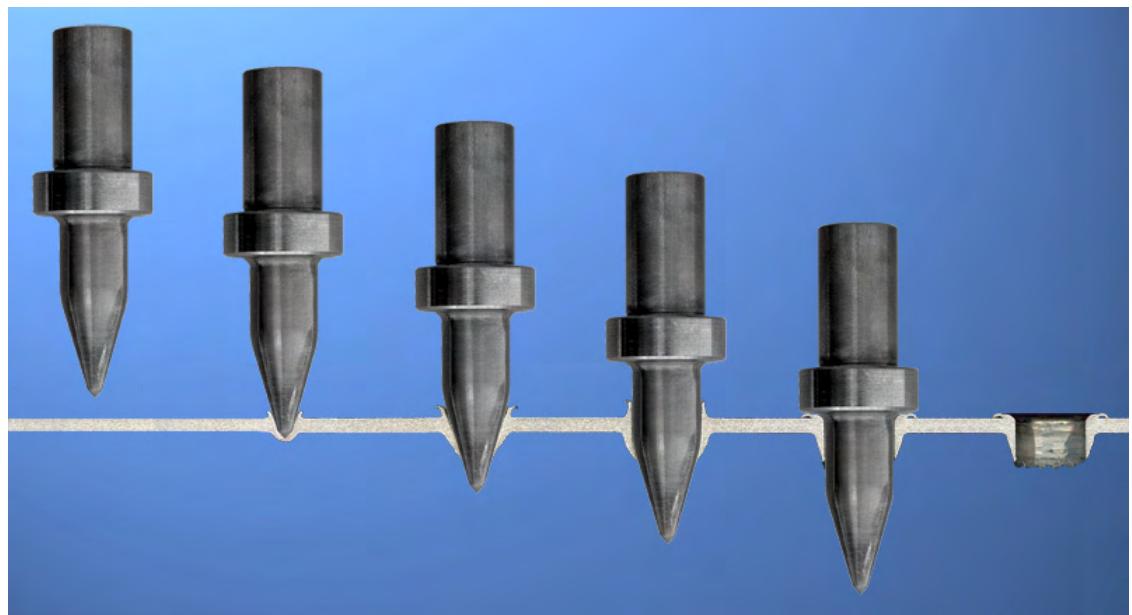


Evaluation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels DoE

Christian Gies



Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Franz Tikal

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Bernd Klein

Prof. Dr. Ekkehart Frieling

Tag der mündlichen Prüfung

20. Dezember 2005

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. 2005

ISBN-10: 3-89958-189-X

ISBN-13: 978-3-89958-189-8

URN: urn:nbn:de:0002-1898

© 2006, 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 Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen des Instituts für Produktionstechnik und Logistik (IPL) der Universität Kassel.

Dem Leiter des Fachgebiets Produktionstechnik und Werkzeugmaschinen, Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Tikal, danke ich herzlich für die Unterstützung und die hilfreichen Anregungen, die diese Arbeit ermöglichten.

Dem Institutsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Hesselbach, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Bernd Klein und Prof. Dr. Ekkehart Frieling danke ich für die Bereitschaft zur Teilnahme an der Prüfungskommission.

Mein Dank gilt weiter dem Kollegium des Instituts, das durch die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Danken möchte ich auch allen wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften sowie den Diplomanden für die wertvollen Anregungen und die tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Neustadt, im Januar 2006

Christian Gies

Verzeichnisse

Formelzeichen und Symbole

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|--------------------------------|------------------|--|
| α | $^\circ$ | Spitzenwinkel |
| β | $^\circ$ | Konuswinkel |
| ϑ | $^\circ\text{C}$ | Temperatur |
| δ | % | Buchsenqualität |
| σ^2 | – | Streuungsmaß |
| $A_{\text{Formerquerschnitt}}$ | mm^2 | Fläche des Fließlochformerquerschnitts |
| b | – | Regressionskoeffizient |
| D_B | mm | Durchmesser Werkzeugbund |
| D_E | mm | Durchmesser der Einspannung |
| D_{\max} | mm | maximaler Werkzeugdurchmesser |
| D_{\min} | mm | minimaler Werkzeugdurchmesser |
| D_N | mm | Nenndurchmesser des Formers |
| E | J | Energieeintrag |
| E_{Rotation} | J | Rotationsenergie |
| $E_{\text{Translation}}$ | J | Translationsenergie |
| f | – | Freiheitsgrad |
| k | – | Anzahl der Faktorstufen |
| L_A | mm | Länge Anformbereich |
| L_B | mm | Länge Werkzeugbund |
| L_E | mm | Länge der Einspannung |
| L_K | mm | Länge Konus |
| L_{SP} | mm | Länge der Werkzeugspitze |
| L_Z | mm | Länge Zylinder |

| Symbol | Einheit | Bedeutung |
|--------------------------------|------------------------|---|
| $L_{Z\text{-ges}}$ | mm | Gesamtlänge Former |
| L_{zk} | mm | Länge Zylinder und Konus |
| m | – | Anzahl der Faktorstufenkombinationen |
| M_{Former} | mm^2 | Mantelfläche des Fließlochformers |
| N | – | Versuchsumfang (Gesamtzahl der Einzelversuche) |
| n | – | Stichprobenumfang |
| R_a | μm | Mittenrauhwert |
| $R_{Ko/Zy}$ | mm | Radius Konus / Zylinder |
| $R_{Sp/Ko}$ | mm | Radius Spitze / Konus |
| R_z | μm | Rauhtiefe |
| $R_{Zy/Bu}$ | mm | Radius Zylinder / Bund |
| s | – | Standardabweichung der Stichprobe |
| s_d | – | Standardabweichung für die Differenz zweier Mittelwerte |
| s_i | – | Standardabweichung |
| $s_{\bar{y}}$ | – | Schätzwert für die Standardabweichung |
| t | – | t-Wert der Studentverteilung |
| $U_{\text{Formerquerschnitt}}$ | mm | Umfang des Fließlochformerquerschnitts |
| V_{Former} | mm^3 | Volumen des Fließlochformers |
| v_1 | mm/min | 1. Vorschubgeschwindigkeit |
| v_2 | mm/min | 2. Vorschubgeschwindigkeit |
| \bar{y} | – | arithmetischer Mittelwert |
| γ | ° | Drallwinkel |
| φ | ° | Winkel |
| ω_i | ° | Formstollenverteilungswinkel |

Abbildungen

| | |
|--|-----|
| Abbildung 2-1: Ablauf des Fließlochformprozesses..... | 3 |
| Abbildung 2-2: Anwendungsgebiete des Fließlochformens /8/ | 4 |
| Abbildung 2-3: Vergleich unterschiedlicher Fließlochformertypen | 5 |
| Abbildung 2-4: Fließlochformerkontur einer Standardgeometrie..... | 7 |
| Abbildung 2-5: Formstollengeometrie eines Fließlochformers..... | 8 |
| Abbildung 2-6: Phasen des Fließlochformprozesses..... | 9 |
| Abbildung 2-7: systemtheoretische Darstellung eines Prozesses /2/ | 13 |
| Abbildung 2-8: Erläuterung von Haupt- und Wechselwirkungseffekten..... | 15 |
| Abbildung 2-9: Signifikanztest – statistische Beurteilung von Effekten | 18 |
| Abbildung 2-10: Vollständiger 2^3 -Faktorenplan /20/ | 20 |
| Abbildung 2-11: Erzeugung eines 2^{4-1} -Faktorenplans..... | 23 |
| Abbildung 3-1: Röhrenmodell nach Kretschmer /29/ | 26 |
| Abbildung 3-2: Qualitätsgruppen von Fließlochbuchsen (nach /21/)..... | 28 |
| Abbildung 4-1: Konturparameter Standardgeometrie..... | 35 |
| Abbildung 4-2: Sondergeometrie..... | 39 |
| Abbildung 4-3: Formstollengeometrie eines Fließlochformers..... | 42 |
| Abbildung 4-4: asymmetrische Formstollengeometrie | 43 |
| Abbildung 4-5: asymmetrische Ungleicheilung der Formstollen | 44 |
| Abbildung 4-6: Fließlochformer mit wendelförmig umlaufende Formstollen | 44 |
| Abbildung 4-7: Fließlochformerzerlegung in infinitesimale Dreiecke | 46 |
| Abbildung 4-8: Berechnungsapplikation für den Fließlochformervergleich | 47 |
| Abbildung 4-9: Zusammenfassung der Einflussgrößen | 50 |
| Abbildung 4-10: Geometriemerkmale einer Fließlochbuchse..... | 53 |
| Abbildung 4-11: Präferenzmatrix zur Faktorpriorisierung..... | 55 |
| Abbildung 4-12: Gefügestruktur der Hartmetallsorte | 58 |
| Abbildung 4-13: Temperaturerfassung beim Fließlochformen | 63 |
| Abbildung 6-1: Ausschnitt der Applikation zur Auswertung der Regressionspolynome | 102 |
| Abbildung 7-1: Einfluss des Spitzewinkels auf die Risslänge | 111 |
| Abbildung 7-2: Einfluss von Drallwinkel und Formstollenzahl auf die Buchsengeometrie | 119 |
| Abbildung 7-3: Abhängigkeit der Kontaktfläche vom Formstollenverhältnis | 126 |
| Abbildung 7-4: Einfluss des Zeilenabstands auf die Oberflächenqualität /109/ | 127 |
| Abbildung 7-5: Vergleich der Aufschweißungen nach 17 Buchsen | 129 |
| Abbildung 7-6: Vergleich von GSPN und SL500 nach 35 gefertigten Buchsen..... | 131 |
| Abbildung 10-1: Applikation zur Berechnung der multiplen Regressionsmodelle..... | 148 |

Diagramme

| | |
|---|-----|
| Diagramm 4-1: Standardgeometrie mit Volumenverdrängung..... | 38 |
| Diagramm 4-2: Standardgeometrie – Volumenverdrängungsgeschw. und –beschl. | 38 |
| Diagramm 4-3: Sondergeometrie mit Volumenverdrängung..... | 41 |
| Diagramm 4-4: Sondergeometrie - Volumenverdrängungsgeschw. und –beschl. | 41 |
| Diagramm 5-1: Einzelmesswerte und Haupteffekte der Axialkraft | 65 |
| Diagramm 5-2: Ausschnitt des Effektdiagramms der Axialkraft | 66 |
| Diagramm 5-3: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Axialkraft..... | 67 |
| Diagramm 5-4: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Zielgrößen..... | 69 |
| Diagramm 6-1: Haupteffekte - Einfluss auf die Axialkraft | 73 |
| Diagramm 6-2: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Axialkraft..... | 74 |
| Diagramm 6-3: Haupteffekte - Einfluss auf das Drehmoment..... | 75 |
| Diagramm 6-4: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf das Drehmoment..... | 76 |
| Diagramm 6-5: Haupteffekte - Einfluss auf den Energieeintrag..... | 77 |
| Diagramm 6-6: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf den Energieeintrag | 78 |
| Diagramm 6-7: Haupteffekte - Einfluss auf die Temperatur..... | 79 |
| Diagramm 6-8: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Temperatur..... | 80 |
| Diagramm 6-9: Haupteffekte - Einfluss auf die Risslänge am Buchsenauslauf..... | 82 |
| Diagramm 6-10: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Risslänge..... | 82 |
| Diagramm 6-11: Haupteffekte - Einfluss auf den nach unten Verdrängten Volumenanteil | 84 |
| Diagramm 6-12: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Risslänge am Buchsenauslauf..... | 85 |
| Diagramm 6-13: Haupteffekte - Einfluss auf die Buchsenlänge | 86 |
| Diagramm 6-14: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Buchsenlänge | 87 |
| Diagramm 6-15: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Zielgrößen..... | 89 |
| Diagramm 6-16: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Zielgrößen..... | 90 |
| Diagramm 6-17: Einfluss der Blechdicke auf die Zielgrößen..... | 91 |
| Diagramm 6-18: Einfluss der Werkstoffcharge auf die Zielgrößen..... | 92 |
| Diagramm 6-19: Einfluss des Werkzeugdurchmessers auf die Zielgrößen | 93 |
| Diagramm 6-20: Einfluss der Konturvariante auf die Zielgrößen..... | 94 |
| Diagramm 6-21: Einfluss des Spitzewinkels auf die Zielgrößen..... | 95 |
| Diagramm 6-22: Einfluss des Konuswinkels auf die Zielgrößen..... | 96 |
| Diagramm 6-23: Einfluss des Drallwinkels auf die Zielgrößen..... | 97 |
| Diagramm 6-24: Einfluss der Formstollenzahl auf die Zielgrößen | 98 |
| Diagramm 6-25: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Zielgrößen | 99 |
| Diagramm 7-1: Kraft- und Momentverlauf der Sonder- und Standardgeometrie..... | 104 |
| Diagramm 7-2: Temperatur und Energieeintrag der Standard- und Sondergeometrie | 105 |
| Diagramm 7-3: Buchsen- und Risslänge der Standard- und Sondergeometrie..... | 106 |
| Diagramm 7-4: Volumenverdrängung der Standard- und Sondergeometrie..... | 107 |
| Diagramm 7-5: Spitzewinkelvariation bei der Standard- und Sondergeometrie | 108 |
| Diagramm 7-6: Maximale Axialkraft in Abhängigkeit des Spitzewinkels | 109 |

| | |
|---|-----|
| Diagramm 7-7: Buchsenlänge in Abhängigkeit des Spitzenwinkels..... | 110 |
| Diagramm 7-8: Risslänge in Abhängigkeit des Spitzenwinkels..... | 110 |
| Diagramm 7-9: Arbeitsbereichlänge – Kraft- und Momentverlauf der Sondergeometrie..... | 113 |
| Diagramm 7-10: Arbeitsbereichlänge – Kraft- und Momentverlauf der Standardgeometrie | 113 |
| Diagramm 7-11: Einfluss des Drallwinkels auf die Axialkraft..... | 116 |
| Diagramm 7-12: Einfluss des Drallwinkels auf das Drehmoment..... | 116 |
| Diagramm 7-13: Volumenverdrängung in Abhängigkeit des Drallwinkels..... | 117 |
| Diagramm 7-14: Buchsenlänge in Abhängigkeit des Drallwinkels..... | 118 |
| Diagramm 7-15: Risslänge in Abhängigkeit des Drallwinkels | 119 |
| Diagramm 7-16: Werkzeugmantelfläche in Abhängigkeit der Formstollengeometrie | 120 |
| Diagramm 7-17: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Axialkraft | 122 |
| Diagramm 7-18: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf das Moment..... | 122 |
| Diagramm 7-19: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Temperatur | 123 |
| Diagramm 7-20: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Buchsenlänge..... | 124 |
| Diagramm 7-21: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Risslänge | 124 |
| Diagramm 7-22: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf das Werkstoffvolumen | 125 |

Tabellen

| | |
|--|-----|
| Tabelle 2-1: Bewertung der Vermengungen teilstatorieller Versuchspläne /27/ | 25 |
| Tabelle 2-2: Auflösung fraktioneller faktorielle Versuchspläne /27/ | 25 |
| Tabelle 3-1: aktuelle Werkzeuggeometrien führender Fließlochformerhersteller..... | 30 |
| Tabelle 4-1: Faktorstufen des 2^{11-4} -Faktorenplans | 57 |
| Tabelle 4-2: physikalische und mechanische Eigenschaften des Hartmetalls | 58 |
| Tabelle 4-3: Chemische Zusammensetzung von S355 J2G3 (St52)nach DIN 17102..... | 59 |
| Tabelle 4-4: Physikalische Eigenschaften von S355 J2G3 (St52)/110/ | 59 |
| Tabelle 4-5: Zuordnung der Faktoren..... | 60 |
| Tabelle 5-1: Auszug aus der Ergebnistabelle der Versuche | 65 |
| Tabelle 6-1: Zuordnung von prozentualem Effekt und Pfeilanzahl | 100 |
| Tabelle 6-2: Ergebnisdarstellung bezogen auf die Haupteinflussgrößen..... | 100 |
| Tabelle 7-1: Statistik der Rauheitsdaten ($L_c = 0.080$)..... | 128 |
| Tabelle 10-1: Studentsche t-Verteilung /11/ | 144 |
| Tabelle 10-2: Versuchsplan | 145 |
| Tabelle 10-3: Einzelergebnisse des 2^{11-4} Versuchsplans | 146 |
| Tabelle 10-4: Berechnete Haupt- und Wechselwirkungseffekte des 2^{11-4} Versuchsplans..... | 147 |
| Tabelle 10-5: Werkzeuggeometriedaten – Standard- und Sondergeometrie..... | 149 |
| Tabelle 10-6: Werkzeuggeometriedaten – Spitzenwinkel..... | 150 |
| Tabelle 10-7: Werkzeuggeometriedaten – Arbeitsbereichslänge..... | 151 |
| Tabelle 10-8: Werkzeuggeometriedaten – Drallwinkel und Formstollen..... | 152 |
| Tabelle 10-9: Werkzeuggeometriedaten – Formstollenzahl und Formstollenverhältnis..... | 153 |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------|
| Vorwort | I |
| Verzeichnisse | III |
| Formelzeichen und Symbole | III |
| Abbildungen..... | V |
| Diagramme | VI |
| Tabellen | VII |
| Inhaltsverzeichnis | VIII |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 Fließlochformen | 3 |
| 2.1.1 Der Fließlochformer | 5 |
| 2.1.2 Der Fließlochformprozess | 8 |
| 2.2 Statistische Versuchsplanung | 11 |
| 2.2.1 Grundlegende Begriffe der statistischen Versuchsplanung | 13 |
| 2.2.2 Statistische Grundlagen..... | 17 |
| 2.2.3 Versuchspläne erster Ordnung..... | 19 |
| 3 Stand der Technik | 26 |
| 3.1 Fließlochformen | 26 |
| 3.1.1 Kinematik des Fließlochformprozesses..... | 26 |
| 3.1.2 Die Buchsenqualität | 27 |
| 3.1.3 Formerwerkstoffe, Beschichtung und Oberflächenqualität..... | 29 |
| 3.1.4 Werkzeuggeometrien der Fließlochformerhersteller | 29 |
| 3.1.5 Zusammenfassung..... | 30 |
| 3.2 Statistische Versuchsplanung | 31 |
| 3.2.1 Einführung | 31 |
| 3.2.2 Weiterentwicklung und Ergänzung des Design of Experiments | 31 |
| 3.2.3 Anwendung | 32 |
| 4 Versuchsplanung und Versuchstechnik | 34 |

| | |
|--|-----|
| 4.1 Systemanalyse..... | 34 |
| 4.1.1 Einflussgrößen | 34 |
| 4.1.2 Zielgrößen..... | 51 |
| 4.2 Auswahl des Versuchsplans | 54 |
| 4.3 Versuchspараметer | 54 |
| 4.3.1 Bestimmung der Faktoren und Faktorstufen | 54 |
| 4.3.2 Werkstoff des Fließlochformers | 58 |
| 4.3.3 Versuchswerkstoff S355 J2G3 (St52)..... | 59 |
| 4.4 Versuchsplanerstellung | 60 |
| 4.5 Versuchstechnik..... | 61 |
| 4.5.1 Fertigung der Fließlochformer | 61 |
| 4.5.2 Maschinen und Vorrichtungen | 62 |
| 4.5.3 Messtechnik | 62 |
| 5 Versuchsauswertungsmethoden..... | 64 |
| 5.1 Methoden der Effektanalyse..... | 64 |
| 5.1.1 Zielgrößenorientierte Effektanalyse | 64 |
| 5.1.2 Faktororientierte Effektanalyse | 69 |
| 5.2 Regressionsanalyse von Faktorenplänen..... | 70 |
| 6 Auswertung der statistischen Versuchsplanung | 72 |
| 6.1 Effektanalyse..... | 72 |
| 6.1.1 Versuchsergebnisse der zielgrößenorientierten Effektanalyse..... | 72 |
| 6.1.2 Versuchsergebnisse der faktororientierten Effektanalyse..... | 88 |
| 6.1.3 Zusammenfassung der Effektanalyse | 99 |
| 6.2 Regressionsmodell..... | 101 |
| 7 Detailuntersuchungen | 103 |
| 7.1 Standard- und Sondergeometrie..... | 103 |
| 7.1.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 103 |
| 7.1.2 Versuchsergebnisse..... | 104 |
| 7.1.3 Schlussfolgerungen..... | 107 |
| 7.2 Variation des Spaltenwinkels | 108 |
| 7.2.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 108 |
| 7.2.2 Versuchsergebnisse..... | 109 |
| 7.2.3 Schlussfolgerungen..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| 7.3 Variation der Arbeitsbereichslänge | 111 |
| 7.3.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 112 |
| 7.3.2 Versuchsergebnisse..... | 112 |
| 7.3.3 Schlussfolgerungen | 114 |
| 7.4 Drallwinkel und Formstollenzahl..... | 115 |
| 7.4.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 115 |
| 7.4.2 Versuchsergebnisse..... | 115 |
| 7.4.3 Schlussfolgerungen | 119 |
| 7.5 Formstollenzahl und Formstollenverhältnis..... | 120 |
| 7.5.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 121 |
| 7.5.2 Versuchsergebnisse..... | 121 |
| 7.5.3 Schlussfolgerungen | 125 |
| 7.6 Oberflächenqualität..... | 127 |
| 7.6.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 128 |
| 7.6.2 Versuchsergebnisse..... | 128 |
| 7.6.3 Schlussfolgerungen | 129 |
| 7.7 Alternative Fließlochformerwerkstoffe..... | 130 |
| 7.7.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung..... | 130 |
| 7.7.2 Versuchsergebnisse..... | 131 |
| 7.7.3 Schlussfolgerungen | 131 |
| 8 Zusammenfassung..... | 132 |
| 9 Schrifttum | 135 |
| 10 Anhang | 144 |

1 Einleitung

Das Fließlochformen ist ein spanloses Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Buchsen in Blechen und Hohlprofilen, welche als Lager- oder Lötbuchsen dienen. In Kombination mit dem ebenfalls spanfreien Gewindefurchen lassen sich in diese Buchsen zudem hochbelastbare Gewinde einfurchen. Somit bietet das Verfahren ideale Voraussetzungen zur Herstellung von lösbarer Verbindungen in dünnwandigen Werkstücken. Um weitere Anwendungsbereiche darüber hinaus zu erschließen, sind innovative Geometriemodifikationen zu entwickeln. Eine gezielte, anwendungsfallspezifische Werkzeugentwicklung setzt jedoch die Kenntnis der wichtigsten Prozesseinflussgrößen und deren Wirkung voraus.

Ziel der Arbeit ist die systematische Parameteridentifikation der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen mittels statistischer Versuchs- und Methodenplanung, um so die Grundlage für eine anwendungsfallspezifische Werkzeugentwicklung zu schaffen. Die Arbeit zeigt auf, welchen Einfluss die Variation einzelner Werkzeuggeometriemeerkmale auf die Prozessgrößen Kraft, Moment, Temperatur und Energieeintrag sowie auf die Buchsenqualitätsmerkmale Buchsenlänge, Risslänge und auf das in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumen besitzen. Die experimentelle Erfassung dieser Einflüsse und deren Interaktionen ist die Grundlage für ein Berechnungsmodell, mit dessen Hilfe eine systematische Werkzeugauswahl in Abhängigkeit des gewünschten Bearbeitungsergebnisses möglich ist.

Basis der Arbeit bildet eine umfassende Erarbeitung der Grundlagen des Fließlochformens und der Methoden der statistischen Versuchsplanung und Versuchsauswertung, die im Vergleich zur herkömmlichen Versuchsmethodik eine systematische Prozessparameteranalyse mit deutlich reduziertem Versuchs-, Kosten- und Zeitumfang ermöglicht. Parallel ist eine Schleiftechnologie zu entwickeln, die das Fertigen von Fließlochformen mit unterschiedlichen Geometriemeerkmalen auf konventionellen Schleifmaschinen ermöglicht. Dazu wird eine mathematische Beschreibung der Fließlochformergeometrie formuliert.

Auf Grundlage der damit verbundenen, umfassenden Systemanalyse, wird mittels statistischer Versuchplanung ein speziell für das Fließlochformen angepasster Versuchsplan aufgestellt. In diesem Rahmen werden die zu untersuchenden Einfluss- und Antwortgrößen festgelegt. Da davon auszugehen ist, dass sich nicht alle prozessbeeinflussenden Größen durch einen einzigen Versuchsplan untersuchen lassen, erfolgt im Vorfeld eine Priorisierung der Einflussgrößen, welche die Basis für die Versuchsplanaerstellung bildet.

Nach abgeschlossener Versuchsdurchführung und -auswertung werden die Versuchsergebnisse der statistischen Versuchsplanung grafisch dargestellt und anschließend interpretiert.

Die Darstellung der Wirkung der einzelnen Einflussgrößen auf die Prozessgrößen und Buchsenqualitätsmerkmale des Fließlochformprozesses findet aus zwei Blickwinkeln statt.

Zunächst erfolgt die Darstellung aus Sicht der Antwortgrößen. Hier erhält man Informationen über die Wirkung der untersuchten Einflussgrößen auf die jeweils betrachtete Antwortgröße. Infolgedessen ist man in der Lage, die Einflussgrößen gezielt so zu verändern, dass das gewünschte Arbeitsergebnis erreicht wird.

In einem zweiten Schritt werden die Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Einflussgrößen dargestellt. Auf diese Weise erhält man einen Überblick über die Wirkung der einzelnen Einflussgrößen auf alle Prozessgrößen und Buchsenqualitätsmerkmale.

Im Anschluss wird mit Hilfe der multiplen Regression ein empirisches Interaktionsmodell, welches den Zusammenhang zwischen den untersuchten Einflussgrößen und den Antwortgrößen quantitativ beschreibt, aufgestellt. Dieses wird softwaretechnisch in einem Berechnungsprogramm umgesetzt, welches eine Prognose der zu erwartenden Zielgrößen innerhalb des untersuchten Versuchsraumes ermöglicht.

In weiteren Detailuntersuchungen werden die im Rahmen der statistischen Versuchsplanung als wichtig eingestuften Einflussgrößen eingehender untersucht. Darüber hinaus wird die Wirkung noch nicht betrachteter Einflussgrößen auf die Antwortgrößen experimentell ermittelt.

Insgesamt dokumentiert die Arbeit am Beispiel des Fließlochformens, wie sich mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung und ergänzenden Versuchsreihen wichtige Prozesseinflussgrößen und deren Effekte auf den Bearbeitungsprozess und das Bearbeitungsergebnis mit einem Minimum an Zeit, Kosten und Aufwand erfassen lassen.

2 Grundlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Grundlagen des Fließlochformens und der statistischen Versuchsplanung beschrieben, um das nötige Grundverständnis für die spätere Vorgehensweise bei der Parameteridentifikation der Prozesseinflussgrößen zu vermitteln.

2.1 Fließlochformen

Das Fließlochformen ist ein spanloses Fertigungsverfahren zur Erzeugung von Buchsen in Blechen und Hohlprofilen, welche als Lager-, Löt- oder Schweißbuchsen dienen. Dazu wird ein rotierender, im Querschnitt mit Formstollen versehener Hartmetallkegeldorn unter axialer Kraftbeaufschlagung auf das Werkstück gedrückt. Die zwischen Werkzeug und Werkstück entstehende Reibungswärme setzt die Festigkeit des Materials soweit herab, dass sich der Bohrdorn mit deutlich reduziertem Kraftaufwand durch das Blech drücken lässt. Durch die Bearbeitung wird das verdrängte Material so verformt, dass auf der Blechunterseite eine Buchse entsteht (vgl. Abbildung 2-1). Der untere Teil der Buchse besteht aus ca. 2/3 des verdrängten Werkstoffvolumens. Das restliche Drittel wird entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängt und lässt sich je nach Werkzeugausführung entweder zu einem Kragen umformen oder durch angeschliffene Schneidkanten spanend entfernen.

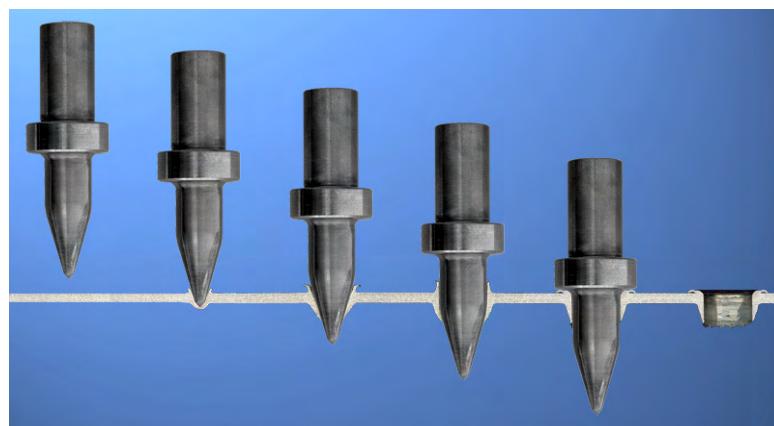


Abbildung 2-1: Ablauf des Fließlochformprozesses

In Kombination mit dem spanfreien Gewindefurchen lassen sich in diese Buchsen zudem hochbelastbare Gewinde furchen. Bei dem Gewindefurchen handelt es sich nach DIN 8583 um ein Verfahren des Druckformens, das in die Untergruppe des Eindrückens eingegliedert ist.

Die durch die Kombination von Fließlochformen und Gewindefurchen erzeugten Gewinde weisen, im Gegensatz zu in konventionelle Bohrungen eingefurchten Gewinde, eine wesentlich höhere Anzahl an tragenden Gewindegängen auf und verfügen aufgrund der verfahrensbedingten Materialverfestigung über eine sehr hohe Belastbarkeit und Auszugs-

festigkeit. Somit bietet die Verfahrenskombination ideale Voraussetzungen zur Herstellung von lösbaren Verbindungen in dünnwandigen Werkstücken. Sie ist eine kostengünstige Alternative zur Montage von Niet-, Schweiß- und Pressmuttern /6/, /7/, /8/.

Das Fließlochformen lässt sich bei einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien wie z. B. bei schweißbaren legierten und unlegierten Stählen, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Stahl, Kupfer, Bronze, Messing, Magnetwerkstoffen und Sonderlegierungen einsetzen. Der erzeugbare Buchsendurchmesser reicht dabei von 1,8 mm bis 30 mm. Der wirtschaftliche Einsatz des Verfahrens ist bis zu einer Blechdicke von ca. 12,5 mm möglich /4/, /114/.

Da das Fließlochverfahren auch in komplexen Teilen und schwer zugänglichen Bereichen wie zum Beispiel in Hohlprofilen einsetzbar ist, ergibt sich ein sehr breites Einsatzspektrum. Fließlochformen wird heute in den Bereichen von Gas- und Wassergeräten, Radiatoren, Kühlaggregaten, Luft- und klimatische Anlagen, Heizapparate, Gasbrennern, Fußbodenheizanlagen, Möbeln, Haushalts- und Küchengeräten, Freizeitgeräten und Campingmöbel, Beleuchtungsanlagen, Lagerregalen, im Gerüst- und Leiterbau, im Apparate- und Behälterbau, bei Landmaschinen sowie im Automobilbau angewendet /6/.



Abbildung 2-2: Anwendungsgebiete des Fließlochformens /8/

2.1.1 Der Fließlochformer

Die Möglichkeit mit Hilfe eines schnell rotierenden Dorns, Buchsen in Blechen zu erzeugen ist schon seit Anfang der zwanziger Jahre bekannt. Dies belegt das Patent /90/ aus dem Jahre 1933, welches das grundlegende Funktionsprinzip des Fließlochformens beschreibt. Doch erst im Rahmen des 1976 erschienenen Patents mit dem Titel „Piercing Tools“ von J. van Geffen wird neben dem Fließlochformprozess erstmalig ein voll funktionsfähiger Fließlochformer beschrieben. Neben der detaillierten Geometriebeschreibung des Werkzeugs, die sich bis heute im Wesentlichen nicht geändert hat, beinhaltet dieses Patent den Einsatz von Hartmetall als Werkzeugwerkstoff. Dies führte zum kommerziellen Durchbruch des Verfahrens und bildet bis heute die Grundlage für den industriellen Einsatz.

Fließlochformer bestehen bis heute aufgrund der hohen Anforderungen an Verschleißfestigkeit, Härte und Temperaturbeständigkeit aus speziell gesinterten Hartmetallsorten. Einige Projekte beschäftigten sich zwar mit der Einführung von Hochleistungskeramik als Alternativwerkstoff, jedoch erreichen die Fließlochformer aus Keramik noch nicht die geforderten Standzeiten /43/.

Ein Fließlochformer setzt sich grundsätzlich aus vier Funktionsbereichen mit unterschiedlichen Aufgaben und Gestaltungsmöglichkeiten zusammen.

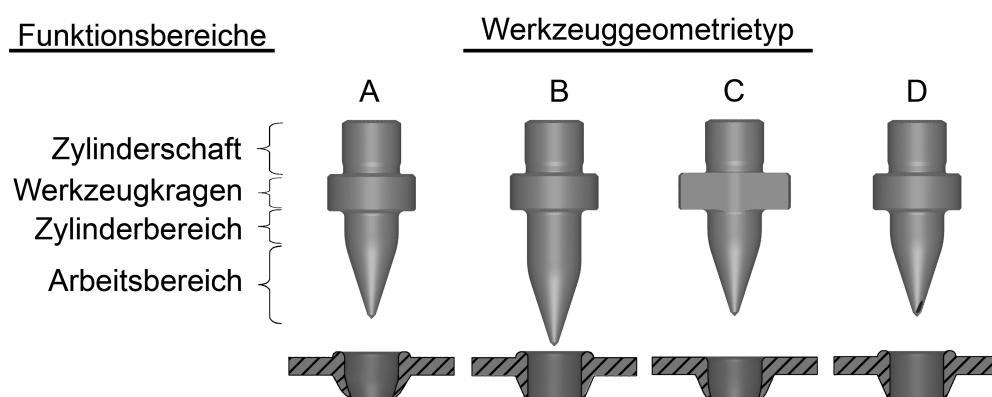


Abbildung 2-3: Vergleich unterschiedlicher Fließlochformertypen

Zylinderschaft - Der Zylinderschaft dient zur Aufnahme des Werkzeugs im Spannfutter der Maschine. Um die während des Bearbeitungsprozesses entstehende Wärme besser an die Umgebung abzuleiten, wird häufig ein mit einem Aluminiumkühlring und Lamellen versehenes Spezialspannzangenfutter verwendet. Dieses stellt sicher, dass neben der sicheren Spannung des Formers, die eine seitliche Bewegung des Werkzeugs beim Aufsetzen auf die kalte Werkstückoberfläche verhindert, ein übermäßiges Aufheizen der Maschinenrspindel unterbunden wird.

Werkzeugkragen - Der Werkzeugkragen dient zur Umformung des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens. Dadurch entsteht eine erhabene Fließlochbuchse deren Buchsenrand sich als Dichtfläche oder als Verstärkung des Gewindes nutzen lässt. Ist eine plane Blechoberfläche erwünscht, so lässt sich der Buchsenrand durch im Werkzeugkragen eingeschliffene Schneiden spanend entfernen (vgl. Abbildung 2-3 C).

Zylinderbereich - Der Zylinderbereich legt den Buchsendurchmesser und die Länge des zylindrischen Buchsenabschnitts fest. Die Länge des zylindrischen Werkzeugbereichs ist der Dicke des zu bearbeitenden Werkstücks anzupassen. Bei gegebener Blechdicke wird dennoch grundsätzlich zwischen den beiden Werkzeugtypen „Lang“ und „Kurz“ unterschieden. Der Werkzeugtyp „Lang“ kommt immer dort zum Einsatz, wo man durchgängige, zylindrische Buchsen wie z. B. bei Lagersitzen, Löt- und Schweißstellen benötigt. Bei Verwendung des Typs „Kurz“ entstehen am Buchsenauslauf konische zulaufende Buchsen. Dadurch wird bei einem nachfolgenden Gewindefurchen eine vollständige Ausformung des Gewindes auch am Buchsenende erreicht (vgl. Abbildung 2-3 A/B). Der zylindrische Teil der erzeugten Buchse sollte hier nur ca. 2/3 der Gesamtbuchsenlänge betragen.

Arbeitsbereich - Die Aufgabe des Arbeitsbereichs ist die Erzeugung bzw. die Aufweitung der Fließlochbuchse. Durch seine geometrische Gestaltung werden maßgeblich die Prozessgrößen, wie z. B. das benötigte Drehmoment und die entstehende Axialkraft, beeinflusst. Da gerade durch die maximal auftretende Axialkraft zulässige Belastungsgrenzen des Bearbeitungszentrums oder des Werkstücks überschritten werden können, gibt es die Möglichkeit, die Axialkraft durch die Integration von Schneidkanten im Arbeitsbereich um bis zu 30 % zu reduzieren /21/. Mit geeigneten Handbohrmaschinen ist so auch der mobile Einsatz des Verfahrens möglich. Nachteil dieser Schneidkantenintegration ist die Reduzierung der Buchsenlänge sowie die Steigerung der Einrisse am Buchsenauslauf.

Insgesamt ergeben sich durch die Gestaltungsmöglichkeiten der einzelnen Funktionsbereiche die in Abbildung 2-3 aufgezeigten vier Fließlochformertypen, deren charakteristischen Geometriemerkmale sich untereinander beliebig kombinieren lassen.

Zur detaillierten Beschreibung der Werkzeuggeometrie wird der Fließlochformer in die beiden Geometriebereiche Werkzeugkontur und Formstollengeometrie unterteilt. Abbildung 2-4 zeigt den typischen Aufbau der Fließlochformerkontur eines Standardwerkzeugs mit den wichtigsten Geometriemerkmalen.

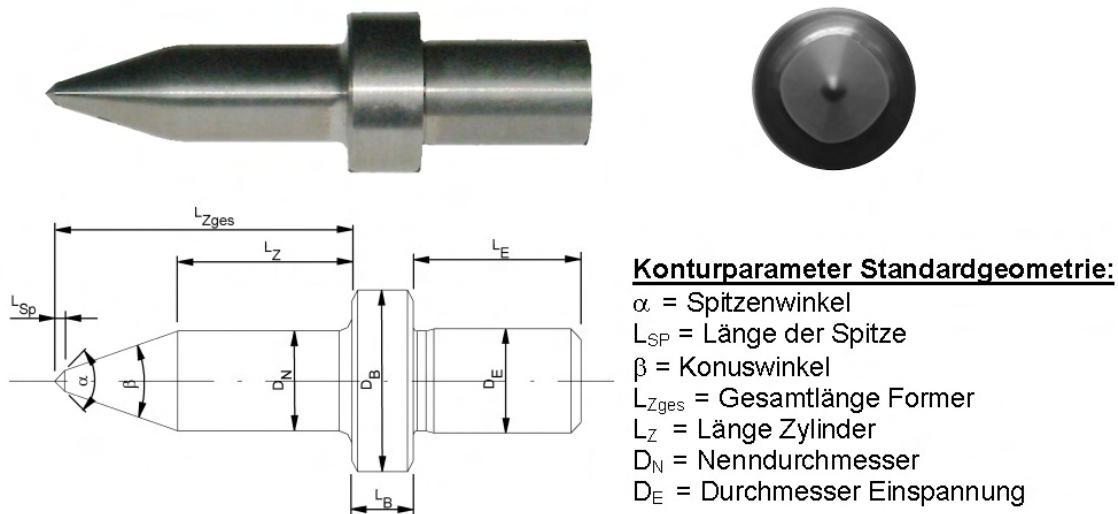


Abbildung 2-4: Fließlochformerkontur einer Standardgeometrie

Der Arbeitsbereich eines Fließlochformers setzt sich aus einer Werkzeugspitze, einem konischen und einem zylindrischen Bereich zusammen. Die Werkzeugspitze (L_{SP}) mit einer Länge von ca. 1 mm und einem Spitzenwinkel (α) von ca. 90° dient der Zentrierung des Werkzeugs und führt zu Beginn des Bearbeitungsprozesses, aufgrund ihrer relativ großen Reibfläche, zu einer raschen Erwärmung des Werkstücks. Durch den konischen Bereich des Werkzeugs (L_K) mit einem Konuswinkel (β) von ca. 37° , wird die Buchse kontinuierlich aufgeweitet, während sie sich immer stärker erwärmt. Beim Übergang in den zylindrischen Teil (L_Z) werden die maximalen Prozesstemperaturen erreicht. Der zylindrische Werkzeugteil legt den Buchsendurchmesser sowie die Länge des zylindrischen Buchsenabschnitts fest und wird anwendungsfallspezifisch gestaltet.

Die Gestaltung der Kontur des Fliesslochformers wird durch die Formstollengeometrie ergänzt. Fließlochformer besitzen je nach Einsatzgebiet und Hersteller zwei bis vier Formstollen, die gleichmäßig über den Werkzeugumfang verteilt sind. Abbildung 2-5 zeigt den gemessenen Querschnitt eines Formers, dessen Hubfunktion über den Radius und der Amplitude dargestellt ist.

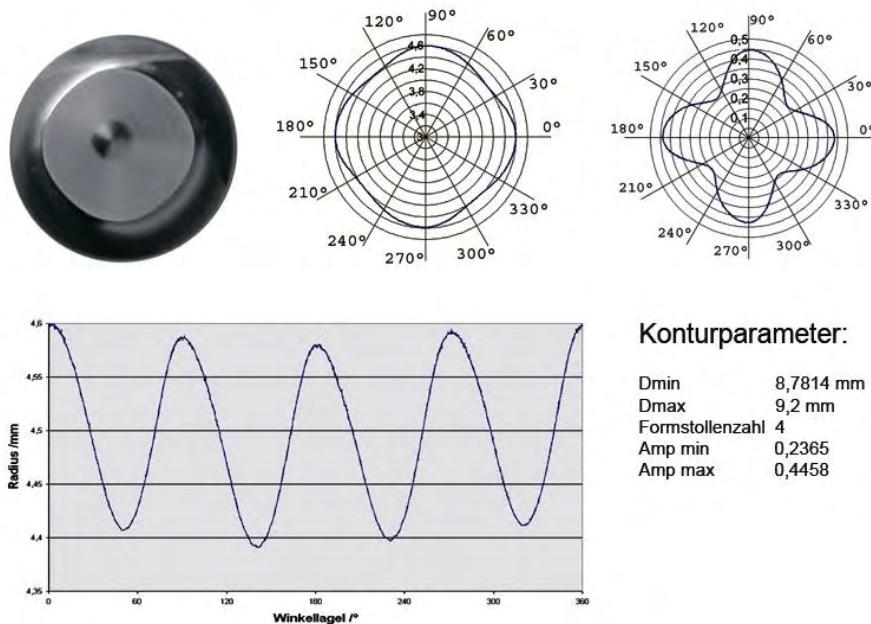


Abbildung 2-5: Formstollengeometrie eines Fließlochformers

2.1.2 Der Fließlochformprozess

Für die Erzeugung von qualitativ hochwertigen Fließlochbuchsen ist neben der geometrischen Gestaltung des Fließlochwerkzeugs, auch die geeignete Wahl der Bearbeitungsparameter, welche in Abhängigkeit des verwendeten Werkzeugdurchmessers, der Werkstückdicke und des Werkstofftyps festzulegen sind, äußerst wichtig.

Die Prozesssteuerung erfolgt durch Festlegung der Drehzahl bzw. der Umfangsgeschwindigkeit und der Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs. Die Festlegung der Vorschubgeschwindigkeit kann indirekt durch die Festlegung einer konstanten Vorschubkraft oder direkt durch die Angabe der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen.

Bei indirekter bzw. kraftgesteuerter Vorschubregelung passt sich die Vorschubgeschwindigkeit durch den voreingestellten Druck den jeweiligen Fließeigenschaften des Werkstoffs, beruhend auf dem aktuellen Erwärmungszustand des Materials, kontinuierlich an. Dies stellt sicher, dass die Belastungsgrenze der Bearbeitungsmaschine nicht überschritten wird. Des Weiteren wird dadurch eine Überhitzung des Werkzeugs vermieden /6/.

Da man bei modernen Bearbeitungszentren nicht von einer Überschreitung der Belastungsgrenzen ausgeht, erfolgt die Bearbeitung im industriellen Einsatz mit einer festgelegten Vorschubgeschwindigkeit. Um die Vorschubgeschwindigkeit den einzelnen Phasen des Bearbeitungsprozesses (vgl. Abbildung 2-6) bestmöglich anpassen zu können, wird häufig mit gestuften Vorschubgeschwindigkeiten gearbeitet. Neben einer Reduzierung der Werkzeugbelastung und der Steigerung der Buchsenqualität lassen sich somit auch die Fertigungszeiten erheblich reduzieren. Im einfachsten Fall wird mit einem einfach gestuften

Vorschub gearbeitet. Dabei wird zunächst der Werkstoff mit einer langsamen Vorschubgeschwindigkeit zwischen 50 mm/min und 100 mm/min soweit erwärmt, bis er beginnt, sich plastisch zu verformen. Im Folgenden wird die Buchse mit einer gesteigerten Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min bis 400 mm/min fertig geformt. Aus dem industriellen Einsatz sind Bearbeitungsprozesse mit einer bis zu sechsfach gestuften Vorschubgeschwindigkeitsanpassung bekannt /6/, /8/.

An einem Bearbeitungsbeispiel wird die Kinematik der Fließlochformens anhand der einzelnen Umformphasen näher erläutert. Bei dem verwendeten Beispiel handelt es sich um die Bearbeitung eines 2 mm dicken Blechstreifens aus S355 J2G3 (St52), in dem eine Fließlochbuchse mit einem Durchmesser von 9,2 mm eingebracht wird.

Die Bearbeitung erfolgt mit einem einfach gestuften Vorschub ($v_1=50$ mm/min; $v_2=200$ mm/min) und einer Drehzahl von 3000 U/min. Um ein Aufschweißen des Werkstoffs auf der Fließlochformeroberfläche zu verringern und somit eine optimale Werkzeugstandzeit und Buchsenqualität sicherzustellen, wird ein speziell für das Fleißlochformen entwickeltes Trennmittel eingesetzt.

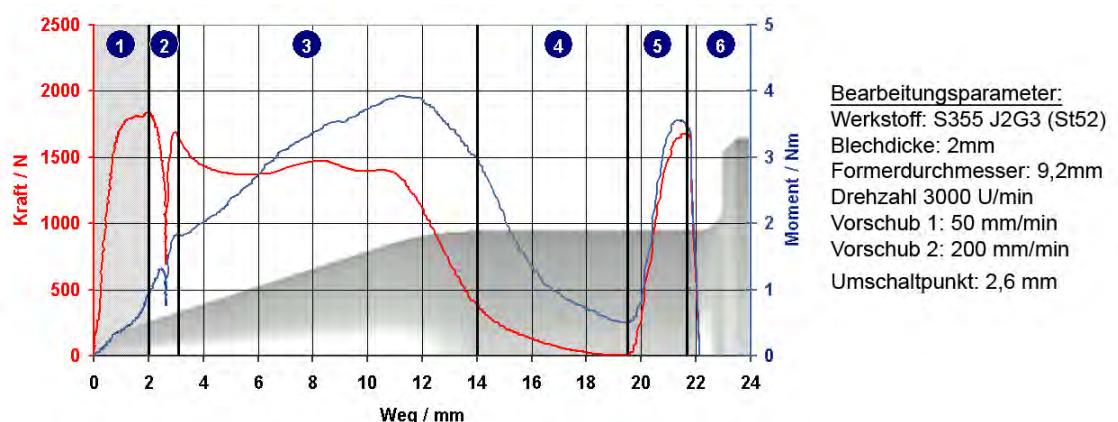


Abbildung 2-6: Phasen des Fließlochformprozesses

Phase 1 - In der ersten Phase beginnt der Fließlochformer mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min in den Werkstoff einzudringen. Dabei wird dem Werkstück durch die Reibung der Werkzeugspitze Energie zugeführt, die den Werkstoff erwärmt. Kraft und Moment steigen kontinuierlich an bis die Werkzeugspitze vollständig in den Werkstoff eingedrungen ist. Der Übergang in den konischen Bereich des Werkzeugs führt zu einer leichten Reduzierung des Kraft- und Momentanstiegs (vgl. Abbildung 2-6). In dieser Phase wird der Werkstoff vor der Werkzeugspitze soweit unter Druck gesetzt, dass er entlang des Fließlochformers entgegen der Vorschubrichtung nach oben verdrängt wird. Bereits kurz vor der Durchdringung des Blechs bildet sich an der Blechunterseite durch den Druck in Vorschubrichtung eine Auswölbung. Dies führt zu einer weiteren Abnahme des Axialkraftanstiegs.

Phase 2 - In der zweiten Phase fällt die Axialkraft nach der Durchdringung des Werkstücks steil ab, während das Moment aufgrund der kontinuierlichen Erhöhung der Reibfläche zwischen Werkzeug und Werkstoff weiter ansteigt. Aufgrund der Abnahme der axialen Werkzeugbelastung wird zu diesem Zeitpunkt (Tiefe 2,5 mm) die Vorschubgeschwindigkeit auf 300 m/min gesteigert. Während des Umschaltvorgangs fallen Kraft und Moment maschinenbedingt ab. Sobald die neue Vorschubgeschwindigkeit wieder vollständig erreicht ist, folgen die Messgrößen wieder dem tendenziellen Verlauf, den Sie schon vor dem Umschaltvorgang besaßen, jedoch auf einem höheren Niveau (Kraft vorher: 1460 kN, nachher: 1690 kN ; Moment vorher: 1,3 Nm, nachher 3 Nm).

Phase 3 - In dieser Phase befindet sich nur der konische Werkzeugsbereich in Werkstoffkontakt. Er dient zur kontinuierlichen Aufweitung der Buchse bis zum Erreichen des Enddurchmessers. Während dieser Phase nimmt die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug zu, dies ist mit einer Zunahme des Drehmoments verbunden, die Temperatur im Werkstoff steigt. Kurz vor dem Übergang vom konischen zum zylindrischen Werkzeugsbereich wird das maximale Drehmoment erreicht. Während des Übergangs fällt es, aufgrund der Reduzierung der an der Umformung beteiligten Werkzeugkontaktefläche, zusammen mit der Axialkraft wieder ab. Das Erreichen des maximalen Drehmoments ist dabei gleichbedeutend mit dem Erreichen der maximalen Prozesstemperatur, die in diesem Beispiel bei ca. 800 °C liegt.

Phase 4 - Zu diesem Zeitpunkt verrichtet der Übergangsbereich zum zylindrischen Teil des Werkzeugs die Hauptarbeit. Dies hat eine Reduzierung der Axialkraft und des Drehmoments mit zunehmender Ausformung der Buchse zur Folge. Der Buchsendurchmesser wird durch den zylindrischen Bereich des Fliesslochformers festgelegt.

Phase 5 - Während der ersten vier Phasen wurde ca. 70 % des verdrängten Werkstoffs in und 30 % entgegen der Vorschubrichtung verdrängt. Dieser entgegen der Vorschubrichtung verdrängte Volumenanteil wird nun in der fünften Phase zu einem Bund umgelegt. Dies erklärt auch den steilen Anstieg der Kraft und des Moments am Ende des Bearbeitungsprozesses.

Phase 6 - Die Buchse ist nun vollständig ausgeformt und das Werkzeug wird im Eilgang zurückgefahren. Das Entfernen des Werkzeugs aus der Bearbeitungsstelle im Eilgang ist wegen der beginnenden thermischen Abkühlung, die zu einem Verklemmen des Formers in der Buchse führen kann, zwingend notwendig. Der Fließlochformprozess ist abgeschlossen und die Buchse steht für die Weiterbearbeitung bereit.

2.2 Statistische Versuchsplanung

Bei der statistischen Versuchsplanung (engl. DoE = Design of Experiments) handelt es sich um ein Hilfsmittel zur Optimierung von Prozessen und der Neuentwicklung von Produkten. Sie ermöglicht die Erfassung von Regel- und Störgrößen im Prozess und den resultierenden Produkt- und Prozesseigenschaften mit einem Minimum an Zeit und Kosten. Dies wird durch systematische Versuchsdurchführungs- und Auswertungsmethoden erreicht, die eine Reduzierung des Versuchsumfangs ermöglichen, ohne die Aussagefähigkeit hinsichtlich der Haupteffekte und der wichtigsten Interaktionseffekte negativ zu beeinflussen. Mit ihrer Hilfe kann die Abhängigkeit einer oder mehrerer Zielgrößen von mehreren Einflussgrößen schnell, kostengünstig und statistisch abgesichert ermittelt werden /25/,/27/. Somit stellt DoE auch im Bereich der Werkzeugentwicklung ein ideales Instrument für die Entwicklung und Optimierung von Werkzeugen dar.

Trotz der Vorteile von DoE arbeiten Ingenieure und Forscher bis heute größtenteils noch immer mit der One-Factor-at-a-Time-Methode. Bei dieser Methode wird immer nur ein Faktor variiert, während alle übrigen Faktoren konstant gehalten werden /25/. Diese Methode ist jedoch mit einem erhöhten Versuchsaufwand verbunden und erfasst keine Interaktionseffekte.

Die statistische Versuchsplanung (VP) bietet eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und Verfahren (vollfaktorielle/teilstatistische VP, D-Optimale VP, Taguchi-Methodik, Shainin-Methodik, Box-Behnken VP, Plackett Burmann VP usw.) aus denen sich der Experimentator die für seine Problemstellung Geeignete aussuchen muss. Jede dieser Methoden besitzt ihre spezifischen Stärken und Schwächen. Dies verlangt vom Experimentator schon im Vorfeld eine detaillierte Analyse der Ausgangssituation bezüglich der zu untersuchenden Faktoren, deren Einstellbereiche und der Auswahl und Messbarkeit der Zielgrößen, um so die für seine Zielsetzung richtige Methode zu wählen /44/. Daher sollen im Folgenden die drei wichtigsten Methoden der statistischen Versuchsplanung kurz vorgestellt werden.

Klassisch (Ronald Fischer) – Die klassische Methode der statistischen Versuchsplanung ist die Durchführung von mathematisch und methodisch abgesicherten Screening-Versuchen. Ziel dieser Versuche ist es, mit möglichst wenigen Versuchen aus einer großen Anzahl von Einflussgrößen diejenigen herauszufiltern, die einen großen Einfluss auf die betrachteten Zielgrößen haben, und dafür jeweils die günstigsten Einstellungen zu ermitteln. Im Bereich der Screening-Versuche kommen sowohl vollfaktorielle als auch fraktionelle faktorielle Versuchspläne zum Einsatz. Durch die Symmetrie und Systematik dieser Versuchspläne ist es möglich, ein multiples Regressionsmodell aufzustellen, welches die Berechnung von Versuchspunkten innerhalb des untersuchten Versuchsraums ermög-

licht. Störgrößen werden bei dieser Vorgehensweise konstant gehalten oder teilweise auch als Faktor mit in den Versuchsplan integriert. Die klassische Versuchsplanung bietet ein reichhaltiges Instrumentarium für eine systematische, schnelle und kostengünstige Prozess- und Produktoptimierung. Je nach Auswahl des Versuchsplans können sowohl die Haupteffekte der einzelnen Faktoren als auch ihre Interaktionseffekte bestimmt werden /26/.

Methode nach Taguchi – Bei der Methode nach Taguchi werden Störgrößen gezielt verändert, um so die Streuung der Versuchsergebnisse zu reduzieren. Taguchi fordert robuste Prozesse, bei denen eine Änderung der Störgrößen einen möglichst geringen Einfluss auf die Zielgrößen hat. Dazu wird der Einfluss der einzelnen Störgrößen getrennt voneinander erfasst und die systematische Änderung der Streuung der Versuchsergebnisse ausgewertet. Ziel ist es, die Prozessparametereinstellung zu finden, bei der die Streuung am kleinsten ist. Denn dort wirken sich die Störgrößen am geringsten auf den Prozess aus, das System ist am robustesten. Taguchi ist gewissermaßen eine Qualitäts-Philosophie, bei der vornehmlich hochvermengte Versuchspläne Verwendung finden /26/.

Methode nach Shainin – Die Methode nach Shainin wird eingesetzt, um die laufende Fertigung zu optimieren. Ziel ist es, die meist nur wenigen dominanten Störgrößen zu erkennen und zu beseitigen. Bei der Durchführung wird auf Methoden der Multi-Vari-Karte und auf vollfaktorielle Versuchspläne zurückgegriffen. Die Versuchsdaten werden aus der laufenden Fertigung systematisch gesammelt und grafisch ausgewertet. Mit Hilfe eines Variablenvergleichs werden alle Störgrößen auf den günstigsten und ungünstigsten Wert gesetzt und die Prozessergebnisse miteinander verglichen. Dann wird bei den Störgrößen paarweise der günstige mit dem ungünstigen Wert vertauscht. Schlägt nun bei einer Störgröße das Prozessergebnis um, so ist diese für das Problem verantwortlich und in der Fertigung zu verändern. Vorteil dieser Methode ist ihre einfache Anwendung /26/.

Ziel dieser Arbeit ist die systematische Erfassung der Prozesseinflussgrößen beim Fließlochformen. Es sollen die Haupteinflussgrößen bezüglich des Einflusses auf die Prozessgrößen und die Buchsengeometrie aus einer Vielzahl von Einflussgrößen herausgefiltert und anschließend evaluiert werden. Im Rahmen der statistischen Versuchsplanungstechniken und -methoden werden für diese Zielstellung, bei der viele Faktoren auf ihre Bedeutung hin untersucht werden, vornehmlich Screening-Versuchspläne verwendet /27/.

Das folgende Kapitel wird daher, nach einem kurzen Einblick in die Grundlagen der statistischen Versuchsplanung, detailliert auf die Entwicklung, Durchführung und Auswertung von Screening-Versuchsplänen eingehen. Für alle weiteren Versuchsplanungsmethoden und -verfahren sei an dieser Stelle auf die Arbeiten /25/, /27/, /44/ und /108/ verwiesen.

2.2.1 Grundlegende Begriffe der statistischen Versuchsplanung

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist die Erfassung der Einflüsse von Regel- und Störgrößen innerhalb eines experimentell zu analysierenden Prozesses, um so Aussagen über die resultierenden Produkt- und Prozesseigenschaften treffen zu können. Die Abbildung 2-7 zeigt die systemtheoretische Darstellung eines Prozesses sowie das Zusammenwirken von Einfluss-, Steuer-, Stör- und Zielgrößen /27/, /108/.

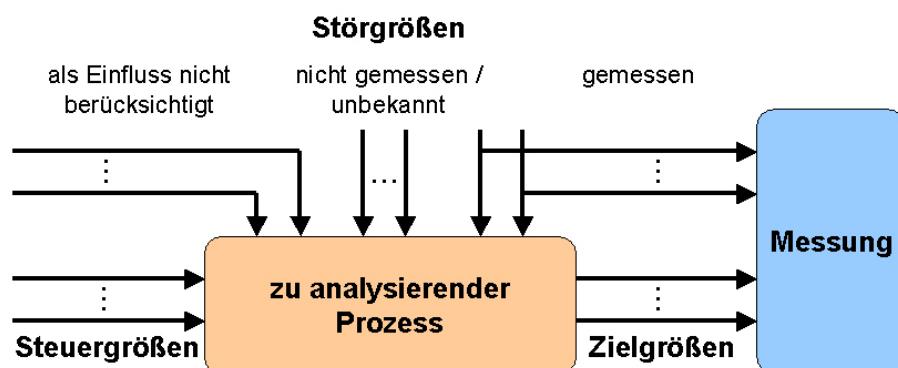


Abbildung 2-7: systemtheoretische Darstellung eines Prozesses /2/

Zielgrößen - Die für den Experimentator wichtigsten Größen sind die Zielgrößen bzw. Antwortgrößen. Sie charakterisieren den Prozess und beschreiben das Ergebnis eines Versuchs. Zielgrößen können sowohl quantitative als auch qualitative Größen sein. Ziel des Experimentators ist es, die Prozesscharakteristika des Prozesses oder des Produkts so zu beeinflussen, dass unter den gegebenen Randbedingungen die Zielgröße bzw. die aus den Zielgrößen zusammengesetzte Zielfunktion ein Optimum erreicht. In erster Linie handelt es sich bei den Zielgrößen um Messgrößen oder um Größen, die sich aus mehreren Messgrößen zusammensetzen. Technische Messgrößen weisen meist eine sehr feine Abstufung auf und sind daher besonders aussagekräftig. Ein objektiver Messwert ist daher als Zielgröße immer einer subjektiven Klasseneinteilung oder Notengebung vorzuziehen /2/, /27/, /44/.

Einflussgrößen - Als Einflussgrößen werden alle Größen bezeichnet, welche die Versuchsergebnisse bzw. Zielgrößen möglicherweise beeinflussen. Einflussgrößen beinhalten sowohl Steuer- als auch Störgrößen /27/.

Steuergrößen - Als Steuergrößen werden alle kontrollierbaren Einflussgrößen bezeichnet, die der Experimentator im Rahmen seiner Versuchsdurchführung systematisch variiert oder annähernd konstant hält /2/, /27/.

Störgrößen - Alle nicht kontrollierbaren Einflussgrößen werden als Störgrößen bezeichnet. Störgrößen können zu einer systematischen Verfälschung der Versuchsergebnisse führen. Ist eine messtechnische Erfassung dieser Größen möglich, so sollten diese mit in die Versuchsauswertung aufgenommen werden. Ist dies nicht möglich, lässt sich die Gefahr einer Verfälschung der Versuchsergebnisse aufgrund der sich ändernden Versuchsbedingungen durch Blockbildung (Zusammenfassung von Versuchspunkten), Randomisierung (Zufallsanordnung der Versuche) und Versuchswiederholungen minimieren /27/, /44/, /108/.

Versuch - Zur Erfassung der Abhängigkeit der Zielgrößen von den Einflussgrößen wird ein Versuch durchgeführt. Unter dem Begriff Versuch versteht man dabei im Allgemeinen die Gesamtheit aller Einzelversuche /20/.

Versuchsplan - Vor der Durchführung eines Versuchs stellt der Experimentator einen detaillierten Versuchsplan, der alle zu untersuchenden Einflussgrößen und Zielgrößen enthält, auf. Der Versuchsplan beinhaltet somit die Liste aller Einzelversuche und die darin festgelegten Einstellparameter /20/.

Faktoren - Da im Rahmen eines Versuchs aufgrund des großen Versuchsumfangs meist nicht alle möglichen Einflussgrößen auf einmal variiert werden können, ist aus der Vielzahl der möglichen Einflussgrößen eine Auswahl der vermuteten wesentlichen Größen zu treffen. Die Einflussgrößen, die im Rahmen des Versuchs variiert werden, bezeichnet man als Faktoren /27/, /44/, /108/.

Faktorstufen - Um den Einfluss der Faktoren auf die Zielgrößen zu bestimmen, werden diese innerhalb eines Versuchsplans mit unterschiedlichen Werten oder Ausprägungen getestet. Diese unterschiedlichen Stufen der Faktoren werden als Faktorstufen bezeichnet. Bei Versuchsplänen mit zwei Faktorstufen spricht man von Versuchsplänen erster Ordnung. Mit diesen Versuchsplänen lassen sich lineare Zusammenhänge erfassen. Möchte man Zusammenhänge höherer Ordnung erfassen, sind Untersuchungen mit drei bzw. mehr Faktorstufen notwendig, die als Versuchspläne zweiter bzw. höherer Ordnung bezeichnet werden /27/, /108/.

Effekte - Effekte sind Vergleichsgrößen, die im Rahmen der Auswertung und Interpretation von Versuchsergebnissen eine zentrale Rolle spielen. Sie dienen der Beschreibung der Einflüsse von Faktoren auf die betrachtete Zielgröße. Ihre Berechnung erfolgt formal durch Mittelwertvergleiche. Effekte, die auf den Einfluss einer einzigen Variablen zurückzuführen sind, werden als Haupteffekt bezeichnet.

Haupteffekt – Als Haupteffekt wird ein Effekt bezeichnet, der auf eine Änderung nur eines Faktors von der unteren auf die obere Faktorstufe zurückzuführen ist. Er berechnet sich als Differenz zwischen dem Mittelwert aller Antworten auf der oberen Stufe des betrachteten Faktors und dem Mittelwert aller Antworten auf der unteren Stufe. Ein positiver Haupteffekt bedeutet, dass durch die Erhöhung des Faktors eine Steigerung der Zielgröße hervorgerufen wird. Ein negativer Haupteffekt bedeutet, dass eine Erhöhung des Faktors zu einer Verringerung der Zielgröße führt /44/.

Wechselwirkungseffekte - Ist der Effekt eines Faktors vom Einstellparameter eines oder mehrerer anderer Faktoren abhängig, so besteht eine Interaktion zwischen den Faktoren. Diese Interaktion wird als Wechselwirkung und der erreichbare Effekt als Wechselwirkungseffekt bezeichnet. Wechselwirkungseffekte berechnen sich als gemittelte Differenz der Einzeleffekte der an der Wechselwirkung beteiligten Faktoren. Bei einer Wechselwirkung zwischen den zwei Faktoren A und B bedeutet ein positiver Wechselwirkungsfaktor, dass auf der hohen Faktorstufe des Faktors A eine Änderung des Faktors B einen größeren Effekt hat als bei der niedrigen Faktorstufe des Faktors A (auch die symmetrische Aussage ist möglich). Insgesamt ist zu beachten, dass es sich bei der Wechselwirkung im statistischen Sinn um die Abhängigkeit eines Faktors von der Stufe eines anderen Faktors handelt. Wechselwirkungen beschreiben daher nicht das gegenseitige Einwirken von Faktoren aufeinander /108/.

Beispiel - Da der Umgang und die Interpretation von Effekten eine zentrale Rolle in dieser Arbeit spielen, wird die Berechnung an einem Beispiel näher erläutert. Betrachtet wird die Zielgröße Temperatur in Abhängigkeit der Einflussfaktoren Werkzeugdurchmesser und Drehzahl. Beide Faktoren wurden auf jeweils zwei Faktorstufen vollfaktoriell getestet. Abbildung 2-8 zeigt den Versuchsplan, die erfassten Temperaturen der Versuchsparameterkombinationen sowie das Auswertungsdiagramm.

| Nr. | Steuergrößen | | Zielgröße Temperatur °C |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| | Durchmesser mm | Drehzahl U/min | |
| 1 | 9,2 | 2000 | s_1 |
| 2 | 14,5 | 2000 | s_2 |
| 3 | 9,2 | 4000 | s_3 |
| 4 | 14,5 | 4000 | s_4 |

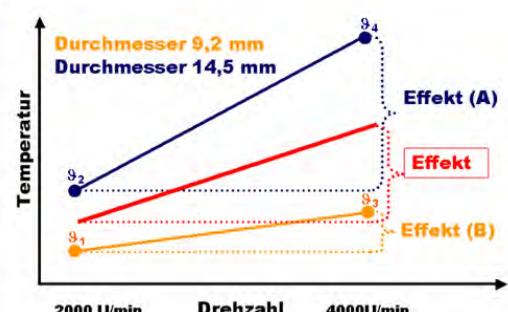


Abbildung 2-8: Erläuterung von Haupt- und Wechselwirkungseffekten

Zur Berechnung des Effekts, der auf die Drehzahlvariation zurückzuführen ist, wird die Differenz zwischen dem Mittelwert aus allen Versuchen auf der oberen Stufe der Drehzahl (4000 U/min) und dem Mittelwert aller Versuche auf der unteren Stufe der Drehzahl

(2000 U/min) gebildet. Diese in Abbildung 2-8 rot eingezeichnete Differenz wird als Haupteffekt der Drehzahl bezeichnet. Die Berechnung des Haupteffekts des Durchmessers erfolgt analog (vgl. Gleichung (1) und (2)):

$$\text{Haupteffekt der Drehzahl: } HE_{Drehzahl} = \frac{\vartheta_3 + \vartheta_4}{2} - \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} \quad (1)$$

$$\text{Haupteffekt des Durchmessers: } HE_{Durchmesser} = \frac{\vartheta_3 + \vartheta_1}{2} - \frac{\vartheta_2 + \vartheta_4}{2} \quad (2)$$

Alternativ kann die Berechnung auch mit Hilfe der Mittelwerte aus den beiden Einzeleffekten A und B erfolgen. Dabei ist der Effekt A der Drehzahleffekt bei hoher Faktorstufe des Durchmessers und der Effekt B der Effekt der Drehzahl bei niedriger Faktorstufe des Durchmessers.

Würde der Experimentator im Rahmen der Versuchsauswertung nur die Haupteffekte dieses Beispiels betrachten, so würde er die wichtige Information, dass eine Erhöhung der Drehzahl bei großem Durchmesser einen größeren Effekt besitzt als bei kleinem Durchmesser, übersehen. Dieser Effekt wird als Wechselwirkungseffekt bezeichnet. Er berechnet sich aus der halben Differenz der Einzeleffekte (A) und (B):

$$\text{Wechselwirkungseffekt: } WWE_{Drehzahl/Durchmesser} = \frac{(\vartheta_3 + \vartheta_1) - (\vartheta_4 + \vartheta_2)}{2} \quad (3)$$

Der Einbezug der Wechselwirkungseffekte im Rahmen der Versuchsauswertung ist bei unbekannten Systemen äußerst wichtig. Im ungünstigsten Fall kann es bei der Berechnung des Haupteffekts dazu kommen, dass sich die Einzeleffekte A und B durch die Mittelwertbildung gegenseitig aufheben. Der Experimentator würde daher aufgrund des nicht vorhandenen Haupteffekts zu dem Ergebnis kommen, dass der betrachtete Faktor den Prozess nicht beeinflusst. In Wahrheit beeinflusst der Faktor den Prozess divergierend, da der Effekt abhängig von dem zweiten an der Wechselwirkung beteiligten Faktors ist. Übertragen auf das obige Beispiel würde dies bedeuten, dass die Erhöhung der Drehzahl bei einem kleinen Durchmesser zu einer Verringerung der Temperatur und bei einem großen Durchmesser zu einer Erhöhung der Temperatur führen würde.

Identer - Neben den Effekten wird als weiter Größe der Gesamtmittelwert aller Versuche berechnet. Dieser als Identer bezeichnete Wert beschreibt die Lage der Versuchsergebnisse insgesamt.

Ausführlichere Informationen zu Effekten und deren Interpretation, sowie weitere hilfreiche Beispiele sind in /25/, /27/, /44/ und /108/ zu finden.

2.2.2 Statistische Grundlagen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den statistischen Grundlagen, die für eine erfolgreiche Auswertung von vollständigen und fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen notwendig sind. Es zeigt kompakt auf, wie sich statistisch signifikante Effekte von zufälligen unterscheiden lassen.

Bei der Durchführung von Versuchen wird der Experimentator immer feststellen, dass Versuchsergebnisse, trotz sorgfältiger Versuchsdurchführung bei der Wiederholung eines Einzelversuchs unter nominell gleichen Versuchsbedingungen, kleine Unterschiede aufweisen. Diese Streuungen der Versuchsergebnisse sind auf nicht beeinflussbare Störgrößen zurückzuführen. Diese sind bei jedem Versuch vorhanden und kaum zu eliminieren. Störgrößen können z. B. Unterschiede in den Umgebungsbedingungen und in den zu untersuchenden Ausgangsmaterialien, aber auch Messungenauigkeiten sein. Im Allgemeinen spricht man von Zufallsstreuungen der Versuchsergebnisse. Um sicher zu gehen, dass das Versuchsergebnis auf die Variation eines Faktors zurückzuführen und nicht zufällig ist, sind mehrere Wiederholungen von Einzelversuchen sowie das anschließende Durchführen eines Signifikanztests nötig. Generell gilt bei der Wiederholung von Einzelversuchen, je größer der Stichprobenumfang aus der Grundgesamtheit ist, desto aussagekräftigere Versuchsergebnisse erhält man.

Das repräsentative Versuchsergebnis wird in der Statistik als Erwartungswert μ und das zugehörige Streuungsmaß σ^2 als Varianz bezeichnet. Da die Berechnung dieser Parameter nicht möglich ist, werden sie mit Hilfe von Stichproben geschätzt. Als Schätzwert für den Erwartungswert dient der arithmetische Mittelwert \bar{y} der Stichprobe:

$$\mu \equiv \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \stackrel{\text{Def}}{=} \bar{y} \quad (4)$$

Die Schätzung der Varianz erfolgt anhand der Stichprobenstreuung s^2 :

$$\sigma^2 \equiv \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \stackrel{\text{Def}}{=} s^2 \quad (5)$$

Die positive Quadratwurzel $s = \sqrt{s^2}$ der Varianz wird als Standardabweichung der Stichprobe bezeichnet und drückt die Streuung der Messwerte um den arithmetischen Mittelwert aus /108/.

Nach der Schätzung der Erwartungswerte und der Berechnung der Effekte ist im folgenden Schritt ein Parameter test durchzuführen. Dieser ermöglicht mit Hilfe von statistischen Prüfverfahren eine Differenzierung von zufälligen und signifikanten Effekten. Ein solcher Parameter test wird als Signifikanztest bezeichnet. Er ermöglicht die Beurteilung der Effekte durch die Berechnung eines Vertrauensintervalls auf Grundlage gewählter Signifikanzniveaus. Dabei geht man davon aus, dass der Mittelwert \bar{y} einer Stichprobe vom Umfang n in der Nähe des wahren, aber unbekannten Mittelwerts μ der Grundgesamtheit liegt.

Zur Bestimmung des Vertrauensintervalls wird zunächst der Schätzwert $s_{\bar{y}}$ für die Standardabweichung des Mittelwerts bestimmt /108/:

$$s_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

Mit Hilfe der Student-Verteilung lässt sich nun das zweiseitige Vertrauensintervall des unbekannten Mittelwerts errechnen:

$$\bar{y} - t \cdot s_{\bar{y}} \leq \mu \leq \bar{y} + t \cdot s_{\bar{y}} \quad (7)$$

Den t-Wert entnimmt man aus der Tabelle 10-1 der Studentsche t-Verteilung. Der t-Wert ist dabei von dem Freiheitsgrad $f = n - 1$ und der gewählten Wahrscheinlichkeit abhängig. Dieses zweiseitige Vertrauensintervall für den Mittelwert μ gibt somit mit der gewählten Wahrscheinlichkeit α an, in welchem Bereich der unbekannte Mittelwert μ zu erwarten ist. Bei der Auswahl des Signifikanzniveaus ist zu beachten, dass mit steigendem Niveau auch die Breite des Vertrauensbereichs zunimmt /108/.

Für den Signifikanztest werden in der Regel der 95 %-, 99 %- und der 99,9 %-Vertrauensbereich bestimmt und den jeweiligen Effekten gegenübergestellt (vgl. Abbildung 2-9).

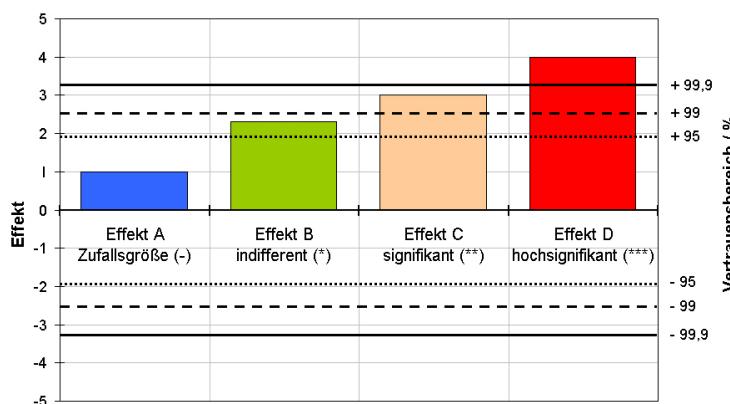


Abbildung 2-9: Signifikanztest – statistische Beurteilung von Effekten

Liegt der Effekt bereits innerhalb des 95 %-Vertrauensbereichs, so wird der Effekt als Zufallsgröße eingestuft, er ist statistisch nicht abgesichert. Liegt der Effekt erst innerhalb des 99 %-Vertrauensbereichs so wird er als indifferent eingestuft. Effekte zwischen dem 99 % und dem 99,9 %-Vertrauensbereich gelten als signifikant und Effekte über dem 99,9 %-Vertrauensbereich als hochsignifikant.

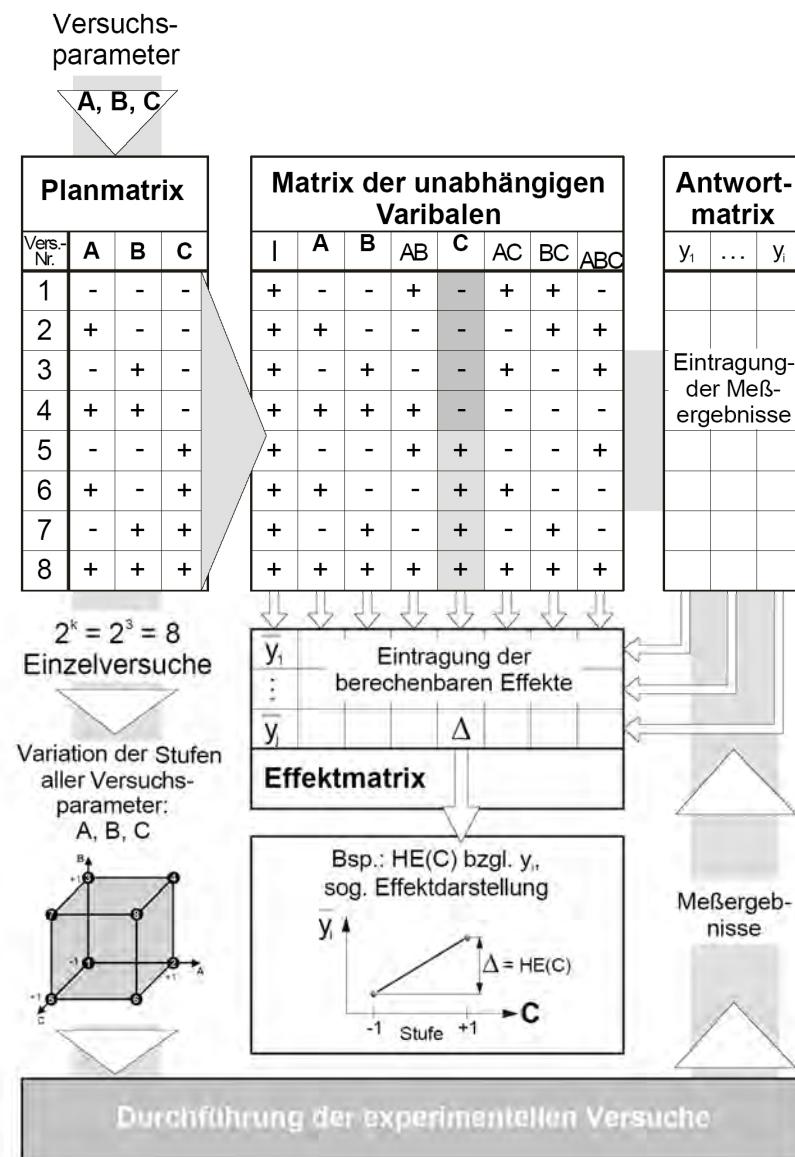
2.2.3 Versuchspläne erster Ordnung

Versuchspläne erster Ordnung kommen vornehmlich dann zum Einsatz, wenn aus einer Vielzahl von Einflussgrößen die Faktoren mit signifikantem Einfluss auf die Zielgröße herausgefiltert werden sollen. Diese Versuchspläne, bei denen die Faktoren auf zwei Faktorstufen untersucht werden, ermöglichen die Erfassung der Einflüsse der Faktoren und ihre Interaktionen. Somit lassen sich nach erfolgreicher Versuchsdurchführung lineare funktionale Zusammenhänge zwischen den Einfluss- und Zielgrößen aufstellen.

2.2.3.1 Vollfaktorielle Versuchspläne (2^k -Faktorenpläne)

Vollfaktorielle Versuchspläne erster Ordnung werden als 2^k -Faktorenpläne bezeichnet. Dabei steht die Basis für die Anzahl der Faktorstufen, der Exponent für die Zahl der varierten Faktoren und das Ergebnis für die Anzahl der Versuchspunkte einer Serie. Jeder neue Faktor, der im Rahmen eines Versuchs zusätzlich evaluiert werden soll, führt somit zu einer Verdopplung der Gesamtversuchsanzahl. Vollfaktorielle Versuchspläne zeichnen sich dadurch aus, dass innerhalb des Versuchs alle Faktoren gleichzeitig auf zwei Stufen variiert werden. Somit lassen sich auch die gegenseitigen Beeinflussungen der Einflüsse zweier und mehrerer Faktoren mit erfassen. Eine vollständige Auswertung der Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte ist möglich.

Anhand eines Beispiels, in dem die drei Faktoren A, B und C auf zwei Faktorstufen untersucht werden, wird im Folgenden die Erstellung und Auswertung eines vollfaktoriellen Versuchsplans exemplarisch erläutert. Die Untersuchung von drei Faktoren auf zwei Faktorstufen erfolgt mit Hilfe eines 2^3 -Faktorenplans. Abbildung 2-10 zeigt für einen solchen Versuchsplan die Planmatrix, Matrix der unabhängigen Variablen, Antwortmatrix und Effektmatrix.

Abbildung 2-10: Vollständiger 2³-Faktorenplan /20/

Planmatrix - Nachdem der Experimentator den Versuchsumfang, die zu untersuchenden Faktoren und die Faktorstufen festgelegt hat, beginnt dieser mit der Erstellung der Planmatrix. In der Planmatrix werden den Faktorstufenkombinationen systematisch Versuchsnummern zugeordnet. Dabei werden zur Verallgemeinerung der Verfahrensweise in der statistischen Versuchsplanung und um die spätere Auswertung des Versuchsplans zu vereinfachen, die natürlichen Einstellparameter der Faktorstufen in der Planmatrix nicht als Realwerte, sondern in normierter Form eingetragen. Zur Normierung der Werte werden diese linear transformiert. In den Faktorenplänen und Planmatrizen werden somit an Stelle der unteren natürlichen Einstellwerte eine „-1“ und an Stelle der oberen Werte eine „+1“ eingetragen. Vereinfachend wird in vielen Fällen auch die „1“ weggelassen, so dass für die untere Stufe „-“ und für die obere Stufe „+“ geschrieben wird /44/, /108/.

Matrix der unabhängigen Variablen - Die Planmatrix dient als Grundlage zur Erstellung der Matrix der unabhängigen Variablen. Diese setzt sich aus den Spalten der Planmatrix, einer Identerspalte sowie aus den Wechselwirkungsspalten zusammen. Bei einem 2³-Faktorenplan enthält sie die drei Hauptfaktorspalten A, B, und C, drei Zwei-Faktor-Wechselwirkungsspalten AB, AC, und BC sowie eine Drei-Faktor-Wechselwirkungsspalte ABC. Die Berechnung der jeweiligen Vorzeichenkolonnen erfolgt durch Multiplikation der Vorzeichenvektoren der an der Wechselwirkung beteiligten Faktoren. Für die Versuchsnummer 1 ergibt sich mit dem Vektor A = -1 und dem Vektor B= -1 der Wechselwirkungsvektor AB =1. Alle weiteren Vorzeichenvektoren werden analog berechnet /20/, /44/, /108/.

Antwortmatrix - Nach erfolgreicher Durchführung der Versuche werden alle Versuchsergebnisse in der Antwortmatrix, entsprechend ihrer Versuchsnummer und der damit verbundenen Versuchsparameterkombination, eingetragen. Im Bereich der Antwortmatrix werden die Mittelwerte \bar{y}_i aus allen Einzelversuchsergebnissen einer Versuchsnummer, sowie deren Standardabweichung s_i und Varianz s_i^2 berechnet. Diese bilden die Grundlage für die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse, da sie für den Signifikanztest benötigt werden /20/, /44/, /108/.

Effektmatrix - Die Effektmatrix dient zur Berechnung der Haupt- und Wechselwirkungseffekte. Die Berechnung der Effekte erfolgt durch die Multiplikation der jeweiligen Vorzeichenpalte mit den Versuchsergebnissen aus der Antwortmatrix und anschließender Addition. Das Ergebnis ist dann durch die halbe Anzahl der Faktorstufenkombinationen m zu dividieren. Formal lassen sich alle Effekt mit der folgenden Formel berechnen:

$$\text{Effekt} = \frac{2}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (\text{Vorzeichen} \cdot \bar{y}_i) \quad (8)$$

Die Effektmatrix kann durch einen Signifikanztest erweitert werden. Dieser dient zur Unterscheidung von signifikanten und zufälligen Effekten. Zur Berechnung der Vertrauensbereiche ist der Mittelwert der Varianzen innerhalb der Faktorstufenkombinationen zu bestimmen:

$$s_m^2 = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m s_i^2 \quad (9)$$

Die Standardabweichung des zu betrachtenden Effekts ergibt sich aus dem Mittelwert der Varianzen und der Gesamtzahl der Einzelversuche N.

$$s_{\bar{d}} = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot s_m^2} \quad (10)$$

Zur Bestimmung der t-Werte der Studentverteilung, für die Berechnung des zweiseitigen Vertrauensbereichs ist der Freiheitsgrad f des Systems nötig. Dieser ergibt sich wie folgt:

$$f = n - m \quad (11)$$

Die Beurteilung der Signifikanz der Effekte erfolgt durch den Vergleich des Effekts mit der Breite der 95 %-, 99 %- und 99,9 %-Vertrauensbereiche. Dabei werden alle Effekte, die größer als der 99,9 % Vertrauensbereich sind, als hochsignifikant eingestuft (entsprechend Kapitel 2.2.2). Sind die Effekte berechnet und auf Signifikanz geprüft, kann die eigentliche Interpretation der Versuchsergebnisse erfolgen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der große Vorteil von vollständigen faktoriellen Versuchsplänen in der vollständigen Erfassung aller Haupt- und Wechselwirkungseffekte liegt. Diese Versuchspläne besitzen eine sehr hohe Aussagefähigkeit. Als Nachteil dieser Versuchspläne ist der mit wachsender Zahl der Faktoren potentiell steigende Versuchsumfang zu nennen. In der Praxis werden vollfaktorielle Versuchspläne mit mehr als fünf Faktoren nur selten angewendet, da eine Analyse der Effekte praktisch kaum noch durchführbar erscheint /20/, /108/.

2.2.3.2 Fraktionelle faktorielle Versuchspläne (2^{k-p} -Faktorenpläne)

Da die Untersuchung von mehr als fünf Faktoren im Rahmen eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit einem erheblichen Versuchsaufwand verbunden ist ($2^5 = 32$ Versuchsreihen), wurden fraktionelle faktorielle Versuchspläne entwickelt. Diese werden häufig auch als Teilstufenpläne bezeichnet. Grundlage dieser Versuchspläne bilden vollfaktorielle Versuchspläne, bei denen auf die Auswertung von höheren Wechselwirkungen verzichtet wird, so dass sich an deren Stelle weitere neue Faktoren in den Versuchsplan integrieren lassen.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass bereits die Zweifach-Wechselwirkungseffekte wesentlich kleiner sind als die Haupteffekte. Dreifach- und höhere Wechselwirkungen sind dann meist so klein, dass sie im Bereich der Streuung liegen und demzufolge als vernachlässigbar gelten. Diese Vernachlässigung von Wechselwirkungen höherer Ordnung bildet die Grundlage bei der Erstellung von fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen /27/, /108/.

Fraktionelle faktorielle Versuchspläne werden auch als 2^{k-p} -Faktorenpläne bezeichnet. Dabei steht die Basis für die Anzahl der Faktorstufen, k für die Zahl der variierten Faktoren, p für die Anzahl der zusätzlich hinzugefügten Faktoren. Potenziert man die Basis mit der Differenz von k und p, so erhält man die Anzahl der Versuchsreihen einer Serie. Durch die zusätzliche Aufnahme der Faktoren können bei gleich bleibendem Versuchsumfang mehr Faktoren untersucht werden. Die Integration von zusätzlichen Faktoren führt jedoch zu einer Verringerung des Informationsgehalts des Versuchsplans, da es zu Effektvermengungen kommt. Sind zwei oder mehrere Effekte miteinander vermischt, so kann bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse nicht mehr unterschieden werden, welche Faktoren für den erfassten Effekt verantwortlich sind /27/,/108/.

Zum besseren Verständnis der Problematik der Vermengung wird im Folgenden die Erstellung eines fraktionellen faktoriellen Versuchsplans anhand eines 2^{4-1} -Faktorenplans erläutert. Grundlage eines solchen Plans bildet ein vollständiger 2^3 -Faktorenplan mit den Faktoren A, B und C, wie er bereits im Kapitel 2.2.3.1 beschrieben wurde. Anstelle der Dreifach-Wechselwirkung ABC wird nun der neue Faktor D in den Versuchsplan integriert. Der Faktor wird im Anschluss mit seiner Vorzeichenkolonne in die Planmatrix übertragen. Die Matrix der unabhängigen Variablen mit den Vorzeichen der Wechselwirkungen wird, analog zu den vollfaktoriellen Versuchsplänen, durch Multiplikation der beteiligten Faktoren berechnet (vgl. Abbildung 2-11).

| | | Matrix der unabhängigen Variablen | | | | | | | |
|---|---|-----------------------------------|---|---|---|----|----|----|-----|
| | | I | A | B | C | AB | AC | BC | ABC |
| 1 | + | - | - | - | - | + | + | - | |
| 2 | + | + | - | - | - | - | + | + | |
| 3 | + | - | + | - | - | + | - | + | |
| 4 | + | + | + | - | - | - | - | - | |
| 5 | + | - | - | + | - | - | - | + | |
| 6 | + | + | - | + | - | + | - | - | |
| 7 | + | - | + | + | - | - | + | - | |
| 8 | + | + | + | + | - | + | + | + | |

| | | Matrix der unabhängigen Variablen | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-----------------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | | I | A | B | C | D | AB | AC | AD | BC | BD | CD | ABC | ABD | ACD | BCD |
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | - | - | - | - | - | + |
| 2 | + | + | - | - | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | + | + |
| 3 | + | - | + | - | + | - | + | - | - | + | - | + | - | + | - | + |
| 4 | + | + | + | - | + | - | - | - | - | + | - | - | + | - | + | + |
| 5 | + | - | - | + | + | + | - | - | - | + | + | + | - | - | - | + |
| 6 | + | + | - | + | + | - | + | - | - | + | - | - | + | - | + | + |
| 7 | + | - | + | + | - | - | - | + | + | - | - | - | + | + | - | + |
| 8 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + |

| | | Matrix der unabhängigen Variablen | | | | | | | |
|---|---|-----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|----|----|
| | | I | ABCD | BCD | ACD | ABD | ABC | AB | AC |
| 1 | + | - | - | - | - | - | - | + | + |
| 2 | + | + | - | - | - | + | - | - | + |
| 3 | + | - | + | - | + | - | + | - | - |
| 4 | + | + | + | - | - | - | - | - | - |
| 5 | + | - | - | + | + | + | - | - | - |
| 6 | + | + | + | - | + | - | - | + | - |
| 7 | + | - | + | + | + | - | - | - | + |
| 8 | + | + | + | + | + | - | - | + | + |

Abbildung 2-11: Erzeugung eines 2^{4-1} -Faktorenplans

Auf diese Weise erhält man einen 2^{4-1} -Faktorenplan, der die Untersuchung von vier Faktoren in nur acht Versuchsreihen ermöglicht. Die Auswertung teilst faktorieller Versuchspläne erfolgt analog zu den vollfaktoriellen Versuchsplänen durch Berechnung der Effekte und anschließendem Signifikanztest. Bei Betrachtung und Vergleich der Vorzeichenkolonnen der Hauptfaktoren und der Wechselwirkungen des entstandenen 2^{4-1} -Faktorenplans ist festzustellen, dass jeder Hauptfaktor mit einer Dreifach-Wechselwirkung und die Zweifach-Wechselwirkungen untereinander vermischt sind. Solche nicht mehr trennbaren Effekte werden als Aliasse bezeichnet. Durch die Aliasse $AB=CD$, $AC=BD$ und $AD=BC$ dieses Versuchsplans ist eine eindeutige Auswertung und Interpretation der Zweifach-Wechselwirkungen nicht mehr möglich, da die Ursachen dieser Effekte nicht mehr eindeutig zuzuordnen sind (vgl. Abbildung 2-11). Als Versuchsergebnis erhält man immer die Summe der miteinander vermischten Effekte und nicht den Einzeleffekt. Ausgehend von der Vernachlässigung der Dreifach-Wechselwirkungen ist jedoch eine Auswertung der Haupteffekte möglich.

Mit 2^{4-1} -Versuchsplänen besitzt der Experimentator ein Instrument, welches die Erfassung der Haupteffekte von vier Faktoren in nur acht Versuchsreihen ermöglicht. Zweifach-Wechselwirkungen lassen sich mit diesem Versuchsplan nicht zuverlässig interpretieren. Im Gegensatz zu einem vollständigen Versuchsplan wird jedoch die Hälfte der Versuche eingespart.

Teilst faktorielle Pläne eignen sich hervorragend zum Aussieben von relevanten Einflussgrößen aus einer Vielzahl von Einzelfaktoren und werden daher auch als Screening-Versuchspläne bezeichnet. Die bei diesen Versuchsplänen vorliegende Vermischung von Effekten ist jedoch immer mit der Gefahr von Fehlinterpretationen der Versuchsergebnisse verbunden. Diese treten vornehmlich dann auf, wenn fälschlicherweise Wechselwirkungen höherer Ordnung vernachlässigt werden. Ist eine solche Wechselwirkung mit einem Hauptfaktor vermischt, so wird die Ursache des Effekts falsch eingestuft.

Das Risiko von Fehlinterpretationen hängt stark vom Typ der Vermischung der Effekte ab. Sind z. B. Haupteffekte mit Zweifach-Wechselwirkungseffekten vermischt, so ist dieser Typ der Vermischung als kritisch einzustufen. Sind die Haupteffekte jedoch mit Vierfach-Wechselwirkungen vermischt, so ist diese Vermischung unkritisch.

Bei fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen lässt sich in Abhängigkeit der gewählten Zuordnung bereits im Vorfeld bestimmen, welche Arten von Effekten miteinander vermischt sind. Dies ermöglicht eine Klassifikation der Versuchspläne, welche als Auflösung des Versuchsplans angegeben und mit römischen Buchstaben gekennzeichnet wird. Tabelle 2-1 enthält eine Auflistung der wichtigsten Auflösungen, die häufig auch als Lösungstyp bezeichnet werden sowie deren Bewertung.

| Auflösung | Vermengung | werden vernachlässigt | Bewertung |
|-----------|--|------------------------|-------------------------|
| III | Faktor mit 2FWW | 2FWW und höhere | kritisch |
| IV | Faktor mit 3FWW 2FWW mit 2FWW | 3FWW und höhere | weniger kritisch |
| V | Faktor mit 4FWW 2FWW mit 3FWW | 3FWW und höhere | unkritisch |
| VI | Faktor mit 5FWW 2FWW mit 4FWW 3FWW mit 3FWW | 4FWW und höhere | unkritisch |

Tabelle 2-1: Bewertung der Vermengungen teilst faktorieller Versuchspläne /27/

Bei der Auswahl des Versuchsplans ist stets zu beachten, dass sich zwar mit steigender Anzahl der Faktoren und Verringerung der Anzahl der Faktorstufenkombinationen mehr Faktoren innerhalb eines Versuchs untersuchen lassen, dies sich jedoch negativ auf die Auflösung und somit den Informationsgehalt des Versuchsplans auswirkt. Die Gefahr von Fehlinterpretationen steigt. Tabelle 2-2 zeigt eine Auswahl möglicher fraktioneller faktorieller Versuchspläne mit ihrer maximalen Auflösung in Abhängigkeit von der Anzahl der Faktoren k und der Anzahl der Faktorstufenkombinationen m /27/.

| m \ k | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 4 | 2^{3-1} III | | | | | | | | | |
| 8 | 2^3 vollst. | 2^{4-1} IV | 2^{5-2} III | 2^{6-3} III | 2^{7-4} III | | | | | |
| 16 | | 2^4 vollst. | 2^{5-1} V | 2^{6-2} IV | 2^{7-3} IV | 2^{8-4} IV | 2^{9-5} III | 2^{10-6} III | 2^{11-7} III | 2^{12-8} III |
| 32 | | | 2^5 vollst. | 2^{6-1} VI | 2^{7-2} IV | 2^{8-3} IV | 2^{9-4} IV | 2^{10-5} IV | 2^{11-6} IV | 2^{12-7} IV |
| 64 | | | | 2^6 vollst. | 2^{7-1} VII | 2^{8-2} V | 2^{9-3} IV | 2^{10-4} IV | 2^{11-5} IV | 2^{12-6} IV |
| 128 | | | | | 2^7 vollst. | 2^{8-1} VIII | 2^{9-2} VI | 2^{10-3} V | 2^{11-4} V | 2^{12-5} IV |

Tabelle 2-2: Auflösung fraktioneller faktorielle Versuchspläne /27/

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass fraktionelle faktorielle Versuchspläne erster Ordnung dem Experimentator die Möglichkeit bieten, mit einem, im Gegensatz zu vollfaktoriellen Versuchsplänen, geringen Versuchsaufwand eine Großzahl an Faktoren und deren Auswirkungen auf das Versuchsergebnis zu untersuchen. Durch den Signifikanztest lassen sich wichtige von unwichtigen Einflussgrößen trennen. Die wichtigen Faktoren können im Rahmen von Folgeversuchen dann gezielt detaillierter untersucht werden. Dem Experimentator sollte jedoch immer bewusst sein, dass er bei Versuchsplänen ab einer Auflösung unter V das Risiko von Fehlinterpretationen der Versuchsergebnisse sehr hoch ist. Die Anwendung hochvermengter Versuchspläne ist nur bei bereits ausreichender Kenntnis des Prozesses vor Versuchsbeginn zu empfehlen.

3 Stand der Technik

3.1 Fließlochformen

Fließlochformen ist ein junges Fertigungsverfahren, welches erst seit Mitte der siebziger Jahre des vorherigen Jahrhunderts industriell eingesetzt wird. Neben den zahlreichen Patenten /45/ bis /107/ sind bis heute drei wissenschaftliche Arbeiten /21/, /29/ und /43/ auf dem Gebiet des Fließlochformens erschienen.

3.1.1 Kinematik des Fließlochformprozesses

Die erste wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet des Fließlochformens entstand Anfang der achtziger Jahre an der Universität in Siegen. Dort untersucht Kretschmer in /29/ die Kinematik des Umformvorgangs. Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden in /29/ und /36/ veröffentlicht. Im Rahmen der Arbeit /29/ wurden Kraft- und Momentverläufe eines kraftgesteuerten Fließlochprozesses erfasst, beschrieben und in einzelne Phasen unterteilt. Durch grafisches Ausplanimetrieren der Flächen unterhalb der Kraft- und Momentverläufe wurden die Rotations- und Translationsarbeit experimentell ermittelt.

Parallel zur messtechnischen Erfassung der Translationsarbeit wurde ein Ansatz zur rechnerischen Bestimmung des Arbeitsbedarfs erarbeitet. Die Umformarbeit wurde mit Hilfe des Röhrenmodells der elementar theoretischen Plastomechanik berechnet. Grundlage dieses Modells bildet die Annahme, dass die Vergleichsformänderung lediglich von der aufgewendeten Umformarbeit und nicht von der Art und Weise der Umformung abhängt. Für die Berechnung wurde das umzuformende Werkstoffvolumen in gleich große Volumenelemente aufgeteilt (Abbildung 3-1) und die für die Umformung dieser Elemente benötigte Umformarbeit mit Hilfe der Vergleichsformänderung φ_i und der Fließspannung k_f bestimmt. Durch Aufsummierung dieser spezifischen Arbeiten wurde der benötigte Gesamtarbeitsbedarf abgeschätzt /10/.

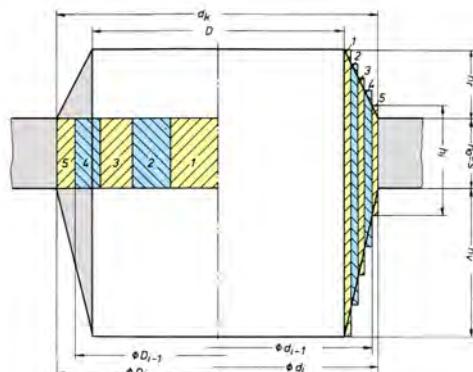


Abbildung 3-1: Röhrenmodell nach Kretschmer /29/

Ende der Neunziger Jahre wurde an der Universität Kassel begonnen, sich mit dem Fließlochformen zu beschäftigen. In Bezug auf die Prozesskinematik wurden dort Prozesse mit NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen, mit denen sich Versuche mit gestuften Technologiedaten realisieren lassen, erforscht.

Im Rahmen der Arbeit „Fließlochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen“ wurde das Fließlochformen in Aluminium, Edelstahl und Baustahl erforscht. Es wurden Untersuchungen mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt, um den Einfluss des Werkstoffes auf die Vorschubkraft und das Drehmoment zu erfassen. Des Weiteren wurden Kraft- und Momentverläufe bei unterschiedlichen Blechdicken in Kombination mit variierenden Drehzahlen und Fließlochformerdurchmessern erfasst und beschrieben. Im Rahmen dieser Versuche konnte aufgezeigt werden, dass die In-Prozess-Kenngrößen Axialkraft und Drehmoment maßgeblich durch die Prozessführung bestimmt werden /21/.

In einem weiteren Kapitel dieser Arbeit wird das Fließlochformen mit gestuften Technologiedaten behandelt. Hier wurden Versuche mit gestuften Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt und die Abhängigkeit der Kraft- und Momentverläufe von dem Zeitpunkt des Umschaltvorgangs erfasst. Es konnte gezeigt werden, dass die optimale Lage des Umschaltpunkts sowohl von dem zu bearbeitenden Werkstoff, dem verwendeten Werkzeugdurchmesser, der Drehzahl als auch der Vorschubgeschwindigkeit abhängt /21/. Die geschickte Wahl des Umschaltpunkts kann zu einer Entlastung der Bearbeitungsmaschine und des Fließlochwerkzeugs führen und die Buchsenqualität stark beeinflussen.

3.1.2 Die Buchsenqualität

Die Buchsenqualität ist die einschneidende Zielgröße, wenn es darum geht, Fließlochformen bei der Herstellung eines Produkts in den Produktionsprozess zu implementieren. Dabei ist in den meisten Fällen nicht nur die Belastungsgrenze der Buchse, sondern auch die optische Buchsenqualität von zentraler Bedeutung. Gerade die Einrisse am unteren Buchsenauslauf führen in vielen Fällen zur Ablehnung des Verfahrens. Aus diesem Grund wurde schon früh versucht, Einfluss auf die Rissbildung und auf die Buchsenlänge zu nehmen. Wissenschaftlich ist dies in Kassel durchgeführt worden /21/. Dort wurde bei unterschiedlichen Werkstoffen die Buchsenqualität in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit und der Drehzahl erfasst und gegenübergestellt.

Zur Beurteilung der Buchsenqualität wurde das Verhältnis von Einrisslänge am Buchsenende zur Buchsenlänge gebildet:

$$\delta = \frac{\text{Risslänge}}{\text{Buchsenlänge}} \quad (12)$$

Diese Verhältniszahl diente in /43/ als charakteristische Kenngröße zur Beurteilung der Buchsenqualität. In /21/ wurde auf Grundlage dieser Kenngröße eine Einstufung in vier Qualitätsgruppen vorgenommen.

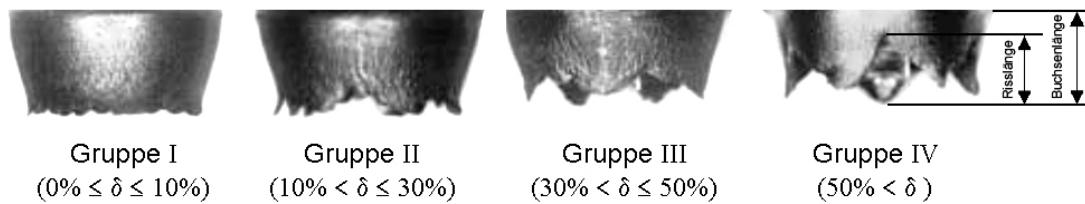


Abbildung 3-2: Qualitätsgruppen von Fließlochbuchsen (nach /21/)

Zusätzlich zu der Erfassung der Buchsenqualität in Form der Vermessung der Buchsenlänge und der Risslänge wurden metallografische Analysen der Buchsen durchgeführt, um so den Einfluss der während des Bearbeitungsprozesses entstehenden hohen Temperaturen auf das Werkstückgefüge zu untersuchen. Dabei konnten die Hauptzonen der Materialumformung, Rekristallisationsbereiche sowie Bereiche höchster Kristallverformung lokalisiert werden. Durch Gefügeuntersuchungen bei Buchsen, deren Herstellung mit unterschiedlichen Bearbeitungsparametern erfolgte, wurde der Einfluss der Technologiedaten auf die Gefügeausbildung in Blech und Buchse nachgewiesen /43/.

Dass sich das Fertigungsverfahren Fließlochformen bei einer Vielzahl unterschiedlichster Werkstoffe einsetzen lässt, wurde bereits in Kapitel 2.1 aufgezeigt. Da zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Fließlochbuchsen jeder Werkstoff eine gezielte Anpassung der Bearbeitungsparameter verlangt, waren Prozessparameteranpassungen zur Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe zentraler Bestandteil wissenschaftlicher Arbeiten /21/, /43/, /29/, /21/.

3.1.3 Formerwerkstoffe, Beschichtung und Oberflächenqualität

Im Rahmen der Arbeit „Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des Fließlochformens“ wurde der Einfluss der Oberflächenqualität auf den Bearbeitungsprozess untersucht. Als Vergleichsgrößen dienten die Maximalkraft und das Maximalmoment. Bei den durchgeführten Versuchsreihen kamen unbeschichtete, mit (TiAl)N beschichtete, geschliffene, aufgerauhte und polierte Werkzeuge aus Hartmetall zum Einsatz. Die Untersuchungen zeigten, dass die Reibung eine wesentliche Rolle im Prozess spielt. Die von Lopes in /43/ durchgeführten Untersuchungen im Bereich der Werkzeugbeschichtung belegten, dass sich durch die Werkzeugbeschichtung das Adhäsionsverhalten von Werkstückwerkstoff und Werkzeug reduzieren lässt. In /24/ zeigte Kerkhofs, dass sich durch die Verwendung einer (Ti,Al)N Beschichtung auch die Standzeit der Fließlochformer erhöht.

In /43/ wurde erstmals die Verwendung von Keramik als Alternative zu Hartmetall bei der Herstellung von Fließlochformern untersucht. Diesbezüglich wurden Versuche mit Fließlochformern aus Cermet durchgeführt und ausgewertet. Fazit dieser Untersuchungen war, dass es bei allen Werkzeugen trotz der Verwendung von unterschiedlichen Drehzahlen und Vorschubgeschwindigkeiten zu einem frühzeitigen Versagen der Werkzeuge durch Werkzeugbruch kam. Infolgedessen wurde Keramik für das Fließlochformen als nicht geeignet eingestuft.

3.1.4 Werkzeuggeometrien der Fließlochformerhersteller

Die Werkzeuggeometrie der Fließlochformer hat sich seit der Patentmeldung von 1976 /54/ nicht wesentlich verändert. Dies belegen die aktuellen Werkzeuggeometrien der Fließlochformerhersteller, die einen nahezu identischen Aufbau besitzen und sich nur in einigen wenigen Geometriegrößen voneinander unterscheiden (vgl. Tabelle 3-1). Hauptunterscheidungsmerkmal der Fließlochformervarianten im Bereich der Formstollengeometrie ist die Anzahl der Formstollen. Sie beträgt je nach Hersteller drei oder vier. Die Differenz von maximaler und minimaler Formstollenhöhe liegt bei allen Werkzeuggeometrien bei ca. 96 %.

Im Bereich der Fließlochformerkontur sind die Unterschiede deutlicher. Während der Spitzwinkel und der Konuswinkel bei allen noch annähernd identisch ist, so unterscheiden sich die Werkzeuge in ihren Übergangsradien von Spitze zu Konus und vom Konus zum Zylinder voneinander. Hier haben einige Hersteller versucht, die abrupten Übergänge der einzelnen Formerbereiche harmonischer zu gestalten, um so den Werkstückfluss positiv zu beeinflussen.

| | | | | |
|--|---|---|--|---|
| |  |  |  |  |
| Bezeichnung | A | B | C | D |
| Spitzenwinkel (α) | 96 ° | 90 ° | 87 ° | 93 ° |
| Konuswinkel (β) | 41 ° | 35 ° | 36 ° | 35 ° |
| Länge Zylinder (L_z) | 6,88 mm | 8,87 mm | 9,85 mm | 7,26 mm |
| Länge Zylinder und Konus (L_{zK}) | 15,93 | 21,45 | 21,57 | 20,51 mm |
| Gesamtlänge (L_{z-ges}) | 18,76 mm | 22,56 mm | 22,73 mm | 22,61 mm |
| Radius Spitze-Konus ($R_{Sp/Ko}$) | 2,4 mm | - | - | 3,3 mm |
| Radius Konus-Zylinder ($R_{Ko/Zy}$) | 11,9 mm | 11,6 mm | 8,6 mm | 29 mm |
| Radius Zylinder-Bund ($R_{Zy/Bu}$) | 1,26 mm | 1,14 mm | 0,67 mm | 1,36 mm |

Tabelle 3-1: aktuelle Werkzeuggeometrien führender Fließlochformerhersteller

3.1.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Fließlochformen noch ein junges Verfahren ist. Dies belegt auch die im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren geringe Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten auf diesem Themengebiet. Die bisherigen Forschungsaktivitäten konzentrierten sich primär auf die Prozessbeschreibung und die Anpassung der Bearbeitungsparameter an bestimmte Werkstoffe. Die Einstufung der Buchsenqualität durch die Erfassung und Auswertung der Buchsen- und Risslänge sowie durch metallografische Untersuchungen der Gefügestruktur bildete die Grundlage für eine qualitative Beurteilung der Prozessparameter. Zur Beurteilung der Werkzeugbelastung wurden in In-Prozess-Messungen die Axialkraft, das Drehmoment und die Prozesstemperatur aufgezeichnet und ausgewertet. Eine wissenschaftliche Untersuchung der Möglichkeit der Beeinflussung der Buchsenqualität durch Anpassung der Werkzeuggeometrie ist jedoch bisher nicht erfolgt.

3.2 Statistische Versuchsplanung

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die wichtigste deutschsprachige Literatur auf dem Gebiet der statistischen Versuchsplanung. Dabei wird explizit auf die Werke eingegangen, welche einen direkten Praxisbezug haben. Darüber hinaus werden ausgesuchte aktuelle Projekte vorgestellt, welche sich mit der Weiterentwicklung, Durchführung und Anwendung von DoE beschäftigten.

3.2.1 Einführung

Als Einstieg in die deutschsprachige Literatur der statistischen Versuchsplanung sind die Arbeiten von Kleppmann /27/ und Scheffler /108/ zu empfehlen. Beide geben einen Überblick über Vor- und Nachteile statistischer Versuchsplanung. Zusammen mit der Arbeit von Klein /25/ erhält man so Einblicke in die Methoden der klassischen Versuchsplanung, die Methoden von Taguchi und Shainin. Diese Arbeiten sind praxisorientiert ausgerichtet, so dass man sie als Hilfsmittel für das erstmalige zielgerichtete Planen, Durchführen und Auswerten von Versuchen empfehlen kann.

Als weitere Einführung in die statistische Versuchsplanung ist die Arbeit von Ament /2/ zu nennen. Er geht insbesondere auf Erstellung und Auswertung von vollfaktoriellen und teilst faktoriellen Versuchsplänen ein.

Gundlach fasst in /20/ die Grundlagen der einzelnen Methoden, Verfahren und Versuchspläne der statistischen Versuchsplanung zusammen. Darüber hinaus entwickelte er einen „Problemzyklus der statistischen Versuchsplanung“, welcher die Vorgehensweise von der Projektinitiierung über die Versuchsstrategie und Versuchsdurchführung bis zur Validierung der Versuchsergebnisse ausführlich in sieben Phasen beschreibt.

Orth und Wenzel geben in /44/ einen Leitfaden für die modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung. Sie gehen dabei detailliert auf die wichtigsten Standardversuchspläne, auf D-Optimale Versuchspläne sowie auf die Modellierung und Optimierung von Versuchsplänen ein.

3.2.2 Weiterentwicklung und Ergänzung des Design of Experiments

Neben der Beschreibung der grundlegenden statistischen Methoden haben sich in den letzten Jahren die Wissenschaftler vermehrt auf die Weiterentwicklung und Ergänzung des Design of Experiments konzentriert.

In diesem Zusammenhang stellen Hövelmann et al. 1993 in /23/ ein Konzept vor, mit welchem man bei prozessorientierter Fertigung auf aufwendige Betriebsversuche im Rahmen der Qualitätsverbesserung verzichten kann. Dabei wird auf die während des Fertigungsprozesses kontinuierlich erfassten und in Datenbanken gespeicherten Messdaten

zurückgegriffen. Durch die Streuung der Prozessparameter lässt sich um diese Daten ein Versuchsplan konstruieren, der eine statistische Analyse ermöglicht, mit deren Hilfe sich die Abhängigkeit der Zielgrößen von den Parametereinstellungen erfassen lässt. Diese dienen im Folgenden als Grundlage für den Optimierungsprozess.

Chao und Hwang stellen 1997 in /13/ am Beispiel der Fräsbearbeitung von carbonfaser-verstärkten Kunststoffen zwei Möglichkeiten der Verbesserung der Taguchi Methode vor. Dabei gehen sie detailliert auf die fünf Schritte der Taguchi Methode ein. Durch die Bestätigung von Versuchsdaten mittels Screening-Versuchen und die Verwendung eines Regressionsmodells stellen sie zwei Methoden vor, mit deren Hilfe sich einige Nachteile der klassischen Taguchi Methode umgehen lassen. In diesem Zusammenhang beschreiben sie die Vor- und Nachteile von hoch vermengten Versuchsplänen und gehen somit auf die Problematik von Interaktionseffekten ein.

Kleppmann stellt 1999 in /26/ ein Ablaufdiagramm für die Auswahl eines geeigneten Verfahrens der Versuchsplanung zur Verbesserung von Produkten und Prozesses vor. Dabei unterscheidet er zwischen aktiven Versuchen, bei denen vorher festgelegt wird, welche Faktoren untersucht werden, und passiven Versuchen, bei denen Bekanntes zusammengetragen und statistisch ausgewertet wird. Im Rahmen der Verfahren geht er auf Screening-Versuchspläne, das Simplexverfahren, die Methode des steilsten Anstiegs, zentral zusammengesetzte Versuchspläne und auf evolutionäre Strategien ein.

Erdbrügge et al. befassten sich 2001 in /18/ mit der Problematik von qualitativen Zielgrößen bei der Auswertung statistischer Versuchspläne. Am Beispiel der Faltenbildung beim CNC gesteuerten Drücken stellen sie ein Verfahren vor, mit dem sich Ausprägungen in Kategorien unterteilen lassen. Diese Einteilung ermöglicht die Durchführung von Screening-Versuchen, um so die prozessrelevanten Einflussfaktoren zu identifizieren. Auf dieser Basis wurde eine Optimierung des Prozesses durchgeführt.

3.2.3 Anwendung

Die Anwendungsgebiete der statistischen Versuchsplanung sind sehr vielfältig. Ihr Einsatzgebiet liegt überall dort, wo Produkte und Fertigungsprozesse zu optimieren sind. Somit wird DoE branchenübergreifend eingesetzt. Die folgenden Veröffentlichungen sollen einen Einblick in die Anwendungsgebiete von DoE im Bereich des Maschinenbaus der letzten Jahre geben.

Alauddin und Baradie stellen 1997 in /1/ mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung ein Regressionsmodell zweiter Ordnung zur Lebensdauerberechnung von Fräsern bei der Schllichtbearbeitung von Stahl auf. Durch das mathematische Modell ist es ihnen möglich, für unterschiedliche Operationen die bestmöglichen Bearbeitungsparameter zu bestimmen. Grundlage des Regressionsmodells bildet ein durch Zentralwertversuche ergänzter vollfaktorieller 2^3 -Versuchsplan.

In /15/ beschreiben Colgan und Monaghan wie sie 2003 mit der Methode von Taguchi die wichtigsten Einflussgrößen beim Tiefziehen bestimmt haben. Browne und Hillery nutzen in /12/ ebenfalls die Methode von Taguchi, um ein Screening beim Tiefziehen durchzuführen. Sie ergänzten ihre Untersuchungen zusätzlich durch einen vollfaktoriellen 3^5 -Versuchsplan.

Choudhury und Bartarya nutzen 2003 in /14/ das Design of Experiments zusammen mit neuronalen Netzen, um den Einfluss unterschiedlicher Geometrieparameter der Werkzeugschneide auf die Prozesstemperatur und die Oberflächenqualität bei der Drehbearbeitung zu erfassen. Sie stellen ihre Regressionsmodelle auf Basis von vollfaktoriellen 3^3 -Versuchsplänen auf.

Daun und Sheppard führen in /17/ durch die Kombination von FEM und der Taguchi Methode eine Parameterstudie zum Walzen von Aluminiumlegierungen durch. Lee nutzt in /41/ ebenfalls diese Methodenkombination, um so durch seine Simulationsergebnisse eine Parameterstudie zum Thema Tiefziehen durchzuführen. Auch Lin greift auf die Taguchi Methode zurück, um in /42/ den Einsatz von TiN beschichteten Fräswerkzeugen zu analysieren und zu optimieren.

Ghani et al. führen 2003 in /19/ auf Grundlage von Taguchi mittels eines vollfaktoriellen 3^3 -Versuchsplans eine Optimierung der Schllichtbearbeitung beim Fräsen durch. Sie erfassen den Einfluss von drei Versuchsparametern auf die Oberflächenqualität und die Prozesskräfte, um so wichtige von unwichtigen Faktoren zu unterscheiden. Auch Davim nutzt im Rahmen einer Parameterstudie zum Thema Drehen in /16/ die Methode von Taguchi und einen vollfaktoriellen 3^3 -Versuchsplan. Er erfasst damit den Einfluss der Schneidbedingungen auf die Prozessparameter und die Bauteilqualität. In beiden Fällen wird für die Datenanalyse eine Varianzanalyse eingesetzt.

2004 wurde eine Parameterstudie zum Schleifen von Krajnik und Kopac in /28/ durchgeführt. Sie nutzten für ihre Untersuchungen einen hoch vermengten Versuchsplan mit dem sie sieben Faktoren auf zwei Faktorstufen in nur acht Versuchsreihen erfolgreich untersuchten. Wechselwirkungen wurden jedoch nicht berücksichtigt.

4 Versuchsplanung und Versuchstechnik

4.1 Systemanalyse

Ziel der Arbeit ist die systematische Parameteridentifikation der Einflussgrößen beim Fließlochformen mittels statistischer Versuchsplanung. Um einen zielorientierten Versuchsplan aufstellen zu können, ist zunächst eine detaillierte Beschreibung der Ausgangssituation notwendig. Dies beinhaltet neben der Erfassung der Grundlagen (vgl. Kapitel 2) und des Stands der Technik (vgl. Kapitel 3) eine ausführliche Beschreibung aller relevanten Einfluss- und Zielgrößen.

Das Unterkapitel Systemanalyse beschäftigt sich mit der Beschreibung und Analyse der Einfluss- und Zielgrößen beim Fließlochformen. Darüber hinaus enthält es, ausgehend von den bisherigen Prozesskenntnissen, erste Prognosen über die zu erwartende Wirkung einzelner Faktoren auf ausgewählte Zielgrößen. Es bildet die Grundlage für die spätere Auswahl der zu untersuchenden Einflussgrößen.

4.1.1 Einflussgrößen

4.1.1.1 Werkzeuggeometrie

Zur Erfassung aller möglichen Einflussfaktoren, die auf eine Variation des Fließlochformers zurückzuführen sind, ist eine detaillierte Betrachtung und Beschreibung der Werkzeuggeometrie notwendig. Dazu wird die Werkzeuggeometrie in die Teilbereiche Werkzeugkontur und Formstollengeometrie unterteilt. Im Rahmen dieser Unterteilung werden die Geometriefaktoren der einzelnen Teilbereiche analysiert und deren Auswirkung auf die Werkzeuggeometrie mathematisch beschrieben. Zusammengesetzt entsteht so eine vollständige Beschreibung der Fließlochformer-Mantelfläche, welche gleichermaßen für eine mathematische Vorbetrachtung der Auswirkungen der Geometrieparametervariationen auf das Werkzeug und den Prozess, als auch als Grundlage für die Erstellung eines parametergesteuerten Programms zur Erzeugung des Fließlochformerschleifcodes Verwendung findet.

Werkzeugkontur / Standardgeometrie - Zur mathematischen Beschreibung herkömmlicher Fließlochformerkonturen, wie man sie bei den etablierten Fließlochformerherstellern derzeit findet, ist eine Unterteilung des Arbeitsbereichs in sieben Einzelbereiche notwendig (Abbildung 4-1). Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Fließlochformer auf Grundlage dieser Werkzeugkonturvariante als Standardgeometrie bezeichnet.

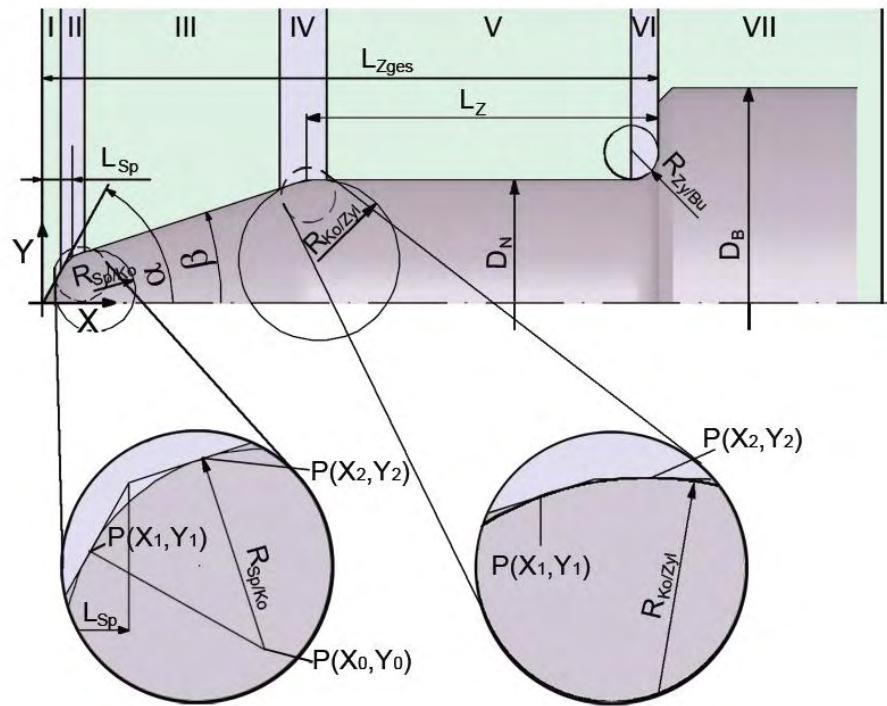


Abbildung 4-1: Konturparameter Standardgeometrie

Der Bereich I der Werkzeugkontur umfasst die Werkzeugspitze. Er wird durch die Angabe des Spitzewinkels festgelegt und durch die Länge der Spitze begrenzt. Mathematisch wird dieser Bereich durch den folgenden analytischen Ausdruck vollständig beschrieben:

$$f_{sp}(x) = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot x \quad (13)$$

Der Bereich III beschreibt den Werkzeugkonus. Dieser wird durch den Konuswinkel festgelegt und durch die Länge der Werkzeugspitze und des Anformbereichs begrenzt:

$$f_{ko}(x) = L_{sp} + \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot (x - L_{sp}) \quad (14)$$

Der Bereich II zwischen Werkzeugspitze und Werkzeugkonus wird durch einen Übergangsradius beschrieben. Diesem liegt die allgemeine Kreisgleichung zu Grunde:

$$f_{RadiusSp/Ko}(x) = Y_0 + \sqrt{R_{Sp/Ko}^2 + 2 \cdot x \cdot X_0 - X_0^2 - x^2} \quad (15)$$

Für die Berechnung der Werkzeugkontur sind der Kreismittelpunkt ($X_0; Y_0$) sowie der Startpunkt ($X_1; Y_1$) und der Endpunkt ($X_2; Y_2$) des Kreisabschnitts zu bestimmen.

Zur Bestimmung der Unbekannten dienen die folgenden Beziehungen:

- Am Startpunkt ($X_1; Y_1$) schneiden sich die Kreisfunktion $f_{RadiusSp/Ko}(x)$ und die Werkzeugspitzenfunktion $f_{Sp}(x)$:

$$f_{RadiusSp/Ko}(x_1) = f_{Sp}(x_1) \quad (16)$$

- Am Endpunkt ($X_2; Y_2$) schneiden sich die Kreisfunktion $f_{RadiusSp/Ko}(x)$ und die Funktion des Konusbereichs $f_{Ko}(x)$:

$$f_{RadiusSp/Ko}(x_2) = f_{Ko}(x_2) \quad (17)$$

- Die Steigung der Tangente der Kreisfunktion am Startpunkt ($X_1; Y_1$) entspricht der Steigung der Funktion der Werkzeugspitze:

$$f'_{RadiusSp/Ko}(x_1) = f'_{Sp}(x_1) \quad (18)$$

- Die Steigung der Tangente der Kreisfunktion am Endpunkt ($X_2; Y_2$) entspricht der Steigung der Funktion des Konusbereichs:

$$f'_{RadiusSp/Ko}(x_2) = f'_{Ko}(x_2) \quad (19)$$

Durch Auflösen des Gleichungssystems erhält man die Bestimmungsgleichungen der sechs Unbekannten und hat auf diese Weise den Übergangsbereich von der Werkzeugspitze zum Konus in Abhängigkeit eines frei wählbaren Übergangsradius definiert.

$$A = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right); B = \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (20) \text{ u. } (21)$$

$$X_0 = \frac{R_{Sp/Ko} \cdot \left(\sqrt{A^2 + 1} - \sqrt{B^2 + 1} \right) - L_{Sp} \cdot A + 1}{A - B} \quad (22)$$

$$X_1 = \frac{R_{Sp/Ko} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{A^2 + 1}} \cdot (A \cdot B + 1) - \sqrt{B^2 + 1} \right) + L_{Sp} \cdot B - 1}{A - B} \quad (23)$$

$$X_2 = \frac{R_{Sp/Ko} \cdot \left(\sqrt{A^2 + 1} + \sqrt{\frac{1}{B^2 + 1}} \cdot (A \cdot B + 1) \right) - L_{Sp} \cdot B + 1}{A - B} \quad (24)$$

Die Y-Koordinaten lassen sich durch Einsetzen der X-Koordinaten in die Grundgleichungen (13), (14) und (15) berechnen. Analog wird dies auch für die restlichen drei Bereiche IV bis VI der Werkzeugkontur durchgeführt, so dass letztendlich eine abschnittsweise definierte Gesamtfunktion der Werkzeugkontur entsteht:

$$f_{Kontur-Standard} = \begin{cases} f_{Sp} & \text{für } 0 \leq x < X_1, \\ f_{Sp/Ko} & \text{für } X_1 \leq x < X_2, \\ f_{Ko} & \text{für } X_2 \leq x < X_3, \\ f_{Ko/Zyl} & \text{für } X_3 \leq x < X_4, \\ f_{Zyl} & \text{für } X_4 \leq x < X_5, \\ f_{Zyl/Bu} & \text{für } X_5 \leq x \leq L_{ges} \end{cases} \quad (25)$$

Durch die Kombination der analytischen Beschreibung der Werkzeugkontur und der allgemeinen Kegelstumpfgleichung erfolgt die Berechnung des durch den Fließlochformer verdrängten Werkstoffvolumens in Abhängigkeit von der Werkzeulgänge. Zur Betrachtung der Volumenverdrängung wird in erster Näherung das vollständige Eindringen des Fließlochformers in einen halbunendlichen Körper betrachtet. Diagramm 4-1 zeigt die Gesamt-volumenverdrängung einer Standardgeometrie in Abhängigkeit der Werkzeulgänge.

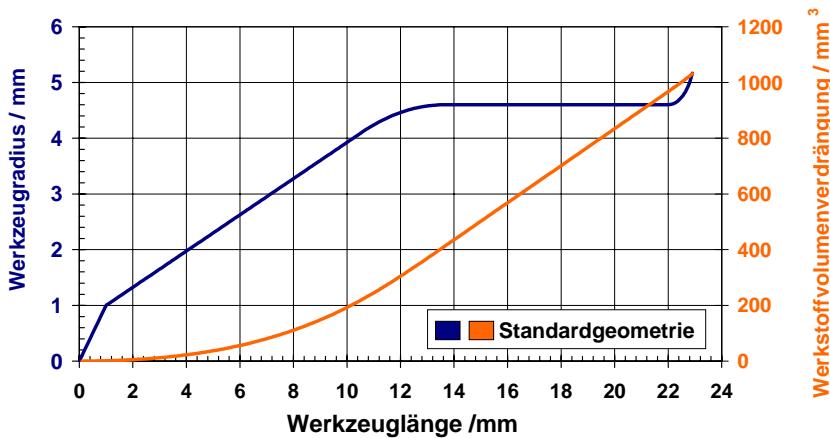


Diagramm 4-1: Standardgeometrie mit Volumenverdrängung

Ausgehend von der Gesamtvolumenverdrängung pro Millimeter, lässt sich unter Einbeziehung der Prozessparameter die Gesamtvolumenverdrängung pro Zeit berechnen. Legt man der Berechnung eine Drehzahl von 3000 U/min und eine Vorschubgeschwindigkeit von 300 mm/min, wie sie bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen verwendet werden, zu Grunde, so entspricht die Zustellung pro Millimeter einer Bearbeitungszeit von 0,2 Sekunden. Aus der zeitabhängigen Gesamtvolumenverdrängung lässt die Volumenverdrängungsgeschwindigkeit und aus diesem Geschwindigkeitsfeld die Werkstoffbeschleunigung berechnen (vgl. Diagramm 4-2).

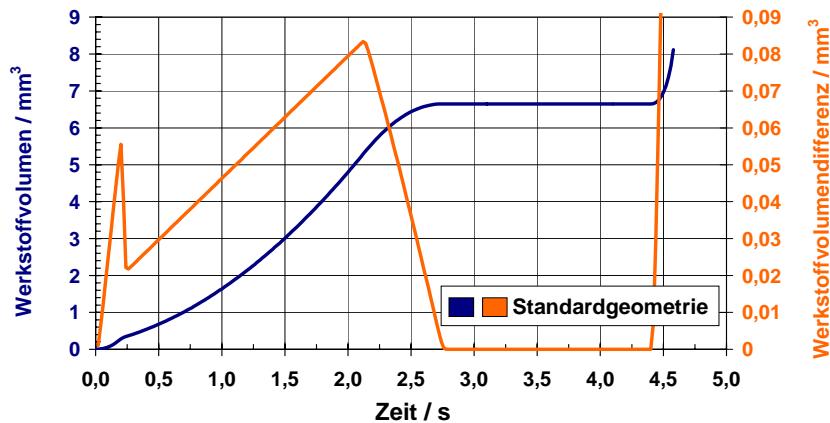


Diagramm 4-2: Standardgeometrie – Volumenverdrängungsgeschw. und -beschl.

Bei diesem Beispiel ist zu erkennen, dass im Geschwindigkeitsfeld des fließenden Werkstoffs durch die bei der Standardgeometrie vorhandenen mehrfachen Wechsel zwischen geraden und abgerundeten Bereichen kritische Geschwindigkeitsgradienten auftreten. Es ist davon auszugehen, dass diese extremen Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge des Werkstoffflusses sowohl die Rissentstehung als auch die Rissausbreitung am Buchsenauslauf begünstigen. Des Weiteren ist eine Korrelation zwischen Volumenverdrängung und Werkzeugbelastung zu erwarten, die sich in den Kraft- und Momentverläufen widerspiegelt.

Somit sind sowohl die Werkstoffvolumenverdrängung als auch die Werkzeugbelastung der Standardgeometrie disharmonisch, die Werkzeugkonturgestaltung weist demzufolge aus analytischer Sicht erhebliche Mängel auf.

Werkzeugkontur / Sondergeometrie - Um die Mängel der Standardgeometrie zu kompensieren, wurde eine Neuentwicklung der Werkzeugkontur durchgeführt. Diese wird im Rahmen dieser Arbeit als Sondergeometrie bezeichnet. Der Arbeitsbereich dieser Kontur ist so gestaltet, dass er ausgehend von einem definierten Spitzenwinkel einen kontinuierlichen Übergang von der Werkzeugspitze bis zum zylindrischen Werkzeuggbereich aufweist. Die Kontur des Arbeitsbereichs entspricht somit dem Ausschnitt einer Ellipse, welche aufgrund ihrer geometrischen Positionierung und Ausdehnung die geforderten Werkzeugabmaße erfüllt.

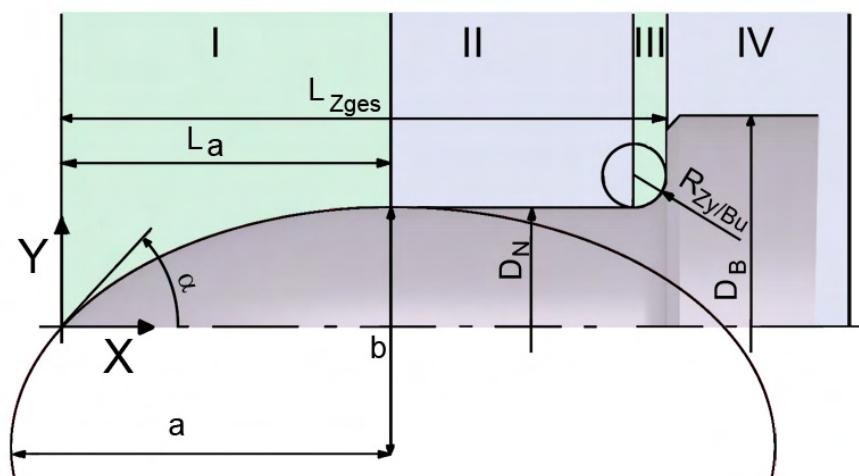


Abbildung 4-2: Sondergeometrie

Grundlage für die mathematische Beschreibung der Sondergeometrie bildet die allgemeine Ellipsengleichung:

$$f_{\text{Ellipse-Grundgl.}}(x) = b \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (26)$$

Der Anformbereich der Sondergeometrie wird durch die Werkzeuggeometrieparameter Spitzewinkel, die Länge des Arbeitsbereichs und durch den Werkzeugdurchmesser bestimmt.

Um die Ellipsengleichung den durch die Werkzeugparameter geforderten Geometrieabmaßen anzupassen, wird die folgende Koordinatenverschiebung der Grundgleichung durchgeführt:

$$f_{\text{Ellipse}}(x) = b \cdot \sqrt{1 - \frac{(x - La)^2}{a^2}} - b - R_N \quad (27)$$

Ausgehend von den folgenden Randbedingungen lassen sich die kleine und große Achse der Ellipse berechnen.

- Am Ende des Arbeitsbereichs muss der Werkzeugdurchmesser erreicht sein:

$$f_{\text{Ellipse}}(La) = R_N \quad (28)$$

- Die Steigung am Startpunkt der Werkzeugkontur $f'_{\text{Ellipse}}(0)$ entspricht der Steigung der Werkzeugspitze:

$$f'_{\text{Ellipse}}(0) = \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (29)$$

Ab dem zylindrischen Bereich deckt sich die Sondergeometrie mit der Standardgeometrie, so dass sich für die mathematische Beschreibung die folgende abschnittsweise definierte Gesamtfunktion ergibt:

$$f_{\text{Kontur-Sonder}}(x) = \begin{cases} f_{\text{Ellipse}}(x) & \text{für } 0 \leq x < X_1, \\ f_{\text{Zyl}}(x) & \text{für } X_1 \leq x < X_2, \\ f_{\text{Zyl/Bu}}(x) & \text{für } X_2 \leq x \leq L_{\text{ges}} \end{cases} \quad (30)$$

Berechnet man die Volumenverdrängung der Sondergeometrie und vergleicht diese mit der Standardgeometrie, so ist zu erkennen, dass die Werkzeugverdrängung der Sondergeometrie bei identischen Werkzeuggeometrieparametern im Vergleich schneller erfolgt (vgl. Diagramm 4-3).

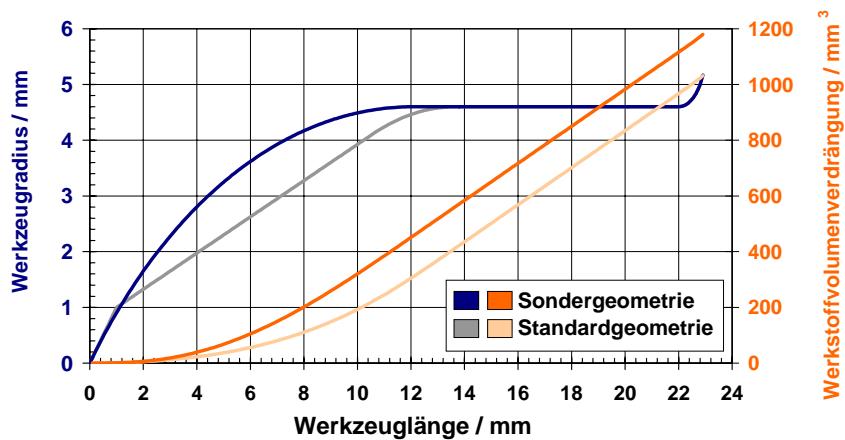


Diagramm 4-3: Sondergeometrie mit Volumenverdrängung

Die Volumenverdrängungsgeschwindigkeit und -beschleunigung der Sondergeometrie sind in Diagramm 4-4 dargestellt.

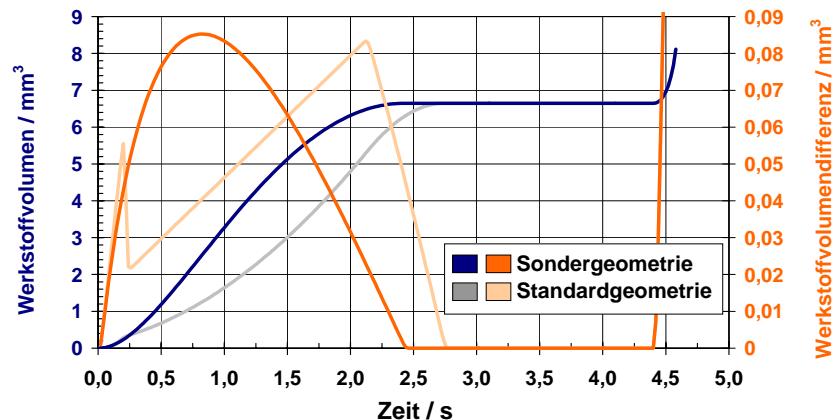


Diagramm 4-4: Sondergeometrie - Volumenverdrängungsgeschw. und -beschl.

Wie in Diagramm 4-4 zu erkennen ist, führt die elliptoide Konturgestaltung im Vergleich zur Standardgeometrie zu einer stetig monotonen Volumenverdrängungsbeschleunigung. Berücksichtigt man eine mögliche Korrelation zwischen den Volumenverdrängungsgrößen und der Werkzeugbelastung, so müsste die Sondergeometrie aufgrund ihres bogenförmigen mit kontinuierlichen Übergängen gestalteten Anformbereichs im Vergleich zur Standardgeometrie einen wesentlich harmonischeren Kraft- und Momentverlauf aufweisen. Aufgrund dessen, dass die Sondergeometrie im Vergleich zur Standardgeometrie bei identischer Länge des Anformbereichs das Werkstoffvolumen zu Beginn des Bearbeitungsprozesses schneller verdrängt, müsste sie jedoch geringfügig höhere maximale Momente und Kräfte besitzen. Da die Belastung jedoch kontinuierlicher eingeleitet wird, ist insgesamt von einer günstigeren Werkzeugbelastung und Werkstoffumformung auszugehen. Der Unterschied zwischen Standardgeometrie und Sondergeometrie wird im Rahmen dieser Arbeit in den folgenden Kapiteln ausführlich untersucht und differenziert dargestellt.

Formstollengeometrie - Der Werkzeugquerschnitt eines Fließlochformers besteht aus mehreren Formstollen die gleichmäßig über den Werkzeugumfang verteilt sind (vgl. Abbildung 2-5). Sie verrichten die für den Umformungsprozess benötigte Verformungsarbeit und lassen sich mathematisch durch eine mit dem Werkzeugdurchmesser und dem Formstollenverhältnis berechnete Winkelfunktion in Abhängigkeit der Winkellage beschreiben. Dieser funktionale Zusammenhang wird als Hubfunktion bezeichnet. Das Formstollenverhältnis ist als der Quotient des in einer Querschnittsfläche des Arbeitsbereichs vorliegenden minimalen und maximalen Werkzeugdurchmessers definiert und wird prozentual angegeben:

$$\text{Formstollenverhältnis} = \frac{\text{minimaler Werkzeugdurchmesser}}{\text{maximale Werkzeugdurchmesser}} [\%] \quad (31)$$

Im einfachsten Fall handelt es sich bei der Querschnittskontur um eine verkürzte Hypotrochoide:

$$y = (A + a) \sin \varphi - \lambda a \sin \left(\frac{A + a}{a} \varphi \right) \quad (32)$$

Abbildung 4-3 zeigt beispielhaft eine sich aus der Gleichung (32) ergebende Formstollengeometrievariante für einen Fließlochformer mit vier Formstollen.

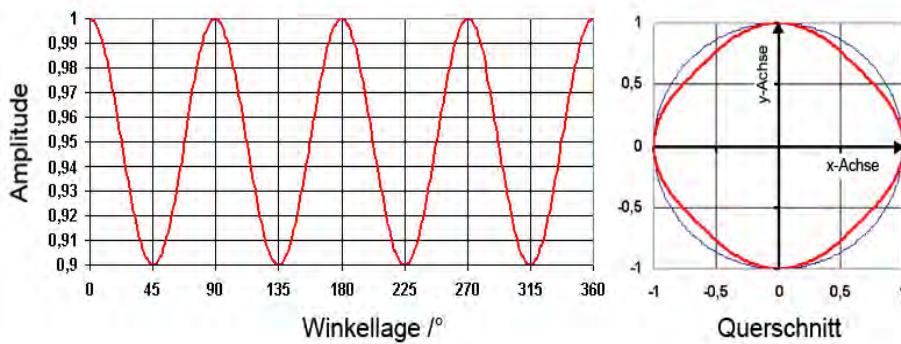


Abbildung 4-3: Formstollengeometrie eines Fließlochformers

Da sich durch die Variation der einzelnen Geometrieparameter die Eingriffverhältnisse des Werkzeugs beeinflussen lassen, beinhaltet die Werkzeugkonturvariation die drei Einflussfaktoren Werkzeugdurchmesser, Formstollenzahl und Formstollenverhältnis. Eine Erhöhung des Werkzeugdurchmessers führt dabei zur Steigerung des insgesamt verdrängten Werkstoffvolumens und somit zur Steigerung aller Zielgrößen. Im Rahmen dieser Arbeit dient der Werkzeugdurchmesser als Verifizierungsgröße, da bei einer prozentualen Erhöhung des Durchmessers auch eine entsprechende Anpassung der Werkzeuglängenabmaße erfolgt. Durch die Erhöhung der Formstollenzahl besitzt das Werkzeug die Möglichkeit mehr Verformungsarbeit zu leisten, was zu einer Steigerung des Drehmoments und der

Temperatur führen dürfte. Ein ähnlicher Effekt ist auch durch die Erhöhung des Formstollenverhältnisses zu erwarten, da dieses maßgeblich die im Werkstoffkontakt befindliche Werkzeugoberfläche bestimmt.

Der typische Werkzeugverschleiß beim Fließlochformen ist das diskontinuierliche Aufschweißen von Werkstückmaterial an den Formstollen. Zur Lösung dieses Problems muss man sich von der herkömmlichen symmetrischen Gestaltung der Formstollengeometrie lösen. Einfachste Möglichkeit der Erzeugung asymmetrischer Formstollengeometrien ist die Verschiebung der Minimalpunkte der Hubfunktion innerhalb einer Periode. Dies wird im Folgenden anhand einer Kosinusfunktion beispielhaft erläutert.

Grundlage der Abbildung 4-4 bildet die über der Winkellage dargestellte elementare Kosinusfunktion, welche ihr Minimum bei einer Winkellage von 180° besitzt. Um das Minimum auf der Abszisse verschieben zu können, ist eine Konvertierung der Kosinusfunktion in ein abschnittsweise definiertes Funktional notwendig. Dieses setzt sich aus einer linksseitigen und rechtseitigen vom Minimum (ω_{\min}) gelegenen Funktion zusammen:

$$f_{\text{Formstollen}}(\omega) = \begin{cases} \cos\left(\omega \cdot \frac{180}{\omega_{\min}}\right) & \text{für } 0 \leq \omega \leq \omega_{\min}, \\ -\cos\left((\omega - \omega_{\min}) \cdot \frac{180}{360 - \omega_{\min}}\right) & \text{für } \omega_{\min} < \omega < 360 \end{cases} \quad (33)$$

Durch Verschiebung des Tiefpunkts lassen sich nun asymmetrische Formstollengeometrien erzeugen, die nun nur noch mit dem Werkzeugdurchmesser, dem Formstollenverhältnis und der Formstollenzahl zu verrechnen sind. Die Position des Minimums der Hubfunktion bildet somit einen weiteren Einflussfaktor, der im Rahmen dieser Arbeit als „Tallage der Hubfunktion“ bezeichnet wird.

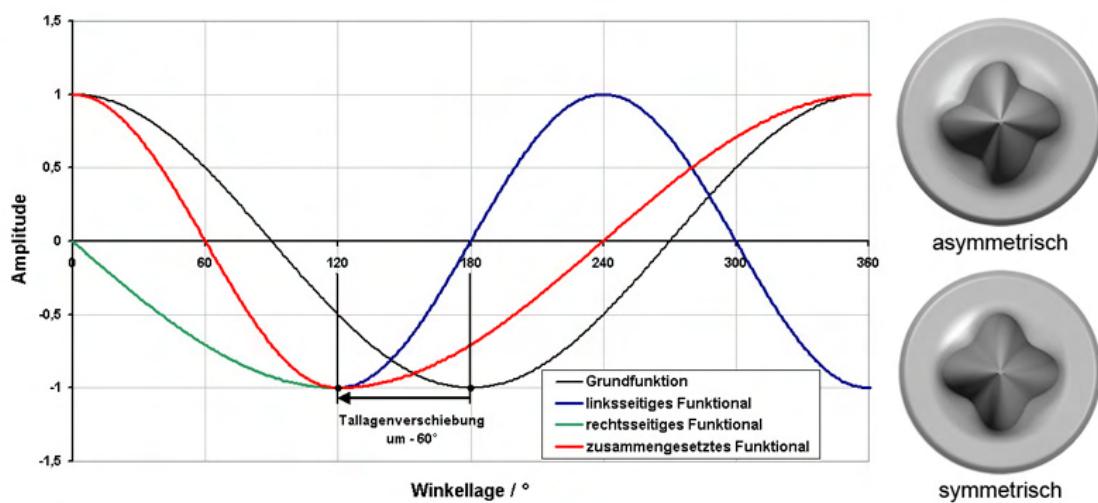


Abbildung 4-4: asymmetrische Formstollengeometrie

Bei Standardwerkzeugen sind die Formstollen gleichmäßig über den Werkzeugumfang verteilt. Dies kann unter bestimmten Bearbeitungsbedingungen zu harmonischen Schwingungen, die das Bearbeitungsergebnis negativ beeinflussen und zu extremen Belastungen der Werkzeuge und der Bearbeitungsmaschine führen. Um diese Schwingungsanregung zu unterbinden, kann eine asymmetrische Ungleicheilung der Formstollen über den Umfang vorgenommen werden (vgl. Abbildung 4-5). Die asymmetrische Ungleicheilung ist somit ein Faktor, der sich in Abhängigkeit von der Formstollenzahl aus mehreren Einzelfaktoren ($\omega_{1\max}, \omega_{2\max} \dots, \omega_{i\max}$) zusammensetzt.

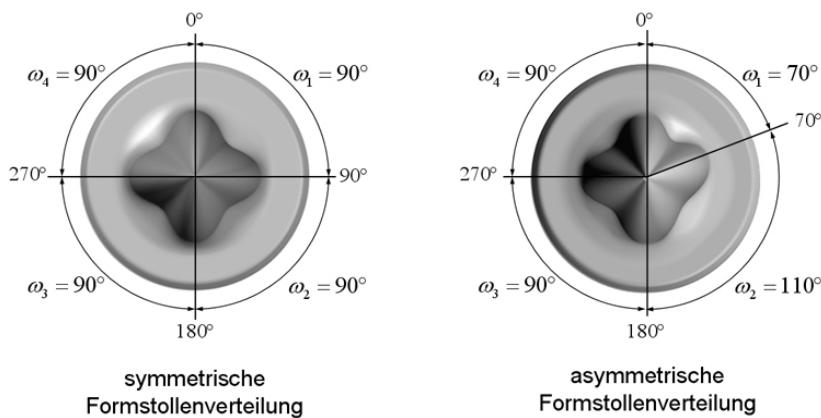


Abbildung 4-5: asymmetrische Ungleicheilung der Formstollen

Um die Buchsenlänge über die Variation der Bearbeitungsparameter hinaus beeinflussen zu können, wurden Fließlochformer mit wendelförmig umlaufenden Formstollen entwickelt (vgl. Abbildung 4-6). Diese können entweder von der Werkzeugspitze mit einem definierten Drallwinkel ($\gamma \neq 0$) bis zum Werkzeubund oder innerhalb eines spezifischen Teilbereichs des Arbeitsteils um das Werkzeug laufen.



Abbildung 4-6: Fließlochformer mit wendelförmig umlaufende Formstollen

Durch die Integration des Dralls soll eine Förderwirkung ähnlich dem Prinzip der Archimedischen Schraube erzielt werden. Positive Drallwinkel sollten zu einer Erhöhung des Werkstoffflusses in Vorschubrichtung und somit zu einer Steigerung der Buchsenlänge führen. Bei negativem Winkel ist der inverse Effekt zu erwarten. Des Weiteren wird durch den Drallwinkel die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück erhöht, so dass theoretisch mehr Reibungswärme in das Werkstück eingebracht werden sollte. Da durch die Anpassung des Winkels die Intensität der erzielbaren Effekte steuerbar sein müsste, wird der Drallwinkel zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren.

Konventionelle Fließlochformer weisen beim Übergang zum Werkzeugbund einen Übergangsradius auf, der maßgeblich die Qualität des Buchsenkragens bestimmt. Um dort einen gleichmäßigen Werkstofffluss zu gewährleisten, kann man im Radiusbereich die Formstollen graduell auslaufen lassen, so dass beim Übergang zum Bund faktisch keine Walkarbeit sondern ausschließlich Reibarbeit verrichtet wird. Konstruktiv wird die Hubfunktion hierfür durch die kontinuierliche Steigerung des Formstollenverhältnisses über einen frei wählbaren Teilabschnitt in eine Kreisbahn überführt. Dies hat eine Erhöhung der Reibfläche zur Folge, welches zu einer Steigerung der Wärmezufuhr am Ende des Bearbeitungsprozesses führt. Der nach oben verdrängte Werkstoff wird so kurz vor seiner Umformung nochmals zusätzlich erwärmt und lässt sich dadurch leichter zu einem Kragen umformen. Die Qualität des Kragens, der in vielen Fällen als Dichtfläche dient, sollte sich auf diese Weise steigern lassen. Der Faktor „auslaufende Hubfunktion“ umfasst im einfachsten Fall zwei Einzelfaktoren, den Startpunkt und den Endpunkt des Auslaufs. Dies lässt sich jedoch durch die Wahl einer beliebigen Anzahl von über dem Werkzeug verteilten Ein- und Auslaufzonen in Kombination mit linearen und exponentiellen Auslauffunktionen nach Belieben steigern.

Werkzeugvolumen- und Werkzeugmantelflächenberechnung – Die vollständige mathematische Beschreibung der Fließlochformergeometrie ermöglicht die Berechnung der Fließlochformer-Mantelfläche und des Werkzeugvolumens. Dazu wird das Werkzeug in kartesischen Koordinaten, welche sich aus der Werkzeugkonturgleichung (25) bzw. (30) in Kombination mit der Formstollengeometriegleichung (33) berechnen lassen, und dem Teilungswinkel α in n infinitesimale Dreiecke in k Ebenen zerlegt. In Abbildung 4-7 ist diese Vorgehensweise schematisch dargestellt.

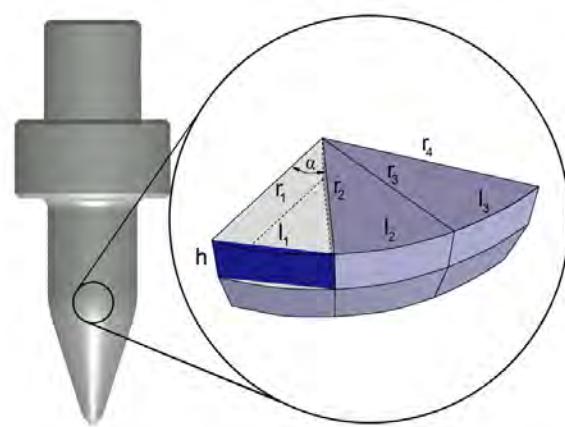


Abbildung 4-7: Fließlochformerzerlegung in infinitesimale Dreiecke

Mittels Winkelfunktionen lassen sich für jedes dieser Dreiecke in Abhängigkeit des Teilungswinkels α und den beiden Radien r_i und r_{i+1} die äußere Seitenlänge l_i approximieren. Summiert man die einzelnen Seitenlängen einer Ebene auf, so erhält man den Umfang des Fließlochformerquerschnitts:

$$U_{\text{Formerquerschnitt}} = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2r_i r_{i+1} \cos \alpha} \quad (34)$$

Um den Flächeninhalt des entsprechenden Fließlochformerquerschnitts zu erhalten, wird der Flächeninhalt A_i der einzelnen Dreiecke bestimmt und anschließend aufsummiert:

$$A_{\text{Formerquerschnitt}} = \frac{1}{2} \sin \alpha \sum_{i=0}^{n-1} r_i r_{i+1} \quad (35)$$

Sind die Flächeninhalte der einzelnen Querschnittsflächen k bestimmt, so lässt sich das Gesamtvolumen des Fließlochformers mit Hilfe des Querschnittsflächenabstands h durch den folgenden Zusammenhang berechnen:

$$V_{\text{Former}} = \frac{h}{3} \sum_{i=1}^{k-1} A_i + A_{i+1} + \sqrt{A_i + A_{i+1}} \quad (36)$$

Die Mantelfläche des Formers ergibt sich aus dem Umfang der einzelnen Querschnittsflächen und dem Querschnittsflächenabstand h :

$$M_{\text{Former}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} (U_i + U_{i+1}) \sqrt{(r_{i+1} - r_i)^2 + h^2} \quad (37)$$

Die Fließlochformeroberfläche und das Formervolumen sind somit mathematisch vollständig beschrieben.

Um einen direkten Vergleich der Fließlochformergeometrien zu ermöglichen wurde, eine Berechnungsapplikation entwickelt, welche durch die Vorgabe der Fließlochformer-Geometrieparameter eine vollständige Berechnung aller Fließlochformer-Geometriedaten durchführt. Abbildung 4-8 zeigt die Oberfläche dieser Applikation, welche mit Excel und Visual Basic erstellt wurde.

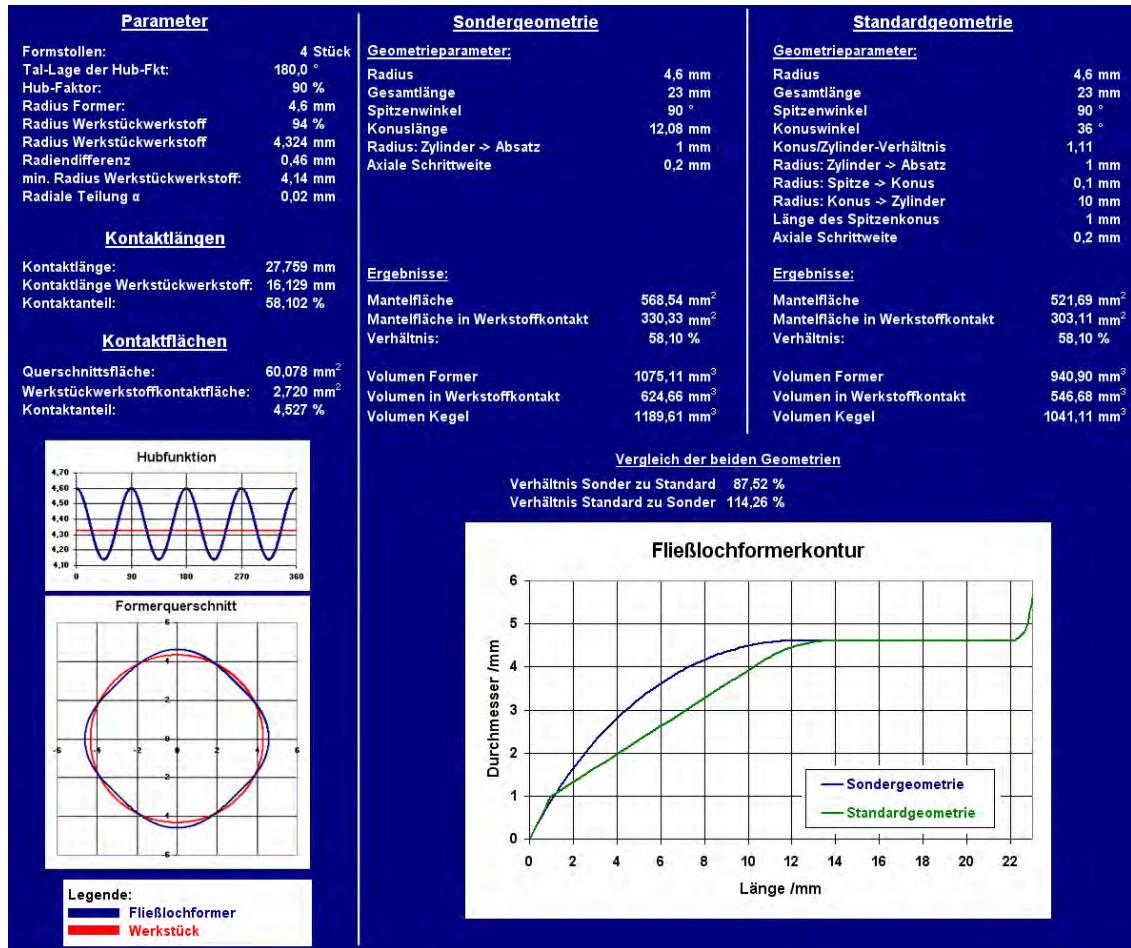


Abbildung 4-8: Berechnungsapplikation für den Fließlochformervergleich

4.1.1.2 Fließlochformerwerkstoff und Oberflächengüte

Fließlochformerwerkstoff - Der Werkstoff des Fließlochformers muss in erster Linie den verfahrensbedingten Anforderungen an Verschleiß- und Warmfestigkeit genügen, ohne die ein industrieller Einsatz des Verfahrens nicht möglich ist. Darüber hinaus ist man bestrebt, Werkstoffe mit geringer Wärmeleitfähigkeit und hoher Wärmekapazität einzusetzen, um so dem Prozess mehr Wärme zuführen zu können. Zusätzlich verhindern solche Werkstoffe ein Aufheizen der Maschinenspindel. Da es während des Bearbeitungsprozesses trotz der Schmierung zu Materialaufschweißungen an der Fließlochformeroberfläche kommt, sind Hartmetalle mit geringer Affinität gegenüber dem zu bearbeitenden Werkstoff zu bevorzugen. Als Alternative zu Hartmetall wird daher immer wieder die Verwendung von Keramik in Betracht gezogen.

Oberflächengüte - Aus tribologischer Sicht kann der Einfluss der Oberflächengüte auf den Bearbeitungsprozess beim Fließlochformen nicht *a priori* ausgeschlossen werden. Da beim Fließlochformen mit Schmierung gearbeitet wird, liegt eine Kombination aus Festkörper und Mischreibung vor. Der gesamte Fließlochformprozess beruht auf dem physikalischen Prinzip, dass durch die Reibungsverluste des Umformprozesses das Werkstück erwärmt wird. Mit steigender Temperatur wird die Fließgrenze des Werkstücks zunehmend herabgesetzt, der Werkstoff lässt sich besser umformen. Steigert man die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, so ist dies mit einer Zunahme des Energieeintrags in das Werkstück verbunden. Die Prozesstemperaturen steigen schneller an und somit wird auch die Fließgrenze schneller herabgesetzt. Der Werkstoff wird schneller besser plastisch verformbar. Dies bringt speziell in der ersten Phase des Fließlochformprozesses, in der das Werkstück noch kalt ist, deutliche Vorteile (vgl. Abbildung 2-1). Hohe Reibkoeffizienten begünstigen jedoch die Gefahr von Kaltverschweißungen auf der Werkzeugoberfläche und somit den Werkzeugverschleiß. Beim Fließlochformen entstehen durch die große Affinität von Hartmetall zu Stahl, bereits nach nur wenigen Buchsen, Ablagerungen am Werkzeug. Reibung ist durch die Werkstoffwahl, durch Polieren, durch Beschichten und durch Schmieren der Reibungsflächen beeinflussbar.

4.1.1.3 Bearbeitungsparameter

Die Bearbeitungsparameter setzen sich im Wesentlichen aus der Umfangs- und Vorschubsgeschwindigkeit zusammen. Um den Bearbeitungsprozess der Werkstückerwärmung besser anpassen zu können, wird in vielen Fällen mit gestuften Vorschüben gearbeitet, so dass in Abhängigkeit der gewählten Stufenanzahl weitere Vorschubgeschwindigkeiten sowie Umschaltpunkte hinzukommen.

Die Umfangsgeschwindigkeit bestimmt als eine der wichtigsten Prozesseinflussgrößen maßgeblich den Energieeintrag in das Werkzeug und somit die Umformtemperatur. Die Anpassung der Bearbeitungsparameter an verschiedene Werkstoffe wird daher bis heute hauptsächlich durch die Variation der Umfangsgeschwindigkeit durchgeführt. So werden Stahlwerkstoffe mit Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 10 m/min und Aluminiumlegierungen aufgrund ihrer höheren Wärmeleitfähigkeit mit gesteigerten Umfangsgeschwindigkeiten, die im Bereich von 17 m/min liegen, bearbeitet.

Neben der Umfangsgeschwindigkeit ist auch die Vorschubgeschwindigkeit bedeutend, da sie die Dauer des Energieeintrags und die Prozessdauer bestimmt. Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit hat so zu erfolgen, dass sich das Material während des gesamten Bearbeitungsprozesses leicht plastisch verformen lässt ohne dabei ungewollte Materialveränderungen, welche die mechanischen Eigenschaften der Buchse negativ beeinflussen könnten, zu erzeugen. Da sich das Werkstück im Laufe des Bearbeitungsprozesses immer weiter erhitzt, sollte eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Prozessfortschritts erfolgen. Dies wird durch gestufte Vorschubgeschwindigkeiten erreicht.

Eine Anpassung der Bearbeitungsparameter an ein zu bearbeitendes Werkstück setzt demnach eine bestmögliche Kombination von Drehzahl, Vorschubgeschwindigkeiten und Lage der Umschaltpunkte voraus.

Neben den Prozessparametern ist die kontinuierliche Schmierung des Werkzeugs äußerst wichtig. Das Schmiermittel verringert die Gefahr von Aufschweißungen am Fließlochformer und sorgt somit für eine lange Standzeit und gute Buchsenqualität. Die Schmierung kann manuell oder über eine automatische Dosiereinrichtung erfolgen.

4.1.1.4 Werkstück

Das zu bearbeitende Werkstück ist eine der wichtigsten Einflussgrößen, da zur Erzeugung von qualitativ hochwertigen Buchsen die Bearbeitungsparameter in erster Linie in Abhängigkeit von dem Werkstückwerkstoff und der Werkstückdicke gewählt werden.

Das zu bearbeitende Werkstück lässt sich in mehrere prozess- und buchsenqualitätsbestimmende Einflussfaktoren unterteilen. Zum einen ist dies der Werkstoff des Werkstücks und zum anderen die Werkstückgeometrie. In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffs ändern sich dessen Schmelztemperatur, Wärmeleitfähigkeit, mittlere spezifische Wärmekapazität, seine mechanischen Kennwerte und somit seine Umformeigenschaften. Das Zusammenwirken von unterschiedlichen Formerwerkstoffen und Werkstückwerkstoffen führt darüber hinaus zu unterschiedlichen Reibwerten, welche sich auch auf den Bearbeitungsprozess auswirken. Ebenso können innerhalb eines Versuchswerkstoffs durch unterschiedliche Werkstoffchargen, Vergütungszustände und Gefüge-

strukturen Unterschiede sowohl im Bearbeitungsprozess als auch bei der Buchsenqualität entstehen.

Neben der chemischen Zusammensetzung hat die Werkstückgeometrie einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Bearbeitungsprozess und das Bearbeitungsergebnis. In Abhängigkeit der Werkstückdicke hat eine Anpassung der Vorschubgeschwindigkeiten und der Lage der Umschaltpunkte zu erfolgen. Nur so kann eine bestmögliche Buchsenqualität gewährleistet werden. Die Bauteilgeometrie beeinflusst des Weiteren die Form- und Maßgenauigkeit der fertigen Fliesslochbuchsen, denn eine ungünstige geometrische Gestaltung des Werkstücks im Bereich der Bearbeitungszone führt zu asymmetrischen Deformationen des Buchsenquerschnitts.

4.1.1.5 Zusammenfassung der Einflussgrößen

Durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten der Fließlochformerkontur und Formstollengeometrie, liegt ein sehr breites Spektrum an geometrischen Einflussgrößen vor. Diese werden durch die Wahl des Fließlochformerwerkstoffs und die Beeinflussbarkeit der Oberflächenqualität ergänzt. Darüber hinaus ist die richtige Wahl der Prozessparameter in Abhängigkeit des zu bearbeitenden Werkstücks von zentraler Bedeutung. In Abbildung 4-9 sind alle wichtigen Prozesseinflussgrößen zusammengefasst.

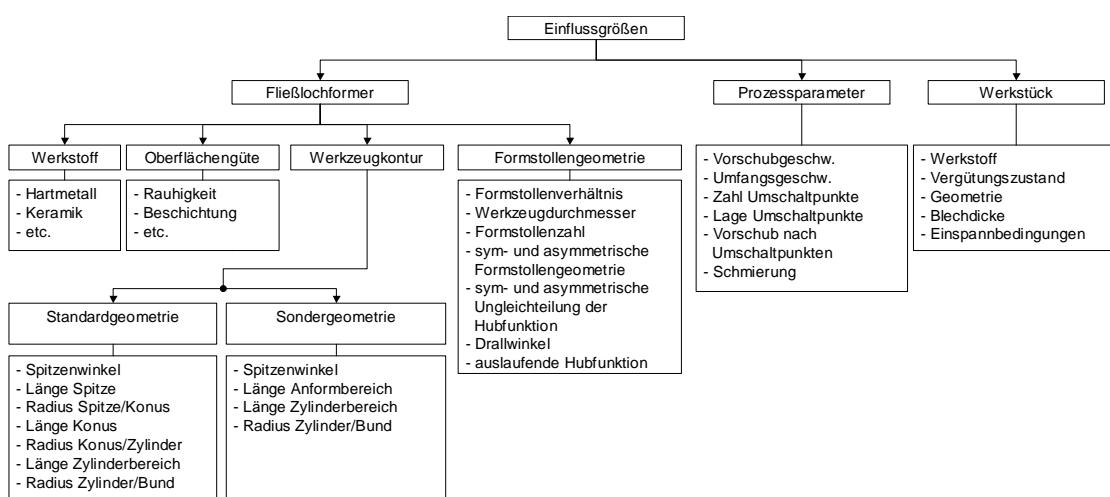


Abbildung 4-9: Zusammenfassung der Einflussgrößen

4.1.2 Zielgrößen

Die Zielgrößen beim Fließlochformen lassen sich in die Bereiche Prozessgrößen und Buchsenqualitätsgrößen unterteilen. Als Prozessgrößen werden alle während des Bearbeitungsprozesses erfassbaren Zielgrößen wie z. B. das Drehmoment, die Axialkraft, der Energieeintrag und die Temperatur bezeichnet. Bei den Zielgrößen, welche die Buchsenqualität bestimmen, handelt es sich um die Buchsenlänge, die Risslänge und den nach unten bzw. oben verdrängte Werkstoffvolumenanteil. Die Erfassung erfolgt im Rahmen von Post-Prozess-Messungen.

4.1.2.1 Prozessgrößen

Das Drehmoment und die Axialkraft werden in Abhängigkeit der Bearbeitungszeit und des Vorschubwegs erfasst. Sie geben Aufschluss über die Belastung des Werkzeugs, des Werkstücks und der Werkzeugmaschine und sind daher bei der Auslegung der Maschinen- und Bauteileigenschaft zu berücksichtigen. Des Weiteren bietet die Erfassung und Auswertung der Kraft- und Momentverläufe die Möglichkeit, detaillierte Informationen über den Verlauf des Bearbeitungsprozesses zu erhalten.

Die Axialkraft spielt in der ersten Phase des Bearbeitungsprozesses eine wichtige Rolle, da das Werkstück zu diesem Zeitpunkt noch nicht die nötige Bearbeitungstemperatur erreicht hat. Wird hier mit zu hoher Vorschubgeschwindigkeit gearbeitet, so entstehen zu hohe Axialkräfte. Diese verursachen bei sehr dünnwandigen Werkstücken mit nicht ausreichender Werkstückeinspannung unbeabsichtigte plastische Deformationen des Werkstücks. Die Bearbeitungsparameter sind daher so zu wählen, dass zu Prozessbeginn möglichst geringe Axialkräfte auftreten. Ist dies nicht möglich, so kann versucht werden, die Axialkraft durch eine Vorbohrung oder durch die Verwendung eines Fließlochformers mit integrierten Schneiden an der Werkzeugspitze zu verringern. Beide Verfahren führen jedoch zur Reduzierung der Buchsenlänge.

Das Drehmoment ist ein Maß für die Formstollenbelastung. Große Drehmomente sind auf starke Reibkräfte zurückzuführen, die den Formstollenverschleiß begünstigen und somit maßgeblich die Standzeit beeinflussen.

Beim Fließlochformen wird mechanische Energie in Reibungswärme umgewandelt, der Energieeintrag ist somit eine weitere wichtige Zielgröße. Er setzt sich aus der Rotations- und der Translationsenergie zusammen.

$$E_{Gesamt} = E_{Rotation} + E_{Translation} \quad (38)$$

Die Rotationsenergie lässt sich mit Hilfe der Winkelgeschwindigkeit und des experimentell ermittelten, zeitabhängigen Momentverlaufs berechnen /40/:

$$E_{\text{Rotation}} = 2 \cdot \pi \cdot n \int_{t_0}^{t_i} M(t) \ dt \quad (39)$$

Die Translationsenergie berechnet sich aus dem vorschubwegabhängigen Kraftverlauf:

$$E_{\text{Translation}} = \int_{s_0}^{s_i} F(s) \ ds \quad (40)$$

Da die Translationsenergie beim Fließlochformen nur einen Bruchteil der Rotationsenergie beträgt, kann der Translationsanteil bei der Energiebetrachtung vernachlässigt werden /29/.

Die Temperatur ist eine weitere wichtige Zielgröße, da beim Fließlochformen die während des Bearbeitungsprozesses in das Werkstück eingeleitete Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Durch die Zuführung von Wärmeenergie steigt die Umformtemperatur und setzt dabei die Fließspannung des Werkstückwerkstoffs herab. Der Fließlochformer durchdringt das Blech und formt die Buchse aus. Die Prozesstemperatur spielt beim Fließlochformen somit eine zentrale Rolle, da sie sowohl die Festigkeits- und Umformeigenschaften während des Bearbeitungsprozesses als auch die mechanischen Eigenschaften der Fließlochbuchse beeinflusst. Sie ist so einzustellen, dass während des gesamten Fertigungsprozesses eine gute plastische Verformung des Werkstücks gewährleistet wird. Ist die Temperatur zu gering, führt dies zur Steigerung der Einrisslänge am Buchsenauslauf, die Funktion der Buchse wird negativ beeinflusst. Bei zu hohen Prozesstemperaturen können in Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffs unerwünschte Gefügestrukturänderungen (Martensitbildung, Kaltverfestigung, Aushärtung, Verzunderung, Randzonenveränderungen) auftreten. Diese können sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften der Fließlochbuchse auswirken.

4.1.2.2 Buchsenqualität

Die wichtigsten Zielgrößen beim Fließlochformen sind die der Buchsenqualität, da sie die mechanischen und geometrischen Eigenschaften des Bauteils beschreiben. Auf Grundlage der Buchsenqualität wird entschieden, ob das Fertigungsverfahren für die Bearbeitung des Bauteils anwendbar ist oder nicht.

Wichtigster Teilespekt der Buchsenqualität ist die Risslänge am Buchsenauslauf. Diese Zielgröße ist unabhängig vom späteren Verwendungszweck der Fließlochbuchse immer so gering wie möglich zu halten. Alle weiteren buchsenqualitätsbestimmenden Merkmale, wie

z. B. die Buchsenlänge, die Ovalität der Buchse, die Oberflächenrauheit, die Buchsenwanddicke und die Volumenanteile des nach unten bzw. oben verdrängten Werkstoffvolumens, hängen stark vom Verwendungszweck der Buchse ab. Aus diesem Grund hat eine Beurteilung der Buchsenqualität stets anwendungsfallbezogen zu erfolgen.

Dass die Anforderungen an die Buchsenqualität bei unterschiedlichen Anwendungsfällen stark variieren, wird bei Betrachtung der Einsatzgebiete Lagerbuchse und Kernbuchse zur Gewindeherstellung deutlich. Bei Lagerbuchsen sind neben der Risslänge die wichtigsten Qualitätsmerkmale: der exakte Buchsendurchmesser, dessen Ovalität und die Zylindrizität der gesamten Buchse. Wird in die gefertigte Buchse in einem weiteren Bearbeitungsschritt ein Gewinde eingefurcht, so spielen die Merkmale Ovalität und Buchsendurchmesser eine untergeordnete Rolle. Darüber hinaus ist eine vollständige Zylindrizität der Fließlochbuchse in diesem Anwendungsbereich nicht erwünscht. Buchsen für eine nachträgliche Gewindeformung sollten am Buchsenende leicht konisch zulaufen. Dies stellt sicher, dass der Gewindeforcher auch am Buchsenauslauf, trotz der prozessbedingten hohen Radialkräfte, normgerechte Gewindeflanken erzeugt.

Da im Rahmen dieser Arbeit das Fließlochformen allgemein und nicht auf einen speziellen Anwendungsfall bezogen untersucht wird, erfolgt die Auswertung der Zielgrößen der Buchsenqualität autonom. Jede Zielgröße wird separat für sich ausgewertet. Dies ermöglicht es, die Prozessparameter entsprechend der individuellen Zielsetzung in Bezug auf die Buchsengeometrie zu wählen. Allgemein gültiges Qualitätsmerkmal ist nur die Länge der Einrisse am Buchsenende, die es zu minimieren gilt. Zur Minimierung der Einrisse am Buchsenauslauf wird häufig im Vorfeld eine Vorbohrung in das Werkstück eingebracht. Dies ist jedoch mit einem weiteren Fertigungsschritt verbunden. Darüber hinaus reduziert sich das für die Ausformung der Buchse zur Verfügung stehende Material. Ein Vorbohren ist daher zu vermeiden. Als Zielgrößen werden in dieser Arbeit die maximale Einrisslänge am Buchsenende, die Buchsenlänge sowie das nach unten verdrängte Werkstoffvolumen betrachtet (vgl. Abbildung 4-10).

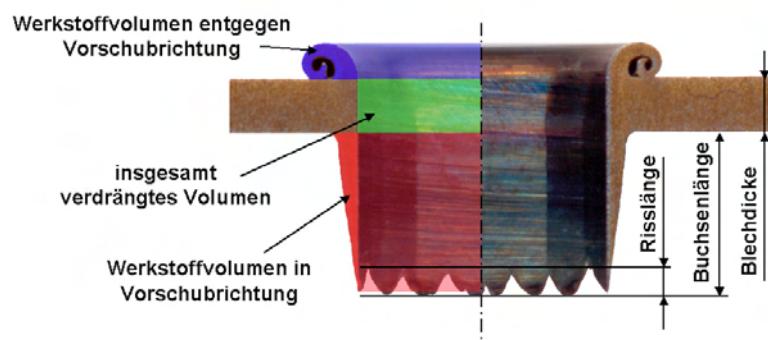


Abbildung 4-10: Geometriemerkmale einer Fließlochbuchse

4.2 Auswahl des Versuchsplans

Im Rahmen der Systemanalyse wurden mehr als 28 Einflussgrößen aufgezeigt. Diese vollständig im Rahmen eines vollfaktoriellen Versuchs zu untersuchen, ist aufgrund der dazu benötigten hohen Anzahl an Einzelversuchen nahezu unmöglich. Selbst bei Verwendung eines fraktionellen faktoriellen Versuchsplans wäre eine vollständige Integration aller Einflussgrößen in den Versuchsplan mit einem erheblichen Versuchsaufwand verbunden. Ausgehend von dieser Diskrepanz ist daher zunächst eine Abschätzung des insgesamt leistbaren maximalen Versuchsumfangs durchzuführen.

Der Versuchsumfang wird aufgrund des hohen Aufwands bei der Vermessung der Buchsengeometrie auf maximal 640 Einzelversuche begrenzt. Diese setzen sich aus 128 Versuchsreihen, die zur statistischen Absicherung mit fünffacher Wiederholung durchgeführt werden, zusammen.

Da beim Fließlochformen noch keine Kenntnisse über mögliche Wechselwirkungen vorliegen, ist bei der Versuchsplanauswahl sicherzustellen, dass sich sowohl alle Haupteffekte als auch alle Wechselwirkungseffekte eindeutig, ohne kritische Vermengungen bestimmen lassen. Diese Vorgaben führen zur Auswahl des fraktionellen faktoriellen Versuchsplans vom Typ 2^{11-4} . Dieser Versuchsplan ist vom Lösungstyp V und ermöglicht eine unkritische Untersuchung von 11 Faktoren (vgl. Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2).

4.3 Versuchspараметer

4.3.1 Bestimmung der Faktoren und Faktorstufen

Auf Grundlage der in Kapitel 4.1 durchgeführten Systemanalyse und unter Einhaltung der Randbedingungen des 2^{11-4} -Versuchsplans erfolgt die Auswahl der zu untersuchenden Faktoren. Um aus den mehr als 28 möglichen Einflussgrößen elf Faktoren herauszufiltern, welche sich durch einen 2^{11-4} -Versuchsplan untersuchen lassen, wird auf Grundlage der bisherigen Prozesskenntnis eine Priorisierung der Einflussgrößen durchgeführt. Als Hilfsmittel dient eine Präferenzmatrix, welche einen paarweisen Vergleich aller Einflussgrößen ermöglicht. Die Priorisierung erfolgt hierbei durch eine direkte Gegenüberstellung jeder Einflussgrößenkombination. Der bei der Gegenüberstellung als wichtiger eingestufte Faktor erhält einen Punkt. Anhand der sich daraus ergebenden Punkteverteilung lässt sich die Rangfolge berechnen.

Anhand eines Beispiels mit vier Faktoren wird die Vorgehensweise detailliert erläutert. Ausgangspunkt bildet die in Abbildung 4-11 aufgezeigte Entscheidungsmatrix. Nach Eintragung der Vergleichsfaktoren in der Grundmatrix wird am ersten Knotenpunkt Faktor A mit B verglichen. Der als wichtiger eingestufte Faktor wird in den Knotenpunkt eingetragen (hier A). Analog wird dies für alle Knotenpunkte durchgeführt (im Knotenpunkt fünf wird Faktor B mit D verglichen). Zählt man im Anschluss die Anzahl der einzelnen Faktorennennungen zusammen, so erhält man eine Rangfolge. Aus dieser lässt sich formal der prozentuale Anteil der Vergleichsfaktoren in Bezug auf die angewendeten Entscheidungskriterien bestimmen.

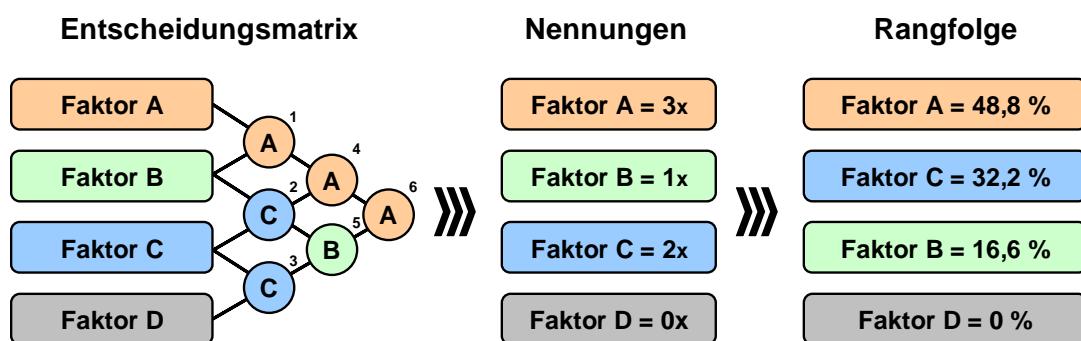


Abbildung 4-11: Präferenzmatrix zur Faktorpriorisierung

Das bei der Entscheidungsmatrix zugrunde liegende Entscheidungskriterium ist entweder ein Einzelkriterium, oder es setzt sich aus einer Vielzahl von Einzelkriterien zusammen. In Bezug auf das Fertigungsverfahren Fließlochformen sind folgende Kriterien entscheidend für die Rangfolge:

- Ein bereits bekannter Effekt eines Faktors (z. B. der Einfluss der Drehzahl auf die Temperatur) soll detaillierter betrachtet werden.
- Der Effekt einer speziellen Einflussgröße (z. B. der Konturvariante) ist von Interesse.
- Wechselwirkungen zwischen Einflussgrößen (z. B. zwischen Formstollenzahl und Formstollenverhältnis) sind nicht auszuschließen.

In vielen Fällen lassen sich bereits vor der eigentlichen Durchführung der Priorisierung mit Hilfe der Präferenzmatrix aufgrund der vorliegenden Randbedingungen einige Faktoren für die Versuchsdurchführung ausschließen.

Vor der Priorisierung wurden folgende Einschränkungen vorgenommen:

- Es werden ausschließlich Fließlochformer vom Typ „long“ ohne Schneiden an der Werkzeugspitze oder am Werkzeugbund eingesetzt.
- Oberflächenrauhigkeit und Fließlochformerwerkstoff werden in separaten Versuchsreihen untersucht.
- Um den Versuchsumfang zu minimieren, sind die Versuche mit einfach gestuften Vorschub durchzuführen.
- Die Werkstückabmaße und Einspannbedingungen bleiben konstant.
- Auf eine Vorbohrung des Werkstücks wird verzichtet.
- Aufgrund der großen Anzahl benötigter Bleche ist der Faktor Werkstoffcharge zu integrieren.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurden die Einflussgrößen Konturvariante, Spitzenwinkel, Konuswinkel, Formstollenanzahl, Formstollenverhältnis, Drallwinkel und der Werkzeugdurchmesser als Faktoren der Werkzeuggeometrie, die Werkstückcharge und Blechdicke als Faktoren des Werkstücks sowie die Faktoren Umfangsgeschwindigkeit und zweite Vorschubgeschwindigkeit als Faktoren der Prozessparameter bestimmt.

Nach der Auswahl der zu untersuchenden Faktoren erfolgt die Festlegung der einzelnen Faktorstufen. Die richtige Auswahl der Faktorstufen hat einen entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Untersuchung. Speziell bei Versuchsplänen erster Ordnung, mit denen sich nur lineare Zusammenhänge erfassen lassen, ist zur Vermeidung von Fehlinterpretationen darauf zu achten, dass die Faktorstufen nicht zu nah, aber auch nicht zu weit auseinander liegen. Die Auswahl der werkzeuggeometriebezogenen Faktorstufen erfolgt auf Grundlage des in Kapitel 3.1.4 dargestellten Stands der Technik. Ausgehend von den arithmetischen Mittelwerten der einzelnen Geometriemeerkmale der in Tabelle 3-1 aufgezeigten Fließlochformer, wurden die Faktorstufen so gewählt, dass diese geringfügig unter und über den Mittelwerten liegen. Die Auswahl der Prozessparameter erfolgt auf Grundlage von Vorversuchen, bei denen die Prozessparameter bestimmt wurden, welche unter Verwendung einer Standardgeometrie minimale Einrisse am Buchsenauslauf erzeugten. Tabelle 4-1 enthält die Auflistung aller zu untersuchenden Faktoren inklusive ihrer Faktorstufen.

| Faktor | untere Faktorstufe | obere Faktorstufe |
|-------------------------|--------------------|-------------------|
| Konturvariante | Standardgeometrie | Sondergeometrie |
| Spitzenwinkel | 80 ° | 90 ° |
| Konuswinkel | 33 ° | 39 ° |
| Formstollenzahl | 3 | 5 |
| Formstollenverhältnis | 95 % | 97 % |
| Drallwinkel | 0 ° | 37,5 ° |
| Werkzeugdurchmesser | 9,2 mm | 13 mm |
| Werkstückcharge | A | B |
| Blechdicke | 2 mm | 3 mm |
| Umfangsgeschwindigkeit | 70 m/min | 110 m/min |
| Vorschubgeschwindigkeit | 50/200 mm/min | 50/300 mm/min |

Tabelle 4-1: Faktorstufen des 2^{11-4} -Faktorenplans

Innerhalb der Faktoren spielt der Werkzeugdurchmesser eine besondere Rolle, da bei dessen Variation nicht nur der Durchmesser, sondern auch die gesamten Werkzeugabmaße zunehmen. Er ist somit streng genommen eine Art Zoomfaktor und dient als Verifizierungsgröße für spätere Fließlochformerbaureihen. Als untere Faktorstufe des Werkzeugdurchmessers wurde ein Durchmesser von 9,2 mm gewählt. Dieser Durchmesser erzeugt eine Fließlochbuchse, welche sich für die nachträgliche Fertigung eines M10 Gewindes mittels Gewindefurchen verwenden lässt. Als obere Faktorstufe wurde ein Werkzeugdurchmesser von 13 mm gewählt. Bei diesem Durchmesser steht im Vergleich ca. die doppelte Menge an zu verdrängendem Werkzeugvolumen zur Verfügung.

Die Werkstückcharge wurde als Versuchsfaktor aufgenommen, da die Blechstreifen aus unterschiedlichen Blechen geschnitten werden. Da sich Werkstoffchargen meist nicht genau gleich verhalten, dient dieser Faktor zur Blockbildung und stellt somit sicher, dass die erfassten Effekte nicht durch die Werkstoffcharge verfälscht werden.

Der Versuchsplan enthält die Bearbeitung von zwei unterschiedlichen Blechdicken. Da Bearbeitungsparameter grundsätzlich an die jeweiligen Blechdicken anzupassen sind, erfolgt auch hier eine Anpassung des Umschaltpunkts an die Blechdicke. Der Umschaltvorgang liegt aufgrund von Vorversuchen bei dem 1,3fachen der jeweiligen Blechdicke.

4.3.2 Werkstoff des Fließlochformers

Die Fließlochformer bestehen aus einer speziell für diesen Prozess entwickelten Hartmetallsorte GS2 der Firma Ceratizit. Es handelt sich dabei um ein Hartmetall auf Mischkarbid-Basis mit den Elementen Co-WC-(Ti Ta Nb)C. Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die physikalischen und mechanischen Eigenschaften dieser Hartmetallsorte. Abbildung 4-12 zeigt die Gefügestruktur.

| Kenngröße | Wert | Einheit |
|-----------------------------|-------------|----------------------------------|
| Dichte (ISO 3369) | 12,23 | g/cm ³ |
| Härte (ISO 3878) | 1489 | HV10 |
| Härte (ISO 3878) | 1480 | HV30 |
| Biegebruchfestigkeit | 2200 | MPa |
| Druckfestigkeit | 5800 | MPa |
| Elastizitätsmodul | 520 | GPa |
| Bruchzähigkeit | 11,2 | MPa.m ^{1/2} |
| Wärmeleitfähigkeit | 40 | Wm ⁻¹ K ⁻¹ |
| Wärmeausdehnungskoeffizient | 6,3 | 10 ⁻⁶ K ⁻¹ |
| Magnetische Sättigung | 18,9 | µTm ³ /kg |
| Koerzitivfeldstärke | 11,7 | kA/m |
| Porosität (ISO 4505) | A02 B00 C00 | |

Tabelle 4-2: physikalische und mechanische Eigenschaften des Hartmetalls

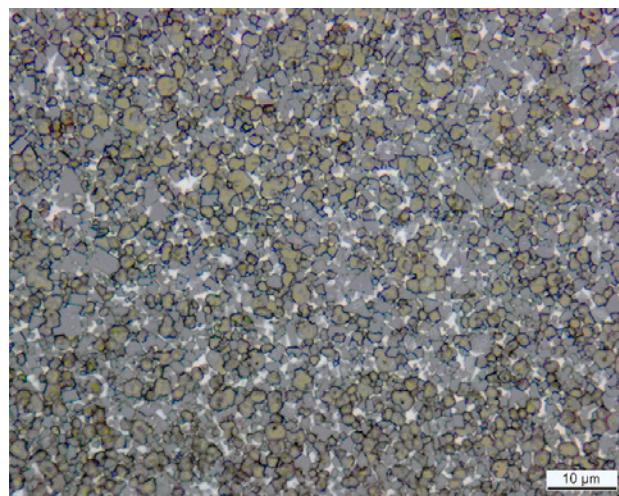


Abbildung 4-12: Gefügestruktur der Hartmetallsorte

4.3.3 Versuchswerkstoff S355 J2G3 (St52)

Als Versuchswerkstoff wird der unlegierte Stahl S355 J2G3 (DIN EN 10025, Werkstoff-Nr.: 1.0562, alte Bezeichnung: St52) mit einer Blechdicke von 2 mm und 3 mm verwendet. Die Werkstückabmaße betragen 200×30 mm. In jeden Blechstreifen lassen sich fünf Buchsen fertigen. Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die chemische Zusammensetzung des Werkstoffs:

| Stahlsorte | | Chemische Zusammensetzung, Massenanteil in % | | | | | |
|---------------------|----------|--|---------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| Kurzname | Wst. Nr. | C | Si | Mn | P | S | N |
| S355 J2G3 (St52) | 1.0562 | $\leq 0,2\%$ | $\leq 0,55\%$ | $\leq 1,6\%$ | $\leq 0,035\%$ | $\leq 0,035\%$ | $\leq 0,009\%$ |

Tabelle 4-3: Chemische Zusammensetzung von S355 J2G3 (St52) nach DIN 17102

Im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt sind die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von S355 J2G3 (St52) zusammengefasst:

| ϑ | α | β | E | \overline{c}_p | c_p^w | ϱ | λ | a |
|--------------------|--------------------|--------------------|-----|------------------|----------|--------------------------|-----------|------------------------------|
| $^{\circ}\text{C}$ | $10^{-6}/\text{K}$ | $10^{-6}/\text{K}$ | GPa | J/(kg·K) | J/(kg·K) | $\mu\Omega\cdot\text{m}$ | W/(m·K) | $10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ |
| -100 | 10,8 | 9,3 | 217 | 423 | 371 | 0,182 | 37,6 | 12,9 |
| 0 | 11,7 | 11,6 | 213 | 456 | 451 | 0,236 | 14,6 | 11,8 |
| 20 | 11,9 | 11,9 | 212 | 461 | 461 | 0,247 | 42,2 | 11,7 |
| 100 | 12,5 | 13,0 | 207 | 479 | 496 | 0,296 | 43,2 | 11,2 |
| 200 | 13,0 | 14,0 | 199 | 499 | 533 | 0,368 | 42,9 | 10,3 |
| 300 | 13,6 | 15,0 | 192 | 517 | 568 | 0,455 | 41,2 | 9,4 |
| 400 | 14,1 | 15,9 | 184 | 536 | 611 | 0,556 | 39,1 | 8,3 |
| 500 | 14,5 | 16,6 | 175 | 558 | 677 | 0,675 | 36,6 | 7,1 |
| 600 | 14,9 | 16,4 | 164 | 587 | 778 | 0,813 | 34,1 | 5,7 |

Tabelle 4-4: Physikalische Eigenschaften von S355 J2G3 (St52)/110/

4.4 Versuchsplanerstellung

Nach Auswahl des Versuchsplans und Festlegung der Faktoren samt der Faktorstufen erfolgt das eigentliche Aufstellen des Versuchsplans. Hierbei werden den Realfaktoren die systematischen Faktoren A, B usw. zugeordnet und entsprechend die Faktorstufenkombinationen eingetragen. Grundsätzlich hat diese Zuordnung keinen Einfluss auf das spätere Versuchsergebnis. Durch geschickte Zuordnungen der Faktoren wird jedoch der Fertigungsaufwand der Fließlochformervariationen von 128 auf 64 Einzelformen reduziert. Tabelle 4-5 zeigt die durchgeführte Zuordnung. Mit Hilfe dieser Zuordnung lässt sich die Matrix der unabhängigen Variablen bestimmen (vgl. Kapitel 2.2.3.1). Die Tabelle 10-2 enthält den vollständigen Versuchsplan.

| Bezeich-nung | Faktor | untere Faktorstufe | obere Faktorstufe |
|---------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| | | “ – “ | “ + “ |
| A | Konuswinkel | 33 ° | 39 ° |
| B | Konturvariante | Standardgeometrie | Sondergeometrie |
| C | Formstollenzahl | 3 | 5 |
| D | Formstollenverhältnis | 95 % | 97 % |
| E | Durchmesser | 9,2 mm | 13 mm |
| F | Werkstoff Charge | S355 J2G3 (A) | S355 J2G3 (B) |
| G | Umfangsgeschwindigkeit | 70 m/min | 110 m/min |
| H | Drallwinkel | 0 ° | 37,5 ° |
| J | Spitzenwinkel | 80 ° | 100 ° |
| K | Blechdicke | 2 mm | 3 mm |
| L | Vorschub | 50/200 mm/min | 50/300 mm/min |

Tabelle 4-5: Zuordnung der Faktoren

4.5 Versuchstechnik

4.5.1 Fertigung der Fließlochformer

Für die Fertigung der Fließlochformer war die Entwicklung einer Schleiftechnologie und eines parametergesteuerten Programms zur Erzeugung des Fließlochformerschleifcodes, welches die Ansteuerung einer mehrachsigen Universalschleifmaschine ermöglicht, nötig. Um weitgehend unabhängig von den Vorgaben der Maschinensteuerungen zu bleiben, wurde die NC-Code Erzeugung vom eigentlichen Bearbeitungsprozess entkoppelt und Visual Basic for Applications (VBA) als Programmiersprachen für die Programmerzeugung außerhalb der Bearbeitungsmaschine genutzt. Aufgrund der hohen Flexibilität wird beim eigentlichen Schleifprozess das kontinuierliche Point-Grinding angewandt, dessen Kinematik aufgrund seiner Punktberührungen die gleichen Freiheitsgrade wie das Außenkonturdrehen aufweist und somit weitgehend unabhängig von der geometrischen Gestaltung der Schleifscheibe ist. Als Einschränkung bleibt somit das kinematische Hinterschneiden der Hubbewegung, welches mit geeigneten Algorithmen kompensiert wird.

Bei dieser Vorgehensweise wird die Außenkontur des Fließlochformwerkzeugs grundsätzlich in eine sehr große aber endliche Anzahl von virtuellen Schleifscheibenläufen unterteilt, die beim realen Prozess durch eine nahezu kontinuierliche Werkstückrotation erfolgt. Hierfür wird die Zustellbewegung der Schleifscheibe aus der mathematischen Beschreibung der Fließlochformer-Mantelfläche abgeleitet und parametrisch beschrieben. Die Komponenten der Werkzeugoberflächenmatrix setzen sich faktoriell aus den Funktionalen der Werkzeugkontur und der Formstollengeometrie, die im Kapitel 4.1.1.1 hergeleitet wurden zusammen. Durch eine entsprechend parametrische Formulierung der einzelnen Faktorfunktionale lassen sich die so gewonnenen Oberflächenvektoren programmtechnisch in einen geeigneten NC-Code überführen. Diese Vorgehensweise ermöglichte die beliebige Variation der Fließlochformergeometrie durch Eingabe der benötigten Geometrieparameter in einer Eingabemaske, in der in Abhängigkeit des gewählten Werkzeugtyps alle Parametervariationsmöglichkeiten der Abbildung 4-9 abgefragt werden. Zudem besteht die Möglichkeit der direkten Adaption von beliebig gestalteten CAD-Konturen.

Die Fertigung der Fließlochformer erfolgt auf einer CNC-Schleifmaschine vom Typ Schütte WU 400-CNC-5C, welche mit einer Steuerung vom Typ NUM 1060-M ausgestattet ist.

4.5.2 Maschinen und Vorrichtungen

Die Fertigung der Fließlochbuchsen erfolgt an einem vertikalen CNC-Bearbeitungszentrum des Typs Maho Mahomat. Dieses ist mit einer Philips 432 Steuerung ausgestattet und ermöglicht bei einer Antriebsleistung von 22,5 KW und einem Drehmoment von 31 Nm Drehzahlen im Bereich von 20-6000 U/min sowie Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 6000 mm/min.

Die Einspannung der Blechstreifen erfolgt in einer Vorrichtung, bei der ein U-Profil die Streifen an eine Gegenhalterplatte mit Aussparung für die Buchse drückt.

4.5.3 Messtechnik

Die Erfassung des Drehmoments und der Axialkraft während des Bearbeitungsprozesses erfolgt durch ein Dynamometer vom Typ Kistler 9273 auf dem die Einspannvorrichtung montiert ist. Die Zielgrößen werden in Abhängigkeit von der Zeit und dem Vorschubweg erfasst. Die Messsignale werden über einem Ladungsverstärker vom Typ RMP VD8 an einen Messrechner, welcher mit einer Analog-Digital-Wandlerkarte vom Typ Eagle PC30DS ausgestattet ist, übertragen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgt mit Hilfe der Anwendungssoftware DIAdem. Der Energieeintrag wird in dieser Arbeit rechnerisch aus dem aufgezeichneten Drehmomentverlauf bestimmt.

Zur Erfassung der Temperatur wird ein Pyrometer des Typs Raytec MXTD eingesetzt. Dieses ermöglicht bei einem spektralen Wellenlängenbereich von 8 bis 14 μm die berührungslose Erfassung von Temperaturen von bis zu 900 °C in Echtzeit. Um den Einfluss des sich während des Bearbeitungsprozesses ändernden Emissionskoeffizienten so gering wie möglich zu halten, werden die Versuchsstreifen auf der Blechunterseite mit hochtemperaturbeständigem Lack schwarz lackiert. Die Temperaturmessung erfolgt am Übergang von Blech zu Fließlochbuchse (vgl. Abbildung 4-13) und wird zeit- und wegabhängig erfasst. Dieser Punkt wurde auf Grund von Voruntersuchungen mit einer Thermographiekamera ausgewählt. Diese zeigten, dass in diesem Bereich die höchsten mit optischen Messsystemen erfassbaren Prozesstemperaturen vorliegen. Die Temperaturmessung erfolgt parallel zur Kraft- und Drehmomenterfassung. Die Temperaturdaten werden direkt an den Messrechner übertragen und mit der Anwendungssoftware DIAdem aufgezeichnet. Für die Aufbereitung und Auswertung sowie für die visuelle Darstellung der Prozessgrößen wird Microsoft Excel in Kombination mit VBA verwendet.

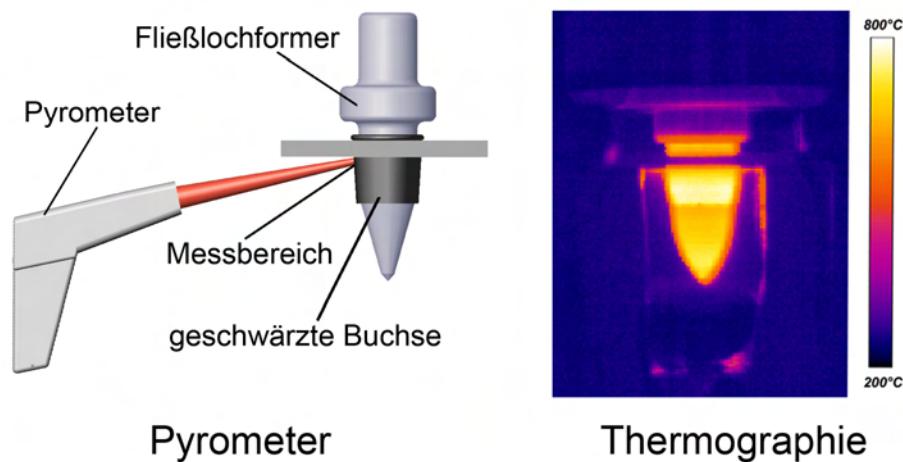


Abbildung 4-13: Temperaturerfassung beim Fließlochformen

In dieser Arbeit werden zur Beurteilung der Buchsenqualität die Zielgrößen maximale Risslänge, Buchsenlänge sowie das nach unten und oben verdrängte Werkstoffvolumen betrachtet. Zur Erfassung dieser Größen werden die gefertigten Fließlochbuchsen mittig mit einer CNC-Drahterdiermaschine des Typs Matra Fanuc Robocut auferodiert, mit einem digitalen Flachbrettscanner vom Typ HP Scannjet 2400 eingescannt und mit Hilfe der CAD-Software AUTOCad vermessen. Die Zielgröße Risslänge ist als maximale Einrißlänge am Buchsenende definiert. Als Buchsenlänge wird die Länge der Buchse ausgehend von der Blechunterseite bezeichnet (vgl. Abbildung 4-10). Für die Bestimmung des verdrängten Werkstoffvolumens wird ausgehend vom Buchsenquerschnitt das Rotationsvolumen berechnet.

Alle Versuche werden zur statistischen Absicherung mit fünffacher Wiederholung durchgeführt. Die Messwerte aller im Rahmen dieser Arbeit dargestellter Diagramme zeigen somit Stichprobenmittelwerte.

5 Versuchsauswertungsmethoden

Die Versuchsauswertung erfolgt in zwei Stufen. In der ersten Stufe wird zur Darstellung der Versuchsergebnisse eine zielgrößen- und faktororientierte Effektanalyse durchgeführt. In der zweiten Stufe wird auf Grundlage der bestimmten signifikanten Haupt- und Wechselwirkungseffekte ein Interaktionsmodell erstellt, welches eine Interpolation der Versuchsergebnisse innerhalb des untersuchten 2^{11-4} Hyperwürfels ermöglicht.

In die Auswertung der Prozessgrößen fließen jeweils die maximalen Messwerte der untersuchten Zielgrößen vor der Umformung des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens aller fünf Versuchswiederholungen jeder Faktorstufenkombination ein (siehe Phase I bis Phase V in Abbildung 2-6). Insgesamt erfolgt die Berechnung jedes Einzeleffekts auf Grundlage von 320 Einzelergebnissen.

Im Rahmen der Versuchsauswertung werden die Begriffe positive und negative Effekte verwendet. Hier ist zu beachten, dass sich die Begriffe positiv und negativ auf die Richtung des Effekts beziehen und demzufolge keine Wertung des durch die Faktorvariation hervorgerufenen Effekts darstellen.

5.1 Methoden der Effektanalyse

5.1.1 Zielgrößenorientierte Effektanalyse

Im Rahmen der zielgrößenorientierten Effektanalyse wird der Einfluss der Faktoren auf die Zielgrößen ausgewertet. Dazu werden zunächst die Effekte der Faktoren auf die zu betrachtende Zielgröße berechnet und auf Signifikanz geprüft. Effekte geben die zielgrößenbasierte Mittelwertdifferenz zwischen allen Versuchsergebnissen auf der oberen Stufe und allen auf der unteren Stufe eines Faktors an. Effekte haben grundsätzlich die Einheit der Zielgröße. In Tabelle 5-1 sind beispielhaft einige für diese Form der Auswertung benötigten Daten zusammengefasst. Diagramm 5-1 zeigt, dass sich daraus ergebende Auswertungsdiagramm, indem sowohl die Einzelversuchsergebnisse als auch die Haupteffekte dargestellt sind.

| Faktor | Größen-Variation | Haupteffekt Axialkraft [N] (Kraftänderung) | Haupteffekt bezogen auf die jeweils kleinere Größe |
|-----------------------|---------------------------------|--|--|
| Konuswinkel | $33^\circ \Rightarrow 39^\circ$ | 224 | 6 % |
| Konturvariante | Standard \Rightarrow Sonder | 1370 | 46 % |
| Formstollenanzahl | $3 \Rightarrow 5$ | -41 | -1 % |
| Formstollenverhältnis | $0,95\% \Rightarrow 0,97\%$ | 108 | 3 % |

Tabelle 5-1: Auszug aus der Ergebnistabelle der Versuche

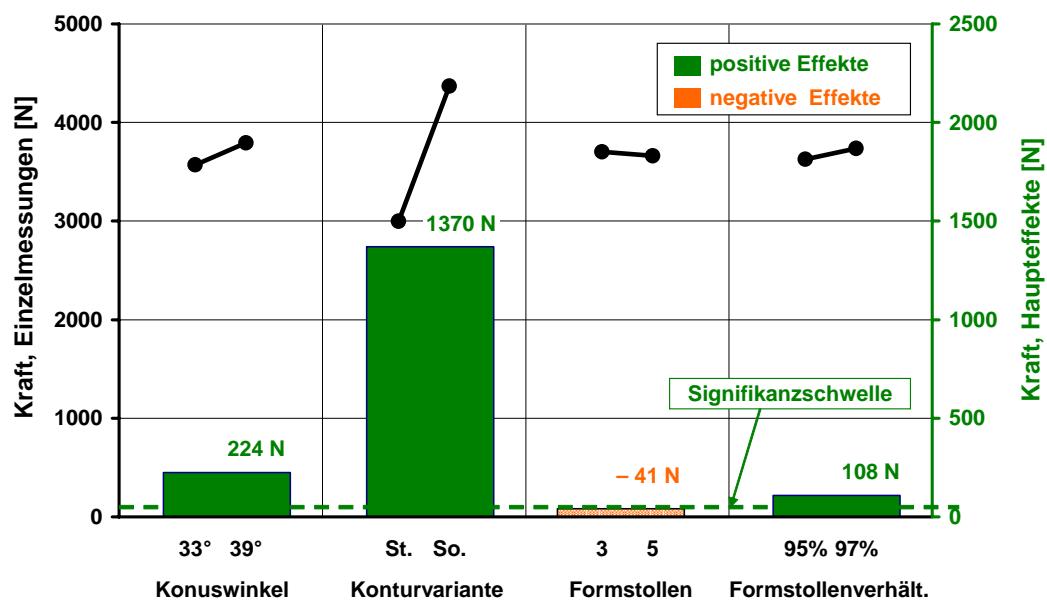


Diagramm 5-1: Einzelmesswerte und Haupteffekte der Axialkraft

Um über den reinen Effekt hinaus Informationen hinsichtlich des Umfangs eines Effekts zu erhalten, wird der prozentuale Effekt bezogen auf die untere Faktorstufe berechnet. Die berechneten prozentualen Änderungen werden zielgrößenabhängig in Übersichtsdiagramme eingetragen. Diagramm 5-2 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt des Diagramms für die Axialkraft. Diese zielgrößenbezogenen Diagramme enthalten den prozentualen Beeinflussungsbereich der Zielgröße, der auf die Variation des Faktors von der unteren auf die obere Faktorstufe zurückzuführen ist. Die unterschiedliche Farbdarstellung trennt die als signifikant eingestuften Effekte von den zufälligen und indifferenten Effekten.

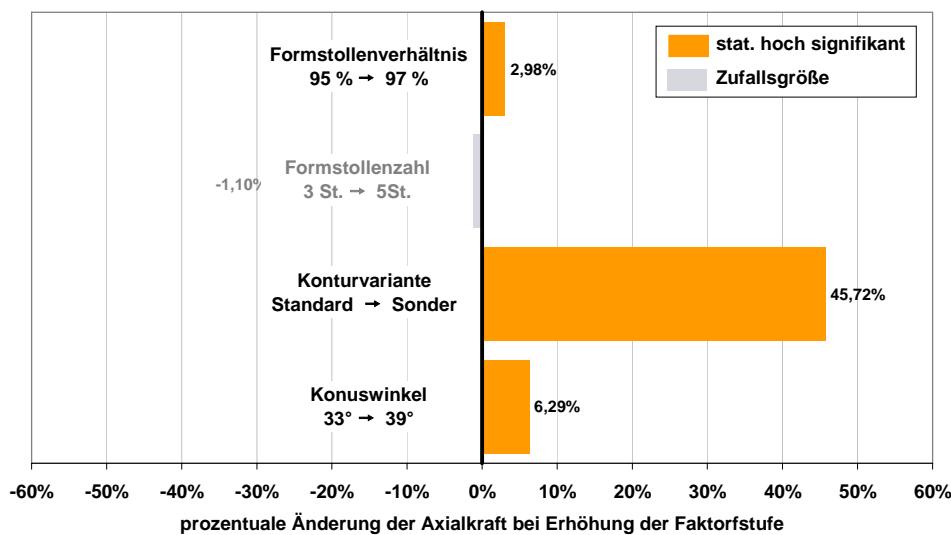


Diagramm 5-2: Ausschnitt des Effektdiagramms der Axialkraft

Das Diagramm enthält Informationen der folgenden Art:

- Die Änderung der Konturvariante von Standardgeometrie auf Sondergeometrie führt zu einer statistisch nachweisbaren Steigerung der maximalen Axialkraft von 46 %, welche auf eine Erhöhung der Axialkraft von 2997 N auf 4367 N zurückzuführen ist. Der Faktor Konturvariante besitzt somit innerhalb des untersuchten Versuchsraums den größten Einfluss auf die maximale Axialkraft.
- Im direkten Vergleich zur Konturvariante ist der Einfluss der Formstollenzahl mit -1,1 % sehr gering. Dieser ist auf die Änderung der Formstollenzahl von drei auf fünf, welcher eine Verringerung der Axialkraft von 3703 N auf 3662 N hervorgerufen hat, zurückzuführen. Die helle Füllfarbe zeigt an, dass der Faktor Formstollenzahl keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße Axialkraft besitzt.

Die Versuchsauswertung wird vornehmlich mit Hilfe der Übersichtsdiagramme der prozentualen Änderung durchgeführt. Alle Einzelversuchsergebnisse der Haupteffekte sind in Tabelle 10-4 enthalten. Auf die grafische Darstellung von Versuchsergebnissen einzelner Faktorstufenkombinationen wird im Rahmen dieser Auswertung verzichtet. Ein direkter Vergleich zweier Einzelergebnisse zur Beschreibung des Einflusses eines Faktors auf eine bestimmte Zielgröße ist aufgrund der starken Vermengung des verwendeten fraktionellen faktoriellen 2^{11-4} Versuchsplans nicht aussagefähig. Ein solcher Vergleich könnte zu Fehlininterpretationen führen, da nicht direkt ersichtlich ist, welche Faktorstufe für die Änderung des Versuchsergebnisses verantwortlich ist. Ein solcher Vergleich ist nur bei vollfaktoriellen Versuchsplänen unbedenklich möglich. Eine direkte Gegenüberstellung einzelner Faktoreinflüsse erfolgt im Rahmen der Detailuntersuchungen.

Neben der Darstellung und Auswertung der Haupteffekte sind die Zweifach-Wechselwirkungseffekte mit zu berücksichtigen. Diese geben an, ob und wie der Effekt eines Faktors von der Stufe eines zweiten Faktors abhängt. Wechselwirkungseffekte treten somit immer dann auf, wenn die an der Wechselwirkung beteiligten Haupteffekte nicht additiv sind. Insgesamt ergeben sich bei dem verwendeten 2^{11-4} -Versuchsplan 55 Zweifach-Wechselwirkungseffekte. Bei allen Wechselwirkungseffekten höherer Ordnung wird davon ausgegangen, dass sie im Bereich der Streuung liegen und daher im Rahmen der Auswertung zu vernachlässigen sind. Die Wechselwirkungen werden analog zu den Haupteffekten in der Effektmatrix des Versuchsplans berechnet und auf Signifikanz geprüft.

Für die Visualisierung der Zweifach-Wechselwirkungseffekte werden die vier gemittelten Versuchsergebnisse der an der Wechselwirkung beteiligten Faktorstufenkombinationen bestimmt. Um die Wechselwirkung eines Faktors mit allen weiteren Faktoren grafisch darzustellen, wird eine faktorbezogene Visualisierung verwendet. Der jeweilige betrachtete Faktor bildet die Basis des Diagramms. Insgesamt erhält man für jede Zielgröße 11 Zweifach-Wechselwirkungsdiagramme. Diagramm 5-3 zeigt für die Zielgröße Axialkraft beispielhaft einen Ausschnitt eines solchen Wechselwirkungsdiagramms mit der Konturvariante als Basis.

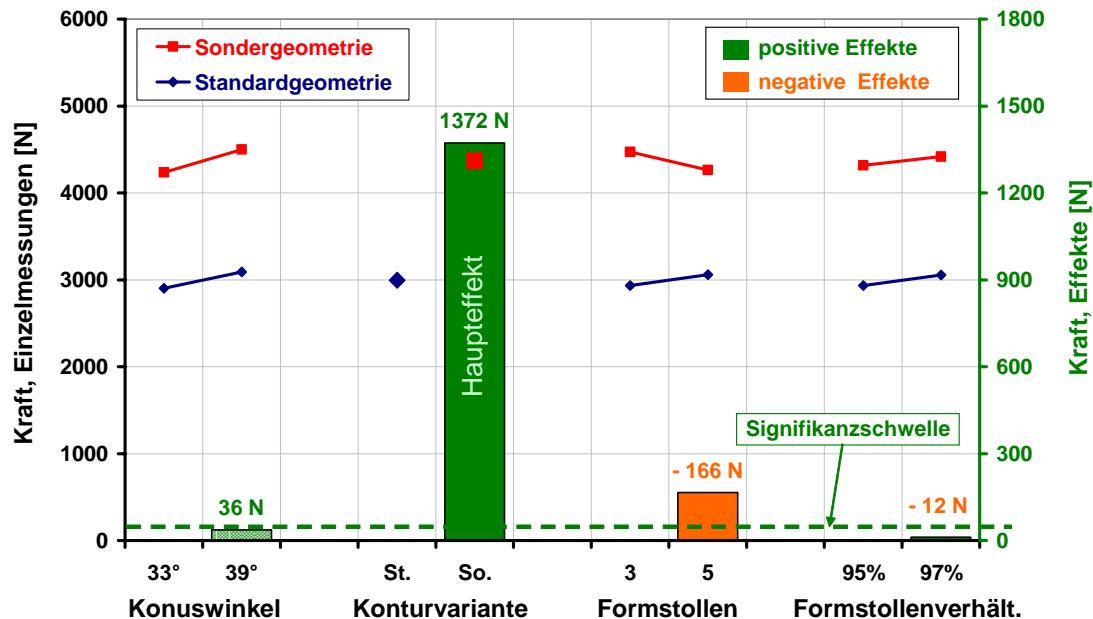


Diagramm 5-3: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Axialkraft

Durch diese Form der Darstellung erhält man anhand der Abweichung der Linien von der Parallelität einen Überblick über vorhandene Wechselwirkungseffekte. Die berechneten Wechselwirkungseffekte werden zusätzlich mit Hilfe der zweiten Ordinate in das Wechselwirkungsdiagramm integriert. Infolge dessen, dass auch der Haupteffekt der betrachteten Basis in dieser Darstellung enthalten ist, ermöglicht sie darüber hinaus die Abschätzung der Bedeutung der Wechselwirkung im Vergleich.

Das Diagramm enthält Informationen der folgenden Art:

- Statistisch nachweisbare Wechselwirkung der Konturvariante und Formstollenzahl. Der durch die Veränderung der Konturvariante erzielte Effekt ist wechselseitig abhängig von der Formstollenzahl. Bei der Sondergeometrie bewirkt eine Erhöhung der Formstollenzahl von 3 Stollen auf 5 Stollen einen um 166 N höheren Effekt bezüglich der Axialkraft als bei der Standardgeometrie. Ebenso gilt: Bei der niedrigen Faktorstufe der Konturvariante hat eine Änderung der Formstollenzahl einen kleineren Effekt als bei der hohen Faktorstufe der Konturvariante. Darüber hinaus sind beide an der Wechselwirkung beteiligten Einzeleffekte gegenläufig.
- Statistisch nicht nachweisbare Wechselwirkung von Konturvariante und Konuswinkel. Der durch die Veränderung der Konturvariante erzielte Effekt ist wechselseitig abhängig von dem Konuswinkel. Bei der Sondergeometrie bewirkt eine Erhöhung des Konuswinkels von 33° auf 39° Stollen einen um 36 N kleineren Effekt bezüglich der Axialkraft als bei der Standardgeometrie. Ebenso gilt: Bei der niedrigen Faktorstufe der Konturvariante hat eine Änderung des Konuswinkels einen höheren Effekt als bei der hohen Faktorstufe der Konturvariante. Da der Effekt mit 36 N unter der Signifikanzgrenze von 52,55 N liegt, ist er nicht als hoch signifikant einzustufen.
- Negative Wechselwirkungseffekte sind in den Diagrammen durch ihre orange Farbgebung von den positiven Effekten, welche grün dargestellt sind, zu unterscheiden.

Die Auswertung der Wechselwirkungseffekte erfolgt vornehmlich für die Faktoren mit den größten Haupteffekten. Alle weiteren Wechselwirkungseffekte sind der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

5.1.2 Faktororientierte Effektanalyse

Auf Grundlage der zielgrößenorientierten Effektanalyse erfolgt die Auswahl und Variation eines bestimmten Faktors, um so die primäre Zielgröße der Zielsetzung entsprechend zu beeinflussen. Um darüber hinaus einen Überblick über die Wirkung dieser Variation auf die übrigen Zielgrößen zu erhalten, wird eine faktororientierte Effektanalyse durchgeführt. Dazu wird der Einfluss eines Faktors auf alle untersuchten Zielgrößen durch faktororientierte Effektdiagramme, deren Grundlage die Werte der zielgrößenabhängigen Übersichtsdiagramme bilden, dargestellt.

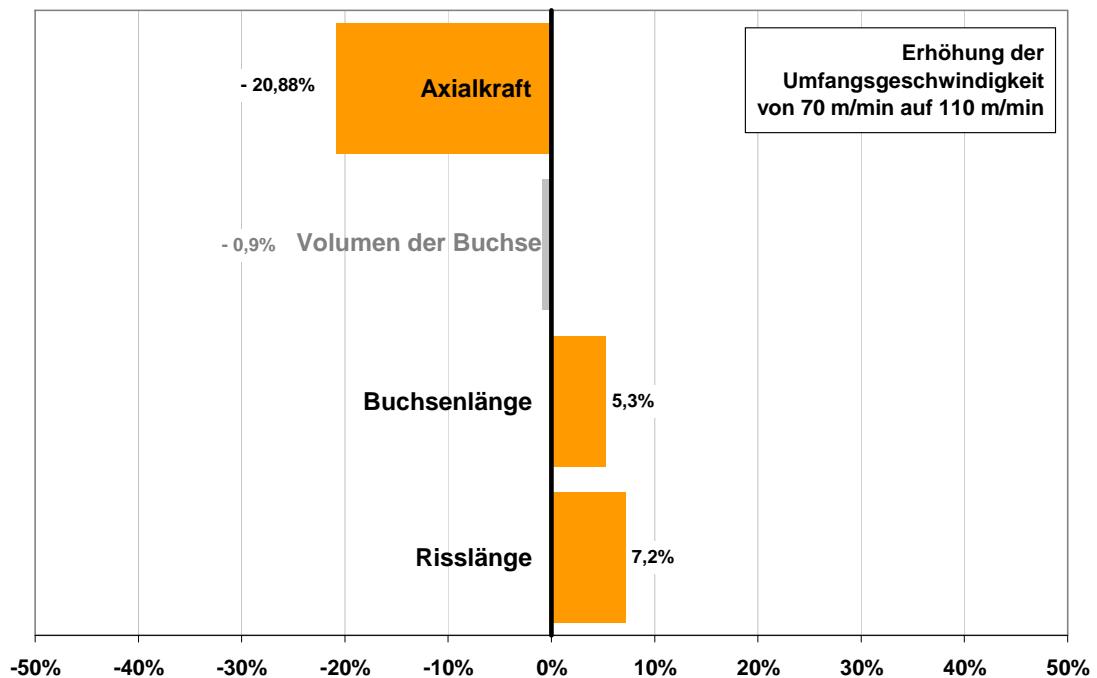


Diagramm 5-4: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Zielgrößen

Diese Diagramme enthalten die prozentualen Änderungen aller Zielgrößen hervorgerufen durch die Variation des betrachteten Faktors von der unteren auf die obere Faktorstufe. Die farbliche Abstufung der Balken spiegelt, analog zu den zielgrößenbezogenen Diagrammen, das Ergebnis des Signifikanztests wieder.

5.2 Regressionsanalyse von Faktorenplänen

Die Effektanalyse gibt einen umfassenden Überblick über die durch die gezielte Änderung der Einflussfaktoren mögliche Beeinflussbarkeit der Prozessgrößen und der Buchsenqualität. Es ist möglich, zielgrößenorientiert wichtige von unwichtigen Faktoren zu unterscheiden. Durch die faktororientierte Effektanalyse lässt sich die Wirkung der Faktorvariation auf alle untersuchten Zielgrößen abschätzen. Darüber hinaus ergeben sich durch die Wechselwirkungseffekte Informationen über mögliche Interaktionen einzelner Faktoren, so dass sich diese bei einer Parameterauswahl mit berücksichtigen lassen. Die Möglichkeit der Berücksichtigung von Wechselwirkungseffekten bei der Parameterauswahl ist einer der wesentlichen Vorteile der statistischen Versuchsplanung.

Die richtige Wahl der Einstellparameter, bezogen auf einen speziellen Anwendungsfall, ist trotz der Kenntnis der Effekte der Einflussgrößen und deren Wechselwirkung jedoch relativ schwierig. Grund dafür ist die hohe Anzahl der zu berücksichtigenden Effekte. Diese ist mit elf Haupteffekten und 55 Zweifach-Wechselwirkungseffekten pro Zielgröße vergleichsweise hoch. Um diese große Menge an Informationen zu bündeln und handhabbar zu machen, ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen zu modellieren, welcher die Realität näherungsweise wiedergibt.

$$\text{Realität: } y = f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (41)$$

$$\text{Mathematisches Modell: } \bar{y} = g(x) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (42)$$

$$\text{Abweichung von der Realität: } e = y - \bar{y} \quad (43)$$

Im Allgemeinen erfolgt eine Modellbildung mit Hilfe der multiplen Regression, welche die stochastisch beeinflussbaren Abhängigkeiten zwischen Faktoren und Zielgrößen auf Grundlage der ermittelten Daten mathematisch erfasst. Die Regressionskoeffizienten werden dabei häufig nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt, welche die Summe der quadrierten Abweichungen zwischen dem Regressionsmodell und den für diese Parameterkombination real gemessenen Versuchsergebnissen minimiert /25/, /26/, /108/:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} \sum_j^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (45)$$

Das Regressionsmodell eines 2^{k-p} Faktorenplans wird aufgrund der Berücksichtigung mehrerer Faktoren ebenfalls dem Gebiet der multiplen Regression zugeordnet. Fraktionelle faktorielle Faktorenpläne 1. Ordnung liefern gemischte Polynome, da sie neben den rein linearen Gliedern auch Wechselwirkungsglieder enthalten. Berücksicht man neben den Haupteffekten auch die Zweifach-Wechselwirkungen der gemischten Polynome eines 2^{k-p} Faktorenplans, so erhält man ein Regressionsmodell zweiten Grads /25/, /26/:

$$\bar{y} = \underbrace{b_0}_{\text{Interferenz}} + \underbrace{\sum_{i=1}^k b_i x_i}_{\text{Haupteffekte}} + \underbrace{\sum_{i<j}^{k-1} \sum_j^k b_{ij} x_i x_j}_{\text{Zweifach-Wechselwirkungen}} \quad (46)$$

Bei Faktorenplänen lassen sich die Koeffizienten nach /108/ dadurch, dass die Matrix der unabhängigen Variablen quadratisch, orthogonal und normiert ist, durch die vereinfachte Koeffizientengleichung berechnen:

$$b = \frac{\sum xy}{\sum x^2} \quad (47)$$

Aufgrund der Analogie der Effektberechnung lassen sich direkt aus der Effektmatrix die linearen Regressionskoeffizienten bestimmen. Die Orthogonalität der Matrix der unabhängigen Variablen führt zu einer unabhängigen Additivität der Regressionspolynomglieder, nicht signifikante Glieder sind bei der Modellbildung nicht zu berücksichtigen. Sie lassen sich ohne Modifikationen der anderen Glieder aus dem Regressionsmodell streichen /108/.

Die mathematische Modellbildung ermöglicht es, innerhalb des untersuchten Hyperwürfels beliebige Versuchspunktkombinationen zu berechnen. Somit lassen sich, unter Berücksichtigung aller untersuchten Zielgrößen, die für die Zielstellung optimalen Einstellparameter bestimmen. Da lediglich ein Versuchspunkt aus einem anderen Teilstufenplan der gleichen Familie berechnet wird, handelt es sich bei dieser Vorgehensweise um eine Interpolation. Eine Extrapolation zu Einstellwerten, die höher oder tiefer als die im Versuch verwendeten Faktorstufen liegen, führt prinzipiell aus dem untersuchten Versuchsreich und somit aus dem Gültigkeitsbereich des Modells heraus. Sie ist mathematisch nicht zulässig und sollte aufgrund der Gefahr von Fehlinterpretationen nur mit Vorsicht durchgeführt werden.

6 Auswertung der statistischen Versuchsplanung

6.1 Effektanalyse

6.1.1 Versuchsergebnisse der zielgrößenorientierten Effektanalyse

Im Rahmen der zielgrößenorientierten Effektanalyse wird jede erfasste Zielgröße auf ihre Beeinflussbarkeit durch die Variation der untersuchten Faktoren hin untersucht. Dazu wird jede Zielgröße separat betrachtet.

6.1.1.1 Axialkraft

Das Axialkraftmaximum als Maß für die Werkzeug-, Werkstück- und Maschinenbelastung beträgt im Durchschnitt 3,7 kN. Bis auf die Formstollenzahl und die Werkstoffcharge besitzen alle Faktoren einen statistisch hoch signifikanten Einfluss. Die Konturvariante, die Blechdicke, der Werkzeugdurchmesser sowie die Umfangsgeschwindigkeit beeinflussen die Axialkraft am stärksten. Bei allen Faktoren erhöht sich durch den Wechsel von der niedrigen auf die hohe Faktorstufe das Axialkraftmaximum. Lediglich die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit führt zu einer Reduzierung der Axialkraft. Die maximale Werkstückbelastung ist bei der Standardgeometrie im Mittel um 45 % geringer als bei der Sondergeometrie. Darüber hinaus konnten große positive Zweifach-Wechselwirkungen zwischen Durchmesser und Blechdicke, Konturvariante und Blechdicke sowie zwischen Konturvariante und Durchmesser nachgewiesen werden. Die Versuchsergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 4.1.1.1, in deren Rahmen bereits ein grundsätzlich höheres Axialkraftmaximum bei Verwendung der Sondergeometrie prognostiziert wurde. Wird beim Einsatz der Sondergeometrie die maximal zulässige Werkstückbelastung überschritten, so lässt sich zur Vermeidung einer Werkstückdurchbiegung die Axialkraft durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit reduzieren. Konturvariante und Umfangsgeschwindigkeit sind jedoch nicht linear unabhängig, so dass die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit bei der Sondergeometrie zu einer stärkeren Reduzierung der Axialkraft führt als bei der Standardgeometrie.

Für den Vergleich der Belastung der beiden Werkzeugkonturvarianten wird im Rahmen der Detailuntersuchungen ein Kraftverlaufvergleich, in dem zusätzlich der Einfluss des Spitzwinkels und der Gesamtlänge des Anformbereichs berücksichtigt werden, durchgeführt.

Als weitere Wechselwirkung die in der Größenordnung der Haupteffekte des Drallwinkels und des Konuswinkels liegt, konnte die Interaktion zwischen der Formstollenzahl und

dem Formstollenverhältnis erfasst werden. Diese besagt, dass die Steigerung der Formstollenzahl bei einem Formstollenverhältnis von 95 % eine Reduzierung und bei einem Verhältnis von 97 % eine Steigerung der Axialkraft bewirkt.

Diese Erkenntnis scheint im ersten Moment im Widerspruch mit den erfassten Haupteffekten zu stehen, da dort kein hoch signifikanter Einfluss der Formstollenzahl nachgewiesen werden konnte. Dies ist durch die spezielle gegenläufige Form der an der Wechselwirkung beteiligten Einzeleffekte zu erklären. Sie führt dazu, dass sich der Einfluss der Formstollenzahl durch die Mittelwertbildung aufhebt (vgl. Kapitel 2.2.1). Als Versuchsergebnis kann daher festgehalten werden, dass sich im Durchschnitt durch die Variation der Formstollenzahl die Axialkraft nicht wesentlich beeinflussen lässt. In Abhängigkeit des gewählten Formstollenverhältnisses besitzt sie jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Axialkraft. Diese Aussage trifft, wie aus dem Diagramm 6-2 zu entnehmen ist, auch für die Interaktion zwischen der Formstollenzahl und der Konturvariante zu. Der Faktor Formstollenzahl wirkt somit nur in Kombination mit anderen Faktoren. Die Formstollenzahl ist insgesamt an fünf als hoch signifikant eingestuften Wechselwirkungen beteiligt und somit als ein wichtiger Einstellparameter einzustufen.

In Diagramm 6-1 sind die mit Hilfe der Haupteffekte berechneten prozentualen Änderungen des Axialkraftmaximums dargestellt. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

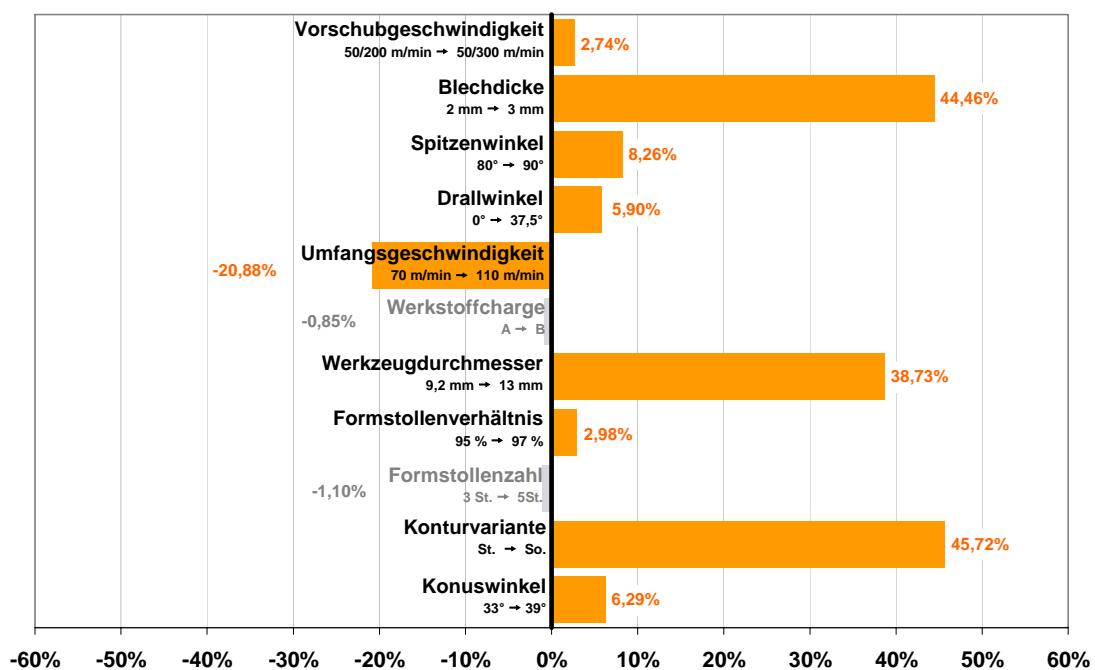


Diagramm 6-1: Haupteffekte - Einfluss auf die Axialkraft

Diagramm 6-2 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit der Konturvariante als Basis. Hier sind deutlich die oben beschriebenen Zweifach-Wechselwirkungen erkennbar. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

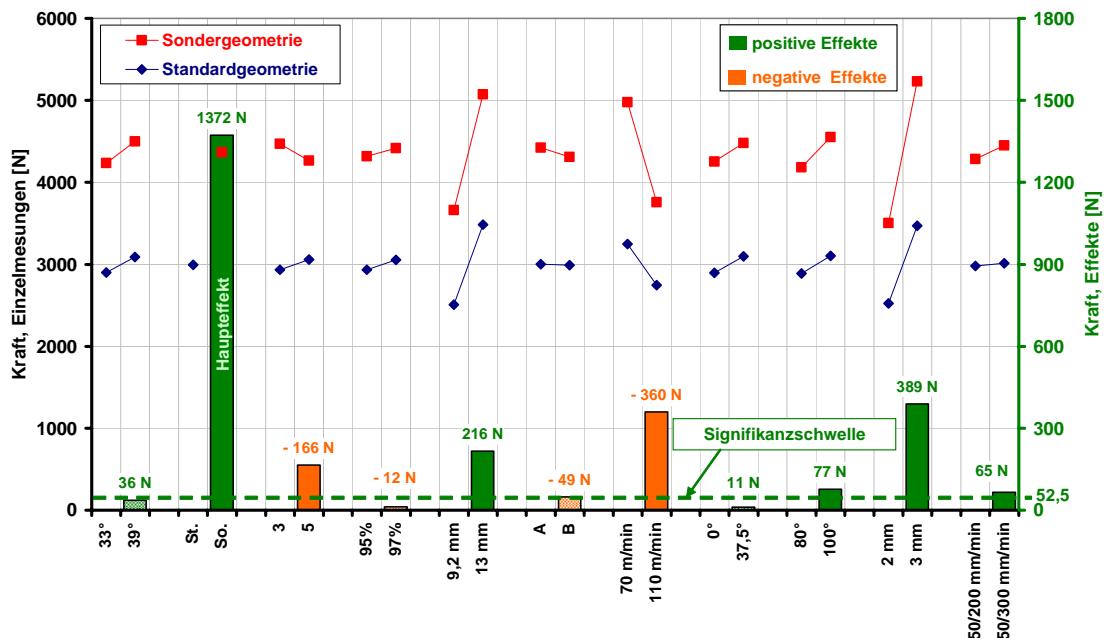


Diagramm 6-2: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Axialkraft

6.1.1.2 Drehmoment

Das Drehmomentmaximum als Maßzahl für die Formstollenbelastung wird hauptsächlich durch den Werkzeugdurchmesser beeinflusst und beträgt im Durchschnitt 6,8 Nm. Bei dem kleinen Werkzeugdurchmesser von 9,2 mm beträgt es im Mittel 4,7 Nm und bei dem Großen von 13 mm im Mittel 8,9 Nm. Als weitere konstruktive Vorgabe ist die Blechdicke, deren Steigerung von 2 mm auf 3 mm zu einer Erhöhung des Drehmoments um ca. 30 % führt, zu nennen. Dieser Effekt ist auf die Zunahme der Kontaktfläche zwischen Fließlochformer und Werkstück, hervorgerufen durch den Mehranteil des zu verdrängenden Werkstoffvolumens, zurückzuführen. Neben den konstruktiven Vorgaben beeinflussen die Bearbeitungsparameter Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeit das Drehmomentmaximum. Um das Drehmoment zu reduzieren, ist die Bearbeitung mit einer möglichst hohen Umfangsgeschwindigkeit und einer geringen Vorschubgeschwindigkeit durchzuführen. Bis auf die Umfangsgeschwindigkeit ist ein Wechsel von der niedrigen auf die hohe Faktorstufe bei allen Faktoren mit einer Steigerung des Drehmomentmaximums verbunden. Zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Blechdicke konnte darüber hinaus ein hoch signifikanter Wechselwirkungseffekt, der in der Größenordnung des Haupteffekts des Drallwinkels liegt, nachgewiesen werden. Durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit bei großer

Blechdicke lässt sich das maximale Drehmoment stärker reduzieren als bei kleiner Blechdicke.

Durch eine Änderung der Werkzeuggeometrie lässt sich das Drehmoment, im Vergleich zu den Faktoren Werkzeugdurchmesser, Umfangsgeschwindigkeit, Blechdicke und Vorschub, kaum beeinflussen.

In Bezug auf die erfassten Zweifach-Wechselwirkungseffekte konnten vornehmlich relativ starke Wechselwirkungseffekte mit dem Werkzeugdurchmesser nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass sich das Drehmomentmaximum durch Variationen der Umfangsgeschwindigkeit, der Blechdicke sowie der Vorschubgeschwindigkeit bei großen Werkzeugdurchmessern stärker ändert als bei kleinen Durchmessern. Die Größe dieser Wechselwirkungseffekte liegt im Bereich der Haupteffekte des Drallwinkels und der Formstollenzahl.

In Diagramm 6-3 sind die Haupteffekte bezüglich des Drehmomentmaximums prozentual dargestellt. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

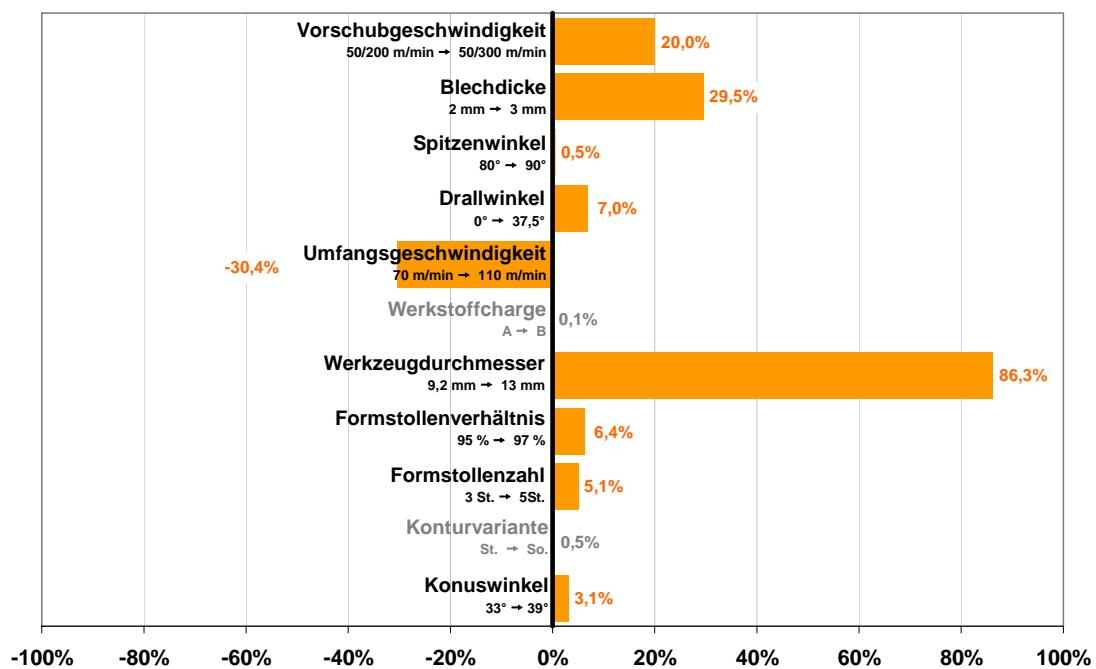


Diagramm 6-3: Haupteffekte - Einfluss auf das Drehmoment

Diagramm 6-4 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit dem Werkzeugdurchmesser als Basis. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

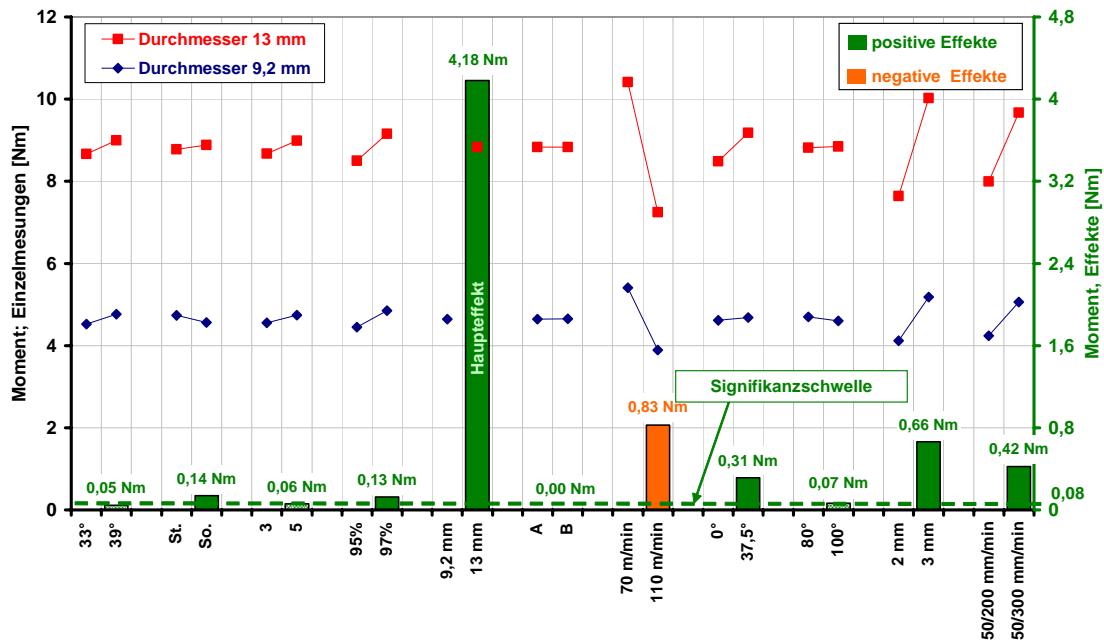


Diagramm 6-4: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf das Drehmoment

6.1.1.3 Energieeintrag

Der Energieeintrag ist ein Maß für die vom Fließlochformer bei der Fertigung der Buchse geleistete Umformarbeit. Innerhalb des untersuchten Versuchsräums beträgt der Energieeintrag im Mittel 7360J. Bis auf die Werkstoffcharge konnte bei allen untersuchten Faktoren ein statistisch signifikanter Einfluss auf den Energieeintrag nachgewiesen werden. Die wichtigsten Einflussgrößen sind, ähnlich wie bei der Kraft- und Momentbetrachtung, die konstruktiven Faktoren Werkzeugdurchmesser und Blechdicke sowie die Bearbeitungsparameter Vorschub- und Umfangsgeschwindigkeit. Je kleiner die Vorschubgeschwindigkeit, desto größer ist der Energieeintrag in das Werkstück. Dies ist auf die im Vergleich zu hohen Vorschubgeschwindigkeiten längere Bearbeitungszeit zurückzuführen. Das Werkzeug ist länger im Eingriff und hat somit die Möglichkeit, mehr Energie in das Werkstück einzubringen. Durch eine erhöhte Umfangsgeschwindigkeit wird mehr Reibungsenergie erzeugt. Infolgedessen steigt der Energieeintrag. Da Reibungsenergie Wärme erzeugt, kann der Energieeintrag auch als Hilfsgröße für die durchschnittliche Prozesstemperatur verwendet werden.

Im Bereich der Formstollengeometrie wirken sich die Formstollenzahl, das Formstollenverhältnis und der Drallwinkel positiv auf den Energieeintrag aus. Nicht nur die Steigerung

der Formstollenzahl und die Erhöhung des Formstollenverhältnisses, sondern auch der Drallwinkel führt zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, was sich in einem erhöhten Energieeintrag widerspiegelt. In welchem Ausmaß sich der Oberflächenkontakt zwischen Werkzeug und Werkstück erhöht, kann weder mathematisch noch experimentell bestimmt werden, da es derzeit keine Möglichkeit gibt, die Kontaktbedingungen während des Bearbeitungsprozesses mathematisch genau zu beschreiben oder messtechnisch zu erfassen.

Da der Energieeintrag im engen Zusammenhang mit der Prozesstemperatur steht, sind ähnliche Ergebnisse bei der Temperaturbetrachtung zu erwarten.

Im Bereich der Wechselwirkungseffekte wurden, übereinstimmend mit der Drehmomentauswertung, hauptsächlich Zweifach-Wechselwirkungen mit dem Werkzeugdurchmesser erfasst. Änderungen der Einstellwerte der Faktoren beeinflussen somit den Energieeintrag bei großen Werkzeugdurchmessern stärker als bei Kleinen. Besonders groß ist dabei die positiv gerichtete Interaktion zwischen dem Durchmesser und der Blechdicke. Sie liegt in der Größenordnung des Haupteffekts der Formstollenzahl. Die negative Wechselwirkung zwischen Durchmesser und der Vorschubgeschwindigkeit liegt im Bereich des Einflusses des Formstollenverhältnisses.

Diagramm 6-5 zeigt die berechneten prozentualen Änderungen der Haupteffekte auf den Energieeintrag. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

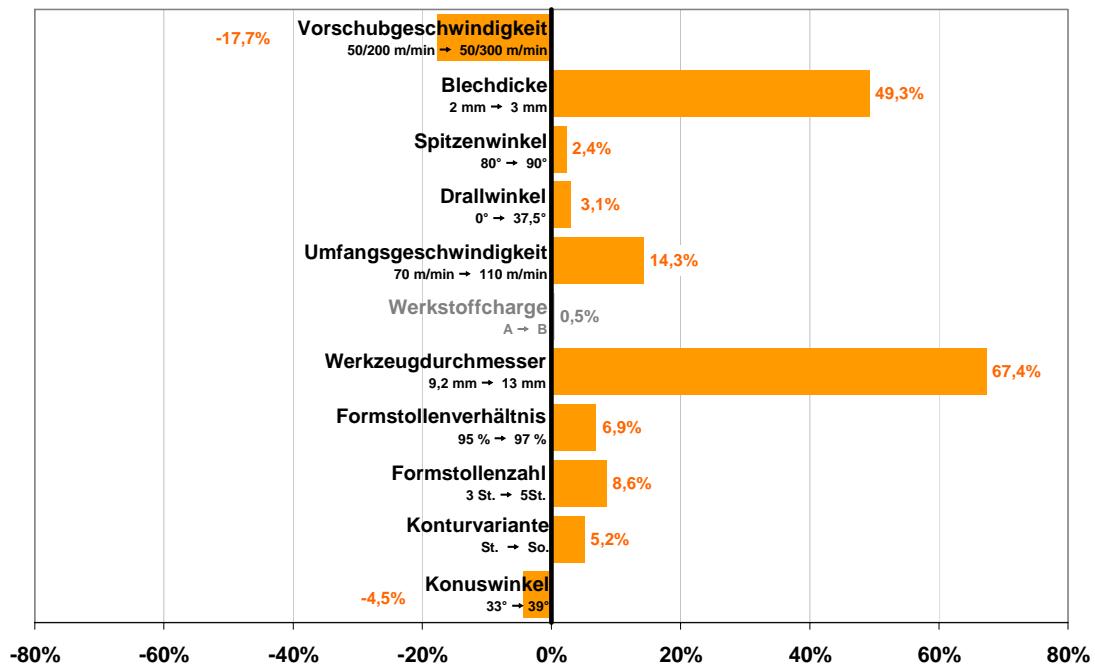


Diagramm 6-5: Haupteffekte - Einfluss auf den Energieeintrag

Diagramm 6-6 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit dem Werkzeugdurchmesser als Basis. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

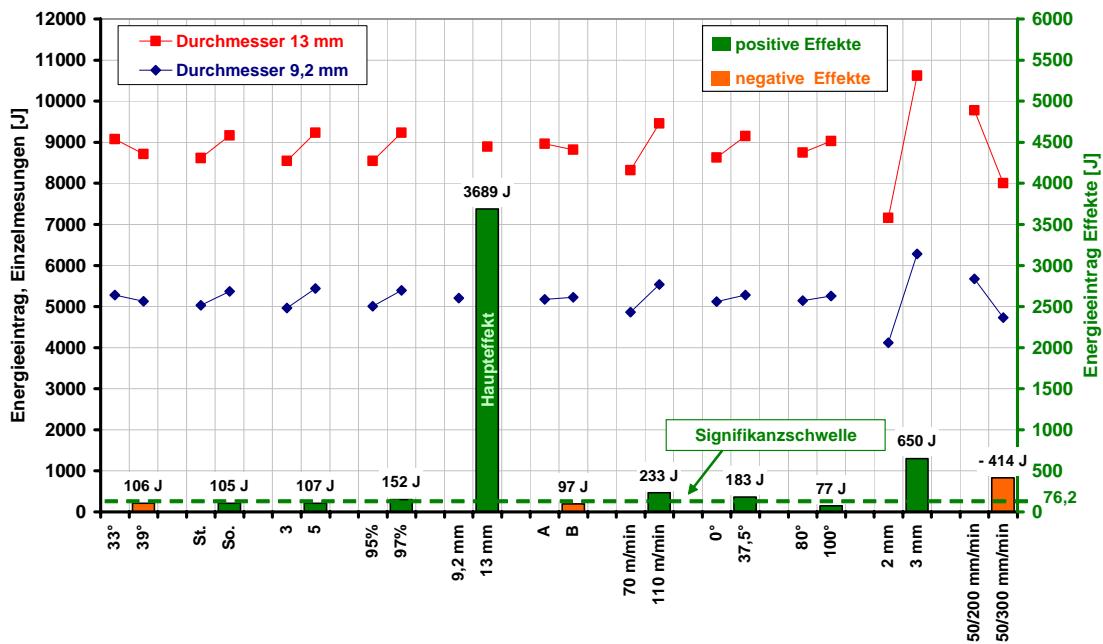


Diagramm 6-6: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf den Energieeintrag

6.1.1.4 Temperatur

Die Prozesstemperatur bestimmt maßgeblich die Umformeigenschaften des Werkstücks während des Bearbeitungsprozesses, sowie die mechanischen Eigenschaften der fertigen Fließlochbuchse. Die maximale Prozesstemperatur liegt im Durchschnitt bei 758 °C und wird beim Übergang vom konischen in den zylindrischen Bereich des Fließlochformers erreicht. Bezuglich der Bearbeitungsparameter hat die Umfangsgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Temperatur. Durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit von 70 m/min auf 110 m/min erhöht sich die Temperatur im Durchschnitt um ca. 60K. Das ist der größte erzielte Effekt auf die Temperatur insgesamt. Die Temperatur lässt sich darüber hinaus zusätzlich durch die Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit steigern. Dieser Effekt ist auf die längere Prozessdauer und die damit verbundene geringere Umfangsgeschwindigkeit zurückzuführen. Das Werkzeug kann mehr Reibungsenergie in das Werkstück einbringen und erzeugt somit mehr Reibungswärme als bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten.

Bei der Temperurbetrachtung ist im Gegensatz zur Energiebetrachtung der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Zielgröße kleiner als der Einfluss der Drehzahl. Dieses Versuchsergebnis zeigt, dass sich durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit vor-

nehmlich die Temperaturspitzen der einzelnen Prozessschritte steigern lassen, während sich durch die Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit die durchschnittliche Prozesstemperatur während des gesamten Bearbeitungsprozesses erhöht. Die Buchse wird somit im Ganzen besser durchwärm und lässt sich entsprechend leichter umformen. Ähnlich verhält es sich mit der Konturvariante. Die Sondergeometrie weist im Gegensatz zur Standardgeometrie zwar einen höheren Energieeintrag auf, die Maximaltemperatur liegt jedoch auf einem ähnlich hohen Niveau wie bei der Standardgeometrie.

Im Bereich der Formstollengeometrie haben die Formstollenanzahl und das Formstollenverhältnis einen positiven Effekt auf die Temperatur. Die Erhöhung beider Faktoren führt zu einer Erhöhung der Reibfläche zwischen Werkzeug und Werkstück, die Temperatur steigt.

Bei den Wechselwirkungen ist die positive Interaktion zwischen der Umfangsgeschwindigkeit und dem Drallwinkel von großer Bedeutung, da sich diese aus zwei gegenläufigen Einzeleffekten zusammensetzt. Die Integration eines Drallwinkels bei hoher Umfangsgeschwindigkeit führt dabei zu einer Steigerung der Maximaltemperatur, wohingegen bei kleiner Umfangsgeschwindigkeit eine Reduzierung der Maximaltemperatur gemessen wurde (vgl. Diagramm 6-8).

In Diagramm 6-7 sind die Haupteffekte der Maximaltemperatur als prozentuale Änderungen dargestellt. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

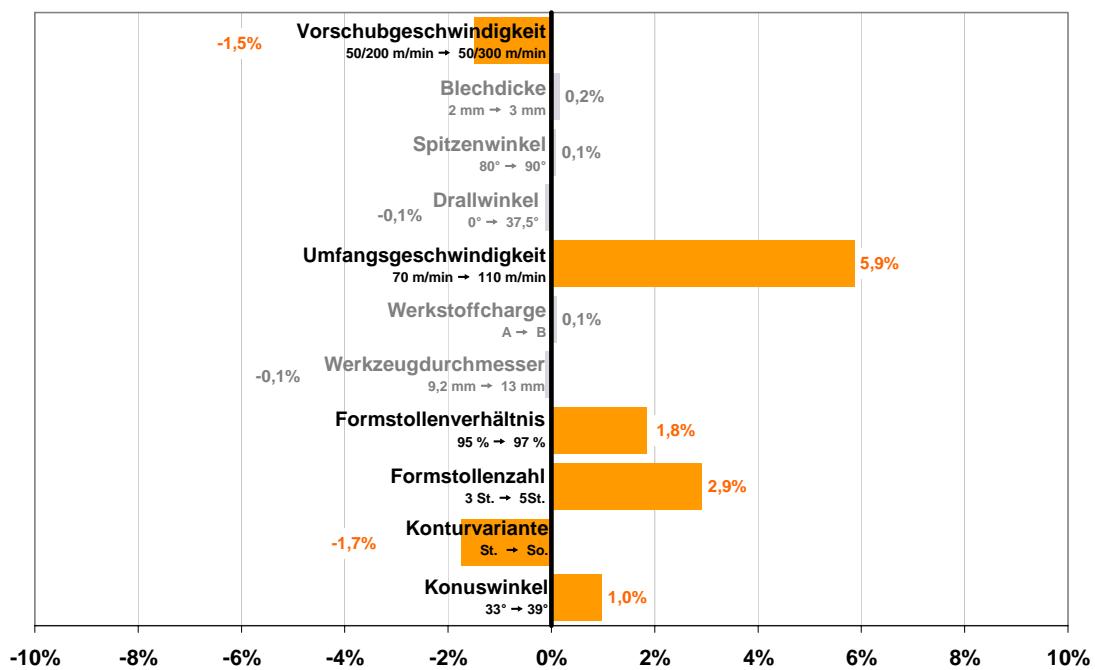


Diagramm 6-7: Haupteffekte - Einfluss auf die Temperatur

Diagramm 6-8 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit der Umfangsgeschwindigkeit als Basis. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

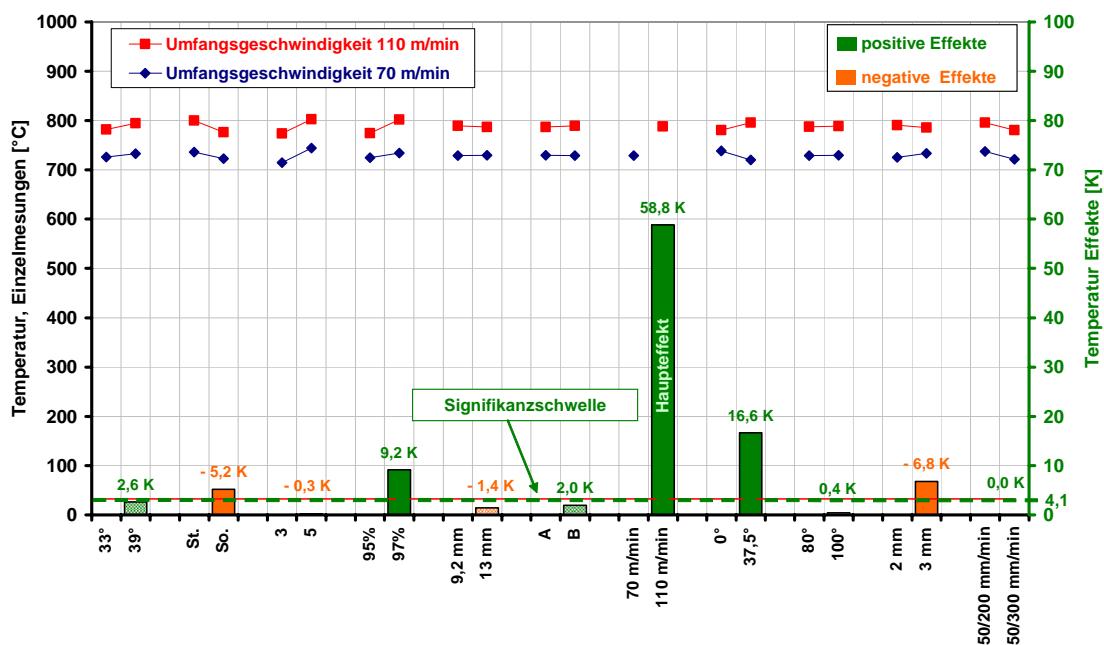


Diagramm 6-8: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Temperatur

6.1.1.5 Risslänge

Die Einrisslänge ist eine der wichtigsten Zielgrößen des Fließlochformens und immer so gering wie möglich zu halten. Bei einer Vielzahl der Anwendungsfälle ist die Einrisslänge am Buchsenende das entscheidende Kriterium für den Einsatz des Verfahrens. Größten Einfluss auf die Risslänge hat der Werkzeugdurchmesser. Im Mittel liegt die Risslänge bei Verwendung eines Werkzeugs mit einem Durchmesser von 9,2 mm bei 0,78 mm und bei Verwendung des Durchmessers von 13 mm bei 1,22 mm. In Bezug auf die Risslänge ist die wichtigste nicht konstruktiv vorgegebene Werkzeuggeometriegröße der Spitzenwinkel. Die Verringerung des Spitzenwinkels von 100 ° auf 80 ° führt zu einer Risslängenreduzierung von mehr als 31 %. Zusätzlich kann die Risslänge durch die Wahl der Werkzeugkontur beeinflusst werden. Hier besitzt die Sondergeometrie mit einer durchschnittlichen um 22 % geringeren Risslänge im Vergleich zur Standardgeometrie deutliche Vorteile.

Zwischen Konturvariante und Spaltenwinkel besteht darüber hinaus eine Wechselbeziehung. Bei der Standardgeometrie führt eine Erhöhung des Spaltenwinkels zu einer mehr als doppelt so großen Steigerung der Risslänge als bei der Sondergeometrie. Wie in Diagramm 6-10 erkennbar, unterscheiden sich die durchschnittlichen Einrisslängen am Buchsenende bei der Sondergeometrie mit einem Spaltenwinkel von 100 ° im Vergleich zu

einer Standardgeometrie mit einem Spitzwinkel von 80° nur um ca. 0,02 mm. Je größer der Spitzwinkel, desto stärker zeigen sich die Vorteile der elliptoiden Konturstaltung. Infolgedessen ist für die Fertigung von qualitativ hochwertigen Buchsen mit geringen Einrisslängen am Buchsenende eine Sondergeometrie mit möglichst kleinem Spitzwinkel zu empfehlen.

Als weitere geometrische Einflussfaktoren mit hoch signifikantem Einfluss auf die Risslänge sind der Drallwinkel und das Formstollenverhältnis zu nennen. Sowohl die Integration des Drallwinkels als auch die Erhöhung des Formstollenverhältnisses führen im Durchschnitt zu stärkeren Einrissen am Buchsenauslauf. Eine Erhöhung der Blechdicke führt zu einer Reduzierung der Rissbildung.

Durch die Variation der Bearbeitungsparameter lässt sich die Risslänge kaum beeinflussen. Tendenziell ist festzuhalten, dass innerhalb des untersuchten Versuchsraums mit steigender Umfangsgeschwindigkeit die Risslänge zunimmt, während sie sich durch die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit reduzieren lässt. Infolgedessen scheinen für die Entstehung der Einrisse die Dauer und die Intensität des Werkzeugkontakts am Buchsenende entscheidend zu sein.

Im Bereich der Zweifach-Wechselwirkungen konnten vermehrt Interaktionen mit der Formstollenzahl nachgewiesen werden. Die als hoch signifikant eingestuften Wechselwirkungen der Formstollenzahl mit der Vorschubgeschwindigkeit, dem Drallwinkel und der Drehzahl liegen mit ihren Effekten von ca. 0,07 mm bis 0,08 mm in der Größenordnung des Haupteffekts des Formstollenverhältnisses. Alle drei Interaktionen setzen sich aus gegenläufigen Einzeleffekten zusammen. So führt die Erhöhung der Formstollenzahl sowohl bei hoher Vorschubgeschwindigkeit als auch bei Fliesslochformern mit integriertem Drall zu einer Reduzierung der Risslänge. Die Erhöhung der Formstollenzahl bei geringer Vorschubgeschwindigkeit sowie bei Fliesslochformern ohne Drall zu einer Steigerung der Risslänge. Durch eine höhere Formstollenzahl, bei kleinen Umfangsgeschwindigkeiten, lassen sich Einrisse reduzieren. Bei großen Umfangsgeschwindigkeiten ist jedoch eine Steigerung der Einrisse festzustellen.

Insgesamt ist die Risslänge eine sehr komplexe Zielgröße, da sie durch eine Vielzahl von Haupt- und Wechselwirkungseffekten beeinflusst wird.

In Diagramm 6-9 sind die berechneten prozentualen Änderungen der Haupteffekte für die Einrisslänge dargestellt. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

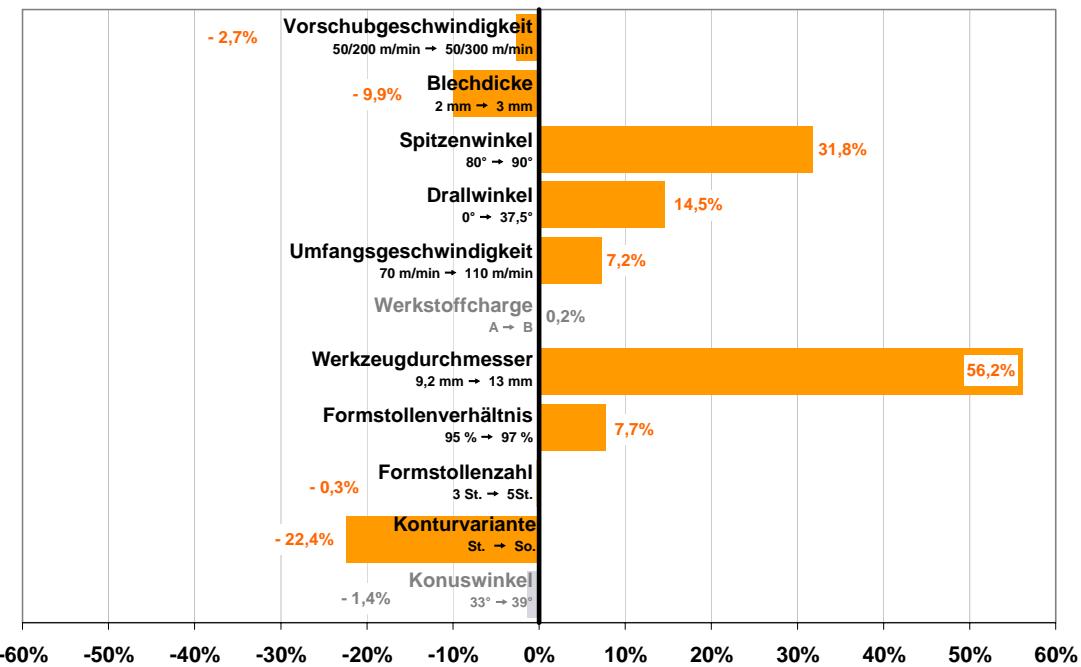


Diagramm 6-9: Haupteffekte - Einfluss auf die Risslänge am Buchsenauslauf

Diagramm 6-10 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit der Konturvariante als Basis. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

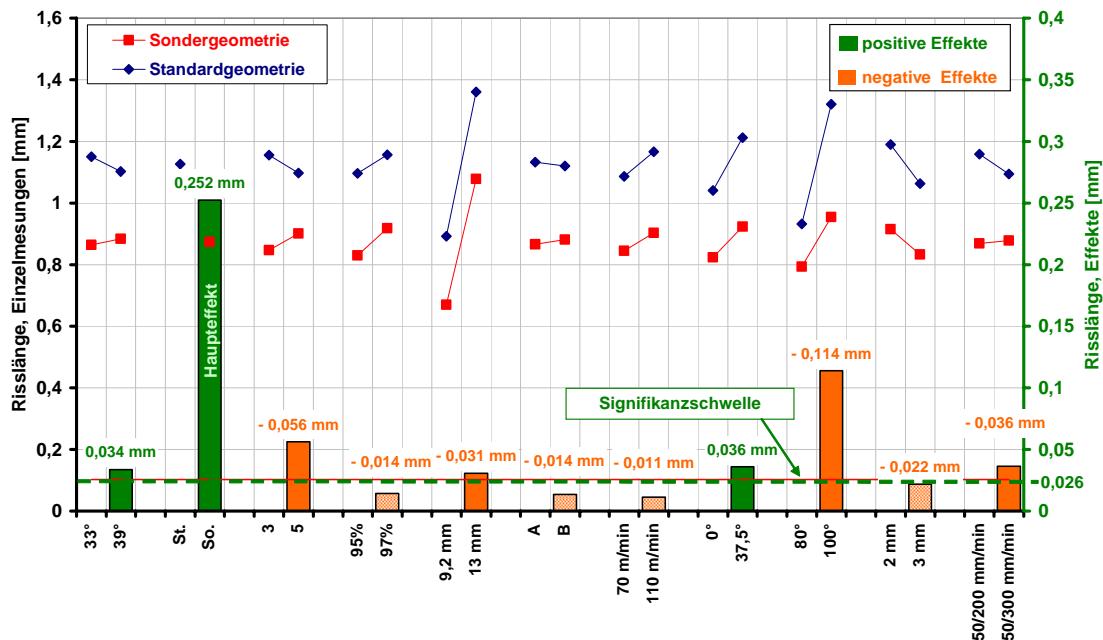


Diagramm 6-10: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Risslänge

6.1.1.6 In Vorschubrichtung verdrängtes Werkstoffvolumen

Das in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumen gibt an, wie viel Material für den unteren Buchsenabschnitt und somit für die eigentliche Buchse zur Verfügung steht. In vielen Fällen werden Fließlochformer mit angeschliffenen Schneiden verwendet, die das nach oben verdrängte Werkstoffvolumen spanend entfernen, um so seine plane Oberfläche zu erzeugen. Speziell bei diesen Anwendungsfällen sollte der spanend zu entfernende Werkstoffanteil so gering wie möglich sein. Fließlochformer mit einem Durchmesser von 9,2 mm verdrängen durchschnittlich 123 mm^3 in Vorschubrichtung. Dies entspricht ca. 74 % des insgesamt verdrängten Werkstoffvolumens. Bei Fließlochformern mit einem Durchmesser von 13 mm sind es 255 mm^3 . Dies entspricht einem Volumenanteil von 77 %. Durch den Werkzeugdurchmesser lässt sich das in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumen am stärksten beeinflussen. Ein weiterer konstruktiver Faktor, auf den man in Normalfall keinen Einfluss nehmen kann, ist die Blechdicke. Durch die Erhöhung der Blechdicke von 2 mm auf 3 mm lässt sich ca. 45 % mehr Werkstoffvolumen nach unten verdrängen.

Neben den konstruktiven Faktoren kann der Werkstofffluss durch die umlaufenden Formstollen beeinflusst werden. Im Durchschnitt verdrängen gedrallte Fließlochformer ca. 20 % mehr Werkstoffvolumen in Vorschubrichtung als herkömmliche Werkzeuge. Somit wird bei gedrallten Werkzeugen im Durchschnitt 82 % des zur Verfügung stehenden Werkstoffvolumens in Vorschubrichtung verdrängt. Der Ansatz, den Werkstofffluss beim Fließlochformen durch die Integration von wendelförmig umlaufenden Formstollen zu beeinflussen, ist somit erfolgreich umgesetzt worden.

Als weitere Einflussgrößen mit einem statistisch positiven Einfluss auf den Werkstofffluss sind die Konturvariante und der Spitzenwinkel zu nennen. Die Sondergeometrie verdrängt mehr Werkstoffvolumen in Vorschubrichtung als die Standardgeometrie. Dies ist auf den durch die elliptoide Formgestaltung entstehenden höheren Druck in Vorschubrichtung, der bereits bei den theoretischen Grundbetrachtungen zur Sondergeometrie im Kapitel 4.1.1.1 prognostiziert und im Rahmen der Axialkraftbetrachtung belegt wurde, zurückzuführen. Aus dieser Grundbetrachtung heraus ist es nicht verwunderlich, dass der Werkstofffluss auch durch die Größe des Spitzenwinkels beeinflusst wird. Alle weiteren Faktoren besitzen keinen nachweisbaren Effekt.

Wechselwirkungen treten vornehmlich mit dem Werkzeugdurchmesser auf. Sie zeigen an, dass Änderungen der Werkzeuggeometrie und der Bearbeitungsparameter bei Werkzeugen mit einem Durchmesser von 13 mm den Werkstofffluss wesentlich stärker beeinflussen, als bei kleineren Durchmessern.

Bei Betrachtung der Interaktionseffekte mit der Formstollenzahl konnten vermehrt Wechselwirkungseffekte nachgewiesen werden, die sich aus gegenläufigen Einzeleffekten zusammensetzen. Dies trifft z. B. für die Interaktion von Formstollenzahl und Drallwinkel, sowie für die Interaktion von Formstollenzahl und Konturvariante zu.

Die Interaktion zwischen Formstollenzahl und Drallwinkel zeigt, dass Fließlochformer mit wendelförmig umlaufenden Formstollen bei Erhöhung der Formstollenzahl mehr Material in Vorschubrichtung verdrängen als ungedrallte. Bei herkömmlichen Fließlochformern ohne Drall bewirkt die Erhöhung der Formstollenzahl hingegen eine Verringerung des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens.

In Diagramm 6-11 sind die Haupteffekte bezüglich des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens prozentual dargestellt. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

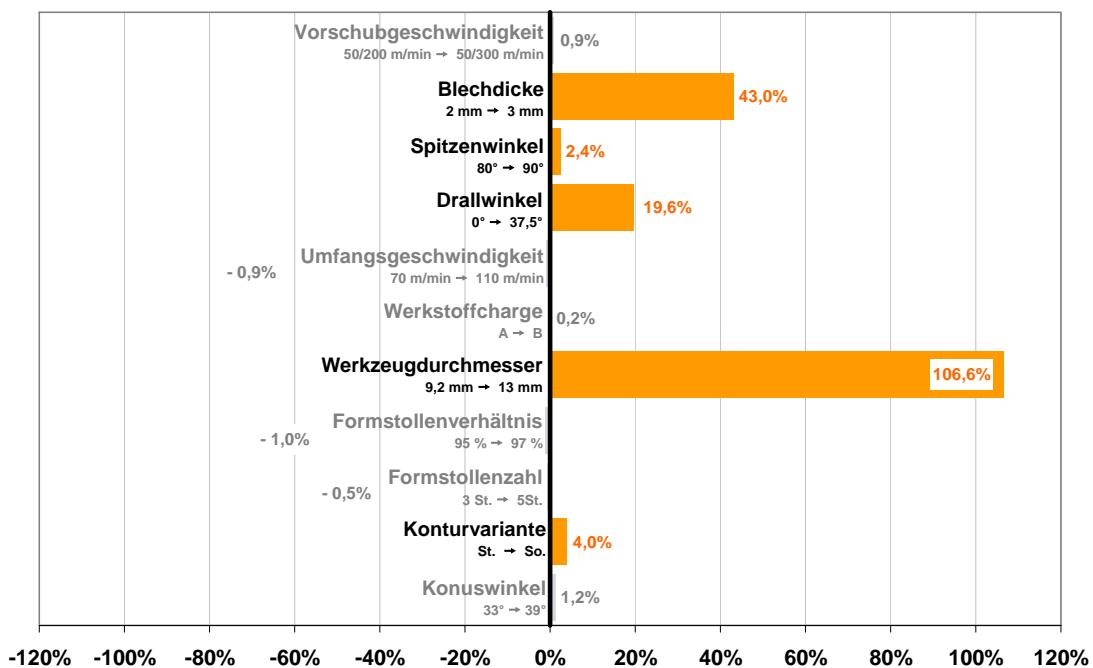


Diagramm 6-11: Haupteffekte - Einfluss auf den nach unten Verdrängten Volumenanteil

Diagramm 6-12 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit dem Werkzeugdurchmesser als Basis. Eine vollständige Auflistung der Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

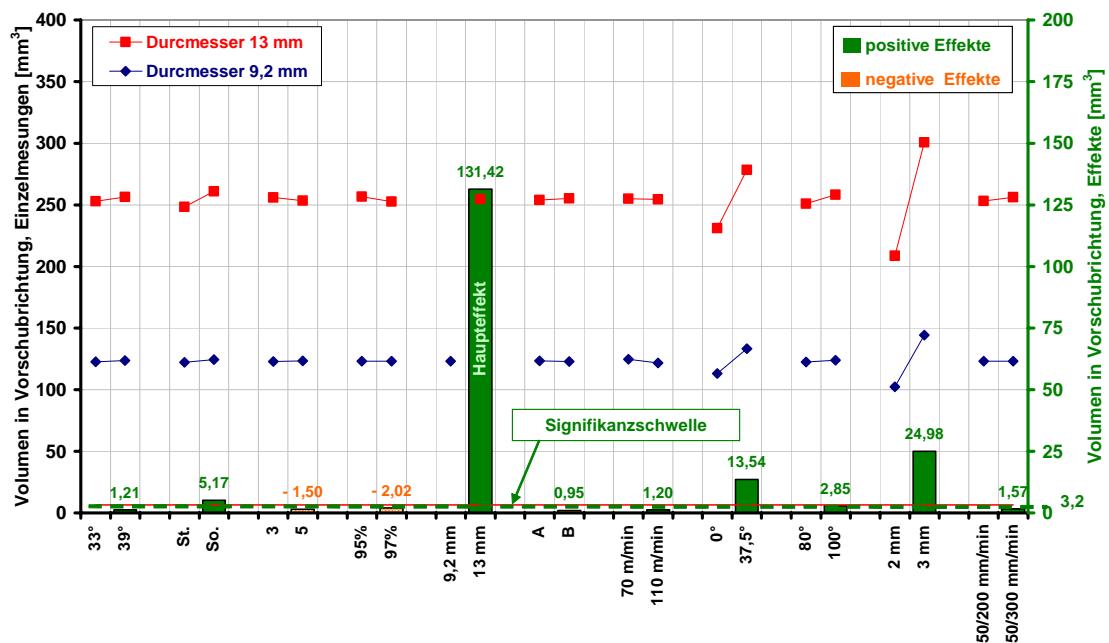


Diagramm 6-12: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Risslänge am Buchsenauslauf

6.1.1.7 Buchsenlänge

Die Buchsenlänge wird maßgeblich durch den Werkzeugdurchmesser beeinflusst. Je größer der Werkzeugdurchmesser, desto mehr Material steht für die Ausformung der Buchse zur Verfügung und desto länger wird diese. Gleiches gilt für die Blechdicke. Darüber hinaus sind Interaktionseffekte mit dem Werkzeugdurchmesser nachweisbar, die besagen, dass sich die Änderungen einzelner Faktoren bei einem großen Werkzeugdurchmesser stärker auf das Bearbeitungsergebnis auswirken als bei einem kleinen Durchmesser.

Über diese konstruktiven Vorgaben hinaus lässt sich die Buchsenlänge beträchtlich durch die Verwendung von wendelförmig umlaufenden Formstollen beeinflussen. Innerhalb des untersuchten Versuchsraums lässt sich die Buchsenlänge durchschnittlich von 6,5 mm auf 8,2 mm steigern. Dies entspricht einer Verlängerung der Buchse um ca. 25 %.

Des Weiteren ermöglicht die Änderung der Formstollenzahl eine Beeinflussung der Buchsenlänge, denn mit steigender Formstollenzahl nimmt die Buchsenlänge zu. Dies kann auf die sich mit steigender Formstollenzahl größere Verformungsarbeit zurückgeführt werden. Grundsätzlich würde man davon ausgehen, dass durch die mit steigender Formstollenzahl größer werdende Reibfläche und der damit verbundenen erhöhten Adhäsion zwischen Werkzeug und dem zu verdrängenden Material der Werkstoff stärker mit in Vorschubrich-

tung gezogen wird. Dem widerspricht jedoch, dass bei Erhöhung des Formstollenverhältnisses die Buchse kürzer wird. Zusätzlich besteht eine Interaktion zwischen der Formstollenzahl und dem Formstollenverhältnis, die besagt, dass sich bei einer großen Formstollenzahl durch die Erhöhung des Formstollenverhältnisses die Buchsenlänge stärker reduziert als bei einer kleinen Formstollenzahl. Diese Zusammenhänge verdeutlichen die komplexen Wirkmechanismen, welche in der Kontaktzone von Werkstück und Werkzeug während des Fließlochformprozesses vorliegen und eine Modellierung des Prozesses erschweren.

Als weitere geometrische Einflussgrößen mit positivem Effekt auf die Buchsenlänge sind der Spitzwinkel und der Konuswinkel zu nennen.

Das folgende Diagramm 6-13 zeigt die berechneten prozentualen Änderungen auf die Buchsenlänge für jede untersuchte Zielgröße. Einzelmesswerte sind der Tabelle 10-3 und die vollständige Auflistung aller berechneten Effekte der Tabelle 10-4 zu entnehmen.

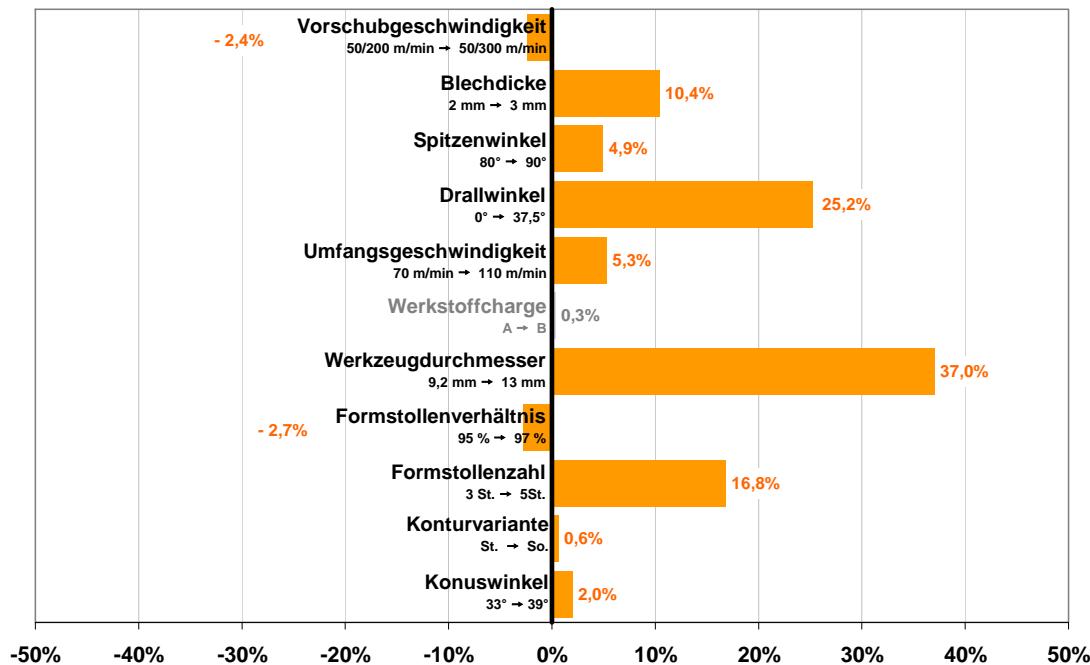


Diagramm 6-13: Haupteffekte - Einfluss auf die Buchsenlänge

Diagramm 6-14 zeigt das Zweifach-Wechselwirkungsdiagramm mit der Formstollenanzahl als Basis. Eine vollständige Auflistung aller Wechselwirkungseffekte ist der Tabelle 10-4 im Anhang zu entnehmen.

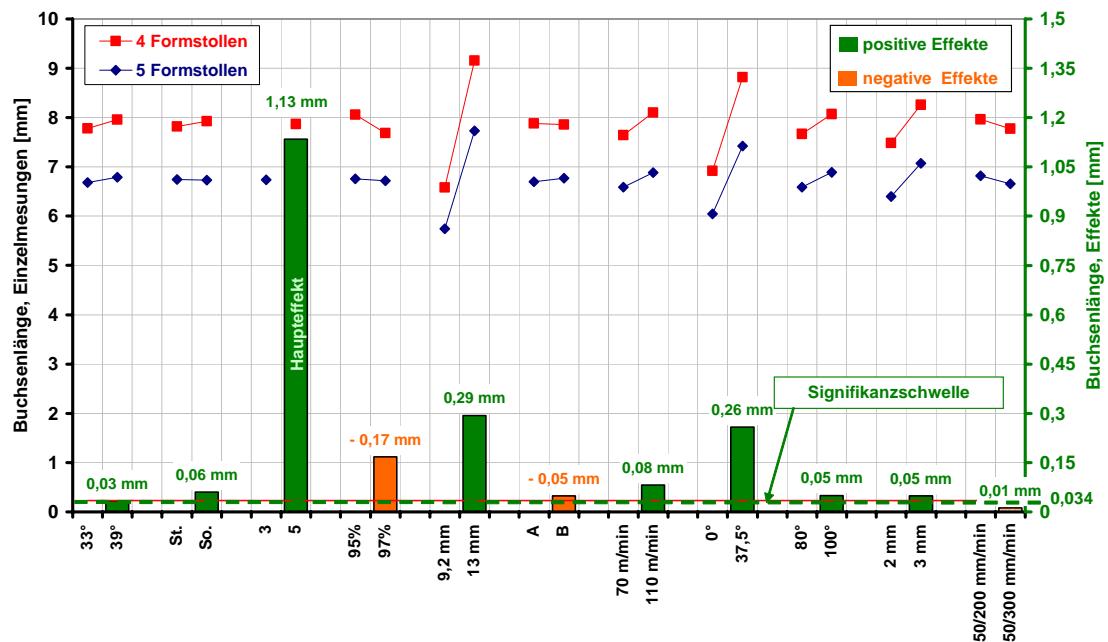


Diagramm 6-14: Wechselwirkungseffekte - Einfluss auf die Buchsenlänge

6.1.2 Versuchsergebnisse der faktororientierten Effektanalyse

Die faktororientierte Effektanalyse dient zur Zusammenfassung der Wirkung der untersuchten Prozessparameter und Geometriegrößen auf alle erfassten Zielgrößen. Sie stellt übersichtlich dar, wie sich das Bearbeitungsergebnis und die Prozessgrößen durch die Variation einer einzelnen Einflussgröße beeinflussen lassen. Die Auswertung erfolgt gesondert für alle elf untersuchten Faktoren. Dazu werden die einzelnen Faktoren den Kategorien Werkzeuggeometrieparameter, Bearbeitungsparameter und Werkstückparameter zugeordnet.

Insgesamt ist bei der Interpretation der Versuchsergebnisse immer darauf zu achten, dass diese nur innerhalb des untersuchten Versuchsraums gültig ist. Die Extrapolation der Ergebnisse und die Verallgemeinerung der Erkenntnisse ist aus mathematischer Sicht nicht zulässig. Wird dieses dennoch durchgeführt, so sollte man sich immer über die Gefahr einer Fehlinterpretation bewusst sein.

6.1.2.1 Umfangsgeschwindigkeit

Durch die Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit wird mehr Reibungsenergie erzeugt, die wiederum zu einer Erhöhung der Prozesstemperatur führt. Insgesamt wird die Buchse besser durchwärm und lässt sich somit leichter umformen. Die Axialkraft und das Drehmoment verringern sich und somit auch die mechanische Belastung des Werkstücks. Die Gefahr einer unbeabsichtigten plastischen Durchbiegung reduziert sich.

In Bezug auf die Buchsenqualität wird durch eine Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit von 70 m/min auf 110 m/min die Buchsenlänge im Durchschnitt um ca. 0,38 mm gesteigert. Gleichzeitig erhöht sich die maximale Einrisslänge am Buchsenende um ca. 0,07 mm. Setzt man diese Ergebnisse in Relation, so wirkt sich die Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit insgesamt zugunsten der Buchsenqualität aus, da der Zuwachs der Risslänge vernachlässigbar ist. Die Tatsache, dass der Werkstofffluss in Vorschubrichtung durch die Umfangsgeschwindigkeit nicht beeinflusst wird, zeigt, dass die gefertigte Buchse zwar länger, jedoch aufgrund der gleichen Menge des nach unten verdrängten Werkstoffvolumens auch dünner ist. Hier muss man sich entscheiden, welche Buchsenqualität für den vorliegenden Anwendungsfall zu bevorzugen ist. Innerhalb des untersuchten Versuchsraums gilt somit, je höher die Umfangsgeschwindigkeit desto länger und dünner die Buchse.

Die Umfangsgeschwindigkeit ist die Prozessgröße die das Bearbeitungsergebnis am stärksten beeinflusst. Diagramm 6-15 zeigt den Einfluss der Steigerung der Umfangsgeschwindigkeit von 70 m/min auf 110 m/min auf alle untersuchten Zielgrößen.

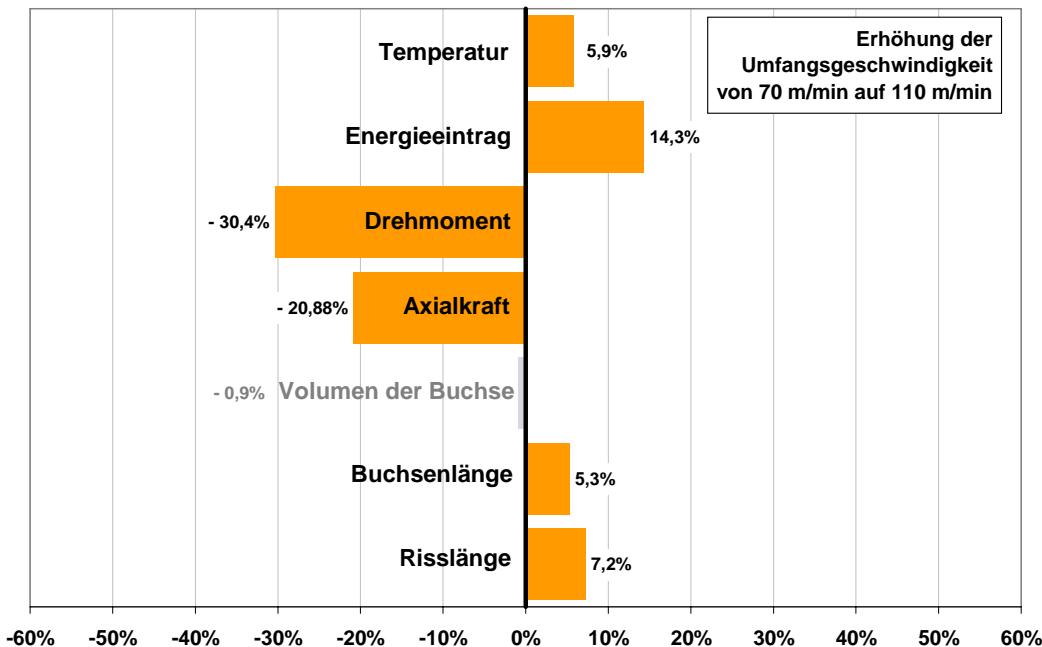


Diagramm 6-15: Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit auf die Zielgrößen

6.1.2.2 Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit als zweite Prozessgröße hat im Vergleich zur Umfangsgeschwindigkeit einen kleineren Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Die richtige Wahl der Vorschubgeschwindigkeit ist dennoch ausschlaggebend für die Fertigung von qualitativ hochwertigen Fließlochbuchsen. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit senkt den Energieeintrag in das Werkstück und steigert gleichzeitig das benötigte Drehmoment und die Axialkraft. Die Belastung von Werkzeug, Werkstück und Bearbeitungszentrum erhöht sich somit mit steigender Vorschubgeschwindigkeit. Durch die höhere Werkzeugbelastung ist auch von einer Verringerung der Standzeit auszugehen.

In Bezug auf die Buchsenqualität wirken sich große Vorschubgeschwindigkeiten negativ auf die Buchsenlänge und auf die Risslänge aus. Diese Änderungen sind äußerst gering und daher in vielen Fällen vernachlässigbar. Ein Einfluss auf den Anteil des in und entgegen der Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumenanteils ist innerhalb des untersuchten Versuchsraums nicht nachweisbar.

Neben den betrachteten Zielgrößen ist im industriellen Einsatz des Verfahrens die Taktzeit maßgebend. Diese hängt unmittelbar von der Vorschubgeschwindigkeit ab und ist so gering wie möglich zu halten. Die Aufgabe liegt daher darin, eine günstige Vorschubparameterkombination bezüglich der Taktzeit, Buchsenqualität, Werkzeugkosten und Prozesssicherheit zu finden. Um dieses Ziel zu erreichen wird in vielen Fällen mit mehr als nur zwei Vorschubgeschwindigkeiten gearbeitet. Des Weiteren ist im Bereich der Vorschubanpassung auch die Wahl des Umschaltpunkts von zentraler Bedeutung. Hier empfiehlt es sich, auf Grundlage der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse, für jeden Anwendungsfall eine kleine Versuchsreihe zur Findung der bestmöglichen Prozessparameterkombination durchzuführen.

In Diagramm 6-16 sind die prozentualen Änderungen hervorgerufen durch die Erhöhung der zweiten Vorschubgeschwindigkeit von 200 m/min auf 400 m/min dargestellt.

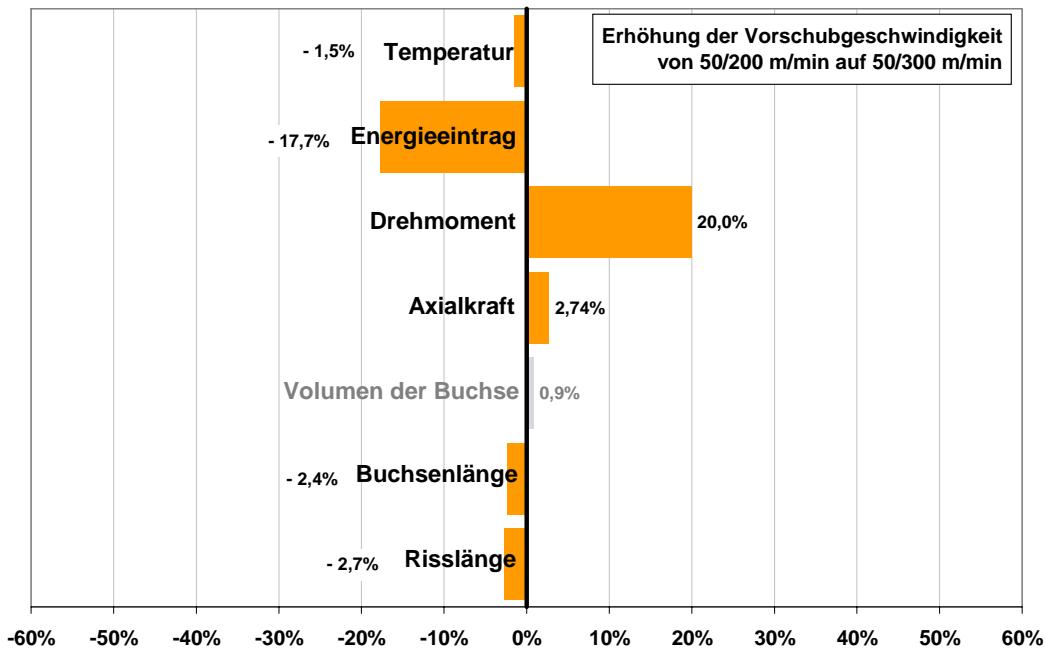


Diagramm 6-16: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Zielgrößen

6.1.2.3 Blechdicke

Die Blechdicke hat einen entscheidenden Einfluss auf die Buchsenqualität. Sie ist buchsenqualitätsbestimmend und sollte daher bereits bei der Konstruktion des Bauteils in Hinblick auf den Fertigungsschritt Fließlochformen mit berücksichtigt werden. Die Wahl der Blechdicke bildet die Grundlage für die Fertigung hochwertiger Fließlochbuchsen.

Die Erhöhung der Blechdicke führt zu einer Erhöhung der Prozessgrößen. Mit steigender Blechdicke wird mehr Energie für die Umformung der Buchse benötigt. Darüber hinaus steigt das Drehmoment an, da sich die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück

mindestens um den Blechdickenzuwachs erhöht. Bei größeren Blechdicken steigt auch die Axialkraft und somit die prinzipielle Gefahr einer Blechdeformation. Hier ist jedoch zu beachten, dass sich mit steigender Blechdicke auch die Stabilität des Bauteils erhöht, welche dem oben genannten Effekt entgegenwirkt.

Im Bezug auf die Buchsenqualität hat die Verwendung einer Blechdicke von 3 mm im Vergleich zu 2 mm nur Vorteile. Das in Vorschubrichtung verdrängte Volumen ist wesentlich größer und führt zu einer längeren Fließlochbuchse. Zusätzlich reduziert sich die Einrisslänge am Buchsenende.

Nachteilig wirkt sich die Verwendung von dickeren Blechen primär auf das Bauteilgewicht aus. Darüber hinaus kann davon ausgegangen werden, dass der Werkzeugverschleiß bei dicken Blechen wesentlich größer ist als bei dünnen. Dies wirkt sich negativ auf die Fertigungskosten und die Prozessstabilität aus. Weiterhin ist zu beachten, dass das Verfahren ab einem bestimmten Verhältnis von Buchsendurchmesser zu Blechdicke praktisch keine Vorteile gegenüber einem gebohrten und anschließend gefurchten oder geschnittenen Gewinde mehr aufweist. Im Extremfall ist der Einsatz des Verfahrens generell nicht mehr möglich, da eine Werkstoffverdrängung in Vorschubrichtung durch die zu hohe Blechdicke verhindert wird. Fließlochformen in volles Material ist nicht möglich. Aufgrund der einfacheren Prozessbedingungen ist in solchen Fällen das Bohren zu bevorzugen.

Diagramm 6-17 zeigt die berechneten prozentualen Effekte, die auf eine Erhöhung des Faktors Blechdicke von 2 mm auf 3 mm zurückzuführen sind.

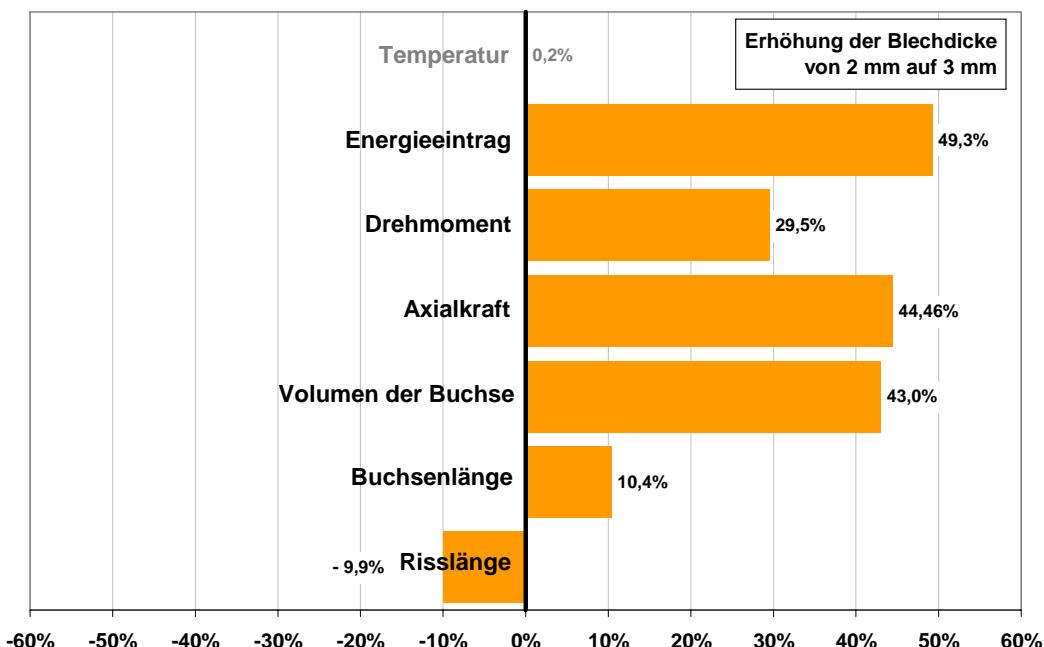


Diagramm 6-17: Einfluss der Blechdicke auf die Zielgrößen

6.1.2.4 Werkstoffcharge

Der Einfluss des Faktors Werkstoffcharge liegt bei allen Zielgrößen unter einem Prozent und ist statistisch nicht nachweisbar. Dies bestätigt, dass es sich bei der großen Anzahl an Blechen und bei den unterschiedlichen Blechdicken immer um den Werkstoff S355 J2G3 (St52) mit identischem Vergütungszustand gehandelt hat. Zudem ist dieses Versuchsergebnis ein Indiz dafür, dass die Einzelversuche ordnungsgemäß durchgeführt wurden.

Diagramm 6-18 zeigt den nicht vorhandenen Einfluss der Werkstoffcharge auf alle betrachteten Zielgrößen.

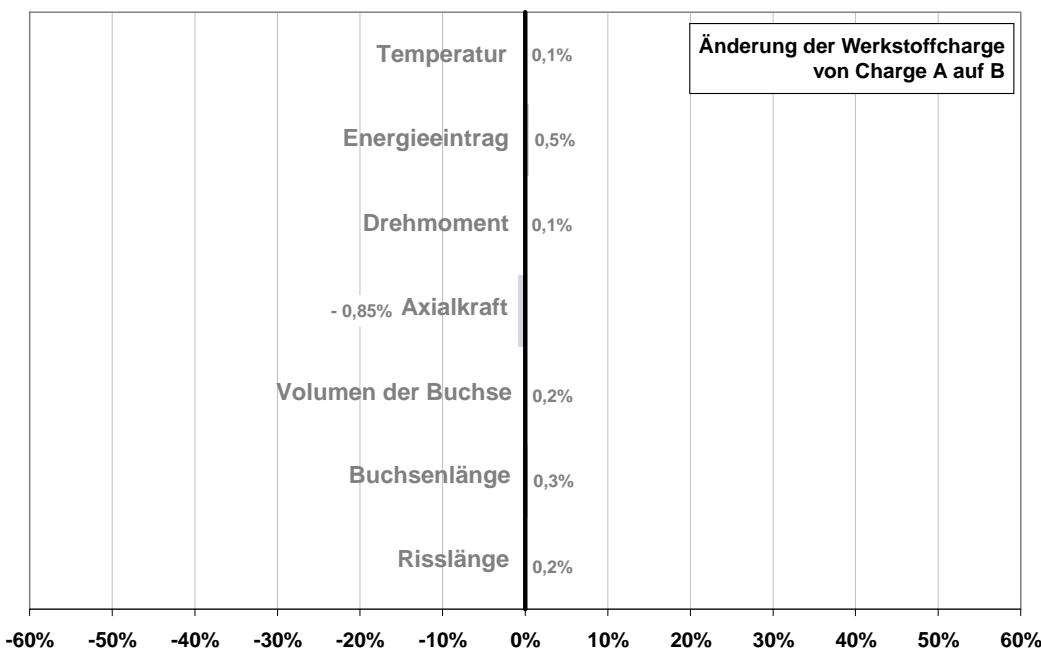


Diagramm 6-18: Einfluss der Werkstoffcharge auf die Zielgrößen

6.1.2.5 Werkzeugdurchmesser

Der Werkzeugdurchmesser ist die zweite Einflussgröße, die bereits im Rahmen der Bauteilkonstruktion festgelegt wird und daher später zur Buchsenoptimierung nicht mehr veränderbar ist. Ähnlich wie schon bei der Blechdicke bildet sie die Grundlage für die später erzielbare Buchsenqualität.

Mit steigendem Werkzeugdurchmesser wächst das zu verdrängende Werkstoffvolumen und somit die für die Umformung benötigte Energie. Zusätzlich erhöhen sich das maximale Drehmoment und die für die Umformung benötigte Axialkraft. Infolgedessen nimmt mit steigendem Werkzeugdurchmesser die Gefahr einer Blechdeformation zu.

Bei der Verwendung eines Werkzeugdurchmessers von 13 mm muss, im Vergleich zu einem Durchmesser von 9,2 mm, doppelt soviel Werkstoff umgeformt werden. Der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil ist doppelt so groß. Die Buchsenlänge

wächst im Durchschnitt von 6,2 mm auf 8,4 mm, dies sind ca. 37 %. Dadurch, dass das Material am Buchsenende zur Erreichung des Enddurchmessers stärker aufgedehnt wird, steigt mit zunehmendem Werkzeugdurchmesser die Risslänge. Diese nimmt bei dem hier betrachteten Fall durchschnittlich um ca. 56 % zu, so dass sich ein schlechteres Verhältnis von Buchsenlänge zu Risslänge ergibt.

In Diagramm 6-19 ist der Einfluss, den die Erhöhung des Werkzeugdurchmessers von 9,2 mm auf 13 mm auf die Prozessgrößen und die Buchsenqualität hervorruft, dargestellt. Bei diesem Diagramm ist zu beachten, dass aufgrund der hohen prozentualen Beeinflussung einiger Zielgrößen eine im Vergleich zu den übrigen in Kapitel 6.1.2 dargestellten Diagrammen andere Skalierung der Abszisse verwendet wird.

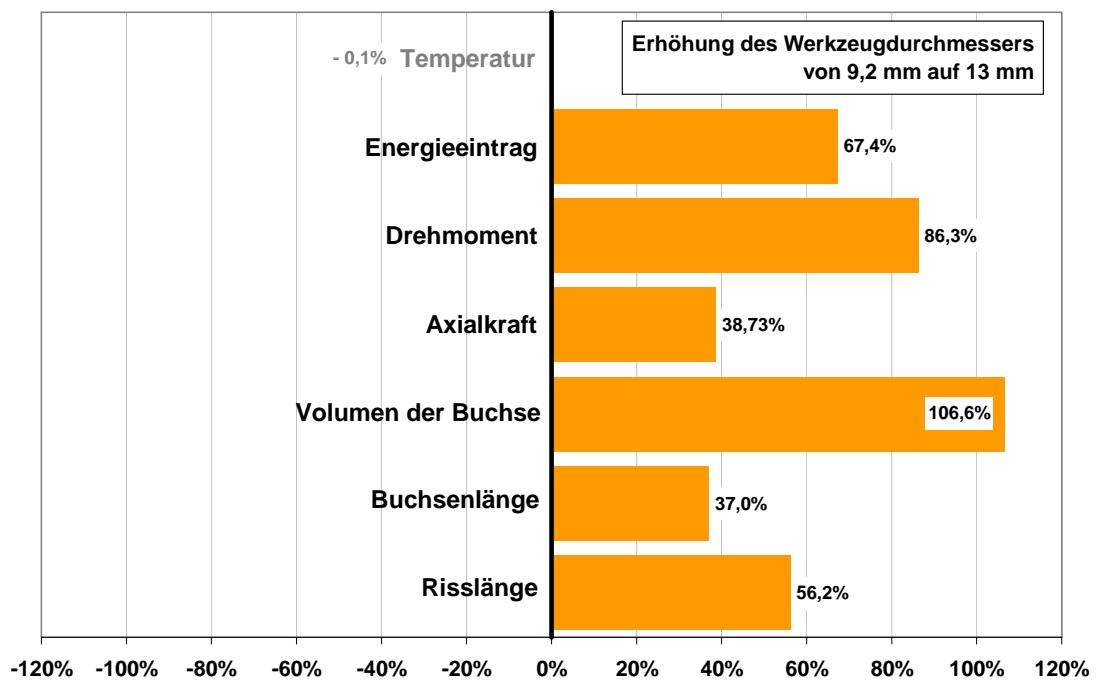


Diagramm 6-19: Einfluss des Werkzeugdurchmessers auf die Zielgrößen

6.1.2.6 Werkzeugkonturvariante

Die Versuchsergebnisse der Einflussgröße Werkzeugkonturvariante zeigen, dass die neu entwickelte Sondergeometrie erhebliche Vorteile im Vergleich zur Standardgeometrie besitzt. Die Risslänge am Buchsenende wird durch den Einsatz der Sondergeometrie um mehr als 22 % reduziert. Dies ist ein beträchtlicher Vorteil, da die Risslänge die bedeutende Zielgröße des Fließlochformens ist. Zusätzlich wird durch die kontinuierliche Konturgestaltung ohne abrupte Übergänge geringfügig mehr Material in Vorschubrichtung verdrängt. Aufgrund des bei der Sondergeometrie im Vergleich zur Standardgeometrie schnelleren Durchmesserzuwachses bringt die Sondergeometrie mehr Energie in das Werkstück, ohne die maximale Prozesstemperatur zu beeinflussen.

Nachteil der Sondergeometrie ist die bei der Fertigung der Buchse entstehende Axialkraft. Sie lässt sich durch die Anpassungen des Spitzwinkels, des Konuswinkels und der Vorschubgeschwindigkeit reduzieren.

Für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Fließlochbuchsen ist die Sondergeometrie einer Standardgeometrie immer vorzuziehen. In Diagramm 6-20 sind die Vorteile der Sondergeometrie dargestellt.

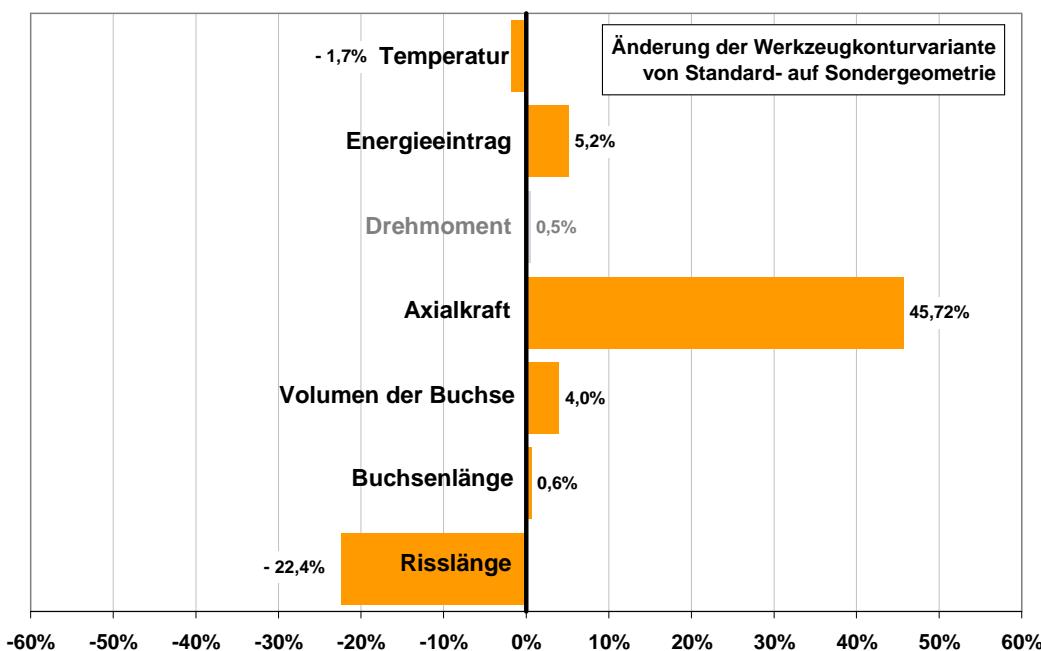


Diagramm 6-20: Einfluss der Konturvariante auf die Zielgrößen

6.1.2.7 Spitzenwinkel

Der Spitzenwinkel ist die Einflussgröße mit dem größten Effekt auf die Einrisslänge. Die Reduzierung des Spitzenwinkels von 90° auf 80° führte im Durchschnitt zu einer Minimierung der Einrisse von 1,13 mm auf 0,86 mm, dies entspricht einer Rissreduzierung von ca. 32 %. Die Werkzeuge mit dem kleinen Spitzenwinkel erzeugten geringfügig kürzere Buchsen und fördern minimal weniger Material in Vorschubrichtung. Im Vergleich zu dem Gewinn an Buchsenqualität durch die Rissreduzierung, sind diese Werte jedoch zu vernachlässigen.

In Bezug auf die Prozessparameter führen kleine Spitzenwinkel zu einer kleineren axialen Belastung von Werkstück und Werkzeug. Dies sollte sich auch positiv auf die Standzeit des Werkzeugs auswirken. Der Spitzenwinkel lässt sich nicht beliebig verkleinern, da bei zu kleinen Winkeln die Werkzeugspitze während des Bearbeitungsprozesses ausbricht.

Diagramm 6-21 zeigt den Einfluss des Spitzenwinkels auf die Zielgrößen.

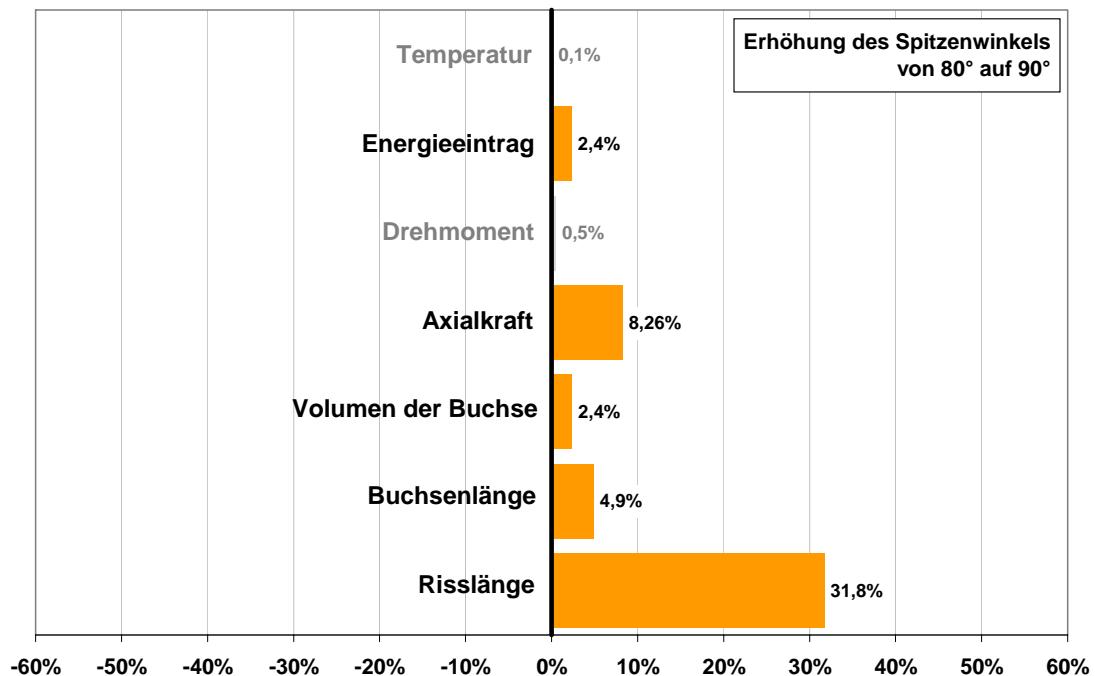


Diagramm 6-21: Einfluss des Spitzenwinkels auf die Zielgrößen

6.1.2.8 Konuswinkel

Der Konuswinkel hat innerhalb des untersuchten Versuchsraums nur einen kleinen Einfluss auf das Versuchsergebnis. Durch die Reduzierung des Konuswinkels lässt sich die Axialkraft um ca. 6 % reduzieren. Gleichzeitig führt dies zu einer Reduzierung des Drehmoments sowie zu einem Anstieg der für die Umformung benötigten Prozessenergie. Große Konuswinkel führen zu geringfügig längeren Buchsen ohne die Risslänge und den Werkstofffluss in Vorschubrichtung zu beeinflussen.

Diagramm 6-22 zeigt den Einfluss des Konuswinkels auf die Zielgrößen.

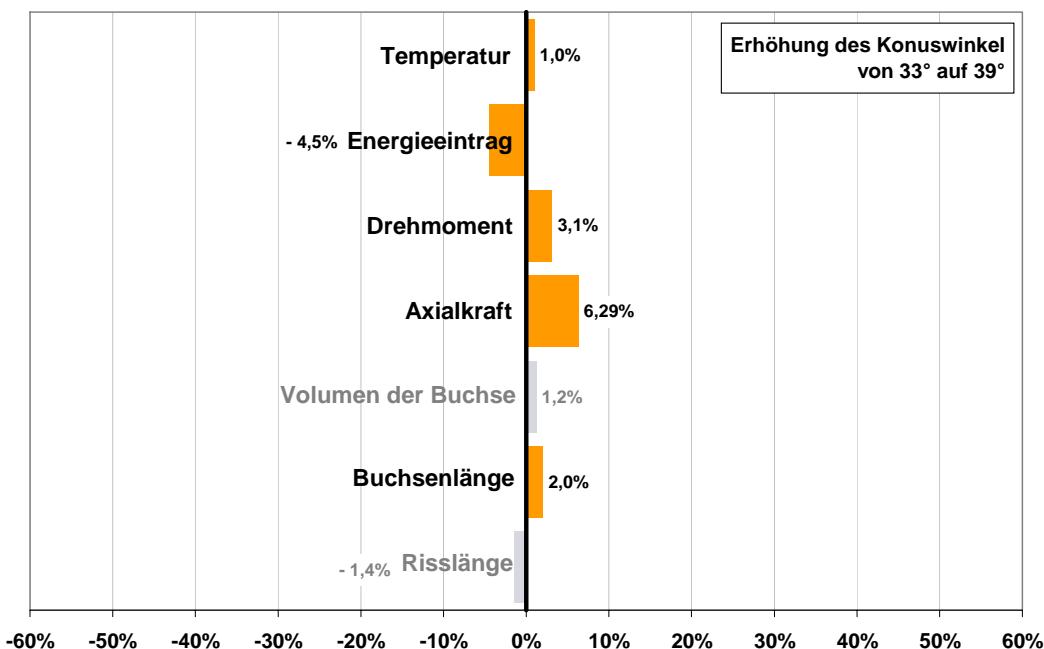


Diagramm 6-22: Einfluss des Konuswinkels auf die Zielgrößen

6.1.2.9 Drallwinkel

Durch die Integration eines Drallwinkels, der dazu führt, dass die Formstollen wendelförmig um das Werkzeug laufen, lässt sich der Werkstofffluss erheblich beeinflussen. Die Werkzeuge mit einem Drallwinkel von $37,5^\circ$ fördern ca. 20 % mehr Werkstoffvolumen in Vorschubrichtung als herkömmliche Fließlochformer. Infolgedessen steigt die Buchsenlänge um mehr als 25 % an. Nachteil des Drallwinkels ist die gleichzeitige Erhöhung der Einrisse am Buchsenende von ca. 0,93 mm auf ca. 1,07 mm. Fließlochformer mit Drallwinkel erzeugen bei der Buchsenherstellung ein minimal stärkeres Drehmoment. Darüber hinaus sind sowohl die Vorschubkraft als auch der Energieeintrag etwas höher.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Drallwinkel der einzige Geometrieparameter ist, der den Werkstofffluss nachhaltig beeinflusst. Positive Drallwinkel begünstigen den Werk-

stofffluss in Vorschubrichtung. Für die Herstellung von planen Fließlochbuchsen bringt die Integration von wendelförmig umlaufenden Formstollen erhebliche Vorteile, da sich das zur Verfügung stehende Werkstoffvolumen fast vollständig zur Erzeugung der eigentlichen Fließlochbuchse ausnutzen lässt. Der spanend zu entfernende Werkstoffvolumenanteil ist entsprechend gering. Die Einrisslänge am Buchsenende lässt sich durch die Anpassung der Prozessparameter und durch die Verwendung der elliptoiden Werkzeugkontur mit kleinem Spitzewinkel minimieren.

Die Einrisse entstehen kurz nachdem das Werkzeug das Material durchdrungen hat. Dies ist die Ursache, weshalb der Spitzewinkel einen so großen Einfluss auf die Risslänge besitzt. Eine weitere Lösung zur Reduzierung der Risslänge bei der Verwendung gedrallter Werkzeuge ist daher dadurch zu erreichen, dass man die wendelförmigen Formstollen nicht von der Werkzeugs spitze aus, sondern erst zu einem späteren Punkt in das Werkzeug integriert. Der Startpunkt des Dralls wird somit auf der Werkzeugachse verschoben. Dies sollte eine bessere Gestaltung des für die Rissentstehung kritischen Bereichs der Werkzeugspitze ermöglichen.

Insgesamt ist der Drallwinkel aufgrund seines großen Einflusses auf die Buchsenqualität einer der wichtigsten Geometriemerkmale des Fließlochformers. Das Diagramm 6-23 zeigt den Einfluss des Drallwinkels auf die Buchsenqualität und die Prozessgrößen.

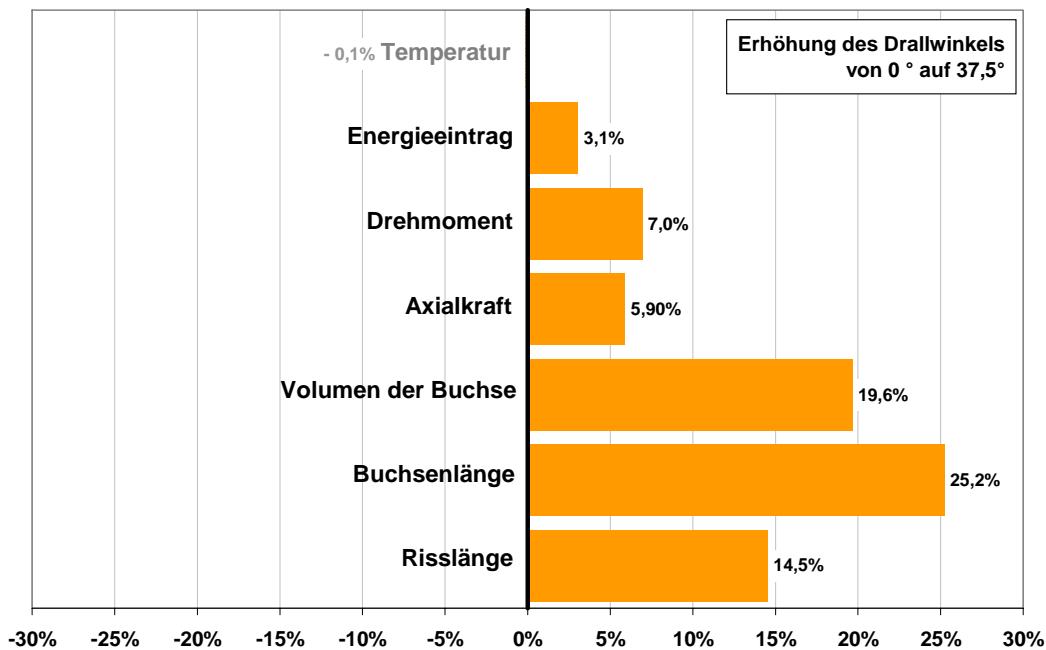


Diagramm 6-23: Einfluss des Drallwinkels auf die Zielgrößen

6.1.2.10 Formstollenzahl

Eine Erhöhung der Formstollenzahl führt zu einer Steigerung der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück und trägt somit zu einer Erhöhung des Energieeintrags bei. Werkzeuge mit mehr Formstollen leisten mehr Verformungsarbeit. Gleichzeitig erhöhen sich das Drehmoment sowie die maximale Temperatur leicht. In Bezug auf die Buchsenqualität lässt sich durch eine Änderung der Anzahl der Formstollen die Buchsenlänge beeinflussen. Diese steigt mit zunehmender Formstollenzahl, ohne die Risslänge und den Werkstofffluss zu beeinflussen. Durch den Einsatz von Fließlochformern mit fünf Formstollen lassen sich daher lange dünne Buchsen erzeugen.

Bei Betrachtung der durch die Erhöhung der Formstollenzahl hervorgerufenen Haupteffekte kommt man zunächst zu dem Schluss, dass das Bearbeitungsergebnis nicht wesentlich durch die Variation der Formstollenzahl beeinflussbar ist. Im Kapitel 6.1.1 wurde jedoch aufgezeigt, dass die Formstollenzahl an einer Vielzahl von Wechselwirkungseffekten beteiligt ist. Diese setzten sich zudem häufig aus zwei gegenläufigen Einzeleffekten zusammen, die sich bei der Mittelwertbildung zur Bestimmung der Haupteffekte gegenseitig aufheben. Würde bei der Versuchsauswertung und der Ergebnisinterpretation nur der Haupteffekt betrachtet werden, so würde der Einfluss der Formstollenzahl auf den Prozess fälschlicherweise als zu gering eingestuft werden. Somit ist festzuhalten, dass der Faktor Formstollenzahl je nach Randbedingung anders wirkt. Darüber hinaus ist nicht nur die Größe des Effekts, sondern auch die Wirkungsrichtung stark von den Einstellparametern der übrigen Einflussfaktoren abhängig. In Diagramm 6-24 ist der Einfluss der Formstollenzahl auf die Zielgrößen dargestellt.

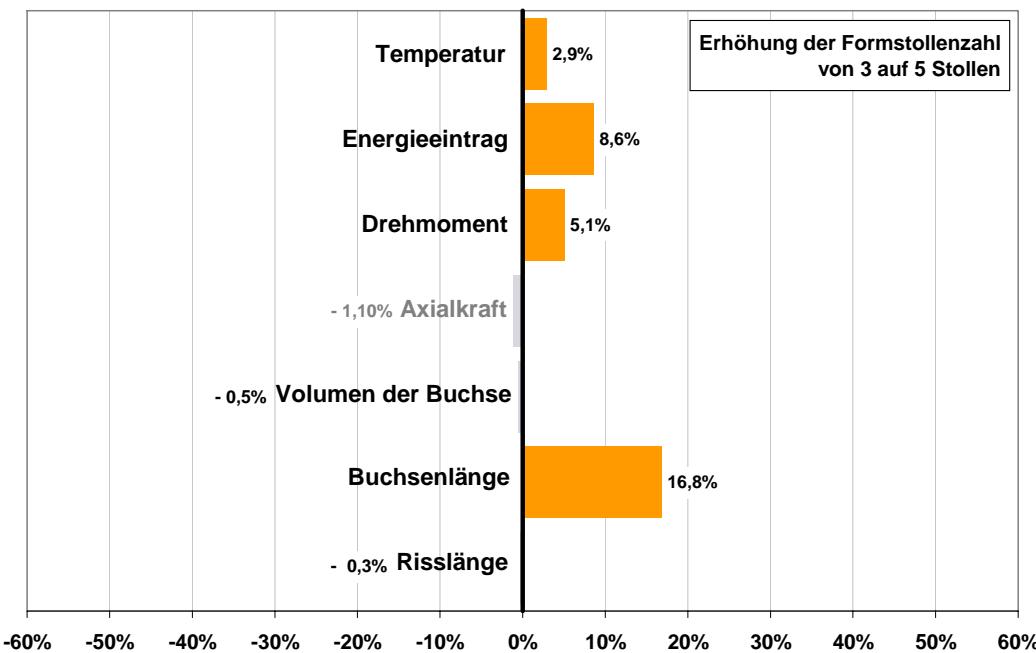


Diagramm 6-24: Einfluss der Formstollenzahl auf die Zielgrößen

6.1.2.11 Formstollenenverhältnis

Das Formstollenenverhältnis bestimmt die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Der Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die Zielgrößen ist insgesamt als relativ gering einzustufen. Mit zunehmendem Formstollenenverhältnis nähert sich die verkürzte Hypotrochoide immer weiter einer Kreisfunktion. Mit zunehmender Kontaktfläche nimmt sowohl das Drehmoment als auch der Energieeintrag leicht zu. Infolgedessen entsteht eine geringfügig höhere Maximaltemperatur. Die Erhöhung des Formstollenenverhältnisses von 95 % auf 97 % führt zu einer Steigerung der Risslänge um 7,7 % und zu einer leichten Reduzierung der Buchsenlänge.

In Diagramm 6-25 ist der Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die ausgewerteten Zielgrößen dargestellt.

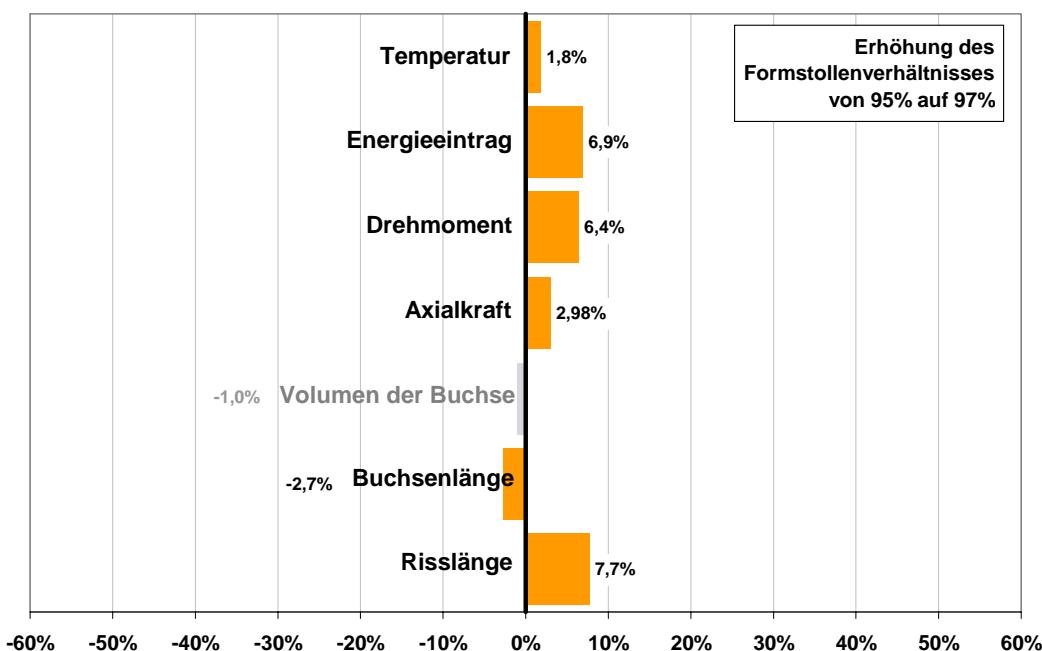


Diagramm 6-25: Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die Zielgrößen

6.1.3 Zusammenfassung der Effektanalyse

Um einen Überblick über alle erfassten Haupteffekte zu bekommen, wurden diese in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Diese Tabelle beinhaltet die prozentuale Erhöhung der Zielgrößen die auf eine Steigerung der Faktoren von der unteren auf die obere Faktorstufe zurückzuführen ist. Zusätzlich werden die Identitäten als zentrale Mittelwerte der Zielgrößen aller Versuche mit aufgeführt. Effekte, die zu einer Steigerung der betrachteten Zielgröße führen, werden mit Pfeil nach oben, solche mit einem negativen Effekt mit Pfeil nach unten gekennzeichnet. Die Anzahl der Pfeile kennzeichnet die Größe des Effekts.

Dazu wird zunächst der größte durch die Variation eines Faktors auf eine Zielgröße erzielte Effekt bestimmt. Bezogen auf diesen Effekt wird der prozentuale Anteil aller weiteren Effekte berechnet. Tabelle 6-1 zeigt die Zuordnung von berechneten prozentualen Effekten und der Zahl der Pfeile.

| prozentualer Anteil | Kennzeichnung | |
|---------------------|---------------|---------|
| | positiv | negativ |
| 0% ≤ Effekt ≤ 15% | — | — |
| 15% < Effekt ≤ 30% | ↑ | ↓ |
| 30% < Effekt ≤ 45% | ↑↑ | ↓↓ |
| 45% < Effekt | ↑↑↑ | ↓↓↓ |

Tabelle 6-1: Zuordnung von prozentualen Effekt und Pfeilanzahl

Somit ergibt sich die folgende tabellarische Darstellung der Effekte.

| Identity: | Axialkraft 3682 N | Drehmoment 6,8 Nm | Energieeintrag 7359 J | Temperatur 759 °C | Risslänge 1 mm | Buchsenlänge 7,3 mm | Werkstoffvolumen 189 mm³ |
|--|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|
| Konuswinkel $33 \Leftrightarrow 39^\circ$ | — 6,3% | — 3,1% | — -4,5% | ↑ 1,3% | — -1,4% | — 2,0% | — 1,2% |
| Konturvariante Standard \Leftrightarrow Sonder | ↑↑↑ 45,7% | — 0,5% | — 5,2% | ↓ -2,4% | ↓↓ -22,4% | — 0,6% | — 4,0% |
| Formstollenanzahl $3 \Leftrightarrow 5$ Stück | — -1,1% | — 5,1% | — 8,6% | ↑↑↑ 4,0% | — -0,3% | ↑↑↑ 16,8% | — -0,5% |
| Formstollenverhältnis $0,95 \Leftrightarrow 0,97\%$ | — 3,0% | — 6,4% | — 6,9% | ↑↑ 2,5% | — 7,7% | — -2,7% | — -1,0% |
| Durchmesser $9,2 \Leftrightarrow 13$ mm | ↑↑↑ 38,7% | ↑↑↑ 86,3% | ↑↑↑ 67,4% | — -0,2% | ↑↑↑ 56,2% | ↑↑↑ 37,0% | ↑↑↑ 106,6% |
| Werkstoff Charge A \Leftrightarrow B | — -1,7% | — 0,1% | — 0,5% | — 0,1% | — 0,2% | — 0,3% | — 0,2% |
| Umfangsgeschwindigkeit $70 \Leftrightarrow 110$ m/min | ↓↓ -20,9% | ↓ -30,4% | ↑ 14,3% | ↑↑↑ 8,1% | — 7,2% | — 5,3% | — -0,9% |
| Drallwinkel $0 \Leftrightarrow 37,5^\circ$ | — 5,9% | — 7,0% | — 3,1% | — -0,2% | ↑ 14,5% | ↑↑↑ 25,2% | ↑ 19,6% |
| Spitzenwinkel $80 \Leftrightarrow 100^\circ$ | ↑ 8,3% | — 0,5% | — 2,4% | — 0,1% | ↑↑↑ 31,8% | — 4,9% | — 2,4% |
| Blechdicke $2 \Leftrightarrow 3$ mm | ↑↑↑ 44,5% | ↑ 29,5% | ↑↑↑ 49,3% | — 0,2% | ↓ -9,9% | ↑ 10,4% | ↑↑ 43,0% |
| Vorschub $50/200 \Leftrightarrow 50/200$ mm/min | — 2,7% | ↑ 20,0% | ↓ -17,7% | ↓ -2,0% | — -2,7% | — -2,4% | — 0,9% |

Tabelle 6-2: Ergebnisdarstellung bezogen auf die Haupteinflussgrößen

Während die Visualisierung der Effektgröße durch die Pfeile einen kompakten Überblick vermittelt, erhält man durch die zusätzliche Aufnahme der zentralen Mittelwerte und der prozentualen Effekte in die Tabelle Informationen der folgenden Art:

- Eine Erhöhung des Spitzenwinkels von 80° auf 100° führt zu einer Steigerung der Risslänge von ca. 32 %. Die durchschnittliche Risslänge am Buchsenende beträgt 1 mm.
- Bei einer durchschnittlichen Risslänge von 1 mm lässt sich diese durch die Variation des Spitzenwinkels zwischen 80° mm und 100° mm um +/- 16 % beeinflussen.

Beide Aussagen sind bezüglich ihres Informationsgehalts identisch. Sie unterscheiden sich lediglich von Ihrem Betrachtungspunkt.

6.2 Regressionsmodell

Durch die Effektanalyse ist man nun umfassend über die Wirkung der untersuchten Faktoren auf alle Zielgrößen informiert. Um die durch den 2^{11-4} Faktorenplan erhaltenen Informationen über die Wirkung der einzelnen Faktoren zusammenzufassen und eine einfache Prognose über die nicht untersuchten Parameterkombinationen des untersuchten Hyperraums zu ermöglichen, wird ein Interaktionsmodell für jede Zielgröße aufgestellt.

Die Entwicklung der Regressionsmodelle der einzelnen Zielgrößen erfolgt auf Grundlage der im Rahmen der statistischen Versuchsauswertung in der Effektmatrix bestimmten Größen. Der zentrale Mittelwert aller Einzelversuche, in der statistischen Versuchplanung als Identer bezeichnet, dient als Zentralpunkt, um den das Regressionsmodell aufgebaut wird. Der Identer entspricht somit dem Faktor b_0 der Gleichung (46).

Die in der Effektmatrix berechneten Haupt- und Wechselwirkungseffekte geben den Beeinflussungsbereich der Zielgröße, hervorgerufen durch die Variation der an den Effekten beteiligten Einflussgrößen, um den zentralen Mittelwert an. In Kombination mit den linear transformierten Faktorstufen x_i können daher die halben Effekte als Regressionskoeffizienten zur Modellbildung verwendet werden. Die halben Hauptfaktoren entsprechen somit den Koeffizienten b_i und die halben Zweifach-Wechselwirkungen den bilinearen Gliedern b_{ij} der Gleichung (46).

Das Regressionsmodell lässt sich mit Hilfe des Identer, der Haupt- und der Wechselwirkungseffekte vollständig aufstellen. In der Praxis werden vornehmlich zur Modellbildung nur die als signifikant eingestuften Effekte verwendet /108/.

Unter Berücksichtigung aller als hoch signifikant eingestuften Effekte (vgl. Tabelle 10-4), erhält man auf diese Weise die folgende Modellgleichung zur Berechnung des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens.

$$\begin{aligned} Volumen = \bar{y} = & 188,9 + 3,7x_A + 65,7x_E + 16,9x_H + 2,2x_I \\ & + 33,5x_J + 1,7x_Ax_G - 1,7x_Bx_C + 2,6x_Bx_E \\ & + 3,7x_Bx_H + 6,7x_Ex_H + 12,5x_Ex_J + 6x_Hx_J \end{aligned} \quad (48)$$

Hierbei ist zu beachten, dass als x_i die linear transformierten Einstellparameter einzusetzen sind und nicht die Realwerte der Faktorstufen. Mit Hilfe der Tabelle 10-4 lassen sich analog die Regressionspolynome für die weiteren sechs Zielgrößen aufstellen.

Ausgehend von den bestimmten Regressionspolynomen erfolgt im nächsten Schritt die Entwicklung einer Applikation, welche die parallele Berechnung der Prognosewerte aller Zielgrößen in Echtzeit ermöglicht. Programmtechnisch erfolgt die Umsetzung dieses Softwaretools mit Hilfe von Excel und VBA.

Die Applikation umfasst die beiden Hauptbereiche Berechnungsergebnisse und Einstellparameter (vgl. Abbildung 6-1 und Abbildung 10-1). Der Bereich Einstellparameter ist in die Unterbereiche Werkzeugkontur, Formstollengeometrie, Bearbeitungsparameter und Werkstück unterteilt. Diesen sind die elf untersuchten Faktoren des durchgeführten fraktionellen faktoriellen Versuchsplans zugeordnet.

Über die Benutzeroberfläche des Softwaretools lassen sich mit Hilfe von Steuerelementen die Faktoren innerhalb des untersuchten Versuchsraums beliebig einstellen. Folglich ist auch eine Interpolation zur Berechnung experimentell nicht durchgeföhrter Faktorstufenkombinationen innerhalb des untersuchten Versuchsraums möglich.

Eingestellt werden die Realwerte, die lineare Transformation zur Berechnung der Prognosewerte erfolgt automatisch. Im Ergebnisbereich erhält man direkt nach der Eingabe der Faktorenwerte über Schieberegler die Ergebnisse der Regressionspolynome aller untersuchten Zielgrößen.

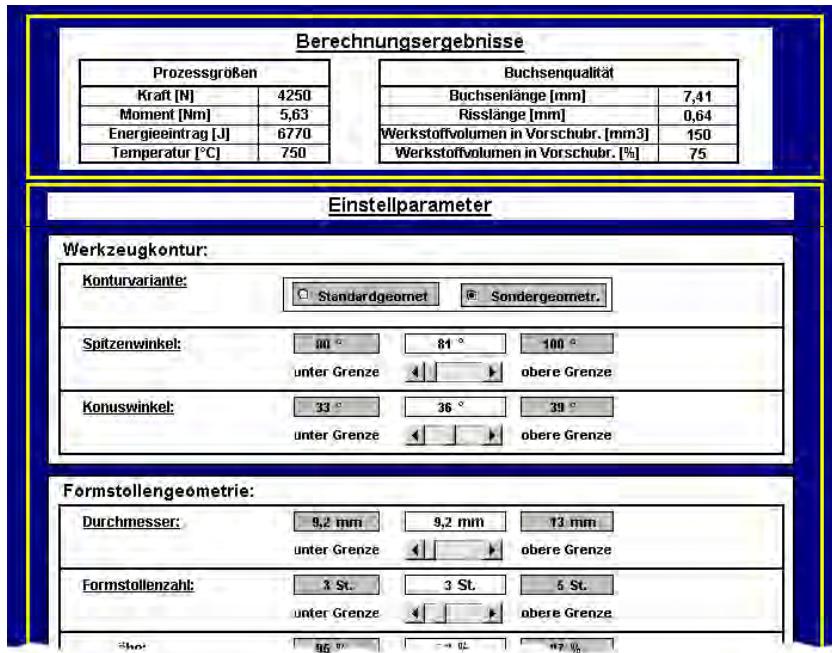


Abbildung 6-1: Ausschnitt der Applikation zur Auswertung der Regressionspolynome

Die Applikation bietet somit eine kompakte, intuitiv zu bedienende Informationsbasis zur Durchführung einer anwendungsfallbezogenen Fließlochformgeometrieentwicklung und Bearbeitungsparameterauswahl. Das zugrunde liegende Regressionsmodell berücksichtigt dabei sowohl die Haupt- als auch die Wechselwirkungseffekte.

7 Detailuntersuchungen

Im Rahmen der Detailuntersuchungen werden einige signifikante Faktoren eingehender untersucht. Ziel ist es, genauere Informationen über die Wirkung einzelner Faktoren zu erhalten. Dazu werden weiterführende Versuchsreihen durchgeführt und ausgewertet, so dass eine direkte Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse möglich ist. Darüber hinaus werden Faktoreinstellungen getestet, die über den bisher untersuchten Versuchsraum hinausreichen. Zusätzlich wird das weiterführende Versuchsprogramm durch die Untersuchung von bisher unberücksichtigten Faktoren ergänzt.

7.1 Standard- und Sondergeometrie

Das durchgeführte Screening zeigt, dass die Konturvariante aufgrund der starken Beeinflussung der Buchsenqualität sowie der anderen Prozessgrößen die wichtigste geometrische Einflussgröße beim Fließblochformen ist. Im Rahmen eines Vergleichs zwischen Standard- und Sondergeometrie werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konturvariante detailliert aufzeigt. Ein direkter Vergleich der Prozessgrößen Kraft, Moment, Temperatur und Energie und der Buchsenqualitätsgrößen Volumenverdrängung in Vorschubrichtung, Riss- und Buchsenlänge steht hier im Vordergrund.

7.1.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Als Versuchswerzeuge kommen Fließlochformer mit Standard- und Sondergeometrie zum Einsatz. Bis auf die Werkzeugkontur sind beide Geometrien identisch. Die geometrischen Formerabmaße mit einem Werkzeugdurchmesser von 9,2 mm entsprechen dem Stand der Technik (vgl. Kapitel 3.1.4). Somit wird ein direkter Vergleich eines handelsüblichen Fließlochformers mit der Neuentwicklung durchgeführt. Detaillierte Geometriedaten können der Tabelle 10-5 im Anhang entnommen werden. Als Werkstückwerkstoff wird der in Kapitel 4.3.3 aufgeführte S355 J2G3 (St52) mit einer Blechdicke von 2 mm verwendet. Die Bearbeitung wird mit einem einfach gestuften Vorschub ($v_1=50 \text{ mm/min}$; $v_2=300 \text{ mm/min}$; Umschaltpunkt bei 2,6 mm) und einer Drehzahl von 3000 U/min durchgeführt. Die Bearbeitungsparameterkombination führte in Vorversuchen bei der Standardgeometrie zu den besten Bearbeitungsergebnissen. Die Versuchsdurchführung entspricht weitgehend der im Kapitel 4.5 beschriebenen Versuchstechnik. Zur Erfassung des Werkstoffflusses wurden 12 Einzelversuche durchgeführt, bei denen die Bearbeitungstiefe sukzessive um 1,5 mm erhöht wurde.

7.1.2 Versuchsergebnisse

7.1.2.1 Axialkraft und Drehmoment

Diagramm 7-1 stellt den Kraft- und Momentverlauf der Sondergeometrie dem der Standardgeometrie gegenüber. Zu Prozessbeginn gleichen sich die Kraft- und Momentverläufe beider Konturvarianten, der Werkzeugkonturunterschied ist noch sehr gering. Ab einer Tiefe von 1 mm beginnt bei der Standardgeometrie der konische Werkzeugbereich, ab dieser Tiefe bleibt die Axialkraft bis zum Umschaltpunkt bei 2,6 mm auf einem annähernd konstantem Niveau, welches bei ca. 1800 N liegt. Mit monoton zunehmendem Werkzeugdurchmesser steigt die Axialkraft bis auf ca. 2600 N stetig an und führt zu einer Steigerung des Drehmoments. Dieses liegt mit ca. 1,6 Nm bei der Sondergeometrie im Vergleich zur Standardgeometrie mit ca. 1,2 Nm deutlich höher. Nach dem Umschaltpunkt fällt die Axialkraft bei der Standardgeometrie leicht ab und bleibt bis zum Übergang des konischen in den zylindrischen Werkzeugbereich mit einem Kraftwert von etwa 1400 N nahezu konstant. Das Drehmoment steigt analog der Werkzeugdurchmesserzunahme linear bis auf 4 Nm an. Ab dem Übergangsbereich fällt die Axialkraft auf ca. 5 N und das Drehmoment auf ca. 0,6 Nm kontinuierlich bis zur Umformung des Werkzeugsbunds ab. Bei der Sondergeometrie bleibt die Axialkraft nach dem Umschaltpunkt über einen Bereich von ca. 1,5 mm zunächst auf dem gleichen hohen Niveau von ca. 2700 N, ehe sie dann hyperbolisch bis zur Umformung des Werkzeugsbunds auf ca. 5 N abfällt. Das Drehmoment steigt bis zu einer Tiefe von 6 mm linear auf ca. 4,2 Nm an und fällt im Anschluss kontinuierlich bis zum Erreichen der Bundumformung 0,5 Nm ab. Der Prozessgrößenverlauf bei der Umformung des nach oben verdrängten Werkstoffvolumens ist bei beiden Konturvarianten nahezu identisch.

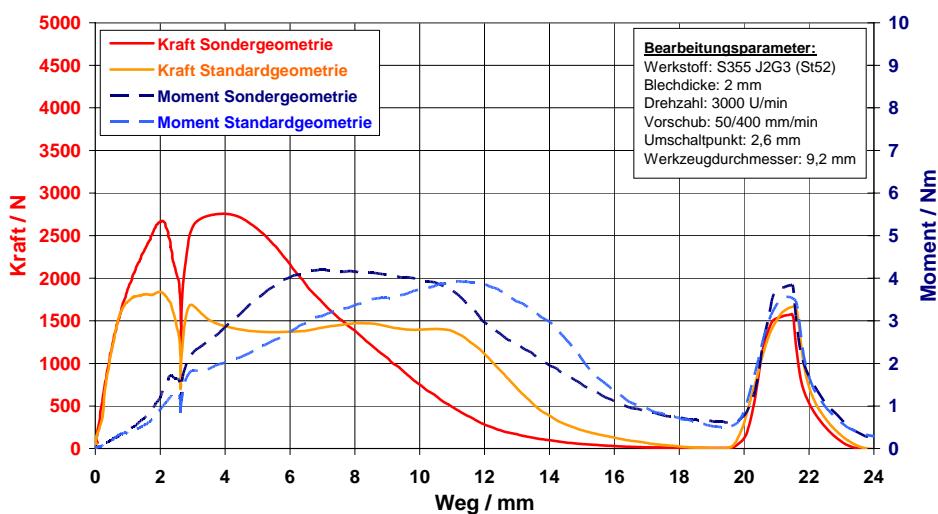


Diagramm 7-1: Kraft- und Momentverlauf der Sonder- und Standardgeometrie

7.1.2.2 Temperatur und Energieeintrag

In Diagramm 7-2 sind die Prozesstemperatur und der Energieeintrag der Sonder- und Standardgeometrie dargestellt. Der Temperatur- und Energieeintragsverlauf ist aufgrund des geringen Konturunterschieds im Bereich der Werkzeugspitze bei beiden Konturvarianten zunächst identisch. Im weiteren Prozessverlauf führt der wesentlich schnelle Durchmesserzuwachs der Sondergeometrie zu einem steileren Temperaturanstieg als bei der Standardgeometrie. Die maximale Prozesstemperatur wird im Vergleich zur Standardgeometrie schneller erreicht. Sie liegt mit 760 °C um etwa 60K höher als bei der Standardgeometrie und wird darüber hinaus über einen längeren Zeitraum gehalten. Der Energieeintrag verhält sich analog. Auch hier ist der Anstieg bei der Sondergeometrie steiler als bei der Standardgeometrie.

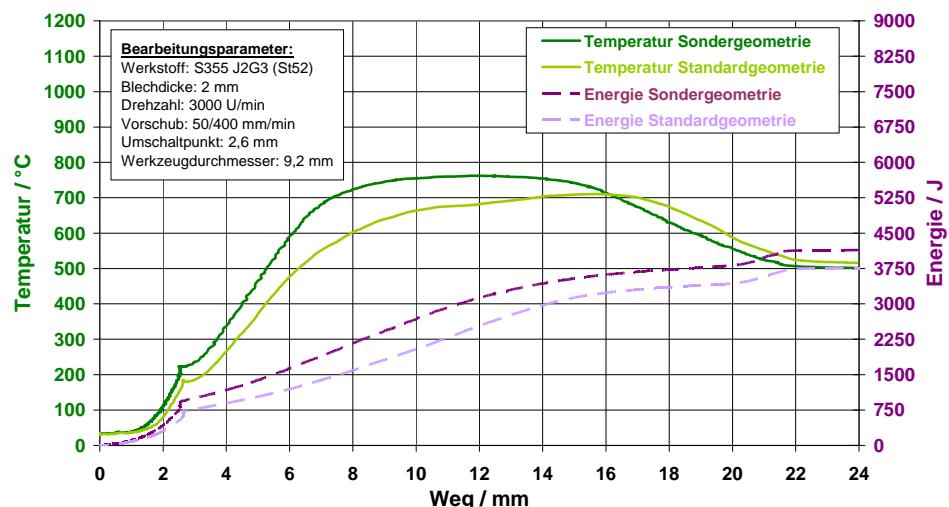


Diagramm 7-2: Temperatur und Energieeintrag der Standard- und Sondergeometrie

7.1.2.3 Buchsenlänge und Risslänge

In Diagramm 7-3 sind die Buchsenlänge und die Risslänge in Abhängigkeit des Vorschubwegs dargestellt. In Bezug auf die Buchsenlänge zeigt sich zunächst bei der Standardgeometrie ein geringfügig schnellerer Zuwachs als bei der Sondergeometrie. Dies kehrt sich ab einer Eindringtiefe von ca. 5 mm um. Nun steigt die Buchsenlänge bei der Sondergeometrie bis zu einer Tiefe von ca. 20 mm schneller an. Ab dieser Tiefe ist eine Buchsenlängenänderung nicht mehr erfassbar. Bis auf den etwas geringeren Anstieg entspricht der Buchsenlängenverlauf der Standardgeometrie nahezu dem der Sondergeometrie. Insgesamt erzeugt der Fließlochformer mit der elliptoiden Werkzeugkontur eine längere Buchse als die konventionelle Werkzeuggeometrie. Betrachtet man sich die Entstehung der Risslänge beider Konturvarianten, so ist festzustellen, dass die ersten Einrisse ab einer Eindringtiefe von ca. 8 mm entstehen. Bei der Standardgeometrie nimmt die Risslänge während des gesamten Bearbeitungsprozesses kontinuierlich zu. Am Ende des Bearbeitungsprozesses

beträgt die maximale Risslänge ca. 0,7 mm. Bei der Sondergeometrie steigt die Risslänge zunächst bis kurz vor dem Eindringen des zylindrischen Werkzeuggbereichs an. Im Folgenden nimmt sie nur noch leicht bis zu ihrem Maximalwert von ca. 0,5 mm zu. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass sich durch die Verwendung der Sondergeometrie die Risslänge im direkten Vergleich zur Standardgeometrie deutlich reduzieren lässt.

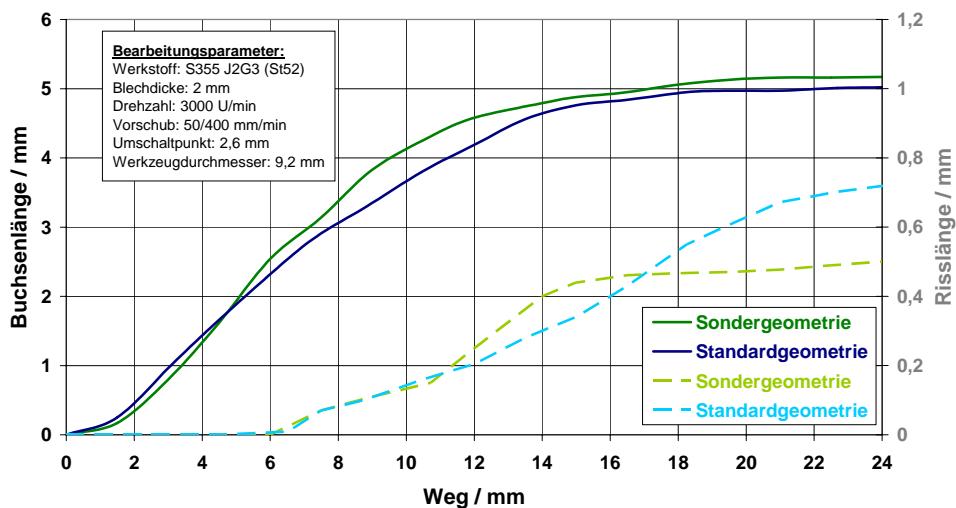


Diagramm 7-3: Buchsen- und Risslänge der Standard- und Sondergeometrie

7.1.2.4 Verdrängtes Werkstoffvolumen

Die prozentuale Verteilung des nach oben und unten verdrängten Werkstoffvolumens bezogen auf das im jeweiligen Arbeitsschritt insgesamt verdrängte Werkstoffvolumen ist in Diagramm 7-4 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass die Standardgeometrie bis zu einer Tiefe von 6 mm mehr Material in Vorschubrichtung verdrängt als die Sondergeometrie. Bei dieser Bearbeitungstiefe hat die Standardgeometrie mit ca. 63 % Volumenverdrängung in Vorschubrichtung den größten Teil der Volumenverdrängungsarbeit bereits geleistet. Über die restlichen 18 mm der Werkzeulgänge ist der Werkstoffvolumenzuwachs mit 9 % sehr gering. Bei der Sondergeometrie zeigt sich insgesamt eine wesentlich harmonischere Volumenverdrängung. Diese erfolgt vor allem zu Beginn des Bearbeitungsprozesses und nimmt mit zunehmendem Prozessfortschritt kontinuierlich ab. Mit ca. 72 % ist der größte Teil des Werkstoffvolumens nach einer Werkzeulgänge von 12 mm in Vorschubrichtung verdrängt. Über die restliche Werkzeulgänge nimmt der Volumenanteil in Vorschubrichtung nur noch geringfügig zu.

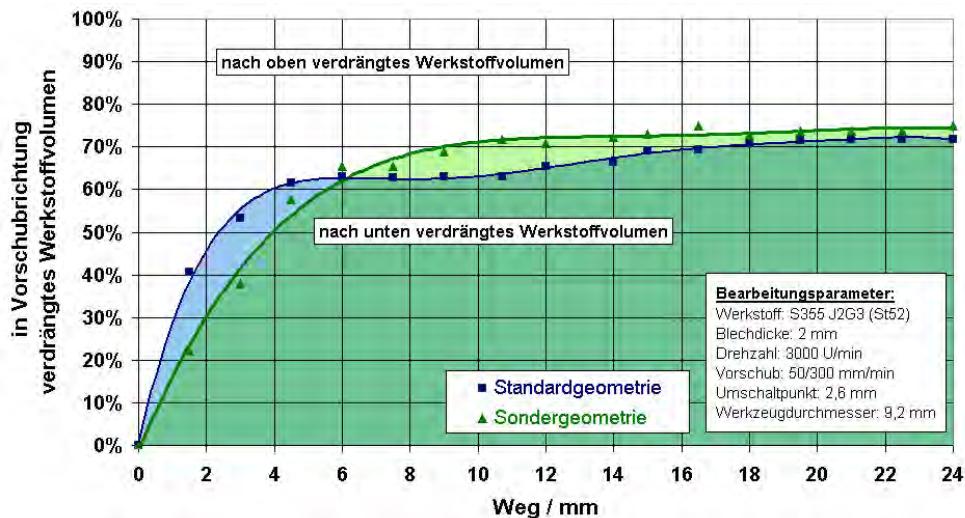


Diagramm 7-4: Volumenverdrängung der Standard- und Sondergeometrie

7.1.3 Schlussfolgerungen

Der durchgeföhrte Vergleich zwischen Standard- und Sondergeometrie bestätigt die durch die statistische Versuchsplanung gewonnenen Erkenntnisse. Die Ursache für die bei der Sondergeometrie im Vergleich zur Standardgeometrie wesentlich höhere Axialkraft ist der schnellere Durchmesserzuwachs im Arbeitsbereich. Durch diesen dissipiert die Sondergeometrie mehr Reibungsenergie, welche für einen schnelleren Temperaturanstieg und eine leicht höhere Maximaltemperatur verantwortlich ist. Darüber hinaus wird diese Maximaltemperatur über einen wesentlich längeren Zeitraum gehalten. Das Werkstück wird schneller plastisch formbar und lässt sich insgesamt leichter umformen. Diese Eigenschaft der Sondergeometrie zusammen mit der kontinuierlichen Volumenverdrängung führt zusätzlich zu einer Reduzierung der Einrisse am Buchsenauslauf.

Der im Vergleich zur Standardgeometrie schnellere Durchmesserzuwachs wirkt sich nachteilig auf die Axialkraft aus. Bei identischen Bearbeitungs- und Werkzeuggeometrieparametern ist diese bei der Sondergeometrie wesentlich größer als bei der Standardgeometrie. Da von einer Korrelation zwischen Axialkraft und Werkstoffvolumenverdrängung auszugehen ist, führt diese zunächst zu einem Zuwachs des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens. Jedoch steigt auch mit zunehmender Axialkraft die Gefahr von unabsichtigten plastischen Deformationen des Werkstücks an. Die Versuchsergebnisse der statistischen Versuchsplanung zeigen, dass eine Reduzierung der Axialkraft durch eine Bearbeitungsparameteranpassung, eine Verringerung des Spitzenwinkels oder eine Verlängerung des Arbeitsbereichs möglich ist.

7.2 Variation des Spitzwinkels

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung wurde gezeigt, dass der Spitzwinkel einen signifikanten Einfluss auf die Einrisslänge am Buchsenende besitzt. Darüber hinaus führt eine Reduzierung des Spitzwinkels auch zu einer Senkung der Axialkraft. Ein kleiner Spitzwinkel in Kombination mit der Sondergeometrie sollte daher bei guter Buchsenqualität die Gefahr von Blechdeformationen reduzieren. Speziell bei der Sondergeometrie sollte sich ein kleinerer Spitzwinkel in Bezug auf die Axialkraft positiv auswirken, da sich durch die Spitzwinkelvariation die gesamte Werkzeugkontur von der Werkzeugspitze bis zum zylindrischen Werkzeuggbereich ändert. Daher sind Untersuchungen durchzuführen, bei denen die Spitzwinkel über den bereits untersuchten Versuchsraum hinaus zu variieren sind.

7.2.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Um den Einfluss des Spitzwinkels auf die Prozessgrößen und die Buchsenqualität zu erfassen, werden Versuche mit Spitzwinkelvariationen von 75° , 90° , 105° und 120° durchgeführt. Die Spitzwinkelvariation wird sowohl bei der Standardgeometrie als auch bei der Sondergeometrie durchgeführt. Der Werkzeugdurchmesser beträgt 9,2 mm. Die Werkzeuggrundgeometrie ist bis auf den Spitzwinkel und die Konturvariante bei allen Werkzeugen identisch und entspricht weitgehend der handelsüblicher Fließlochformer. Die detaillierten Geometrieparameter sind der Tabelle 10-6 im Anhang zu entnehmen. In Diagramm 7-5 sind die sich durch die Spitzwinkelvariation ergebenden Werkzeugkonturen dargestellt. Als Werkstückwerkstoff wird S355 J2G3 (St52) mit einer Blechdicke von 2 mm eingesetzt. Die Bearbeitung erfolgt mit einem einfach gestuften Vorschub ($v_1=50$ mm/min; $v_2=300$ m/min; Umschaltpunkt bei 2,6 mm) und einer Drehzahl von 3000 U/min. Die Versuchstechnik entspricht der in Kapitel 4.5 beschriebenen.

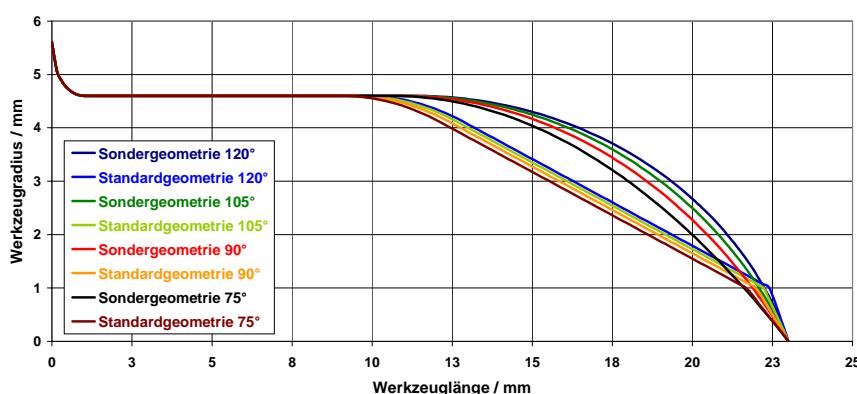


Diagramm 7-5: Spitzwinkelvariation bei der Standard- und Sondergeometrie

7.2.2 Versuchsergebnisse

Die Versuchsauswertung erfolgt für die Zielgrößen Axialkraft, Buchsenlänge und Einrisslänge. Für diese Zielgrößen konnte bereits mit Hilfe der faktororientierten Effektanalyse ein hoch signifikanter Einfluss des Spitzenswinkels mit großer Wirkung nachgewiesen werden (vgl. Kapitel 6.1.2.7).

7.2.2.1 Axialkraft

Die Variation des Spitzenswinkels wirkt sich bei beiden Geometrievariationen unterschiedlich auf die Axialkraft aus (vgl. Diagramm 7-6). Die maximale Axialkraft ist bei der Standardgeometrie unabhängig von dem Spitzenswinkel. Dies ist dadurch zu erklären, dass sich eine Änderung des Spitzenswinkels nur direkt auf die Werkzeugspitze auswirkt. Der konische Werkzeubereich, in dem das Axialkraftmaximum kurz vor dem Umschaltpunkt erreicht wird, bleibt unbeeinflusst. Bei der Sondergeometrie hingegen ist der gesamte Arbeitsbereich der Werkzeugkontur vom Spitzenswinkel abhängig. Dies führt dazu, dass sich durch die Verringerung des Spitzenswinkels die maximale Axialkraft reduziert. Insgesamt reicht die Spitzenswinkelreduktion bei der Sondergeometrie nicht aus, um das niedrige Axialkraftniveau der Standardgeometrie zu erreichen.

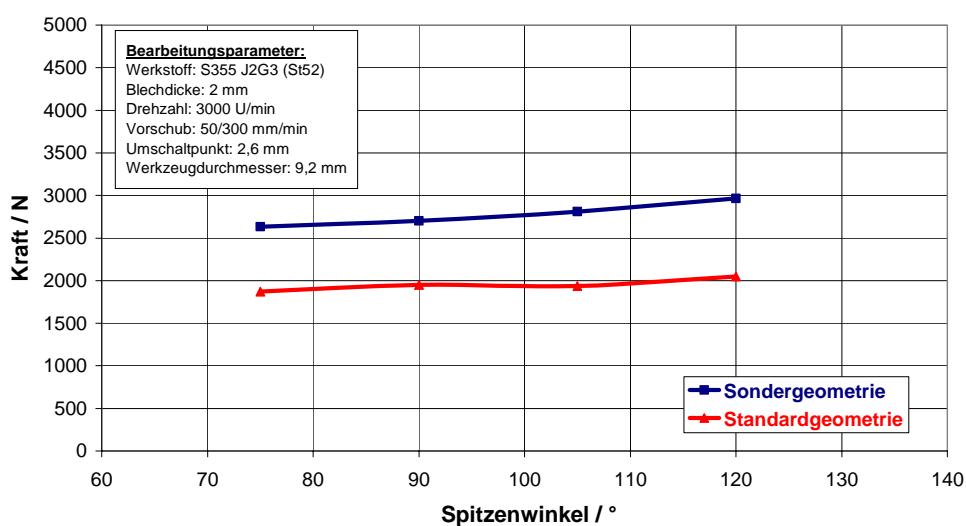


Diagramm 7-6: Maximale Axialkraft in Abhängigkeit des Spitzenswinkels

7.2.2.2 Buchsenlänge

Die Verringerung des Spitzenwinkels führt sowohl bei der Sondergeometrie als auch bei der Standardgeometrie zu einer nahezu linearen Abnahme der Buchsenlänge (vgl. Diagramm 7-7). Die erzielte Buchsenlänge ist bei der Sondergeometrie etwas höher als bei der Standardgeometrie.

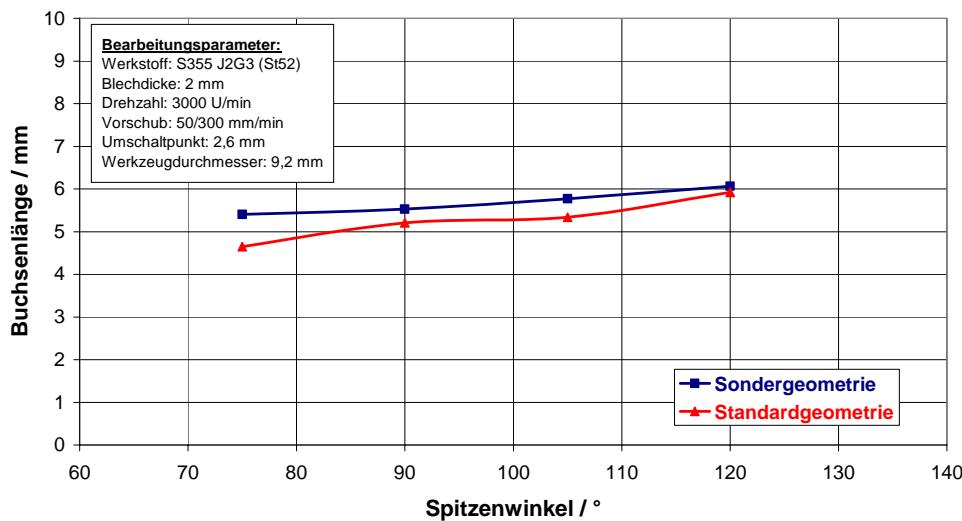


Diagramm 7-7: Buchsenlänge in Abhängigkeit des Spitzenwinkels

7.2.2.3 Risslänge

Der Spitzenwinkel bestimmt bei beiden Werkzeugkonturvarianten die Einrisslänge am Buchsenende (vgl. Kapitel 6.1.2.7). Je größer der Spitzenwinkel desto länger sind auch die Einrisse am Buchsenende. In Diagramm 7-8 ist der Einfluss des Spitzenwinkels auf die Risslänge für die Standard- und Sondergeometrie dargestellt. Die Sondergeometrie erzeugt generell kleinere Einrisse als die Standardgeometrie.

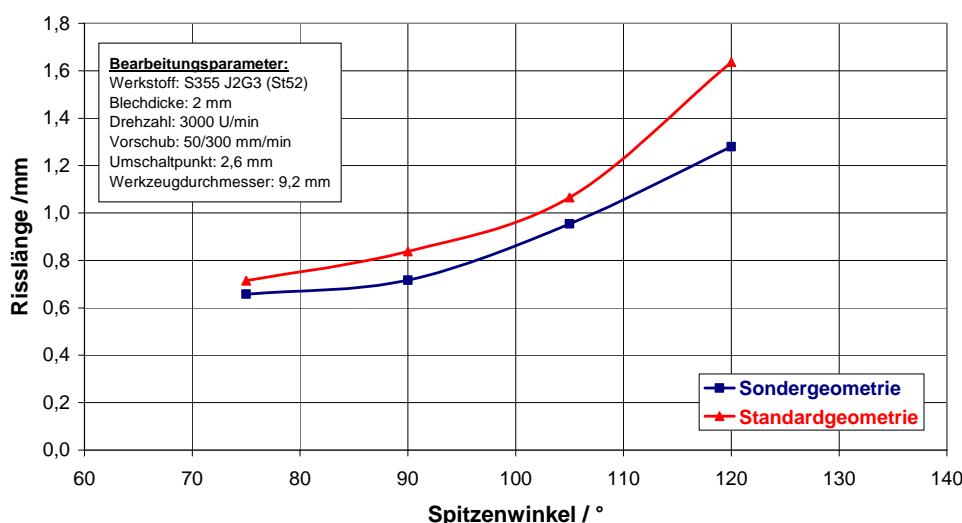


Diagramm 7-8: Risslänge in Abhängigkeit des Spitzenwinkels

7.2.3 Schlussfolgerungen

Die Versuchsreihe zeigt, dass sich mit jeder Verringerung des Spitzwinkels die Einrisslänge am Buchsenende weiter reduzieren lässt (vgl. Abbildung 7-1).



Abbildung 7-1: Einfluss des Spitzwinkels auf die Risslänge

Eine Verringerung des Spitzwinkels kann jedoch nicht unbegrenzt erfolgen. Bei der Standardgeometrie führt die Spitzwinkelreduzierung zu einer Schwächung der Werkzeugspitze. Bei der Bearbeitung von S355 J2G3 (St52) mit den in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Prozessparametern führt ein Spitzwinkel von 60° bereits nach nur wenigen Buchsen zum Werkzeugversagen. Bei der Sondergeometrie ist dies ähnlich, jedoch bricht das Werkzeug erst bei kleineren Winkeln. Die Verwendung von kleinen Spitzwinkeln ist daher von der Zähigkeit des Fließlochformerwerkstoffs in Kombination mit der Festigkeit des zu bearbeitenden Werkstückmaterials abhängig.

Bei der Sondergeometrie wird der Spitzwinkel zusätzlich durch die Länge des Arbeitsbereichs des Fließlochformers begrenzt. Bei konstanter Arbeitsbereichslänge lässt sich bei zu kleinen Spitzwinkeln die der Werkzeugkontur zugrunde liegende Ellipsengleichung mathematisch nicht mehr den gegebenen Werkzeugabmaßen anpassen. Die Kontur der Sondergeometrie ist nicht mehr bestimmbar. Eine weitere Reduzierung des Spitzwinkels ist dann nur durch die Verlängerung des Arbeitsbereichs, welcher auch zu einer Steigerung der Gesamtlänge des Formers führt, möglich.

Die Reduzierung der Axialkraft durch die Verwendung von Sondergeometrien mit geringen Spitzwinkeln wurde erfolgreich umgesetzt. Die erzielbare Axialkraftreduzierung ist jedoch als gering einzustufen.

7.3 Variation der Arbeitsbereichslänge

Sowohl die Versuchsergebnisse der statistischen Versuchsplanung als auch die der Gegenüberstellung der Standard- und Sondergeometrie belegen, dass die höhere Axialkraft der Sondergeometrie auf den schnelleren Durchmesserzuwachs im Arbeitsbereich zurückzuführen ist. In einem ersten Schritt wurde vergeblich versucht, die Axialkraft durch die Integration eines kleinen Spitzwinkels zu reduzieren. Aus dieser Erkenntnis heraus wird eine Versuchreihe durchgeführt, in welcher der Einfluss der Arbeitsbereichslänge einge-

hender zu untersuchen ist. Dabei werden die bereits untersuchten Faktorgrenzen des Konuswinkels und damit verbunden die Länge des Arbeitsbereichs erweitert.

7.3.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuchsreihe zur Untersuchung des Längeneinflusses des Arbeitsbereichs kommen Standard- und Sondergeometrien zum Einsatz. Bis auf die Längenänderung des Anformbereichs sind die geometrischen Abmaße der Fließlochformer mit denen in Kapitel 7.1 identisch. Bei der Sondergeometrie wurden Arbeitsbereiche mit einer Länge von 14 mm, 16 mm und 18 mm untersucht. Bei der Standardgeometrie entspricht dies, unter Berücksichtigung einer Werkzeugspitzenlänge von 1 mm, den Konuswinkeln von 41° , 35° und 29° . Im Gegensatz zu den Versuchen der statistischen Versuchsplanning ist nicht die Gesamtlänge des Fließlochformers, sondern die Länge des zylindrischen Fließlochformerbereichs konstant. Die Gesamtlänge des Formers ändert sich folglich mit jeder Abstufung um 2 mm. Die genauen Geometriedaten sind Tabelle 10-7 zu entnehmen. Als Werkstückwerkstoff wird der in Kapitel 4.3.3 aufgeführte S355 J2G3 (St52) mit 2 mm Blechdicke verwendet. Die Bearbeitung erfolgt mit einem einfach gestuften Vorschub ($v_1=50 \text{ mm/min}$; $v_2=300 \text{ mm/min}$; Umschaltpunkt bei 2,6 mm) und einer Drehzahl von 3000 U/min. Die Versuchsbedingungen entsprechen den in Kapitel 4.5 dargestellten.

7.3.2 Versuchsergebnisse

Das primäre Ziel der Arbeitsbereichsverlängerung ist die Axialkraftreduzierung bei der Sondergeometrie. Daher liegt der Schwerpunkt bei der Versuchsauswertung auf der Auswertung der Axialkraftverläufe. Darüber hinaus sind die Risslänge, Buchsenlänge sowie der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil zu berücksichtigen.

7.3.2.1 Axialkraft und Drehmoment

In Diagramm 7-9 sind die Axialkraft- und Momentverläufe der Sondergeometrie dargestellt. Es zeigt, dass sich durch die Verlängerung des Arbeitsbereichs von 14 mm auf 16 mm die Axialkraft um ca. 11 % reduziert. Eine weitere Verlängerung des Arbeitsbereichs auf 18 mm führt jedoch zu keiner weiteren Reduzierung. Der Einfluss auf das maximale Drehmoment ist bei der Sondergeometrie insgesamt gering.

Bei der Standardgeometrie ist in Diagramm 7-10 ein identischer Effekt bezüglich der Axialkraft festzustellen. Auch hier führt die Reduzierung des Konuswinkels von 41° auf 35° zunächst zu einer Reduzierung der Maximalkraft von ca. 19 %. Durch eine weitere Verringerung des Konuswinkels kann die Axialkraft nicht weiter beeinflusst werden. In Bezug auf das Drehmoment ist mit zunehmender Werkzeulgänge beim Übergang von dem koni-

schen in den zylindrischen Werkzeugbereich eine leichte Reduzierung des Drehmomentmaximums zu beobachten.

Sowohl bei der Sonder- als auch bei der Standardgeometrie steigt im Bereich des Werkzeugbunds die maximale Axialkraft mit zunehmender Arbeitsbereichslänge an. Dies lässt auf eine Erhöhung des nach oben verdrängten Werkstoffvolumenanteils schließen.

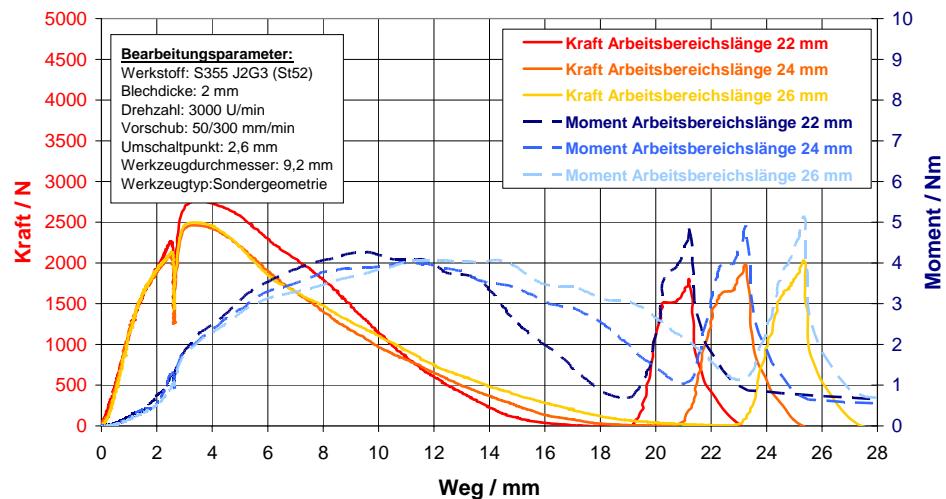


Diagramm 7-9: Arbeitsbereichlänge – Kraft- und Momentverlauf der Sondergeometrie

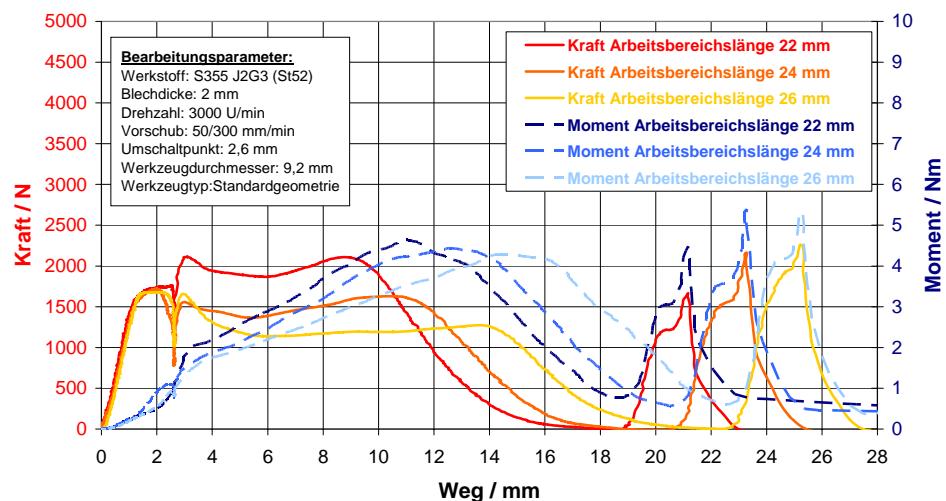


Diagramm 7-10: Arbeitsbereichlänge – Kraft- und Momentverlauf der Standardgeometrie

7.3.2.2 Buchsenqualität

Die buchsenqualitätsbestimmenden Merkmale Risslänge, Buchsenlänge und das in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumen werden ebenfalls durch die Änderung der Arbeitsbereichslänge beeinflusst.

Bei der Sondergeometrie verringert sich mit zunehmender Länge des elliptoiden Werkzeugbereichs die Risslänge. Die Reduzierung ist linear und führt bei einer Steigerung der Arbeitsbereichslänge von 14 mm auf 18 mm insgesamt zu einer Rissreduzierung von 0,44 mm auf 0,42 mm. Die Konuswinkelvariation der Standardgeometrie hat keinen erfassbaren Effekt auf die Risslänge.

Die Steigerung der Arbeitsbereichslänge führt zu einer maximalen Buchsenlängenreduzierung von 4 %. Gleichzeitig reduziert sich der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil von 73 % auf 67 %. Der Mehranteil des nach oben Verdrängten Werkstoffvolumens ist daher für die in Diagramm 7-9 und Diagramm 7-10 aufgezeigte Erhöhung der Axialkraft im Bereich des Werkzeugbunds verantwortlich.

7.3.3 Schlussfolgerungen

Die Verlängerung des Arbeitsbereichs wurde speziell bei der Sondergeometrie mit dem Ziel der Axialkraftverringerung durchgeführt. Ausgangspunkt für diese Untersuchung war das Versuchsergebnis der faktororientierten Effektanalyse in Kapitel 6.1.2.8, in dem der Einfluss des Konuswinkels auf die Zielgrößen analysiert wurde (vgl. Diagramm 6-3). Betreffend der Axialkraft konnte eine Reduzierung der maximalen Axialkraft mit zunehmender Arbeitsbereichslänge nachgewiesen werden. Bei den im Rahmen der Detailuntersuchung durchgeföhrten Versuchen wurde die Arbeitsbereichslänge sowohl bei der Sondergeometrie als auch bei der Standardgeometrie über den bereits untersuchten 2^{11-4} Hyperwürfel hinaus erweitert. Dabei zeigte sich, dass die durch die zunehmende Arbeitsbereichslänge bedingte Reduzierung der maximalen Axialkraft bei beiden Konturvarianten einem Sättigungswert entgegenstrebt. Somit ist eine Axialkraftreduzierung durch die Verlängerung des Arbeitsbereichs nur begrenzt möglich. Jede weitere Verlängerung wirkt sich nur auf die Buchsenqualität aus. Insgesamt lässt sich die Axialkraft der Sondergeometrie auch durch die Variation der Arbeitsbereichslänge nicht auf das niedrige Niveau der Standardgeometrie reduzieren.

7.4 Drallwinkel und Formstollenzahl

Die Integration eines positiven, in Werkzeugdrehrichtung gerichteten Drallwinkels führt zu einer Steigerung des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumenanteils. Darüber hinaus steigen auch die Gesamtbuchsenlänge sowie die Risslänge am Buchsenende an (vgl. Kapitel 6.1.2.9). Im Rahmen der Detailuntersuchungen wird überprüft, inwieweit sich diese Effekte durch die Stärke des Drallwinkels beeinflussen lassen. Darüber hinaus wird durch die Integration von negativen Drallwinkeln versucht, den Werkstofffluss entgegen der Vorschubrichtung zu begünstigen, um so durch die Variation des Drallwinkels eine gezielte Beeinflussung des Werkstoffflusses in beide Richtungen zu ermöglichen. Da die Buchsenlänge neben dem Drallwinkel maßgeblich durch die Formstollenzahl bestimmt wird, wird diese ebenfalls variiert.

7.4.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Die Untersuchung des Drallwinkeleinflusses wird sowohl mit der Sonder- als auch mit der Standardgeometrie durchgeführt. Als Drallwinkel werden -42° , -24° , 0° , 24° und 42° in Kombination mit 3, 4 und 5 Formstollen untersucht. Alle weiteren Geometrieparameter sind konstant. Die detaillierte Auflistung der Werkzeuggeometrieparameter ist Tabelle 10-8 im Anhang zu entnehmen. Die Bearbeitung erfolgt mit einer Drehzahl von 3000 U/min und einem einfach gestuften Vorschub. Bis zu einer Tiefe von 2,6 mm wird mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min und im Anschluss mit 300 mm/min gearbeitet. Als Werkstück kommt S355 J2G3 (St52) mit 2 mm Blechdicke zum Einsatz (vgl. auch Kapitel 4.3.3). Die Versuchsbedingungen entsprechen den in Kapitel 4.5 dargelegten.

7.4.2 Versuchsergebnisse

7.4.2.1 Axialkraft

Die Integration des Drallwinkels führt unabhängig von der Drallrichtung zu einem Anstieg Axialkraft. Die Formstollenzahl in Kombination mit dem Drallwinkel besitzt keinen eindeutigen Einfluss auf die Axialkraft. Beide Aussagen treffen sowohl für die Standard- als auch für die Sondergeometrie zu. Bei der Standardgeometrie liegen die Kraftmaxima jedoch durchschnittlich um ca. 800 N niedriger als bei der Sondergeometrie. Diagramm 7-11 zeigt exemplarisch den Einfluss des Drallwinkels und der Formstollenzahl auf die Axialkraft bei der Sondergeometrie.

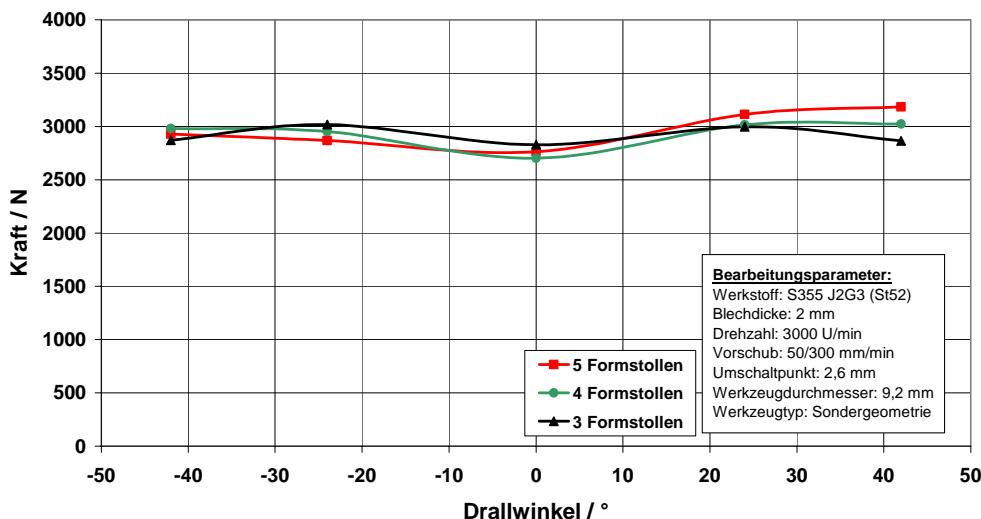


Diagramm 7-11: Einfluss des Drallwinkels auf die Axialkraft

7.4.2.2 Drehmoment

Sowohl bei der Standard- als auch bei der Sondergeometrie ist das Drehmoment direkt abhängig von der Formstollenanzahl. Mit steigender Anzahl der Formstollen steigt auch das Drehmoment unabhängig vom gewählten Drallwinkel an. Der Einfluss des Drallwinkels steht in Wechselwirkung mit der Formstollenanzahl. Bei kleiner Formstollenanzahl ist der Einfluss des Drallwinkels auf das Drehmoment erheblich geringer als bei großer Formstollenanzahl. In Diagramm 7-12 ist dieser Effekt exemplarisch für die Sondergeometrie dargestellt.

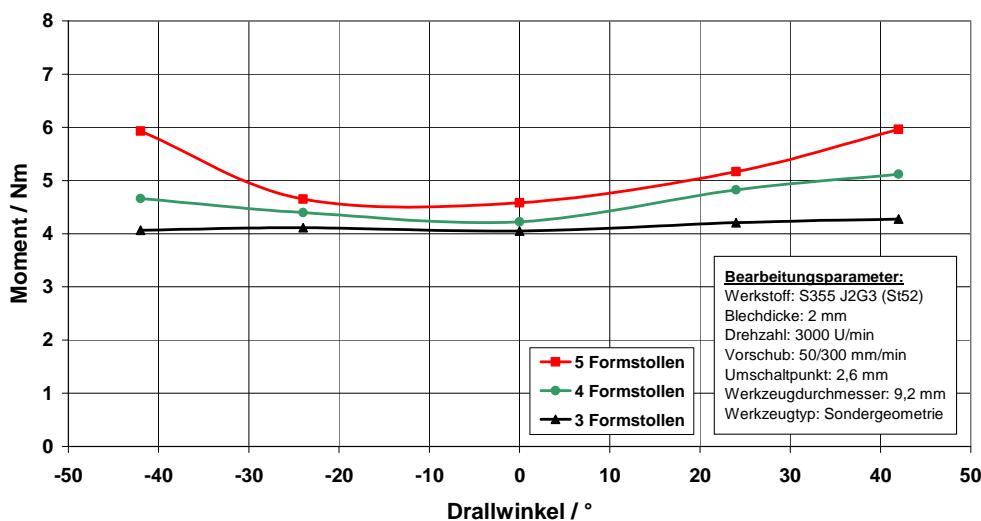


Diagramm 7-12: Einfluss des Drallwinkels auf das Drehmoment

7.4.2.3 Werkstoffvolumenanteil

Der in und entgegen der Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil wird maßgeblich durch den Drallwinkel beeinflusst. Ein Einfluss der Formstollenanzahl ist nicht ein-

deutig nachweisbar. Das Versuchsergebnis aus Kapitel 6.1.2.10 wird somit bestätigt. In Diagramm 7-13 ist der Anteil des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens für die Standard- und Sondergeometrie in Abhängigkeit des Drallwinkels dargestellt, wobei sich die Versuchswerte durch Mittelwertbildung der jeweiligen Versuchsergebnisse von drei, vier und fünf Formstollen ergeben.

Das Diagramm zeigt innerhalb des untersuchten Versuchsraums einen annähernd linearen Einfluss des Drallwinkels auf die Werkstoffvolumenverdrängung. Ausgehend von einem negativen Drallwinkel steigt der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil kontinuierlich mit steigendem Drallwinkel an. Somit begünstigen positive Drallwinkel den Werkstofffluss in Vorschubrichtung und negative Drallwinkel den Werkstofffluss entgegen der Vorschubrichtung.

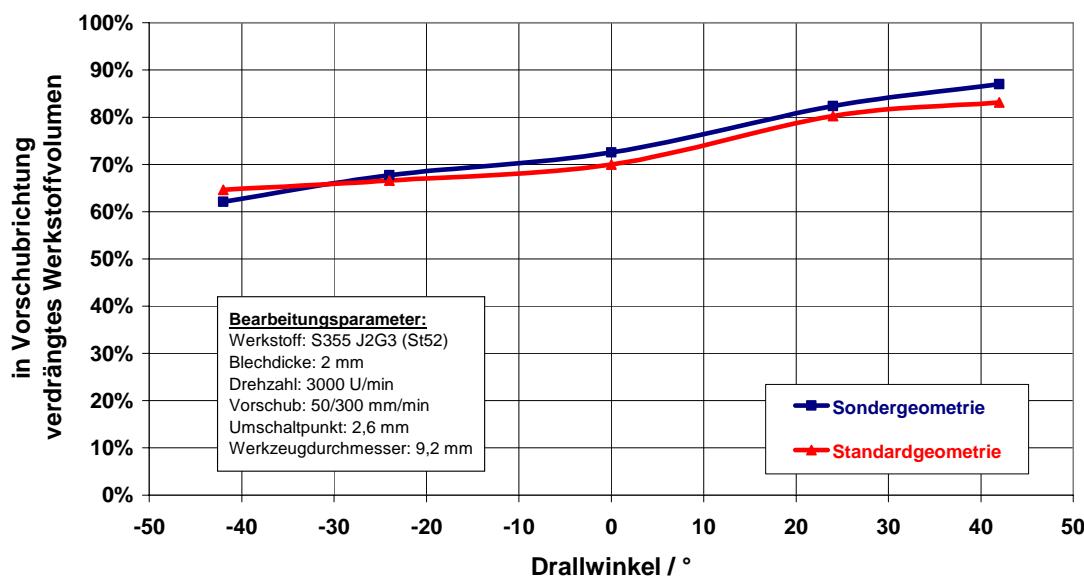


Diagramm 7-13: Volumenverdrängung in Abhängigkeit des Drallwinkels

7.4.2.4 Buchsenlänge

Die Wahl der Werkzeugkonturvariante beeinflusst, dem Versuchsergebnis aus Kapitel 6.1.2.6 entsprechend, die Buchsenlänge nicht wesentlich. In Diagramm 7-14 ist daher der Einfluss der Formstollenzahl in Abhängigkeit des Drallwinkels auf die Buchsenlänge dargestellt, wobei sich die Versuchswerte durch Mittelwertbildung der beiden Konturvarianten ergeben. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass mit zunehmender Formstollenzahl auch die Buchsenlänge zunimmt. Dies ist sowohl bei positiven Drallwinkeln, wie bereits in Kapitel 6.1.2.9 belegt als auch bei negativen Drallwinkeln der Fall. Eine Steigerung der Kontaktfläche zwischen Fließlochformer und zu bearbeitendem Werkstück führt folglich unabhängig vom Drallwinkel zu einer Steigerung der Buchsenlänge.

Der Effekt des Drallwinkels auf die Buchsenlänge ist bei allen getesteten Formstollenzahlen identisch. Mit zunehmender Drallausprägung nimmt die Buchsenlänge unabhängig von der Drallrichtung zu. Somit erzeugen sowohl Fließlochformer mit einem Drallwinkel von -24° als auch von $+24^\circ$ längere Buchsen als Werkzeuge ohne umlaufende Formstollen. Die Ursache dieses Effekts liegt in der Zunahme der Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück.

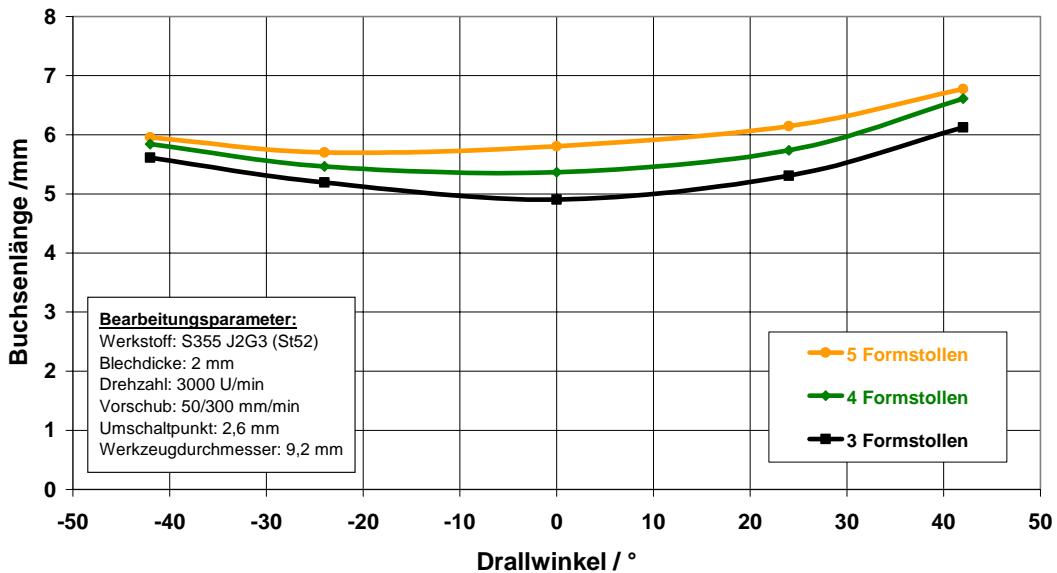


Diagramm 7-14: Buchsenlänge in Abhängigkeit des Drallwinkels

7.4.2.5 Risslänge

Der Länge der Einrisse am Buchsenauslauf werden maßgeblich durch die Konturvariante bestimmt. Ein eindeutiger Einfluss der Formstollenzahl auf die Risslänge ist nicht nachweisbar. Daher ist im Diagramm 7-15 die Risslänge für die Standard- und Sondergeometrie in Abhängigkeit des Drallwinkels dargestellt, wobei sich die Versuchswerte durch Mittelwertbildung der jeweiligen Versuchsergebnisse von drei, vier und fünf Formstollen ergeben. Mit steigender Drallausprägung nimmt die Risslänge unabhängig von der Drallrichtung zu. Der Zielgrößenverlauf ist somit mit der Änderung der Buchsenlänge zu vergleichen. Folglich sind sowohl die Buchsenlängen- als auch die Risslängenänderung auf eine Erhöhung der Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug zurückzuführen.

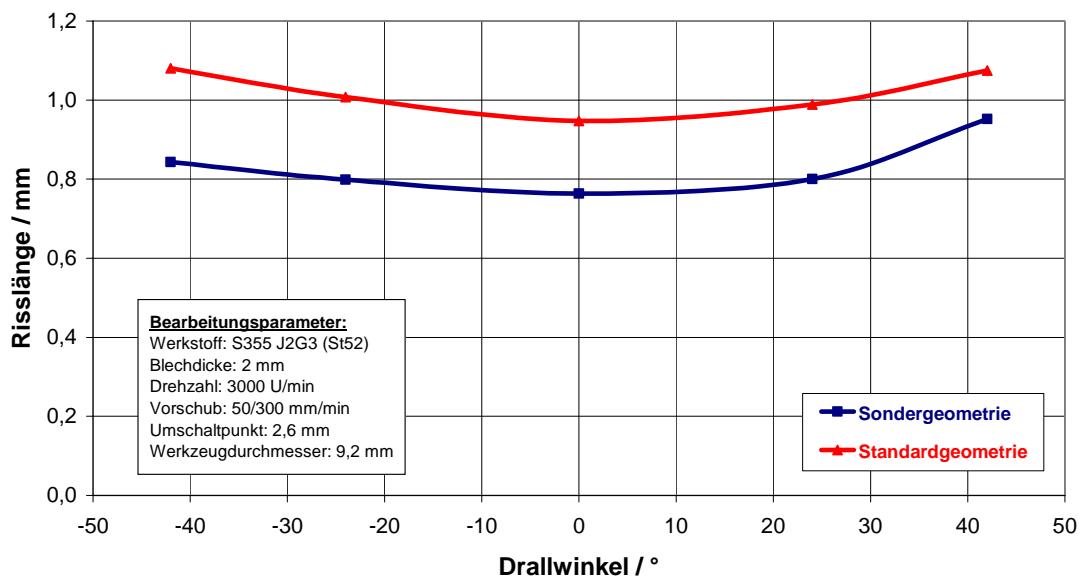


Diagramm 7-15: Risslänge in Abhängigkeit des Drallwinkels

7.4.3 Schlussfolgerungen

Der Drallwinkel ist neben der Konturvariante der wichtigste geometrische Einflussfaktoren beim Fließlochformen. Er bestimmt durch die Beeinflussung des Werkstoffflusses, der Buchsenlänge und der Risslänge maßgeblich die erzielbare Buchsenqualität. Speziell die Steuerungsmöglichkeit des Werkstoffvolumenflusses zeichnet den Drallwinkel aus. Mit Hilfe der Detailuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass nicht nur der Werkstofffluss in, sondern auch entgegen der Vorschubrichtung durch den Drallwinkel beeinflussbar ist.

In Kombination mit der Formstollenanzahl lassen sich somit anwendungsfallbezogene Buchsengeometrien erzeugen. Für die Erzeugung von langen dünnen Buchsen ist z. B. ein Former mit großer Formstollenanzahl und großem negativem Drallwinkel zu empfehlen. Für kurze dicke Buchsen sollten Sondergeometrien mit geringer Formstollenanzahl und ohne Drallwinkel verwendet werden. Um möglichst lange Buchsen mit großem Werkstoffvolumenanteil im unteren Buchsenabschnitt zu erzeugen, bieten sich Sondergeometrien mit großem positivem Drallwinkel und hoher Formstollenanzahl an. Alleiniger negativer Aspekt, der auf die Verwendung von wendelförmig umlaufenden Formstollen zurückzuführen ist, sind die, im Vergleich zu nicht gedrallten Werkzeugen, etwas größeren Einrisse am Buchsenauslauf.



Abbildung 7-2: Einfluss von Drallwinkel und Formstollenanzahl auf die Buchsengeometrie

7.5 Formstollenzahl und Formstollenverhältnis

Die Formstollenzahl und das Formstollenverhältnis sind die formstollengeometriebestimmenden Faktoren und daher maßgeblich für die Kontaktfläche zwischen Fließlochformer und zu bearbeitendem Werkstück verantwortlich. Die Abhängigkeit der Kontaktfläche von diesen beiden Faktoren lässt sich mit Hilfe des Berechnungstools zur Werkstoffvolumen- und Werkzeugmantelflächenbestimmung berechnen (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Diagramm 7-16 zeigt die Abhängigkeit der Werkzeugmantelfläche von der Formstollenzahl und dem Formstollenverhältnis bei 100 % Werkstoffkontakt für eine Sondergeometrie mit einem Werkzeugdurchmesser von 9,2 mm.

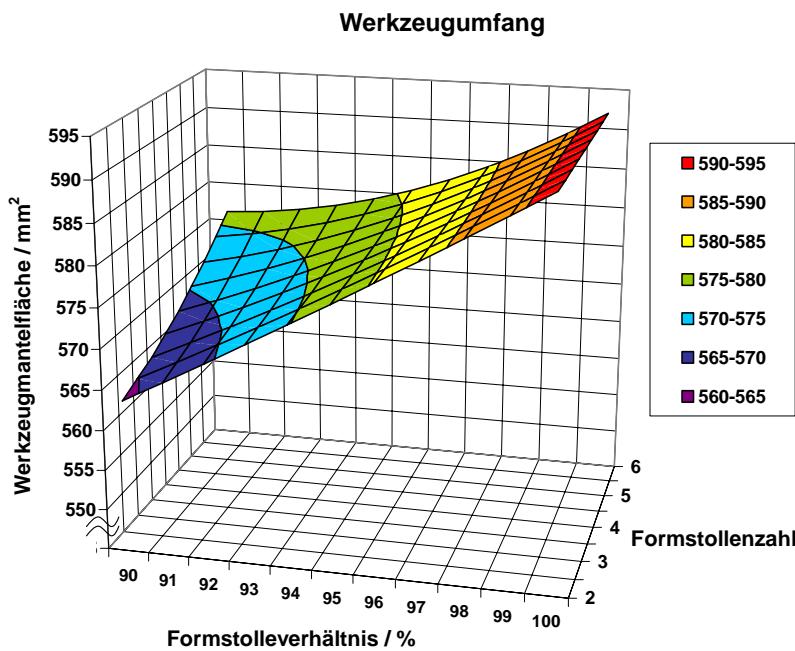


Diagramm 7-16: Werkzeugmantelfläche in Abhängigkeit der Formstollengeometrie

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung wurde bereits gezeigt, dass das Formstollenverhältnis einen signifikanten Einfluss auf die Risslänge am Buchsenende besitzt. Je mehr sich die Formstollengeometrie einer Kreisfunktion nähert, desto länger sind die Einrisse (vgl. Kapitel 6.1.1.5). Die Detailuntersuchen sollen zeigen, bis zu welchem Grad eine Reduzierung des Formstollenverhältnisses zu einer Steigerung der Buchsenqualität beträgt. Da die Werkzeugmantelfläche neben dem Formstollenverhältnis auch von der Formstollenzahl beeinflusst wird, werden Versuche mit einer sukzessiven Änderung beider Faktoren durchgeführt.

7.5.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche werden jeweils 13 Sonder- und Standardgeometrien mit identischer Werkzeugkontur verwendet. Die Werkzeuge werden mit drei, vier und fünf Formstollen in Kombination mit einem Formstollenverhältnis von 92 %, 94 %, 96 %, 98 % und 100 % gefertigt. Die detaillierten Geometriabmessungen sind Tabelle 10-9 zu entnehmen. Als Versuchswerkstoff wird S355 J2G3 (St52) mit 2 mm Blechdicke verwendet (vgl. Kapitel 4.3.3). Die Drehzahl beträgt 3000 U/min und die Vorschubgeschwindigkeit wird bei einer Tiefe von 2,6 mm von 50 mm/min auf 300 mm/min erhöht. Die Versuchsbedingungen sind dem Kapitel 4.5 zu entnehmen.

7.5.2 Versuchsergebnisse

7.5.2.1 Axialkraft

Der Einfluss der Formstollenzahl auf die Axialkraft ist insgesamt als gering einzustufen. In Diagramm 7-17 ist der über die Formstollenzahl gemittelte Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Axialkraft für die Standard- und Sondergeometrie dargestellt. Die Sondergeometrie erzeugt unabhängig vom Formstollenverhältnis eine im Durchschnitt um ca. 800 N höhere Axialkraft als die Standardgeometrie. Wie aus dem Diagramm 7-17 ersichtlich, ist die Form des Effekts des Formstollenverhältnisses bei der Standard- und der Sondergeometrie nahezu identischen. Ausgehend von einem Formstollenverhältnis von 92 % steigt die Axialkraft bis zu einem Verhältnis von ca. 98 % bei der Standardgeometrie von 1800 N auf 2000 N und bei der Sondergeometrie von 2500 N auf 3000 N kontinuierlich an. Von 98 % auf 100 % erhöht sich die Axialkraft im Folgenden auf fast 3500 N bei der Standardgeometrie und auf fast 4000 N bei der Sondergeometrie. In Bezug auf die Versuchsergebnisse aus Kapitel 6 ist daher festzuhalten, dass das aufgestellte Interaktionsmodell die Versuchsergebnisse innerhalb des untersuchten 2^{11-4} Hyperwürfels hervorragend wiedergibt. Bei der Extrapolation der Formstollenverhältnisse auf Faktorstufen, welche größer als die untersuchten 98 % sind, liefert das Berechnungsmodell zwar tendenziell richtige Prognosewerte für die maximale Axialkraft, diese sind jedoch in ihrer Größenordnung zu klein.

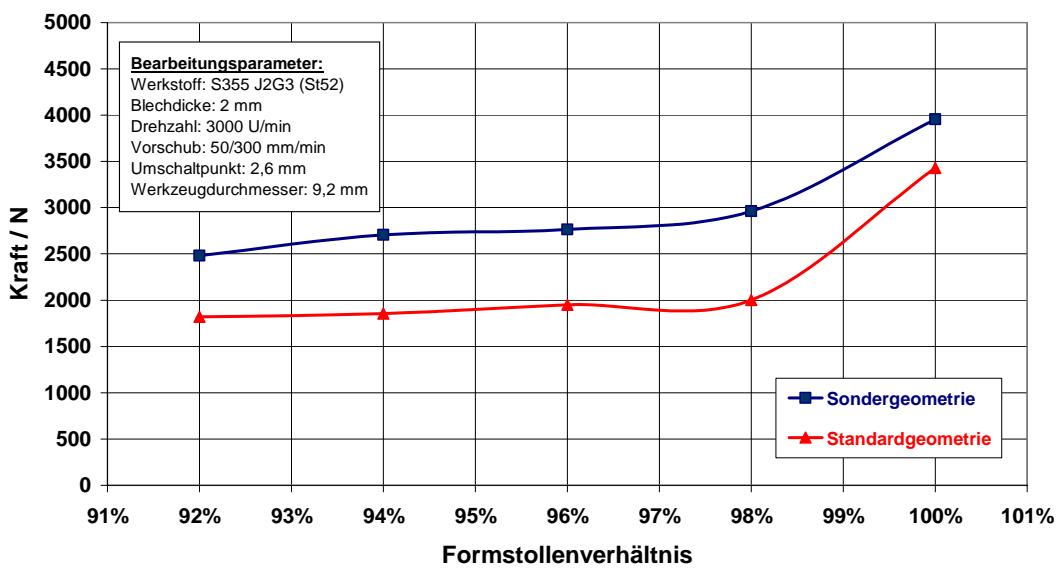


Diagramm 7-17: Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die Axialkraft

7.5.2.2 Drehmoment

Mit steigender Formstollenenzahl steigt das Drehmoment an (vgl. Kapitel 6.1.2.10). Wie in Diagramm 7-18 erkennbar, sind die formstollenenverhältnisabhängigen maximalen Drehmomente bei der Standard- und Sondergeometrie annähernd identisch. Bei beiden Konturvarianten hat eine Zunahme des Formstollenenverhältnisses eine Steigerung des Drehmoments zur Folge.

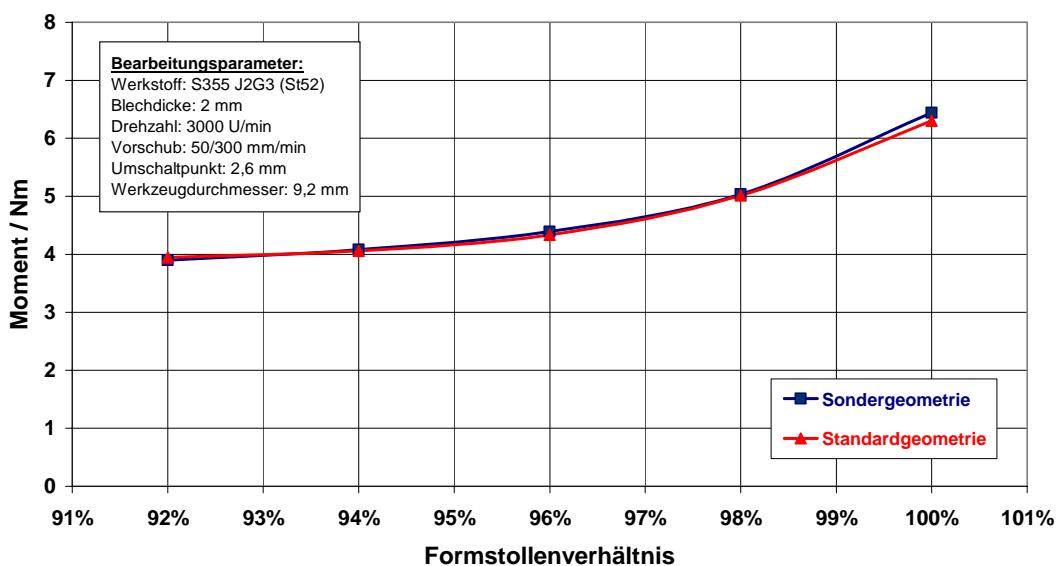


Diagramm 7-18: Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf das Moment

7.5.2.3 Temperatur

Der Unterschied zwischen den Maximaltemperaturen der Sonder- und der Standardgeometrie ist sehr gering. Der Einfluss der Formstollenanzahl und des Formstollenverhältnisses ist bei beiden Konturvarianten nahezu identisch. Daher wird der Einfluss der Formstollenanzahl und des Formstollenverhältnisses exemplarisch am Beispiel der Sondergeometrie erläutert. Die Maximaltemperatur steigt sowohl mit zunehmendem Formstollenverhältnis als auch mit steigender Formstollenanzahl annähernd linear an. Die Zunahme der Temperatur ist auf den mit steigender Formstollenanzahl zunehmenden Energieeintrag zurückzuführen. Dies zeigt, dass die Maximaltemperatur nicht nur von der Reibfläche, sondern auch direkt von der Anzahl der Reibstellen abhängig ist.

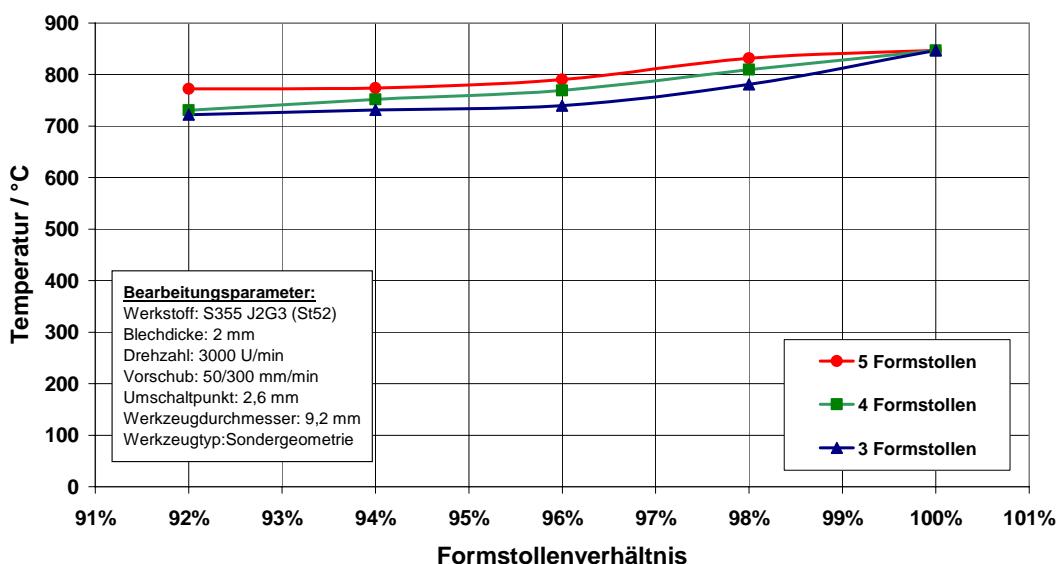


Diagramm 7-19: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf die Temperatur

7.5.2.4 Buchsenlänge

Betrachtet man mit Hilfe des Regressionsmodells aus Kapitel 6.2 den Einfluss der Formstollenanzahl und des Formstollenverhältnisses auf die Buchsenlänge, so zeigt sich, dass bei den in Kapitel 7.5.1 gewählten Werkzeuggeometrieparametern eine Erhöhung des Formstollenverhältnisses bei geringer Formstollenanzahl zu einer Erhöhung der Buchsenlänge und bei hoher Formstollenanzahl zu einer Verringerung der Buchsenlänge führt. Bei einer Formstollenanzahl von vier ist ein Einfluss kaum erfassbar. Diese interpolierte Tendenz des Berechnungsmodells konnte sowohl für die Sonder- als auch für die Standardgeometrie im Rahmen dieser Detailuntersuchung bestätigt werden. Diagramm 7-20 zeigt dies exemplarisch für die Standardgeometrie.

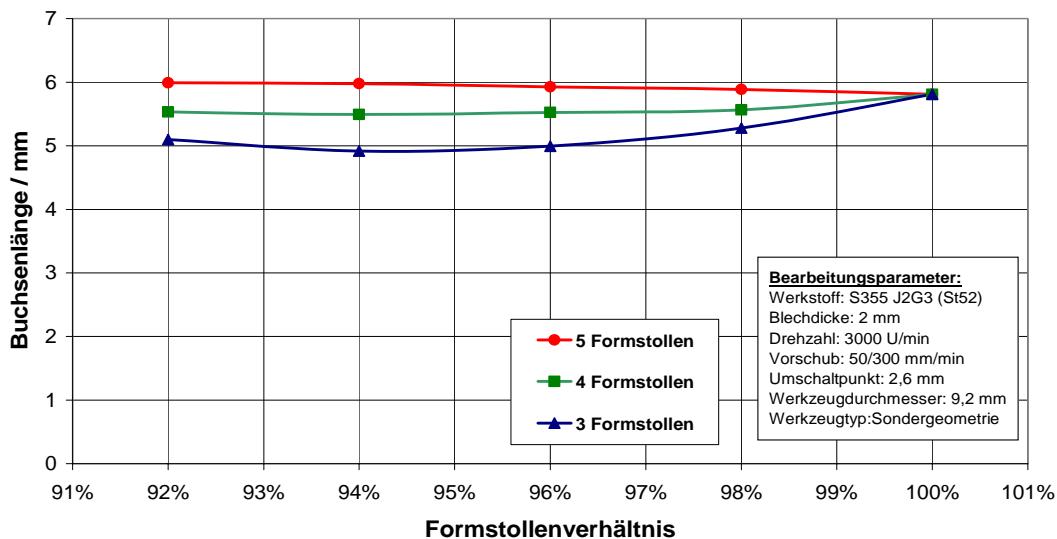


Diagramm 7-20: Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die Buchsenlänge

7.5.2.5 Risslänge

Der Verlauf der Risslänge entspricht tendenziell dem Axialkraftverlauf. Ausgehend von einem Formstollenenverhältnis von 92 % steigt die Risslänge bis zu einem Verhältnis von ca. 98 % sowohl bei der Standard- als auch bei der Sondergeometrie kontinuierlich an. Von 98 % auf 100 % erhöht sich die Risslänge im Anschluss abrupt auf ihr Maximum. Insgesamt ist die Risslänge bei Verwendung der Sondergeometrie unabhängig vom gewählten Formstollenenverhältnis immer geringer als bei der Standardgeometrie.

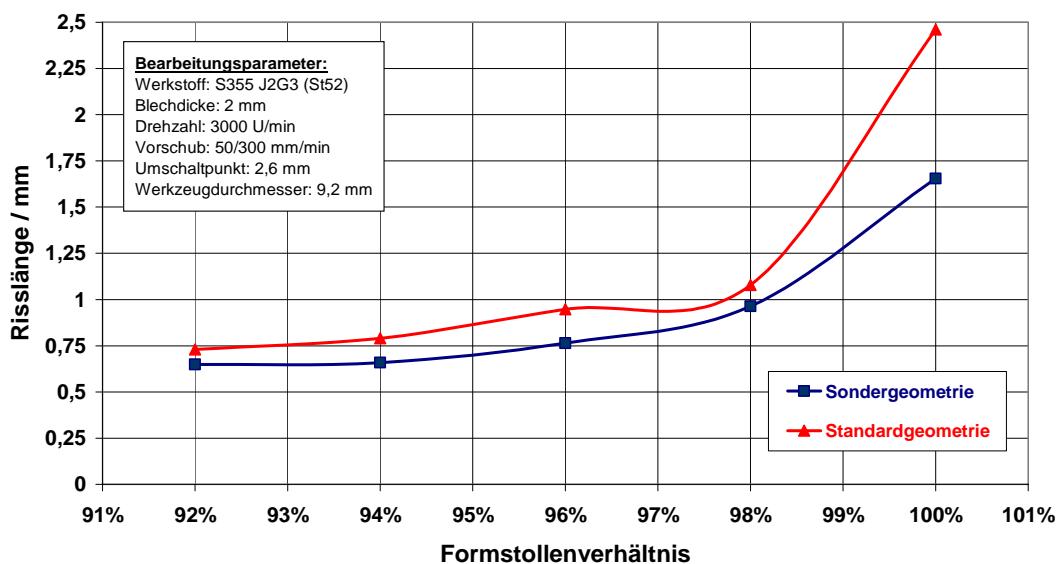


Diagramm 7-21: Einfluss des Formstollenenverhältnisses auf die Risslänge

7.5.2.6 Werkstoffvolumenanteil

Ein eindeutiger Einfluss der Formstollenanzahl auf den in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumenanteil ist sowohl für die Standard- als auch für die Sondergeometrie nicht nachweisbar. Dies entspricht dem Versuchsergebnis aus Kapitel 6.1.1.6. In Diagramm 7-22 ist der Einfluss des Formstollenverhältnisses und der Formstollenanzahl beispielhaft für die Standardgeometrie dargestellt. Die Sondergeometrie besitzt einen nahezu identischen Verlauf. Bei beiden Konturvarianten zeigt sich, dass mit zunehmendem Formstollenverhältnis ein größerer Werkstoffvolumenanteil in Vorschubrichtung verdrängt wird. Wie schon bereits bei anderen Zielgrößen beobachtet, steigt der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil bei der Erhöhung des Formstollenverhältnisses von 98 % auf 100 % wesentlich stärker an als im gesamten Bereich davor.

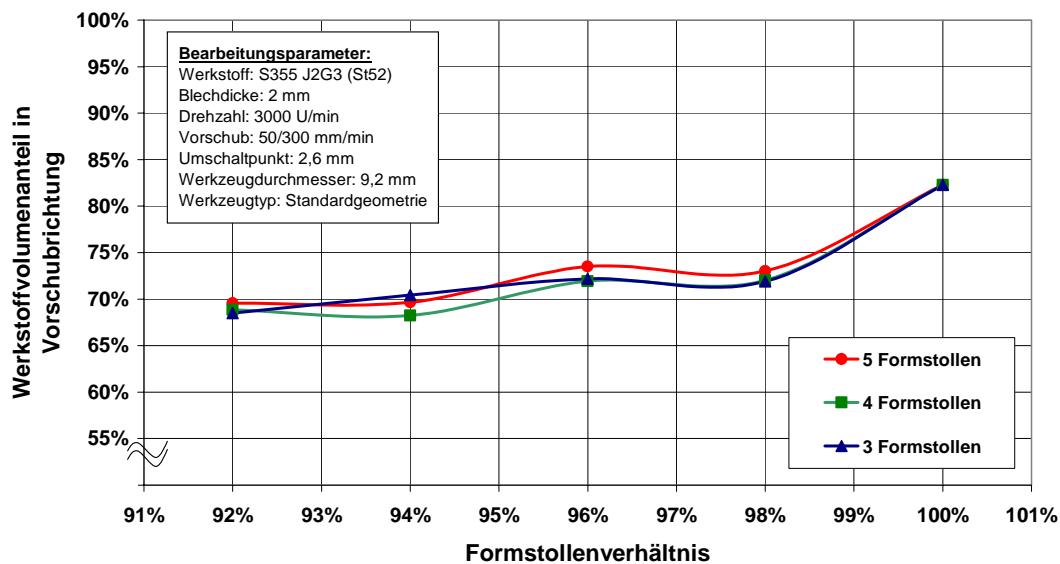


Diagramm 7-22: Einfluss des Formstollenverhältnisses auf das Werkstoffvolumen

7.5.3 Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Werkstoffvolumenanteil in Vorschubrichtung mit dem Axialkraftmaximum korreliert. Mit steigender Axialkraft nimmt auch der Anteil des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumens zu. Diese Korrelation zeigte sich bereits bei der statistischen Versuchsauswertung, wurde nochmals im Rahmen der Schlussfolgerungen des Kapitels 7.1.3 angesprochen und wird hiermit bestätigt. Für die Praxis bedeutet dies, dass der tendenzielle Einfluss von Faktorvariationen auf die Werkstoffvolumenverdrängung in erster Näherung durch die Betrachtung der Axialkraft erfolgen kann.

Die Zunahme des in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumenanteils mit steigendem Formstollenverhältnis ist direkt auf den steigenden Anteil der Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug zurückzuführen. Geht man in erster Näherung von einem

konstanten zu verdrängenden Werkstoffvolumenanteil pro Umdrehung aus, so zeigt sich, dass mit steigendem Formstollenverhältnis der Werkstoffkontaktanteil zunimmt. Wie in Abbildung 7-3 ersichtlich, verringert sich dabei zunehmend der Freiraum zwischen Formstollen und Werkstoff. Ist der Freiraum zu klein, kann dieser nicht mehr für den Werkstofffluss entgegen der Vorschubrichtung genutzt werden. Während des Bearbeitungsprozesses fließt weniger Material nach oben.

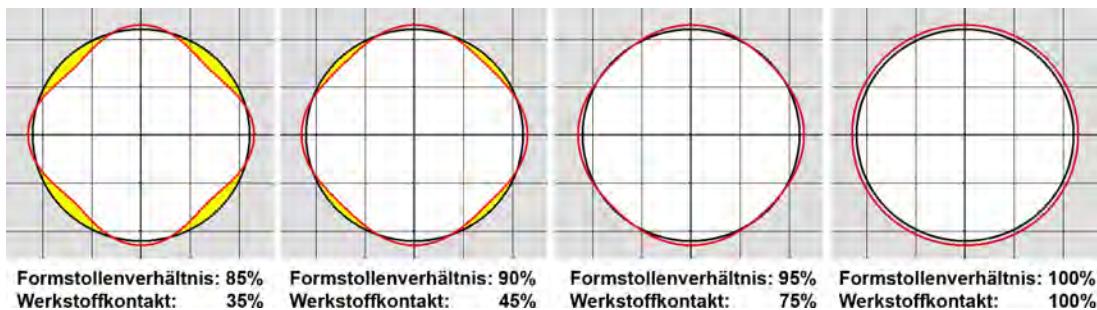


Abbildung 7-3: Abhängigkeit der Kontaktfläche vom Formstollenverhältnis

Insgesamt zeigen die Versuchsergebnisse, dass die Buchsenqualität sich aus dem Zusammenwirken mehrerer Einzelfaktoren aus den Bereichen Formstollengeometrie und Fließlochformerkontur zusammensetzt. Dies ist ein Beleg dafür, wie wichtig der Einbezug von Wechselwirkungseffekten bei der Versuchsergebnisinterpretation im Rahmen der statistischen Versuchsplanung und Versuchsauswertung ist. Darüber hinaus zeigt sich, dass das in Kapitel 6.2 aufgestellte lineare Berechnungsmodell die Effekte der einzelnen Faktoren auf die Zielgrößen innerhalb des untersuchten Versuchsraums hervorragend wiedergibt. Die maximal erfasste Abweichung des Interaktionsmodells von der Realität beträgt nur ca. 8 %. Wählt man jedoch Faktorstufen außerhalb des untersuchten Hyperwürfels, so liefert das Berechnungsprogramm zwar tendenziell richtige Werte, aber diese liegen in ihrer Größenordnung unter den Realwerten. Die Versuchsergebnisse dieser Detailuntersuchung bestätigen somit die Versuchsergebnisse aus Kapitel 6 und zeigen Grenzen des multiplen Regressionsmodells bezogen auf die Extrapolation der Versuchswerte auf.

In Bezug auf die Werkzeuggeometriegestaltung ist auf Grundlage der Auswertung dieser Detailuntersuchungen ein Formstollenverhältnis von zwischen 94 % und 95 % zu empfehlen. Werkzeuge in diesem Bereich stellen einen guten Kompromiss zwischen erzielter Buchsenlänge, Einrisslänge und in Vorschubrichtung verdrängten Werkstoffvolumenanteil dar.

7.6 Oberflächenqualität

Beim Fließlochformen von S355 J2G3 (St52) kommt es trotz des Einsatzes eines Schmiermittels immer zu unerwünschten Materialaufschweißungen auf der Fließlochformeroberfläche. Diese Aufschweißungen bestimmen maßgeblich den Verschleiß der Werkzeuge. In der Praxis werden diese Materialreste in regelmäßigen Abständen von der Werkzeugoberfläche schleiftechnisch entfernt. Dies führt in vielen Fällen zu einer zusätzlichen Schädigung der Werkzeugoberfläche sowie zu einer Änderung der Fließlochformerkontur und der Formstollengeometrie.

Im Rahmen der Oberflächenqualitätsuntersuchung ist zu prüfen, ob die Stärke der Aufschweißungen durch unterschiedliche Oberflächenqualitäten beeinflussbar ist. Die Oberflächenqualität der Fließlochformer wird bei der Fertigung durch das Point-Grinding Verfahren, ähnlich wie bei der Fräsbearbeitung, durch die Zustellung der Schleifscheibe beeinflusst (vgl. Abbildung 7-4). Sie hat darüber hinaus einen entscheidenden Einfluss auf die Herstellungszeit des Fließlochformers. Je kleiner die Zustellung, desto länger die Fertigungszeit. Daher soll im Rahmen der Detailuntersuchung zusätzlich untersucht werden, welchen Einfluss die Oberflächenrauhigkeit auf den Fließlochformprozess besitzt.

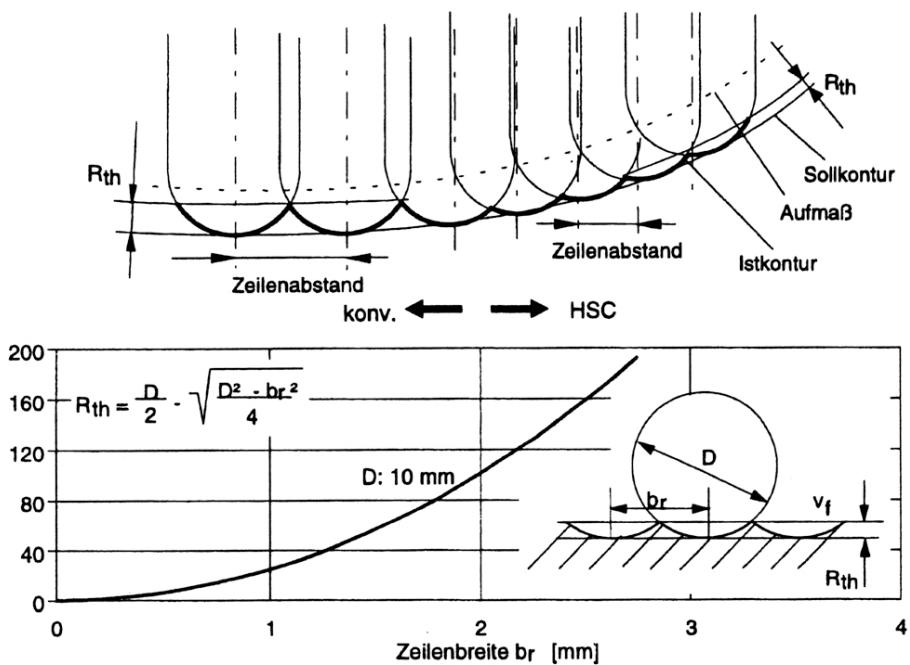


Abbildung 7-4: Einfluss des Zeilenabstands auf die Oberflächenqualität /109/

7.6.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Um den Einfluss der Schleifteilung auf die Oberflächenqualität und somit auf den Fließlochformprozess zu testen, wurden vier Fließlochformer der Standardgeometrie und vier der Sondergeometrie mit unterschiedlichen Zeilenabständen gefertigt. Die Werkzeugabmaße sind der Tabelle 10-5 zu entnehmen. Die verwendeten Zustellungen betragen jeweils 10 µm, 20 µm, 30 µm und 50 µm. Im Anschluss wurde die Oberflächenrauhigkeit durch das optische 3D-Messsystem MicroProf® der Firma FRT erfasst und mit der Software FRT Mark III ausgewertet. Zur Steigerung der Oberflächenqualität wurden die beiden Werkzeuge mit dem Zeilenabstand von 10 µm zusätzlich mit Diamantschleifpasten der Körnung 6 µm, 3 µm und 1 µm poliert. Bearbeitet wird S355 J2G3 (St52) mit einer Blechdicke von 2 mm (vgl. Kapitel 4.3.3). Die Bearbeitung erfolgt mit einem einfach gestuften Vorschub, dessen Umschaltpunkt bei 2,6 mm liegt, die Drehzahl beträgt 3000 U/min und die Vorschubgeschwindigkeiten 50 mm/min und 300 mm/min. Die Versuchsbedingungen entsprechen den in Kapitel 4.5 dargelegten.

7.6.2 Versuchsergebnisse

7.6.2.1 Oberflächenqualität

Die Bestimmung der Oberflächenrauhigkeit zeigt, dass der Einfluss der Schleifscheibenanzahl innerhalb des untersuchten Bereichs als sehr gering einzustufen ist. Tabelle 7-1 gibt einen Überblick über die durchschnittlich erzielten Rauheitsdaten.

| Messgröße (Lc = 0,080) | Schleifteilung | | | | |
|---------------------------|----------------|---------|-------|-------|-------|
| | 10 µm | poliert | 20 µm | 30 µm | 50 µm |
| R _a / µm | 0,82 | 0,14 | 1,04 | 1,07 | 1,13 |
| R _z (DIN) / µm | 3,96 | 0,86 | 4,21 | 5,13 | 5,88 |
| R _z (ISO) / µm | 3,84 | 0,82 | 4,12 | 4,85 | 5,37 |

Tabelle 7-1: Statistik der Rauheitsdaten (Lc = 0,080)

7.6.2.2 Prozessgrößen und Buchsenqualität

Ein eindeutiger Einfluss der Oberflächenqualität auf die Prozessgrößen Axialkraft, Drehmoment, Energieeintrag und Temperatur ist innerhalb des untersuchten Versuchsräums nicht nachweisbar. In Bezug auf die Buchsenqualität konnte ebenfalls kein direkter Einfluss der Oberflächenqualität auf die Zielgrößen nachgewiesen werden.

7.6.2.3 Aufschweißungen

Aufschweißungen auf der Fließlochformeroberfläche sind bereits nach der Fertigung der ersten Buchse deutlich erkennbar. Mit zunehmender Buchsenzahl steigt die Intensität der Aufschweißung im Folgenden kontinuierlich weiter an. Betrachtet man die Aufschweißungen nach der Fertigung von 17 Buchsen, so ist kein Unterschied zwischen den Fließlochformern der unterschiedlichen Oberflächenqualitäten erkennbar (vgl. Abbildung 7-5). Darüber hinaus ist eine vergleichbare Aufschweißintensität bei der Standard- und Sondergeometrie feststellbar.

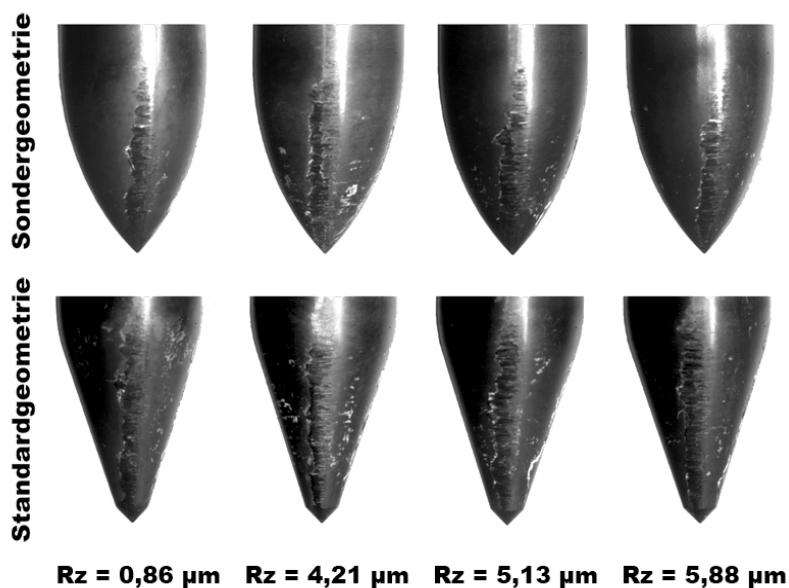


Abbildung 7-5: Vergleich der Aufschweißungen nach 17 Buchsen

7.6.3 Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass ein eindeutiger Einfluss der Oberflächenqualität innerhalb des untersuchten Versuchsraums auf die Prozessgrößen und auf die Buchsenqualität nicht nachweisbar ist. Die Oberflächenqualität spielt somit hier bezüglich der Aufschweißungsintensität von S355 J2G3 (St52) auf der Werkzeugoberfläche eine untergeordnete Rolle. Ursache könnte das beim Fließlochformen verwendete Trennmittel sein, welches durch seine Feststoffanteile die Effekte der Oberflächenqualität überlagert. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Aufschweißungen maßgeblich auf die Adhäsion zwischen dem verwendeten Fließlochformerwerkstoff GS2 (vgl. Kapitel 4.3.2) und den verwendeten Baustahl S355 J2G3 (St52) zurückzuführen sind. Zur Verringerung der Aufschweißungen sind somit alternative Fließlochformerwerkstoffe mit geringer Adhäsionsneigung zu Stahl zu entwickeln. Auch die Verwendung von hochtemperaturbeständigen und verschleißfesten Werkzeugbeschichtungen ist denkbar.

Betrachtet man die Versuchsergebnisse aus Sicht der Werkzeughersteller, so hat der fehlende Einfluss der axialen Schrittweite auf die Zielgrößen auch eine positive Seite. Für die Bearbeitung von S355 J2G3 (St52) ist sowohl eine aufwendige Politur der Werkzeuge mit Diamantpaste als auch die Fertigung mit einem geringen Zeilenabstand nicht nötig. Dies spart Fertigungszeit bei gleichzeitiger Reduzierung der Fertigungskosten der Werkzeuge.

7.7 Alternative Fließlochformerwerkstoffe

Die Verwendung eines Schmiermittels ist bis heute fester Bestandteil des Fließlochformens. Das Schmiermittel dient als Trennmittel und soll das Aufschweißen des zu bearbeitenden Werkstoffs auf der Fließlochformeroberfläche unterbinden. Dies gelingt jedoch nicht vollständig, da die Adhäsionsneigung zwischen dem Werkstückwerkstoff und dem Fließlochformerwerkstoff zu groß ist. Dieser Zusammenhang und die Tatsche, dass die Aufschweißungen maßgeblich die Standzeit der Werkzeuge beeinflussen, wurde bereits in Kapitel 7.6 eingehend diskutiert. Da die Ursache der Aufschweißungen auf die Adhäsionsneigung des Fließlochformerwerkstoffs gegenüber S355 J2G3 (St52) zurückzuführen ist, sind alternative Fließlochformerwerkstoffe zu untersuchen.

Im Rahmen der Detailuntersuchungen zum Thema alternative Fließlochformerwerkstoffe wird aufgrund der enormen Entwicklung auf dem Gebiet der Schneidstoffe Keramik als alternativer Werkstoff mit unterschiedlichen Werkzeuggeometrien getestet. Ziel des Keramikeinsatzes ist zum einen die Reduzierung der Aufschweißungen und zum anderen die Trockenbearbeitung. Dies würde zu erheblichen Vorteilen im Rahmen der Folgebearbeitungsverfahren, bei denen teilweise eine aufwendige Entfernung der Trennmittellückstände durchzuführen ist, beitragen. Darüber hinaus entfallen bei der Fertigung der Buchsen alle mit der Schmierung verbundenen Zusatzkosten, dies würde zu einer erheblichen Senkung der Fertigungskosten pro Buchse führen.

7.7.1 Versuchsplan und Versuchsdurchführung

Als Versuchswerkstoffe werden neben der Hartmetallsorte GS2 die Siliziumnitridkeramiksorten SL500 der Firma Ceram Tec und GSPN der Firma BeaTec eingesetzt. Aus allen drei Werkstoffen werden Standard- und Sondergeometrien mit identischen Geometrieparametern gefertigt (vgl. Tabelle 10-5). Die Bearbeitung des 2 mm dicken S355 J2G3 (St52) Werkstoffs erfolgt ohne Schmierung mit einer Drehzahl von 3000 U/min und einem gestuften Vorschub (Umschaltpunkt 2,6 mm, $v_1=50$ mm/min, $v_2= 300$ mm/min). Die Versuchsbedingungen sind dem Kapitel 4.5 zu entnehmen.

7.7.2 Versuchsergebnisse

Der Vergleich der drei Fließlochformerwerkstoffe in Bezug auf die Intensität der Aufschweißungen auf der Fließlochformeroberfläche zeigt, dass auf der Oberfläche der Keramikfließlochformer die Intensität der Aufschweißungen etwas geringer als bei der verwendeten Hartmetallsorte ist. Demgegenüber steht jedoch der starke Werkzeugverschleiß des Siliziumnitrids, der dazu führt, dass bereits nach der Fertigung von nur 35 Buchsen das Werkzeug an der Spitze bricht. Abbildung 7-6 zeigt den Werkzeugverschleiß der Sondergeometrie nach der Fertigung von 35 Buchsen bei Verwendung von GSPN und SL500.

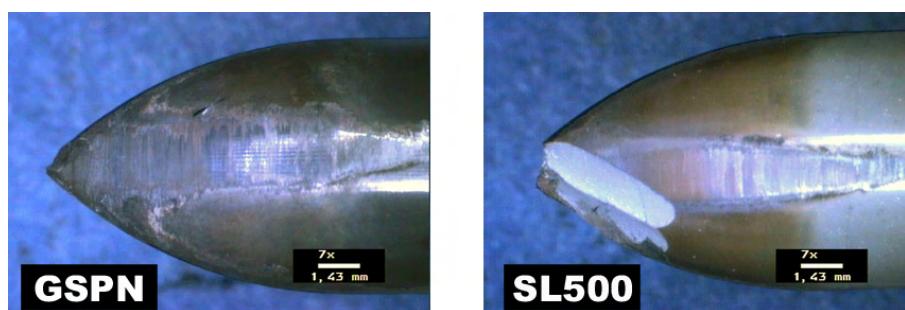


Abbildung 7-6: Vergleich von GSPN und SL500 nach 35 gefertigten Buchsen

Aufgrund des frühzeitigen Versagens beider Keramiksorten wird auf eine ausführliche Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse bezüglich der erfassten Prozessgrößen Axialkraft, Drehmoment, Energieeintrag und Temperatur sowie der buchsenqualitätsbestimmenden Größen Risslänge, Buchsenlänge und in Vorschubrichtung verdrängtes Werkstoffvolumen verzichtet.

7.7.3 Schlussfolgerungen

Die Versuchsergebnisse zeigen aufgrund der geringeren Adhäsionsneigung der Siliziumnitridkeramik zu S355 J2G3 (St52), dass Keramik grundsätzlich das nötige Potential besitzt, Hartmetall als Fließlochformerwerkstoff abzulösen. Solange der Werkzeugbruch jedoch so früh eintritt, ist Keramik als Fließlochformerwerkstoff nicht wirtschaftlich einsetzbar. Aufgrund der im Vergleich zu Hartmetall höheren Fertigungskosten sowie den sechs- bis achtfach höheren Werkstoffkosten, ist der Einsatz von Keramik nur durch das Erreichen höherer Standzeiten im Vergleich zu Hartmetall oder bei der Möglichkeit des Verzichts auf das Trennmittel ökonomisch sinnvoll. Für die erfolgreiche Substitution von Hartmetall durch Keramik sind somit die zukünftigen Entwicklungen auf dem Werkstoffsektor abzuwarten.

8 Zusammenfassung

Diese Arbeit bildet die Grundlage für eine anwendungsfallspezifische Werkzeuggeometrieeentwicklung und Bearbeitungsparameteranpassung beim Fließlochformen. Durch die konsequente Anwendung statistischer Methoden- und Versuchsplanung konnten die wichtigsten Einflussgrößen und deren Wirkung identifiziert und quantitativ beschrieben werden.

Ausgangspunkt der Prozesseinflussgrößenevaluation bildete eine umfassende Systemanalyse des Fließlochformprozesses. In diesem Rahmen wurden Schwachstellen der derzeit auf dem Markt befindlichen Fließlochformergeometrien lokalisiert und durch Werkzeug-Neuentwicklungen kompensiert. Es wurde eine Sondergeometrie, welche sich durch einen kontinuierlichen Übergang von der Werkzeugspitze bis zum zylindrischen Werkzeugbereich auszeichnet, entwickelt. Als weitere wichtige Geometrievolution ist die Integration von wendelförmig umlaufenden Formstollen im Arbeitsbereich des Werkzeugs, welche ausgehend von einem definierten Drallwinkel nach dem Prinzip der archimedischen Schraube eine Steuerung des Werkstoffflusses in und entgegen der Vorschubrichtung ermöglichen, zu nennen. Darüber hinaus wurden Fließlochformer mit asymmetrischer Formstollengeometrie, mit asymmetrischer Ungleicheilung der Formstollen und mit auslaufendem Formstollenverhältnis entwickelt.

Die im Rahmen der Systemanalyse durchgeführte, vollständige mathematische Beschreibung der Fließlochformergeometrie war Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Schleiftechnologie und eines parametergesteuerten Programms zur Erzeugung des Schleifcodes, welcher die Fertigung von Formen auf einer CNC-Schleifmaschine mit dem Point-Grinding Verfahren ermöglicht. Beides, Systemanalyse und Schleiftechnologie, bildeten die Basis für die Durchführung der Parameterversuche.

Die Parameteridentifikation der Prozesseinflussgrößen wurde mittels eines fraktionellen faktoriellen Screening Versuchsplans vom Typ 2^{11-4} durchgeführt. Dieser Plan berücksichtigte die Einflussgrößen Konturvariante, Spitzwinkel, Konuswinkel, Drallwinkel, Werkzeugdurchmesser, Formstollenzahl, Formstollenverhältnis, Vorschubgeschwindigkeit, Umfangsgeschwindigkeit, Blechdicke und Werkstoff Charge. Als Zielgrößen wurden die Prozessgrößen Axialkraft, Drehmoment, Temperatur und Energieeintrag, sowie die buchsenqualitätsbestimmenden Größen Buchsenlänge, Risslänge und der in Vorschubrichtung verdrängte Werkstoffvolumenanteil ausgewertet.

Vernachlässigt man bei der Einflussgrößenauswertung die konstruktiven Vorgaben von Werkzeugdurchmesser und Blechdicke, so konnte gezeigt werden, dass die Axialkraft von der die Fließlochformerkonturvariante und der Umfangsgeschwindigkeit abhängig ist. Je höher die Umfangsgeschwindigkeit, desto kleiner die maximale Axialkraft und somit die Druckbelastung von Werkstück und Werkzeug. Das Drehmoment wird maßgeblich durch die Bearbeitungsparameter beeinflusst. Durch Erhöhung der Drehzahl und Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit lässt sich das maximale Drehmoment am wirksamsten verringern. Die maximale Prozesstemperatur hängt von der Umfangsgeschwindigkeit und der Formstollenzahl ab. Eine Erhöhung dieser beiden Faktoren führt zu einem Temperaturanstieg. In Bezug auf den Energieeintrag in das Werkstück spielen wiederum die Bearbeitungsparameter die wichtigen Rollen. Sowohl höhere Umfangsgeschwindigkeiten als auch geringere Vorschubgeschwindigkeiten tragen zu einer Energieeintragsteigerung bei. Die Prozessgrößen hängen somit maßgeblich von den Bearbeitungsparametern ab.

Die buchsenqualitätsbestimmenden Größen werden vornehmlich durch die Gestaltung der Fließlochformergeometrie beeinflusst. Die Einrisse am Buchsenende sind bei Verwendung der Sondergeometrie mit kleinem Spitzenwinkel am geringsten. Durch die Variation der Formstollenzahl und die Verwendung von wendelförmig umlaufenden Formstollen ist eine Buchsenlängenbeeinflussung möglich. Durch die Integration eines Drallwinkel lässt sich darüber hinaus der Werkstofffluss in einem bisher noch nicht vorstellbaren Bereich steuern. Die durchgeföhrten Detailuntersuchungen belegen, dass positive Drallwinkel den Werkstofffluss in Vorschubrichtung und negative Drallwinkel den Werkstofffluss entgegen der Vorschubrichtung begünstigen.

Durch die statistische Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung wurden neben den Haupteffekten der einzelnen Faktoren zahlreiche signifikante Zweifach-Wechselwirkungseffekte identifiziert. Die Möglichkeit der Haupt- und Interaktionseffekterfassung ist ein wesentlicher Vorteil der DoE gegenüber der herkömmlichen One-faktor-at-a-time Versuchsmethode.

Um alle Effekte bei der Prozessparameterauswahl und der Fließlochformergeometriegestaltung berücksichtigen zu können, wurde ein multiples Regressionsmodell aufgestellt. Ausgehend von dieser Realitätsmodellierung wurde eine Applikation entwickelt, welche die Berechnung aller Zielgrößen innerhalb des untersuchten 2^{11-4} Hyperraums erlaubt. Eine Anpassung der Fließlochformergeometrie und der Bearbeitungsparameter entsprechend der individuellen Zielsetzung bei Berücksichtigung aller Haupt- und Interaktionseffekte ist somit möglich.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden weiterführende Versuchsreihen zur detaillierten Untersuchung der wichtigsten Einflussgrößen und zur Erweiterung des bisher betrachteten Versuchsraums durchgeführt. Diese Versuche bestätigten die Versuchsergebnisse der statistischen Versuchsplanung. Sie belegen, dass innerhalb des untersuchten Versuchsraums das aufgestellte Interaktionsmodell die Zusammenhänge zwischen den Einfluss- und Antwortgrößen sehr präzise wiedergibt. Die Abweichung zwischen den berechneten Werten des Regressionsmodells und der real gemessenen Werte lag bei maximal 8%.

Im Rahmen der Detailuntersuchungen wurde darüber hinaus der Einfluss der Oberflächenqualität der Fließlochformer auf das Aufschweißverhalten von S355 J2G3 (St52) untersucht und die Möglichkeit Hartmetall durch Keramik zu substituieren. Ein signifikanter Einfluss der Oberflächenrauhigkeit auf das Aufschweißverhalten von S355 J2G3 (St52) innerhalb des betrachteten Oberflächenqualitätsbereichs war nicht nachweisbar. Die Untersuchungen von Keramiken als Alternative zu Hartmetall zeigten, dass diese durch ihre geringere Adhäsionsneigung gegenüber S355 J2G3 (St52) grundsätzlich das nötige Potential besitzen um Hartmetall als Fließlochformerwerkstoff abzulösen. Fließlochformer aus Keramik sind jedoch aufgrund ihrer äußerst geringen Standzeit und ihrem hohen Preis für den industriellen Einsatz derzeit noch nicht geeignet.

Bei allen durchgeführten Versuchsreihen wurde ausschließlich S355 J2G3 (St52) als Versuchswerkstoff verwendet. Dass die gewonnenen Versuchsergebnisse grundsätzlich auch auf andere Werkstoffe übertragbar sind, zeigt das DFG Projekt „Thermofließlochformen in Aluminiumblech und Aluminiumschaum-Sandwichs“, welches parallel zu dieser Arbeit durchgeführt wurde. In jenem Projekt wurden die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die Fließlochformergeometrievariationen und die Bearbeitungsparameteranpassung erfolgreich auf die Bearbeitung von Aluminiumblechen und Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen übertragen /111/, /112/.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass sich das Design of Experiments erfolgreich für die Werkzeug-Neuentwicklung und -Optimierung einsetzen lässt. Statistische Methoden- und Versuchsplanung ermöglicht die Aufstellung eines individuell auf die Problemstellung und Zielsetzung angepassten Versuchsplans, welcher sich im Vergleich zu herkömmlichen Versuchsmethoden durch ein Minimum an Zeit und Kosten bei maximalem Informationsgehalt auszeichnet. Die Möglichkeit auf Grundlage der durchgeführten Versuche ein Regressionsmodell aufzustellen, welches die Berechnung beliebiger Einstellparameter innerhalb des untersuchten Versuchsraums ermöglicht, ist ein weiterer nicht zu vernachlässigender Vorteil der statistischen Versuchsplanung und Versuchsauswertung.

9 Schrifttum

- /1/ Alauddin, M.; El Baradie, M.-A.; "Tool life model for end milling steel (190 BHN)"; in: *Journal of Materials Processing Technology* 68 (1997), 50-59
- /2/ Ament, Ch.; „Eine Einführung in die statistische Versuchsplanung“; Universität Bremen, Fachgebiet Mess-, Steuerung. Und Regelungstechnik
- /3/ Anonym; „Fliessformer - für Durchzüge in dünnwandigen metallischen Werkstoffen“; in: *Maschinen, Anlagen, Verfahren* (1981) Heft 11; 32
- /4/ Anonym; „Grenzen beim Thermo-Fließbohren gesprengt“, in: *Maschinen, Anlagen, Verfahren* Heft 9 (1994); 39
- /5/ Anonym; „Zehn Millimeter draufgesetzt. Fließlochformen mit erweitertem Durchmesserbereich“ in: *Produktion, Landsberg* Band 35 (1996) Heft 25; 14
- /6/ Anonym; „*Fließformtechnik und Gewindeformen*“; Firmenschrift Drabus, 2004
- /7/ Anonym; „*Praxishandbuch Fließlochformen mit centerdrill*“; Firmenschrift Zecha
- /8/ Anonym; „*Technisches Handbuch – Flowdrill*“; Firmenschrift Flowdrill, 2005
- /9/ Bartsch, C.; „Rationalisierung für die Montage. Fließbohren für Blechgewinde“; in: *Schweizer Maschinenmarkt* Band 90 (1990) Heft 35; 44-47
- /10/ Bauer, D; Kretschmer, G.; „Umformarbeit beim Fließlochformen“; in: *wt Zeitschrift für industrielle Fertigung* 72 (1982); 451-454
- /11/ Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.; Musiol, G.; Mühling, H.; „Taschenbuch der Mathematik“; 3. überarbeitete und erweiterte Auflage der Neubearbeitung (1997); Frankfurt am Main: Harry Deutsch Verlag
- /12/ Browne, M.T.; Hillery, M.T. "Optimising the variables when deep-drawing C.R.1 cups", in: *Journal of Materials Processing Technology* 136 (2003), 64-71
- /13/ Chao, P. Y. „An improved Taguchi's method in design of experiments for milling CFRP composite“, in: *International Journal of Production. Res.*, 1997 Vol. 35, NO. 1, 51-66
- /14/ Choudhury, S.K.; Bartarya G.; „Role of temperature and surface finish in predicting tool wear using neuronal network and design of experiments“; in: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43(2003), 747-753
- /15/ Colgan, M. „Deep drawing process: analysis and experiment“, in: *Jounal of Materials Processing Technology* 132 (2003), 35-41

- /16/ Davim, J.-P.; „Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the orthogonal arrays“; in: *Journal of Materials Processing Technology* 132 (2003), 340-344
- /17/ Duan, X.; Sheppard T.; „Influence of forming parameters on the final subgrain size during hot rolling of aluminium alloys“; in: *Journal of Materials Processing Technology* 130-131 (2002), 245-249
- /18/ Erdbrügge, M.; Kleiner, M.; Kunert, J.; „Optimales Drücken – Statistische Versuchsplanung bei qualitativen Zielgrößen“; in: *Qualität und Zuverlässigkeit* 46 (2001), 1180-1183
- /19/ Ghani, J.-A.; Choudhury, I.-A.; Hassan, H.-H.; „Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters“; in: *Journal of Materials Processing Technology* 145 (2004), 84-92
- /20/ Gundlach, C.; „Entwicklung eines ganzheitlichen Vorgehensmodells zur problemorientierten Anwendung der statistischen Versuchsplanung“; Dissertation Universität Kassel (2004)
- /21/ Heiler, R.; n „Fließlochformen und Gewindefurchen auf NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen“; Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik Band 526 (1999), Düsseldorf: VDI-Verlag; 1-200,
- /22/ Holst, G.; „Systematisierung der Planungsphase der statistischen Versuchsmethodik für die industrielle Anwendung“ Dissertation TU Hamburg-Harburg. Aachen: Shaker 1995.
- /23/ Hövelmann, F.; Otten, H.; Pohl, D. „Statistische Versuchsplanung einmal anders“, in: *Qualitätstechnik* 38 (1993), 285-289 Kleppmann, W. „Systematisch verbessern – Zielbewusstes Optimieren mit Versuchsplanung“, in: *QM-Methoden* Jahrg. 44 (1999), 1133-1136
- /24/ Kerkhofs, M. ; Van-Stappen, M.; D-Olieslaeger, M.; Quaeyhaegens, C. ; Stals, L.-M.; “The performance of (Ti,Al)N-coated flowdrills”; in: *Surface and Coatings Technology* Band 68/69 (1994); 741-746
- /25/ Klein, B.; „Versuchsplanung – DoE, Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik“; Oldenburg Wissenschaftsverlag GmbH (2004)
- /26/ Kleppmann Wilhelm, „Statistische Versuchsplanung-Klassisch, Taguchi oder Shainin?“, in: *Qualitätstechnik* 37, München: Carl Hanser, 1992; 89-92
- /27/ Kleppmann, W.; „Taschenbuch der Versuchsplanung - Produkte und Prozesse Optimieren“ 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag Wien, 2001
- /28/ Krajnik, P.; Kopac, J.; „Adequacy of matrix experiment in grinding“; in: *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004), 566-572

- /29/ Kretschmer, G.; „Ein Beitrag zum Fließlochformen von Blechdurchzügen“, *Dissertation - Fachbereich Maschinentechnik I Universität – Gesamthochschule - Siegen*, 1980
- /30/ Kretschmer, G.; „Fliesslochformen und Gewindefurchen von Blechen aus legierten Stählen“; in: *Werkstatttechnik*, wt - Zeitschrift für Industrielle Fertigung Band 77 (1987) Heft 7; 367-369
- /31/ Kretschmer, G.; „Fliesslochformen von Blechdurchzügen. Teil 1“; in: *Blech Rohre Profile Band 28* Heft 8 (1981), 331-333
- /32/ Kretschmer, G.; „Fliesslochformen von Blechdurchzügen“; in: *Werkstattblatt Neue Serie* Band D (1982) Heft 850
- /33/ Kretschmer, G.; „Furchen von Gewinde in fließlochgeformten Durchzügen bei dünnen Werkstücken“; in: *Der Maschinenmarkt* Band 89 (1983) Heft 98; 2329-2332
- /34/ Kretschmer, G.; „Gefurchte Gewinde in fließlochgeformten Durchzügen“; in: *Schweizer Maschinenmarkt* Band 85 (1985) Heft 48; 20-22
- /35/ Kretschmer, G.; „Genaue Temperaturbestimmung beim Fliesslochformen schont Werkzeug und Spindel Zeitschriftenaufsatz“; in: *Der Maschinenmarkt* Band 87 (1981) Heft 96; 2087-2090
- /36/ Kretschmer, G.; „Gewindefurchen in fließlochgeformte Durchzüge oder Werkstücke mit geringer Wanddicke“; in: *Werkstattblatt. Neue Serie* Band 114 (1985) Heft 942; 1-7
- /37/ Kretschmer, G.; „Fliesslochformen von Blechdurchzügen. Teil 2“; in: *Blech Rohre Profile Band 28* Heft 9 (1981); 414-416
- /38/ Kreutz, H.; „Löcher erzeugen mit Reibungswärme“; in: *Industrie Anzeiger* Band 103 (1981) Heft 73; 100-102
- /39/ Kreutz, H.; „Fliesslochformen von Durchzügen in Bleche und Rohre erfordert geeignete Maschinen“; in: *Der Maschinenmarkt* Band 89 (1983) Heft 3; 20-22
- /40/ Kuypers, F.; “Physik für Ingenieure – Bad 1: Mechanik und Thermodynamik”; VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996
- /41/ Lee, S.W.; “Study on forming parameters of the metal bellows”; in: *Journal of Materials Processing Technology* 130-131 (2002), 47-53
- /42/ Lin, T.-R.; “Experimental design and performance analysis of TiN-coated carbide tool in face milling stainless steel”; *Journal of Materials Processing Technology* 127 (2002), 1-7
- /43/ Lopes, J.-C.; „Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie des Fließlochformens“, *Deutsche Dissertation Universität Gesamthochschule Kassel* (1999), Selbstverlag

- /44/ Orth, A.; Wenzel, D.; „*Leitfaden Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung*“; Hessisches Zentrum für Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement, Fachhochschule Frankfurt am Main
- /45/ PAT-FR2378582 - Flowdrill - Fliesslochformen – 1978-01-27; „Procédé et dispositif de réalisation d'un trou entouré d'un collet dans une plaque métallique ou dans la paroi d'un tube métallique, en utilisant la chaleur de frottement de la pression“
- /46/ PAT-102004562.2 – Universität Kassel – Fließlochformwerkzeug – 2004.10.01; „Fließlochformwerkzeug - Ungleicheilung“
- /47/ PAT-CH593727 - Flowdrill - Fliesslochformen – 1977-12-15; „Schnell um seine Achse drehbarer Dorn zum Bilden eines durch einen Kragen umgebenen Loches in einer Metallwand“
- /48/ PAT-CH627099 - Drabus - 1981-12-31; „Um seine Längsachse drehbarer Dorn zum Bilden eines von einem Kragen umgebenen Loches in einer metallenen Platte oder in der Wand eines metallenen Rohres“
- /49/ PAT-DD298961A5 - Ejot - 1992-03-19; „Loch- und gewindeformende Schraube“
- /50/ PAT-DE19645576A1 - Küba - 1989-05-07; „Bohrer zur Herstellung von Rohrabschlußbuchsen in Kältemittel transportierenden Rohren“
- /51/ PAT-DE19653394A1 - F. Tikal - 1998-06-25; „Werkzeug zum spanlosen Erzeugen eines Durchzuges mit Innengewinde in einem Arbeitsgang“
- /52/ PAT-DE19911308 EMUGE - Kombi Werkzeug –2000-09-14; „Vorrichtung zum Fließlochfurchen und Gewindefurchen“
- /53/ PAT-DE2359794 - Flowdrill - Fliesslochformen – 1974-07-20; „Schnell um seine Achse drehender Dorn zum Bilden eines Loches in einer metallenen Platte oder der Wand eines metallenen Rohres“
- /54/ PAT-DE2552665 - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-08-12; „Schnell um seine Achse drehbarer Dorn zum Bilden eines durch einen Kragen umgebenen Loches in einer Metallwand“
- /55/ PAT-DE2802230 - Flowdrill - Fliesslochformen – 1978-08-03; „Verfahren und Vorrichtung zum Bilden eines durch einen Kragen umgebenen Loches in einer metallenen Platte oder in der Wand eines metallenen Rohres durch Reibungswärme und Druck“
- /56/ PAT-DE2848144C2 - Drabus - 983-08-25; „Drehbarer Dorn zum Bilden von Kragenlöchern“

- /57/ *PAT-DE3238978* - Drabus - Fliesslochformen – 1983-05-05; „Schnell um seine Achse drehbarer Dorn zum Bilden eines von einem Kragen umgebenen Loches in einer metallenen Platte oder in der Wand eines metallenen Rohres“
- /58/ *PAT-DE3843722A1* - R.Bosch - 1990-07-05; „Verfahren zum Herstellen von Gewinden in Blechdurchzügen“
- /59/ *PAT-DE3909725* - EJOT - Fliesslochformen – 1990-09-06; „Loch- und gewindeformende Schraube“
- /60/ *PAT-DE4224131A1* - Stabilus - 1994-01-27; „Verfahren zur Herstellung eines Anschlußstuzens“
- /61/ *PAT-DE4321316A1* - VAW Aluminium - 1995-01-05; „Sandwichplatte mit verstärkten Anschlußbohrungen und Verfahren zu ihrer Herstellung“
- /62/ *PAT-DE4440437C1* - Ejot - 1996-02-08; „Selbstbohrende und gewindeformende Schraube mit Fließformabschnitt“
- /63/ *PAT-DE7537312U* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-06-03; „Schnell um seine Achse drehbarer Dorn zum Bilden eines durch einen Kragen umgebenen Loches in einer Metallwand“
- /64/ *PAT-DE8424585* - F. Viegner - Fliesslochformen - 1984-12-20; „Fließloch-Formwerkzeug“
- /65/ *PAT-E33954B* - Flowdrill - 1986-10-10; „Fliessbohrwerkzeug, insbesondere zur Verwendung in einer Handbohrmaschine“
- /66/ *PAT-EP0057039* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1982-08-04; “Flow drill for the provision of holes in sheet material”
- /67/ *PAT-EP0150518* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1984-01-30; “Flowdrill, particularly adapted to be used in a hand drilling machine”
- /68/ *PAT-EP0464071B1* - Ejot – Fliesslochformen - 1993-06-09; „Loch- und gewindeformende Schraube“
- /69/ *PAT-EP085888* - John Deere - Fliesslochformen – 1982-02-08; „Verfahren zum Herstellen eines beidendig mit einer Randverstärkung versehenen Durchgangsloches in einem Metallwerkstück sowie Werkzeug und Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens“
- /70/ *PAT-ES421461* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1974-02-02; “un dispositivo de mandril de material duro, capaz de girar rápidamente en torno a su eje“

- /71/ *PAT-ES443066* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1975-12-15; „perfeccionamientos introducidos en un madril que puere girar rapidamente en torno s su eje para la formacion de un agujero“
- /72/ *PAT-ES522152* - John Deere - Fliesslochformen – 1983-05-06; “Herramienta y dispositivo para hacer un agujero de paso, provisto por ambos extremis de sendos refuerzos de los bordes, en una pieza de trabajo metalica“
- /73/ *PAT-FR2210458* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1974-07-12; „Mandrin à grande vitesse de rotation pour percer une plaque de métal ou la paroi d'un tuyau de métal“
- /74/ *PAT-FR2292532* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1975-11-27; „Outil de perçage destiné à etre entrainé en rotation à grande vitesse autour de son axe pour former un trou entouré d'un rebord dans une paroi métallique“
- /75/ *PAT-FR2514676* - Drabus - Fliesslochformen – 1982-10-21 ; „Outil de perçage par refoulement pour la formation de collerettes sur des plaques métalliques“
- /76/ *PAT-FR6709991* - Delabiet Larent - Fliesslochformen – 1929-12-11; „Perfectionnement apporté dans l'établissement des robinets“
- /77/ *PAT-GB1455276* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-11-10; „Improvements in and relating to piercing tools for forming holes in metal plates or the wall of metal tubes“
- /78/ *PAT-GB1493292* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1977-11-30; „Improvements in and relating to piercing tools“
- /79/ *PAT-GB1582718* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1978-01-27; „Improvements in and relating to methods and apparatuses for forming by frictional heat and pressure holes surrounded each by a boss in a metal plate or the wall of a metal tube“
- /80/ *PAT-GB2091610* - Friedrich K Hiby - Fliesslochformen – 1982-08-04; „Flow drilling tools“
- /81/ *PAT-GB2107626* - Drabus - Fliesslochformen – 1983-05-05; „Flow-drilling tool“
- /82/ *PAT-JP51083060* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-07-21
- /83/ *PAT-NL160499C* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1979-11-15; „Doorn voor het maken van een door een kraag omgeven gat in een metalen plaat“
- /84/ *PAT-NL7217160* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1974-06-18; „Werwijze en gereedschap voor het maken van een gat in een metalen plaat of de wand van een metalen buis“

- /85/ *PAT-NL7415558* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-01-24; „Werkwijze en stuk gereedschap voor het door wrijvingswarmte en druk maken van een door een kraag omgeven gat in een metalen plaat of de wand van een metalen buis“
- /86/ *PAT-NL8100304* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1982-08-04; “Vloeiboor voor het maken van gaten in plaatmateriaal”
- /87/ *PAT-NL8101502* Drabus - Fliesslochformen – 1982-10-18; „Werkwijze voor behulp van een vloeiboor aanbrengen van een kraag in een plaat“
- /88/ *PAT-SE419180* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-05-29; „Snabbroterande dorn för upptagande av ett av en krage omgivet häl I en metallvägg“
- /89/ *PAT-SE7316862.7* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1978-04-03; „Snabbt kring sin axel toterbar dorn av hard metal för upptagande av ett hal I en metallplatta eller I en vägg I err metallrör uteslutande genom friktionsvärme och tryck“
- /90/ *PAT-US1906953* - W L Enghauser - Fliesslochformen – 1933-05-02; “Method of forming manifolds”
- /91/ *PAT-US2260288* - L G Black - Fliesslochformen – 1941-10-28; „Drill for penetrating hard metals“
- /92/ *PAT-US2360733* - T. R. Smith - Fliesslochformen – 1944-10-17; „Faucet Construction“
- /93/ *PAT-US2566738* - L F Mitchell - Fliesslochformen – 1951-09-04; „punching apparatus“
- /94/ *PAT-US2736335* - C H Webber - Fliesslochformen – 1956-02-28; „Tapping and cutoff connection to plastic fluid pressure main“
- /95/ *PAT-US2950637* - D. B. Merrill - Fliesslochformen – 1960-08-30: „Fitting for tapping steel walled members“
- /96/ *PAT-US2991551* - H D Fogle - Fliesslochformen – 1961-07-11; “Method and apparatus for forming holes in pipes”
- /97/ *PAT-US3162211* - E J Barusch - Fliesslochformen – 1964-12-22; „Combination line penetrting valve device“
- /98/ *PAT-US3195156* - H. F. Phipard Jr - Fliesslochformen – 1920-07-20; „Method of producing thread swaging devices“
- /99/ *PAT-US3230813* - G A Norsted - Fliesslochformen – 1966-01-25; „Die an punch platen“

- /100/ *PAT-US3429171* - Joseph J Feher - Fliesslochformen – 1969-02-25; „Radius spin drill“
- /101/ *PAT-US3559445* - Hougen Everett - Fliesslochformen – 1971-02-02; „Piercing tool for sheet material“
- /102/ *PAT-US3939683* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1976-02-14; „Piercing tools“
- /103/ *PAT-US4132097* - Tridan tool - Fliesslochformen – 1977-11-03; „Method for forming collared holes“
- /104/ *PAT-US4177659* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1979-12-11; „Rotatable piercing tools for forming holes surrounded each by a boss in metal plates or the wall of metal tubes“
- /105/ *PAT-US4275413* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1978-01-24; „Methods and apparatuses for forming by frictional heat and pressure holes surrounded each by a boss in a metal plate or the wall of a metal tube“
- /106/ *PAT-US4428214* - John Deere - Fliesslochformen – 1984-01-31; „Flow drilling process and tool therefore“
- /107/ *PAT-US4454741* - Flowdrill - Fliesslochformen – 1982-02-19; „Flow drill for the provision of holes in sheet material“
- /108/ Scheffler, E.; „*Statistische Versuchsplanung und -Auswertung*“ 3. Auflage Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1997
- /109/ Schulz, H.; „*Hochgeschwindigkeitsbearbeitung – High Speed Machining*“ München: Carl Hanser Verlag Wien, 1996
- /110/ Stahlinstitut VDEh, Hg. *Taschenbuch der Stahl-Eisen-Prüfblätter*; Ausgabe: 2., neubearb. Aufl., Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 2003
- /111/ Tikal, F.; Gies, C.; „Thermofließlochformen in Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen. Thermoflow hole forming in aluminium foam sandwich structures“; in: *Aluminium* Band 81 (2005) Heft 4; 301-307
- /112/ Tikal, F.; Gies, C.; Holsten, S.; „Thermofließlochformen in Aluminiumschaum-Sandwichstrukturen. Neue Anforderungen - neue Werkzeuge“; in: *VDI-Z Integrierte Produktion* Band 146 (2004) Heft 7/8; 40-42
- /113/ Tikal, F.; Gutheil, P.; Scherm, W.; „Buchsen im Blech. Fließlochbohren auf NC-Maschinen“; in: *Fertigung, Landsberg* Band 21 (1993) Heft 6; 48-50
- /114/ Tikal, F.; Heiler, R.; „Fließbohren in Stahl-Hohlprofilen bis 12,5 mm Wanddicke. Neue Dimensionen“ in: *Bänder Bleche Rohre* Band 35 (1994) Heft 6; 32-33,36-38

- /115/ Tikal, F.; Heiler, R.; „Gewinde in Aluminiumlegierungen. Höchste Produktqualität beim Fließlochformen und Gewindefurchen“; in: *Produktion und Management - wt* Band 86 (1996) Heft 10; 511-515
- /116/ Tikal, F.; Heiler, R.; Müller, K.; „Fließlochformen und Gewindefurchen in austenitischen Edelstählen“ in: *Maschinenmarkt* Band 102 (1996) Heft 47; 28-33
- /117/ Tikal, F.; Lopes, J.-C.; Damm, S.; Zanin, G.-M.; Weingärtner, W.-L.; “Thermodrilling: Fundamentals of a new production technology.“ Konferenz-Einzelbericht: *SheMet, Internat. Conf. on Sheet Metal*, 7 * (1999); 581-588
- /118/ Tikal, F.; Weingärtner, W.-L.; Heiler, R.; Lopes, J.-C.; „Fließlochformen und Gewindefurchen in Baustahl St37“ in: *Bänder Bleche Rohre* Band 38 (1997) Heft 7/8; 50,52,54-57

10 Anhang

10.1 Studentsche t-Verteilung

STUDENTSche t -Verteilung: Quantile $t_{\alpha,m}$ bzw. $t_{\alpha/2,m}$

| Anzahl der Frei- heits- grade m | Wahrscheinlichkeit α für zweiseitige Fragestellung | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 0,10 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,002 | 0,001 |
| 1 | 6,31 | 12,7 | 31,82 | 63,7 | 318,3 | 637,0 |
| 2 | 2,92 | 4,30 | 6,97 | 9,92 | 22,33 | 31,6 |
| 3 | 2,35 | 3,18 | 4,54 | 5,84 | 10,22 | 12,9 |
| 4 | 2,13 | 2,78 | 3,75 | 4,60 | 7,17 | 8,61 |
| 5 | 2,01 | 2,57 | 3,37 | 4,03 | 5,89 | 6,86 |
| 6 | 1,94 | 2,45 | 3,14 | 3,71 | 5,21 | 5,96 |
| 7 | 1,89 | 2,36 | 3,00 | 3,50 | 4,79 | 5,40 |
| 8 | 1,86 | 2,31 | 2,90 | 3,36 | 4,50 | 5,04 |
| 9 | 1,83 | 2,26 | 2,82 | 3,25 | 4,30 | 4,78 |
| 10 | 1,81 | 2,23 | 2,76 | 3,17 | 4,14 | 4,59 |
| 11 | 1,80 | 2,20 | 2,72 | 3,11 | 4,03 | 4,44 |
| 12 | 1,78 | 2,18 | 2,68 | 3,05 | 3,93 | 4,32 |
| 13 | 1,77 | 2,16 | 2,65 | 3,01 | 3,85 | 4,22 |
| 14 | 1,76 | 2,14 | 2,62 | 2,98 | 3,79 | 4,14 |
| 15 | 1,75 | 2,13 | 2,60 | 2,95 | 3,73 | 4,07 |
| 16 | 1,75 | 2,12 | 2,58 | 2,92 | 3,69 | 4,01 |
| 17 | 1,74 | 2,11 | 2,57 | 2,90 | 3,65 | 3,96 |
| 18 | 1,73 | 2,10 | 2,55 | 2,88 | 3,61 | 3,92 |
| 19 | 1,73 | 2,09 | 2,54 | 2,86 | 3,58 | 3,88 |
| 20 | 1,73 | 2,09 | 2,53 | 2,85 | 3,55 | 3,85 |
| 21 | 1,72 | 2,08 | 2,52 | 2,83 | 3,53 | 3,82 |
| 22 | 1,72 | 2,07 | 2,51 | 2,82 | 3,51 | 3,79 |
| 23 | 1,71 | 2,07 | 2,50 | 2,81 | 3,49 | 3,77 |
| 24 | 1,71 | 2,06 | 2,49 | 2,80 | 3,47 | 3,74 |
| 25 | 1,71 | 2,06 | 2,49 | 2,79 | 3,45 | 3,72 |
| 26 | 1,71 | 2,06 | 2,48 | 2,78 | 3,44 | 3,71 |
| 27 | 1,71 | 2,05 | 2,47 | 2,77 | 3,42 | 3,69 |
| 28 | 1,70 | 2,05 | 2,46 | 2,76 | 3,40 | 3,66 |
| 29 | 1,70 | 2,05 | 2,46 | 2,76 | 3,40 | 3,66 |
| 30 | 1,70 | 2,04 | 2,46 | 2,75 | 3,39 | 3,65 |
| 40 | 1,68 | 2,02 | 2,42 | 2,70 | 3,31 | 3,55 |
| 60 | 1,67 | 2,00 | 2,39 | 2,66 | 3,23 | 3,46 |
| 120 | 1,66 | 1,98 | 2,36 | 2,62 | 3,17 | 3,37 |
| ∞ | 1,64 | 1,96 | 2,33 | 2,58 | 3,09 | 3,29 |
| | 0,05 | 0,025 | 0,01 | 0,005 | 0,001 | 0,0005 |
| | Wahrscheinlichkeit α für einseitige Fragestellung | | | | | |

Tabelle 10-1: Studentsche t-Verteilung /11/

10.2 Versuchsplan

| Nr. | Vollfaktoren | | | | | | | | | | |
|-----|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
| 1 | - | - | - | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 2 | + | - | - | - | - | - | - | + | - | + | |
| 3 | - | + | - | - | - | - | - | - | + | + | |
| 4 | + | + | - | - | - | - | - | + | - | - | |
| 5 | - | - | + | - | - | - | - | - | - | + | |
| 6 | + | - | + | - | - | - | - | + | - | - | |
| 7 | - | + | + | - | - | - | - | + | + | - | |
| 8 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | |
| 9 | - | - | - | + | - | - | - | + | - | + | |
| 10 | + | - | - | + | - | - | - | - | + | - | |
| 11 | - | + | - | + | - | - | - | + | - | - | |
| 12 | + | + | - | + | - | - | - | + | + | + | |
| 13 | - | - | + | + | - | - | - | + | + | - | |
| 14 | + | - | + | + | - | - | - | + | + | - | |
| 15 | - | + | + | + | - | - | - | + | + | + | |
| 16 | + | + | + | + | - | - | - | - | - | - | |
| 17 | - | - | - | - | + | - | - | + | - | + | |
| 18 | + | - | - | - | + | - | - | - | - | - | |
| 19 | - | + | - | - | + | - | - | + | + | - | |
| 20 | + | + | - | - | + | - | - | + | + | - | |
| 21 | - | - | + | - | + | - | - | + | - | - | |
| 22 | + | - | + | - | + | - | - | + | + | + | |
| 23 | - | + | + | - | + | - | - | + | - | - | |
| 24 | + | + | + | - | + | - | - | - | + | - | |
| 25 | - | - | - | + | + | - | - | + | + | - | |
| 26 | + | - | - | + | + | - | - | - | + | + | |
| 27 | - | + | - | + | + | - | - | - | - | + | |
| 28 | + | + | - | + | + | - | - | + | - | + | |
| 29 | - | - | + | + | + | - | - | - | + | + | |
| 30 | + | - | - | + | + | - | - | + | - | - | |
| 31 | - | + | + | + | + | - | - | + | + | - | |
| 32 | + | + | + | + | + | - | - | + | - | + | |
| 33 | - | - | - | - | + | - | - | + | + | - | |
| 34 | + | - | - | - | + | - | - | + | + | - | |
| 35 | - | + | - | - | + | - | - | - | - | - | |
| 36 | + | + | - | - | + | - | - | + | + | - | |
| 37 | - | - | + | - | + | - | - | - | + | - | |
| 38 | + | - | + | - | + | - | - | + | - | - | |
| 39 | - | + | + | - | + | - | - | + | + | + | |
| 40 | + | + | + | - | + | - | - | + | - | - | |
| 41 | - | - | - | + | + | - | - | + | - | - | |
| 42 | + | - | - | + | + | - | - | - | + | - | |
| 43 | - | + | - | + | + | - | - | + | + | + | |
| 44 | + | + | - | + | + | - | - | + | + | - | |
| 45 | - | - | + | + | + | - | - | + | - | + | |
| 46 | + | - | + | + | + | - | - | + | + | - | |
| 47 | - | + | + | + | + | - | - | + | - | - | |
| 48 | + | + | + | + | + | - | - | - | + | + | |
| 49 | - | - | - | - | + | + | - | + | - | - | |
| 50 | + | - | - | - | + | + | - | - | + | + | |
| 51 | - | + | - | - | + | + | - | + | - | + | |
| 52 | + | + | - | - | + | + | - | + | + | - | |
| 53 | - | - | + | - | + | + | - | - | + | + | |
| 54 | + | - | + | - | + | + | - | + | + | - | |
| 55 | - | + | + | - | + | + | - | + | - | - | |
| 56 | + | + | + | - | + | + | - | - | - | + | |
| 57 | - | - | - | + | + | + | - | + | + | + | |
| 58 | + | - | - | + | + | + | - | - | + | - | |
| 59 | - | + | - | + | + | + | - | - | + | - | |
| 60 | + | + | - | + | + | + | - | + | - | + | |
| 61 | - | - | + | + | + | + | - | - | - | - | |
| 62 | + | - | + | + | + | + | - | - | + | + | |
| 63 | - | + | + | + | + | + | - | - | + | - | |
| 64 | + | + | + | + | + | + | - | - | + | + | |
| 65 | - | - | - | - | - | - | - | + | - | + | + |
| 66 | + | - | - | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 67 | - | + | - | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 68 | + | + | - | - | - | - | - | + | - | - | + |
| 69 | - | - | + | - | - | - | - | + | + | - | - |
| 70 | + | - | + | - | - | - | - | + | - | + | + |
| 71 | - | + | + | - | - | - | - | + | + | - | + |
| 72 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 73 | - | - | - | + | - | - | - | + | - | - | - |
| 74 | + | - | - | + | - | - | - | + | + | + | - |
| 75 | - | + | - | + | - | - | - | + | + | + | - |
| 76 | + | + | - | + | - | - | - | + | - | + | - |
| 77 | - | - | + | + | - | - | - | + | + | + | + |
| 78 | + | - | + | + | - | - | - | + | - | - | - |
| 79 | - | + | + | + | - | - | - | + | - | - | - |
| 80 | + | + | + | + | - | - | - | + | + | - | - |
| 81 | - | - | - | - | + | - | - | + | - | + | - |
| 82 | + | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 83 | - | + | - | - | + | - | - | + | + | + | - |
| 84 | + | + | - | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 85 | - | - | + | - | + | - | - | + | + | + | - |
| 86 | + | - | + | - | + | - | - | + | - | + | - |
| 87 | - | + | + | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 88 | + | + | + | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 89 | - | - | - | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 90 | + | - | - | - | + | - | - | + | + | + | - |
| 91 | - | + | - | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 92 | + | + | - | - | + | - | - | + | - | + | - |
| 93 | - | - | + | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 94 | + | - | - | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 95 | - | + | - | - | + | - | - | + | - | + | - |
| 96 | + | + | + | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 97 | - | - | - | - | - | - | - | + | + | - | - |
| 98 | + | - | - | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 99 | - | + | - | - | - | - | - | + | + | - | - |
| 100 | + | + | - | - | - | - | - | + | - | - | - |
| 101 | - | - | + | - | - | - | - | + | + | - | - |
| 102 | + | - | + | - | - | - | - | + | - | - | - |
| 103 | - | + | - | - | - | - | - | + | - | - | - |
| 104 | + | + | + | - | - | - | - | + | + | + | - |
| 105 | - | - | - | + | - | - | - | + | - | + | - |
| 106 | + | - | - | + | - | - | - | + | + | - | - |
| 107 | - | + | - | + | - | - | - | + | + | + | - |
| 108 | + | + | - | + | - | - | - | + | + | - | - |
| 109 | - | - | + | + | - | - | - | + | + | + | - |
| 110 | + | - | + | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 111 | - | + | + | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 112 | + | + | + | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 113 | - | - | - | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 114 | + | - | - | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 115 | - | + | - | - | + | - | - | + | + | - | - |
| 116 | + | + | - | - | + | - | - | + | - | + | - |
| 117 | - | - | + | - | + | - | - | + | + | + | - |
| 118 | + | - | + | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 119 | - | + | + | - | + | - | - | + | - | - | - |
| 120 | + | + | - | + | + | - | - | + | + | - | - |
| 121 | - | - | - | + | + | - | - | + | - | + | - |
| 122 | + | - | - | + | + | - | - | + | + | - | - |
| 123 | - | + | - | + | + | - | - | + | - | + | - |
| 124 | + | + | - | + | + | - | - | + | - | - | - |
| 125 | - | - | + | + | + | - | - | + | - | - | - |
| 126 | + | - | + | + | + | - | - | + | - | - | - |
| 127 | - | + | + | + | + | - | - | + | - | - | - |
| 128 | + | + | + | + | + | - | - | + | + | - | - |

Tabelle 10-2: Versuchsplan

10.3 Einzelergebnisse

| Versuchsnummer | Kraft [N] | Moment [Nm] | Energie [J] | Temperatur [°C] | Risslänge [mm] | Buchsenlänge [mm] | Volumen [mm³] | Versuchsnummer | Kraft [N] | Moment [Nm] | Energie [J] | Temperatur [°C] | Risslänge [mm] | Buchsenlänge [mm] | Volumen [mm³] |
|----------------|-----------|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------------|---------------|----------------|-----------|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------------|---------------|
| 1 | 3233 | 5,2 | 6219 | 693 | 1,11 | 6,8 | 158 | 65 | 2475 | 4,1 | 5715 | 732 | 0,96 | 5,6 | 135 |
| 2 | 2568 | 4,9 | 3161 | 691 | 0,97 | 4,9 | 96 | 66 | 1843 | 2,9 | 4528 | 779 | 0,99 | 6,2 | 103 |
| 3 | 5466 | 6,8 | 5277 | 725 | 0,41 | 5,0 | 137 | 67 | 3764 | 3,6 | 7273 | 783 | 0,57 | 6,5 | 152 |
| 4 | 3690 | 4,2 | 3783 | 699 | 0,66 | 5,8 | 111 | 68 | 2484 | 3,5 | 3797 | 743 | 0,42 | 4,9 | 93 |
| 5 | 1824 | 5,0 | 3618 | 728 | 0,53 | 5,2 | 87 | 69 | 1756 | 2,9 | 4812 | 783 | 0,88 | 7,0 | 110 |
| 6 | 3180 | 6,1 | 6640 | 747 | 0,80 | 8,0 | 167 | 70 | 2637 | 4,7 | 6114 | 780 | 0,66 | 6,0 | 125 |
| 7 | 3153 | 6,2 | 5262 | 738 | 0,73 | 7,3 | 119 | 71 | 2163 | 3,6 | 4837 | 784 | 0,77 | 5,9 | 93 |
| 8 | 4886 | 6,3 | 5955 | 763 | 0,75 | 6,2 | 122 | 72 | 4017 | 3,7 | 8072 | 813 | 0,66 | 8,1 | 163 |
| 9 | 2358 | 5,3 | 3625 | 708 | 0,94 | 5,4 | 108 | 73 | 1655 | 3,1 | 5029 | 791 | 0,82 | 4,9 | 91 |
| 10 | 3080 | 5,9 | 6508 | 760 | 0,66 | 5,3 | 132 | 74 | 2751 | 5,1 | 5959 | 796 | 0,88 | 6,4 | 150 |
| 11 | 3496 | 4,3 | 4370 | 748 | 0,61 | 5,2 | 101 | 75 | 2669 | 3,7 | 4742 | 771 | 0,89 | 6,0 | 106 |
| 12 | 5307 | 6,8 | 5758 | 672 | 0,83 | 6,4 | 160 | 76 | 4260 | 3,6 | 7523 | 724 | 0,87 | 6,2 | 139 |
| 13 | 3231 | 5,7 | 7132 | 743 | 0,99 | 6,2 | 127 | 77 | 3175 | 5,3 | 6633 | 811 | 0,98 | 7,9 | 154 |
| 14 | 2802 | 5,6 | 3759 | 752 | 0,93 | 6,6 | 115 | 78 | 2150 | 3,8 | 5223 | 870 | 1,31 | 6,1 | 98 |
| 15 | 5023 | 6,6 | 6261 | 719 | 0,54 | 6,9 | 159 | 79 | 3401 | 3,8 | 8114 | 766 | 0,63 | 6,0 | 132 |
| 16 | 3149 | 4,6 | 4481 | 762 | 0,62 | 5,5 | 95 | 80 | 2794 | 4,7 | 4723 | 845 | 0,70 | 6,7 | 114 |
| 17 | 4267 | 12,6 | 8433 | 715 | 1,17 | 8,4 | 309 | 81 | 3029 | 6,5 | 10976 | 762 | 0,87 | 7,1 | 257 |
| 18 | 2850 | 7,7 | 6838 | 712 | 1,29 | 6,3 | 202 | 82 | 2898 | 6,5 | 6228 | 778 | 1,26 | 8,3 | 219 |
| 19 | 7333 | 9,9 | 10810 | 748 | 0,80 | 7,1 | 283 | 83 | 5309 | 8,9 | 10785 | 732 | 1,26 | 9,2 | 337 |
| 20 | 5268 | 10,2 | 5976 | 675 | 1,43 | 8,1 | 240 | 84 | 3737 | 5,6 | 8162 | 759 | 0,82 | 6,9 | 213 |
| 21 | 2986 | 7,6 | 7785 | 758 | 1,43 | 7,4 | 182 | 85 | 2721 | 6,9 | 7494 | 797 | 1,99 | 10,8 | 232 |
| 22 | 4510 | 13,1 | 8973 | 756 | 1,43 | 11,2 | 330 | 86 | 3958 | 7,0 | 12365 | 806 | 1,42 | 8,8 | 272 |
| 23 | 4602 | 10,1 | 6636 | 702 | 0,99 | 9,1 | 240 | 87 | 2831 | 5,2 | 9142 | 773 | 1,11 | 8,0 | 186 |
| 24 | 5634 | 10,9 | 11258 | 760 | 0,88 | 8,2 | 259 | 88 | 5509 | 9,0 | 10675 | 800 | 1,10 | 12,2 | 350 |
| 25 | 3335 | 8,7 | 8113 | 732 | 1,96 | 8,3 | 220 | 89 | 2519 | 6,3 | 6807 | 770 | 1,58 | 6,5 | 181 |
| 26 | 4161 | 12,5 | 8856 | 740 | 1,45 | 7,0 | 275 | 90 | 4022 | 8,0 | 12735 | 832 | 1,67 | 9,6 | 317 |
| 27 | 4330 | 9,4 | 6363 | 684 | 0,94 | 6,3 | 205 | 91 | 2920 | 6,0 | 9614 | 766 | 1,10 | 8,1 | 227 |
| 28 | 6966 | 11,5 | 10931 | 746 | 1,00 | 8,7 | 330 | 92 | 5585 | 9,4 | 10364 | 810 | 0,78 | 7,1 | 289 |
| 29 | 3898 | 13,7 | 10058 | 760 | 0,82 | 7,5 | 257 | 93 | 3973 | 7,6 | 13274 | 831 | 1,24 | 10,4 | 327 |
| 30 | 3574 | 8,8 | 8036 | 768 | 1,23 | 8,9 | 177 | 94 | 2718 | 7,2 | 7322 | 794 | 1,02 | 7,3 | 184 |
| 31 | 7446 | 10,6 | 12480 | 713 | 1,06 | 10,3 | 329 | 95 | 5688 | 8,5 | 11172 | 768 | 1,24 | 8,5 | 264 |
| 32 | 5062 | 10,5 | 6265 | 740 | 0,99 | 7,7 | 199 | 96 | 3587 | 6,8 | 10431 | 825 | 1,58 | 10,6 | 235 |
| 33 | 2748 | 4,8 | 3291 | 711 | 1,21 | 6,0 | 107 | 97 | 1669 | 2,6 | 4557 | 769 | 1,16 | 5,2 | 92 |
| 34 | 3104 | 5,9 | 6232 | 765 | 0,88 | 5,5 | 138 | 98 | 2733 | 4,4 | 5914 | 782 | 1,09 | 6,9 | 152 |
| 35 | 3243 | 3,9 | 4037 | 715 | 0,53 | 4,9 | 102 | 99 | 2596 | 3,3 | 4088 | 761 | 0,54 | 5,8 | 103 |
| 36 | 5075 | 6,7 | 5222 | 652 | 0,73 | 6,3 | 156 | 100 | 3620 | 3,7 | 6938 | 728 | 0,50 | 5,8 | 134 |
| 37 | 2633 | 5,6 | 6915 | 751 | 0,60 | 5,8 | 123 | 101 | 2591 | 4,7 | 6013 | 760 | 0,53 | 7,5 | 161 |
| 38 | 2060 | 5,2 | 3603 | 736 | 0,59 | 6,8 | 116 | 102 | 1764 | 3,4 | 5052 | 846 | 0,73 | 5,6 | 95 |
| 39 | 4778 | 8,9 | 7088 | 714 | 0,57 | 7,7 | 170 | 103 | 3127 | 3,9 | 8866 | 769 | 0,56 | 6,2 | 123 |
| 40 | 3306 | 4,2 | 4616 | 748 | 0,72 | 5,9 | 92 | 104 | 2683 | 3,8 | 4594 | 786 | 0,83 | 7,5 | 109 |
| 41 | 2770 | 5,6 | 6737 | 718 | 0,74 | 6,4 | 148 | 105 | 2433 | 4,7 | 6270 | 790 | 0,64 | 5,3 | 128 |
| 42 | 2495 | 5,1 | 3513 | 719 | 0,74 | 4,7 | 94 | 106 | 1582 | 3,9 | 5095 | 845 | 0,79 | 5,7 | 104 |
| 43 | 4683 | 6,5 | 6068 | 742 | 0,76 | 5,6 | 140 | 107 | 4065 | 3,7 | 7989 | 762 | 0,72 | 6,5 | 153 |
| 44 | 3696 | 4,4 | 4329 | 719 | 0,70 | 5,9 | 111 | 108 | 2740 | 3,7 | 4189 | 770 | 1,02 | 5,6 | 100 |
| 45 | 2141 | 5,4 | 3907 | 724 | 0,86 | 5,5 | 100 | 109 | 2087 | 4,0 | 5927 | 899 | 1,58 | 7,2 | 102 |
| 46 | 3715 | 5,9 | 6649 | 768 | 1,01 | 7,9 | 162 | 110 | 2977 | 5,4 | 6558 | 821 | 0,99 | 6,2 | 130 |
| 47 | 3102 | 4,5 | 5203 | 741 | 0,62 | 6,3 | 109 | 111 | 2317 | 3,7 | 4495 | 784 | 0,65 | 5,9 | 94 |
| 48 | 4637 | 6,9 | 5999 | 765 | 0,75 | 6,0 | 130 | 112 | 3820 | 4,2 | 8129 | 825 | 0,58 | 7,2 | 157 |
| 49 | 2888 | 7,5 | 6859 | 729 | 1,60 | 8,1 | 220 | 113 | 2575 | 5,7 | 6048 | 759 | 1,11 | 6,1 | 181 |
| 50 | 4559 | 11,7 | 7895 | 726 | 0,90 | 6,7 | 258 | 114 | 3405 | 7,0 | 11537 | 788 | 1,11 | 10,2 | 329 |
| 51 | 4577 | 8,2 | 5541 | 690 | 1,12 | 6,7 | 221 | 115 | 3490 | 5,6 | 9101 | 769 | 1,27 | 8,4 | 230 |
| 52 | 7859 | 11,4 | 10619 | 686 | 0,99 | 8,9 | 338 | 116 | 5766 | 8,5 | 10006 | 727 | 0,80 | 7,4 | 298 |
| 53 | 3919 | 12,3 | 9490 | 748 | 1,21 | 8,0 | 262 | 117 | 4264 | 7,9 | 13045 | 821 | 1,76 | 12,2 | 356 |
| 54 | 3631 | 8,3 | 7405 | 748 | 1,31 | 10,0 | 215 | 118 | 2725 | 6,1 | 6518 | 779 | 1,56 | 8,2 | 196 |
| 55 | 5654 | 10,7 | 12103 | 712 | 1,11 | 11,2 | 346 | 119 | 4617 | 8,2 | 10755 | 771 | 0,86 | 8,3 | 239 |
| 56 | 4629 | 9,9 | 5708 | 747 | 0,84 | 7,3 | 196 | 120 | 3330 | 5,8 | 8728 | 756 | 1,21 | 10,3 | 217 |
| 57 | 4138 | 13,9 | 9839 | 714 | 1,67 | 8,9 | 325 | 121 | 3823 | 7,4 | 12762 | 829 | 1,47 | 7,7 | 262 |
| 58 | 3383 | 7,4 | 7167 | 716 | 1,49 | 6,7 | 184 | 122 | 2585 | 8,0 | 6858 | 780 | 1,83 | 8,6 | 214 |
| 59 | 6204 | 10,5 | 11990 | 722 | 0,67 | 6,8 | 275 | 123 | 4946 | 9,1 | 11493 | 776 | 1,27 | 9,1 | 312 |
| 60 | 4757 | 10,6 | 6072 | 690 | 1,26 | 7,7 | 236 | 124 | 3138 | 6,1 | 8587 | 792 | 0,85 | 6,6 | 201 |
| 61 | 3068 | 8,4 | 8280 | 755 | 1,05 | 6,9 | 181 | 125 | 2719 | 8,0 | 7789 | 795 | 1,35 | 9,2 | 215 |
| 62 | 4764 | 13,7 | 9416 | 759 | 1,18 | 9,8 | 348 | 126 | 3727 | 7,6 | 12603 | 824 | 1,14 | 8,4 | 261 |
| 63 | 5385 | 10,4 | 6907 | 723 | 1,03 | 8,6 | 241 | 127 | 3204 | 5,1 | 9449 | 787 | 1,73 | 8,3 | 192 |
| 64 | 6863 | 11,2 | 11931 | 773 | 1,37 | 8,8 | 277 | 128 | 6079 | 10,2 | 11922 | 824 | 1,03 | 10,9 | 346 |

Tabelle 10-3: Einzelergebnisse des 2^{11-4} Versuchsplans

10.4 Haupt- und Wechselwirkungseffekte

| Faktor | Axialkraft | Drehmoment | Energieeintrag | Temperatur | Risslänge | Buchsenlänge | Volumen |
|----------|------------|------------|----------------|------------|-----------|--------------|------------|
| Identity | 3682 | | 6,79 | 7359 | 758,8 | 1,00 | 7,30 |
| A | 224 | *** 0,21 | *** -337 | *** 10,1 | *** -0,01 | 0,14 | *** 2,32 |
| B | 1370 | *** 0,03 | 372 | *** -18,2 | *** -0,25 | *** 0,05 | *** 7,42 |
| C | -41 | * 0,34 | 607 | *** 29,7 | *** -0,00 | 1,13 | *** -0,93 |
| D | 108 | *** 0,42 | 492 | *** 18,9 | *** 0,07 | *** -0,20 | *** -1,96 |
| E | 1195 | *** 4,10 | 3709 | *** -1,2 | *** 0,44 | 2,28 | *** 131,42 |
| F | -31 | * 0,01 | 34 | * 1,1 | 0,00 | 0,02 | * 0,34 |
| G | -858 | *** -2,43 | 984 | *** 58,8 | *** 0,07 | *** 0,38 | *** -1,79 |
| H | 211 | *** 0,46 | 221 | *** -1,2 | 0,14 | *** 1,64 | *** 33,81 |
| I | 292 | *** 0,04 | 172 | *** 1,0 | 0,27 | *** 0,35 | *** 4,47 |
| J | 1339 | *** 1,75 | 2910 | *** 1,6 | *** -0,10 | *** 0,72 | *** 66,93 |
| K | 100 | *** 1,24 | *** -1433 | *** -15,6 | *** -0,03 | *** -0,17 | *** 1,61 |
| AB | 37 | * 0,10 | *** -92 | *** -1,8 | 0,03 | *** 0,04 | *** 0,52 |
| AC | 7 | -0,09 | *** -22 | 10,6 | *** 0,01 | 0,03 | ** -1,11 |
| AD | -14 | 0,09 | *** -9 | 5,1 | *** 0,02 | * -0,00 | 0,78 |
| AE | 44 | ** 0,13 | *** -73 | *** -0,4 | *** -0,04 | *** 0,04 | *** 1,21 |
| AF | 49 | ** -0,02 | *** -92 | *** -4,4 | *** -0,02 | * -0,03 | ** 0,12 |
| AG | -4 | 0,09 | *** 98 | 2,6 | * -0,04 | *** 0,02 | * 3,37 |
| BC | -164 | *** -0,04 | 30 | * 2,0 | 0,06 | *** 0,06 | *** -3,33 |
| BD | -11 | -0,21 | *** -87 | *** -2,3 | 0,01 | 0,04 | *** 1,51 |
| BE | 214 | *** 0,04 | 45 | ** -1,6 | *** -0,03 | *** 0,01 | 5,17 |
| BF | -48 | ** -0,04 | -1 | -5,0 | *** 0,01 | *** -0,03 | * -1,44 |
| BG | -360 | *** -0,06 | * 73 | *** -5,2 | *** -0,01 | 0,01 | -2,20 |
| CD | 210 | *** -0,08 | *** -145 | *** -1,4 | *** -0,02 | * -0,17 | *** 0,78 |
| CE | 61 | *** -0,05 | * 67 | *** -4,1 | ** 0,02 | * 0,29 | *** -1,50 |
| CF | 9 | 0,04 | -17 | -0,9 | -0,00 | -0,05 | *** 1,38 |
| CG | 104 | *** -0,08 | *** 9 | -0,3 | 0,08 | *** 0,08 | *** 1,78 |
| DE | -7 | 0,21 | *** 207 | *** -1,6 | *** -0,01 | *** -0,10 | *** -2,02 |
| DF | -33 | * 0,05 | * 25 | 3,1 | * 0,02 | * -0,01 | 0,64 |
| DG | 18 | 0,14 | *** 53 | 9,2 | *** 0,04 | *** -0,00 | -0,44 |
| EF | 45 | ** -0,03 | -56 | *** -4,1 | ** 0,01 | 0,01 | 0,95 |
| EG | -114 | *** -0,75 | 269 | *** -1,4 | 0,01 | 0,17 | *** 1,20 |
| FG | 6 | 0,05 | * 15 | 2,0 | 0,01 | -0,01 | -2,37 |
| AH | -19 | -0,08 | *** -44 | ** 0,2 | *** -0,04 | *** 0,02 | -2,13 |
| AI | -7 | -0,08 | *** -34 | * -4,4 | *** -0,03 | *** -0,02 | * -0,94 |
| AJ | 20 | -0,05 | * 37 | * 3,0 | * 0,05 | *** 0,04 | 2,53 |
| AK | 12 | -0,04 | 25 | 0,3 | 0,02 | *** 0,03 | ** 1,93 |
| BH | 13 | 0,04 | 102 | *** -4,8 | *** -0,04 | *** -0,15 | *** -0,14 |
| BI | 78 | *** 0,02 | 42 | ** -2,9 | * -0,11 | *** -0,11 | 0,52 |
| BJ | 388 | *** -0,10 | *** 80 | *** -1,7 | 0,02 | *** -0,05 | *** -2,24 |
| BK | 66 | *** -0,08 | ** 58 | 7,2 | *** 0,04 | *** 0,05 | *** 0,55 |
| CH | 121 | *** 0,01 | -10 | 1,9 | *** -0,06 | *** 0,26 | *** 7,32 |
| CI | 35 | * 0,05 | * 12 | 5,9 | *** 0,00 | *** 0,05 | *** 0,25 |
| CJ | -17 | -0,06 | ** 69 | *** -2,7 | * 0,01 | *** 0,05 | *** 1,67 |
| CK | 16 | 0,06 | * -70 | 1,8 | *** -0,08 | *** -0,01 | 1,29 |
| DH | -2 | -0,02 | 19 | 3,8 | ** -0,03 | *** -0,23 | *** -2,90 |
| DI | 15 | -0,11 | *** -123 | *** -2,4 | 0,04 | *** 0,09 | *** -1,62 |
| DJ | 39 | * -0,08 | ** 14 | -0,4 | 0,01 | *** -0,03 | ** 0,60 |
| DK | -33 | * 0,12 | *** -37 | * -1,1 | *** -0,01 | *** -0,00 | 2,09 |
| EH | 30 | 0,22 | 118 | *** -0,4 | 0,08 | *** 0,48 | *** 13,54 |
| EI | 107 | *** -0,03 | -9 | -1,0 | 0,02 | * 0,00 | 2,85 |
| EJ | 219 | *** 0,63 | 634 | *** 11,8 | *** -0,04 | 0,15 | *** 24,98 |
| EK | -47 | ** 0,41 | *** -460 | 0,9 | *** -0,01 | *** -0,06 | *** 1,57 |
| FH | -13 | 0,08 | *** -12 | -1,9 | *** -0,03 | *** -0,03 | 0,88 |
| FI | 27 | 0,08 | *** -12 | 2,9 | * -0,01 | *** -0,02 | 0,84 |
| FJ | -57 | *** 0,16 | 154 | *** -0,8 | *** -0,01 | 0,01 | 0,77 |
| FK | -0 | 0,03 | -12 | -1,5 | *** -0,01 | *** -0,03 | * -0,08 |
| GH | -49 | ** -0,02 | 81 | *** 16,6 | *** -0,00 | 0,08 | *** -0,11 |
| GI | -29 | -0,01 | 74 | *** 0,4 | 0,06 | *** 0,02 | 0,54 |
| GJ | 1 | -0,44 | *** 56 | *** -6,8 | *** -0,04 | *** -0,01 | 0,94 |
| GK | 93 | *** -0,21 | *** -102 | *** -0,0 | *** -0,01 | 0,05 | *** -2,41 |
| HI | 28 | 0,19 | 86 | *** 1,1 | *** -0,03 | *** -0,01 | -0,65 |
| HJ | 29 | -0,06 | * -65 | *** -4,3 | *** -0,01 | 0,20 | *** 12,00 |
| HK | -13 | 0,11 | 33 | * -1,4 | 0,02 | * -0,02 | * 1,38 |
| IJ | 60 | *** 0,04 | 59 | *** -2,1 | *** -0,02 | * -0,06 | *** 0,55 |
| IK | -135 | *** -0,01 | 3 | *** -3,8 | ** 0,01 | *** -0,00 | 0,43 |
| JK | -95 | *** 0,24 | *** -149 | *** 5,6 | *** 0,02 | ** -0,03 | ** -2,08 |

Tabelle 10-4: Berechnete Haupt- und Wechselwirkungseffekte des 2¹¹⁻⁴ Versuchsplans

10.5 Applikation zur Berechnung der multiplen Regressionsmodelle

| Berechnungsergebnisse | | |
|------------------------------|---|--|
| Prozessgrößen | Buchsenqualität | |
| Kraft [N] 4060 | Buchsenlänge [mm] 7,59 | |
| Moment [Nm] 6,07 | Risslänge [mm] 0,85 | |
| Energieeintrag [J] 8120 | Werkstoffvolumen in Vorschubr. [mm ³] 198 | |
| Temperatur [°C] 770 | Werkstoffvolumen in Vorschubr. [%] 80 | |

| Einstellparameter | | |
|-------------------------------|--|-------------------------|
| Werkzeugkontur: | | |
| <u>Konturvariante:</u> | <input checked="" type="checkbox"/> Standardgeometr. <input type="checkbox"/> Sondergeometr. | |
| <u>Spitzenwinkel:</u> | 80 ° | 87 ° |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Konuswinkel:</u> | 33 ° | 36 ° |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| Formstollengeometrie: | | |
| <u>Durchmesser:</u> | 9,2 mm | 11,0 mm |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Formstollenzahl:</u> | 3 St. | 4 St. |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Hubhöhe:</u> | 95 % | 96,0 % |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Drallwinkel:</u> | 0 ° | 22,1 ° |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| Bearbeitungsparameter: | | |
| <u>Drehzahl:</u> | 2000 U/min | 3000 U/min |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Vorschub 2 50/..:</u> | 200 m/min | 250 m/min |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| Werkstück: | | |
| <u>Blechdicke:</u> | 2 mm | 2,6 mm |
| | unter Grenze | < > obere Grenze |
| <u>Werkstoffcharge:</u> | <input checked="" type="radio"/> A | <input type="radio"/> B |
| Standardwerte setzen | Berechnung | |

Abbildung 10-1: Applikation zur Berechnung der multiplen Regressionsmodelle

10.6 Standard- und Sondergeometrie (Kapitel 7.1)

| | Sondergeometrie | Standardgeometrie |
|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Werkzeugtyp | So | St |
| Durchmesser [mm] | 9,2 | 9,2 |
| Gesamtlänge [mm] | 24 | 24 |
| Spitzenwinkel [°] | 90 | 90 |
| Länge der Spitze [mm] | - | 1 |
| Rad. Spitze/Konus [mm] | - | 0,1 |
| Konuswinkel [°] | - | 35 |
| Rad. Konus/Zylinder [mm] | - | 15 |
| Arbeitsbereich [mm] | 12,08 | - |
| Rad. Zylinder/Absatz [mm] | 1 | 1 |
| Formstollenanzahl [Stück] | 4 | 4 |
| Formstollenverhältnis [%] | 96 | 96 |
| Tal-Lage Hubfunktion [°] | 180 | 180 |
| Drallwinkel [°] | 0 | 0 |

Tabelle 10-5: Werkzeuggeometriedaten – Standard- und Sondergeometrie

10.7 Variation des Spitzwinkels (Kapitel 7.2)

| | Sondergeometrie - Spitzwinkel 75° | Sondergeometrie - Spitzwinkel 90° | Sondergeometrie - Spitzwinkel 105° | Sondergeometrie - Spitzwinkel 120° | Standardgeometrie - Spitzwinkel 75° | Standardgeometrie - Spitzwinkel 90° | Standardgeometrie - Spitzwinkel 105° | Standardgeometrie - Spitzwinkel 120° |
|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Werkzeugtyp | So | So | So | So | St | St | St | St |
| Durchmesser [mm] | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| Gesamtlänge [mm] | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Spitzwinkel [°] | 75 | 90 | 105 | 120 | 75 | 90 | 105 | 120 |
| Länge der Spitze [mm] | - | - | - | - | 1,3 | 1 | 0,77 | 0,58 |
| Rad. Spitze/Konus [mm] | - | - | - | - | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Konuswinkel [°] | - | - | - | - | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| Rad. Konus/Zylinder [mm] | - | - | - | - | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Arbeitsbereich [mm] | 12,38 | 12,08 | 11,85 | 11,66 | - | - | - | - |
| Rad. Zylinder/Absatz [mm] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Formstollenzahl [Stück] | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Formstollenverhältnis [%] | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Tal-Lage Hubfunktion [°] | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Drallwinkel [°] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 10-6: Werkzeuggeometriedaten – Spitzwinkel

10.8 Variation der Arbeitsbereichslänge (Kapitel 7.3)

| | Sondergeometrie – Arbeitsbereich 12 mm | Sondergeometrie - Arbeitsbereich 14 mm | Sondergeometrie - Arbeitsbereich 16 mm | Standardgeometrie - Arbeitsbereich 12 mm | Standardgeometrie - Arbeitsbereich 14 mm | Standardgeometrie - Arbeitsbereich 16 mm |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| Werkzeugtyp | So | So | So | St | St | St |
| Durchmesser [mm] | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| Gesamtlänge [mm] | 22 | 24 | 26 | 22 | 24 | 26 |
| Spitzenwinkel [°] | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| Länge der Spitze [mm] | - | - | - | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| Rad. Spitze/Konus [mm] | - | - | - | 1 | 1 | 1 |
| Konuswinkel [°] | - | - | - | 41 | 35 | 29 |
| Rad. Konus/Zylinder [mm] | - | - | - | 15 | 15 | 15 |
| Arbeitsbereich [mm] | 14 | 16 | 18 | - | - | - |
| Rad. Zylinder/Absatz [mm] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Formstollenanzahl [Stück] | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Formstollenverhältnis [%] | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Tal-Lage Hubfunktion [°] | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Drallwinkel [°] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 10-7: Werkzeuggeometriedaten – Arbeitsbereichslänge

10.9 Drallwinkel und Formstollenzahl (Kapitel 7.4)

| | Sondergeometrie Drallwinkel 0° | Sondergeometrie Drallwinkel - 24° / +24° | Sondergeometrie Drallwinkel - 42° / +42° | Standardgeometrie Drallwinkel 0° | Standardgeometrie Drallwinkel - 24° / +24° | Standardgeometrie Drallwinkel - 42° / +42° |
|----------------------------------|-----------------------------------|---|---|-------------------------------------|---|---|
| Werkzeugtyp | So | So | So | St | St | St |
| Durchmesser [mm] | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 | 9,2 |
| Gesamtlänge [mm] | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Spitzenwinkel [°] | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 |
| Länge der Spitze [mm] | - | - | - | 1 | 1 | 1 |
| Rad. Spitze/Konus [mm] | - | - | - | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Konuswinkel [°] | - | - | - | 37,5 | 37,5 | 37,5 |
| Rad. Konus/Zylinder [mm] | - | - | - | 10 | 10 | 10 |
| Arbeitsbereich [mm] | 12,08 | 12,08 | 12,08 | - | - | - |
| Rad. Zylinder/Absatz [mm] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Formstollenzahl [Stück] | 3 / 4 / 5 | 3 / 4 / 5 | 3 / 4 / 5 | 3 / 4 / 5 | 3 / 4 / 5 | 3 / 4 / 5 |
| Formstollenverhältnis [%] | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Tal-Lage Hubfunktion [°] | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Drallwinkel [°] | 0 | -24/+24 | -42/+42 | 0 | -24/+24 | -42/+42 |

Tabelle 10-8: Werkzeuggeometriedaten – Drallwinkel und Formstollen

10.10 Formstollenzahl und Formstollenverhältnis (Kapitel 7.5)

| | Sondergeometrie | Standardgeometrie |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|
| Werkzeugtyp | So | St |
| Durchmesser [mm] | 9,2 | 9,2 |
| Gesamtlänge [mm] | 23 | 23 |
| Spitzenwinkel [°] | 90 | 90 |
| Länge der Spitze [mm] | - | 1 |
| Rad. Spitze/Konus [mm] | - | 0,1 |
| Konuswinkel [°] | - | 37,5 |
| Rad. Konus/Zylinder [mm] | - | 10 |
| Arbeitsbereich [mm] | 12,08 | - |
| Rad. Zylinder/Absatz [mm] | 1 | 1 |
| Formstollenzahl [Stück] | 4 | 4 |
| Formstollenverhältnis [%] | 92, 94, 96, 98, 100 | 92, 94, 96, 98, 100 |
| Tal-Lage Hubfunktion [°] | 180 | 180 |
| Drallwinkel [°] | 0 | 0 |

Tabelle 10-9: Werkzeuggeometriedaten – Formstollenzahl und Formstollenverhältnis