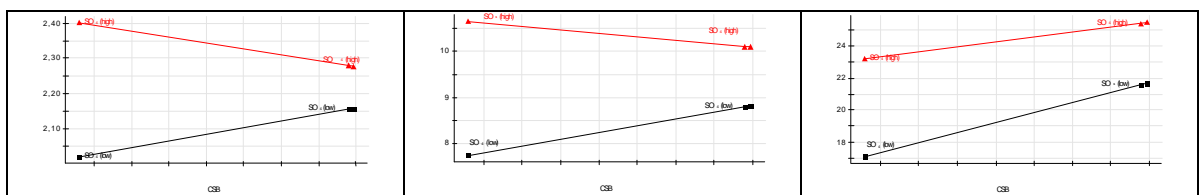


Abb. 12.19: Wechselwirkungseffekte zwischen Huminstoffen (gemessen als CSB) und Sulfat auf die Partikelgröße

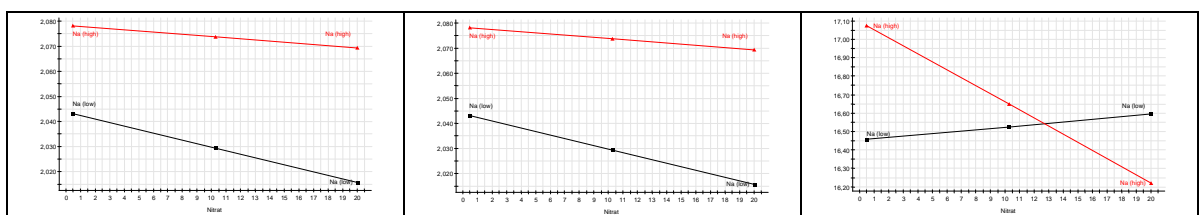


Abb. 12.20: Wechselwirkungseffekte zwischen Nitrat und Natrium auf die Partikelgröße

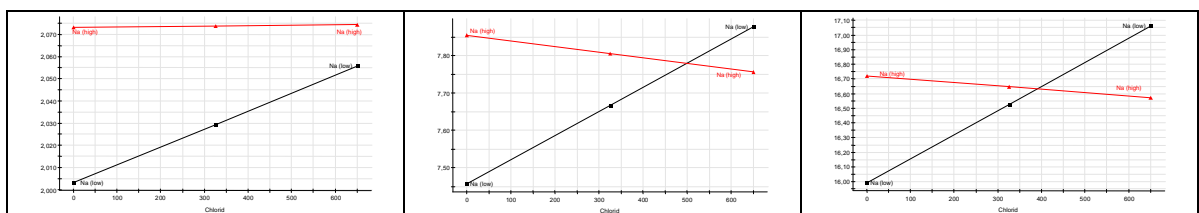


Abb. 12.21: Wechselwirkungseffekte zwischen Chlorid und Natrium auf die Partikelgröße

12.6.6.3 Interpretation und Zusammenfassung der Effekte

	Huminstoffe (-1 – +1 mg/l)	Phosphat (0,2 – 20 mg/l)	Sulfat (0,3 – 200 mg/l)	Ammonium (4,5-400 mg/l)
Huminstoffe (-1 – +1 mg/l)	Verzögerung bis 4 min	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	hohe NH ₄ -Konz.: Verzögerung bis 4 min
Phosphat (0,2 – 20 mg/l)	keine Wechselwirkung	Vertrauensbereich zu groß	keine Wechselwirkung	hohe NH ₄ -Konz.: Verzögerung bis 2 min niedrige NH ₄ -Konz.: Beschleunigung bis 1 min
Sulfat (0,3 – 200 mg/l)	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	Verzögerung bis zu 3 min	keine Wechselwirkung
Ammonium (4,5 – 400 mg/l)	hohe NH ₄ -Konz.: Verzögerung bis 4 min	hohe NH ₄ -Konz.: Verzögerung bis 2 min niedrige NH ₄ -Konz.: Beschleunigung bis 1 min	keine Wechselwirkung	evtl. Verzögerung bis zu 2 min

Tab. 12.12: Auswirkungen durch Fremdionen auf die Reaktionsgeschwindigkeit, Teilplan 1

	Nitrat (0,5 – 20 mg/l)	Chlorid (0,5 - 650 mg/l)	Natrium (3,2 – 850 mg/l)	Kalium (2,7 – 600 mg/l)
Nitrat (0,5 – 20 mg/l)	Vertrauensbereiche zu groß	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung
Chlorid (0,5 - 650 mg/l)	keine Wechselwirkung	Beschleunigung bis zu 1 min	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung
Natrium (3,2 – 850 mg/l)	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	Verzögerung bis zu 1 min	keine Wechselwirkung
Kalium (2,7 – 600 mg/l)	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	Verzögerung bis zu 2,5 min

Tab. 12.13: Auswirkungen durch Fremdionen auf die Reaktionsfähigkeit, Teilplan 2

	Huminstoffe (-1 – +1 mg/l)	Phosphat (0,2 – 20 mg/l)	Sulfat (0,3 – 200 mg/l)	Ammonium (4,5-400 mg/l)
Huminstoffe (-1 – +1 mg/l)	Zunahme bis zu 3µm	keine Wechselwirkung	hohe SO ₄ -Konz.: Zunahme bis zu 3µm (im Vergleich zu niedriger SO ₄ -Konz. bis zu 8µm)	keine Wechselwirkung
Phosphat (0,2 – 20 mg/l)	keine Wechselwirkung	kein Effekt	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung
Sulfat (0,3 – 200 mg/l)	hohe SO ₄ -Konz.: Zunahme bis zu 3µm (im Vergleich zu niedriger SO ₄ -Konz. bis zu 8µm)	keine Wechselwirkung	Zunahme bis zu 3,5 µm	keine Wechselwirkung
Ammonium (4,5-400 mg/l)	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	kein Effekt

Tab. 12.14: Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung (Quantifizierung bezogen auf d₉₀), Teilplan 1

Bedeutung:

Einzeleffekte

Wechselwirkungseffekte

	Nitrat (0,5 – 20 mg/l)	Chlorid (0,5 - 650 mg/l)	Natrium (3,2 – 850 mg/l)	Kalium (2,7 – 600 mg/l)
Nitrat (0,5 – 20 mg/l)	kein Effekt	keine Wechselwirkung	hohe Na-Konz.: Abnahme bis zu 1µm	keine Wechselwirkung
Chlorid (0,5 - 650 mg/l)	keine Wechselwirkung	kein Effekt	niedrige Na-Konz.: Zunahme bis zu 1µm	keine Wechselwirkung
Natrium (3,2 – 850 mg/l)	hohe Na-Konz.: Abnahme bis zu 1µ	niedrige Na-Konz.: Zunahme bis zu 1µm	kein Effekt	keine Wechselwirkung
Kalium (2,7 – 600 mg/l)	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	keine Wechselwirkung	Abnahme bis zu 1,5µm

Tab. 12.15: Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung (Quantifizierung bezogen auf d_{90}), Teilplan 2

12.6.7 Regressionsanalyse

Wie aus Tab. 12.16 und Tab. 12.17 ersichtlich, wurden unterschiedliche Modell angepaßt. Für jeweils tu_{80} , Tu_{80} und T_{max} sowie für die Partikelgrößenverteilungen d_{10} , d_{50} und d_{90} wurden eigenständige Modelle entwickelt. Diese im Modell verbliebenen Terme waren als signifikante Größen anzusehen.

Anhand dieser erstellten Regressionsgleichung konnte der Aufgabenstellung Rechnung getragen werden, die Zusammenhänge sowie ein Prognose-Modell als Ziel des Forschungsvorhabens zu entwickeln.

	tu_{80}	Tu_{80}	T_{max}	d_{10}	d_{50}	d_{90}
Constant	10,1343	43,3827	54,5316	1,93407	7,27346	17,0247
KS						
KS(A)	-9,2161	0,50714	0,43571	-0,508659	-3,74401	-6,15277
KS(B)	9,2161	-0,50714	-0,43571	0,508659	3,74401	6,15277
MT	-0,109976	0,956191	0,941429	0,00284168	0,0132313	-0,00380886
CBS	0,0231866	-1,53078e-005	-8,05451e-005	0,000377258	0,0028975	0,0123779
PO_4	-0,0866531	0,0337733	0,0393586	-0,00193376	-0,00555143	-0,0102425
SO_4	0,0368984	0,000734122	0,000741816	0,0029814	0,0226951	0,0486835
NH_4	-0,00803443	0,0006863	0,000903028	-2,10699e-005	-0,000115885	-0,000201216
KS*MT						
KS(A)*MT	0,175026			0,00511112	0,0293611	0,0384028
KS(B)*MT	-0,175026			-0,00511112	-0,0293611	-0,0384028
KS*CBS						
KS(A)*CBS	-0,00673255			0,00026552	0,00299792	0,0040332
KS(B)*CBS	0,00673255			-0,00026552	-0,00299792	-0,0040332
KS* SO_4						
KS(A)* SO_4	-0,00979127			-0,000679457	-0,00313326	0,000893465
KS(B)* SO_4	0,00979127			0,000679457	0,00313326	-0,000893465
MT*CBS	-0,000465343					
MT* SO_4	-0,000792781			-2,78195e-005	-0,000215601	-0,000498178
MT* NH_4				-3,55842e-006	-2,18827e-005	-3,11274e-005
CBS* PO_4		-0,000103402	-0,000120974			
CBS* NH_4	1,64299e-005					
PO_4 * SO_4		-0,000230745	-0,000274944			
PO_4 * NH_4	0,000478387					
SO_4 * NH_4	2,71734e-005					

Tab. 12.16: Regressionskoeffizienten Teilplan 1 (real)

	tu80	Tu80	Tmax	d10	d50	d90
Constant	9,6859	43,2171	54,2986	2,05946	8,00933	17,8096
KS						
KS(A)	-7,29832	0,433738	0,372493	-0,533404	-3,60906	-5,76907
KS(B)	7,29832	-0,433738	-0,372493	0,533404	3,60906	5,76907
MT	-0,127767	0,9551	0,93986	-0,000166843	-0,00392446	-0,0196913
NO ₃	-0,0163462	0,0167858	0,0206589	-0,00612541	-0,0193123	-0,0144983
CL	-0,00314344	0,00186373	0,00234348	8,11303e-005	0,000651603	0,00165452
NA	0,00391671	0,000136625	0,00017033	0,000176125	0,00124377	0,00250163
K	0,00926391	-0,000644051	-0,000877397	-0,000454823	-0,00216251	-0,00531139
KS*MT						
KS(A)*MT	0,122708			0,00522917	0,0319583	0,0523125
KS(B)*MT	-0,122708			-0,00522917	-0,0319583	-0,0523125
KS*CL						
KS(A)*CL	0,000740956	0,000490766	0,000615861			
KS(B)*CL	-0,000740956	-0,000490766	-0,000615861			
KS*NA						
KS(A)*NA	-0,000863545	-0,000494504	-0,000649498	0,000160096	0,00080571	0,00124623
KS(B)*NA	0,000863545	0,000494504	0,000649498	-0,000160096	-0,00080571	-0,00124623
KS*K						
KS(A)*K	-0,00237527					
KS(B)*K	0,00237527					
MT*NO ₃				0,000134615	0,000499998	0,000617517
MT*CL	4,93969e-005	-2,88685e-005	-3,59252e-005			
MT*NA	-6,74108e-005			-3,0015e-006	-1,78122e-005	-2,92768e-005
MT*K	-0,000138819	4,53431e-005	5,85971e-005	9,55688e-006	2,39969e-005	3,74602e-005
NO ₃ *NA		-3,7093e-005	-4,54206e-005	1,13548e-006	-1,45344e-005	-5,98786e-005
CL*NA				-9,31826e-008	-9,4546e-007	-2,21593e-006
CL*K		-2,41656e-006	-3,09321e-006			

Tab. 12.17: Regressionskoeffizienten Teilplan 2 (real)

12.6.8 Varianzanalyse

In Modde 6 wurden mit der Varianzanalyse die „Modelladäquatheitstests“ und die „Gütemaße des Modells“ untersucht. Bei dieser Software werden nicht die einzelnen Terme des Modells in die Varianzanalyse einbezogen. Vielmehr geht es um die Beurteilung und die Güte des Modells.

12.6.8.1 Modelladäquatheitstests

Modde 6 stellt viele Daten in einer grafischen Form dar, die leichter zu deuten sind als nur die Angabe von Zahlenwerten. Exemplarisch wird daher nur eine ANOVA-Tabelle mit ihren Zahlenwerten angegeben, wie Tab. 12.18 zeigt. Ausführlich sind dann die grafischen Darstellungen für alle „ANOVA“- und „Lack of Fit“-Plots in Abb. 12.22, Abb. 12.23 und Abb. 12.24 aufgelistet. Allerdings konnten für den Teilplan 1 keine „Lack of Fit“-Plots erstellt werden, da die Versuche 33-35 nicht durchgeführt wurden.

tu80	DF	SS	MS (variance)	F	p	SD
Total	35	2360,39	67,4397			
Constant	1	1366,56	1366,56			
Total Corrected	34	993,828	29,2302			5,4065
Regression	13	980,96	75,4585	123,152	0,000	8,68668
Residual	21	12,8673	0,612729			0,78277
Lack of Fit	19	12,7273	0,669858	9,5694	0,099	0,818449
Pure Error	2	0,14	0,07			0,264575

Tab. 12.18: „ANOVA“-Tabelle für tu80, Teilplan 2

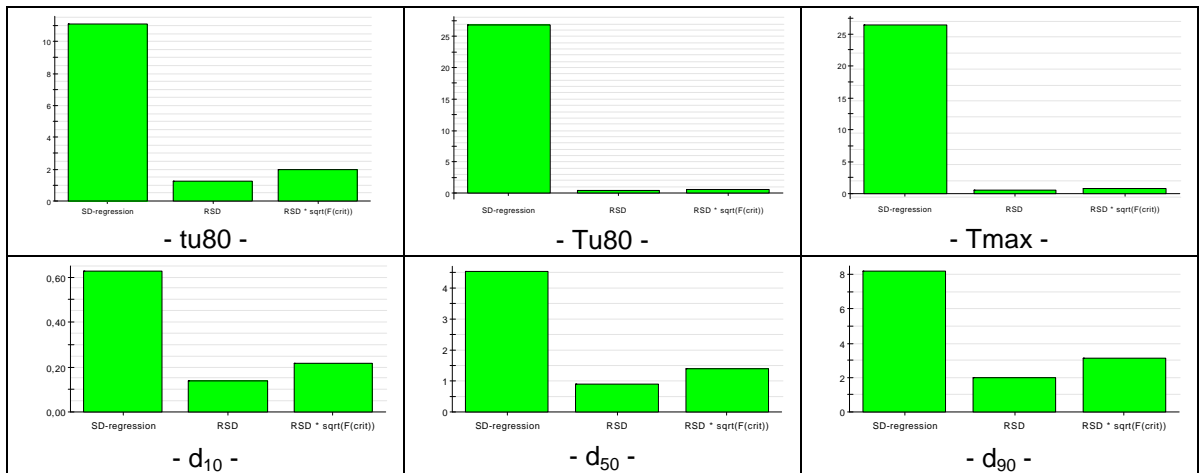


Abb. 12.22: „ANOVA“-Plots¹⁹, Teilplan 1

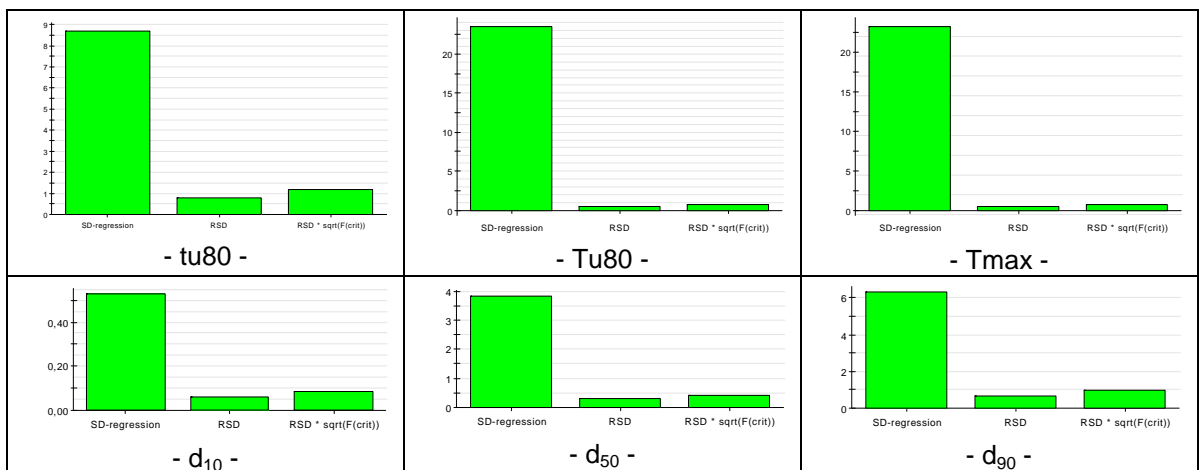


Abb. 12.23: „ANOVA“-Plots, Teilplan 2

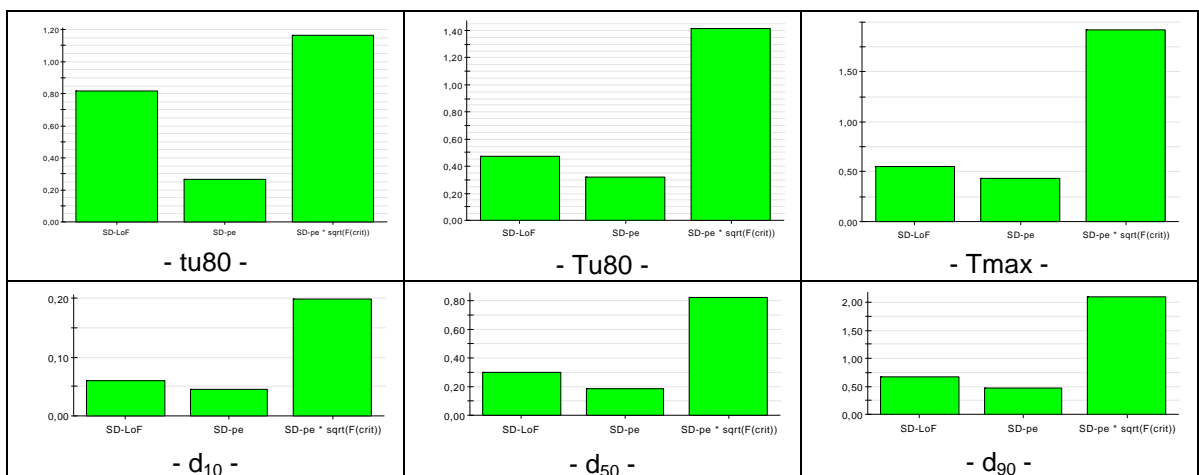


Abb. 12.24: „Lack of Fit“-Plots²⁰, Teilplan 2

¹⁹ Faustregel: Wenn der linke Balken größer ist als die beiden anderen, ist die Regression in Ordnung.

²⁰ Faustregel: Wenn der rechte Balken größer ist als die beiden anderen, so liegt kein „Lack of Fit“ vor.

12.6.8.2 Gütemaße des Modells

Die vier möglichen Gütemaße, die Modde 6 liefert, können zum einen grafisch und zum anderen tabellarisch dargestellt werden. Aufgrund des Umfangs wird exemplarisch eine grafische Darstellung in *Abb. 12.25* gezeigt. Auf jeden Fall ist hiermit ersichtlich, daß die Gütemaße ausreichende Werte aufwiesen ($R^2 > 0,8$, $Q^2 > 0,5$, Model Validity $> 0,25$).

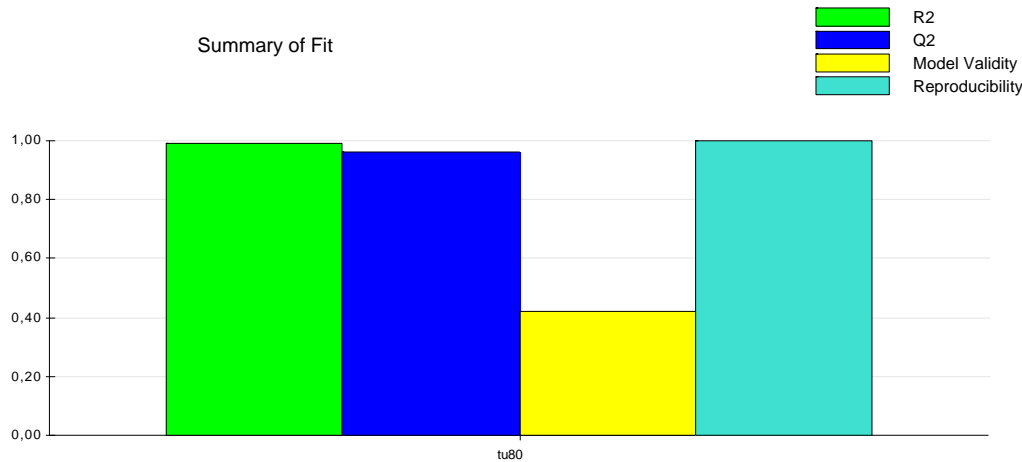


Abb. 12.25: Summary-Plot für tu80, Teilplan 2

Eine komplette Zusammenstellung der Werte ist in *Tab. 12.19* abgebildet. Auch hier ist wiederum zu erkennen, daß im Teilplan 1 Versuche fehlen.

	Zielgröße	R ²	R ² Adj.	Q ²	SDY	RSD	N	Model Validity	Reproducibility
Teilplan 1	tu80	0,988762	0,976659	0,941618	8,02491	1,226040	28	-	-
	Tu80	0,999520	0,999318	0,998998	14,6214	0,381962	28	-	-
	Tmax	0,999127	0,998760	0,998211	14,3979	0,507006	28	-	-
	d10	0,933954	0,888548	0,77439	0,41234	0,137658	28	-	-
	d50	0,946042	0,908946	0,815258	2,96588	0,894962	28	-	-
	d90	0,919241	0,863719	0,707536	5,44596	2,010450	28	-	-
Teilplan 2	tu80	0,987053	0,979038	0,959985	5,40650	0,782770	35	0,420282	0,997605
	Tu80	0,999289	0,998901	0,998247	13,9788	0,463438	35	0,744647	0,999471
	Tmax	0,998990	0,998439	0,997539	13,7864	0,544775	35	0,800636	0,999
	d10	0,980997	0,969233	0,94320	0,33092	0,058046	35	0,788771	0,981433
	d50	0,990856	0,985195	0,972447	2,38665	0,290401	35	0,710558	0,993937
	d90	0,982943	0,972384	0,949283	3,95340	0,656973	35	0,76167	0,985489

Tab. 12.19: Zusammenstellung der Gütemaße

12.6.9 Korrelationsanalyse

Tab. 12.20 zeigt exemplarisch die Korrelationsbetrachtung für tu80 des Teilplans 1. Es ist gut zu erkennen, daß der Plan nicht 100%ig orthogonal ist. Dies ist auf das Fehlen der Versuche 29-35 zurückzuführen.

Werte, die größer als 0,2 sind, sind zu beachten, d.h. sie können nicht mehr ganz unabhängig voneinander betrachtet werden.

	KS(B)	T	CBS	PP	SU	AM	KS(B)*T	KS(B)*CBS	KS(B)*SU	T*CBS	T*SU	CBS*AM	PP*AM	SU*AM	tu80
KS(B)	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,71	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66
T	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,71	-0,14	0,00	0,00	0,00	-0,50
CBS	0,00	0,00	1,00	-0,17	-0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
PP	0,00	0,00	-0,17	1,00	-0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,06
SU	0,00	0,00	-0,17	-0,17	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14
AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,71	-0,14	-0,14	0,09
KS(B)*T	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,14	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,14	-0,14	-0,38
KS(B)*CBS	-0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,37
KS(B)*SU	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
T*CBS	0,00	-0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,26
T*SU	0,00	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	1,00	0,00	0,00	0,00	-0,05
CBS*AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,71	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	-0,02	-0,02	0,01
PP*AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,14	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	1,00	-0,14	0,14
SU*AM	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,14	-0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,02	-0,14	1,00	0,08
tu80	0,66	-0,50	0,20	-0,06	0,14	0,09	-0,38	-0,37	0,00	0,26	-0,05	0,01	0,14	0,08	1,00

Tab. 12.20: Korrelationsanalyse für tu80, Teilplan 1

12.6.10 Graphische Auswertung

Da es unzählige Darstellungsmöglichkeiten der Faktoren in Form von Contour-Plots oder 3D-Darstellungen gibt, zeigt Abb. 12.26 jeweils für die Zielgröße tu80 des Teilplans 2 einen Contour-Plot und die zugehörige 3D-Darstellung für die Faktoren „Temperatur“ und „Nitrat“. Alle übrigen Faktoren wurden auf der unteren Stufe belassen.

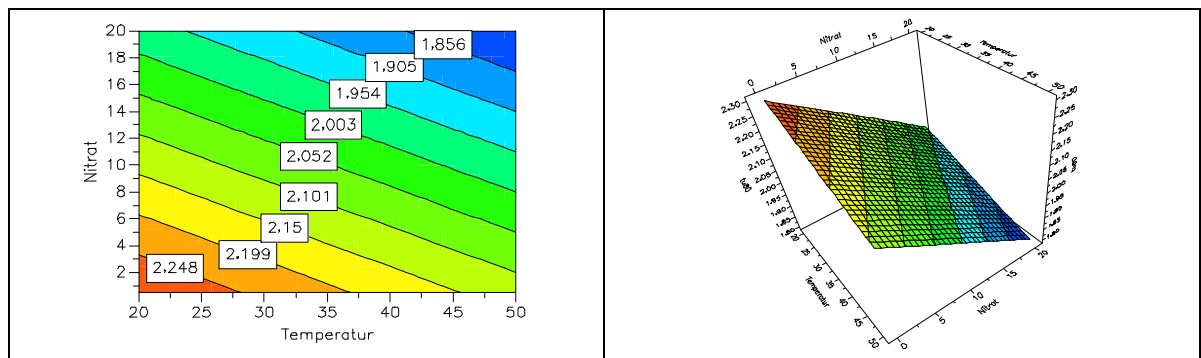


Abb. 12.26: Contour-Plot sowie 3D-Darstellung für tu80, Teilplan 2

12.6.11 Optimale Einstellungen bei mehreren Zielgrößen

Bei diesem Forschungsvorhaben ging es nicht um optimale Bereiche der Zielgrößen, vielmehr um Verständnisfragen, wie sich bestimmte Faktoren verhalten sowie um eine Modellerstellung (Prognose-Modell). Daher wird an dieser Stelle nicht näher auf optimale Einstellungen eingegangen.

12.7 Validierung

12.7.1 Interpretation und Rückschlüsse

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens angewendeten Methoden der statistischen Versuchsplanung haben sich als nützliche Werkzeuge zur Reduzierung des sehr umfangreichen Untersuchungsprogrammes herausgestellt. Sowohl zum beschriebenen Beispiel des Löschverhaltens von Kalken als auch zur Steindruckfestigkeit sind nun aussagekräftige Prognosen möglichen.

Weiter Interpretationen sind in 12.6.6 bereits getätigt worden.

12.7.2 Maßnahmen

Die Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Grundlagenkenntnisse auf die Produktionsbedingungen in Kalksandsteinwerken ist in jedem Einzelfall unter Berücksichtigung werksspezifischer Gegebenheiten durch eingehende Voruntersuchungen im Kalksandsteinwerk zu überprüfen.

12.7.3 Absicherung und weiteres Vorgehen

Da nicht sämtliche Fragestellungen beantwortet werden konnten, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Auf jeden Fall kann abschließend gesagt werden, daß das Forschungsziel erreicht wurde.

12.7.4 Bestätigungsversuch

Aufgrund der Tatsache, daß der Faktor „CSB“ des ersten Teilplans nicht ausreichend vorhanden war, konnten keine Bestätigungsversuche durchgeführt werden. Außerdem unterliegt der Branntkalk durch Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft einer Veränderung, so daß sich nach längerer Lagerzeit die Reaktionsgeschwindigkeit reduziert. Man hätte dies durch Lagerung unter Inertgas (z.B. Stickstoff) verhindern können, dieses war aber räumlich nicht möglich. Allerdings hat sich bei der Durchführung eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans innerhalb des Forschungsprojektes gezeigt, daß die Ergebnisse durchaus aussagekräftig und vertrauenswürdig sind.

12.7.5 Dokumentation abschließen und vervollständigen

Eine ausführliche und abschließende Dokumentation ist dem Forschungsbericht /AIF03/ zu entnehmen.

13 Ausbildung, Training und Einführung der statistischen Versuchsmethodik in ein Unternehmen

In der heutigen Zeit werden präventive Mechanismen für Unternehmen immer wichtiger /LES01, PFE00, ZIS00, RED99, THE01, KAS95a, KAS95b/. Gründe sind erhöhte Qualitätsansprüche, strikte Produkthaftungsgesetze, Kosten für korrektive Maßnahmen und nicht zuletzt Forderungen der Normen bzw. Richtlinien DIN EN ISO 9000:2000, QS 9000, VDA 6.1 und TS 16949.

In diesem Kontext stellt die statistische Versuchsplanung eine fast unerläßliche Methode dar. Jedoch tritt gerade durch den Begriff „Statistik“ bei vielen eine ablehnende Haltung ein. Nach den zuvor beschriebenen Methoden, Verfahren und Versuchsplänen (siehe Kapitel 5 - 10) sowie einer ganzheitlichen und systematisierten Vorgehensweise (siehe Kapitel 11) stellt sich noch die Frage: *Wie kann die statistische Versuchsplanung ausgebildet, trainiert und in Unternehmen integriert werden?* Dazu sollen folgende Abschnitte einige Hilfestellungen und Empfehlungen aufzeigen.

13.1 Wer sind die potentiellen Anwender der statistischen Versuchsplanung in einem Unternehmen?

Die statistische Versuchsplanung läßt sich prinzipiell in fast allen Phasen des Produktentstehungsprozesses anwenden, wie Abb. 13.1 schematisch zeigt. Salopp kann sogar gesagt werden, *daß die statistische Versuchsplanung überall dort angewendet werden kann, wo Versuche durchzuführen sind.*



Abb. 13.1: DoE im Produktentstehungsprozeß

Große Erfolge beim Einsatz der statistischen Versuchsplanung wurden im Entwicklungs- und Optimierungsstadium bei Produkten und Prozessen verzeichnet, wie vielfältige Beispiele /BAR86, BAR90, BAU94, BEY85, BRA94, BRA95, BOU93, CER95, EBE93, ERD01, GOH99, GUN01, HIL00, KAM88, KRÖ01, KRP95, KRZ00, KÜL94, MCL84, MEI88, MIE00a, MIE00b, RAM92, SOI96, SRR00, WEL99, ZAC84/, zeigen. Aus diesem Grund sind Ingenieure und Techniker, die sich mit der Produkt- und Prozeßgestaltung befassen, die wohl geeignetsten Anwender in einem Unternehmen.

Um den Nutzen für die Unternehmen noch zu steigern, ist es ratsam, ebenfalls die Wissenschaftler und Ingenieure aus den Forschungsbereichen mit der statistischen Versuchsplanung zu konfrontieren.

Mit dem frühen Einsatz der Versuchsplanung, wie *Abb. 13.1* verdeutlicht, schöpft man das Potential der Methode insofern aus, daß auf allen Stufen nachhaltige Prävention betrieben und ein Beitrag zur Kundenzufriedenheit (intern wie extern) geliefert wird.

13.2 Wie kann die statistische Versuchsplanung in ein Unternehmen eingeführt werden?

Ein Unternehmen, das die statistische Versuchsmethodik einführen will, sollte einen Spezialisten qualifizieren, der über die benötigten Kenntnisse (Statistik/Versuchsplanung) verfügt. Dieser Spezialist ist auch der erste Ausbilder des Unternehmens, der firmeninterne Trainingsprogramme erstellen sollte. Er muß ein umfassendes Wissen mitbringen, damit die Fragen während der Schulungen von ihm beantwortet werden können. Ansonsten würden die Teilnehmer schnell den Glauben an die Methode und den Ausbilder verlieren. Hilfreich ist es ebenfalls, wenn er die Produkte und Prozesse in dem Unternehmen kennt, damit Beispiele den nötigen praktischen Bezug haben. Weiterhin steht er als Berater für die Teammitglieder zur Verfügung. Eine derartige Vorgehensweise sollte aber auf jeden Fall vom Management „aktiv“ unterstützt werden. Daher ist es förderlich, Informationstrainings auch für das Management abzuhalten. Ein mögliches Vorgehen zur Einführung und Etablierung der statistischen Versuchsmethodik, das auf dem zuvor Beschriebenen beruht, ist in *Abb. 13.2* aufgeschlüsselt.

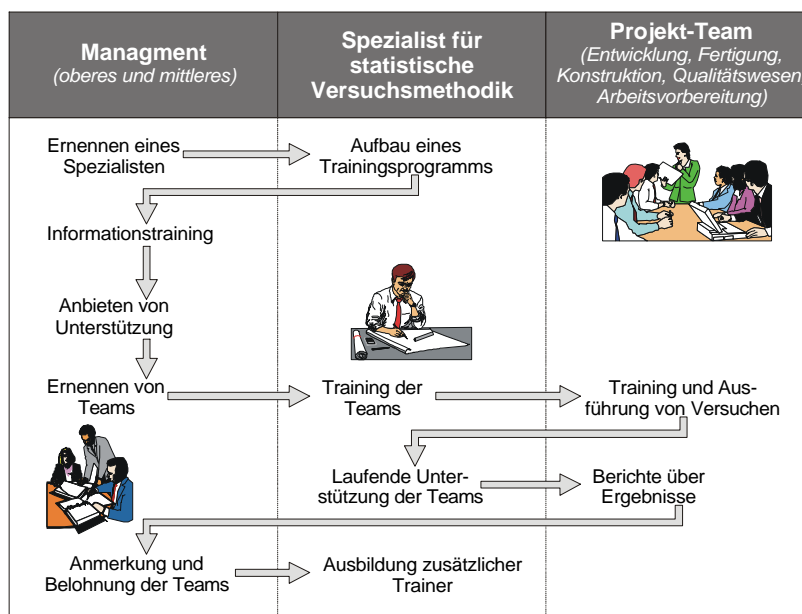


Abb. 13.2: Mögliche Vorgehensweise zur Einführung der statistischen Versuchsmethodik

Vielfach wird die Anlaufphase durch einen externen Berater unterstützt. Dieser leitet, in Verbindung mit dem internen Spezialisten, die ersten Pilotprojekte und dient für den Einführungszeitraum als weiterer Ansprechpartner. Er sollte neben den fachlichen Statistik- und Versuchsplanungskenntnissen, mit Techniken der Moderation, Kreativitätstechniken (im Sinne von Sammlung, Bewertung, Auswahl) usw. vertraut sein.

Empfehlenswert ist es weiterhin, die ersten Projekte nicht zu komplex zu gestalten, da die Übersichtlichkeit sowie das Vorstellungsvermögen im mehrdimensionalen Raum schnell verloren geht. Des weiteren ist ein nicht erfolgreiches Pilotprojekt meistens ein Anlaß, die Methode als „nicht tauglich“ abzustempeln und weitere Anwendungen einzustellen.

13.3 Wann sollten die Personen trainiert werden?

Die Zeit zwischen dem Erlernen und dem Anwenden sollte nach Möglichkeit kurz sein bzw. zeitnah erfolgen. Außerdem ist festzustellen, daß eine Schulung allein oft nicht die gewünschte Wirkung bringt, weil sich die Teilnehmer nur einmal mit dem Thema befassen. Verstärkt wird dieser Effekt, wenn, wie bereits angedeutet, ein zu langer Zeitraum vergeht, bis eine erste Anwendung erfolgt. Gerade das „*learning-by-doing*“ bringt oft erst den gewünschten „Aha-Effekt“. Durch regelmäßiges „Nachhalten“ der Ausbildungsinhalte gegenüber den Teilnehmern kann Abhilfe geschaffen werden. Positiv läßt sich dies noch untermauern, wenn im Unternehmen „Multiplikatoren“ geschaffen werden, die als Ansprechpartner verfügbar sind. Von diesen „Multiplikatoren“ sollten ständig Impulse ausgehen, um die statistische Versuchsmethodik fest zu etablieren.

Ebenso sollten aufbauende Schulungen stattfinden, d.h. spezielle Schulungen für Anfänger, Fortgeschrittene oder Spezialisten, da die Versuchsmethodik sehr vielfältig ist, aber nicht alle Facetten von jedem benötigt werden.

13.4 Trainingsumfang und Inhalte zur Schulung von DoE

Vom Umfang und den Möglichkeiten ist die statistische Versuchsmethodik kein einfaches Thema, da auch der Bereich der Statistik tangiert wird und es eine Vielzahl an Methoden, Verfahren und Versuchsplänen gibt. Das Festlegen des Trainingspensums, der Unterlagen und der Schwierigkeitsgrad sollte mit den Teilnehmern bzw. Mitarbeitern im Hinblick auf die späteren Aufgaben abgestimmt werden (siehe dazu *Tab. 13.1*, *Tab. 13.2*, *Tab. 13.3* und *Tab. 13.4*). Aufbauende Schulungen sind ebenfalls als essentiell anzusehen, damit die Teilnehmer nicht überfordert werden und sich der vermittelte Stoff besser verfestigt. Wichtig ist in jedem Fall, das Neugelernte baldmöglichst in die Praxis umzusetzen.

Aufgrund des Zeitmangels in Unternehmen steht für Schulungszwecke¹ nur ein begrenzter Zeitrahmen zur Verfügung. So ist es nicht verwunderlich, daß Schulungen in der Regeln zwei, maximal drei Tage umfassen. Da das Spektrum an Methoden und Verfahren groß ist, erscheint es auch im Hinblick auf die zur Verfügung stehende Zeit als sinnvoll, Anfänger-, Fortgeschrittenen- und Spezialisten-Schulungen abzuhalten.

Um zu ergründen, welche Schulungsinhalte für Anfänger, Fortgeschrittene und Spezialisten geeignet sind, wurde eine Kurzumfrage unter DoE-Experten aus Industrie und Hochschule durchgeführt. An der Befragung nahmen teil: Dr. B. Gimpel (Quality Engineers), Dr. A. Härtl (Ingenieurbüro Härtl), Dr. R. Herb (Roche Diagnostic), Prof. W. Kleppmann (FH-Aalen), Prof. A. Orth (FH-Frankfurt/Umesoft), G. Pall (Juran Institut), M. Rinnagl (INA/Universität Erlangen-Nürnberg), C. Ronniger (BMW), S. Soravia (Degussa), H. Strasser (BMW) sowie Dr. U. Waschatz (VW). Die Ergebnisse der Befragung sind in *Tab. 13.1* und *Tab. 13.2* dargelegt.

¹ Deutsche Unternehmen weisen dem DoE immer noch einen Nischencharakter zu. Dagegen nimmt DoE in japanischen und angloamerikanischen Unternehmen einen wesentlich höheren Stellenwert ein. Zu beweisen ist dies wie folgt: Ein japanischer Ingenieur erhält im Durchschnitt ein DoE-Training zwischen 100 bis 200 Stunden, bis zu 1/5 aller Ingenieure wenden DoE-Techniken ständig an und ca. 3-4 % der Ingenieure sind ausschließlich als DoE-Experten tätig. Es ist daher nicht verwunderlich, daß Teil des japanischen Erfolgs bezüglich der Produkt- und Prozeßoptimierung hinsichtlich Kosten, Zeit- und Qualität auf dem systematischen Einsatz der Statistik beruhen /KLE02, BHO88/.

Versuchspläne/ Methoden	Anfänger	Fortge- schrittene	Spezialisten
Einfaktorpläne	●	●	●
2 ^k -Pläne	●	●	●
2 ^{k-p} -Pläne	○	●	●
Plackett-Burmann Pläne	○	●	●
Zentralpunktversuche	●	●	●
3 ^k -Pläne	●	●	●
3 ^{k-p} -Pläne	○	●	●
zentral zusammenges. Pläne	○	●	●
Box-Behnken Pläne	○	●	●
D-optimale Pläne	○	⊙	●
Mischungspläne	○	⊙	●
Taguchi-Pläne	○	⊙	●
Shainin-Methoden	●	●	●

Tab. 13.1: Verfahren und Versuchspläne (●: hoch, ⊙: mittel, ○: niedrig)

Auswertmethoden	Anfänger	Fortge- schrittene	Spezialisten
Effekte (mit Grafik)	●	●	●
Wechselwirkungen (m. G.)	●	●	●
Regression	⊙	●	●
Korrelationsbetrachtung	○	●	●
Koeffizienten	○	●	●
Residuenanalyse	○	●	●
Modellanpassung	○	●	●
Modellanpassung für mehrere Zielgrößen	○	⊙	●
ANOVA	○		●
Lack-of-Fit	○	⊙	●

Tab. 13.2: Auswertmethoden (●: hoch, ⊙: mittel, ○: niedrig)

Anhand der Einschätzungen aus Tab. 13.1 für die Verfahren und Versuchspläne sowie aus Tab. 13.2 für die Auswertverfahren lassen sich Schulungsveranstaltungen und -konzepte für Anfänger, Fortgeschrittene und Spezialisten ableiten, die nicht nur auf einer Meinung gründen. Natürlich sind abweichende Meinungen und Abschätzungen nicht zu leugnen, dennoch stellen Tab. 13.1 und Tab. 13.2 eine gute Ausgangsbasis zur Erstellung dar. Eine mögliche Umsetzung ist Tab. 13.3 zu entnehmen.

Aus Tab. 13.3 ist ersichtlich, welche Inhalte für jede Gruppe geeignet erscheinen bzw. sich gut aufbauend vermitteln lassen. Anzumerken ist noch, daß es eventuell Sinn macht, den Bereich der Mischungspläne in einer gesonderten Veranstaltung zu betrachten. Begründet werden kann dies dadurch, daß es unterschiedliche Mischungspläne gibt und das Mischungspläne nur in bestimmten Industriezweigen Anwendung finden.

Für die Taguchi- und Shainin-Methodik machen ebenfalls gesonderte Veranstaltungen Sinn. Die Shainin-Methodik eignet sich im Vergleich zur Taguchi-Methodik für Anfänger, wohingegen die Taguchi-Methodik bei Fortgeschrittenen und Spezialisten zum Einsatz kommt.

Phasen	Anfänger	Fortgeschrittene	Spezialisten
planen	<ul style="list-style-type: none"> • 2^k-Pläne 	<ul style="list-style-type: none"> • 2^{k-p}-Pläne • zentral zusammengesetzte Pläne • Box-Behnken Pläne • (3^k-Pläne) 	<ul style="list-style-type: none"> • D-optimale Pläne • Mischungspläne • (qualitative Faktoren)
durchführen	<ul style="list-style-type: none"> • Dateneingabe 	<ul style="list-style-type: none"> • Randomisierung • Zentralpunkte 	<ul style="list-style-type: none"> • Korrelationen (-matrix) prüfen
analysieren	<ul style="list-style-type: none"> • Effekte • Wechselwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • R^2-, Q^2-Maße • Regression (MLR) • Residuen • Koeffizienten • Modellanpassung 	<ul style="list-style-type: none"> • ANOVA • Lack of Fit • Modellanpassung für mehrere Zielgrößen
vorhersagen	<ul style="list-style-type: none"> • Contour Plot 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächengrafiken • Vorhersagen • Optimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrzieloptimierung • 4D-Grafiken
Zeit	2 Tage	3 Tage	3 Tage

Tab. 13.3: Schulungskonzepte²

13.5 Welche Anforderungen werden an die beteiligten Personen zur Durchführung von Versuchsplanungsprojekten gestellt?

Zur Durchführung eines DoE-Projektes werden unterschiedlichste Anforderungen an die beteiligten Personen gestellt. Wünschenswert wäre es, wenn ein oder mehrere Experten die in Abb. 13.3 geforderten Kenntnisse verkörpern würden.

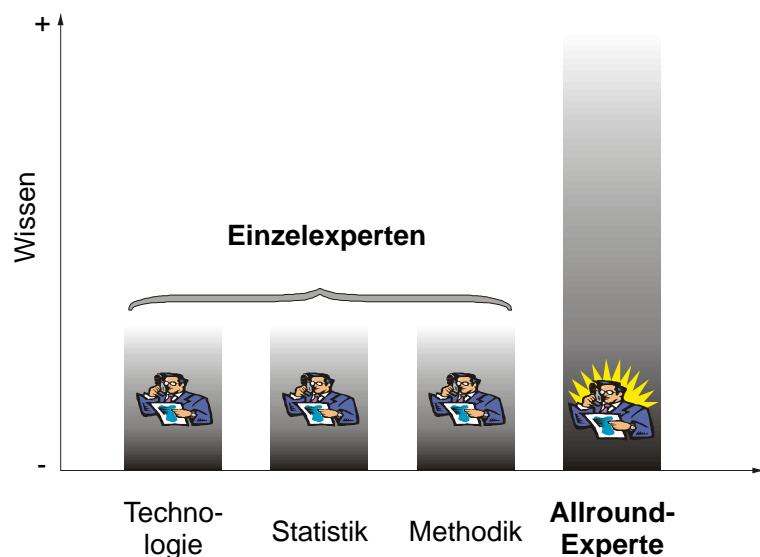


Abb. 13.3: Anforderungen

² Separat: Taguchi und Shainin (eigene Konzepte)

Idealerweise ist sogar jemand verfügbar, der alle drei Bereich (Statistik, Versuchsplanung und Technologie) vereint bzw. abdeckt. Ansonsten sollte versucht werden, je einen „Experten“ pro Bereich für die erfolgreiche Durchführung eines DoE-Projektes im Unternehmen oder als externer Berater gewinnen zu können. Auf jeden Fall sollten diese drei Bereiche im Projektteam vertreten sein, damit bei allen abzuarbeitenden Schritten der notwendige Input gegeben ist.

Eine ausführliche Darstellung der fachlichen Inputs und Anwesenheit während der Durchführung ist in *Tab. 13.4* zusammengestellt.

Phasen eines DoE-Projektes ³	Statistik/ Versuchsplanung	Technologie/ Fachkenntnisse
Projektinitiierung/Problembeschreibung		●
Systemanalyse	○	●
Festlegung Ziel- und Einflußgrößen	⊙	●
Versuchsstrategie	●	○
Versuche durchführen	○	●
Versuchsauswertung	●	⊙
Validierung/Übertragung in die Praxis	○	●

Tab. 13.4: Fachliche Inputs vs. Durchführungsschritte (●: hoch, ⊙: mittel, ○: niedrig)⁴

Es zeigt sich, daß zwar die Technologie- bzw. Fachkenntnisse einen Großteil verkörpern, jedoch umfangreiche Statistik- und Versuchsplanungskennnisse nicht außer acht gelassen werden können.

13.6 Wie sollten Versuchsplanungsprojekte durchgeführt werden, bzw. welche Schritte sind erforderlich?

In *Abb. 13.4* sind mögliche Vorgehensmodelle zur Durchführung von Versuchen aufgezeigt. Die dort abgebildeten Vorgehensweisen wurden so strukturiert, daß der Formalisierungsgrad, der Informationsgehalt (Wissensaquise) und die Dokumentationstiefe ersichtlich sind.

Es zeigt sich, daß die beiden rechten Vorgehensweisen, die grau schattiert sind, zwar den höchsten Formalisierungsgehalt aufweisen, jedoch im Umkehrschluß auch die meisten Informationen sowie die größte Dokumentationstiefe liefern. Die Vorgehensweise, die ganz rechts abgebildet ist, stellt den im *Kapitel 11* entwickelten ProStaV im Vergleich zu anderen gebräuchlichen und in Literaturstellen zu findenden Vorgehensweisen dar. Hier ist nochmals zu erkennen, welche Detaillierungstiefe im ProStaV steckt.

Daher kann die Empfehlung gegeben werden, die beiden markierten Vorgehensmodelle anzuwenden, auch wenn sie auf den ersten Blick mehr Arbeit verkörpern. Letztendlich werden die Ergebnisse aber dafür detaillierte Kenntnisse zu Tage fördern und gleichzeitig eine gesicherte Dokumentation ergeben.

³ Stellen den in *Kapitel 11* entwickelten ProStaV dar.

⁴ Auch diese Einschätzungen entstammen der Kurzumfrage aus *Kapitel 13.4*, d.h. sie sind als relativ realistisch anzusehen.

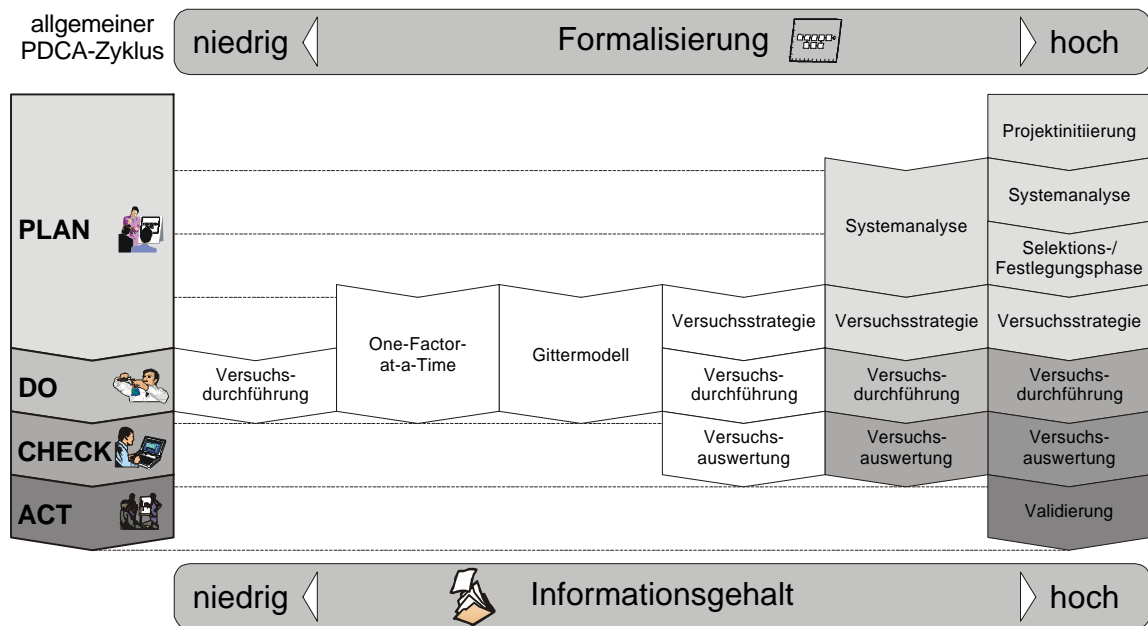


Abb. 13.4: Vorgehensmodelle zur Durchführung von Versuchen

13.7 Wie oft werden bestimmte Verfahren bzw. Versuchspläne verwendet?

Im Rahmen des ersten und zweiten DoE-Kongresses 2002 und 2003 in der IHK-Kassel wurde unter den Teilnehmern⁵ eine empirische Erhebung bezüglich der Anwendungshäufigkeit einzelner Verfahren bzw. Versuchspläne vorgenommen. Der Fragebogen enthielt eine Grobaufteilung von Verfahren (*Taguchi*, *Shainin*) sowie einiger Versuchspläne (2^k , 2^{k-p} , 3^k , zentral zusammengesetzt, Mischungen, D-optimal). Zur Anwendungshäufigkeit wurden Fragen betreffend einmaliger und mehrmaliger Anwendung gestellt. Die erhaltenden Ergebnisse sind in Abb. 13.5 dargestellt, wobei die Häufigkeit in Prozent umgerechnet wurde.

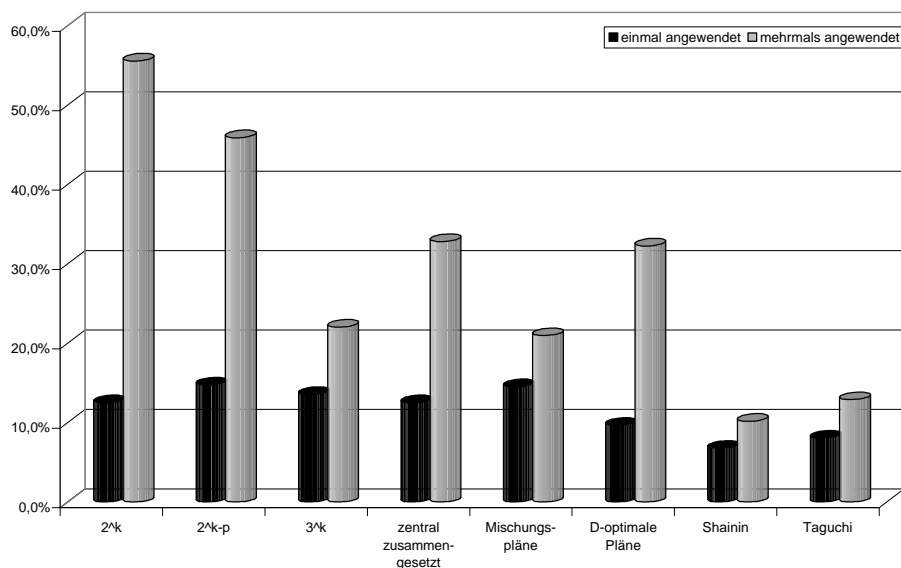


Abb. 13.5: Empirische Erhebung bezüglich Anwendungshäufigkeit von Versuchsplänen

⁵ 2002 = 49 Teilnehmer, 2003 = 36 Teilnehmer

Bei der Betrachtung von *Abb. 13.5* zeigt sich eine hohe Anwendungshäufigkeit bei 2^k - und 2^{k-p} -Plänen, eine mittlere bei zentral zusammengesetzten und D-optimalen Plänen sowie eine niedrige bei 3^k - und Mischungsplänen⁶. *Taguchi* und *Shainin* nehmen eine untergeordnete Rolle ein.

Zweifelsfrei ist dieses Ergebnis nicht statistisch abgesichert. Jedoch deckt es sich in vielen Punkten mit persönlichen Erfahrungen. Weiterhin gibt es Aufschluß, daß gerade vermeintlich „einfache“ Versuchspläne einen hohen Anwendungsgrad aufweisen.

13.8 Welche Kosten sind für die DoE-Anwendung zu veranschlagen, bzw. wie sieht der Kosten-/Nutzen-Vergleich aus?

Wie schrieb bereits *Kapfer*: „Schulung - die einzig notwendige Investition für DoE“ /KAP92/. Zur Anwendung von DoE sind keine zusätzlichen Investitionen in Geräte oder Sensoren nötig. Vielmehr ist eine gründliche Ausbildung sinnvoll. Wenigstens ein Spezialist sollte allerdings soweit geschult werden, daß er als Multiplikator und Ansprechpartner bzw. Moderator im Unternehmen dient, wie bereits in *Kapitel 13.2* angeführt.

Inhalt der Ausbildung sollten statistische Grundkenntnisse als auch die unterschiedlichsten Methoden, Verfahren und Versuchspläne sein (siehe *Kapitel 13.4*). Denn dieses Wissen schützt vor dem blindgläubigen Umgang mit den Methoden und trägt so zur erfolgreichen Anwendung bei.

Zusätzliche Kosten könnten allerdings durch die Anschaffung einer geeigneten Versuchsplanungssoftware anfallen. Diese rangieren jedoch, je nach Wahl eines Programms, in einem vertretbaren Rahmen.

Im Vorfeld einer möglichen Anschaffung sollte allerdings sorgfältig überlegt werden, für welche Anwendungsfälle die Software benötigt wird. In *Kleppmann* /KLP98/ ist dazu eine tabellierte Auflistung zu finden.

Als Hauptkostentreiber bei der statistischen Versuchsplanung sind vielmehr die Versuche zu nennen. Geht man davon aus, daß Versuche geplant, durchgeführt und ausgewertet werden müssen, wie *Abb. 13.6* verdeutlicht, kann der Nutzen-/Kosten-Vergleich daran leicht aufgezeigt werden.

Vergleichsweise geringe Kosten fallen in den Phasen „Planung“ und „Auswertung“ an. Beide zeichnen sich jedoch durch einen hohen Nutzwert aus. Diese geringen Kosten resultieren im wesentlichen daraus, daß keine extra Anschaffungen bzw. keine Material- oder Maschinenkosten anfallen, lediglich menschliche Ressourcen werden benötigt.

Der hohe Nutzen läßt sich dadurch erklären, daß in der Planungsphase durch sorgfältige Analyse der Problem- bzw. Aufgabenstellung sowie einer zugehörigen Informationsbeschaffung Grundlagen geschaffen werden, um einen geeigneten Versuchsplan auszuwählen bzw. zu erstellen. Die Auswertung profitiert im späteren Verlauf von dieser detaillierten und sorgfältigen Planung. Anhand der statistischen Auswertung lassen sich vielfältige Aussagen treffen.

⁶ Mischungspläne spielen nur in einigen Industriezweigen (z.B. Chemie, Kunststoff, Gummi, etc.) eine Rolle.

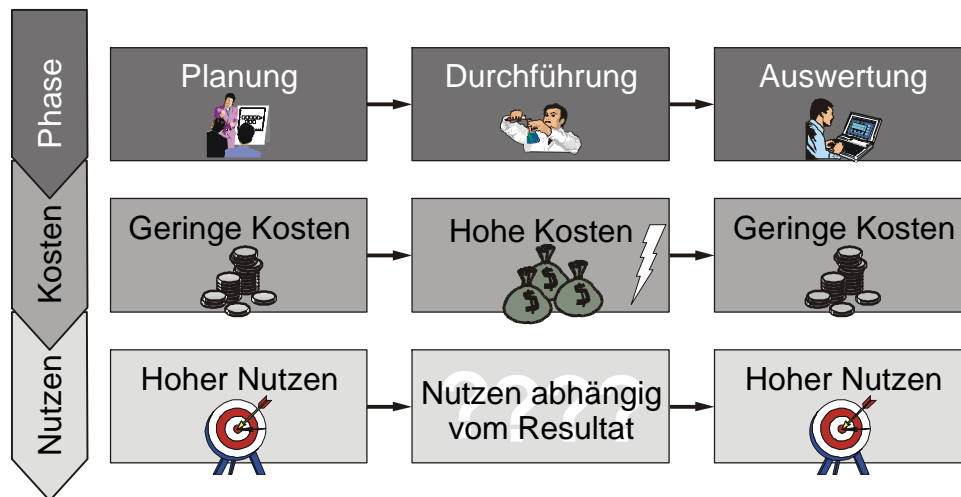


Abb. 13.6: Kosten-/Nutzen-Vergleich

Hingegen verursacht die „Versuchsdurchführung“ gegenüber den beiden anderen Phasen vergleichsweise hohe Kosten. Dies liegt daran, daß Kosten für die Belegung und Unterhaltung von Versuchsständen sowie Material- und Werkzeugkosten anfallen. Je nach Versuchsdurchführung kann der Nutzen mehr oder weniger sein. Bei beispielsweise ungeeigneten Faktoren oder Faktorstufenkombinationen stellen sich unter Umständen Versuchsergebnisse ein, die im schlimmsten Fall zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. In diesem Fall müßten die Versuche erneut durchgeführt werden.

14 Zusammenfassung

Die statistische Versuchsplanung (englisch: Design of Experiments, kurz DoE) nimmt neben Methoden wie der FMEA, QFD, usw. eine wichtige Stellung ein, da mit ihr neben der Qualität auch Zeit und Kosten im Bereich der Versuchsdurchführung erreicht werden können. Eine Analyse von durchgeführten Studien zum Thema Quality-Engineering-Methoden konnte diese These untermauern (siehe *Abb. 4.8*).

Insbesondere die Chemie-, Medizin- und Automobilindustrie haben die Vorteile der statistischen Versuchsplanung erkannt und gelten daher bei uns als Vorreiter in der Anwendung. Klein- und mittelständische Unternehmen hingegen wenden die statistische Versuchsplanung noch eher zögerlich an, was neben einem reichhaltig bestückten „Werkzeugkasten“ an Methoden, Verfahren und Versuchsplänen, die dem Bereich der statistischen Versuchsplanung zugeschrieben werden, auch an einer fehlenden systematisch geleiteten Vorgehensweise liegt.

Auch wenn es schon eine Reihe von Veröffentlichungen zu den einzelnen Bereichen der statistischen Versuchsplanung, wie z.B. Planung der Versuche, Beschreibung einzelner Versuchspläne, Auswertansätze von Versuchsplänen, usw. gibt, liegt das Neue der vorliegenden Arbeit in der Gesamtbetrachtung des Themenkomplexes *„Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung“*.

Dazu wurde zunächst das Umfeld identifiziert, in dem die statistische Versuchsplanung angewendet wird (*Kapitel 3-4*). Zudem wurden die Grundlagen der einzelnen Methoden, Verfahren und Versuchspläne, die zum Bereich der Versuchsplanung zählen, detailliert aufgeführt (*Kapitel 5-10*). Hieraus war es dann möglich, die charakteristischen Eigenschaften aufzulisten (siehe *Tab. 5.10, Tab. 5.11, Tab. 5.12, Tab. 6.4, Tab. 6.5, Tab. 7.2, Tab. 8.7, Tab. 9.3* und *Tab. 10.3*), die helfen sollen, Versuchspläne zielsicherer einzusetzen. Allerdings fehlten immer noch detaillierte Hinweise, um ein Versuchsplanungsprojekt zu bearbeiten.

Daher bestand das Ziel der Arbeit weiterhin darin, ein, von klein- und mittelständischen Unternehmen gefordertes, Vorgehensmodell zu entwickeln, welches sämtliche durchzuführenden Schritte eines statistischen Versuchsplanungsprojektes unterstützt.

Der neu entwickelte *„Problemlösungszyklus der statistischen Versuchsplanung“* (kurz ProStaV) beschreibt ausführlich in sieben Phasen eine Vorgehensweise von der Projektinitiierung über die Versuchsstrategie und Versuchsdurchführung bis zur letztendlichen Validierung und schließt somit die bisherige Lücke eines nicht durchgängig unterstützten Vorgehensmodells. Weiterhin wurden Erfahrungen des Forschungsprojektes *„Untersuchung zur technologischen und wirtschaftlichen Effizienz einer systematisierten Versuchsplanungsmethodik in der Produktentwicklung“* /GUN01/ im ProStaV verarbeitet.

Innerhalb des ProStaV werden Hilfestellung zur systematischen Auswahl der relevanten Ziel- und Einflußgrößen, zur Wahl der Versuchsstrategie in Form von entwickelten Versuchsplanungslandkarten, zur Auswertung und zur Validierung gegeben. Vor allem die oft vernachlässigten Phasen der systematischen Auswahl relevanter Zielgrößen und Faktoren, der Auswahl einer geeigneten Versuchsstrategie und der schrittweisen Auswertung wurden hierin ausführlich behandelt und aufbereitet.

Der ProStaV ist allgemein gehalten, um möglichst viele unterschiedliche Problemstellungen bearbeiten zu können. Allerdings sollte er nicht als „starr“ angesehen werden. Für geübte Anwender der Versuchsplanung kann es durchaus Sinn machen, den einen oder anderen Schritt auszulassen oder verkürzt abzuarbeiten.

Nicht nur durch das geleitete Vorgehen, sondern durch die damit verbundene lückenlose Dokumentation kann ein Unternehmen mit dem ProStaV eine Wissensakquise betreiben. Mit derartigen praktisch ermittelten Daten kann die Bearbeitung von künftigen Versuchsplanungsprojekten, die in eine ähnliche Richtung weisen, effektiver ablaufen. Die anfallenden Hypothesen können somit schneller und mit weniger Aufwand verifiziert werden.

Zur Verdeutlichung und zur Untermauerung der Handhabung des ProStaV wurde ein industrielles Praxis- bzw. Forschungsbeispiel aus dem Bereich der Kalksandsteinproduktion bearbeitet und beschrieben. Die positiven Ergebnisse konnten die Vorgehensweise sowie die Anwendung der statistischen Versuchsplanung bestätigen.

Zum Abschluß wurden noch Hinweise und Empfehlungen zur Implementierung der statistischen Versuchsplanung, beruhend auf einer Kurzumfrage bei namhaften DoE-Experten aus Hochschule und Industrie, aufgezeigt, die Hilfestellung bieten sollen, das Thema „statistische Versuchsplanung“ und dessen Vorzüge leichter in Unternehmen zu integrieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß mit dem ProStaV ein Anwendungsleitfaden entwickelt worden ist, der es auch Nichtstatistikern, Nichtmathematikern und klein- und mittelständischen Unternehmen erlaubt, die reichhaltigen Möglichkeiten der statistischen Versuchsplanung systematisch anzuwenden. Er soll dazu beitragen, daß Unternehmen ihre Zurückhaltung gegenüber der statistischen Versuchsplanung ablegen, damit diese einen höheren Verbreitungs- und Durchdringungsgrad erfährt.

Im Hinblick auf die heutigen Möglichkeiten der Umsetzung sei noch erwähnt, daß neben der Intergration des ProStaV in eine Versuchsplanungssoftware auch eine multimediale Umsetzung oder ein multimediales Lernprogramm für den Bereich der statistischen Versuchsplanung sehr sinnvoll erscheint.

Abschließend soll die Motivation, die statistische Versuchsplanung einzusetzen, mit einem einfachen aber sehr passenden Leitsatz der Qualitätssicherung untermauert werden:

*„Wer aufgehört hat besser zu werden,
hat aufgehört gut zu sein!“ /VDI998/.*

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Kundenorientierte Bedeutung von Wettbewerbsfaktoren /KAS93/.....	7
Abb. 2.2: Return on Investment über relative Qualität und relativem Marktanteil /KRM87/.....	10
Abb. 2.3: Fehlerentstehung und Behebung /PFE96, WST91/.....	11
Abb. 2.4: Entwicklung des Qualitätsmanagements /WKM93/.....	12
Abb. 2.5: Komponenten des Qualitätsmanagements /REH96/.....	14
Abb. 2.6: Wirtschaftlichkeit der Anwendung von präventiven QE-Methoden /VDI04a/.....	15
Abb. 2.7: Anzahl der Änderungen vor Fertigungsbeginn /SUL86/.....	16
Abb. 2.8: Zehnerregel der Fehlerkosten /PFE96/.....	17
Abb. 2.9: Entwicklungskosten-Gewinn /VDI94b/.....	18
Abb. 3.1: Präventive Methoden innerhalb der Produktwertschöpfungskette (in Anlehnung an /REH96/).....	19
Abb. 3.2: Verknüpfung der QFD-Häuser /KLE99/.....	21
Abb. 3.3: House of Quality.....	22
Abb. 3.4: FMEA-Formblatt.....	23
Abb. 3.5: Qualitätsregelkarte.....	24
Abb. 3.6: Zusammenwirken der Q7 /THE96/.....	29
Abb. 3.7: Zusammenwirken der M7 /THE96/.....	31
Abb. 3.8: Qualitätsmethoden im Spannungsfeld des Dreiecks „Qualität-Zeit-Kosten“.....	32
Abb. 4.1: Geschichtliche Entwicklung.....	36
Abb. 4.2: Begriffe der Versuchsplanung (in Anlehnung an /HOL95/).....	38
Abb. 4.3: DoE-Schnittstellen zu anderen Methoden.....	43
Abb. 5.1: Übersicht Einfaktorenpläne.....	46
Abb. 5.2: Beispiele Lateinischer Quadratpläne.....	48
Abb. 5.3: Durch Permutation erzeugte 4 x 4 Standard Latin Squares /PET91b/.....	48
Abb. 5.4: Entstehung eines Griechisch-Lateinischen Quadratplans.....	49
Abb. 5.5: Hypergriechisch-Lateinische Quadratpläne.....	49
Abb. 5.6: Beispiel eines ausgewogenen.....	50
Abb. 5.7: Youden Quadratplan.....	50
Abb. 5.8: Youden Quadratplan.....	51
Abb. 5.9: Erweiterung eines Youden.....	51
Abb. 5.10: Beispiel eines 2 ³ -Versuchsplan /HOL95/.....	53
Abb. 5.11: Darstellung unterschiedlicher Wechselwirkungen /PET91b/.....	55
Abb. 5.12: Entstehung eines teilfaktoriellen 2 ⁴⁻¹ -Versuchsplans.....	58
Abb. 5.13: Generierung von teilfaktoriellen Versuchspläne.....	59
Abb. 5.14: Plackett-Burmann-Versuchsplan für zwölf Versuche.....	61
Abb. 5.15: Zentralpunktversuch.....	62
Abb. 5.16: Vollständiger symmetrischer 3 ² -Versuchsplan.....	64
Abb. 5.17: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines 3 ² -Plans.....	65
Abb. 5.18: Box-Behnken Versuchsplan für drei Faktoren.....	68
Abb. 5.19: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines Box-Behnken Plans für drei Faktoren.....	69
Abb. 5.20: Zentral zusammengesetzter Plan vs. 5 ^k -Plan /SCH97/.....	70
Abb. 5.21: Darstellung eines zentral zusammengesetzten Plans für zwei Faktoren.....	71
Abb. 5.22: „Matrix der unabhängigen Variablen“ eines orthogonalen.....	71
Abb. 6.1: Auswahl von Versuchspunkten „ohne“ und „mit“ Potential Terms.....	82
Abb. 6.2: Klassifizierung der Versuchspunkte.....	86
Abb. 6.3: Inclusions eines D-optimalen Versuchsplans.....	87
Abb. 6.4: Eingeschränkter Versuchsraum.....	87
Abb. 6.5: Versuchspunkte im verkleinerten Versuchsraum /WAS01/.....	88
Abb. 6.6: Versuchspunkte im gesamten Versuchsraum /WAS01/.....	88
Abb. 7.1: Ziel von Optimierungsverfahren.....	95
Abb. 7.2: Auffinden eines Optimums mit der Methode des steilsten Anstiegs.....	96
Abb. 7.3: Simplexoptimierung steilster Anstieg.....	97
Abb. 7.4: Rotation um den Optimalpunkt.....	97
Abb. 7.5: Prinzip der Gaus-Seidl-Strategie.....	98

Abb. 7.6: Anordnung der Versuche für zwei bzw. drei Faktoren.....	100
Abb. 7.7: EVOP-Formblatt /WEM99/.....	102
Abb. 7.8: Schema eines genetischen Algorithmus.....	105
Abb. 7.9: Rekombination im genetischen Algorithmus /NIS94/.....	106
Abb. 7.10: Experimentelle Optimierung eines Düsenreaktors /REC73/.....	107
Abb. 8.1: Versuchsraum bei Mischungen für drei Komponenten /SPE91/.....	110
Abb. 8.2: Bedeutung der Koeffizienten beim Scheffé- und Cox-Modell /ORT00b/.....	114
Abb. 8.3: Nichtlineare Wirkungen /PET91b/.....	115
Abb. 8.4: Beispiel eines Contour-Plots.....	116
Abb. 8.5: Übersicht Mischungspläne und deren Einsatzgebiete.....	117
Abb. 8.6: Standard-Simplex zweiten Grades.....	118
Abb. 8.7: Sequentielle Erweiterung von Standard-Simplex-Plänen.....	119
Abb. 8.8: Darstellung einer Drei- und Vierkomponentenmischung inkl. Versuchsplan /COR90a/.....	121
Abb. 8.9: Simplex-Axial-Plan einer Dreikomponentenmischung.....	122
Abb. 8.10: Erweiterte Simplex-Axial-Konstruktion /PET91b/.....	123
Abb. 8.11: Beispiel eines „Screening“-Plans.....	124
Abb. 8.12: Mischungsanalyse mit unterer Begrenzung /COR90a/.....	125
Abb. 8.13: Mischungsanalyse mit oberer Begrenzung /COR90a/.....	126
Abb. 8.14: Versuchsraum durch Unter- und Obergrenzen beschränkt /KHU96/.....	127
Abb. 8.15: Verhältnisse von Komponenten /SPE91.....	129
Abb. 8.16: Ratio-Konstruktion.....	130
Abb. 8.17: Umgang mit einer Hauptkomponente.....	132
Abb. 8.18: {3,2}-Standard-Simplex auf Versuchspunkt des 2 ² -Faktorenplans /COR90a/.....	132
Abb. 8.19: 2 ² -Faktorplan auf jedem Punkt des Simplex-Centroid-Plans /COR90a/.....	133
Abb. 9.1: Bewertung nach Toleranzvorgabe /QUE89a/.....	137
Abb. 9.2: Verlust L(y) steigt mit dem Quadrat der Abweichung vom Zielwert t	138
Abb. 9.3: Einstellung robuster Bereiche /KRO94, WAL94/.....	140
Abb. 9.4: „Design“-Aufwand im Vergleich /ELA88, ASI88/.....	142
Abb. 9.5: P-Diagramm /PHA89/.....	143
Abb. 9.6: Gegenüberstellung klassischer 2 ³ -Plan mit einem L ₈ -Feld.....	144
Abb. 9.7: Standardisierte Felder nach Taguchi /PHA89/.....	145
Abb. 9.8: Versuchsanordnung mit einem inneren und einem äußeren Feld.....	146
Abb. 9.9: Scheinstufen-Methode und Spaltenmehrfachbenutzung an einem L ₉ (3 ⁴) Feld /PHA89/.....	147
Abb. 9.10: Spaltenzusammenlegung /PHA89/.....	149
Abb. 9.11: Standardgraph für L ₈ (2 ⁷) und modifizierter Graph.....	150
Abb. 9.12: Durch Leerspalten angepasste Matrix eines L ₈ (2 ⁷) Feldes.....	150
Abb. 9.13: Problemstellung.....	150
Abb. 9.14: Geforderter Graph.....	151
Abb. 9.15: Problemrelevanter Graph.....	151
Abb. 9.16: Orthogonales Feld L ₈ (2 ⁷) mit Wechselwirkungstabelle /PHA89/.....	152
Abb. 9.17: Lineare Graphen von L ₈ mit Wechselwirkungstabelle /HOL95/.....	152
Abb. 9.18: Modifikationsregeln für lineare Graphen /PHA89/.....	153
Abb. 10.1: Schematische Anwendung der Shainin-Werkzeuge /BHO90/.....	158
Abb. 10.2: Ergänztes Shainin-Methodenspektrum (in Anlehnung an /DOA95/.....	159
Abb. 10.3: Isoplot mit Meßungenauigkeit und Produktvariation /INT8/.....	160
Abb. 10.4: Darstellung einer Multi-Vari-Karte /KRO94, RED97/.....	161
Abb. 10.5: Unterschiedliche Formen der Streuung bei Multi-Vari-Karten /QUE92b/.....	162
Abb. 10.6: Komponententausch /QUE92b/.....	163
Abb. 10.7: Signifikante und wiederholbare Differenz zwischen guten und schlechten Einheiten /QUE92a/.....	164
Abb. 10.8: Orthogonale Tafel zur Haupt- und Wechselwirkungsanalyse /BHO88/.....	165
Abb. 10.9: Prozeßabschnittstausch.....	166
Abb. 10.10: Run-Test.....	167
Abb. 10.11: Paarweiser Vergleich /TÖN97/.....	168
Abb. 10.12: Beispiel Konzentrationsdiagramm fehlerhafter Dichtringe einer Gießerei /TRA95/.....	169
Abb. 10.13: Variablensuche /QUE92b/.....	170
Abb. 10.14: Verteilungsformen von Prozessen /QUE92a/.....	172
Abb. 10.15: Kombinationsmöglichkeiten von A und B, die je dreimal vorliegen /BHO00/.....	172
Abb. 10.16: Entscheidungsmatrix /BHO88/.....	173

Abb. 10.17: Streudiagramme zum Auswerten korrelativer Zusammenhänge /RED97/.....	175
Abb. 10.18: Ermittlung realistischer Toleranzen /RED97/.....	175
Abb. 11.1: Phasenübersicht des ProStaV.....	178
Abb. 11.2: Teamzusammensetzung.....	180
Abb. 11.3: Schritte der Systemanalyse.....	182
Abb. 11.4: Wirkgrößen.....	186
Abb. 11.5: Ablauf „Selektion und Festlegung“.....	187
Abb. 11.6: Grobbewertung von Zielgrößen.....	188
Abb. 11.7: Zielgrößenmatrix.....	189
Abb. 11.8: Grobbewertung.....	194
Abb. 11.9: Korrelationsmatrix Stell-/Störgrößen.....	195
Abb. 11.10: Wechselwirkungsmatrix.....	196
Abb. 11.11: Wechselwirkungsabschätzung für mehrere Zielgrößen /FLA95/.....	197
Abb. 11.12: Korrelationsabschätzung Stell-/Störgröße auf Zielgröße.....	197
Abb. 11.13: Intensitäts-Beziehungsmatrix mit Portfolio-Daigramm /MAY97, ULR96/.....	198
Abb. 11.14: Erweiterte Intensitäts-Beziehungsmatrix /MAY95/.....	198
Abb. 11.15: Mögliche Grenzen im Portfolio-Diagramm /MAY97/.....	200
Abb. 11.16: Portfolio-Darstellung der erweiterten Intensitäts-Beziehungsmatrix /MAY97/.....	200
Abb. 11.17: Wahl des Faktorstufenabstandes /FLA95/.....	202
Abb. 11.18: Übersicht und Einstiegspunkt zur „Versuchsplanlandkarte“.....	205
Abb. 11.19: Versuchsplanlandkarte Teil „Mixture-Designs“.....	206
Abb. 11.20: Versuchsplanlandkarte Teil „Homing-in nach Shainin“.....	207
Abb. 11.21: Versuchsplanlandkarte Teil „Einfaktoren Versuchspläne“.....	208
Abb. 11.22: Versuchsplanlandkarte Teil „Screening-Phase“.....	209
Abb. 11.23: Versuchsplanlandkarte Teil „klassische Versuchspläne“.....	210
Abb. 11.24: Versuchsplanlandkarte Teil „Taguchs orthogonale Felder“.....	211
Abb. 11.25: Versuchsplanlandkarte Teil „Untersuchungen im Optimalgebiet“.....	212
Abb. 11.26: Versuchsplanlandkarte Teil „Experimentelle Optimumsuche“.....	213
Abb. 11.27: Nichtidentische Versuchsbedingungen /CER95/.....	215
Abb. 11.28: Wahrscheinlichkeitsnetz.....	222
Abb. 11.29: Augenscheinlicher Ausreißer y^*	224
Abb. 11.30: Normalverteilungsplot der Residuen.....	225
Abb. 11.31: Residuen vs. Faktor.....	226
Abb. 11.32: Residuen vs. Run Order (links: kein Trend, rechts: Trend).....	226
Abb. 11.33: Residuen vs. Modellschätzer (links: keine Abhängigkeit, rechts: Trompetenform).....	227
Abb. 11.34: Beobachtungen vs. Vorhersagen.....	227
Abb. 11.35: Effekteplots (links: Signifikanzschwelle, rechts: Konfidenzintervalle).....	229
Abb. 11.36: Umwandlung der physikalischen Einstellbereiche in.....	230
Abb. 11.37: Zentrierung und Skalierung /ORT00/.....	231
Abb. 11.38: Modellanpassung durch „Least Squares Fit“ /ORT00/.....	232
Abb. 11.39: Aufspaltung der Quadratsummen /OTO97, ORT00/.....	233
Abb. 11.40: Konturliniendiagramm.....	238
Abb. 11.41: 3D-Plot.....	239
Abb. 11.42: Komplettübersicht der Phasen und Einzelschritte des ProStaV.....	245
Abb. 12.1: Kalksandsteinentstehung /INT9/.....	248
Abb. 12.2: Wasserkreislauf im Kalksandsteinwerk.....	249
Abb. 12.3: Aufbau des Forschungsvorhabens.....	250
Abb. 12.4: Teilplan 1.....	259
Abb. 12.5: Teilplan 2.....	259
Abb. 12.6: Naßlöschapparatur.....	260
Abb. 12.7: Partikelgröße.....	260
Abb. 12.8: Normalverteilungsplot der Residuen für tu80, Teilplan 1.....	262
Abb. 12.9: Darstellung Residuen vs. Temperatur für tu80, Teilplan 1.....	262
Abb. 12.10: Residuen vs. Modellschätzer für tu80, Teilplan 1.....	262
Abb. 12.11: Beobachtungen vs. Vorhersagen für tu80, Teilplan 1.....	263
Abb. 12.12: Darstellung der Haupteffekte von tu80, Teilplan 1.....	263
Abb. 12.13: Darstellung der Haupteffekte von tu80, Teilplan 2.....	264
Abb. 12.14: Sulfatkonzentration für Tmax, Teilplan 1.....	264
Abb. 12.15: Effekt der Starttemperatur auf Tu80 und Tmax.....	264

<i>Abb. 12.16: Darstellung der Einzelparametereinflüsse von Huminstoffen (gemessen als CSB), Sulfat und Kalium auf die Partikelgröße</i>	265
<i>Abb. 12.17: Darstellung der Auswirkungen durch Fremdionenkombinationen von tu80</i>	266
<i>Abb. 12.18: Wechselwirkungseffekte für Tu80 und Tmax</i>	267
<i>Abb. 12.19: Wechselwirkungseffekte zwischen Huminstoffen (gemessen als CSB) und Sulfat auf die Partikelgröße</i>	267
<i>Abb. 12.20: Wechselwirkungseffekte zwischen Nitrat und Natrium auf die Partikelgröße</i>	267
<i>Abb. 12.21: Wechselwirkungseffekte zwischen Chlorid und Natrium auf die Partikelgröße</i>	267
<i>Abb. 12.22: „ANOVA“-Plots, Teilplan 1</i>	271
<i>Abb. 12.23: „ANOVA“-Plots, Teilplan 2</i>	271
<i>Abb. 12.24: „Lack of Fit“-Plots, Teilplan 2</i>	271
<i>Abb. 12.25: Summary-Plot für tu80, Teilplan 2</i>	272
<i>Abb. 12.26: Contour-Plot sowie 3D-Darstellung für tu80, Teilplan 2</i>	273
<i>Abb. 13.1: DoE im Produktentstehungsprozeß</i>	275
<i>Abb. 13.2: Mögliche Vorgehensweise zur Einführung der statistischen Versuchsmethodik</i>	276
<i>Abb. 13.3: Anforderungen</i>	279
<i>Abb. 13.4: Vorgehensmodelle zur Durchführung von Versuchen</i>	281
<i>Abb. 13.5: Empirische Erhebung bezüglich Anwendungshäufigkeit von Versuchsplänen</i>	281
<i>Abb. 13.6: Kosten-/Nutzen-Vergleich</i>	283

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1: Anzahl der Haupt- und Wechselwirkungen in Abhängigkeit der Faktoren	56
Tab. 5.2: Lösungstypen von teilfaktoriellen Versuchsplänen /SCH97/.....	57
Tab. 5.3: Gegenüberstellung des Versuchsumfanges	60
Tab. 5.4: Generierungsschemata für Plackett-Burman Pläne /PLA46/.....	61
Tab. 5.5: Gegenüberstellung Faktoren, Versuchsanzahl, benötigte Koeffizienten und Redundanzfaktor bei 3^k -Versuchsplänen /SCH97, PET91b/.....	65
Tab. 5.6: Besetzung der Sphären bei einem vollständigen 3^3 -Versuchsplan /PET91b/.....	67
Tab. 5.7: Sternpunktabstände für Orthogonalität /DRE93, SCH97/	72
Tab. 5.8: Anzahl Wiederholungen des Zentralpunktes bei gegebenem a /DRE93/.....	72
Tab. 5.9: Gegenüberstellung Anzahl Faktoren und Koeffizienten vs. Versuchspläne und Redundanz /PET/.....	73
Tab. 5.10: Charakteristika Einfaktorpläne	74
Tab. 5.11: Charakteristika.....	75
Tab. 5.12: Anzahl der Versuche der Versuchspläne	75
Tab. 6.1: Bedeutung der Koeffizienten /ORT00/.....	80
Tab. 6.2: Umsetzung der umgangssprachlichen Ausdrücke in die Modellsprache /ORT00/.....	81
Tab. 6.3: Verschiedene Modelle und deren Versuchsumfänge /PET91b/.....	90
Tab. 6.4: Charakteristika.....	93
Tab. 6.5: Anzahl der Versuche der Versuchspläne	94
Tab. 7.1: Anzahl der Zyklen <i>c</i> in EVOP-Programmen in Abhängigkeit von a , b und g /SCH97/.....	101
Tab. 7.2: Charakteristika.....	108
Tab. 8.1: Abstände der Gitterpunkte /SPE91/.....	117
Tab. 8.2: Anzahl der Gitterpunkte in einem {k,g}-Simplexgitter /SCH97/.....	119
Tab. 8.3: Versuchspunkte in einem Simplex-Centroid-Plan /PET91b/.....	120
Tab. 8.4: Anzahl der benötigten Mischungsversuche bei Simplex-Centroid-Plänen.....	121
Tab. 8.5: Versuchspunkte in einem Simplex-Axial-Plan /PET91b/.....	122
Tab. 8.6: Faktorieller Versuchsplan /SPE91/.....	130
Tab. 8.7: Charakteristika von Mischungsplänen	134
Tab. 9.1: Typen von Verlustfunktionen (in Anlehnung an /WAL94/).....	139
Tab. 9.2: Signal/Rausch-Verhältnisse: statische Problemtypen /PHA89/.....	154
Tab. 9.3: Charakteristika.....	155
Tab. 10.1: Durchschnittlich zu erwartende Analyse als Funktion der Anzahl der zurandomisierenden Teile /DOA95/.....	167
Tab. 10.2: A-zu-B-Stichprobengröße /BHO90, ZEL97/.....	174
Tab. 10.3: Charakteristika.....	176
Tab. 11.1: Unterlagen und Methoden zur Informationsbeschaffung	184
Tab. 11.2: Charakteristika von Werkzeugen und Hilfsmitteln /WEK96/.....	185
Tab. 11.3: Übersicht über die Zielgrößenarten /CER95/.....	191
Tab. 11.4: Behandlung von Störgrößen /PET91b/.....	202
Tab. 11.5: Grundlegende Auswertverfahren und ihr Anwendungszweck /ORT01/.....	220
Tab. 11.6: Grundlegende Darstellungsmethoden und ihr Anwendungszweck /ORT01/.....	221
Tab. 11.7: Tabelle der Transformationen.....	223
Tab. 11.8: Einstellung der Effekte zur Optimierung der Zielgröße /ORT00a/.....	230
Tab. 11.9: Freiheitsgrade der SS /ORT00/.....	234
Tab. 11.10: Korrelationsmatrix eines 2^3 -Versuchsplan.....	238
Tab. 11.11: Grenzbereichsdefinition	240
Tab. 11.12: Wunschfunktionen	241
Tab. 12.1: Wichtige Sand- und Kalkeigenschaften	249
Tab. 12.2: Einflußgrößen.....	252
Tab. 12.3: Feinbewertung der potentiellen Zielgrößen	253
Tab. 12.4: Grobbewertung der Einflußgrößen	254
Tab. 12.5: Korrelationsabschätzung.....	255

Tab. 12.6: Wechselwirkungsabschätzung bezüglich Naßlöschkurve	256
Tab. 12.7: Wechselwirkungsabschätzung bezüglich Partikelgröße ¹⁵	256
Tab. 12.8: Korrelationsabschätzung Stellgrößen auf Zielgrößen	256
Tab. 12.9: Faktoren mit Faktorstufen	257
Tab. 12.10: Gegenüberstellung potentieller Versuchspläne aus dem „Screening“-Bereich	258
Tab. 12.11: Gegenüberstellung potentieller Versuchspläne	258
Tab. 12.12: Auswirkungen durch Fremdionen auf die Reaktionsgeschwindigkeit, Teilplan 1	268
Tab. 12.13: Auswirkungen durch Fremdionen auf die Reaktionsfähigkeit, Teilplan 2	268
Tab. 12.14: Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung (Quantifizierung bezogen auf d_{90}), Teilplan 1	268
Tab. 12.15: Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung (Quantifizierung bezogen auf d_{90}), Teilplan 2	269
Tab. 12.16: Regressionskoeffizienten Teilplan 1 (real)	269
Tab. 12.17: Regressionskoeffizienten Teilplan 2 (real)	270
Tab. 12.18: „ANOVA“-Tabelle für tu_{80} , Teilplan 2	270
Tab. 12.19: Zusammenstellung der Gütemaße	272
Tab. 12.20: Korrelationsanalyse für tu_{80} , Teilplan 1	273
Tab. 13.1: Verfahren und Versuchspläne)	278
Tab. 13.2: Auswertmethoden	278
Tab. 13.3: Schulungskonzepte	279
Tab. 13.4: Fachliche Inputs vs. Durchführungsschritte	280

Abkürzungsverzeichnis

2-FWW.....	Zweifaktor-Wechselwirkung
ANOVA	Analysis of Variance
AXN.....	Standard-Axial-Plan
AXR	Reduced-Axial-Plan
DGQ.....	Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V.
DoE	Design of Experiments
E	Effekt
EA	Evolutionäre Algorithmen
ES.....	Evolutionsstrategie
EVOP	Evolutionary Operations
FEM	Finite Element Methode
FMEA.....	Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse
FTA, FBA	Failure Tree Analysis, Fehlerbaumanalyse
GA.....	Genetische Algorithmen
HE	Haupteffekt
HoQ.....	House of Quality
JUSE.....	Union of Japanese Scientists and Engineers
KB	Kurzbezeichnung
KP.....	Kontrollpunkte
M7	Sieben-Management Werkzeuge
PCR	Principal Component Regression
PDCA.....	Problemlösungszyklus (Plan-Do-Check-Act)
PLS.....	Partial Least Square
PRESS.....	Prediction Error Sum of Square
Q7.....	Sieben-Elementaren Qualitätswerkzeuge
QE-Methoden....	Quality-Engineering-Methoden
QFD.....	Quality Function Deployment
QM.....	Qualitätsmanagement
QRK	Qualitätsregelkarte
ROI.....	Return of Investment
SPC.....	Statistical Process Control
Stdf.....	Standardfehler
SVM.....	statistische Versuchsmethodik
SVP	statistische Versuchsplanung
TQM.....	Total Quality Management
TRIZ.....	Theorie des erfinderischen Problemlösens
VDA.....	Verband der Automobilindustrie e.V.
VM.....	Versuchsmethodik
VP.....	Versuchsplanung
WE	Wechselwirkungseffekt
WW	Wechselwirkung
ZP.....	Zentralpunkt

Formelverzeichnis

1/c.....	multiplikativer Faktor
1/c*.....	Kompensationsgröße
(A).....	aktueller Prozeß
A, B, C,	Versuchsparameter, Faktoren, Einflußgrößen, unabhängige Variablen
x_1, x_2, x_3, \dots	
A_0	mittlere Ersatzkosten
B.....	Modellkoeffizientenvektor
(B).....	vermutlich besserer Prozeß
b_0, b_1, b_2, b_{12}	Regressionkoeffizienten
b_i	lineare Koeffizienten
b_{ii}	quadratischer Koeffizient
b_{ij}	Koeffizienten einer Zweifach-Wechselwirkung
b_{ij}	quadratischer Koeffizient bei Mischungen
b_{ijh}	Koeffizient einer Dreifach-Wechselwirkung
b_{ijh}	kubischer Koeffizient bei Mischungen
b_p	Regressionskoeffizient Prozeßvariable/Prozeßfaktor
C.....	Konditionszahl
c.....	Zyklenzahl
c_0	konstanter Koeffizient
c_0	Kostenkoeffizient
c_m, c_{mk}	Maschinenfähigkeitsindizes
c_p, c_{pk}	Prozeßfähigkeitsindizes
D.....	Determinante
D.....	Differenz zwischem guten und schlechten Durchschnitt
d	Durchschnittliche Differenz der Wiederholungen
d	Maximum der relativen Vorhersagevarianz
det.....	Determinante
DF	Freiheitsgrade
d_i	Abstand vom kritischen Punkt
e_i	Residuum
F_{emp}	berechneter F-Wert
F_{krit}	tabellierter F-Wert
g	Grad des Regressionspolynoms
g	gute Einheit
I.....	Identitätsspalte
i, j, h, l.....	Indizes
K.....	(Anzahl) Koeffizienten
K.....	Konstante
k	Versuchsparameter
L.....	Verlustfunktion
LD.....	logarithmierte Determinante
$L_n(m^k)$	orthogonales Feld
m	Faktorstufe
M.....	Intervallmittelpunkt
M.....	Varianz-Kovarianz-Matrix
MA.....	Mittelwertabweichung
MS.....	mittlere Quadratsumme
$MS_{Lack\ of\ Fit}$	mittlere Quadratsumme der Modellschwäche

$MS_{\text{pure error}}$	.....	mittlere Quadratsumme des experimentellen Fehlers
$MS_{\text{regression}}$	.....	mittlere Quadratsumme der Regression
MS_{residual}}	.....	mittlere Quadratsumme der Residuen
N	.....	Alle durchgeführten Versuche
n	.....	Anzahl der Versuche
n	.....	Faktorstufenkombinationen
N	.....	Versuche der unteren Faktorstufe (-1)
N_+	.....	Versuche der oberen Faktorstufe (+1)
n_A	.....	Anzahl A-Einheiten
n_B	.....	Anzahl B-Einheiten
ND	.....	normierte logarithmierte Determinante
n_M	.....	Anzahl unterschiedlicher Gitter- bzw. Versuchspunkte
n_{St}	.....	Sternpunktversuche
n_W	.....	Würfelpunktversuche
n_{ZP}, n_0	.....	Zentralpunktversuche
OEG	.....	obere Eingriffsgrenze
o_i	.....	untere Begrenzung
OSG	.....	obere Spezifikationsgrenze
OWG	.....	obere Warngrenze
p	.....	neu hinzugefügte Faktoren
$p(x)$	.....	Gewichtsfunktion
PRESS	.....	Quadratsumme des Vorhersagefehlers
Q^2	.....	Vorhersagepotential
r	.....	Anzahl der Realisierungen
R	.....	Lösungstyp
r	.....	rechte Seite der Gleichung
R	.....	Spanweite
R^2	.....	Bestimmtheitsmaß
R^2_{adj}}	.....	adjustiertes Bestimmtheitsmaß
R_o	.....	experimentelle Entfernung
s	.....	schlechte Einheit
s	.....	Standardabweichung
S/N	.....	Rauschabstand
S/R	.....	S = Signalleistung; R = Rauschleistung (auch S/N)
SS	.....	(einfache) Summe der quadratischen Abweichung
SS_{constand}}	.....	Quadratsumme des Mittelwertes
$SS_{\text{corrected}}$	.....	Summe der quadratischen Abweichungen vom Mittelwert
SS_{Effekt}}	.....	Standardabweichung der Effekte
$SS_{\text{Lack of Fit}}$	.....	Quadratsumme von nicht erfaßten systematischen Anteilen
$SS_{\text{pure error}}$	.....	Quadratsumme von rein zufälligen Anteilen
$SS_{\text{regression}}$	.....	Quadratsumme dies das Regressionsmodell beschreibt
SS_{residual}}	.....	Quadratsumme des Restes, der nicht vom Modell erklärt wird
SS_{residual}}	.....	Standardabweichung der Residuen
SS_{total}}	.....	Quadratsumme der Meßwerte
T_o	.....	oberer Grenzwert
T_u	.....	unterer Grenzwert
UEG	.....	untere Eingriffsgrenze
u_i	.....	untere Begrenzung
USG	.....	untere Spezifikationsgrenze
UWG	.....	untere Warngrenze
V	.....	Verhältnisse bei Mischungen

V_c	unteres Verhältnis
V_{c+}	oberes Verhältnis
V_{c0}	mittleres Verhältnis
w_i	Gewichtung der Zielgröße
X	erweiterte Versuchsmatrix
x	Zeile aus einem Versuchsplan
x'	Faktor nach Zentrierung
x''	Faktor nach Zentrierung und Skalierung
x_{Ei}	Einflußgröße
x_m	mittlere Einstellung eines Faktors
x_o	obere Einstellung eines Faktors
x_{OT}	obere Toleranzgrenze
x_p	Prozeßvariable/Prozeßfaktor
x_{SI}	Stellgröße
x_{St}	Steuergröße
x_u	untere Einstellung eines Faktors
x_{UT}	untere Toleranzgrenze
Y	Meßwertvektor
y_i	Zielgröße, Antwortgröße, abhängige Variable
y_{Ti}	Transformierte Zielgröße
y_{zi}	Zielgrößenoptimierung
\hat{y}_i	Regressionswert/Modellschätzer
z	Störgröße
ZBW	Zielgrößenbewertungszahl
z_{oi}	ontere Pseudokomponenten
z_{ui}	untere Pseudokomponenten
ΔM	Meßungenauigkeit
ΔP	Produktvariation
$\Delta\mu$	technologisch relevanter Effekt
α	Fehlerrisiko 1. Art
α	Signifikanzniveau
α	Sternpunktastand
β	Fehlerrisiko 2. Art
ε_i	Versuchsstreuung
λ	Eigenwert
λ	Power-Transformations Exponent
μ	Gesamtmittelwert
v	Vorhersagevarianz
v	Vorzeichen bei Ungleichung
σ	Standardabweichung
τ	Zielwert
$\xi_i, \alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \delta_m$	Faktoreinfluß, Blockeinfluß, usw. bei Einfaktorplänen

Literaturverzeichnis

- /ADD62/ Addelman, S.: Orthogonal main-effect plans for asymmetrical factorial experiments. In: Technometrics 4 (1962) Heft 1. S. 21 - 46.
- /AIF03/ Eden, Wolfgang; Hogewoning, Sonja; Schmidt, Sven-Olaf; Gundlach, Carsten; Buhl, Josef-Christian: Abschlußbericht Forschungsvorhaben „Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen. AiF-Nummer 13106-N. Hannover: Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. 2003.
- /AKA78/ Akao, Yoji: Quality function deployment. Cambridge: Productivity Press 1978.
- /AKA92/ Akao, Yoji: QFD - Quality Function Deployment. Wie die Japaner Kundenwünsche in Qualität umsetzen. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1992.
- /AND75/ Anders, Falk: Die Versuchsplanung mit Hilfe der SFD-Technik, eine Methode zur Ermittlung signifikanter Einflußgrößen. In: Die Lebensmittel-Industrie 22 (1975) Heft 5. S. 221 - 224.
- /ASI88/ N. N.: Total Quality Excellence (Taguchi Methods). Quality-Engineering, Executive Briefing. Dearborn: 1988.
- /BAK86/ Barker, T. B.: Quality engineering by design. Taguchi's philosophy. In: Quality Progress 19 (1986). S. 32 - 42.
- /BAK90/ Barker, T. B.: Engineering Quality by Design: Interpreting the Taguchi Approach. New York: Marcel Dekker 1990.
- /BAN76/ Bandemer, H. (u.a): Optimale Versuchsplanung. Frankfurt: Harri Deutsch Verlag 1976.
- /BAN80/ Bandemer, H.; Näther, W.: Theorie und Anwendung der optimalen Versuchsplanung. Band II. Berlin: Akademie-Verlag 1980.
- /BAN94/ Bandemer, H.; Bellmann, A.: Statistische Versuchsplanung. 4., neubearbeitete Auflage. Stuttgart: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1994.
- /BAR86/ Bartel, Wieland: Praktische Anwendung eines Faktorenversuchs. In: Qualität und Zuverlässigkeit 31 (1986) Heft 11. S. 454 - 456.
- /BAR90/ Bartel, Wieland: Versuchsplanung, Grundlage für die Prozeßregelung. Anwendung beim Spritzgießen von Thermoplasten. In: Qualität und Zuverlässigkeit 35 (1990) Heft 2. S. 99 - 102.
- /BAU94/ Bauer, Dietrich; Krebs, R.: Anwendung der Taguchi-Methode bei der Auslegung von Tiefziehprozessen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 35 (1994) Heft 12. S. 1368 - 1374.
- /BEN89a/ Bendell, T.; Disney, J.; Pridmore, W. A.: Taguchi Methods. Application in World Industry. Berlin: IFS Publications Springer Verlag 1989.
- /BEN89b/ Bendell, T.: Taguchi Methods. Proceedings of the European Conference. London: 1989.
- /BER91/ N. N.: Bertelsmann Universallexikon. Gütersloh: Bertelsmann Lexikon Verlag 1991.

- /BEY85/ Schulze, A; Aepler, E.; Beyer, O.: Zur Anwendbarkeit der statistischen Versuchsplanung und -auswertung in der Experimentiertechnik von Dieselmotoren. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen 29 (1985) Heft 6. S. 86 - 88.
- /BGB03/ Bergbauer, Axel K.: Six Sigma - Renaissance einer vergessenen Qualitätsmethode oder neuer Qualitätsstandard? Teil 4. In: ZfP-Zeitung (2003) Heft Februar. S. 35 - 39.
- /BGG95/ Buggert, Willi; Wielpütz, Axel: Target Costing als Instrument der Qualitätssicherung. In: ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 90 (1995) Heft 11. S. 533 - 535.
- /BHO00/ Bhote, Keki R.; Bhote, Adi K.: World Class Quality. Using Design of Experiments to Make it Happen. Second Edition. New York: AMACOM 2000.
- /BHO88/ Bhote, Keki R.: World Class Quality. New York: AMA Membership Publications Division, American Management Association 1988.
- /BHO90/ Bhote, Keki. R.: Qualität - Der Weg zur Weltspitze. Großbottwar: Institut für Qualitätsmanagement 1990.
- /BLA02/ Blank, Rolf: QFD. Aus: Leist, Ralph; Kühlmeyer, Manfred (Hrsg.): Qualitätsmanagement-Methoden: Auswahl - Einführung - Durchführung. Augsburg: WEKA, Fachverlag für Technische Führungskräfte 1996.
- /BLÄ95/ Bläsing, Jürgen P.; Mack, T.: Verbesserungen. Problemlösungsstrategien für eine gezielte Fehlersuche. In: MM-Magazin Qualitätsmanagement (1995) Heft 11. S. 14 - 17.
- /BOS90/ N.N.: Schriftenreihe: Qualitätssicherung der Bosch-Gruppe Nr. 1-12. Stuttgart: Robert Bosch 1990.
- /BOS91/ Ziebart, Ulrich: Software zum Auswerten von Versuchen. Stuttgart: Robert Bosch 1991.
- /BOS93/ N. N.: Statistische Versuchsplanung. Schriftenreihe der Bosch-Gruppe. Stuttgart: Robert Bosch 1993.
- /BOU93/ Bourdon, Rainer; Ehrenstein, Gottfried W.: Prozeßrobustheit beim Spritzgießen optimieren. In: Qualität und Zuverlässigkeit 38 (1993) Heft 2. S. 98 - 104.
- /BOX51/ Box, G. E. P.; Wilson, K. B.: On the experimental attainment of optimum conditions. In: J. Royal Statistical Soc. (1951) Ser. B 13. S. 1 - 45.
- /BOX57/ Box, G. E. P.: Evolutionary operation: A method for increasing industrial productivity. In: Appl. Statist. 6 (1957) Heft 2. S. 81 - 101.
- /BOX60/ Box, G. E. P.: Some New Three Level Designs for the Study of quantitative Variables. In: Technometrics 2 (1960) Heft 4. S. 455 - 475.
- /BOX61a/ Box, G. E. P.; Hunter, J. S.: The 2^{k-p} fractional factorial designs. Part 1. In: Technometrics 3 (1961) Heft 3. S. 311 - 351.
- /BOX61b/ Box, G. E. P.; Hunter, J. S.: The 2^{k-p} fractional factorial designs. Part 2. In: Technometrics 3 (1961) Heft 3. S. 399 - 458.
- /BOX69/ Box, G. E. P.; Draper, N. R.: Evolutionary operation. New York: John Wiley and Sons 1969.

- /BOX75/ Box, G. E. P.; Draper, N. R.: Das EVOP-Verfahren. München: Oldenbourg Verlag 1975.
- /BOX78/ Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S.: Statistics for Experiments. New York: John Wiley & Sons 1978.
- /BOX85/ Box, G. E. P.: Discussion to Off-Line quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method. In: Journal of Quality Technology 17 (1985) Heft 4. S. 189 - 190.
- /BOX87/ Box, G. E. P.; Draper, N. R.: Empirical model-building and response surface. New York: John Wiley and Sons 1987.
- /BRA94/ Bracht, Josef; Spenhoff, Eckehardt: Mischungsexperimente in Theorie und Praxis. Teil 1. In: Qualität und Zuverlässigkeit 39 (1994) Heft 12. S. 1352 - 1360.
- /BRA95/ Bracht, Josef; Spenhoff, Eckehardt: Mischungsexperimente in Theorie und Praxis. Teil 2. In: Qualität und Zuverlässigkeit 40 (1995) Heft 1. S. 86 - 90.
- /BRE96/ Bremer, Jürgen; Herrmann, Joachim; Cuevas, Alvaro M.: Analyse von Prozeßparameters nach Shainin. Ein Praxisbericht aus der Kunststoff-industrie. In: Qualität und Zuverlässigkeit 41 (1996) Heft 12. S. 1417 - 1423.
- /BRE98/ Bremer, Jürgen: Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen. Dissertation TU Berlin. Berlin: 1998.
- /BRN92/ Braun; Wald: Systemoptimierung. Interne Unterlage. München: BMW 1992.
- /BRU89/ Brunner, Franz J.: Die Taguchi-Optimierungsmethode. Ein neuer Qualitätsweg zur dynamischen Wettbewerbsfähigkeit. In: Qualität und Zuverlässigkeit 34 (1989) Heft 7. S. 339 - 344.
- /BRU97/ Brunner, Franz J.: Zehn Stufen zur Weltspitze. Strategien auf dem Weg zu Business Excellence. In: Qualität und Zuverlässigkeit 42 (1997) Heft 10. S. 1123 - 1128.
- /BUM00/ Baumeister, Sandra: Qualitätsmanagement in Deutschland und Japan. Japan Analysen Prognosen Nr. 172/173. München: Japan Zentrum der Ludwig Maximilian Universität München 2000.
- /BUR01/ Burckhardt, Werner: Qualitätsmanagement. Aus: Burckhardt, Werner (Hrsg.): Das Große Handbuch Produktion. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 2001.
- /CAN00/ Can, Ahmet: Versuchsdesign und Taguchi Verfahren. Eine Chance für die Türkei. In: TU International (2000) Heft August. S. 44 - 47.
- /CEM02/ Cemalovic, Igor: Parameteroptimierung mit Hilfe der statistische Versuchsplanung am Beispiel eines CAD/CAE modellierten Autotürcharniers. Diplomarbeit Universität Kassel. Kassel: 2002.
- /CER95/ N. N.: Methode zur Qualitätssicherung und Prozeßbeherrschung in der Keramik. Leitfaden. Aachen: Fraunhoferinstitut für Produktionstechnologie 1995.

- /CLE96/ Clemens, Christiane; Riechmann, Thomas: Evolutionäre Optimierungsverfahren und ihr Einsatz in der ökonomischen Forschung. Diskussionspapier Nr. 195. Universität Hannover. Hannover: 1996.
- /COC50/ Cochran, W. G.; Cox, G. M.: Experimental design. New York: John Wiley and Sons 1950.
- /CON84/ Conner, W. S.; Young, S.: Fractional factorial experiment designs for experiments with factors at two and three levels. Aus: McLean, R. A.; Anderson, V. L. (Hrsg.): Applied factorial and fractional designs. New York: Marcel Dekker 1984.
- /COO80/ Cook, R. D.; Nachtsheim, C. J.: A comparison of algorithms for constructing exact D-optimal designs. In: Technometrics 22 (1980) Heft 4. S. 315 - 324.
- /COR90a/ Cornell, John A.: Experiments with mixtures. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. 1990.
- /COR90b/ Cornell, John A.: How to Run Mixture Experiments for Product Quality. Milwaukee: ASQC 1990.
- /CZE97/ Czeranowsky, G.; Unger, O.: Qualität in der Produktion. Qualitätstechniken in der Praxis - eine Befragung verschiedener Unternehmen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 42 (1997) Heft 3. S. 313 - 318.
- /DAE94/ Daenzer, W. F. (Hrsg.): Systems engineering: Methodik und Praxis. 8. verb. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation 1994.
- /DAT51/ Dantzig, G. B.: Maximization of a linear Function of variables subject to linear inequalities. In: T. C. Koopmans (Hrsg.): Activity Analysis of Production and Allocation. New York: John Wiley & Sons Inc. 1951.
- /DAV54/ Davies, O. L.: The design and analysis of industrial experiments. New York: Hafner Publishing Co. 1954.
- /DES00/ N. N.: Design-Expert Handbuch bzw. Hilfe. Version 6.0.1. 2000.
- /DGQ01a/ N. N.: QFD - quality function deployment. Berlin: Beuth-Verlag 2001.
- /DGQ01b/ N. N.: Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Berlin: Beuth-Verlag 2001.
- /DGQ90a/ DGQ: SPC 1 - statistische Prozeßregelung. Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- /DGQ90b/ N. N.: SPC 3 - Anleitung zur Statistischen Prozeßlenkung (SPC): Qualitätsregelkarten, Prozeßfähigkeitsbeurteilung, Fehlersammelkarte. Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- /DGQ95/ N. N.: SPC 2 - Qualitätskartentechnik. 5. Auflage. Berlin: Beuth-Verlag 1995.
- /DGQ98/ N. N.: Prüfmittelmanagement. Berlin: Beuth-Verlag 1998.
- /DIE98/ Dietrich, Edgar; Schulze, Alfred: Statistische Verfahren zur Qualifikation von Meßmitteln, Maschinen und Prozessen. 3., bearb. und erw. Aufl. München: Hanser 1998.
- /DIN12973/ N. N.: Value Management. Deutsche Fassung EN 12973:2000. Berlin: Beuth-Verlag 2002.

- /DIN1325/ N. N.: Value Management, Wertanalyse, Funktionsanalyse, Wörterbuch. Teil 1: Wertanalyse und Funktionenanalyse, Deutsche Fassung EN 1325-1:1996. Berlin: Beuth-Verlag 1996.
- /DIN2221/ N. N.: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- /DIN25424a/ N. N.: Fehlerbaumanalyse. Methoden und Bildzeichen. Ausgabe: 1981-09. Berlin: Beuth-Verlag 1981.
- /DIN25424b/ N. N.: Fehlerbaumanalyse. Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaums. Ausgabe: 1990-04. Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- /DIN25448/ N. N.: Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analyse). Ausgabe: 1990-05. Berlin: Beuth-Verlag 1990.
- /DIN55350a/ N. N.: DIN55350: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Berlin: Beuth-Verlag 1987.
- /DIN55350b/ Kapfer, W.: DIN 55350 T 32 E: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Teil 32: Versuchsplanung (Entwurf). Berlin: 1988.
- /DIN69910/ N. N.: Wertanalyse. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V 1987.
- /DIN8402/ N. N.: DIN EN ISO 8402: Qualitätsmanagement. Berlin: Beuth-Verlag 1995.
- /DNG52/ Dingler, H.: Über die Geschichte und das Wesen des Experiments. München: Bayerische Staatsbibliothek 1952.
- /DOA95/ Doan, Detlev: VW-Handbuch der Versuchsmethodik. 5. verbesserte Auflage. Wolfsburg: VW 1995.
- /DRA62/ Draper, N. R.: Third order rotatable designs in three dimensions: Analysis. In: Technometrics 4 (1962) Heft 2. S. 219 - 234.
- /DRA92/ Draper, Norman R.; Lin, Dennis K.: Projection Properties of Plackett and Burman Designs. In: Technometrics 32 (1992) Heft 4. S. 423 - 427.
- /DRE93/ Dreyer, Helmut; Malig, Hans-Jürgen: Statistische Versuchsplanung. Birkenau: Q-DAS 1993.
- /DRR94/ Dürr, W.: Statistische Versuchsplanung im Rahmen von Qualitätsmanagementsystemen. Heidelberg: SAS Institut 1994.
- /DU00/ Du, Ying-Hong: Multiobjektorientierte Prozeßoptimierung beim Spritzgießen mit Hilfe der Taguchi-Methode und Fuzzy-Gruppenanalyse. Berichte aus der Fertigung. Dissertation Universität Paderborn. Aachen: Shaker Verlag 2000.
- /DUM94/ DuMouchel, W.; Jones, B.: A Simple Bayesian Modification of D-optimal Designs to Reduce Dependence an Assumed Modell. In: Technometrics 36 (1994) Heft 1. S. 37 - 47.
- /DYK71/ Dykstra, O.: The augmentation of experimental data to maximize $[X'X]$. In: Technometrics 13 (1971) Heft 4. S. 682 - 688.
- /EBE93/ Eberding, Karsten; Richter, Reinhart: Versuchsmethodik, eine Hilfe zur Qualitätsverbesserung. In: Sonderdruck Qualität und Zuverlässigkeit (1993/3).

- /EDE02/ Edenhofer, Berthold; Esch, Franz-Josef; Knoop, Oliver: Richtig smart erst gemeinsam. System-FMEA: Risikoabsicherung in Fahrzeugprojekten nur durch enge Einbindung aller Partner. In: Qualität und Zuverlässigkeit 47 (2002) Heft 7. S. 732 - 735.
- /EHR93/ Ehrlenspiel, K.: Gründe für den Kosten-, Zeit- und Qualitätsdruck Japans und Antworten darauf. Eindrücke einer Studienreise zu elf japanischen Unternehmen. In: Konstruktion 45 (1993). S. 73 - 78.
- /ELA88/ Elay, L. A.: Quality by Design. Taguchi Methods and US Industry. Derborn: ASI Presse 1988.
- /ERD01/ Erdbrügge, Martina; Göbel, Roland; Kleiner, Matthias; Kunert, Joachim: Optimales Drücken. Statistische Versuchsplanung bei qualitativen Zielgrößen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 46 (2001) Heft 9. S. 1180 - 1183.
- /ETZ00/ Etzel Heft J.; Heilmann, H.; Richter, R.: IT-Projektmanagement. Fallstricke und Erfolgsfaktoren. Heidelberg: dpunkt-Verlag 2000.
- /FED55/ Federer, W. T.: Experimental design. New York: Macmillan Co. 1955.
- /FIS25/ Fisher, R. A.: Statistical methods for research workers. London: Oliver and Boyd 1925.
- /FIS35/ Fisher, R. A.: The design of experiments. London: Oliver and Boyd 1935.
- /FIS74/ Fisher, R. A.; Yates, F.: Statistical tables for biological agricultural and medical research. Edinburgh: Logman 1974.
- /FKM92/ N. N.: Abschlußbericht „Fehlerverhütung vor Produktionsbeginn durch Verfahren der statistischen Versuchsmethodik“. Frankfurt: 1992.
- /FLA95/ Flamm, Rolf: Entwicklung eines Systemkonzeptes zur wissensbasierten, systematische unterstützten Versuchsmethodik. Dissertation RWTH Aachen. Frankfurt: Forschungsgemeinschaft Qualitätssicherung e.V. (FQS) 1995.
- /FNK77/ Frank, G.: Einfluß der Löschbedingungen auf die Qualität des gebildeten Calciumhydroxids beim Naßlöschen. In: Zement-Kalk-Gips 30 (1977). S. 34 - 39.
- /FQS01/ Lesmeister, Frank: ProQEngineering. Handlungsleitfaden zur kundenorientierten Produktgestaltung durch problemorientierte Anwendung präventiver QM-Methoden. Frankfurt am Main: FQS 2001.
- /FRH99/ Fraunhofer Institut: Erfolgsfaktoren von Innovationen: Prozesse, Methoden und Systeme? Ergebnisse einer gemeinsamen Studie der Fraunhofer Institute IPA, IAO, IPK. Stuttgart: 1999.
- /FSC01/ Fischer, Ernst Peter: Die andere Bildung. Was man von den Naturwissenschaften wissen sollte. Berlin: Ullstein Verlag 2001.
- /GAA96/ Glaap, Winfried: TQM in der Praxis leichtgemacht. München: Carl Hanser Verlag 1996.
- /GEI98/ Geiger, Walter: Qualitätslehre. 3., neu bearb. und erg. Aufl. Braunschweig: Vieweg 1998.

- /GFQ91/ N. N.: Statistische Versuchsmethodik nach Taguchi und Shainin. 2. Deutsche Tagung. Bad Homburg: GFQ 1991.
- /GIM91/ Gimpel, Bernd: Qualitätsgerechte Optimierung von Fertigungsprozessen. Dissertation RWTH Aachen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- /GOG94/ Gogoll, Alexander: Die sieben Management-Werkzeuge. Einfache Qualitätstechniken helfen Probleme zu lösen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 39 (1994) Heft 5. S. 516 - 521.
- /GOH99/ Gohrbandt, Uwe; Otte, Viktor; Otte, Ralf; Müller, Arndt: Neu Möglichkeiten zur Simulation von Schwenkmomenten an Automobiltürscharnieren mit Neuronalen Netzen. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 101 (1999) Heft 4. S. 238 - 246.
- /GOL89/ Goldberg, David E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Mass.: Addison-Wesley Publishing 1989.
- /GRO95/ Grob, R.; Klonaris, P.; Pfeifer, Tilo: Informationen verfügbar machen. Ergebnisse der interdisziplinären Forschergruppe „Wissensbasierte Systeme in der Qualitätssicherung (WibQus)“. In: Qualität und Zuverlässigkeit 40 (1995) Heft 3. S. 319 - 323.
- /GRS95/ Groß, Dieter; Theobald, Georg: Fehlerverhütung mit Poka-Yoke und Shainin. Japanische Qualitätstechniken im Einsatz bei der Optimierung von Lötanlagen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 40 (1995) Heft 10. S. 1186 - 1189.
- /GUN01/ Gundlach, C.; Klein, B.: Abschlußbericht Forschungsprojekt: Untersuchung zur technologischen und wirtschaftlichen Effizienz einer systematisierten Versuchsplanungsmethodik in der Produktentwicklung. Gefördert durch die Stiftung Industrieforschung (Köln). Kassel: Universität Kassel 2001.
- /GUN02/ Gundlach, Carsten: Überblick und Einteilung der verschiedenen Versuchsmethoden. Vortrag beim Kongreß „Design of Experiments“. Kassel: IHK-Kassel 2002.
- /GUN03/ Gundlach, Carsten: Überblick und Einteilung der verschiedenen Versuchsmethoden. Vortrag beim 1. DoE-Kongreß der IHK-Kassel. Kassel: IHK 2003.
- /HAR91/ Hartung, Joachim: Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 8., durchgesehene Auflage. München: R. Oldenbourg Verlag 1991.
- /HAS95/ Haslauer, F.: Mit Benchmarking zur Weltspitze aufsteigen. Aus: Kreuz, W. (Hrsg.): Kontinuierliches Benchmarking Voraussetzung zum Aufstieg für die Weltklasse von morgen. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1995.
- /HAS95/ Haslauer, F.: Mit Benchmarking zur Weltspitze aufsteigen. Aus: Kreuz, W. (Hrsg.): Kontinuierliches Benchmarking Voraussetzung zum Aufstieg für die Weltklasse von morgen. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1995.
- /HAT89/ Hart, Hans: Einführung in die Meßtechnik. Berlin: VEB 1989.

-
- /HDT01/ Haus der Technik e.V. (Hrsg.). Tagung: Design of Experiments (DoE) in der Motorenentwicklung. Berlin: Haus der Technik 2001.
- /HEI94/ Heistermann, Jochen: Genetische Algorithmen: Theorie und Praxis evolutionärer Optimierung. Stuttgart: Teubner Verlagsgesellschaft 1994.
- /HER96/ Hering, Ekbert; Triemel, Jürgen; Blank, Hans-Peter (Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure. 3., überarbeitete Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- /HER99/ Hering, Ekbert; Triemel, Jürgen; Blank, Hans-Peter (Hrsg.): Qualitätsmanagement für Ingenieure. 4. überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Verlag 1999.
- /HES94/ Heß, Martin: TQM/Kaizen Praxisbuch. Qualitätszirkel und verwandte Gruppen im Total Quality Management. Bad Nauheim: Verlag TÜV Rheinland 1994.
- /HFM92/ Hofmeister, F.; Bäck, T.: Genetic Algorithmus and Evolution. Strategies: Similarities and Differences. Papers on Economics and Evolution 9103. Dortmund: 1992.
- /HIC80/ Hicks, Ch.: Grundlagen der experimentellen Versuchsplanung. Aus dem Amerikanischen übersetzt von W. Stifter. Frankfurt am Main: Fachbuchhandlung für Psychologie 1980.
- /HIL00/ Hillebrecht, Martin: Beitrag zur Optimierung des Auftragschweißens von Korrosionsschutzschichten durch on-line Elementspektralanalyse. Dissertation Universität Clausthal-Zellerfeld. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2000.
- /HLF96/ Hilf, Klaus-Dieter: Optimale Versuchsplanung zur dynamischen Rotorkalibrierung. Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regeltechnik, 590. Dissertation Universität Heidelberg. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996.
- /HLL75/ Holland, John: Adaption in Natural and Artificial Systems. Michigan: 1975.
- /HOC88/ Hochstädter, Dieter; Kaiser, Ulrike: Varianz- und Korrelationsanalyse. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch 1988.
- /HOE93/ N. N.: Statistische Versuchsplanung. Qualität bei Hoechst. Frankfurt a. M.: Hoechst 1993.
- /HOL95/ Holst, Gerald: Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung. Dissertation TU Hamburg-Harburg. Aachen: Shaker 1995.
- /HRB02/ Herb, Rolf: Implementierung von Versuchsplanungsmethoden in einen F&E-Bereich. Vortrag beim 1. DoE-Kongreß der IHK-Kassel. Kassel: IHK 2003.
- /HRB98/ Herb, Rolf: TRIZ. Der Weg zum konkurrenzlosen Erfolgsprodukt. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1998.
- /HRR98/ Herrmann, Joachim; Bremer, Jürgen: Alles zielt aufs Optimum. Die regressionsanalytisch beschleunigte Evolutionsstrategie als Methode zur Versuchsplanung. In: Qualität und Zuverlässigkeit 43 (1998) Heft 10. S. 1229 - 1233.
-

- /HRT74/ Hartmann, Klaus; Lezki, Eduard; Schäfer, Wolfgang (Hrsg.): Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1974.
- /INT1/ Rinnagl, Michael: www.versuchsmethodik.de. Stand: 22.10.2002.
- /INT2/ N. N.: http://www.amsup.com/taguchi_methods/dr_taguchi.htm. Stand: 22.10.2002.
- /INT3/ N. N.: <http://www.shainin.com/SLLCWEB/evolution.html>. Stand: 22.10.2002.
- /INT4/ Anderson, Mark J.; Whitcomb, Patrick J.: Find the Optimal Formulation for Mixtures. April 1998. Online im Internet: <http://www.statease.com/newsltr.html#articles>. Stand: 13.11.2000
- /INT5/ N. N.: www.taguchi.com. Stand: 01.06.2001.
- /INT6/ N. N.: www.shainin.com. Stand: 19.05.2003.
- /INT7/ Walsh, Tom: Sleuth helps DaimlerChrysler on its quest for quality. www.freep.com.
- /INT8/ N. N.: http://www.carillontech.com/Shannin/Isoplot_Const.html. Stand: 31.07.2001.
- /INT9/ N. N.: <http://www.kalksandstein.de>. Stand: 10.11.2003.
- /ISH80/ Ishikawa, K.: Guide to Quality Control. Tokio: Asian Productivity Organization 1980.
- /ISO3534/ N. N.: ISO 3534 Part 3: Design of Experiments. First edition: 1985. Vocabulary and symbols. Geneva: International Organization for Standardization 1985.
- /JOH95/ Johannsen, J.; Schmitt, L.: Rechnergestützte statistische Versuchsmethodik in der Antriebsentwicklung von BMW. Aus: VDI (Hrsg.): Mess- und Versuchstechnik im Automobilbau. VDI Bericht 1189. Düsseldorf: VDI Verlag 1995.
- /KAC86/ Kacker, R. M.: Taguchi's quality philosophy: Analysis and commentary. In: Quality Progress 19 (1986) Heft 12. S. 21 - 29.
- /KAM88/ Kaminski, M.; Fein, P.: Fallbeispiel einer Qualitätsverbesserung mittels Taguchi-Methoden. In: Qualität und Zuverlässigkeit 33 (1988) Heft 11. S. 599 - 603.
- /KAP90/ Kapfer, Walter: Qualitätssicherung durch Versuchsmethodik. Lehrgangunterlagen der Deutschen Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ). Frankfurt a. M.: 1990.
- /KAS93/ Hansen, W.; Jansen, H. H.; Kamiske, G. F. (Hrsg): Qualitätsmanagement im Unternehmen. Berlin: Springer Verlag 1993.
- /KAS95a/ Kamiske, Gerd F.; Theden, Philipp: Qualitätstechniken steigern die Rentabilität. Ergebnisse einer empirischen Untersuchung bei deutschen Unternehmen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 40 (1995) Heft 11. S. 1263 - 1268.

- /KAS95b/ Kamiske, Gerd F.; Theden, Philipp: Einsatzpotential von Qualitätstechniken. Eine Befragung deutscher Unternehmen. In: *ZwF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 90 (1995) Heft 11. S. 530 - 532.
- /KEM52/ Kempthorne, O.: *The design and analysis of industrial experiments*. New York: John Wiley and Sons 1952.
- /KHU96/ Khuri, A. I.; Cornell, J. A.: *Response surfaces: Design and analyses*. New York: Marcel Dekker 1996.
- /KIE59/ Kiefer, J.: Optimum experimental design. In: *J. Royal Statistical Soc. B20* (1958) Heft 2. S. 272 - 319.
- /KIE60/ Kiefer, J.; Wolfowitz, J.: The equivalence of two extremum problems. In: *Canadian Journal of Mathematics* 12 (1960). S. 363 - 366.
- /KIN94/ King, Bob: *Better Designs in Half the Time*. St. Gallen: gfmt 1994.
- /KLE02/ Klein, Bernd: „Design of Experiments“. Einführung in die Taguchi-/Shainin-Methodik. Lehrgangsunterlage. Kassel: 2002.
- /KLE99/ Klein, Bernd: *QFD. Quality Function Deployment*. Renningen: Expert Verlag 1999.
- /KLM03/ Klimmek, Christian; Kunht, Sonja; Gather, Ursula; Kleiner, Matthias: Wirkmedienbasierte Umformprozesse planen. Kombination der statistischen Versuchsplanung mit der Finite-Element-Methode. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 48 (2003) Heft 1. S. 27 - 28.
- /KLO76/ Klotz, U.-P.: Ein Beitrag der modernen Versuchsplanung zur Gestaltung des Marketing-Mix. Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München. München: 1976.
- /KLP92/ Kleppmann, Wilhelm: Statistische Versuchsplanung - Klassisch, Taguchi oder Shainin? In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 37 (1992) Heft 2. S. 88 - 92.
- /KLP98/ Kleppmann, Wilhelm: *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. München: Carl Hanser Verlag 1998.
- /KOE95/ Koether, R.: Unternehmensleistungen steigern - Was beinhaltet modernes Management und welchen Nutzen hat es? In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 40 (1995) Heft 7. S. 814.
- /KOL96/ Kolb, Matthias: D-optimale Versuchspläne. Eine Methode zur Abschätzung praktikabler Versuchszahlen. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* 41 (1996) Heft 7. S. 818 - 821.
- /KON63/ Kontrorovic, S. J.; Segalova, E. E.; Rebinder, P. A.: Einfluß von Gips auf den Hydrationsprozeß und auf die Erhärtung des Calciumoxides durch Hydratation. In: *Kolloidnyj Zurnal* 25 (1963). S. 561 - 566.
- /KRE96/ Krebs, Regine: *Optimieren von Tiefziehbedingungen mit Methoden der Statistischer Versuchsplanung*. Dissertation Universität Gesamthochschule Siegen. Siegen: 1996.
- /KRL99/ Krallmann, Hermann; Frank, Helmut; Gronau, Norbert: *Systemanalyse im Unternehmen. Partizipative Vorgehensmodelle, objekt- und prozeßorientierte Analysen, flexible Organisationsarchitekturen*. München: Oldenbourg Verlag 1999.

- /KRM87/ Kramer, Friedhelm: Innovative Produktpolitik: Strategie - Planung - Entwicklung - Durchsetzung. Berlin: Springer Verlag 1987.
- /KRÖ01/ Kröff, André: Numerische Untersuchung und Optimierung des Ziehens von hoch kohlenstoffhaltigen Stahldrähten. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 584. Düsseldorf: VDI Verlag 2001.
- /KRO91/ Krottmaier, Johannes: Taguchi, Shainin - Stein der Weisen? In: Qualität und Zuverlässigkeit 36 (1991) Heft 2. S. 90 - 93.
- /KRO94/ Krottmaier, Johannes: Versuchsplanung. Ein integraler Bestandteil der TQM-Strategie. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Köln: Verlag TÜV Rheinland 1994.
- /KRO95/ Krottmaier, Johannes: Leitfaden Simultaneous Engineering. Kurze Entwicklungszeiten, niedrige Kosten, hohe Qualität. Berlin: Springer-Verlag 1995.
- /KRP95/ Krempelhuber, H. von; Lachenmayer, U.: Bewertung der Einflußfaktoren bei der Vorbehandlung und beim Reinigen mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung. In: Galvatotechnik, 86. (1995) H. 3. S. 712 - 716.
- /KRÜ00/ Krüger, Wolfgang: Teams führen. Planegg: (STS Standard Tabellen & Software Verlag 2000.
- /KRU95/ Krummenacher, Stefan: Prozeßmanagement als Baustein von Total Quality Management. Dissertation Universität St. Gallen. Aachen: Shaker Verlag 1995.
- /KRY91/ Kreyszig, Erwin: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 4. unveränd. Nachdr. der 7. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht 1991.
- /KRZ00/ Kreutz, Martin: Mit statistischer Versuchsplanung und neuronalen Netzen Rezepturoptimierung. In: Die Ernährungsindustrie (2000) Heft 2. S. 46 ff.
- /KÜH02/ Kühnel, Martin: Experimentelle Ermüdungsfestigkeitsuntersuchung zum nichtlinearen Schädigungsverhalten mittels der statistischen Versuchsplanung. Diplomarbeit Universität Kassel. Kassel: 2002.
- /KUH90/ Kuhn, Heinrich: Klassische Versuchsplanung. Taguchi-Methode, Shainin-Methode: Versuch einer Wertung. In: VDI-Zeitung (1990) Heft 12. S. 91 - 94.
- /KÜL94/ Kühlmeyer, M.: Statistische Versuchsplanung und Zuverlässigkeit in der Fahrzeug-Entwicklung. Aus: VDI (Hrsg.): Wege zum Erfolgreichen Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. VDI Bericht 1106. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- /LAN77/ Lange, J.: Anwendung von Multifaktoren-Plänen nach Plackett-Burman bei der Atomabsorptions-Spektralfotometrie. In: Silikattechnik 28 (1977) Heft 1. S. 17 - 21.
- /LEH98/ Lehmkuhl, Frank: Verfahren zur Bestimmung einer geeigneten Transformation der Beobachtungen bei Taguchi-Verfahren. Dissertation der Universität Dortmund. Dortmund: 1998.

- /LES01/ Lesmeister, Frank: Verbesserte Produktplanung durch den problemorientierten Einsatz präventiver Qualitätsmethoden. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16, Nr. 132. Düsseldorf: VDI Verlag 2001.
- /LIN53/ Linder, A.: Planen und Auswerten von Versuchen. Basel: Verlag Birkhäuser 1953.
- /LIN69/ Linder, A.: Planen und Auswerten von Versuchen. 3. Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag 1969.
- /LOD98/ Lodders, Dorothea: Methoden der experimentellen Optimierung. Dissertation JLU Gießen. Göttingen: Cuvillier 1998.
- /LYV77/ Lychmus, H.; Rjani, A.; Dilaktorski, N.: Über den Mechanismus der Kalkhydratation. In: Silikatechnik 28 (1977). S. 300 - 303.
- /MAC99/ Macrone, Michael: Heureka! Das archimedische Prinzip und 80 weitere Versuche, die Welt zu erklären. 3. Auflage. München: Deutscher Taschenbuchverlag 1999.
- /MAJ98/ Majer, Clemes Philipp: Parameterschätzung, Versuchsplanung und Trajektoroptimierung für verfahrenstechnische Prozesse. Fortschritt-Bericht VDI: Reihe 3, Verfahrenstechnik, 538. Dissertation Universität Stuttgart. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998.
- /MAL94/ Malig, Hans-Jürgen: Gefahren beim Auswerten von Signal-Rauschverhältnissen erkennen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 39 (1994) Heft 9. S. 1003 - 1010.
- /MAS89/ Mason, R. L.; Gust, R. F.; Hess, J. L.: Statistical Design and Analysis of Experiments. New York: John Wiley & Sons Inc. 1989.
- /MAY97/ Mayers, Bernhard: Prozeß- und Produktoptimierung mit Hilfe der Statistischen Versuchsmethodik. Dissertation RWTH Aachen. Aachen: Shaker Verlag 1997.
- /MCK91/ Mackowiak, E.: Qualität - ein strategischer Erfolgsfaktor im Wettbewerb. Vortrag im Rahmen des Seminars „Qualität - Herausforderung für die Zukunft“. Braunschweig: 1991.
- /MCL84/ McLean, R. A.; Anderson, V. L. (Hrsg.): Applied factorial and fractional designs. New York: Marcel Dekker 1984.
- /MEI88/ Meier, Gert: Wechselwirkung. Abhängigkeiten und Einflüsse der Parameter beim Fräsen ermitteln mit systematischen Versuchen. In: Maschinenmarkt 94 (1988) Heft 39. S. 68 - 74.
- /MIC93/ Michaeli, W.; Eversheim, W. (Hrsg.): CIM im Spritzgießbetrieb. Wirtschaftlich Fertigen durch Rechnerintegration. München: Carl Hanser Verlag 1993.
- /MIE00a/ Mitterer, Alexander: Optimierung vielparametrischer Systeme in der Kfz-Antriebsentwicklung. Statistische Versuchsplanung und Künstliche Neuronale Netze in der Steuergeräteauslegung zur Motoabstimmung. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- /MIE00b/ Mitterer, Alexander; Zuber-Goos, Frank: Modellgestützte Kennfeldoptimierung. Ein neuer Ansatz zur Steigerung der Effizienz in der Steuergeräteapplikation. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 102 (2000) Heft 3, S. 188 - 196.

- /MIE99/ Mitterer, A.; Fleischhauer, T.; Zuber-Goos, F.; Weicker, K.: Modellgestützte Kennfeldoptimierung an Verbrennungsmotoren. Aus: VDI (Hrsg.): Statistische Analyse der Belastung im Kundeneinsatz zur Entwicklung von Zielvorgaben der Betriebsfestigkeitsauslegung. VDI Bericht 1470. Düsseldorf: VDI Verlag 1999.
- /MIT90/ Mittmann, Bernd: Qualitätsplanung mit der Methode von Shainin. In: Qualität und Zuverlässigkeit 35 (1990) Heft 4. S. 209 - 212.
- /MLL89/ Müller, H. W.: Quality Engineering - ein Überblick über neuere Verfahren. Aus: Zink, K. J. (Hrsg): Qualität als Managementaufgabe. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1989.
- /MOD01/ N. N.: Modde Version 6.0. Umetrics AB 2001.
- /MON91/ Montgomery, Douglas C.: Design and analysis of experiments. Third Edition. New York: John Wiley & Sons 1991.
- /MRK92/ Markfort, Dieter; Thiel, Norbert: Design of Experiments nach Taguchi in der industriellen Entwicklung. Unterlage zum Intensivseminar 23.-27. November 1992 in Garmisch-Partenkirchen. München: 1992.
- /MTC74a/ Mitchell, T. J.: An algorithm for the construction of „D-Optimal“ experimental designs. In: Technometrics 16 (1974) Heft 2. S. 203 - 210.
- /MTC74b/ Mitchell, T. J.: Computer construction of „D-Optimal“ first-order designs. In: Technometrics, 16 (1974), S. 211 - 220.
- /NAY86/ Nayatami, Yoshinobu et. al.: Seven Management Tools for QC. Rep. Stat. Appl. Res. Vol. 33, No. 2.
- /NED92a/ Nedeß, Christian; Holst, Gerald: Hilfen für die statistische Versuchsplanung? Taguchis orthogonale Felder und lineare Graphen: Teil 1. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 2. S. 93 - 97.
- /NED92b/ Nedeß, Christian; Holst, Gerald: Hilfen für die statistische Versuchsplanung? Taguchis orthogonale Felder und lineare Graphen: Teil 2. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 3. S. 157 - 159.
- /NED92c/ Nedeß, Christian; Holst, Gerald: Hilfen für die statistische Versuchsplanung? Taguchis orthogonale Felder und lineare Graphen: Teil 3. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 4. S. 202 - 204.
- /NEU96/ Neumann, Albert: Quality Function Deployment: Qualitätsplanung für Serienprodukte. Dissertation Universität Aachen. Aachen: Shaker Verlag 1996.
- /NIC92/ Nickel, Joachim: Technische und methodische Hilfsmittel zur Verbesserung der Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA). Dissertation Universität Hamburg. Hamburg: Shaker Verlag 1992.
- /NIS94/ Nissen, Volker: Evolutionäre Algorithmen: Darstellung, Beispiele, betriebswirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten. Wiesbaden: DUV 1994.
- /NIS97/ Nissen, Volker: Einführung in Evolutionäre Algorithmen. Optimierung nach dem Vorbild der Evolution. Braunschweig: Vieweg Verlag 1997.
- /ORT00a/ Orth, Andreas: Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung. Einsteigerkurs. Schulungsunterlage. Eschborn: Umesoft 2000.

- /ORT00b/ Orth, Andreas: Modellgestützte Versuchsplanung für die Optimierung von Mischungen. Schulungsunterlage. Eschborn: Umesoft 2000.
- /ORT00c/ Orth, Andreas: Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung. Spezialkurs: Blocking und D-optimale Versuchspläne. Schulungsunterlage. Eschborn: Umesoft 2000.
- /ORT01/ Orth, Andreas; Wenzel, Dirk: Leitfaden Modellgestützte Versuchsplanung und Prozeßoptimierung. Frankfurt: 2001.
- /ORT02/ Orth, Andreas; Soravia, Sergio: Design of Experiments. Encyclopedia of industrial chemistry. Sixth Edition. Weinheim: Wiley-VCH 2002.
- /OTO97/ Otto, Matthias: Chemometrie: Statistik und Computereinsatz in der Analytik. Weinheim: VCH 1997.
- /PAR66/ Parthey, H.; Wahl, D.: Die experimentelle Methode in Natur- und Geisteswissenschaften. Berlin: VEB Verlag der Wissenschaften 1966.
- /PEA93/ Peace, G. S.: Taguchi Methods. A Hands-On Approach. Reading: Addison-Wesley 1993.
- /PET91a/ Petersen, Harro: Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung (in 4 Bd.). Bd. 1: Grundlagen der deskriptiven und mathematischen Statistik. Landsberg/Lech: ecomed 1991.
- /PET91b/ Petersen, Harro: Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung (in 4 Bd.). Bd. 2: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung. Landsberg/Lech: ecomed 1991.
- /PET91c/ Petersen, Harro: Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung (in 4 Bd.). Bd. 3: Selektion von statistischen Versuchsplänen. Landsberg/Lech: ecomed 1991.
- /PET93/ Petersen, Harro; de Mehr, M.: Grundlagen der Statistik und der statistischen Versuchsplanung (in 4 Bd.). Bd. 4: Einsatz statistischer Methoden bei der Qualitätssicherung in der chemischen Industrie Landsberg/Lech: ecomed 1993.
- /PET95/ Petersen, Harro: Die Taguchi-Methode in der statistischen Versuchsplanung und Qualitätssicherung. Frankenthal: Eigendruck 1995.
- /PETa/ Petersen, Harro: Lehrgangunterlagen statistische Versuchsplanung. Umdruck. Frankenthal: 1999.
- /PETb/ Petersen, Harro: Statistische Versuchsplanung. Umdruck. Frankenthal.
- /PFE00/ Pfeifer, T.; Lesmeister, F.: Einsatz präventiver QM-Methoden. Aus: Thomann H. J. (Hrsg.): Der Qualitätsmanagement-Berater. Aktueller Ratgeber für den Qualitätsmanager in der betrieblichen Praxis. Köln: TÜV-Verlag 2000.
- /PFE01/ Pfeifer, Tilo: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Hanser 2001.
- /PFE02/ Pfeifer, T.; Tillmann, M.: Das schwächste Glied stärken. Engpassorientierte Optimierung der Produktion durch innovative Prozessgestaltung. In: Qualität und Zuverlässigkeit 47 (2002) Heft 11. S. 1120 - 1121.
- /PFE96/ Pfeifer, Tilo: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Hanser 1996.

- /PFE97/ Pfeifer, T.; Mayers, B.; Steins, D.: Statistische Versuchsmethodik zur Qualitätssicherung und -verbesserung. In: Spektrum der Wissenschaft (1997) Heft Januar. S. 103 - 105.
- /PHA89/ Phadke, Madhav S.: Robuste Prozesse durch Quality Engineering. München: gfmt - Gesellschaft für Management Technologie 1989.
- /PLA46/ Plackett, R. L.; Burman, J. P.: The design of optimum multifactorial experiments. In: Biometrika 33 (1946). S. 303 - 325.
- /POH55/ Pohl, G.: Der Einfluß von SO₄-Ionen beim Löschen von Weißkalk. In: Zement-Kalk-Gips 8 (1955).S. 387 - 393.
- /POL98/ Polheim, Hartmut: Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen. Dissertation Technische Universität Ilmenau. Aachen: Shaker 1998.
- /QS9000/ N.N.: QS9000 - QM-System-Forderungen. Berlin: Beuth-Verlag 1998.
- /QSB99/ Thomann H. J. (Hrsg.): Der Qualitätssicherungs-Berater. Köln: TÜV-Verlag 1999.
- /QUE01a/ Quentin, Horst: Versuchsmethodik Aus: Hansen, W.; Kamiske, G. F. (Hrsg.): Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements. Werkzeuge - Systeme - Prozeßorientierung Düsseldorf: Smposion Publishing 2001.
- /QUE01b/ Quentin, Horst: Statistische Versuchsmethodik nach Shainin Aus: Hansen, W.; Kamiske, G. F. (Hrsg.): Praxishandbuch Techniken des Qualitätsmanagements. Werkzeuge - Systeme - Prozeßorientierung. Düsseldorf: Smposion Publishing 2001.
- /QUE89a/ Quentin, Horst: Statistische Versuchsmethodik. Korrelation - Varianzanalyse - Taguchi. In: Qualität und Zuverlässigkeit 34 (1989) Heft 5. S. 229 - 232.
- /QUE89b/ Quentin, Horst; Kaminski, Martin: Ausbildung, Training und Einführung der statistischen Versuchsmethodik in einem Unternehmen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 34 (1989) Heft 12. S. 644 - 646.
- /QUE92a/ Quentin, Horst: Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Shainin-Methoden. Teil 1: Shainin's Philosophie und Techniken. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 6. S. 345 - 348.
- /QUE92b/ Quentin, Horst: Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Shainin-Methoden. Teil 2: Versuchsmethodik. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 7. S. 416 - 419.
- /QUE94/ Quentin, Horst: Versuchsmethoden im Quality-Engineering. Braunschweig: Vieweg-Verlag 1994.
- /RAI99/ Günther Raidl: Evolutionäre Algorithmen. Folien zur Lehrveranstaltung. Wien: 1999.
- /RAM92/ Rammelmüller, Benno; Steibl, Georg: Optimal mahlen. Robustes Design nach Taguchi am Praxisbeispiel „Mahlen von Koks-kohle“. In: Qualität und Zuverlässigkeit 37 (1992) Heft 8. S. 473 - 474.
- /RAU90/ Rauben, A.: Planungsmethodik für ein Qualitätskostensystem. DiSSERTATION Universität Stuttgart. Berlin: Springer Verlag 1990.

- /REC73/ Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie. Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Stuttgart: Frommann-Holzboog 1973.
- /RED97/ Redeker, G.: Grundlagen der Qualitätssicherung. Vorlesungsskript Institut für Qualitätssicherung. Hannover: Universität Hannover 1997.
- /RED99/ Redeker, Georg; Zischka, Stefan: QFD als Philosophie verstehen. ... und an die unternehmensspezifischen Anforderungen anpassen. In: Qualität und Zuverlässigkeit 44 (1999) Heft 3. S. 330 - 332.
- /REH96/ Reinhart, Gunther; Lindemann, Udo; Heinzl, Joachim: Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium um Praxis. Berlin: Springer 1996.
- /RET78/ Retzlaff, G.; Rust, G.; Waibel, J.: Statistische Versuchsplanung. Planung naturwissenschaftlicher Experimente und ihre Auswertung mit statistischen Methoden. 2., verbesserte Auflage. Weinheim: Verlag Chemie 1978.
- /ROS88/ Ross, P. J.: Taguchi techniques for quality engineering: Loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design. Milwaukee: ASQC 1988.
- /ROY90/ Roy, R.: A primer on the Taguchi method. Milwaukee: ASQC 1990.
- /RSC97/ Domain Solutions Corporation. Online Documentaion RS/Client 1.1.0 for Windows. RS/1 Version 5.3.0. Cambridge: 1997.
- /RSS02/ N.N.: Rath & Strong's Six Sigma Pocket Guide. 34 Werkzeuge zur Prozessverbesserung. Köln: TÜV-Verlag 2002.
- /SCF58/ Scheffé, H.: Experiments with mixtures. In: J. Royal Statistical Soc. B 21 (1958) Heft 2. S. 344 - 360.
- /SCF63/ Scheffé, Henry: The Simplex-Centroid Design for Experiments with Mixtures. In: Journal of the Royal Statistical Society 25 (1963) Heft B. S. 235 - 263.
- /SCH86/ Scheffler, Eberhard: Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung. 2., stark überarb. Aufl. Leipzig: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1986.
- /SCH97/ Scheffler, Eberhard: Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker. 3., neu überarbeitete und erweiterte Auflage von „Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung“. Stuttgart: Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1997.
- /SCI90/ Schick, Peter: Systemoptimierung - Grenzen der Versuchsmethoden ergebnisorientiert überschreiten. In: Qualität und Zuverlässigkeit 35 (1990) Heft 12. S. 703 - 708.
- /SCL91/ Schulze, Claus: Einflußgrößenrechnung im Vorfeld der statistischen Versuchsplanung. In: Qualität und Zuverlässigkeit 36. (1991) H. 6. S. 334 - 339.
- /SCÖ94/ Schöneburg, Eberhardt: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategie. Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Bonn: Addison-Wesley 1994.

- /SCW68/ Schwefel, Hans-Paul: Projekt MHD-Staustrahlrohr: Experimentelle Optimierung einer Zweiphasendüse, Teil 1. Technischer Bericht 11.034/68, 35, AEG Forschungsinstitut. Berlin: 1968.
- /SCW75/ Schwefel, Hans-Paul: Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Dissertation. Berlin: 1975.
- /SCW77/ Schwefel, Hans-Paul: Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie. Basel: Birkhäuser Verlag 1977.
- /SDT92/ Schmidt, S. R.; Lauensby, R. G.: Understanding Industrial Designed Experiments. 3rd ed. Colorado Springs: Air Academy Press 1992.
- /SED50/ Seder, L.: Diagnosos with diagrams. Part I and II. In: Industrial Quality Control 1950.
- /SEE85/ Scheel, Armin: Beitrag zur Theorie der Evolutionsstrategie. Dissertation TU Berlin. Berlin: 1985.
- /SHO74/ Schoeffler, S.; Buzzell, R. D.; Rober, D.; Heany, D. F.: Impact of strategic planning on profit performance. In: Harvard Business Review (1974) Heft 52. S. 137 - 145.
- /SMI18/ Smith, K.: On the standard deviation of adjusted and interpolated values of an observed polynomial function and its constants and the guidance they give towards a proper choise of the distribution of observations. In: Biometrika 12 (1918). S. 1 - 85.
- /SOI96/ Sonius, M. W.; Tew, B. W.: Parametric design optimization of an entrapped fiber connection. In: Composite Structures 35 (1996). S. 283 - 293.
- /SON89/ Sondermann, Jochen; Leist, Ralph: Methodenbausteine für eine qualitätsorientierte Prozeßplanung. FMEA - Versuchsmethodik, Design of Experiments - Poka-yoke. In: Qualität und Zuverlässigkeit 34 (1989) Heft 12. S. 656 - 662.
- /SPE91/ Spenhoff, Eckehardt: Prozessicherheit durch statistische Versuchsplanung in Forschung, Entwicklung und Produktion. Grundlagen und Fallbeispiele der klassischen Versuchsplanung. München: gfmt - Gesellschaft für Managment und Technologie 1991.
- /SPI81/ N. N.: Start up Business. Cambridge: Strategic Planing Institut 1981.
- /SPI83/ N. N.: The PIMS-Programm. Cambridge: Strategic Planing Institut 1981.
- /SPN62/ Spenley, W; Hext, G. R.; Himsworth, F. R.: Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation. In: Technometrics 4 (1962) Heft 4. S. 441 - 461.
- /SRR00/ Schnerr-Häselbarth, Oliver: Automatisierung der Online-Qualitätsüberwachung beim Kunststoffspritzgießen. Dissertation RWTH Aachen. Aachen: Verlag Mainz 2000.
- /STC98/ N. N.: Statistica for Windows. Computer-Programm-Handbuch. StatSoft Inc. (Hrsg.): Tulsa: StatSoft Inc. 1998.
- /STE94/ Steinborn, Susanne; Hartelt, Manfred: Taguchi-Methoden - das japanische Geheimnis? Probleme der Qualitätssicherung und Versuchsplanung. In: Qualität und Zuverlässigkeit 39 (1994) Heft 1. S. 29 - 33.

-
- /STN00/ Steinbuch, Pitter A.: Projektorganisation und Projektmanagement. Ludwigshafen: Friedrich Kiehl Verlag 2000.
- /SUL86/ Sullivan, P.: Quality Function Deployment. In: Quality Progress (1986) Heft 6. S. 39 - 50.
- /TAG88/ Taguchi, Genichi: System of experimental design. Engineering methods to optimize quality an minimize costs. New York: White Plains 1988.
- /TAG89/ Taguchi, Genichi: Einführung in Quality Engineering. Minimieren von Verlusten durch Prozeßbeherrschung. München: gfmt - Gesellschaft für Managment und Technologie 1989.
- /TAG91/ Taguchi, Genichi: Taguchi-Methods: Signal-to-Noise Ratio for Quality Evaluation. Dearborn: American Supplier Institut 1991.
- /TAG92/ Taguchi, Genichi: Taguchi Methods: Research and Development. Dearborn: American Supplier Institut 1992.
- /TAW96/ N. N.: Lehrgangsunterlage „QM-Manager“. Kassel: TAW-Cert 1996.
- /THE01/ Theden, Philipp: Wirtschaftlichkeit von Qualitätstechniken. Aus: Hansen, W.; Kamiske, G. F. (Hrsg.): Qualitätsmanagement. Digitale Fachbibliothek auf CD-Rom. Düsseldorf: Symposion Publishing 2001.
- /THE96/ Theden, Philipp: Qualitätstechniken. Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung. München: Carl Hanser Verlag 1996.
- /TIE99/ Tiederle, Viktor: Einsatz der statistischen Versuchsplanung zur Optimierung des Drahtbond-Prozesses in der Produktion. Dissertation Technische Universität Berlin. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999.
- /TIM96/ Timischl, Wolfgang: Qualitätssicherung. München: Carl Hanser Verlag 1996.
- /TÖN97/ Tönshoff, Hans Kurt: Hypertextsystem zur Auswahl von präventiven Qualitätstechniken. Universität Hannover (Institut für Fertigungstechnik und spanende Werkzeugmaschinen.). Internetskript: 1997.
- /TOU97/ Toutenburg, Helge; Gössl, Rüdiger; Kunert, Joachim: Quality Engineering. Eine Einführung in die Taguchi-Methoden. München: Prentice Hall 1997.
- /TRA95/ Traver, R. W.: Manufacturing Solutions for Consistent Quality and Reliability. New York: Amacom 1995.
- /TS16949/ N. N.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Zertifizierungsvorgaben der Automobilindustrie zur technischen Spezifikation ISO/TS 16949. Oberursel: VDA-QMC 1999.
- /TÜV00/ Thomann H. J. (Hrsg.): Der Qualitätsmanagement-Berater. Aktueller Ratgeber für den Qualitätsmanager in der betrieblichen Praxis. Köln: TÜV-Verlag 2000.
- /TVE95/ Tvedt, Arne M.: Total Quality Management. Auf dem Weg zu einem unternehmensweiten Qualitätsmanagement. Dissertation Universität St. Gallen. Aachen: Shaker Verlag 1995.
- /ULR96/ Ulrich, Hans; Probst, Gilbert J. B.: Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln - Ein Brevier für Führungskräfte. 4., unveränderte Auflage. Bern: Paul Haupt 1996.
-

- /VDA04a/ N. N.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz Band 4 Teil 1. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Frankfurt: VDA 1996.
- /VDA04b/ N. N.: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz. Band 4 Teil 2: System-FMEA. Frankfurt: VDA 1996.
- /VDA6/ N. N.: Qualitätsaudit. Grundlagen DIN EN ISO 9001 und DIN EN ISO 9004. 3. Auflage. Frankfurt: VDA 1996.
- /VDI2247/ N. N.: Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung . Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- /VDI2800/ N. N.: Wertanalyse. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.
- /VDI2801/ N. N.: Formularsatz zur Wertanalyse gemäß DIN 69910. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- /VDI92/ VDI (Hrsg.): Qualitätssicherung für Produktionsingenieure. Qualität und Produktivität ein Widerspruch? VDI Bericht 998. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
- /VDI94a/ VDI (Hrsg.): Wege zum Erfolgreichen Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung. VDI Bericht 1106. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- /VDI94b/ VDI (Hrsg.) (Hrsg.): Wettbewerbsvorteile durch integrierte Produktentwicklung. VDI Bericht 1136. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- /VES80/ Vester, F.; Hesler, von A.: Sensitivitätsmodell. Frankfurt: Reg. Planungsgemeinschaft Untermain 1980.
- /WAL94/ Wallacher, Johannes: Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung von robusten Faktorkombinationen in der präventiven Qualitätssicherung. Dissertation Universität-Karlsruhe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- /WAS01/ Waschatz, Uwe: Grundlagen der statistischen Versuchsplanung. Vorlesungsunterlagen Universität Kassel. Kassel: 2001.
- /WEB48/ Weber, E.: Grundriß der biologischen Statistik. Jena: Gustav Fischer Verlag 1948.
- /WEK96/ Leist, Ralph; Kühlmeyer, Manfred (Hrsg.): Qualitätsmanagement-Methoden: Auswahl - Einführung - Durchführung. Augsburg: WEKA, Fachverlag für Technische Führungskräfte 1996.
- /WEL99/ Werler, Christian: Qualitäts- und Fehleranalyse mit Hilfe neuronaler Netze Grafisch durch den Datenschungel. In: Chemie - Anlagen + Verfahren (1999).
- /WEM99/ Wember, Theo: Technische Statistik und statistische Versuchsplanung. Einführung in statistische Methoden mit Anwendungsschwerpunkt in der Analyse technischer Daten für Techniker, Ingenieure und Naturwissenschaftler. Seminarmanuskript. Waltrop: Eigenverlag 1999.
- /WHE72/ Wheeler, R. E.: Efficient experimental design. Annual Meeting of the Am. Stat. Assn. Montreal: 1972.
- /WIN86/ Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 2., durchges. Aufl. München: Carl Hanser Verlag 1989.

- /WIT80a/ Wittneben, U.: Untersuchungen zur Reaktionsfähigkeit und Viskosität wässriger Kalkhydratsuspensionen. Dissertation RWTH Aachen. Aachen: 1980.
- /WIT80b/ Wittneben, U.: Untersuchungen zur Teilchengrößenverteilung in Kalkhydratsuspensionen. Forschungsbericht Nr. 1/80 der Forschungsgemeinschaft der Deutschen Kalkindustrie e.V. Köln: 1980.
- /WKM93/ Weckenmann, A.: Vorlesung Qualitätssicherung. Erlangen: 1993.
- /WST91/ Westkämper, Engelbert: Integrationspfad Qualität. Leitfaden zum Erfolg. Berlin: Springer 1991.
- /WYN72/ Wynn, H. P.: Results in the Theory and construction of D-optimum experimental designs. J. Roy. Statis. Soc. 1972
- /YAT37/ Yates, F.: The design and analysis of factorial experiments. Technical Communication 35. England: Imperial Bureau of Soil Science 1937.
- /YAT39/ Yates, F.: The analysis of Latin Squares when two or more rows are missing. In: Journal Royal Statistical Society 6 (1939).
- /YOU59/ Youden, W. J.: Discussion of the papers of Messrs. Satterthwaite and Budne. In: Technometrics 1 (1959) Heft 2. S. 157 - 159.
- /ZAC84/ Zacek, Hubert; Kralove, Hradec: Auswertung partieller Faktorenversuche durch Analyse der Mittelwerte. In: Qualität und Zuverlässigkeit 29 (1984) Heft 5. S. 144 - 147.
- /ZEL97/ Zeller Rudolf: Veranstaltungsunterlagen Statistische Versuchsplanung. Teil I: Methodik nach Shainin. Donzendorf: 1997.
- /ZIN89/ Zink, K. J.: Qualität als Herausforderung. Aus: Zink, K. J. (Hrsg): Qualität als Managementaufgabe. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1989.
- /ZIS00/ Zischka, Stefan: Zielgerichtete Qualitätsplanung in der Produktentwicklung. Projektspezifisches Quality-Deployment. Aachen: Shaker Verlag 2000.
- /ZWE89/ Zwecker, Matthias: Bewertung und Zusammenfassung von Zielgrößen bei der Tablettenentwicklung mit der modifizierten Simplex-Methode am Beispiel von Multivitamin-Supplement-Präparaten. Dissertation Universität Marburg. Marburg: Görlich & Weiershäuser 1989.

Gegenüberstellung der Norminhalte DIN 55350 und ISO 3534

DIN 55350 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik Teil 32: Versuchsplanung - Entwurf - Dezember 1988	ISO 3534 Statistical Terminology Part 3. Glossary of Terms relating to the Design of Experiments 1985
1.1 Versuchsplanung 1.1.1 Statistische Versuchsplanung 1.2 Ziel- und Einflußgrößen, Faktor, Stufe 1.2.1 Zielgröße 1.2.2 Einflußgröße 1.2.3 Faktor 1.2.4 (Faktor-) Stufe 1.2.5 Faktor-Stufen-Kombination 1.2.6 Störgrößen 1.3 Versuch, Durchführung, Block 1.3.1 Einzelversuch 1.3.2 Versuch 1.3.3 Versuchsplan 1.3.4 Durchführung, Realisierung 1.3.5 Vervielfachung 1.3.6 Randomisierung 1.3.7 Block 1.3.8 Blockfaktor 1.4 Versuchsbedingungen 1.4.1 Versuchsraum 1.4.2 Versuchseinheit 1.4.3 Versuchsstreuung 1.5 Wirkung, Effekte 1.5.1 Wirkung 1.5.2 Haupteffekte 1.5.3 Wechselwirkung 1.5.4 Kontrast 1.5.5 Orthogonale Kontraste 1.5.6 Vermengung, Vermengen, Confounding 1.6 Modell, Reststreuung 1.6.1 Modell 1.6.2 Restabweichung 1.6.3 Antwortfläche	1. General terms 1.1 design of experiments; experiment desing 1.2 factor 1.3 level; version (of a factor) 1.4 treatment 1.5 experiment space 1.6 experimental unit 1.7 experimental error 1.8 block 1.9 block factors 1.10 replication 1.11 duplication 1.12 randomization 1.13 main effect; average effect 1.14 interaction 1.15 confounding 1.16 contrast 1.17 orthogonal contrasts 1.18 predictor variable 1.19 response varibale 1.20 assumed model 1.21 residual error 1.22 response surface 1.23 evolutionary operation (EVOP)

Tab. A.1: Gegenüberstellung Inhalt DIN 55350 Teil 32 (Entwurf) und ISO 3534/3

DIN 55350 T32-E: Verwendete deutsche und englische Begriffe		Bezug zur ISO 3534/3:	
1.1	Versuchsplanung	- <i>design of experiments</i>	1.1
1.1.1	Statistische Versuchsplanung	- <i>parameter design</i>	--
1.2	Ziel- und Einflußgrößen, Faktor, Stufe		
1.2.1	Zielgröße	- <i>response variable</i>	1.19
1.2.2	Einflußgröße	- <i>assignable cause</i>	--
1.2.3	Faktor	- <i>factor</i>	1.2
1.2.4	(Faktor-) Stufe	- <i>level, version</i>	1.3
1.2.5	Faktor-Stufen-Kombination	- <i>factor level combination</i>	--
1.2.6	Störgrößen	- <i>extraneous variables</i>	--
1.3	Versuch, Durchführung, Block		
1.3.1	Einzelversuch	- <i>treatment</i>	1.4
1.3.2	Versuch	- <i>experimental program</i>	--
1.3.3	Versuchsplan	- <i>experimental design</i>	--
1.3.4	Durchführung, Realisierung	- <i>replication, repetition</i>	1.10
1.3.5	Vervielfachung	- <i>duplication</i>	1.11
1.3.6	Randomisierung	- <i>randomization</i>	1.12
1.3.7	Block	- <i>block</i>	1.8
1.3.8	Blockfaktoren	- <i>block factors</i>	1.9
1.4	Versuchsbedingungen		
1.4.1	Versuchsbedigungen	- <i>experiment space</i>	1.5
1.4.2	Versuchseinheit	- (Anm.: fehlende Angabe)	1.6
1.4.3	Versuchsstreuung	- <i>experimental error</i>	1.7
1.5	Wirkung, Effekte		
1.5.1	Wirkung	(Anm.: fehlende Angabe)	--
1.5.2	Haupteffekt	- <i>main effect, average effect</i> (Anm.: Numerierungsfehler)	1.13
1.5.2	Wechselwirkung	- <i>interaction (effect)</i>	1.14
1.5.3	Kontrast	- <i>contrast</i>	1.16
1.5.4	Orthogonale Kontraste	- <i>orthogonal contrast</i>	1.17
1.5.5	Vermengung, Vermengen, Confounding	- <i>confounding</i>	1.15
1.6	Modell, Reststreuung		
1.6.1	Modell	- <i>assumed model</i> - <i>empirical model</i>	1.20
1.6.2	Restabweichung	- <i>residual error</i>	1.21
1.6.3	Antwortfläche	- <i>response surface</i>	1.22

Tab. A.2: Gegenüberstellung der Begriffe von DIN 55350 Teil 32 (Entwurf) und ISO 3534/3

Statements

Statements zur Anwendung der Versuchsplanung im Forschungsprojekt AiF 13106 „Einfluß der chemischen Zusammensetzung von Anmachwässern auf die Herstellung und Eigenschaften von Kalksandsteinen.“

„Zu Beginn der Versuchsplanung ergab sich ein zusätzlicher Zeitaufwand, der für die Verständigung zwischen zwei unterschiedlichen Fachbereichen notwendig war. Diese Zeit, ist aber auch notwendig, um eine sinnvolle Kommunikation zu ermöglichen und vermeidet spätere Zeiteinbußen, die durch Missverständnisse oder Unkenntnis der Sachlage (sei es auf Seite Versuchsplanung oder der Forschung) auftreten könnten.“

Die Anzahl der Versuche konnte durch die statistische Versuchsplanung drastisch reduziert werden und die Ergebnisse der Voraussagen des ersten Versuchsplans wurden bestätigt.

Der Ansatz der statistischen Versuchsplanung in diesem Forschungsprojekt hat zu einer deutlichen Reduzierung der Versuchsanzahl und zu einer klaren Zeitersparnis bei guten Forschungsergebnissen geführt und ist als uneingeschränkt positiv zu beurteilen.“

Dipl.-Geol. Sonja Hogewoning
Forschungsgemeinschaft Kalk + Mörtel e.V.

„Die im Rahmen diese Vorhabens angewandten Methoden der statistischen Versuchsplanung haben sich als nützliche Werkzeuge zur Reduzierung dieses sehr umfangreichen Untersuchungsprogrammes auf einen praktisch durchführbares Maß herausgestellt. Sowohl zum Löschverhalten der Kalke als auch zur Steindruckfestigkeit sind aussagekräftige Prognosen möglich.“

Dipl.-Ing. Wolfgang Eden
Kalksandstein-Dienstleistungs GmbH, Leiter des Prüf- und Forschungsinstituts

Durchgeführte Versuchspläne im Forschungsprojekt

Untersuchungsabschnitt A

Zur Überprüfung der Zweckmäßigkeit der statistischen Versuchsplanung in Bezug auf die dem Vorhaben zugrundeliegende Fragestellung und die Vorhersagegenauigkeit der aus der Versuchsplanung resultierenden Regressionsgleichungen wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan entwickelt. Die Messungen wurden mit dem Kalk D durchgeführt. Untersucht wurden die Parameter Starttemperatur (Mischungstemperatur), Kaliumchlorid und Kaliumsulfat. Der Versuchsumfang betrug 17 Versuche.

Nachdem sich die statistische Versuchsplanung als zweckmäßig und für die Fragestellung des Vorhabens als hinreichend genau erwiesen hatte, wurde eine Versuchsplanung entwickelt, die acht Fremdionen, zwei Kalksorten und die variable Starttemperaturen umfaßte.

Die Faktoren Huminstoffe (CSB), Ammonium, Phosphat, Sulfat, Kalium, Natrium und Chlorid wurden auf zwei Teilpläne ($2 \times 2^{6-1}$) aufgeteilt, deren Messungen beide mit zwei Kalken und einer Starttemperaturspanne von 20 bis 50°C durchgeführt wurden. Insgesamt waren dazu 70 Versuche notwendig.

Ziel dieser Versuchsstrategie war die Ermittlung von möglichen Wechselwirkungen zwischen den Fremdionen.

Untersuchungsabschnitt B

Wie im Forschungsvorhaben /AIF03/ beschrieben, sind in realen Kondensaten stets gleichzeitig verschiedene Fremdionen in unterschiedlicher Konzentration vorhanden. Um den Einfluß dieser „Fremdionen-Pakete“ mit ihren gegenseitigen Wechselwirkungen auf den Kalksandstein-Herstellungsprozeß zu ermitteln, wurden im Rahmen der statistischen Versuchsplanung und in Anschlußversuchen mehrere Kombinationen der einzelnen Salze hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Steineigenschaftswerte untersucht.

Dabei wurden im ersten Schritt zunächst 19 systematisch variierte Versuchsansätze durchgeführt (teilkoforieller 2^{7-3} -Plan). An den Prüfkörpern des Formates NF wurde die Steindruckfestigkeit, die Steinrohichte und der (eventuelle) Gehalt an nicht umgesetztem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mittels Differential-Thermoanalyse festgestellt.

Mit einer zweiten Testreihe wurde die Aussagefähigkeit dieser statistischen Methode zusätzlich überprüft. Unter Ansatz praxisüblicher Herstellparameter (Mittelsand, Mittelbrannt, 7 M.-% CaO in der Rohmischung) wurden an elf Serien gleichzeitig der Einfluß und die Wechselwirkung von KCl und K_2SO_4 mit einem zentral zusammengesetzten Plan untersucht.

Versuchspläne

Teilplan 1

Exp Ilo	Exp Iname	Run Order	Incl/ Excl	KS	MT	CSB	P04	S04	IH4	tu80	Tu80	I _{max}	d10	d50	d90
1	N1	1	Incl	A	20	-1	0,2	0,3	4,5	2,4	63	73,7	1,62	4,81	12,3
2	N2	2	Incl	B	20	-1	0,2	0,3	400	10,4	62,2	73,3	2,29	9,96	20,81
3	N3	3	Incl	A	50	-1	0,2	0,3	400	1,5	91,9	102,4	1,91	6,29	14,39
4	N4	4	Incl	B	50	-1	0,2	0,3	4,5	4,9	91	101,4	2,32	10,09	21,07
5	N5	5	Incl	A	20	+1	0,2	0,3	400	3,9	63,5	74,3	1,87	6,67	17,65
6	N6	6	Incl	B	20	+1	0,2	0,3	4,5	23,1	62,1	73,1	2,37	10,37	26,2
7	N7	7	Incl	A	50	+1	0,2	0,3	4,5	1,8	91,7	102,2	1,9	6,9	16,9
8	N8	8	Incl	B	50	+1	0,2	0,3	400	7,5	90,5	100,8	2,42	10,15	24,72
9	N9	9	Incl	A	20	-1	20	0,3	400	2,3	64	74,8	1,6	4,66	12,16
10	N10	10	Incl	B	20	-1	20	0,3	4,5	11	62,7	73,9	2,3	10	21,05
11	N11	11	Incl	A	50	-1	20	0,3	4,5	1,4	92	102,5	1,88	6,22	14,27
12	N12	12	Incl	B	50	-1	20	0,3	400	4,9	91,7	102,3	2,25	9,93	20,94
13	N13	13	Incl	A	20	+0,98	20	0,3	4,5	4	63	73,6	1,81	6,51	17,47
14	N14	14	Incl	B	20	+0,98	20	0,3	400	23,4	62	73,1	2,52	11,63	27,84
15	N15	15	Incl	A	50	+0,98	20	0,3	400	2	91,5	101,9	1,94	7,47	18,23
16	N16	16	Incl	B	50	+0,98	20	0,3	4,5	6,4	90,9	101,3	2,44	10,72	24,01
17	N17	17	Incl	A	20	-1	0,2	200	400	3,8	63,1	73,7	1,9	7,42	19,49
18	N18	18	Incl	B	20	-1	0,2	200	4,5	21,6	61,9	73	3,25	16,32	31,8
19	N19	19	Incl	A	50	-1	0,2	200	4,5	1,7	92,4	103	2,01	7,53	17,96
20	N20	20	Incl	B	50	-1	0,2	200	400	5,6	91	101,4	2,7	12,95	25,83
21	N21	21	Incl	A	20	+0,98	0,2	200	4,5	6,2	62,7	73,3	2,01	9,11	27,43
22	N22	22	Incl	B	20	+0,98	0,2	200	400	28,8	62,8	73,9	2,54	11,74	27,7
23	N23	23	Incl	A	50	+0,98	0,2	200	400	2,1	92,9	103,6	2,08	8,39	20,86
24	N24	24	Incl	B	50	+0,98	0,2	200	4,5	7,4	90,2	100,4	2,57	11,42	26
25	N25	25	Incl	A	20	-1	20	200	4,5	3,2	62,9	73,5	1,7	5,85	15,87
26	N26	26	Incl	B	20	-1	20	200	400	22	62,3	73,4	3,05	15,15	30,74
27	N27	27	Incl	A	50	-1	20	200	400	1,8	91,5	101,9	1,95	7,24	17,96
28	N28	28	Incl	B	50	-1	20	200	4,5	6,1	90,6	100,9	2,65	12,68	25,8
29	N29	29	Incl	A	20	+1	20	200	400						
30	N30	30	Incl	B	20	+1	20	200	4,5						
31	N31	31	Incl	A	50	+1	20	200	4,5						
32	N32	32	Incl	B	50	+1	20	200	400						
33	N33	33	Incl	A	35	0	10,1	100,15	202,25						
34	N34	34	Incl	A	35	0	10,1	100,15	202,25						
35	N35	35	Incl	A	35	0	10,1	100,15	202,25						

Teilplan 2

Exp Ho	Exp Name	Run Order	Incl/ Excl	KS	MT	H03	CL	HA	K	tu80	Tu80	Tmax	d10	d50	d90
1	N1	1	Incl	A	20	0,5	0,5	3,2	2,7	2,7	63,4	74,2	1,6	4,92	12,5
2	N2	2	Incl	B	20	0,5	0,5	3,2	600	17,7	61,8	72,7	2,21	9,37	18,73
3	N3	3	Incl	A	50	0,5	0,5	3,2	600	2,1	91,8	102,3	1,91	5,8	12,61
4	N4	4	Incl	B	50	0,5	0,5	3,2	2,7	5,1	90,2	100,4	2,31	9,89	20,6
5	N5	5	Incl	A	20	20	0,5	3,2	600	4,1	63,1	73,8	1,54	4,4	10,95
6	N6	6	Incl	B	20	20	0,5	3,2	2,7	10,8	62,3	73,4	2,33	10,25	21,09
7	N7	7	Incl	A	50	20	0,5	3,2	2,7	1,5	92,1	102,6	1,84	6,04	13,86
8	N8	8	Incl	B	50	20	0,5	3,2	600	6,7	92	102,6	2,28	9,01	17,73
9	N9	9	Incl	A	20	0,5	650	3,2	600	3,8	63,5	74,2	1,57	4,56	11,19
10	N10	10	Incl	B	20	0,5	650	3,2	2,7	8,8	62,7	73,9	2,56	11,36	23,29
11	N11	11	Incl	A	50	0,5	650	3,2	2,7	1,1	92,3	102,9	1,86	6,31	14,93
12	N12	12	Incl	B	50	0,5	650	3,2	600	6,5	90,5	100,7	2,32	9,3	17,96
13	N13	13	Incl	A	20	20	650	3,2	2,7	2,3	64	74,9	1,67	5,6	14,81
14	N14	14	Incl	B	20	20	650	3,2	600	15,7	62	72,9	2,26	9,9	20,05
15	N15	15	Incl	A	50	20	650	3,2	600	2,1	92,4	103	1,89	5,71	12,57
16	N16	16	Incl	B	50	20	650	3,2	2,7	3,9	90,9	101,3	2,31	10,31	21,83
17	N17	17	Incl	A	20	0,5	0,5	850	600	5,7	63,1	73,7	1,72	5,51	12,89
18	N18	18	Incl	B	20	0,5	0,5	850	2,7	16,2	61,7	72,7	2,65	12,07	24,43
19	N19	19	Incl	A	50	0,5	0,5	850	2,7	1,9	90,7	100,9	1,74	5,83	14,09
20	N20	20	Incl	B	50	0,5	0,5	850	600	7,4	93	103,9	2,23	8,81	17,65
21	N21	21	Incl	A	20	20	0,5	850	2,7	3,4	62,6	73	1,64	5,09	12,85
22	N22	22	Incl	B	20	20	0,5	850	600	19,6	62,1	73,1	2,25	9,61	19,23
23	N23	23	Incl	A	50	20	0,5	850	600	2,4	91,7	102,2	1,89	5,89	12,79
24	N24	24	Incl	B	50	20	0,5	850	2,7	5,5	91,1	101,5	2,46	10,06	19,98
25	N25	25	Incl	A	20	0,5	650	850	2,7	2,8	63,5	74,2	1,69	5,37	13,91
26	N26	26	Incl	B	20	0,5	650	850	600	19,1	62,1	73,1	2,3	9,87	19,8
27	N27	27	Incl	A	50	0,5	650	850	600	2,3	91,9	102,4	1,97	6,28	14,05
28	N28	28	Incl	B	50	0,5	650	850	2,7	4,8	91	101,4	2,32	9,84	19,91
29	N29	29	Incl	A	20	20	650	850	600	4,4	62,6	73,2	1,59	4,58	10,84
30	N30	30	Incl	B	20	20	650	850	2,7	12,1	62,6	73,8	2,56	11,18	22,6
31	N31	31	Incl	A	50	20	650	850	2,7	1,5	91,5	101,9	1,85	6,04	14,1
32	N32	32	Incl	B	50	20	650	850	600	6,9	90,5	100,8	2,31	8,92	17,51
33	N33	33	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35	2,5	76,8	87,2	1,76	5,3	12,3
34	N34	34	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35	2,9	77,3	87,9	1,71	5,4	13,02
35	N35	35	Incl	A	35	10,25	325,25	426,6	301,35	2,4	76,7	87,1	1,8	5,66	13,2

Vermengungsstruktur

Term	Generator
KS	a
MT	b
CSB	c
PO ₄	d
SO ₄	e
NH ₄	abcde
KS*MT	
KS*CSB	
KS*PO ₄	
KS*SO ₄	
KS*NH ₄	
MT*CSB	
MT*PO ₄	
MT*SO ₄	
MT*NH ₄	
CSB*PO ₄	
CSB*SO ₄	
CSB*NH ₄	
PO ₄ *SO ₄	
PO ₄ *NH ₄	
SO ₄ *NH ₄	

Vermengungsstruktur Teilplan 1

Term	Generator
KS	a
MT	b
NO ₃	c
CL	d
NA	e
K	abcde
KS*MT	
KS*NO ₃	
KS*CL	
KS*NA	
KS*K	
MT*NO ₃	
MT*CL	
MT*NA	
MT*K	
NO ₃ *CL	
NO ₃ *NA	
NO ₃ *K	
CL*NA	
CL*K	
NA*K	

Vermengungsstruktur Teilplan 2

Beschreibende Statistik

Teilplan 1

	tu80	Tu80	Tmax	d10	d50	d90
Min	1,4	61,9	73	1,6	4,66	12,16
Max	28,8	92,9	103,6	3,25	16,32	31,8
Mean	7,9	77,0714	87,7357	2,20893	9,22071	21,3375
Q(25%)	2,2	62,75	73,55	1,9	6,785	17,56
Q(75%)	8,95	91,5	101,9	2,48	11,07	25,915
Median	4,9	77,1	87,6	2,165	9,52	20,9
Std. Dev.	8,02491	14,6214	14,3979	0,412341	2,96588	5,44596
Min/Max	0,0486111	0,666308	0,704633	0,492308	0,285539	0,38239
N	28	28	28	28	28	28

Teilplan 2

	tu80	Tu80	Tmax	d10	d50	d90
Min	1,1	61,7	72,7	1,54	4,4	10,84
Max	19,6	93	103,9	2,65	12,07	24,43
Mean	6,24857	77,0714	87,7086	2,02571	7,544	16,2814
Q(25%)	2,4	62,65	73,75	1,73	5,555	12,87
Q(75%)	7,15	91,3	101,7	2,31	9,855	19,855
Median	4,1	76,8	87,2	1,91	6,28	14,81
Std. Dev.	5,4065	13,9788	13,7864	0,330928	2,38665	3,9534
Min/Max	0,0561224	0,663441	0,699711	0,581132	0,36454	0,443717
N	35	35	35	35	35	35

Modellterme

Teilplan 1

Terme
Konstante
KS
MT
CSB
PO ₄
SO ₄
NH ₄
KS*MT
KS*CSB
KS*SO ₄
MT*CSB
MT*SO ₄
CSB*NH ₄
PO ₄ *NH ₄
SO ₄ *NH ₄

tu80

Terme
Konstante
KS
MT
CSB
PO ₄
SO ₄
NH ₄
CSB*PO ₄
PO ₄ *SO ₄

Tu80, Tmax

Terme
Konstante
KS
MT
CSB
PO ₄
SO ₄
NH ₄
KS*MT
KS*CSB
KS*SO ₄
MT*SO ₄
CSB*SO ₄

d₁₀, d₅₀, d₉₀

Teilplan 2

Terme
Konstante
KS
MT
NO ₃
CL
NA
K
KS*MT
KS*CL
KS*NA
KS*K
MT*CL
MT*NA
MT*K

tu80

Terme
Konstante
KS
MT
NO ₃
CL
NA
K
KS*CL
KS*NA
MT*CL
MT*K
NO ₃ *NA
CL*K

Tu80, Tmax

Terme
Konstante
KS
MT
NO ₃
CL
NA
K
KS*MT
KS*K
MT*NO ₃
MT*NA
MT*K
NO ₃ *NA
CL*NA

d₁₀, d₅₀, d₉₀