

Abschlussbericht

zum BMWi-Forschungsprojekt

SolarCheck

Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens und eines anschaulichen Indikators zur Feststellung der Funktionsfähigkeit thermischer Solaranlagen für Trinkwarmwasserbereitung und kombinierte Heizungsunterstützung

FKZ: 0325870A/B

Autoren: C. Schmelzer, M. Georgii, O. Kusyy, C. Sauer, J. Orozaliev, K. Vajen, Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik

S. Lang, N. Bonk, H. Drück, Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

Projektverantwortung: Herr Prof. Dr. Klaus Vajen

Koordination: Universität Kassel
Institut für Thermische Energietechnik
Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik
Kurt-Wolters-Str.3
34125 Kassel



Laufzeit des Forschungsprojekts: 01.10.2016 bis 31.12.2020

Datum dieses Abschlussberichts: 16.07.2021

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0325870A/B aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Wissenschaftliche Projektpartner:

Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und
Energiespeicherung (ehemals ITW/TZS)
Herr Dr. Harald Drück
Pfaffenwaldring 6
70569 Stuttgart



INES - Institut National de l'Energie Solaire
50 avenue du lac Léman
Technopôle Savoie technolac
F-73375 LE BOURGET DU LAC



Teilnehmende Firmen:

Bosch Solarthermie GmbH
Herr Alexander Sarg
Junkersstraße 20-24
73249 Wernau



Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG
Herr Herbert Bechem
Berghäuser Str. 40
42859 Remscheid



Viessmann Werke GmbH & Co. KG
Herr Dr. Bernd Hafner
Viessmannstr. 1
35107 Allendorf



RESOL – Elektronische Regelungen GmbH
Herr Guido Filler
Heiskampstraße 10
45527 Hattingen



SOLVIS GmbH
Herr Helmut Jäger
Grotrian-Steinweg-Straße 12
38112 Braunschweig



WILO SE
Herr Lars Diekkämper
Nortkirchenstraße 100
44263 Dortmund



Enertracting GmbH
Herr Roland Heinzen
Altmüllerstraße 6-8
34117 Kassel



Assoziierte Partner:

Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie e. V.
Herr Jonas Budde
Frankfurter Straße 720-726
51145 Köln



BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
Herr Jörg Mayer
Quartier 207
Französische Straße 23
10117 Berlin



Danksagung

Für die freundliche Unterstützung bei der administrativen und inhaltlichen Abwicklung des F&E-Vorhabens möchten wir uns ganz herzlich beim BMWi und dem PtJ bedanken. Weiterer Dank für die stets angenehme Kommunikation und sehr konstruktive inhaltliche Zusammenarbeit gilt unseren Projektpartnern Bosch Solarthermie GmbH, Enertracting GmbH, RESOL GmbH, SOLVIS GmbH, Vaillant GmbH, Viessmann Werke GmbH & Co. KG, WILO SE sowie dem CEA INES.

KURZFASSUNG

Die unbedingte Notwendigkeit einer automatisierten Funktionskontrolle für solarthermisch unterstützte Heizungssysteme ist branchenweit unbestritten. Fehler in der Anlage, die zu einem Minderertrag des solarthermischen Systems führen, werden in der Regel von der fossilen Nachheizung ausgeglichen. Hiermit können Fehlfunktionen lange Zeit unbemerkt bleiben. Außerdem haben sich in Mitteleuropa vergleichsweise komplexe Systeme mit einer Vielzahl an Komponenten und Varianten etabliert. Diese Komplexität erhöht den Aufwand und die Kosten bei der Fehlersuche selbst durch Fachleute, und erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass es beim Bau oder dem Betrieb der Anlagen zu Fehlern kommt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SolarCheck wurden deshalb zwei die Möglichkeiten zur automatisierten Funktionsüberwachung thermischer Solaranlagen untersucht: ein FSC-basierter Indikator, der die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems anzeigt, und einen komponentenorientierter Ansatz, welcher auf Grundlagen von Algorithmen gezielt Fehler anzeigt und Informationen zur Ursache liefert.

Die Methodenentwicklung des FSC-basierten Leistungsindikators geschah dabei basierend auf über 10.000 TRNSYS-Jahressimulationen. Insbesondere ging es hierbei um die Fragen, welche Parameter jeweils den größten Einfluss haben und ob das Verfahren für unterschiedliche Kombisystemhydrauliken angepasst werden muss. Auf Basis der Simulationsdaten konnten Korrekturfunktionen für einflussreiche Größen und Parameter ermittelt und getestet werden. Einen weiteren Schwerpunkt bilden die Untersuchungen zum Einfluss der Sensorqualität auf die Aussage der Leistungsbewertung. Hierbei wurden verschiedene Sensorik-Kombinationen definiert und hinsichtlich der resultierenden Gesamtunsicherheit analysiert.

Ausgangspunkt für die Algorithmenentwicklung des komponentenorientierten Ansatzes, war eine projektinterne FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse), aus der eine Liste mit priorisiert zu betrachtenden Anlagenfehlern hervorging. Diese Fehler wurden jeweils analysiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen gruppiert. Für die entscheidenden Auswirkungen (Symptome) wurden dann Algorithmen entwickelt und z. T. an Anlagenmessdaten getestet.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	4
EINLEITUNG	6
1 FSC-METHODE	8
1.1 GRUNDIDEE DER FSC-METHODE.....	8
1.2 FORSCHUNGSFRAGEN BZGL. FSC-METHODE	9
1.3 SIMULATIONSBASIERTE METHODENENTWICKLUNG	10
1.3.1 <i>Untersuchte Anlagenhydrauliken</i>	10
1.3.2 <i>Automatisierte Parametervariationen – Softwaretool und Vorgehensweise</i>	12
1.3.3 <i>Durchgeführte Parametervariationen und Gesamtstreuung</i>	14
1.3.4 <i>Einflussgrößen auf die Korrelationsgenauigkeit und Korrekturfunktionen</i>	15
1.3.5 <i>Anwendbarkeit der FSC-Methode bei TWW-Systemen</i>	22
1.3.6 <i>Ansätze zur Verbesserung der Reaktionszeit</i>	22
1.4 AUSWIRKUNGEN DER SENSORQUALITÄT AUF DIE AUSSAGEKRAFT DER FSC-METHODE	25
1.4.1 <i>Sensorkosten</i>	28
1.4.2 <i>Methodisches Vorgehen Messunsicherheiten</i>	30
1.5 FAZIT FSC-METHODENENTWICKLUNG.....	32
1.6 ÜBERPRÜFUNG DER FSC-METHODE MIT MESSDATEN	32
1.6.1 <i>Datenbereitstellung</i>	32
1.6.2 <i>Vorverarbeitung und Aufbereitung der Messdaten</i>	38
1.6.3 <i>Überprüfung und Verifikation der FSC-Methode</i>	40
1.7 IMPLEMENTIERUNG DER FSC-METHODE	45
2 ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS	47
2.1 MEHRSTUFIGES VERFAHREN FÜR DIE FEHLERERKENNUNG	47
2.2 LISTE BEARBEITETER FEHLER UND ERSTELLTER SYMPTOME	48
2.3 FUNKTIONSWEISE DER SYMPTOME UND BERÜCKSICHTIGTE BERECHNUNGSWEGE	49
2.3.1 <i>Symptom „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“</i>	49
2.3.2 <i>Symptom „Volumenstrom im Betrieb zu klein“</i>	50
2.3.3 <i>Symptom „Temperatur(-differenz) im Betrieb zu hoch“</i>	52
2.3.4 <i>Symptom „Kollektortemperatur unplausibel“</i>	53
2.3.5 <i>Symptom „UA-Wert zu niedrig“</i>	54
2.4 FAZIT ALGORITHMENENTWICKLUNG BEREICH SOLARKREIS.....	56
3 ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SPEICHER UND NACHHEIZUNG	57
4 ZUSAMMENFASSUNG	58
5 LITERATURVERZEICHNIS	60
6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	61
7 TABELLENVERZEICHNIS.....	63
8 ANHANG.....	64
8.1 LASTENHEFT FÜR BENÖTIGTE MESSDATEN UND ANLAGENINFORMATIONEN	64
8.2 ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SPEICHER UND NACHHEIZUNG.....	65

Einleitung

Motivation

Bisher können Betreiber, Nutzer oder Installateure ohne sehr tiefe Fachkenntnisse kaum einordnen, ob eine thermische Solaranlage verhältnismäßig gut oder schlecht funktioniert. Bei PV-Anlagen genügen schon einfache kWh-Zähler und entsprechende Onlineportale, die die Erträge darstellen und vergleichen, um die Funktionsfähigkeit der Anlage überprüfen zu können. In der Solarthermie steht ein vergleichbares Instrument zur Leistungsbewertung nicht zur Verfügung, da aufgrund des Einflusses von Nachheizung, Regelung, Speicherung und tatsächlichem Verbrauch hier einfach zu ermittelnde Größen wie die eingespeiste solare Energie nicht aussagekräftig sind. Auch viele andere in der Solarthermie genutzte Kennzahlen, wie die eingesparte konventionelle Energie (als relative Größe durch f_{save} angegeben), solarer Nutzungsgrad o.ä., sind system-, standort- und bedarfsabhängig und lassen sich nicht einfach einordnen. Die Möglichkeit, die Funktionsfähigkeit des gesamten Wärmeversorgungssystems anhand dieser Kennzahlen von mehreren Anlagen untereinander zu vergleichen, ist somit nicht gegeben.

Zielsetzung

Ziel des Projektes SolarCheck war die Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens, das die Leistungs- und Funktionsfähigkeit eines solar unterstützten Wärmeversorgungssystems in einer anschaulichen Kennzahl darstellen kann. Weiterhin sollten Algorithmen definiert werden, welche ausgewählte Fehler des Wärmeversorgungssystems anzeigen und eingrenzen können.

Um ein einheitlich einsetzbares und vergleichbares Maß für die Funktionsfähigkeit eines solar unterstützten Wärmeversorgungssystems zu erhalten, wurde im Projekt SolarCheck ein FSC¹-basierter Leistungsindikator entwickelt und untersucht. Dieser kann im Rahmen eines automatisierten Funktionskontrollverfahrens berechnet werden und gibt an, welchen Ertrag die Anlage tatsächlich liefert – relativ zu einem theoretisch zu erwartenden Ertrag, der dynamisch unter Beachtung der tatsächlich vorliegenden Randbedingungen (solare Einstrahlung und Verbrauch) ermittelt wird. Die Berechnung basiert dabei auf Korrelationen zwischen verschiedenen Kenngrößen, die das System und die Randbedingungen charakterisieren und aus Messdaten sowie wenigen grundlegenden Systemparametern bestimmt werden können. Das Verfahren hat daher einen wesentlich geringeren Implementierungs- und Rechenaufwand als dynamische Simulationen, berücksichtigt aber dennoch die Einflüsse auf den Ertrag. Vorteilhaft ist außerdem, dass das Verfahren nicht ausschließlich den Solarkreis betrachtet, sondern die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems (inkl. der Nachheizung) bewertet. Da der Indikator automatisch auf Ertragseinbußen reagiert, können alle Systemfehler oder Fehlverhalten detektiert werden, welche das Systemverhalten stark beeinflussen.

¹ Zur Bedeutung von FSC (Fractional Solar Consumption) siehe Kap. 1.1

EINLEITUNG

Da dieser FSC-System-Ansatz auf Jahreswerten der Energieverbräuche und der Nutzenergie-lieferung des Kessel basiert, reagiert der berechnete Indikator nur vergleichsweise langsam auf Anlagenfehler. Zusätzlich ergibt sich mithilfe des FSC-basierten Indikators nur eine Einschätzung zur Leistungsfähigkeit des Systems. Welche Ursache für die erkannten Leistungseinbußen verantwortlich ist, kann hiermit nicht ermittelt werden. Aus diesen Gründen wurde als zweiter Baustein im Projekt ein komponentenorientierter Ansatz verfolgt. Dieser algorithmenbasierte Ansatz ist in der Lage, Fehlfunktionen einzelner Komponenten schnell zu erkennen und liefert zusätzliche Informationen zur Lokalisierung von Fehlern. Allerdings ist dadurch noch keine Aussage zur Funktions- und Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems getroffen und es können nur Fehler erkannt werden, für die Algorithmen existieren und anwendbar sind. Außerdem ist die Entwicklung und Implementierung der einzelnen Algorithmen aufwändiger.

Gliederung des Berichts

Kapitel 1 befasst sich mit dem Leistungsindikator bzw. der FSC-Methodik zur Leistungsbewertung. Hierzu werden zunächst die Grundlagen für FSC und f_{sav} erläutert (1.1) und die Forschungsfragen definiert (1.2), bevor kurz auf die Vorgehensweise in der simulationsbasierten Methodenentwicklung eingegangen wird (1.3.1-1.3.3).

Kapitel 1.3.4 beschäftigt sich hierbei detailliert mit der Streuung von Systemen gegenüber der gemeinsamen f_{sav} -FSC-Korrelation. Hierbei werden die einflussreichsten Systemparameter und Größen identifiziert, sodass deren Einfluss über Korrekturfunktionen ausgeglichen werden kann.

In Kapitel 1.4 wird analysiert, welchen Einfluss Sensor-Messunsicherheiten auf die Aussagekraft des Leistungsindikators haben. Um die Rahmenbedingungen abzustecken werden drei Sensorik-Kombinationen explizit verglichen: eine kostengünstige und unangepasste Sensorik, eine kosteneffiziente Sensorik und die Variante „maximale Genauigkeit“.

Nach einem kurzen Fazit zum theoretischen und simulationsbasierten Teil der FSC-Methodenentwicklung (Kapitel 1.5), beschäftigt sich Kapitel 1.6 mit der Überprüfung der Methodik an realen Anlagenmessdaten und Kapitel 1.7 gibt kurz den aktuellen Stand zur Implementierung des Verfahrens wieder.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Algorithmenentwicklung für den Bereich Solarkreis. Hier werden zunächst kurz die Grundlagen zur algorithmenbasierten Fehlerdetektion und die im Bereich Solarkreis behandelten Fehler erläutert. Anschließend werden die Vorgehensweise der Algorithmen und die unterschiedlichen Detektionswege je Symptomalgorithmus erläutert und die Anwendung der Algorithmen an Messdaten wird beispielhaft dargestellt.

Kapitel 3 stellt kurz vor, welche Fehler für die Bereiche Speicher und Nachheizung betrachtet wurden. Die jeweils vorgeschlagenen Algorithmen bzw. Vorgehensweisen zur Detektion sind in Anhang 8.1 zusammengefasst.

1 FSC-Methode

Im Projekt „SolarCheck“ wurde zunächst ein einheitlicher und vergleichbarer Leistungsindikator für die Funktionsfähigkeit solarthermischer Kombisysteme entwickelt. Dabei werden rechnerisch erwartete Energieeinsparungen $f_{sav,expected}$ auf Grundlage von Korrelationen mit FSC („Fractional Solar Consumption“) ermittelt und mit einem gemessenen (erreichten) Wert $f_{sav,measured}$ verglichen.

1.1 Grundidee der FSC-Methode

Die Methode basiert auf dem Parameter FSC („Fractional Solar Consumption“), welcher im IEA SHC Task 26 von T. Letz et al. definiert wurde [1], um Kombisysteme und ihre Hydrauliken miteinander vergleichen zu können.

In den Parameter FSC geht die tatsächliche Einstrahlung und Last ein, womit die tatsächlichen Betriebsrandbedingungen der Anlage berücksichtigt werden. Dazu wird der jährliche Referenzenergieverbrauch für Raumheizung und TWW-Bereitung bestimmt:

$$E_{ref,y} = Q_{dhw,y} + Q_{sh,y} + Q_{loss,ref,y} \quad (1-1)$$

Die jährlichen Speicherverluste $Q_{loss,ref}$ eines konventionellen Referenzsystems werden aus dem täglichen TWW-Verbrauch $V_{dhw,daily}$ über

$$Q_{loss,ref} = 0.16 \frac{\text{W}}{\text{K}} \sqrt{0.75 \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{-1} \cdot V_{dhw,daily} \cdot (52.5 - 15)\text{K} \cdot \Delta t} \quad (1-2)$$

abgeschätzt und addiert (mit Δt als Dauer eines Jahres).

Die nutzbare monatliche Strahlungsenergie $E_{sol,usable,y}$ wird dann als Minimum zwischen der monatlichen Einstrahlung auf die Kollektoraperturfläche und dem monatlichen Referenzenergiebedarfes (analog Gl. (1-1)) definiert und anschließend über das Jahr aufsummiert:

$$E_{sol,usable,y} = \sum_{m=1}^{12} \min[(A_{col} \cdot H_{t,m}), E_{ref,m}] \quad (1-3)$$

Daraus ergibt sich FSC_{use} als Verhältnis der jährlichen nutzbaren Strahlungsenergie und dem jährlichen Referenzenergieverbrauch:

$$FSC_{use} = \frac{E_{sol,usable,y}}{E_{ref,y}} \quad (1-4)$$

Aus der Nachheizenergie sowie den gemessenen Verbräuchen wird außerdem die tatsächliche (rechnerische) Energieeinsparung $\hat{f}_{sav,use,measured}$ bestimmt:

$$\hat{f}_{sav,use,measured} = 1 - \frac{Q_{aux,delivered}}{E_{ref}} \quad (1-5)$$

Schließlich kann das tatsächlich gemessene $\hat{f}_{sav,use,measured}$ mit dem über die FSC-Korrelation bestimmten erwarteten Wert $\hat{f}_{sav,use,expected}$ verglichen werden (vgl. Abb. 1-1).

FSC-METHODE

Daraus ergibt sich der Leistungsindikator (Performance Factor) zu

$$PF = \frac{\hat{f}_{sav,use,measured}}{\hat{f}_{sav,use,expected}} \quad (1-6)$$

In FSC_{use} und $\hat{f}_{sav,use}$ gehen – anders als in [1] – hier keine Kesselnutzungsgrade ein, es bezieht sich also auf Nutzenergien (Index „use“). Das Dach über $\hat{f}_{sav,use}$ dient zur Verdeutlichung, dass es sich genau um die nach Gl.(1-1) bis (1-5) berechnete Größe (mit abgeschätzten Referenzspeicherverlusten) handelt.

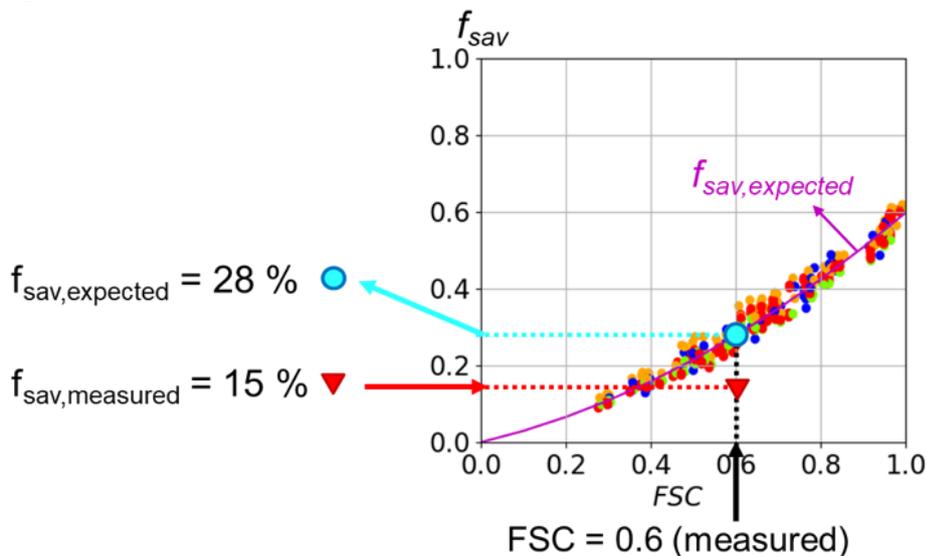


Abb. 1-1 Grundprinzip der FSC-Methode zur Leistungsbewertung: 1. Bestimme $\hat{f}_{sav,use,measured}$ aus Messdaten; 2. Bestimme FSC_{use} aus Messdaten; 3. Berechne $\hat{f}_{sav,use,expected}$ aus FSC_{use} über die Korrelation; 4. Vergleiche $\hat{f}_{sav,use,measured}$ und $\hat{f}_{sav,use,expected}$

1.2 Forschungsfragen bzgl. FSC-Methode

Um die Tauglichkeit der FSC-Methode zu prüfen, wurden im SolarCheck-Projekt folgende Fragestellungen eingehend untersucht:

- Wie genau ist die FSC- f_{sav} -Korrelation auch bei breiterer Parametervariation?
- Kann eine gemeinsame Korrelation für alle Hydrauliken genutzt werden, oder sind jeweils eigene Korrelationen erforderlich?
- Welche Parameter haben wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Korrelation(en)?
- Kann die Streuung durch Korrekturfunktionen verringert werden?
- Welche Sensorik (Messstellen) wird für das Verfahren benötigt?
- Welche Sensor-Qualität ist notwendig, d.h. welche Auswirkungen haben Messunsicherheiten auf die Aussagekraft des Leistungsindikators bzw. der FSC-Methodik?
- Wie sieht die kosteneffizienteste Sensorik zur Umsetzung des Verfahrens aus und welche Unsicherheiten resultieren hiermit?

1.3 Simulationsbasierte Methodenentwicklung

Um die Fragestellungen aus Kapitel 1.2 zu untersuchen, wurde ein simulationsbasierter Ansatz verfolgt. Zum einen ermöglicht dies, gezielte Parametervariationen vorzunehmen sowie gleichzeitig die Vergleichbarkeit von Datensätzen sicherzustellen. Zum anderen standen für eine rein Messdaten-basierte Methodenentwicklung bei weitem nicht genug Messdaten zur Verfügung. Als Simulationsprogramm wurde TRNSYS (Version 17) gewählt.

Im Folgenden werden zuerst die in TRNSYS abgebildeten Anlagenhydrauliken vorgestellt (1.3.1) und das programmierte Softwaretool zur Durchführung der Parametervariationen und Auswertung der Simulationsergebnisse beschrieben (1.3.2). Danach werden die durchgeführten Parametervariationen und daraus resultierende Genauigkeit der Korrelation dargestellt (1.3.3). Anschließend werden Korrekturfunktionen zur Verbesserung der Korrelationsgenauigkeit ermittelt (1.3.4). Kapitel 1.3.5 diskutiert schließlich die Anwendbarkeit des Verfahrens bei TWW-Systemen und in 1.3.6 werden die Untersuchungen zur Verbesserung der Reaktionsschnelligkeit des Verfahrens dargestellt.

1.3.1 Untersuchte Anlagenhydrauliken

Zu Beginn des Projektes wurden in Diskussion mit den Projektpartnern Standardhydrauliken definiert und in TRNSYS abgebildet. Auf Grundlage dieser Systeme wurde die FSC-Methodik entwickelt und getestet. Die Hydrauliken sind bezüglich der Einbindung der Solarwärme, der Art des Speichers und der Anbindung von Nachheizung und Heizkreis gruppiert. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, die Umsetzung in der Simulationsumgebung zu modularisieren und somit zu vereinfachen. Folgende Grundsysteme wurden identifiziert und umgesetzt:

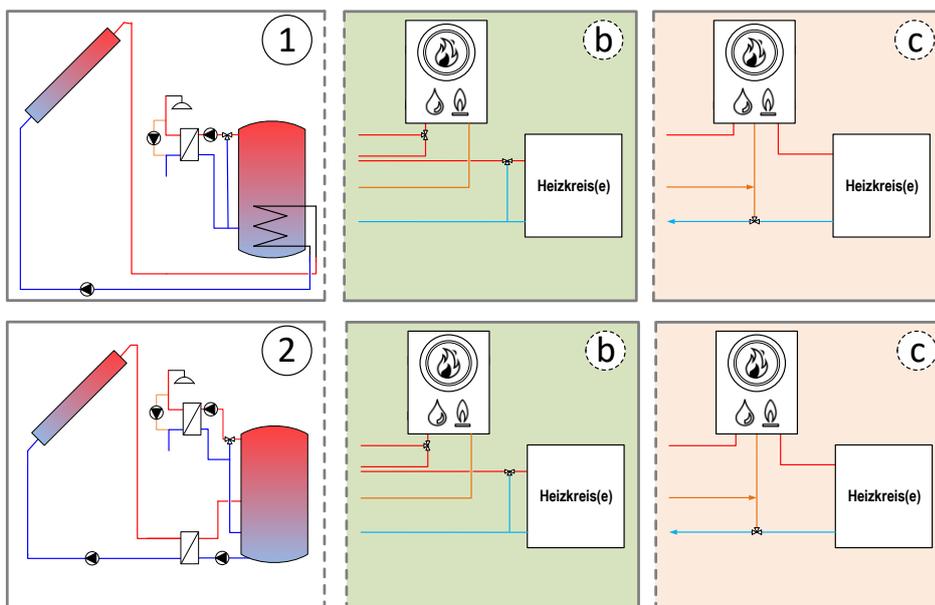


Abbildung 1-2 Kombisysteme 1b, 1c und 2b, 2c

Die Systeme 1 und 2 (b/c) bilden Unterschiede in der Art der Einbindung der Solarwärme ab, siehe Abbildung 1-2. Während Nr. 1 einen internen Wärmeübertrager (WÜT) im Speicher

FSC-METHODE

vorsieht, kommt bei Nr. 2 ein externer Wärmeübertrager (inkl. zugehörigem Sekundärkreis) zum Einsatz. Die Trinkwarmwasser-Bereitung (TWW) geschieht in beiden Fällen über eine externe Frischwasserstation. Die Buchstaben b/c² kennzeichnen die verschiedenen Anbindungen der Nach- und Raumheizung. System b sieht den Parallelen Anschluss aller Teilsysteme an den Speicher vor und Variante c stellt die „Rücklaufanhebung“ (RLA) dar.

Nr. 3 (Abbildung 1-3) ist ein weiteres Standard-System, bei dem die TWW-Erzeugung jedoch nicht über eine Frischwasserstation, sondern über einen innenliegenden Rohrwendel-WÜT über die gesamte Speicherhöhe geschieht:

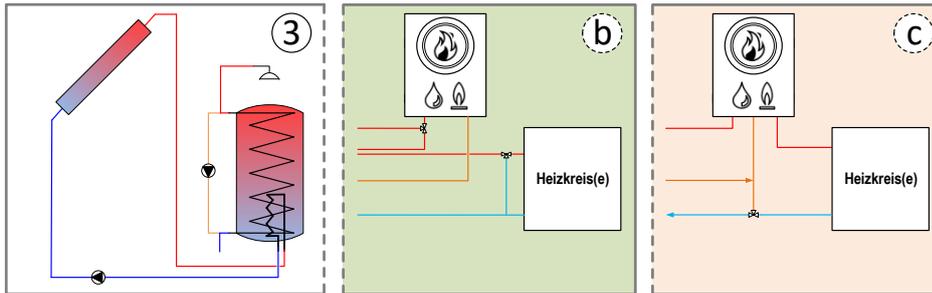


Abbildung 1-3 Kombisystem 3b, 3c

Nr. 4 (Abbildung 1-4) kennzeichnet das untersuchte Standard-System zur solaren TWW-Bereitung. Das Anlagenkonzept verfügt über einen Trinkwarmwasser-Speicher, die Nachheizung und der Kollektorkreis sind jeweils über interne WÜT angeschlossen.

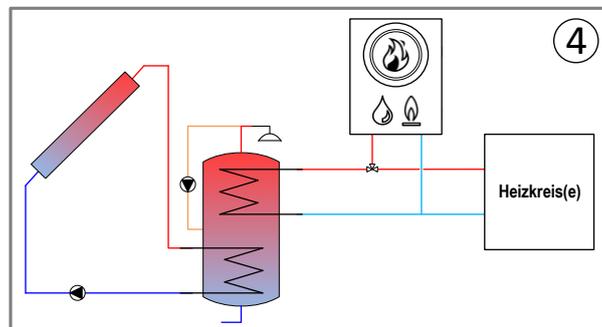


Abbildung 1-4 TWW-System 4

Das Standard-System der SOLVIS GmbH mit SOLVISMax-Speicher ist mit Nr. 5 abgebildet, siehe Abbildung 1-5. Die TWW-Bereitstellung wird hier über eine Frischwasserstation realisiert. Der Kollektorkreis ist über einen externen WÜT eingebunden. Ein Besonderheit dieses Systems ist das Speicherkonzept. Sowohl die Solarwärme als auch der Rücklauf des Heizkreises werden dem Speicher über Schichtladelanzen temperaturschichtoptimiert zugeführt. Weiterhin besonders ist der in den Speicher integrierte Brenner.

² Zunächst war ein weiteres System „a“ geplant. Dieses entsprach jedoch eher der solaren TWW-Unterstützung in größeren Anlagen und wurde daher in Absprache mit den Projektpartnern mit niedrigerer Priorität versehen.

FSC-METHODE

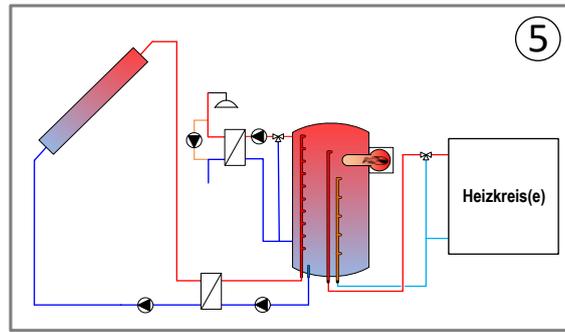


Abbildung 1-5 Kombisystem 5

1.3.2 Automatisierte Parametervariationen – Softwaretool und Vorgehensweise

Die Methodenentwicklung für das FSC-Verfahren basiert auf dynamischen TRNSYS Jahressimulationen der in 1.3.1 dargestellten Hydrauliken. Unter Berücksichtigung der möglichen Variationsparameter (Hydraulik, Standort, Last, Kollektorfläche, Nachheiztemperatur, Speichergröße u. –wärmedämmstandard, ...) ergibt sich somit eine Vielzahl erforderlicher Jahressimulationen. Aus diesem Grund wurde zunächst ein Softwaretool entwickelt, welches es ermöglicht, Simulationen anhand vorgegebener Parametervariationen zu starten und die Ergebnisse im Anschluss zu archivieren und auszuwerten.

Ein Hauptelement der Softwarelösung ist der **SimulationHandler** (siehe Abbildung 1-6). Im SimulationHandler werden die zu variierenden Parameter (und deren Ausprägungen) sowie das Vorlagendeck als Input spezifiziert. Der enthaltene **TRNSYS DeckWriter** schreibt bzw. erstellt basierend darauf die jeweiligen TRNSYS-Decks und ruft die eigentliche TRNSYS-Simulation auf. Die Simulationsparameter und die Simulations-Ausgabewerte werden nach der Simulation in einer festgelegten Ordnerstruktur zusammen mit dem jeweiligen Simulationsdeck abgelegt und ggf. komprimiert.

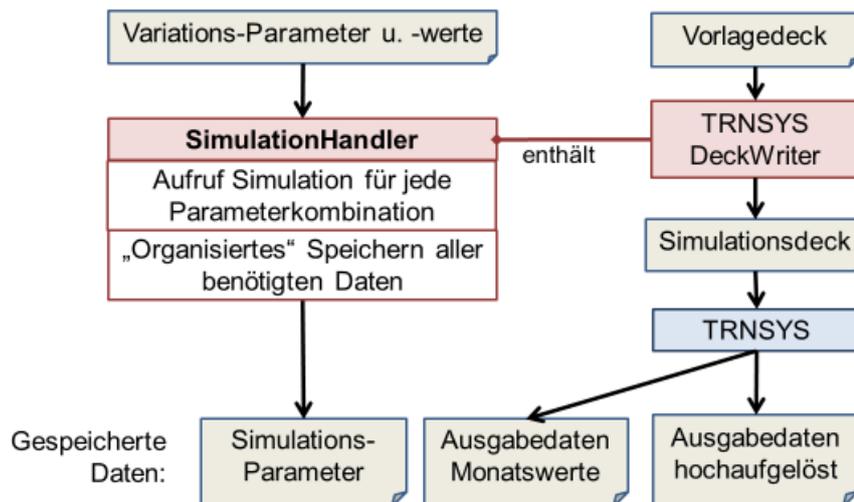


Abbildung 1-6: Softwaretool I - SimulationHandler

Je Aufruf des SimulationHandlers können entweder alle möglichen Kombinationen der Parameterausprägungen simuliert werden (kartesisches Produkt), oder eine zufällige Untermenge

bzw. eine semi-zufällige Untermenge davon³. Dies erlaubt, die Zahl der Simulationen zu reduzieren, die sonst mit Zahl der variierten Parameter und Ausprägungen stark steigt. Außerdem können bei Bedarf schon vorhandene Kombinationen aus der Ordnerstruktur ausgelesen und übersprungen werden.

Weiterhin ist es möglich, mehrere SimulationHandler parallel auszuführen, um Simulationen z.B. bei mehrkernigen Prozessoren parallel laufen zu lassen und somit erheblich Rechenzeit einzusparen.

Abbildung 1-7 verdeutlicht die weitere Vorgehensweise innerhalb des Tools. Der **OutFileGatherer** vereint die gespeicherten Parameter und die Ausgabedaten jeweils zu einem **DataSet**, welche wiederum in einer **DataSetCollection** zusammengefasst werden. Die DataSetCollection ermöglicht es, Berechnungen von Kennzahlen (FSC, f_{save} , ...) für die Jahresimulationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Referenzsysteme durchzuführen.

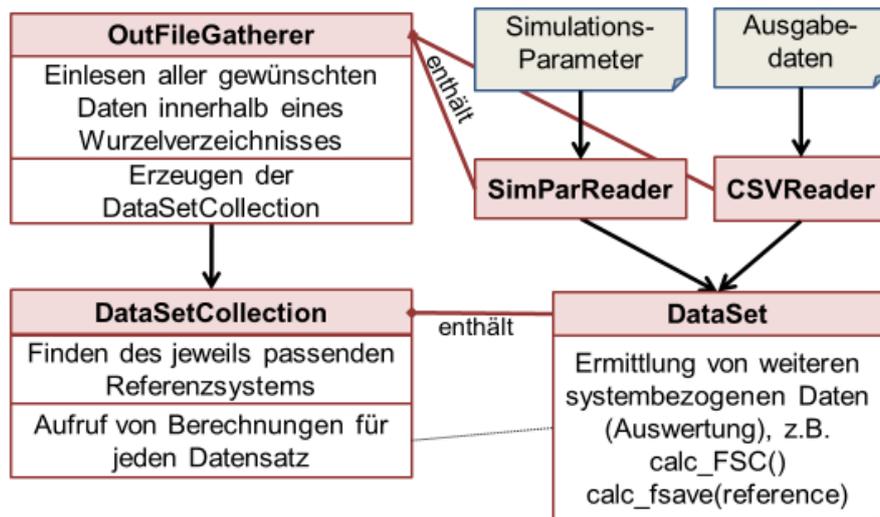


Abbildung 1-7: Softwaretool II – OutFileGatherer u. Datasets

Die DataSets bzw. DataSetCollections können einfach und platzsparend abgespeichert und später wieder geladen und weiterverwendet werden.

Abbildung 1-8 zeigt den **CorrelationMaker** als letzten großen Baustein des Software Tools. Wie der Name sagt, ist es Aufgabe des CorrelationMakers, die FSC- f_{save} -Korrelationen zu bestimmen. Hierbei können alle Datensätze einer DataSetCollection genutzt werden oder es werden Filter definiert, um die verwendeten Datensätze einzuschränken. Dies ist besonders nützlich, um z.B. die Einflüsse bestimmter Parameter sichtbar zu machen oder für die Betrachtung anderer Zusammenhänge auszublenden. Der CorrelationMaker bietet zusätzlich direkt Funktionen zur Visualisierung der jeweiligen Korrelationen an. So können verschiedene Kennzahlen übereinander geplottet und bspw. Einflussgrößen wie die Kessel-Nachheiztemperatur farblich gekennzeichnet werden.

³ d.h. nur für gewisse Parameter zufällig

FSC-METHODE

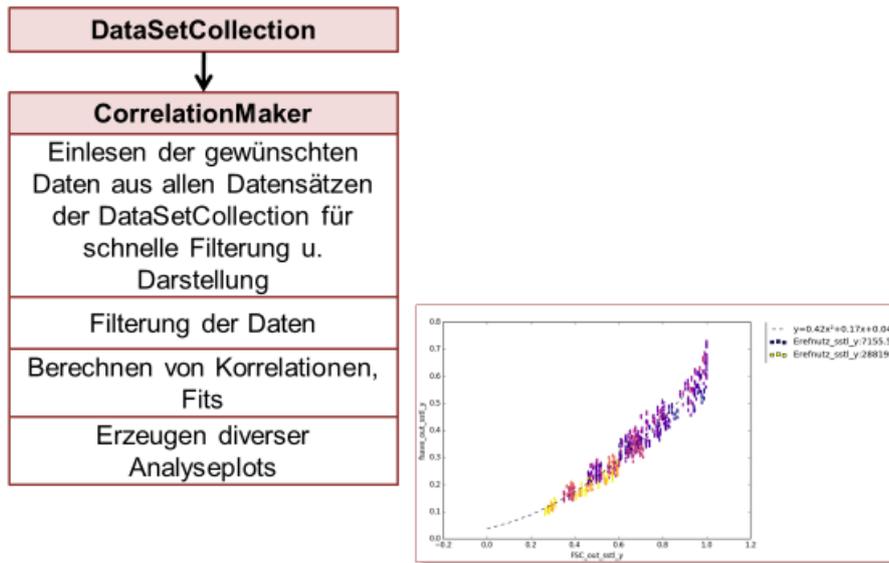


Abbildung 1-8: Softwaretool III – CorrelationMaker

1.3.3 Durchgeführte Parametervariationen und Gesamtstreuung

Für die Hydrauliken aus Kap. 1.3.1 wurden die Parameter gemäß Tabelle 1-1 variiert, wobei jedoch nicht alle theoretisch möglichen Parameterkombinationen abgedeckt wurden. Für alle Ausprägungen der Grundparameter Kollektorfläche u. -neigung, Gebäude, Standort u. TWW-Verbrauch wurden sämtliche Parameter mindestens einmal systematisch variiert. Die übrigen Parameter blieben dabei jeweils auf ihrem Standardwert fixiert. Darüber hinausgehende Ausprägungskombinationen wurden nur in einer zufälligen Untermenge simuliert, da ansonsten eine sehr hohe Zahl an Simulationen (> 60.000) nötig gewesen wäre.

Tabelle 1-1: Variationsparameter und -bereiche

Parameter	Variationsbereich
Hydraulik	6 Kombisysteme aus Kombinationen folgender Varianten: <ul style="list-style-type: none"> • Externer oder interner Solar-WÜT • Raumheizung über zentralen Speicher oder Rücklaufanhebung • Frischwasserstation oder interner TWW-WÜT • Mit oder ohne Schichtladelanzen und integriertem Brenner • 1 TWW-System mit internem Solar-WÜT im TWW-Speicher
Kollektorfläche	10 - 30 m ² (Kombi), 4 - 8 m ² (TWW)
Kollektorneigung	30 - 70°
Kollektortyp	Flachkollektor / Vakuumröhrenkollektor
Durchfluss	10 – 30 l/(h m ²)
Gebäudetyp	entspr. 30 - 100 kWh/m ² in DE-Würzburg, + wenig isoliertes Haus (nur für ES)
Standort	SE-Stockholm, DE-Würzburg, ES-Madrid
TWW-Bedarf	100 - 400 l/d
Spezifische Speichergröße	40 - 100 l/m ² , mind. 300 l (TWW 35-65 l/m ² , mind. 150l)
Nachheizvolumen	50 - 300 l
Nachheiztemperatur	55 - 75 °C
Isolierung Speicher (UA-Wert)	15 - 23 cm, zusätzlicher Aufschlagsfaktor 1 - 2

FSC-METHODE

Insgesamt wurden über 12.000 Kombisysteme und über 2.500 TWW-Systeme über ein Jahr simuliert, wobei die Zeitschrittweite sechs Minuten (bei Hydrauliken mit Konvergenzproblemen auch drei Minuten) betrug. Alle relevanten Temperaturen, Volumenströme und Signale wurden für jeden Zeitschritt aufgezeichnet und standen somit für weitere Auswertungen zur Verfügung.

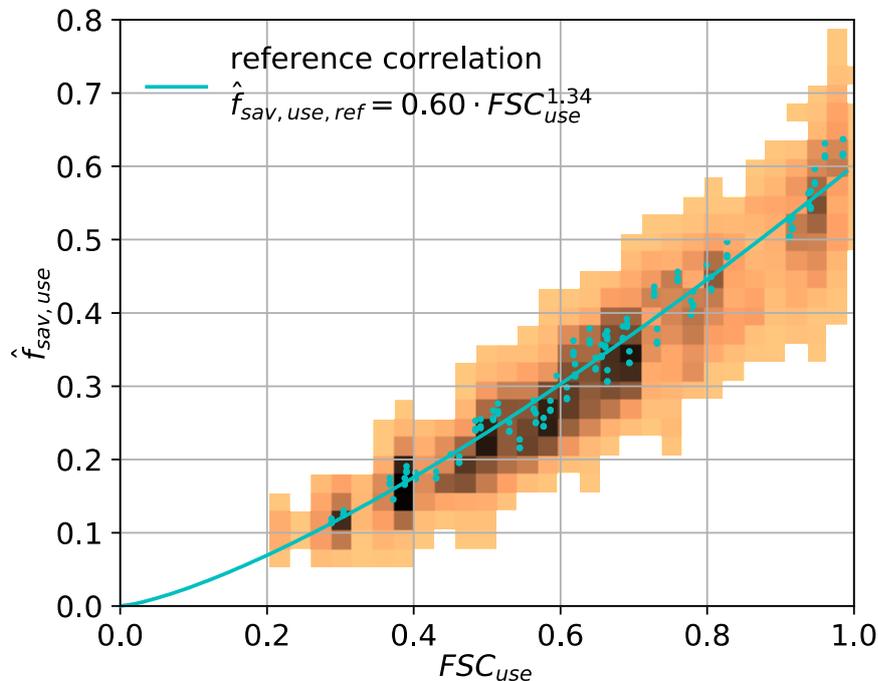


Abbildung 1-9 Gesamtstreuung der Korrelation bei breiter Parametervariation. In türkis eine Korrelation, die man erhält, wenn nur Kollektorfläche, -neigung, Gebäudeart u. Standort variiert werden

Wie Abbildung 1-9 zeigt, weist die FSC Korrelation bei derartiger Parametervariation jedoch eine große Streubreite auf, die nur noch sehr grobe Aussage bezüglich eines Fehlbetriebs ermöglichen würde: z.B. kann hier bei einem FSC von 60% das erwartete $\hat{f}_{sav,use,expected}$ zunächst nur auf den großen Bereich von ca. 15-45% eingegrenzt werden.

1.3.4 Einflussgrößen auf die Korrelationsgenauigkeit und Korrekturfunktionen

Um Einflüsse auf die Korrelation und ihre Streuung untersuchen zu können, wurden weitere Kenngrößen definiert (siehe Tabelle 1-2), welche die Auslegung oder Betriebsrandbedingungen einer Anlage charakterisieren.

Dabei ist es im ersten Schritt wichtig zu verstehen, welche Kenngrößen sich in den Daten bereits implizit mit FSC_{use} ändern. Dazu wurden als erster Anhaltspunkt die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Kenngrößen mit FSC_{use} berechnet (siehe Abb. 1-10).

Tabelle 1-2: Weitere betrachtete Parameter zur Anlagencharakterisierung

Parameter	Bedeutung
$FSC_{d,use}$	FSC auf täglicher Basis (tägliches Minimum)
$SLR_y = H_{t,y} A_{col,ap} / E_{ref,use,y}$	Jährliches Solar-Last-Verhältnis

FSC-METHODE

$SLR_{m,max} = \max_m(SLR_m)$	Maximales monatliches Solar-Last-Verhältnis im Jahr
$Q_{dhw,y}/E_{ref,use,y}$	Anteil Wärmebedarf TWW+Zirkulation (TWW @ 45°C)
$x_{dhw} = \frac{Q_{dhw,y}}{E_{ref,y}} \cdot \frac{1}{0.10 + 0.29 \cdot FSC_{use}}$	Anteil Wärmebedarf TWW+Zirkulation, relativ zum FSC-Trend
$v_{store} = V_{store}/A_{col,ap}$	Spezifisches Speichervolumen bzgl. Kollektoraperturfläche
$V_{aux}/V_{dhw,d}$	Nachheizvolumen Speicher bezogen auf mittleres tägliches TWW-Zapfvolumen
$x_{UA,store} = UA_{store} \cdot \frac{K}{W} \cdot \frac{1}{1.4 \cdot (2.44 + 3.19 V_{store} m^{-3})}$	Wärmedurchgang Speicher, relativ zu einem größenabhängigen Referenzwert
β	Kollektorneigung
$\Delta\beta$	Abweichung Kollektorneigung von optimaler Kollektorneigung
\dot{m}_{soll}	Spezifischer Massenstrom Solarkreis (bzgl. Aperturfläche)
$\langle T_{col,m,on} - T_{amb} \rangle_y$	Temperaturdifferenz zw. mittlerer Kollektortemperatur (bei Betrieb) und Umgebungstemperatur, gemittelt über ein Jahr
$\eta_{\Delta Tm,Gtm}$	Nomineller Kollektorwirkungsgrad bei mittlerer Temperaturdifferenz und Jahresmittel der Einstrahlung bei Betrieb
$x_{\eta,m,col} = \frac{\eta_{\Delta Tm,Gtm}}{0.53 - 0.06 \cdot FSC_{use}}$	Nomineller Kollektorwirkungsgrad relativ zum FSC-Trend
$x_{solv,pump,on,daylight,y}$	Jährlicher Anteil Betriebsstunden Solarpumpe
$\langle T_{flow,sh,on} \rangle_y$	Raumheizungs-Vorlauftemperatur (jährliches Mittel bei Betrieb)
$x_{SH,on,y}$	Jährlicher Anteil Betrieb Heizkreis

Es ist zum einen erkennbar, dass es zwischen FSC_{use} und $FSC_{d,use}$ (auf täglicher Vergleichsbasis analog zu Gleichung (1-3)) eine sehr starke Korrelation gibt. Da es also kaum einen Unterschied macht, ist es ausreichend, FSC_{use} auf Monatsbasis zu berechnen. Außerdem korrelieren FSC_{use} und das jährliche Solar-Last-Verhältnis SLR_y stark, sodass SLR_y gegenüber FSC_{use} wenig zusätzliche Informationen enthält.

Wie erwartet, können höhere FSC eher in niedrigeren Breitengraden und bei geringerem Raumheizwärmeverbrauch erreicht werden. Insbesondere zeigt sich auch, dass der TWW-Anteil im Wärmeverbrauch tendenziell mit FSC_{use} steigt und der mittlere Kollektorwirkungsgrad mit FSC_{use} tendenziell sinkt.

Da sich die letztgenannten Kenngrößen im Nachfolgenden auch als einflussreich auf die Abweichung erwiesen, wurden für diese lineare Trends (mit FSC_{use}) gefittet. Die Trends dienen dann als FSC_{use} -abhängige Normierung, um möglichst unkorrelierte Parameter zu erhalten (siehe x_{dhw} und $x_{\eta,m,col}$ in Tabelle 1-2).

FSC-METHODE

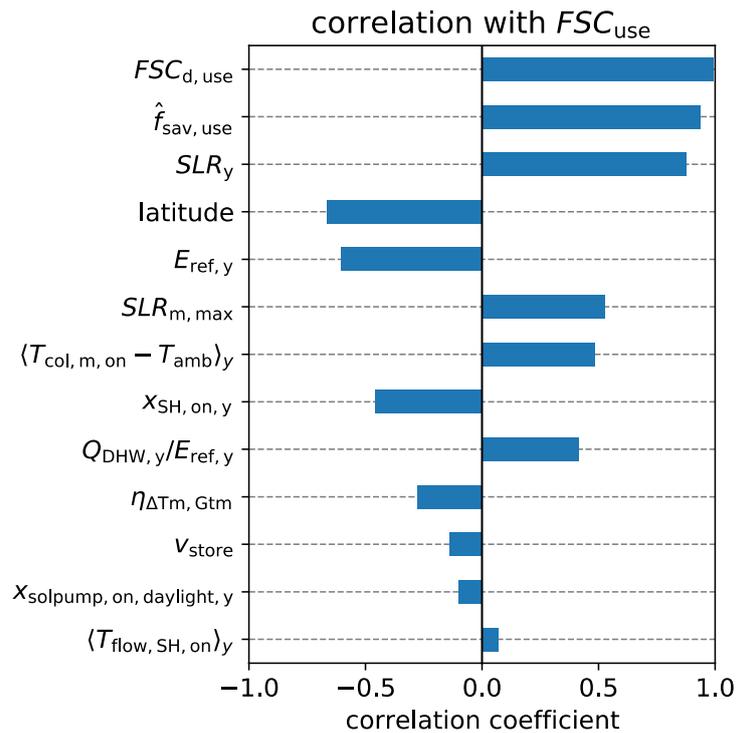


Abb. 1-10 Implizite Abhängigkeit von FSC für einige Kenngrößen. Je länger der Balken ist, desto eindeutiger ist eine Abhängigkeit.

Die wichtigsten Parameter mit Einfluss auf die Abweichung von der FSC-Korrelation wurden ebenfalls über die Korrelation der relativen Residuen mit den einzelnen Kenngrößen ermittelt, siehe Abb. 1-11.

Während der Korrelationskoeffizient zeigt, wie eindeutig eine Abweichung mit einem Parameter zusammenhängt, sagt er nichts über die absolute Größe der Abweichung aus. Deshalb wurde z.B. der jährliche Anteil der Betriebsstunden der Solarkreispumpe nicht als Korrekturparameter aufgenommen, da der Einfluss zwar eindeutig, aber insgesamt gering war. Da sich nach einer Korrektur die Korrelationskoeffizienten ändern können, ist es sinnvoll, letztere nach Anwenden einer Korrektur erneut zu ermitteln.

Als wichtigste Korrekturgrößen stellten sich letztlich Kenngrößen heraus, die mit folgenden Parametern zusammenhängen:

- Nomineller Kollektorwirkungsgrad bei mittlerer Temperaturdifferenz und Einstrahlung (bei Betrieb)
- TWW-Anteil am Gesamtenergiebedarf
- Nachheizvolumen und -temperatur
- Speichergröße und -isolierung

Als weiteres Ergebnis bleibt zu erwähnen, dass Kollektorfläche und -neigung, Gebäudetyp und Gesamtwärmeverbrauch sowie die Anlagenhydraulik fast keinen systematischen Einfluss auf die Abweichungen gegenüber der Korrelation hatten. Damit bestätigt sich die grundsätzliche Idee und Vorgehensweise der FSC-Methodik und es kann für alle Hydrauliken eine gemeinsame Korrelation genutzt werden.

FSC-METHODE

Auch ist erkennbar, dass es zwar Korrelationen gibt, aber keine davon sehr eindeutig (d.h. mit hohen Korrelationskoeffizienten). Das bedeutet, dass es immer eine Streuung gibt, die nicht durch (globale) Korrekturfunktionen abgebildet werden kann.

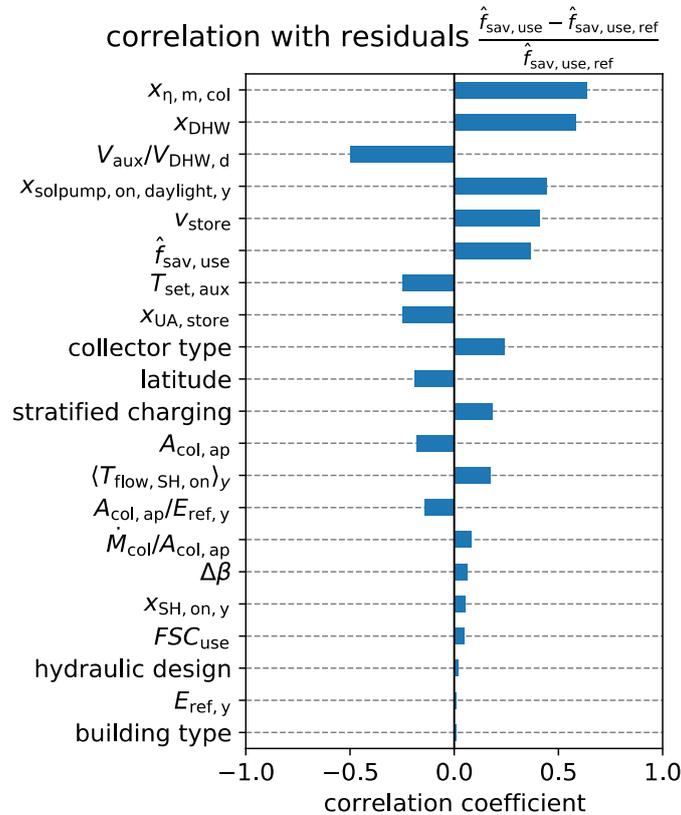


Abb. 1-11 Korrelationskoeffizienten für die Korrelation zwischen relativem Residuum und einigen Kenngrößen

Um für die einflussreicheren Kenngrößen Korrekturterme zu finden, wurde ein einfacher Ansatz gewählt, bei dem eine Basiskorrelation mit FSC (in Form einer Potenzfunktion) mit einem Korrekturfaktor multipliziert wird. Der Korrekturfaktor ist seinerseits das Produkt von Einzelfaktoren, die zu den einzelnen einflussreichen Kenngrößen gehören:

$$\hat{f}_{sav, use} = c_0 \cdot FSC^{c_1} \cdot F_{tot} = c_0 \cdot FSC_{use}^{c_1} \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot \dots \quad (1-7)$$

Die Koeffizienten können nach Logarithmieren durch lineare Regression gewonnen werden. Der Ansatz mit Potenzfunktionen erfordert positive Wertebereiche und es können nur monotone Funktionen repräsentiert werden. Außerdem sollte der Wert für typische bzw. „normale“ Parameterausprägungen bei 1 liegen, damit es sich um einen „Korrektur“-Faktor handelt. Dafür wird bei der Regression automatisch die Summe der relativen Residuen minimiert und nicht die der absoluten Residuen. Da die FSC-Korrelation ebenfalls mittels einer Potenzfunktion dargestellt wird, kann die beste Abhängigkeit von FSC gleichzeitig optimiert werden. Für quadratische Funktionen und Potenzfunktion ergeben sich dabei (für die mittlere Korrelation über alle Datenpunkte) sehr ähnliche Kurven mit vernachlässigbaren Unterschieden.

Vor der Regression wurden fehlerhafte bzw. nicht sinnvolle Parameterkombinationen ausgefiltert. Die Regression lieferte dann folgende Basiskorrelation:

FSC-METHODE

$$\hat{f}_{sav,use} = 0.567 \cdot FSC_{use}^{1.32} \cdot F_{tot} \quad (1-8)$$

mit dem Gesamtkorrekturfaktor

$$F_{tot} = F_{DHW} \cdot F_{Vaux} \cdot F_v \cdot F_{\eta m} \cdot F_{Tset,aux} \cdot F_{UA,store} \quad (1-9)$$

wobei

$$\begin{aligned} F_{DHW} &= \left(\frac{Q_{DHW,y}}{E_{ref,y}} \cdot \frac{1}{0.10 + 0.29 \cdot FSC_{use}} \right)^{0.15} \\ F_{Vaux} &= \left(\frac{V_{aux}}{V_{DHW,d}} \right)^{-0.07} \\ F_v &= \left(\frac{v_{store}}{0.080 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2_{ap}}} \right)^{0.09} \\ F_{\eta m} &= 1 + 0.49 \left(\frac{\eta_{m,col}}{0.53 - 0.06 \cdot FSC_{use}} - 1 \right) \\ F_{Tset,aux} &= 1 - 0.009 \frac{1}{\text{K}} \cdot (T_{set,aux} - 65^\circ\text{C}) \\ F_{UA,store} &= 1 - 0.17 \cdot \left(\frac{F_R \cdot UA_{store,real} \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}}{1.4 \cdot (2.44 + 3.19 \cdot V_{store} \text{m}^{-3})} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1-10)$$

Dabei wurden Funktionen wieder linearisiert, wenn sie nahezu lineares Verhalten aufwiesen. Abb. 1-12 zeigt die Verteilungen der relativen Residuen, also der relativen Abweichungen der simulierten fehlerfreien $\hat{f}_{sav,use}$ von den aus der Korrelation ermittelten $\hat{f}_{sav,use,expected}$. Die Streubreite kann durch die Korrekturterme ungefähr halbiert werden, auf -15% bis +13% (relativ) bzgl. $\hat{f}_{sav,use}$. Eine weitere stichprobenartige Analyse der Systeme mit großen negativen Abweichungen zeigte außerdem, dass es sich hier um Systeme handelt, die unpassende Parameterkombinationen aufwiesen (Größe und Verbrauch sehr unterschiedlich, oder hohe Nachheiztemperatur und deutlich zu großes Nachheizvolumen). Deshalb darf und sollte ein Leistungsindikator in diesen Fällen legitimerweise ein schlechteres Ergebnis ermitteln und die gegenüber einem angepassten System deutlich niedrigere Gesamteffizienz anzeigen. Durch stärkere Eingrenzung der erlaubten Parameterkombinationen können größere Abweichungen weiter ausgefiltert werden, sodass 95% der Systeme im Bereich -11% bis +13% liegen (schwarze Verteilung Abb. 1-12).

FSC-METHODE

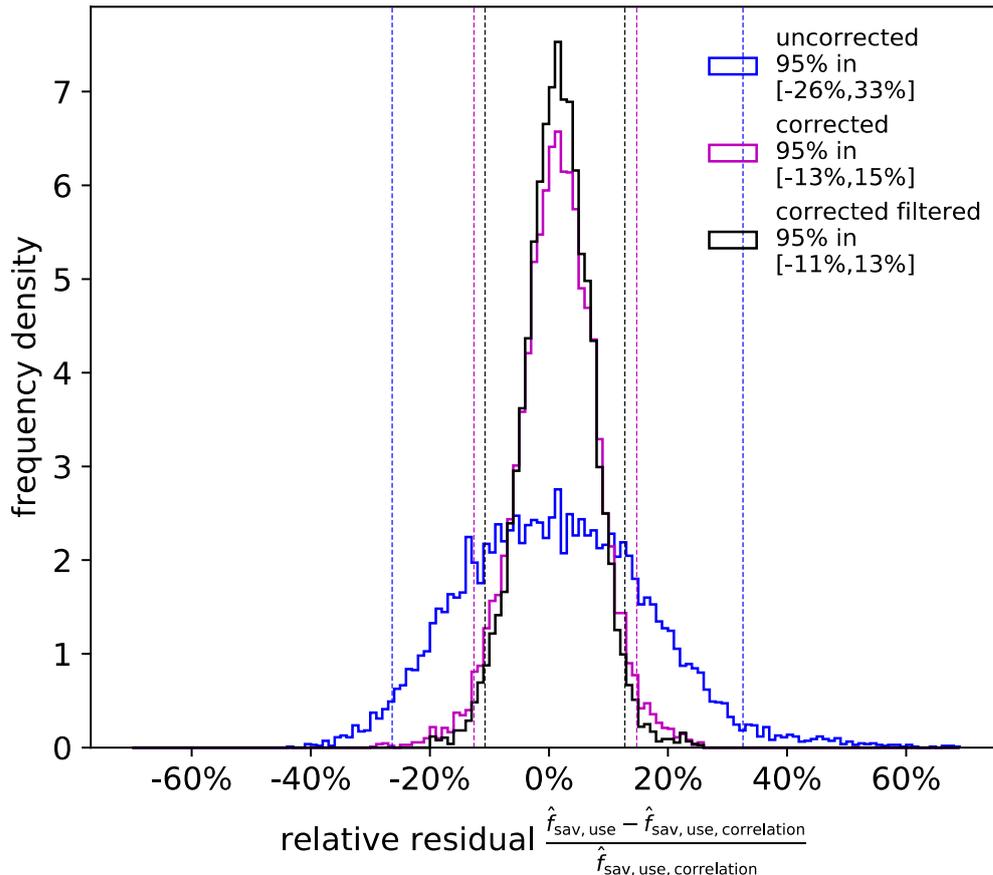


Abb. 1-12 Histogramme der relativen Residuen zur Korrelation ohne (blau) und mit (magenta) Korrektur. Die schwarze Verteilung ergibt sich bei etwas strengeren Grenzen für sinnvolle Kombinationen der Parameterausprägungen.

Die Korrekturterme verringern insgesamt die Streuung, aber nicht zwangsläufig für jedes einzelne System. Insbesondere für Systeme mit sehr kleinen Abweichungen kann die Abweichung nach der Korrektur größer sein als vor der Korrektur, beträgt aber typischerweise weniger als 5% (siehe Abbildung 1-13). Für Systeme mit sehr kleinen Kollektorflächen im Verhältnis zum Bedarf ($\frac{A_{col,ap}}{E_{ref,use,y}} < 0.7 \frac{m^2}{MWh}$) und damit kleinen FSC_{use} wird $\hat{f}_{sav,use}$ durch die Korrelation und Korrektur tendenziell unterschätzt. Auch werden die Auswirkungen sich gegenseitig verstärkender Effekte eher unterschätzt. Zur Bestimmung eines Referenzwertes für den Leistungsvergleich ist dies aber durchaus vorteilhaft. Z.B. bedeutet dies, dass bei sich verstärkenden negativen Effekten der Referenzwert zwar etwas sinkt, das System jedoch real noch weniger leisten wird. Hierdurch bekommt das System gerechtfertigt einen schlechteren Wert für den Leistungsindikator, weil ein besser angepasstes System auch deutlich höhere Einsparungen bringen würde. Für sich gegenseitig verstärkende positive Effekte hingegen bedeutet der niedrigere Referenzwert einen Bonuspuffer, der ebenfalls vertretbar ist, weil das System grundsätzlich überdurchschnittlich hohe Einsparungen aufweist.

Fast alle Korrekturfaktoren können automatisch aus höher aufgelösten (Zeitschritt < 1 h) Messdaten gewonnen werden. Für den nominellen Kollektorwirkungsgrad können auch typische Kollektorkennlinien verwendet werden. Hier geht es mehr um Unterschiede zwischen Kollektorbauarten (Flachkollektor oder Vakuumröhrenkollektor) und -betriebsweisen (eher

FSC-METHODE

niedrige oder hohe Temperaturdifferenzen zur Umgebung während des Betriebs) als um kleinere Unterschiede zwischen Kollektoren gleicher Bauart.

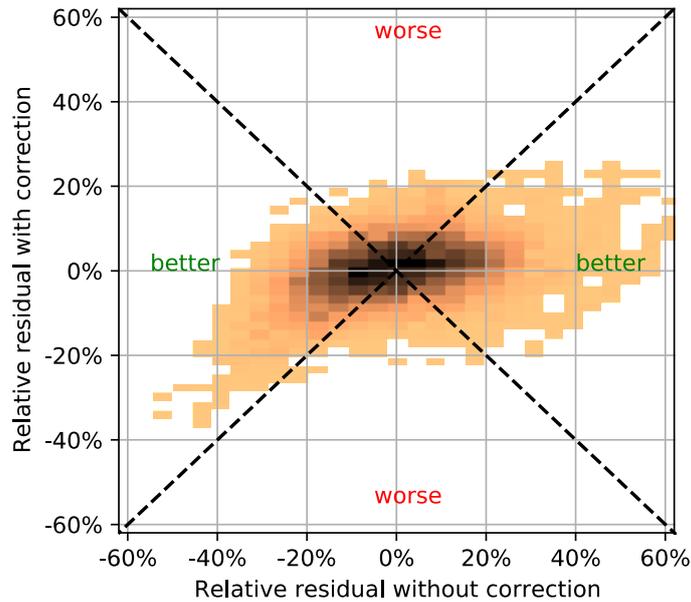


Abbildung 1-13 Residuen vor und nach der Korrektur für die simulierten Systeme. Die Korrekturterme reduzieren die Streuung insgesamt, für einzelne Systeme mit vorher kleinen Abweichungen können die Korrekturfaktoren aber die Abweichung auch vergrößern.

Tabelle 1-3 gibt einen Überblick über die Gültigkeitsbereiche der Korrekturfaktoren.

Tabelle 1-3: Gültigkeitsbereiche der Korrekturfaktoren

Parameter	Variationsbereich	Bereich Korrekturfaktor
$Q_{dhw,y}/E_{ref,use,y}$	0.09 ... 0.59	0.85 ... 1.14
x_{dhw}	0.5 ... 2	
$\eta_{\Delta Tm,Gtm}$	0.35 ... 0.68	0.86 ... 1.20
$x_{\eta,m,col}$	0.7 ... 1.3	
$x_{UA,store}$	0.44 ... 1.44	0.92 ... 1.10
$V_{aux}/V_{dhw,d}$	0.37 ... 4.0	0.91 ... 1.07
v_{store}	0.03 ... 0.16	0.88 ... 1.06
$T_{set,aux}$	55 ... 75	0.91 ... 1.09

1.3.5 Anwendbarkeit der FSC-Methode bei TWW-Systemen

Im Projektverlauf wurde ebenfalls untersucht, ob die FSC-Methode auf reine TWW-Systeme anwendbar ist. Grundsätzlich wurden hierzu zwei Ansätze verfolgt: Zum einen wurde der Raumheizverbrauch in (1-1) mitberücksichtigt. Dies führte aber eher zu kleinen FSC_{use} , für die die Korrelation tendenziell schlechter wird. Außerdem gibt es bei kleinen FSC_{use} Probleme durch die Messunsicherheiten (siehe Kapitel 1.4). Zu dem wurde der Raumheizverbrauch in (1-1) ignoriert und nur der TWW-Bedarf mitgerechnet. Hier ergibt sich jedoch eine schlechte Korrelation zwischen FSC_{use} und $\hat{f}_{sav,use}$, wie in Abbildung 1-14 dargestellt. Damit ist FSC_{use} für TWW-Systeme kein geeigneter Ausgangsparameter, um die Leistung zu beurteilen. Der Hauptgrund liegt darin, dass TWW-Systeme deutlich kleiner dimensioniert werden. Sie weisen somit deutlich weniger sommerliche Überschüsse auf. Dagegen ist FSC_{use} gerade mit Blick auf diese Überschüsse definiert und geht implizit davon aus, dass sämtlicher Wärmebedarf im Sommer immer solar gedeckt werden kann, auch weil die Speicher im Verhältnis zum sommerlichen Bedarf sehr groß dimensioniert sind.

Darüber hinaus zeigte Kapitel 1.3.4, dass für Kombisysteme für den TWW-Anteil eine Korrektur der Korrelation vorgenommen werden muss, diese gilt aber nicht für TWW-Anteile nahe eins. Wenn außerdem in FSC_{use} nur der TWW-Bedarf und Referenzspeicherverluste berücksichtigt sind, dann ist es nicht sinnvoll, das Ergebnis über FSC_{use} nochmals in Abhängigkeit des TWW-Bedarfs zu korrigieren. Das zeigt, dass FSC_{use} für TWW-Systeme kein geeigneter Parameter ist und die FSC-Methode damit hier leider nicht angewendet werden kann.

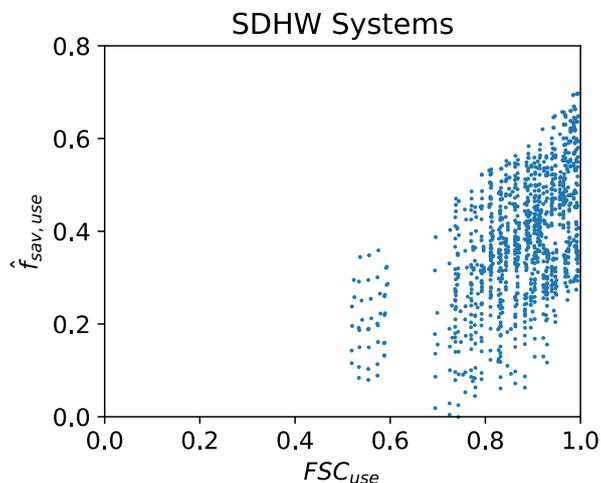


Abbildung 1-14 Korrelation für solarunterstützte TWW-Systeme.

1.3.6 Ansätze zur Verbesserung der Reaktionszeit

Zur Anwendung der FSC-basierten Ertragskontrolle eines solarthermischen Systems müssen Daten eines ganzen Jahres vorhanden sein. Da die Energiesummen monatlich verglichen werden und der Betrachtungszeitraum zwölf Monate umfasst, ist dies der Startpunkt für die Ertragskontrolle und -bewertung. Wenn bereits zwölf Monate an Anlagendaten vorhanden sind, können alle Kennzahlen monatlich neu berechnet werden. Es wird aber immer der Datensatz eines kompletten Jahres verwendet. Dies hat zur Folge, dass sich Anlagenfehler,

FSC-METHODE

selbst wenn sie zu einem Komplettausfall der Solaranlage führen, erst nach und nach bemerkbar machen, da z.B. in Monat eins nach Anlagenausfall immer noch elf Monate an fehlerfreien Daten verwendet werden. Diese Zeitperiode kann auch nicht ohne Weiteres verkürzt werden, da die FSC-Methode auf der saisonalen Verteilung von Strahlungsangebot und Heizwärmebedarf basiert. Ohne Anpassung der Methodik würde ein kürzerer Betrachtungszeitraum, bspw. für den gesamten Sommer, lediglich ein konstantes $FSC=1$ erzeugen. Für kürzere Evaluationszeiträume spielen demnach die Kapazität und der Ladezustand des Speichers und die Höhe der Überschusswärme eine größere Rolle. Um diese Faktoren zu berücksichtigen, wurden neue Kennzahlen definiert.

RFSC: Refined FSC erweitert die Methodik um einen theoretischen Speicherterm, welcher Energie von vorherigen Zeitschritten im Rahmen des thermischen Speichers rechnerisch umlegt, siehe Abbildung 1-15. Hierdurch kann der Betrachtungszeitraum beliebig verkürzt werden (Tage, Wochen, Monate). RFSC gibt damit das maximal mögliche $\hat{f}_{sav,use}$ in diesem Zeitraum an.

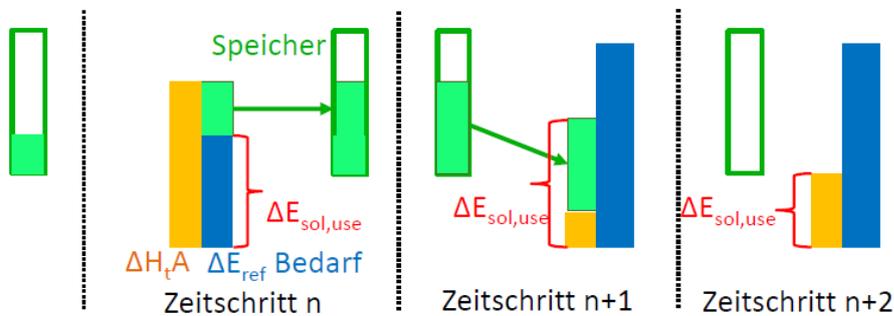


Abbildung 1-15: RFSC – Erweiterung der Methodik um einen theoretischen Speicherterm. Der Speicherterm hängt nur vom vorherigen Zeitschritt ab, nicht von ggf. gemessenen Speichertemperaturen.

Unter Berücksichtigung des flexiblen Betrachtungszeitraums ergibt sich RFSC aus der Summe der nutzbaren Solarenergie $E_{sol,use,\Delta t}$ der jeweiligen Zeitschritte (i) und der Referenzenergie $E_{ref,\Delta t}$ auf derselben Zeitbasis:

$$RFSC = \frac{E_{sol,use}}{E_{ref}} = \frac{\sum_i \Delta E_{sol,use,\Delta t}^{(i)}}{\sum_i \Delta E_{ref,\Delta t}^{(i)}} \quad (1-11)$$

Abbildung 1-16 zeigt die $\hat{f}_{sav,use}$ -RFSC-Punkte des Systems $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b) auf Jahresbasis. Wie zu erkennen ist, liegt die Streuung in einem ähnlichen Bereich, wie bei den $\hat{f}_{sav,use}$ -FSC-Korrelationen. Auf Jahresbasis liegt RFSC damit erwartungsgemäß im selben Bereich wie FSC. Durch die im Vergleich zur Ausgangsmethodik begrenzte Speicherkapazität liegt RFSC tendenziell etwas niedriger.

FSC-METHODE

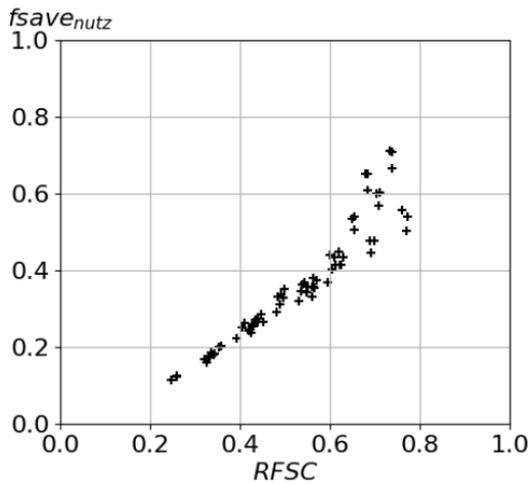


Abbildung 1-16: $\hat{f}_{sav,use}$ -RFSC-Punkte des Systems $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b) auf Jahresbasis

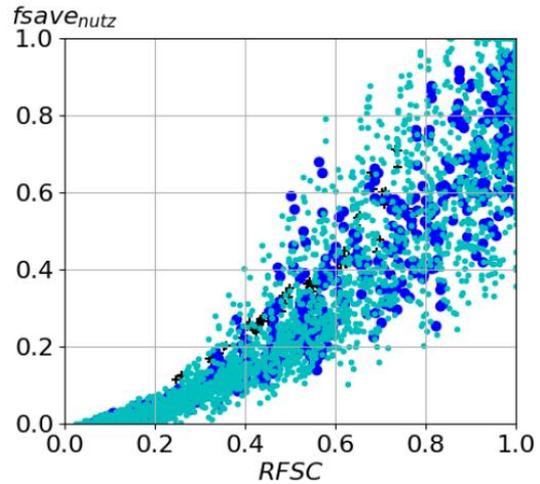


Abbildung 1-17: $\hat{f}_{sav,use}$ -RFSC-Punkte des Systems $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b) auf Monatsbasis (blaue Punkte) und auf Wochenbasis (türkise Punkte)

Werden die Kennzahlen mit kürzeren Evaluationsperioden berechnet, nimmt die Streuung deutlich zu, wie Abbildung 1-17 zeigt. Die Auswertung auf Monats- oder Wochenbasis ist mit der Anpassung $FSC \rightarrow RFSC$ somit noch nicht möglich. Insbesondere wird das Maß der Überdimensionierung in der bisherigen Methodik nicht berücksichtigt, welches aber für das Anlagenverhalten im Sommer entscheidend ist. Daher wurde eine weitere Kennzahl definiert:

SLR: Solar to load ratio gibt das Verhältnis von Einstrahlung auf die Kollektorfläche zu tatsächlicher Last an (mit Berücksichtigung des RFSC-Speicherterms):

$$SLR = \frac{H_t A + E_{store,0}}{E_{ref}} \quad (1-12)$$

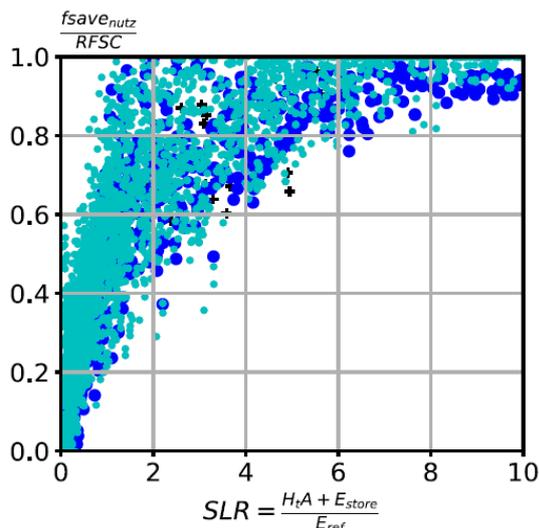


Abbildung 1-18: $\hat{f}_{sav,use}/RFSC$ -SLR-Korrelation für das System $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b), Streuung bei Variation sämtlicher Parameter auf Jahresbasis (schwarze Kreuze), Monatsbasis (blaue Punkte) und Wochenbasis (türkise Punkte).

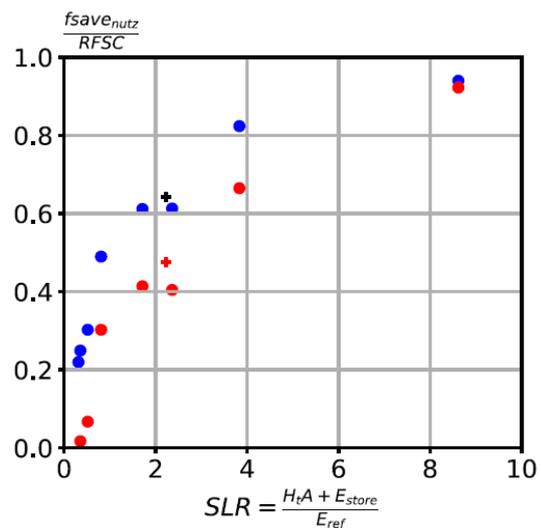


Abbildung 1-19: RFSC- & SLR-Korrelation für das System $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b) für 1 System auf Jahres- (Kreuz) und Monatsbasis (Punkte) in fehlerfrei (blau) und mit Fehler in der Zirkulationseinbindung (rot).

Da RFSC die maximal mögliche Energieeinsparung angibt, misst das Verhältnis $\hat{f}_{sav,use}/RFSC$, wie nah das tatsächliche $\hat{f}_{sav,use}$ am theoretischen Maximum ist. Trägt man dieses Verhältnis gegen SLR auf, ergibt sich der in Abbildung 1-18 dargestellte Zusammenhang. Es ist erkennbar, dass deutlich überdimensionierte Systeme (hohe SLR) nahe am theoretischen Maximum sind und Systeme mit $SLR < 2$ deutlich abfallen. Dieses Verhalten ist durch den Nutzungsgrad der Kollektoren zu erklären, der für nicht überdimensionierte Systeme bedeutsam wird, aber weder in SLR noch in RFSC eingeht. Es ist allerdings zu sehen, dass die resultierenden Punkte auch für kürzere Evaluationsperioden im gleichen Kurvenbereich liegen. D.h. die Werte für jährliche (schwarze Kreuze), monatliche (blaue Punkte) und wöchentliche (türkise Punkte) Bilanzierungen liegen in einem konsistenten Bereich, welcher nicht von der Dauer der Evaluationsperiode abhängt. Für ein Einzelsystem ist die Streuung von $\hat{f}_{sav,use}/RFSC$ vs. SLR deutlich geringer (Abbildung 1-19). Auch hier liegt der Jahreswert nahe der Kurve der einzelnen Monatswerte. Zusätzlich eingetragen sind die Jahres- und Monatswerte für ein fehlerhaftes System mit der Hydraulik $int_{sol} + int_{DHW}$ (3b), das eine Zirkulationsleitung installiert hat, die den Speicher durchmischt. Es ist zu sehen, dass sowohl der jährliche Wert als auch die einzelnen Monatswerte jeweils niedriger liegen. Nur bei sehr hohen SLR ist für die monatlichen Evaluationsperioden kein Unterschied mehr vorhanden, da aufgrund der Überdimensionierung und der entsprechend hohen Solarerträge trotz kontinuierlicher Durchmischung des Speichers die Nachheizung nicht anspringen muss. Wenn es also gelingt, für ein System die Abhängigkeit $\hat{f}_{sav,use}/RFSC$ von SLR genau genug vorherzusagen, könnte dies dazu benutzt werden, um die Energieeinsparungen auch auf kürzeren Bilanzzeiträumen zu überprüfen. Allerdings ist zu bedenken, dass die verwendeten Größen aus Messdaten kommen und mit Unsicherheiten behaftet sind. Da mit $\hat{f}_{sav,use}/RFSC$ eine weitere Verhältnisbildung vorgenommen wird, werden die Unsicherheiten gemäß Fehlerfortpflanzung noch größer. Es ist zu erwarten, dass für kleine, nicht überdimensionierte Systeme die Unsicherheiten hier ebenfalls nur eine sehr grobe Ertragsbewertung zulassen. Für solche Systeme spielen aber wiederum Betriebszustände, in denen die Solarerträge wegen mangelnder Last reduziert sind, eine untergeordnete Rolle, womit auch FSC nicht relevant ist. Stattdessen kann hier der Solarertrag unmittelbar zur Bewertung des Solarkreises herangezogen werden.

1.4 Auswirkungen der Sensorqualität auf die Aussagekraft der FSC-Methode

Grundlage für die Betrachtung der Sensorqualität und deren Auswirkungen bildet die analytische Betrachtung der Messunsicherheiten in den einzelnen Kreisen. Für die Abschätzung der resultierenden Unsicherheiten wurde zusätzlich eine Monte-Carlo-Analyse durchgeführt. Um einen fundierten Aussage treffen zu können, in welchem Bereich die resultierenden Messunsicherheiten für $\hat{f}_{sav,use}$ und FSC_{use} liegen und inwiefern diese die Aussagekraft des Leistungsindikators beeinträchtigen, wurden sämtliche relevanten Sensoren zunächst einzeln und anschließend in jeweils sinnvollen Kombinationen variiert bzw. verbessert. Zur Erläuterung der Ergebnisse werden die in Tabelle 1-4 aufgeführten Sensorik-Kombinationen genauer betrachtet.

FSC-METHODE

Tabelle 1-4: Ausgewählte Sensorik-Kombinationen

	Sensoren	Kosten
Unangepasste, günstige Sensorik	○ Temperatursensoren: Klasse B (alle Kreise)	290 € Sensoren;
	○ Volumenstromsensoren: günstig, z.B. Vortex (alle Kreise)	1.000 € mit Einbau
	○ Strahlung: aus Satellitendaten	
Maximale Genauigkeit	○ Wärmemengenzähler in allen Kreisen	510 € Sensoren;
	○ Strahlungsmessung mit Pyranometer	>1.500 € mit Einbau
Kosteneffiziente Sensorik	○ Kessel- und Raumheizkreis:	350 € Sensoren;
	• Temperatursensoren Klasse AA	1.060 € mit Einbau
	• geeichte Wasserzähler	
	○ TWW- und Zirkulationskreis: Temperatursensoren Klasse A	
	○ Strahlung mit einfachem Strahlungssensor	

Abbildung 1-20 zeigt die resultierenden Unsicherheitsbereiche im $\hat{f}_{sav,use}$ -FSC_{use}-Diagramm. Blau eingezeichnet ist die gemeinsame Korrelation der Kombisysteme. Die grüne Linie kennzeichnet den Bereich der (reduzierten) Streuung gegenüber der Korrelation. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Sensorik-Kombinationen sind als rote Linien bzw. gelbe Bereiche eingetragen. Ein System kann nur dann sicher als fehlerhaft identifiziert werden, wenn das gemessene $\hat{f}_{sav,use}$ im roten Bereich bzw. unterhalb der jeweiligen roten Linie liegt. Mit der unangepassten Sensorik („lowest cost“) ergibt sich die gepunktete Linie und der größte gelbe Unsicherheitsbereich. Die Funktionsfähigkeit kleinerer und besonders wirtschaftlich dimensionierter Systeme mit FSC_{use} ≤ 0,4 lässt sich hiermit nicht beurteilen, da der Indikator erst anschlägt, wenn fast keine Solarerträge mehr eingebracht werden. Für größere, überdimensionierte Systeme allerdings kann auch mit der günstigen Sensorik schon eine Aussage zur Leistungsfähigkeit getroffen werden.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Bereiche bzw. Linien für die Sensorik mit der maximal erreichbare Genauigkeit („best equipment“) und für die kosteneffiziente Sensorik („best cost-value ratio“) bereits sehr nah beieinander liegen. Die ausgewählte Sensor-Kombination der kosteneffizienten Sensorik ist demnach schon sehr gut auf die Kombisysteme abgestimmt.

FSC-METHODE

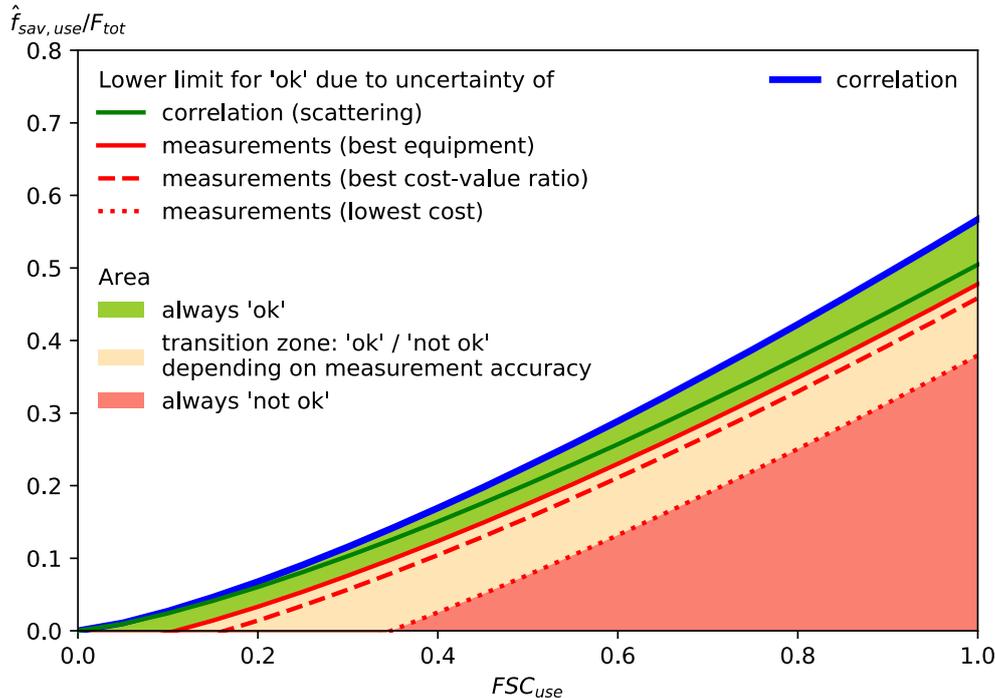


Abbildung 1-20: Einfluss der Messunsicherheit auf die Unsicherheitsbereiche der FSC-Korrelation.

Tabelle 1-5 fasst die Ergebnisse noch mal in der Anwendung an drei Beispielsystemen zusammen. Bei der kleinen Anlage ($\hat{f}_{sav,use,simulation}$ 18 %) kann ein Fehler über den FSC-Leistungsindikator erst angezeigt werden, wenn $\hat{f}_{sav,use,measured}$ um über 80 % abfällt bzw. unter 3,4 % liegt. Durch die kleineren Nachheizenergien (größere Kollektorflächen) und die geringeren Bedarfe (besserer Dämmstandard) bei großen FSC-Werten funktioniert die FSC-Methodik bei größeren und überdimensionierten Anlagen besser. So kann beim System „high“ ($\hat{f}_{sav,use,simulation}$ 50 %) auch mit der günstigen Sensorik schon eine Aussage getroffen werden, wenn die anteilige Energieeinsparung um 36 % relativ abfällt.

Tabelle 1-5: Detektionsbereiche ausgewählter Systeme bei den untersuchten Sensorik-Kombinationen

	Fehler im System (der jeweiligen Größe) erkennbar ab		
	„low“ (f_{sav} 18 %)	„mid“ (f_{sav} 34 %)	„high“ (f_{sav} 50 %)
Unangepasste, günstige Sensorik	$f_{sav} < 3,4 \%$ - 81 % relativ	$f_{sav} < 17,8 \%$ - 48 % relativ	$f_{sav} < 31,9 \%$ - 36 % relativ
Maximale Genauigkeit	$f_{sav} < 13,2 \%$ - 27 % relativ	$f_{sav} < 27,6 \%$ - 19 % relativ	$f_{sav} < 41,8 \%$ - 16 % relativ
Kosteneffiziente Sensorik	$f_{sav} < 11,3 \%$ - 37 % relativ	$f_{sav} < 25,7 \%$ - 24 % relativ	$f_{sav} < 39,8 \%$ - 20 % relativ

Werden in allen Kreisen Wärmemengenzähler und zusätzlich ein Pyranometer eingesetzt (Maximale Genauigkeit), ist eine Fehlerdetektion auch bei Kleinanlagen möglich. Zwar lässt die Breite des Unsicherheitsbereiches keine hochaufgelöste Aussage zu (z.B. 93 % des theoretischen Ertrags), ein Fehler ist allerdings sicher zu detektieren, wenn $\hat{f}_{sav,use,measured}$

des Systems „low“ unter 13,2 % sinkt bzw. relativ um 27 % abfällt. Für die größeren Systeme stellt es sich entsprechend besser dar.

Wie bereits in Abbildung 1-20 angesprochen, ist hier außerdem erkennbar, dass die kosteneffiziente Sensorik schon nah an der maximal erreichbaren Genauigkeit liegt. Der Leistungsindikator kann hier Leistungseinbußen beim System „low“ als Fehler einstufen, wenn $\hat{f}_{sav,use,measured}$ um > 37 % abfällt (System „mid“/„high“ ab -24/-20 %).

Die gewählte Sensorik im System hat also einen entscheidenden Einfluss auf die Detektionsbereiche des FSC-Indikators und bestimmt maßgeblich, ab welchen Ertragseinbußen ein Anlagenfehler erkannt werden kann. Mit einer sinnvoll ausgewählten Kombination an Sensoren (kosteneffiziente Sensorik) ist eine aussagekräftige Leistungsbewertung allerdings auch für kleinere und wirtschaftlicher dimensionierte Anlagen möglich. Für größere Anlagen mit mehr Überschüssen spielen auch die Messunsicherheiten eine geringere Rolle.

1.4.1 Sensorkosten

Neben der Betrachtung von Auswirkung der Sensorqualität auf die FSC-Detektionsbereiche, wurde eine Kostenrecherche durchgeführt, um auch eine Aussage zur Kosteneffizienz der jeweiligen Sensorkombination treffen zu können. Die im Folgenden aufgelisteten Preise sind Internetpreise inkl. MwSt, abgerufen Mitte 2019, und stellen damit in etwa auch die Einkaufspreise größerer Systemanbieter dar. Noch nicht enthalten sind hier die Kosten für Einbau in die jeweilige Anlage (inkl. ggf. notwendiger Fittings, etc.) und die Anbindung an die jeweilige Regelungstechnik. Hierfür ist ca. ein Faktor drei bis vier auf die Sensorkosten anzusetzen, um den Endkundenpreis abzuschätzen.

Weiterhin ist anzumerken, dass sich die Genauigkeiten der Durchflusssensoren und Wärmemengenzähler lediglich auf die Messung in Wasserkreisen bezieht. In Wasser-Glykol-Gemischen können die Messunsicherheiten und systematischen Fehler deutlich größer sein. Tabelle 1-6 zeigt die Kosten typischer Platin-Widerstandstemperatursensoren, da diese am häufigsten in Heizungssystemen verwendet werden. Andere Sensortypen (z.B. Thermoelemente) wurden nicht betrachtet. Wie zu sehen ist, gibt es zwischen Sensoren der Klasse B und Sensoren der Klasse AA kaum einen Preisunterschied (ca. 1 € pro Sensor), während sich die maximal erlaubte Abweichung drittelt. Sollen Temperaturen noch genauer gemessen werden, muss auf gepaarte Temperatursensoren zurückgegriffen werden. Diese sind allerdings mit einem Aufpreis von > 50 € sehr teuer.

Tabelle 1-6: Kosten Temperatursensoren, Internetrecherche

Temperatursensoren				
Klasse	B	A	1/3 B bzw. AA	Gepaart
Preis pro Paar in €	17,4	18,4	19,4	75,0
Genauigkeit $u_{\Delta T}$	< ± 1,0 K	< ± 0,46	< ± 0,34 K	< ± 0,2 K

FSC-METHODE

Tabelle 1-7 fasst die Kosten von gängigen Durchflusssensoren zusammen. Hierbei wurde ebenfalls eine Auswahl insbesondere nach Temperatureinsatzbereich getroffen. Viele weitere Sensortypen (z.B. Ringkolbenzähler, Ovalradzähler) sind in den Temperaturbereichen $> 60\text{ °C}$ nicht mehr zugelassen und wurden deswegen hier vernachlässigt. Als günstigste Sensoren werden in Heizkreisen oft Vortex-Durchflussmesser eingebaut, welche eine vergleichsweise hohe Ungenauigkeit aufweisen. Mit geeichten Wasserzählern kann ein Volumenstrom jedoch zu ähnlichen Kosten bereits deutlich genauer ermittelt werden. Höhere Genauigkeiten sind dann wieder nur zu deutlichen Mehrkosten mit kleinen magnetisch-induktiven Durchflussmessern (MIDs) oder Ultraschallsensoren zu erzielen.

Tabelle 1-7: Kosten Durchflusssensoren, Internetrecherche

Durchflusssensoren				
Typ	Vortex	Wasserzähler (geeicht)	MID	Ultraschall
Preis (ab) in €	60	70 (mit M-Bus)	450	400
Genauigkeit	$\pm 5\% \text{ MW}$	$\pm 2\% \text{ MW} < 30\text{ °C}$ $\pm 3\% \text{ MW} > 30\text{ °C}$	$\pm 1\% \text{ MW}$	$> \pm 2\% \text{ MW}$
T_{max} in °C	> 100	30 / 90	< 90	> 80

Bei Wärmemengenzählern (WMZ) die nach Measurement Instruments Directive zertifiziert sind (siehe Tabelle 1-8) ließ sich zwischen verschiedenen Genauigkeitsklassen kein Preisunterschied erkennen. Durch die hohen Anforderungen an die Genauigkeit werden in WMZ nur gepaarte Temperatursensoren mit Abweichungen der Temperaturdifferenz $< 0,2\text{ K}$ eingesetzt. Die zusätzliche maximale Unsicherheit des Rechenwerkes, ebenfalls festgelegt durch die DIN EN 1434, ist hier zwar angegeben, wird aber im Folgenden nicht berücksichtigt. Da in den Alternativen lediglich mit Einzelsensoren gerechnet wird und die Anbindung an den Regler und die Umsetzung der Wärmemengenzählung im Regler sehr unterschiedlich sind, wären die Ergebnisse sonst nur sehr eingeschränkt vergleichbar.

Tabelle 1-8: Kosten Wärmemengenzähler, Internetrecherche

Wärmemengenzähler (geeicht)	
Preis (ab) in €	150 (mit M-Bus) [Klasse 2 oder 3]
Genauigkeit	Temperatursensor $\pm 0,1..0,2\text{ K}$ bzw. $\pm 1..3,5\%$ Durchflusssensor Klasse 2 (Ultraschall): $\pm 2..2,5\% \text{ MW}$ [max. 5 % MW] Klasse 3 (Flügelrad): $\pm 3..3,5\% \text{ MW}$ [max. 5 % MW] Rechenwerk max. 1,5 % (der thermischen Energie)
T_{max} in °C	> 90

1.4.2 Methodisches Vorgehen Messunsicherheiten

Grundlage zur Berechnung der Ungenauigkeiten ist die Betrachtung stochastischer und systematischer Messfehler.

Für die **stochastischen Unsicherheiten** gilt, dass sie in jedem Zeitschritt unabhängig von anderen Zeitschritten und stochastisch um den Messmittelwert verteilt sind. Für die einfache Summe der Energien über einen Zeitraum von N Zeitschritten folgt somit:

$$u_{Q_{\text{Summe}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_{Q_i}^2} \quad (1-13)$$

Durch die Summenbildung über längere Zeiträume bzw. Messpunkte, wie z.B. Monate oder Jahre, verringert sich der Einfluss der stochastischen Fehler auf die Gesamtunsicherheit einer Energiesumme stark. Dieser Effekt kann an dem Fall veranschaulicht werden, wenn sich die Absolutwerte der Unsicherheiten der einzelnen Zeitschritte nicht gravierend voneinander unterscheiden:

$$u_{Q_1} = u_{Q_2} = \dots = u_{Q_i} .$$

Hiermit ergibt sich die Gesamtunsicherheit einer Monatssumme zu:

$$\Rightarrow u_{Q_{\text{Summe}}} \approx \sqrt{N} \cdot u_{Q_i} . \quad (1-14)$$

Während die Energie über N Zeitschritte aufsummiert wird, wächst die Unsicherheit nur mit dem Faktor \sqrt{N} . Die mittlere Unsicherheit im Zeitschritt ergibt sich auf diese Weise zu $(1/\sqrt{N}) \cdot u_{Q_i}$.

Im Gegensatz hierzu schwanken die gemessenen Werte bei **systematischen Fehlern** nicht stochastisch um ihren Mittelwert, sondern weichen in jedem Zeitschritt konstant in die gleiche Richtung ab. Die Gesamtabweichung der Temperaturdifferenz und der Wärmemenge im einzelnen Zeitschritt ergeben sich weiterhin nach (1-13). Bei voneinander unabhängigen Messgrößen, wie z.B. T_{VL} und T_{RL} bzw. ΔT und \dot{V} , kann davon ausgegangen werden, dass die systematischen Messfehler sich teilweise kompensieren. In diesen Fällen wird die kombinierte Unsicherheit nach Gaußscher Fehlerfortpflanzung gerechnet werden. Im Gegensatz zu Formel (1-13) wird die Gesamtunsicherheit der Energiemenge (summiert über alle Zeitschritte) allerdings als einfache Summe der einzelnen Unsicherheiten gebildet:

$$u_{Q_{\text{Summe,sys}}} = \sum_{i=1}^N u_{Q_{i,sys}} \quad (1-15)$$

Der positive Effekt einer Summenbildung entfällt hier also und die Messunsicherheiten müssen mit aufsummiert werden.

Die **Zusammenführung der stochastischen und systematischen Messunsicherheiten** geschieht im Anschluss nach Fehlerfortpflanzung:

$$u_{Q_{\text{Summe,ges}}} = \sqrt{u_{Q_{\text{Summe,sys}}}^2 + u_{Q_{\text{Summe,stoch}}}^2} \quad (7)$$

1.4.2.1 Ergebnis der analytischen Betrachtung der einzelnen Kreise

Der erste Schritt zur Bestimmung des Einflusses der Messunsicherheiten war die analytische Betrachtung der einzelnen Kreise. Mit der Bestimmung der einflussreichsten Sensoren konnte die Grundlage für die Identifikation einer kosteneffizienten Sensorik gelegt werden.

Die Detailbetrachtungen wurden zunächst anhand eines solaren Kombisystems (Typ 2b, siehe Abschnitt 1.3.1) in einem Einfamilienhaus in Würzburg mit einer Kollektorfläche von 20 m², einem TWW-Bedarf von 200 l/d und einem spezifischen Heizwärmebedarf von 60 kWh/(m²a) durchgeführt und im zweiten Schritt auf die Übertragbarkeit auf andere Kombisysteme geprüft.

Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass der Einfluss eines Sensors sich sehr gut über die relative Messunsicherheit abschätzen lässt. Ist also die Messunsicherheit im Vergleich zur Messgröße (Betriebswert) groß, schlägt sich das auch in der resultierenden Energie nieder. Für die einzelnen Kreise ergibt sich damit folgende Priorisierung:

- Kesselkreis: Haupteinfluss ΔT -Messung
- Raumheizkreis: Haupteinfluss ΔT -Messung
- TWW-Kreis: Haupteinfluss Volumenstrommessung

Weiterhin lässt sich zusammenfassen, dass der übergeordnete Einfluss eines Sensors immer dann groß ist, wenn die entsprechende Energie (Wärmemenge) einen wesentlichen Teil der Gesamtenergiebilanz des Systems bildet. So haben die Zirkulationsverluste aufgrund der kleinen auftretenden Temperaturdifferenzen oft eine große Messunsicherheit (z.B. 40 % der Jahressumme), da die Energie allerdings im Vergleich zum TWW-Verbrauch oder der Nutzenergie des Kessels klein ist, ist auch der Gesamteinfluss sehr begrenzt.

1.4.2.2 Monte-Carlo-Analyse

Bei der analytischen Betrachtung der einzelnen Kreise handelt es sich eher um eine Maximalfehlerabschätzung. Dies ist durchaus sinnvoll, um die Haupteinflussparameter zu identifizieren. Allerdings werden die resultierenden Unsicherheiten durch die Auswahl der systematischen Fehler als Extremwerte anhand der Grenzabweichungen jedoch deutlich überschätzt. Zusätzlich kann über die Berechnung auf diesem Wege kein realistischer Bereich der resultierenden Detektionsbereiche und Unsicherheit von $\hat{f}_{sav,use}$ oder FSC_{use} angegeben werden – diese ergeben sich aus zufälligen Sensorkombinationen mit unbekanntem systematischen Messabweichungen. Aus diesen Gründen wurde die Berechnung der Unsicherheitsbereiche in Abschnitt 1.4 numerisch über eine Monte-Carlo-Analyse (MCA) umgesetzt.

Hierbei werden im ersten Schritt die systematischen Messunsicherheiten der Sensoren jeweils unabhängig voneinander zufällig anhand einer Normalverteilung festgelegt. Als Standardabweichung für die Normalverteilung wird die halbe Messunsicherheit des jeweiligen Sensors angesetzt. Somit ist sichergestellt, dass 95,5 % der gewählten Unsicherheiten innerhalb der Grenzwerte liegen. Umgekehrt heißt dies auch, dass 4,5 % der Messfehler die jeweiligen Grenzwerte überschreiten und größere Abweichungen aufweisen. Mit dieser Unsicherheit der

Messtechnik werden im zweiten Schritt die Wärmemengen und die Systemkennzahl f_{sav} berechnet. Diese beiden Schritte werden sehr häufig wiederholt (ca. $n = 1.000$ Iterationen), bis der gleitende Mittelwert keine starken Schwankungen mehr aufweist. Durch die hohe Anzahl an Wiederholungen und die jedes Mal erneut zufällig ausgewählten Messunsicherheiten ergibt sich für die Systemkennzahlen eine aussagekräftige Häufigkeitsverteilung. Aus der Häufigkeitsverteilung können 68 % und 95,5 %-Quantile berechnet werden, die als Maß für die Unsicherheiten bei der Ermittlung von f_{sav} und FSC dienen.

1.5 Fazit FSC-Methodenentwicklung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Leistungsbewertung mittels FSC als Methodik für Kombisysteme grundsätzlich funktioniert. Mit Hilfe der Korrekturfunktionen ist die theoretische Korrelation ca. $\pm 11\%$ genau. Jedoch beschränken Messunsicherheiten der Sensoren die Gesamtgenauigkeit, v.a. für kleinere FSC, sodass die Sensorauswahl und -installation mit Bedacht durchgeführt werden sollte. Damit lässt sich zwar keine prozentgenaue Leistungsbewertung durchführen, aber größere Ertrags- und Effizienzeinbußen sind dennoch erkennbar. Vorteilhaft ist dabei, dass die Effizienz des Gesamtsystems betrachtet wird und die Überwachung damit unabhängig von der Fehlerursache anschlägt. Nachteilig sind jedoch die für Kleinanlagen nicht vernachlässigbaren Kosten für die Sensorik von knapp 1.000 € (inkl. Einbau). Außerdem reagiert der Indikator aufgrund des jährlichen Bilanzzeitraums nur träge und ist nur für Kombisysteme, nicht aber für reine TWW-Systeme gültig.

1.6 Überprüfung der FSC-Methode mit Messdaten

Die Entwicklung der FSC-/PF-Methodik erfolgte auf Grundlage von Simulationen, daher war eine Überprüfung der Ergebnisse mit Messdaten realer solarthermischer Kombianlagen vor einem Praxiseinsatz vorgesehen. In den folgenden Abschnitten 1.6.1 und 1.6.2 werden zunächst die für die Verifizierung der Methodik gesammelten Messdatenquellen sowie die Vorgehensweise bei der Vorverarbeitung und Aufbereitung der Daten vorgestellt. Die Verifikation der FSC-/PF-Methodik anhand der gesammelten und aufbereiteten Messdaten erfolgt in Abschnitt 1.6.3.

1.6.1 Datenbereitstellung

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Messdatenquellen identifiziert. Größtenteils handelte es sich dabei um Messdaten, die in vorhergehenden Forschungsprojekten gesammelt und ausgewertet wurden. Für die meisten Anlagen standen die Daten ausschließlich nicht als originale Rohdaten, sondern in bereits ausgewerteter Form als monatliche oder jährliche Wärmemengen vor. Neben dem Vorteil der Zeitersparnis bei der Aufbereitung der Messdaten für die Bestimmung von FSC und f_{save} ergab sich somit der Nachteil, dass die Vorgehensweise bei der Auswertung sowie eventuell im Auswertungszeitraum aufgetretene Fehler oder Probleme im Anlagenbetrieb oder Probleme bei der Messdatenerfassung nicht mehr nachvollzogen werden konnten. Auch wichtige Informationen zur Anlagenregelung standen nicht zur Verfügung. Insgesamt ist die Aussagekraft

der aus diesen bereits vorausgewerteten Messdaten gewonnenen Kennzahlen für die Verifizierung der in diesem Projekt entwickelten FSC-/PF-Methodik damit eingeschränkt.

1.6.1.1 Messdaten aus Projekt CombiSol

Die meisten verfügbaren Daten stammen aus dem IEE⁴-Projekt Solar Combisystems Promotion and Standardisation (CombiSol) aus dem Jahr 2010. Für alle unten aufgeführten Anlagen liegen monatliche Wärmemengen und umfangreiche Informationen zur Anlage wie Kollektorfläche, Speichervolumen, Anlagenhydraulik und Art und Leistung der Nachheizung vor:

- Deutschland: 4 Anlagen
- Österreich: 10 Anlagen
- Schweden: 7 Anlagen
- Frankreich: 10 Anlagen

Für die deutschen Anlagen sind detaillierte Messdaten und Informationen verfügbar, da diese Anlagen vom IGTE bzw. dem damaligen ITW/TZS betreut wurden. Insgesamt sind jedoch nur für 13 Anlagen Mess- bzw. Monatsdaten eines kompletten Jahres verfügbar, wie es für eine Bestimmung von FSC und f_{save} notwendig wäre. Die Daten für fehlende Monate wurden im Projekt CombiSol anhand eines im Projekt beschriebenen Verfahrens extrapoliert⁵.

1.6.1.2 Messdaten aus Projekt „Solar Combisystems“

Aus dem Altener Projekt „Solar Combisystems“ aus dem Jahr 2003 sind monatliche Wärmemengen und Informationen zu prinzipiell 23 Anlagen in Frankreich, Österreich, Dänemark, Niederlande, Italien und Deutschland verfügbar. Vier dieser Anlagen können jedoch nicht einer der in SolarCheck definierten Standardhydrauliken zugeordnet werden. Weitere zehn Anlagenhydrauliken können nicht eindeutig einer Standardhydraulik zugeordnet werden. Letztere Anlagen wurden der am besten passenden Standardhydraulik zugeordnet. Monatswerte stehen für insgesamt 14 der Anlagen zur Verfügung, für die restlichen Anlagen sind lediglich Jahreswerte verfügbar. Ähnlich wie bei den Daten aus dem Projekt CombiSol sind für die meisten Anlagen nur Daten einiger Monate in der Heizsaison verfügbar. Die Werte für die restlichen Monate wurden extrapoliert. Lediglich bei einer Anlage mit verfügbaren Monatswerten betrug der Zeitraum des Anlagenmonitorings ein komplettes Jahr.

1.6.1.3 Messdaten aus Projekt „Kombianlagen“ (ITW/TZS)

Über das zuvor beschriebene Projekt „Solar Combisystems“ hinaus stehen dem ITW/TZS detailliertere Messdaten und Messdatenanalyse einer der Kombianlagen zur Verfügung, die nach Änderung der Kesseleinbindung noch ein weiteres Jahr messtechnisch im Projekt

⁴ IEE steht für Intelligent Energy - Europe, dem Vorgänger des EU-Programmes „Horizon 2020“

⁵ Eine Beschreibung des Extrapolationsverfahrens findet sich im Deliverable D4.2 des CombiSol Projektes aus dem Jahr 2010: Guidelines for calculation of savings indicators, technical report of the CombiSol project, 34 p

„Kombianlagen – Solaranlagen zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung“ untersucht wurde.

1.6.1.4 Messdaten von Solvis und Resol

Vom Industriepartner Solvis wurden detaillierte Messdaten mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Min. für eine Anlage bereitgestellt. Die Messdatenerfassung läuft seit April 2016. Bis zum Zeitpunkt der Neuausrichtung des Projektes⁶ auf Algorithmenentwicklung wurden am IGTE lediglich die ersten 4 Monate der verfügbaren Messdaten ausgewertet. Eine Berechnung von f_{save} und FSC war bei diesen Messdaten aufgrund fehlender Messdaten für die Nachheizung nicht möglich.

Eine weitere vielversprechende Datenquelle schien zu Projektbeginn die Onlinedatenbank VBus.net des Projektpartners Resol zu sein. Wie sich bei einer genaueren Betrachtung gezeigt hat, waren diese Daten jedoch nicht für die Verifizierung in SolarCheck verwendbar, da die Monitoringdaten nur Informationen aus maximal zwei hydraulischen Kreisen bereitstellen. Generell ist eine Zuordnung der gewonnenen Messdaten durch eine fehlende Standardisierung bzw. fehlende Kennzeichnungspflicht durch die Anlagenbesitzer nicht möglich. Außerdem werden zumeist hauptsächlich Messgrößen aus dem Solarkreis gewonnen, welche zur Bestimmung von FSC und f_{save} nicht benötigt werden. Die zur Berechnung der Kenngrößen benötigten Verbrauchsdaten und Solarstrahlung sowie Informationen über Speichertemperaturen und Wärmeverluste des Speichers sind nicht verfügbar.

1.6.1.5 Weitere im Projekt untersuchte potentielle Messdatenquellen

- **Messdaten von co2online:** Die Beratungsgesellschaft co2online wurde angefragt, ob Messdaten aus dem Praxistest Solarthermie⁷ für SolarCheck zur Verfügung gestellt werden könnten. Die Rückmeldung war grundsätzlich positiv. Eine endgültige Zu- oder Absage seitens co2online wurde dem IGTE bis zum Projektende allerdings nicht erteilt.
- **Messdaten von Enercity/proKlima:** Beim SolarCheck-Projekttreffen am 27.02.2019 in Kassel wurden von Rainer Tepe Erfahrungen und Ergebnisse aus der proKlima Solarertragsförderung vorgestellt. Die Verfügbarkeit geeigneter Mess- und Anlagendaten für die Verifikation im Rahmen von SolarCheck wurde geprüft, das Ergebnis der Prüfung lag jedoch bis zum Zeitpunkt der Neuorientierung des Projektes nicht vor.

Abbildung 1-21 zeigt eine Übersicht der 52 im Projekt zur Verfügung stehenden Datensätze. Für 46 der Anlagen sind Monatsdaten oder Messdaten mit höherer Auflösung verfügbar. Lediglich für insgesamt 14 Anlagen sind Messdaten über den Zeitraum von mindestens einem Jahr vorhanden, nur für 2 dieser Anlagen liegen zeitlich hochaufgelöste Messdaten vor. Das im Projektantrag angestrebte Ziel, mindestens 10 geeignete Datensätze für die Verifikation

⁶ Ursprünglich war das Projekt SolarCheck stärker auf den FSC-Leistungsindikator fokussiert. Nachdem die Ergebnisse im Bereich der Methodenentwicklung und insbesondere die sich ergebenden Zusatzkosten eine breite Marktdurchdringung sehr unwahrscheinlich machten, wurde der Schwerpunkt des Projektes stärker auf die Algorithmenentwicklung gelegt.

⁷ <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/solarthermie/solarthermie-anlagen-im-test/>,

Homepage zuletzt aufgerufen am 25.04.2019

FSC-METHODE

jeder Standardhydraulik aus bestehenden Monitoringdaten zu bekommen, konnte somit nicht erreicht werden. Ursächlich hierfür ist primär die Tatsache, dass die von den Industriepartnern in der Antragstellung avisierten Messdatensätze überhaupt nicht oder nicht in der ursprünglich vorgesehenen Anzahl bereitgestellt werden konnten, da bei vorhandenen Anlagen meist für die Verifikation der FSC-/PF-Methodik essentielle Messdaten von Nachheizung, Heizkreisen und/oder Speicher nicht messtechnisch erfasst werden. Daher wurde zusätzlich zu den Messdaten realer Anlagen auf die im Folgenden vorgestellten „Semi-synthetischen“ Messdaten aus CTSS-Simulationen zurückgegriffen.

Einbindung Solarkreis / Einbindung (Nach-) Heizkreis(e)	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	
a	0	(A13), (A16) (2)	0	(A3), (A5), (A6), (A7), (A10), (A11), A19	S1 A1, A18	3	0	
b	C2, C3, C4, C5 4	(A8), A15 1 + (1)	A2a C8-16, C25-31 17					A4, (A9), A12, A14, A17 C1, C17 6 + (1)
c	C6, C7 2	0	A2b C19-24 6					

Abbildung 1-21: Übersicht der verfügbaren Messdaten. Die Abkürzungen indizieren jeweils die Herkunft der Daten: C - Projekt CombiSol, A - Projekt SolarCombisystems, S - Solvis. Die Gesamtanzahl der Messdatensätze ist für jede Standardhydraulik fett dargestellt, nicht eindeutig zuordenbare hydraulische Verschaltungen sind in Klammern gesetzt.

1.6.1.6 „Semi-synthetische“ Messdaten aus CTSS-Simulationen

Am IGTE bzw. ehemaligen ITW/TZS wurden zahlreiche Anlagenprüfungen nach der sogenannten CTSS-Methode durchgeführt. Die Abkürzung CTSS steht für Component Testing and System Simulation. Das CTSS-Prüfverfahren steht für Anlagen zur solaren Trinkwassererwärmung und solare Kombianlagen und ist in der europäischen Normenreihe EN 12977 standardisiert. Abbildung 1-22 zeigt den schematischen Ablauf einer CTSS-Prüfung. Das Verfahren besteht im Wesentlichen aus zwei Schritten, einer Prüfung der Hauptkomponenten des Systems zur Identifikation der charakteristischen Kennwerte bzw. Parameter nach standardisierten Normverfahren und die anschließende Implementierung des Gesamtsystems in einem Simulationsprogramm zur Jahressimulation des Gesamtsystems unter Referenzbedingungen.

FSC-METHODE

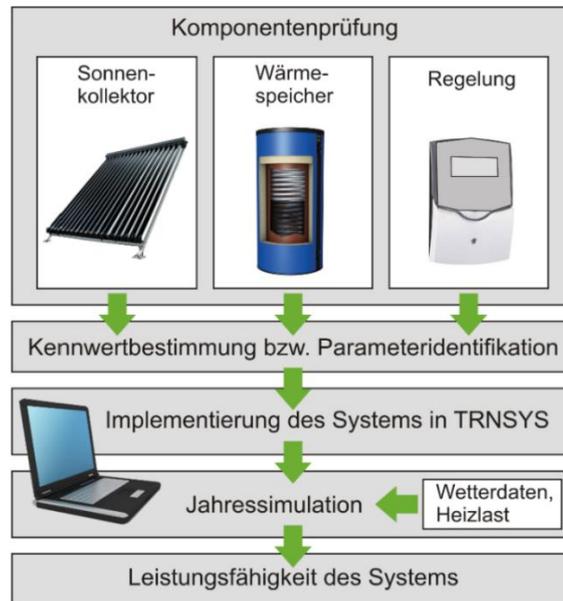


Abbildung 1-22: Prinzipieller Ablauf des CTSS-Verfahrens [2]

Simulationsdaten aus CTSS-Prüfungen können gewissermaßen als „semi-synthetische“ Messdaten betrachtet werden, da in TRNSYS reale Anlagenhydrauliken abgebildet werden und Komponentenparameter der zugehörigen, mit normierten Verfahren geprüften realen Komponenten implementiert werden. Am IGTE sind Simulationsdaten von ca. 30-40 Anlagen auf Basis des CTSS-Verfahrens verfügbar, wobei jedoch viele nicht den in im Projekt SolarCheck priorisierten Standardhydrauliken entsprechen.

Erprobt wurde Verwendbarkeit der CTSS-Daten für die Überprüfung bzw. Verifikation der FSC-/PF- Methode zunächst anhand der Ergebnisse einer Referenzanlage, für welche eine Vielzahl an Parametervariationen durchgeführt wurde sowie den Ergebnissen vier weiterer, repräsentativer realer Kombianlagen.

Für die Jahressimulation in TRNSYS wurden für alle Anlagen dieselben Referenzbedingungen verwendet. Diese entsprechen den in EN 12977-2:2018 festgelegten Referenzbedingungen für die Leistungsvorhersage für ein Niedrigenergiehaus am Referenzstandort Würzburg:

- Wetterdaten: Prüf-Referenzjahr (TRY) Würzburg; Jahressumme Globalstrahlung in Kollektorebene $E_{glob} = 1231 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
- Heizlast Niedrigenergiehaus (NE 50/30); Jährliche Raumheizlast $Q_{d,SH} = 9090 \text{ kWh/a}$
- Jährliche Last für die Trinkwassererwärmung (HW): $Q_{D,HW} = 2945 \text{ kWh/a}$ (entspricht einem täglichen Lastvolumen von 200 Litern bei einer Temperaturdifferenz von 35 K)
- Wärmelast konventionelle Vergleichsanlage: $Q_{conv,net} = 12679 \text{ kWh/a}$ (inkl. 644 kWh Wärmeverluste Speicher)

Abbildung 1-23 zeigt das Hydraulikschema der Referenzanlage (REF) mit einem Tank-im-Tank-Speicher mit einem Gesamtvolumen von 750 l. Die Heizungsunterstützung wird über eine Rücklaufanhebung realisiert. Die Einbindung des Solarkreises mit einer Kollektorfläche von 10 m^2 erfolgt über einen internen Wärmeübertrager. Für die Referenzanlage wurden

FSC-METHODE

verschiedene Systemvarianten untersucht, diese werden in Abschnitt 1.6.3 diskutiert. Die Simulationsparameter aller untersuchten Anlagen sind in Tabelle 1-9 aufgelistet.

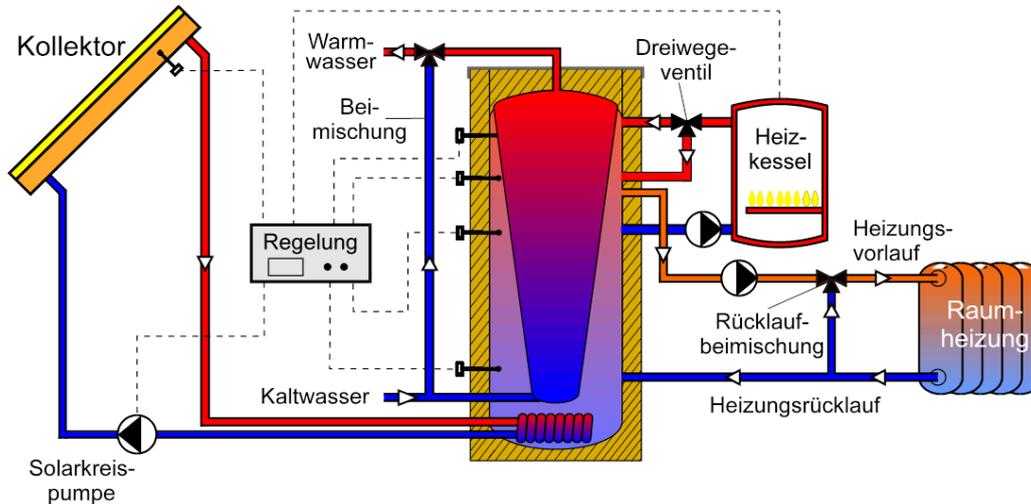


Abbildung 1-23: Hydraulikschema der Referenzanlage

Tabelle 1-9: Übersicht der Simulationsparameter ausgewählter Anlagen inkl. Referenzanlage (REF).

Abkürzungen: FK – Flachkollektor, VRK – Vakuumröhrenkollektor, WÜ – Wärmeübertrager, HW – häusliche Wassererwärmung

System ID	REF 7 (Basis- version)	3K	4K	8K	9K
Kollektortyp	FK	FK	VRK	FK	FK
Kollektorfläche A_{koll} [m ²]	10.00	8.04	8.80	14.22	7.90
Ges. Speichervolumen V_{ges} [l]	750	795	787	976	546
$V_{\text{ges}}/A_{\text{koll}}$ [l/m ²]	75	99	89	69	69
Wassererwärmung	Tank-im-Tank	Int. WÜ	Ext. WÜ	Tank-im-Tank	Tank-im-Tank
Heizungsunterstützung	Rücklauf-anhebung	Rücklauf-anhebung	Pufferung	Rücklauf-anhebung	Rücklauf-anhebung
Einbindung Solarkreis	Int. WÜ	Int. WÜ	Ext. WÜ	Int. WÜ	Int. WÜ
Bereitschaftsvolumen HW $V_{\text{AUX,HW}}$ [l]	300	270	-	317	200
Solltemperatur $T_{\text{set,HW}}$ [°C]	56,5	45	65	47	45

FSC-METHODE

Hysterese HW [K]	2,5	5	5	2	15
Wärmeverlustrate Speicher [W/K]	3,5	4,75	3,45	3,98	4,91
(max.) Vorlauftemperatur Kessel [°C]	90	65	80	55	75

1.6.2 Vorverarbeitung und Aufbereitung der Messdaten

Um die FSC-/PF-Methode anhand realer Messdaten überprüfen zu können, müssen die vorhandenen Messdaten und Anlageninformationen zunächst verarbeitet werden. Für einen möglichst einfachen und schnellen Zugang zu den Daten wurde eine Datenbank erstellt, die sowohl Messdaten bzw. bereits ausgewertete monatliche Mittelwerten oder kumulierte Wärmemengen als auch alle verfügbaren und für die Auswertung relevanten Anlageninformationen enthält. Zudem können die berechneten Kennwerte und die Ergebnisse einer Messdatenanalyse, sofern vorhanden, in die Datenbank aufgenommen werden. Vorab wurde ein Lastenheft erstellt, mit dessen Hilfe alle Informationen bestimmt wurden, die in die Datenbank überführt werden sollten (s. Anhang 8.1).

Zur Erstellung der Datenbank wurde das Softwaretool MySQL Workbench verwendet. Als Datenquellen standen Excel-Tabellen mit monatlichen Messdaten und Metadaten aus den Projekten CombiSol und SolarCombiSystems zur Verfügung sowie Steckbriefe, die meist im pdf-Format vorlagen. Diese wurden teils automatisiert über Scripte und teils händisch in die Datenbank übertragen. Es wurden technische Daten aus insgesamt 49 Anlagen in die Datenbank eingepflegt.

Die Anlageninformationen sind in über 20 Tabellen gespeichert, welche nach ihrer thematischen Zugehörigkeit in Themengebiete eingeordnet wurden. So wurde die folgende Benennungsstruktur eingeführt, die sich in den Tabellenbenennungen widerspiegelt:

- Themengebiet 0: Projektinformationen/Anlagenzuordnung
- Themengebiet 1: allgemeine Anlageninformationen
- Themengebiet 2: Informationen zu Kollektoren und Solarkreislauf
- Themengebiet 3: Informationen zum Warmwasserspeicher
- Themengebiet 4: Informationen zur Nachheizung
- Themengebiet 5: Informationen zur Raumheizung und den Heizkreisen
- Themengebiet 6: Informationen zur Anlagenregelung
- Themengebiet 7: Informationen zu Investitionskosten
- Themengebiet 8: Monitoringdaten und Metadaten
- Themengebiet 9: Berechnungsverfahren

Eine Möglichkeit der Kopplung der Datenbank mit dem nachfolgend beschriebenen Python-Tool zur Messdatenverarbeitung wurde im Projektverlauf untersucht, konnte aber bis zum Zeitpunkt der Neuorientierung des Projekts nicht zufriedenstellend realisiert werden.

FSC-METHODE

Zur Messdatenverarbeitung wurde ein Python-Softwaretool entwickelt. Dessen Hauptkomponenten sowie ein vereinfachtes Schema der Vorgehensweise sind in Abbildung 1-24 dargestellt. Im ersten Schritt werden die Messdaten von einem *DataReader* eingelesen und in ein einheitliches Format umgewandelt. Da Messdatenfiles in der Regel nicht einem einzigen Standardformat entsprechen, sondern je nach verwendetem Datenerfassungssystem sehr unterschiedlich aussehen können, ist für nahezu jede messtechnisch untersuchte Anlage die Erstellung eines eigenen *DataReaders* notwendig. Durch die Umwandlung in ein standardisiertes Format können jedoch die nachfolgenden Operationen immer mit denselben Routinen durchgeführt werden.

Die umgewandelten Messdaten werden im Anschluss an den *DataAnalyzer* übergeben, der – entsprechend seines Namens – eine Messdatenanalyse durchführt. Der bis zum Zeitpunkt der Neuorientierung des Projekts implementierte Funktionsumfang enthält eine Überprüfung auf Datenlücken sowie eine grobe Plausibilitätsprüfung der Daten. Alle erkannten Fehler und Unregelmäßigkeiten sowie ggf. ergriffene Maßnahmen werden in einem Protokoll festgehalten. Treten Datenlücken auf, entscheidet deren Länge über die ergriffene Maßnahme: sehr kurze Datenlücken von wenigen Zeitschritten werden ignoriert, da sie keine merkliche Auswirkung auf die ermittelten Kennwerte haben. Für den Umgang mit größeren Datenlücken wurden zum Zeitpunkt der Neuausrichtung des Projektes noch geeignete Methoden, z.B. der Ersatz durch Daten mit ähnlichen Wetterbedingungen, geprüft. Die Plausibilitätsprüfung beschränkt sich auf eine reine Überprüfung der generellen physikalischen Plausibilität der Messdaten. Die Definition und Umsetzung feinerer Plausibilitätsprüfungen, die eine Kenntnis der Abhängigkeit der Messdaten untereinander erfordern und für jede erfasste Messgröße gesondert durchgeführt werden müssten, sind sehr zeitintensiv und wurde letztendlich aufgrund der veränderten Zielfokussierung im Projekt nicht weiterverfolgt.

Nach der Analyse im *DataAnalyzer* sollen die Messdaten und das erstellte Analyseprotokoll in die Datenbank eingepflegt werden. Die Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Auswertetool und Datenbank konnte aufgrund der Neuausrichtung des Projekts auf die Entwicklung von Fehlerdetektionsalgorithmen nicht mehr im Rahmen des Projektes realisiert werden. Zur weiteren Auswertung der Messdaten werden diese dann an den *DataEvaluator* übergeben. Dort erfolgt im ersten Schritt die Ermittlung von Monatsdaten aus den Messdaten. Anhand der Monatsdaten werden im nächsten Schritt die für die Verifikation benötigten Kennwerte, insbesondere die relative Einsparung f_{save} und der FSC-Wert der Anlage berechnet und mit der entsprechenden Korrelation verglichen. Die berechneten Kennwerte und Monatsdaten sollten dann zukünftig zur weiteren Verwendung in die Datenbank eingepflegt werden können. Auch diese Schnittstelle, sowie ein geplantes Skript zur Plausibilitätsprüfung der Energiebilanz anhand von Input/Output-Bilanzen, konnten aus dem bereits oben erläuterten Grund nicht mehr in das Tool implementiert werden.

FSC-METHODE

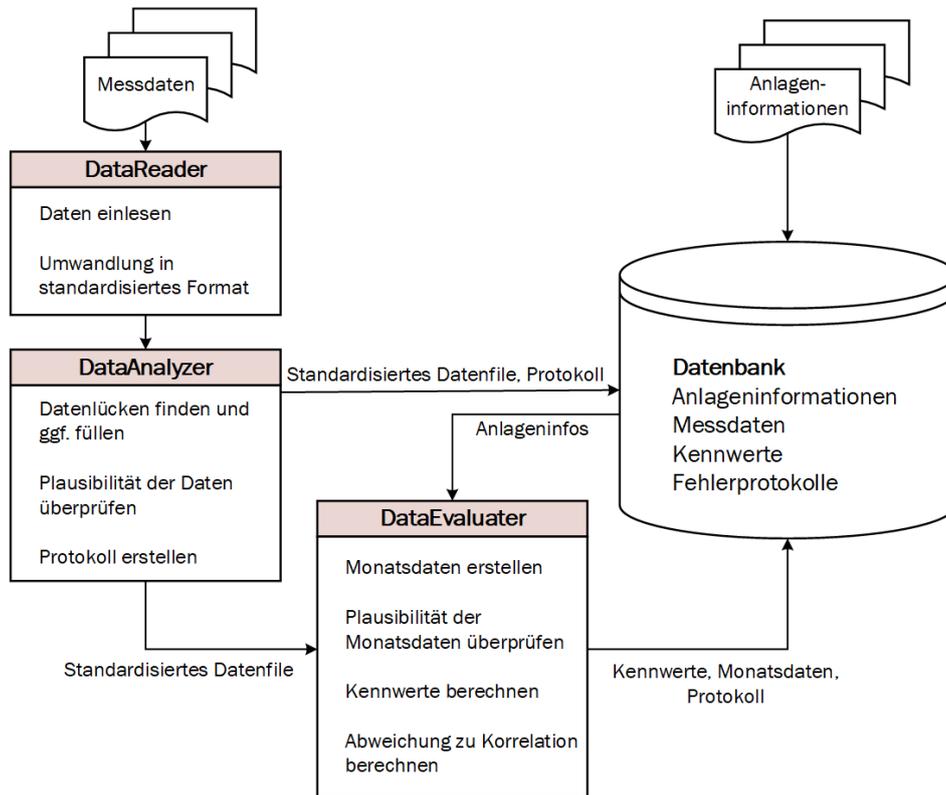


Abbildung 1-24: Schematische geplante Vorgehensweise bei der Vorverarbeitung der Daten

1.6.3 Überprüfung und Verifikation der FSC-Methode

Messdaten und Anlagen, die aus früheren Forschungsaktivitäten des IGTE stammen, wurden bereits in die Datenbank aufgenommen. Abbildung 1-25 und Abbildung 1-26 zeigen beispielhafte graphische Auswertungen einiger verfügbarer Anlagendaten. Dabei wurden nur diejenigen Anlagen ausgewertet, für welche Messdaten über mindestens 12 Monate zur Verfügung standen. Die berechneten f_{save} /FSC-Paare wurden mit einer Basiskorrelation ohne Korrekturfaktoren (schwarze Linie) verglichen:

$$f_{save} = 0.31 \cdot FSC^2 + 0.3 \cdot FSC \quad (1-16)$$

Als zulässige Abweichung von der Korrelation wurde 20 % gewählt (gestrichelte schwarze Linien). In Abbildung 1-25 erfolgt die Darstellung mit der Unterscheidung nach Standardhydrauliken⁸. Für die Auswertung standen Kombianlagen mit den Standardhydraulik-Grundtypen 1, 3 und 7 zur Verfügung. Auf den ersten Blick scheint eine Abhängigkeit der f_{save} -Werte, bzw. der Lage der Punkte im Vergleich zur Korrelation der Standardhydraulik gegeben zu sein. Diese Schlussfolgerung ist jedoch zum einen aufgrund der geringen Anzahl an Anlagen nicht legitim. Zum anderen wurden in dieser Auswertung keine weiteren möglichen Einflussfaktoren berücksichtigt.

⁸ siehe Kapitel 1.3.1. System 7 stellt ein Tank-in-Tank-System mit internem Solar-WÜT dar, welches in der Methodenentwicklung in Absprache mit den Projektpartnern nicht weiter betrachtet wurde.

FSC-METHODE

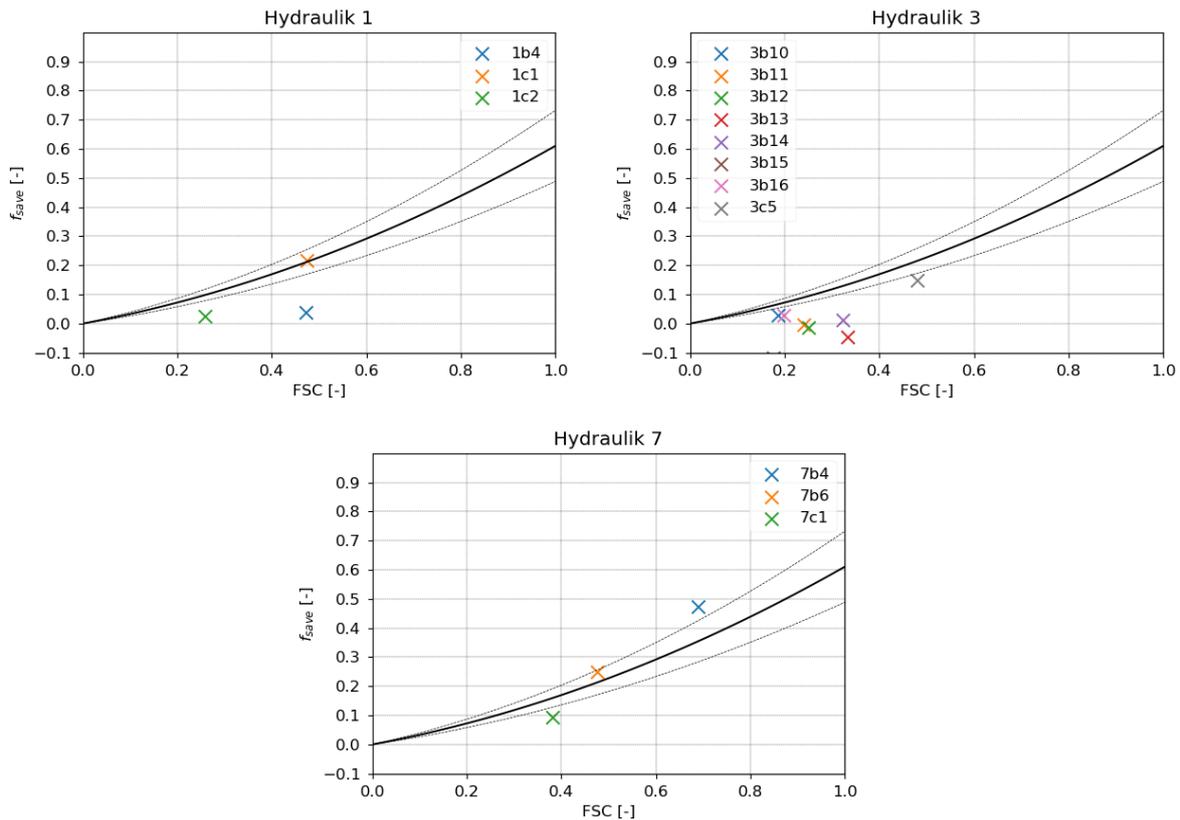


Abbildung 1-25: Graphische Gegenüberstellung von Anlagen mit unterschiedlichen Standardhydrauliken

In Abbildung 1-26 werden vier weitere Einflussfaktoren untersucht:

- Das auf die Kollektorfläche bezogene Speichervolumen
- Der Anlagenstandort
- Der auf die Kollektorfläche bezogene Warmwasserbedarf incl. Wärmeverluste der Zirkulationsleitung, falls vorhanden
- Der auf die Kollektorfläche bezogene Gesamtwärmebedarf incl. Wärmeverluste der Zirkulationsleitung, sofern vorhanden

Auch hier ist keine klare Abhängigkeit der f_{save} /FSC-Paare von den untersuchten Einflussfaktoren erkennbar. Für die detailliertere Auswertung müssten noch weitere potentielle Einflussfaktoren untersucht werden. Außerdem wären weitere Informationen, z. B. zu Anlagenbetrieb und Messdatenerfassung sowie Messdaten mit zeitlich höherer Auflösung für eine Interpretation der Ergebnisse hilfreich, welche jedoch für keine der Anlagen verfügbar sind.

FSC-METHODE

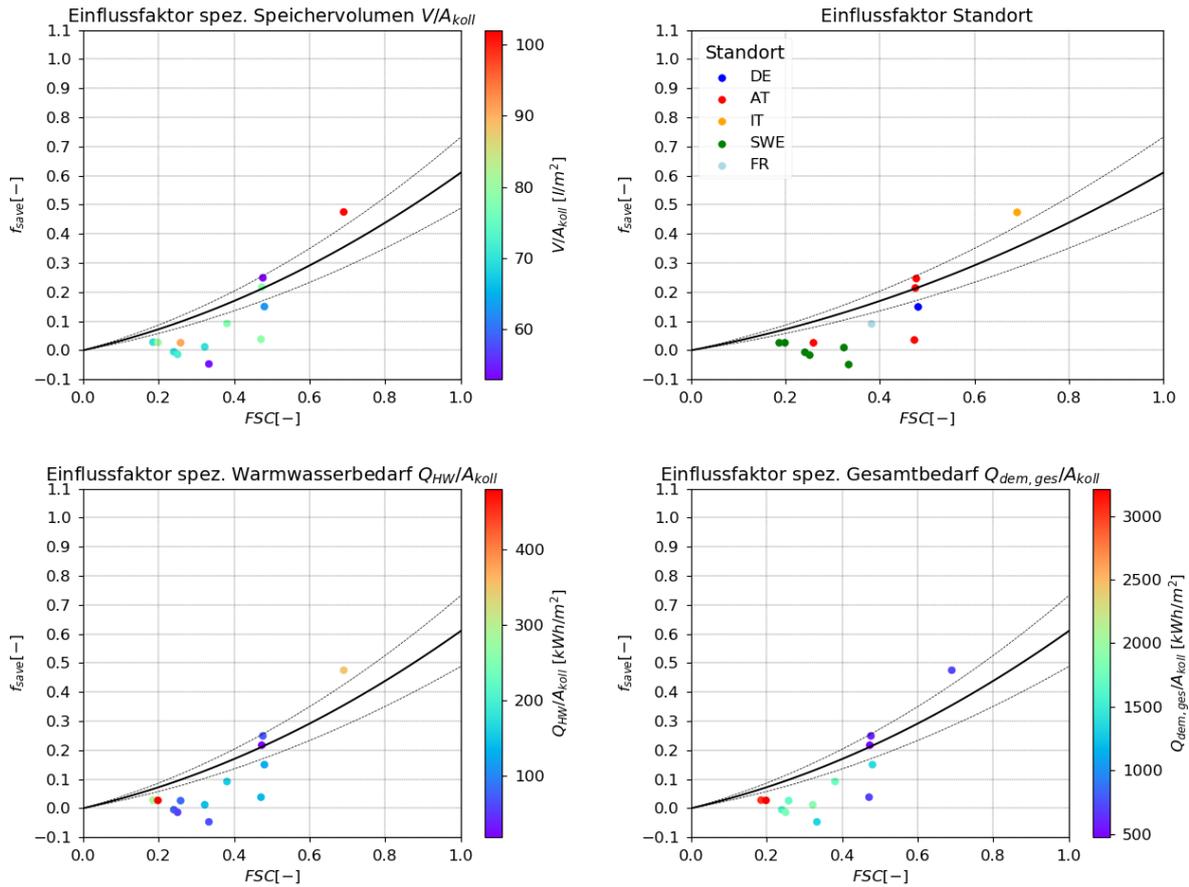


Abbildung 1-26: Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren. Von links oben nach rechts unten: Einfluss des spezifischen Speichervolumens, des Anlagenstandorts, des spezifischen Warmwasserbedarfs und des spezifischen Gesamtwärmebedarfs.

Die in 1.6.1.6 vorgestellten semi-synthetischen Messdaten wurden ebenfalls ausgewertet und mit der Basiskorrelation in Gleichung (1-16) verglichen. Hierzu wurde eine Abweichung von maximal 20 % zur Korrelation als akzeptabel angenommen. In Tabelle 1-10 sind die untersuchten Systemvarianten der Referenzanlage aufgelistet. Untersucht wurde der Einfluss der folgenden Parameter:

- nutzbare Warmwassermenge und HW-Solltemperatur
- gesamtes Speichervolumen
- Wärmeverlustrate des Speichers
- Art der Einbindung der Heizungsunterstützung
- Art der Solar- und HW-Einbindung

Tabelle 1-10: Übersicht der Systemvarianten der Referenzanlage

System ID	Varierte Parameter
Nutzbare Warmwassermenge	
REF_6	Nutzbare Warmwassermenge $V_{HW} = 100$ l, Solltemperatur HW: $T_{set,HW} = 52,5$ °C
REF_7	Nutzbare Warmwassermenge $V_{HW} = 150$ l, Solltemperatur HW: $T_{set,HW} = 56,5$ °C
REF_8	Nutzbare Warmwassermenge $V_{HW} = 200$ l, Solltemperatur HW: $T_{set,HW} = 62,5$ °C

FSC-METHODE

REF_9	Nutzbare Warmwassermenge $V_{HW} = 250$ l, Solltemperatur HW: $T_{set,HW} = 68,5$ °C
REF_10	Nutzbare Warmwassermenge $V_{HW} = 300$ l, Solltemperatur HW: $T_{set,HW} = 74,5$ °C
Speichervolumen	
REF_7	Standard-Speicher (Speichervolumen 750 l)
REF_7VG	Großer Speicher (Speichervolumen 1000 l)
REF_7VK	Kleiner Speicher (Speichervolumen 500 l)
Wärmeverlustrate	
REF_7	Standard-Speicher (Wärmeverlustrate 3,5 W/K)
REF_G_S_B	Befriedigender Speicher (Wärmeverlustrate 4,5 W/K)
REF_G_S_S	Sehr guter Speicher (Wärmeverlustrate 2,5 W/K)
Einbindung Heizungsunterstützung	
REF_7	Standardvariante (Rücklaufanhebung)
REF_7PK	Kleiner Heizungspuffer (100 l)
REF_7PG	Großer Heizungspuffer (200 l)
Solar- und HW-Einbindung	
REF_5	Standard-Konfiguration (Solarkreis: int. WÜ, HW: Tank-im-Tank)
REF_E_1	Modifikationen: Solarkreis wie REF_5, HW: externer WÜ)
REF_EE_1	Modifikationen: Solarkreis: externer WÜ, HW: externer WÜ)
REF_G_1	Modifikationen: Solarkreis: wie REF_5, HW: wie REF_5, integrierter Gasbrenner (Kennwerte: SolvisMax)

In Abbildung 1-27 ist die graphische Auswertung der Parameteruntersuchungen der Referenzanlage dargestellt. Die Abbildung rechts unten zeigt außerdem die Auswertung der semi-synthetischen Messdaten der vier nach dem CTSS-Verfahren geprüften realen Anlagen im Vergleich zur Referenzanlage. Relativ geringen Einfluss auf die relative Einsparung f_{save} hat, wie im Diagramm links unten zu sehen ist, die Art der Einbindung des Solarkreises und der Trinkwassererwärmung. Lediglich die Solarkreiseinbindung über einen externen Wärmeübertrager sowie die direkte Integration des Gasbrenners in den Speicher resultieren in einer leichten Verbesserung der relativen Einsparung. Das Gesamtspeichervolumen hat ebenfalls vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die relative Einsparung. Größeren Einfluss hat unter anderem die Art der Einbindung der Heizungsunterstützung. Eine Heizungsunterstützung durch ein Heizungspuffervolumen senkt die relative Einsparung im Vergleich zu einer Rücklaufanhebung deutlich, wobei die Einsparung erwartungsgemäß mit größer werdendem Puffervolumen sinkt. Eine Erhöhung der nutzbaren Warmwassermenge und damit verbunden die Erhöhung der HW-Solltemperatur kann ebenfalls zu einer erheblichen Senkung der relativen Einsparung führen: Die Erhöhung der nutzbaren Warmwassermenge von 100 Liter (REF_6, $T_{set,HW} = 52,5$ °C) auf 300 Liter (REF_10, $T_{set,HW} = 74,5$ °C) resultiert in einer Reduzierung

FSC-METHODE

der relativen Einsparung um 3,8 %-Punkte von $f_{\text{save,REF}_6} = 23,5\%$ auf $f_{\text{save,REF}_{10}} = 19,7\%$. Ein weiterer signifikanter Einflussfaktor ist die Wärmeverlustrate des Speichers. Die Differenz der relativen Einsparung zwischen einer Anlage mit einem „sehr gut“ gedämmten Speicher mit einer Wärmeverlustrate von 2,5 W/K (REF_G_S_S) und einem „befriedigend“ gedämmten Speicher mit einer Wärmeverlustrate von 4,5 W/K (REF_G_S_B) beträgt 5 %-Punkte.

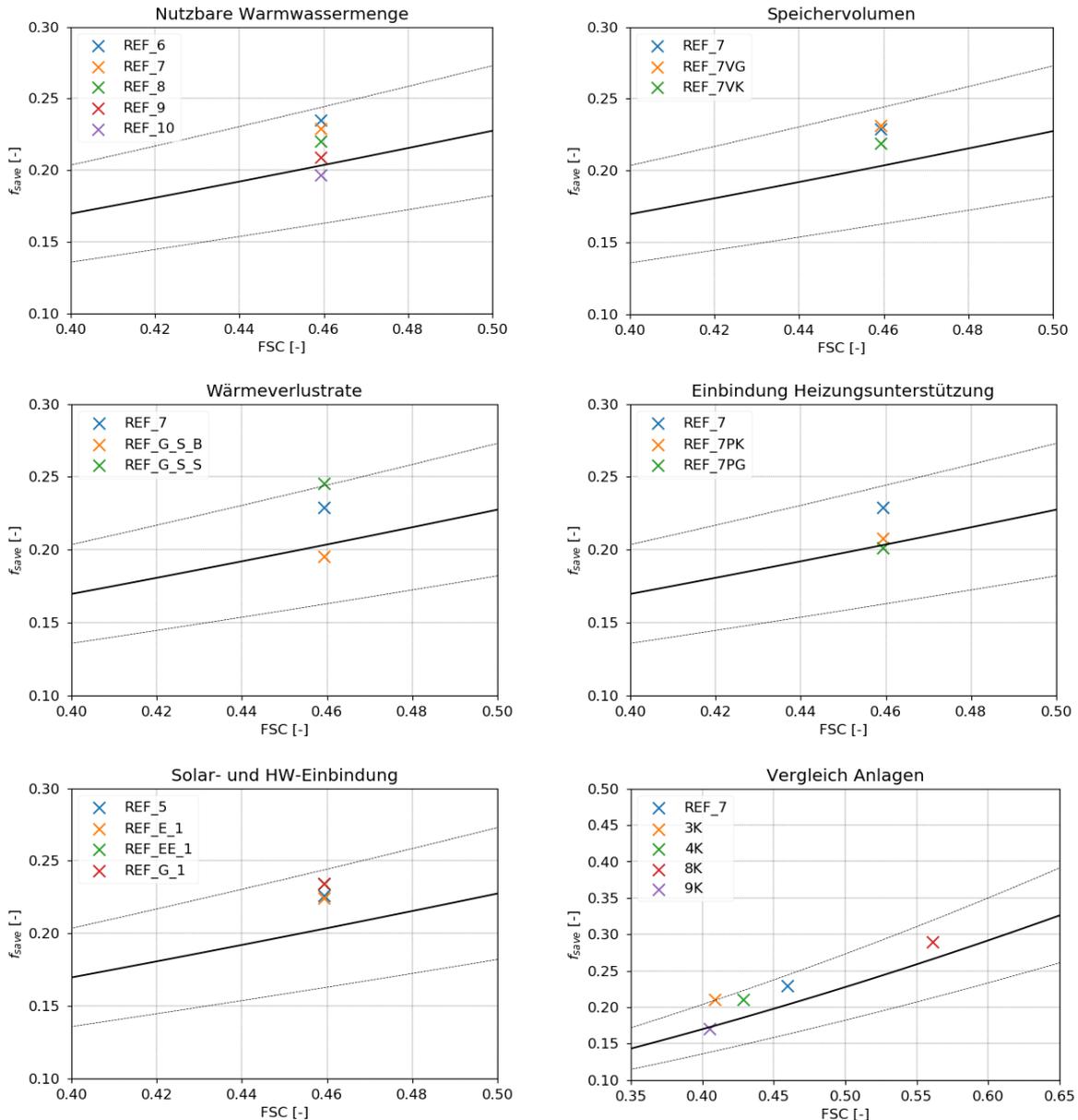


Abbildung 1-27: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Auswertung der semi-synthetischen Messdaten

Der Vergleich der vier Anlagen sowie der Referenzanlage im Diagramm in Abbildung 1-27 rechts unten bestätigt im Wesentlichen die vorher getroffenen Aussagen über die Einflussfaktoren. Am besten schneiden demnach Anlagen mit Rücklaufanhebung, einem relativ großen Verhältnis von Speichervolumen zu Kollektorfläche und guter Wärmedämmung des Speichers ab (Anlagen 3K und 4K). Generell ist jedoch zu bemerken, dass die hier diskutierten Faktoren nicht die einzigen relevanten Einflussfaktoren darstellen. Ausschlag-

gebend für die Effizienz der Gesamtanlage ist eine gute Kombination aller relevanter Einflussfaktoren, inklusive beispielsweise der Anschlusshöhen des Speichers und die Positionen der Temperatursensoren, die bei der vorliegenden Auswertung noch nicht berücksichtigt wurden. Bei der graphischen Darstellung der Auswertung der semi-synthetischen Messdaten in Abbildung 1-27 wird auf den ersten Blick ersichtlich, dass sich die Ergebnisse der Referenzanlage sowie die Ergebnisse der vier untersuchten realen Anlagen im Rahmen eines Toleranzbandes von maximal 20 % Abweichung zur Korrelation befinden. Jedoch fällt auf, dass die resultierenden f_{save} -Werte größtenteils oberhalb der Korrelationskurve liegen. Dies könnte mehrere Gründe haben, z.B.:

1. Solare Kombianlagen mit den betrachteten Hydrauliken bzw. Speichertechnologien (insbesondere Tank-im-Tank-Systeme) können nicht ausreichend genau durch die verwendete Korrelation beschrieben werden, da sie generell etwas besser abschneiden als die zur Bestimmung der Korrelation verwendeten Anlagenvarianten
2. Zur Erstellung der Korrelation wurde ein deutlich breiteres Spektrum an Parameterkombinationen verwendet. Dieses Spektrum beinhaltet auch deutlich ungünstigere Systemkonfigurationen als die ausgewählten Konfigurationen der mit semi-synthetischen Messdaten untersuchten Anlagen, wodurch sich letztere eher im „guten“ Bereich wiederfinden.

Die Betrachtung der Abhängigkeit der relativen Energieeinsparung von der Einbindungsvariante der Trinkwarmwasserbereitung in Abbildung 1-27 rechts unten bestätigt jedoch die erste Vermutung nicht. Die Änderung von Tank-im-Tank (REF_5) zur Einbindung über einen externen Wärmeübertrager (REF_E_1) ergibt kaum unterschiedliche Ergebnisse der relativen Einsparung, die Ergebnisse der Tank-im-Tank-Variante sind sogar marginal schlechter. Auch beim Vergleich der unterschiedlichen Anlagen (rechts unten) ist kein generell besseres Abschneiden von Anlagen mit Tank-im-Tank-Speicher (REF_7, 8K, 9K) erkennbar. Für die zweite Vermutung spricht zudem, dass es sich um Anlagenkonfigurationen handelt, die nach Herstellerempfehlung eingestellt wurden, also im Herstellerinteresse auf eine optimale Betriebsweise ausgelegt sein sollten.

Eine abschließende Einordnung der Ergebnisse der Referenzanlage und anderer Anlagen, deren hydraulische Verschaltung von denjenigen abweichen, die für die Korrelationserstellung berücksichtigt wurden, in Hinblick auf deren Eignung für die Verifikation der FSC-/PF-Methode stand noch aus, wurde aber aufgrund der Neuausrichtung des Projektes nicht mehr vorgenommen.

1.7 Implementierung der FSC-Methode

Um den Weg für die geplante Integration des FSC-/PF-Verfahrens in die nationale und internationale Normung zu bereiten, wurde bei der Sitzung des DIN Normausschuss NA 041-01-56 AA „Solaranlagen“ (Spiegelausschuss zu CEN/TC 312 und ISO/TC 180) am 14.01.2020 in Köln von Dr. Harald Drück über das Projekt „SolarCheck“ sowie die daraus resultierenden Ergebnisse berichtet.

FSC-METHODE

Ein weiterer Bericht über das Projekt „SolarCheck“ war innerhalb des für den 11. März 2020 geplanten Treffens des Europäischen Normungskomitees CEN TC 312 (Thermal Solar Systems and Components) geplant. Dieses Treffen wurde jedoch aufgrund der Corona-Pandemie und den daraus resultierenden Reisebeschränkungen abgesagt

2 Algorithmenbasierte Fehlerdetektion: Bereich Solarkreis

Um einerseits eine kostengünstige Alternative für kleine Anlagen zu erhalten und andererseits gravierende Fehler zeitnah anzuzeigen, wurden im zweiten Teil des Projekts Algorithmen entwickelt, die spezifische Fehlfunktionen erkennen können. Dazu wurden in Absprache mit den Industriepartnern wichtige Fehler priorisiert.

Besonderer Wert wurde auf die Ermittlung unterschiedlicher möglicher Berechnungspfade zur Erkennung eines Fehlers gelegt, um auch unterschiedlichen Konstellationen vorhandener Messdaten und Anlagenhydrauliken gerecht zu werden. Außerdem sollten die Berechnungspfade möglichst allgemein gültig sein, also insbesondere auch für große Solaranlagen gelten. Die Entwicklung im Bereich Solarkreis geschah dabei auf Grundlage von Anlagenmessdaten von zwei Solarthermie-Versuchsanlagen der Universität Kassel (siehe [2]) sowie von einer Viessmann Großanlage. Die Algorithmen wurden weiterhin an Messdaten von ca. 5..7 weiteren Anlagen der verschiedenen Industrie-Projektpartner getestet. Die Algorithmenentwicklung erfolgte dabei gemäß eines mehrstufigen Fehlererkennungsverfahrens, das in Abschnitt 2.1 kurz erläutert wird. Kapitel 2.2 stellt die untersuchten Fehler und die erarbeiteten Symptome im Bereich Solarkreis vor. In Kapitel 2.3 werden dann die einzelnen Algorithmen bzw. Berechnungswege und deren Test an Messdaten dargestellt.

2.1 Mehrstufiges Verfahren für die Fehlererkennung

Oft sind zur Erkennung eines Fehlers viele Wege denkbar, wobei jeder Weg eigene Anforderungen an die vorhandene Messtechnik (bzw. allg. Datengrundlage) stellt und häufig noch von der vorliegenden Anlagenhydraulik abhängt. Um die sich daraus ergebende Vielzahl an Möglichkeiten überschaubar zu halten, wurden die Algorithmen im Einklang mit einem modularen mehrstufigen Fehlererkennungsverfahren [2] entwickelt und implementiert.



Abbildung 2-1: Mehrstufiges Verfahren zur Fehlererkennung.

In diesem Verfahren werden schrittweise aus aufbereiteten und auf Plausibilität geprüften Messdaten zunächst spezifische Informationen als Merkmale gewonnen. Merkmale sind eine (unbewertete) Eigenschaft oder Information aus einem Signal, z.B. „Solarkreis ist in Betrieb“. Für jedes Merkmal gibt es ggf. mehrere Algorithmen, welche dieses Merkmal auf unterschiedliche Weise bzw. für andere Eingangsdaten oder Randbedingungen bestimmen. Liegen ein oder mehrere Merkmale außerhalb eines erwarteten Bereichs (z.B. „Solarertrag zu niedrig“) oder treten unerwartet (nicht) gleichzeitig auf („Kein Volumenstrom obwohl Pumpensignal an“), wird ein Symptom für den zugehörigen Zeitraum erzeugt. Aus dem Vorliegen von Symptomen kann dann auf das Vorliegen mindestens eines Fehlers geschlossen werden. Mithilfe verschiedener vorliegender Symptome kann dann der Fehler ggf. weiter eingegrenzt werden. Sowohl für Merkmale als auch Symptome können unscharfe Grenzen definiert werden. Das bedeutet, dass zwei Grenzen angegeben werden, die einen Übergangsbereich zwischen den Klassen ‚ok‘ und ‚nicht ok‘ definieren. Das erleichtert zum

einen die Grenzwertfindung, zum anderen kann mittels der Breite des Übergangsbereichs auch die Deutlichkeit einer Grenzwertüberschreitung beurteilt werden. Somit lässt sich auch die Stärke eines Symptoms bestimmen. Das ermöglicht wiederum in nachfolgenden Schritten auch eine Anpassung der Alarmempfindlichkeit.

Nach diesen Prinzipien wurden im Projekt verschiedene Merkmal- und Symptomalgorithmen mit dem Ziel entwickelt, die priorisierten Fehler aus Kap. 2.2 automatisiert detektieren zu können.

2.2 Liste bearbeiteter Fehler und erstellter Symptome

In Absprache mit den Industriepartnern wurde eine Gesamtliste von Fehlern priorisiert. Folgende als wichtig erachtete Fehler wurden im Bereich Solarkreis schließlich betrachtet:

1. Pumpen defekt (Solarkreis)
2. Überprüfung des Volumenstroms im primären und sekundären Solarkreis (Luft in Anlage, WÜT Verschmutzung,...)
3. Kollektorfühler falsch positioniert (nicht am/im Kollektor)
4. Kollektorfühler misst nicht die Fluidtemperatur (aus Tauchhülse gerutscht)
5. Überprüfung des Wärmeübertragers (UA-Wert)
6. Ungleichmäßige Durchströmung von Kollektorfeldern (Luft, Verrohrung, Verschmutzung)

Fehlergruppe „Kein oder verminderter Volumenstrom im Solarkreis“

Die Fehler 1, 2 und 6 der Fehlerliste lassen sich zu einer gemeinsamen Fehlergruppe zuordnen. Durch den Ausfall der Solarkreispumpen, Luft in der Anlage, oder Verschmutzungen bzw. Verstopfungen im Rohrleitungssystem (auch Verkalken des WÜT) kommt es zu verminderten Volumenströmen und ggf. zum Komplettausfall der Anlage.

Folgende Symptome wurden für diese Fehlergruppe als besonders signifikant identifiziert:

- **Symptom „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“**
- **Symptom „Volumenstrom im Betrieb zu klein“**
- **Symptom „Temperatur(-differenz) im Betrieb zu hoch“**

Symptom: Kollektortemperatur unplausibel

Für die Fehler 3 und 4 wurde das Symptom „Kollektortemperatur unplausibel“ erstellt. Zwar ergeben sich bei den beiden Fehlern im Detail auch (weitere) unterschiedliche Symptome, diese wurden allerdings nicht weiter betrachtet.

Symptom: UA-Wert zu niedrig

Zur Überprüfung des Wärmeübertragers wurde ein Symptom-Algorithmus geschrieben, welcher automatisiert den Wärmedurchgang (UA-Wert) in stationären Betriebsphasen berechnet und mit einem Referenzwert vergleicht.

2.3 Funktionsweise der Symptome und berücksichtigte Berechnungswege

Im Folgenden wird die grundlegende Funktionsweise der jeweiligen Symptome beschrieben. Weiterhin werden für einige Symptome verschiedene Berechnungswege aufgezeigt. Diese ermöglichen es, dass die entwickelten Algorithmen für unterschiedliche Anlagenhydrauliken und bei unterschiedlichen Sensorausstattungen angewendet werden können.

2.3.1 Symptom „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“

Abbildung 2-2 zeigt mögliche Detektionswege des Symptoms „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“. Wie aufgezeigt wird, muss einerseits der tatsächliche Stillstand der Anlage festgestellt werden, andererseits gilt es festzustellen, ob die Anlage in Betrieb sein sollte (erfüllte Betriebsbedingungen). Der Anlagenstillstand kann auf verschiedenen Wegen detektiert werden:

- Anhand des Volumenstroms im Solarkreis (direkte Messung)
- Über die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf
- Über die Differenz zwischen Kollektor- und Vorlauftemperatur

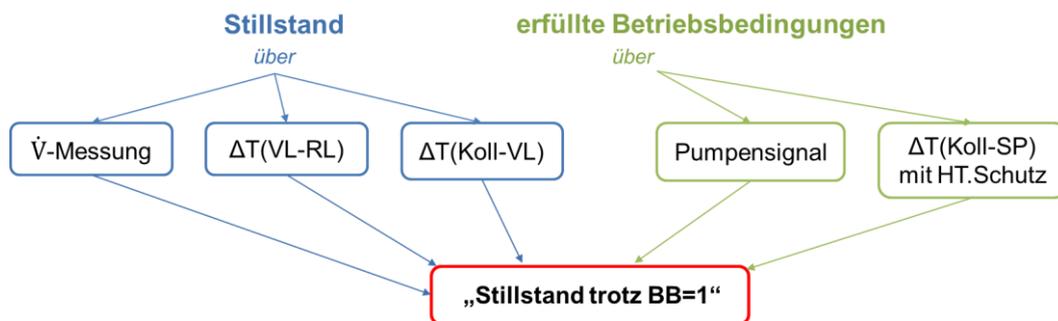


Abbildung 2-2: Detektionswege des Symptoms „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“

Ob das System in Betrieb sein sollte, lässt sich am einfachsten direkt am Pumpensignal erkennen, da der Regler alle Betriebsbedingungen prüft. Sollte dieses Signal nicht vorhanden sein, kann auch über die Temperaturdifferenz zwischen Kollektor und Speicher eine Aussage zum Soll-Betrieb getroffen werden. Hierbei gilt es ggf. vorhandene Hochtemperaturschutzgrenzen zu beachten.

Abbildung 2-3 zeigt beispielhaft den Symptom-Algorithmus und die Reaktion der berechneten Merkmale. Für dieses Beispiel wird der Soll-Betrieb über das Pumpensignal und der Ist-Betrieb über die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im primären Solarkreis ermittelt. Im oberen Bereich sind die Solarkreis- und Speichertemperaturen sowie die Einstrahlung dargestellt. In der Mitte kann der Volumenstrom im primären Solarkreis und das Pumpensignal (skaliert auf 500) abgelesen werden. Im unteren Bereich sind die Merkmale und Symptome dargestellt. Das magentafarbene Merkmal („BB=1“) zeigt die erfüllten Betriebsbedingungen an. Es berechnet sich basierend auf dem Pumpensignal. In Cyan eingetragen ist das Merkmal „Solarkreis ist in Betrieb“, berechnet anhand der Temperaturdifferenz zwischen primärer Vor- und Rücklauftemperatur.

ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS

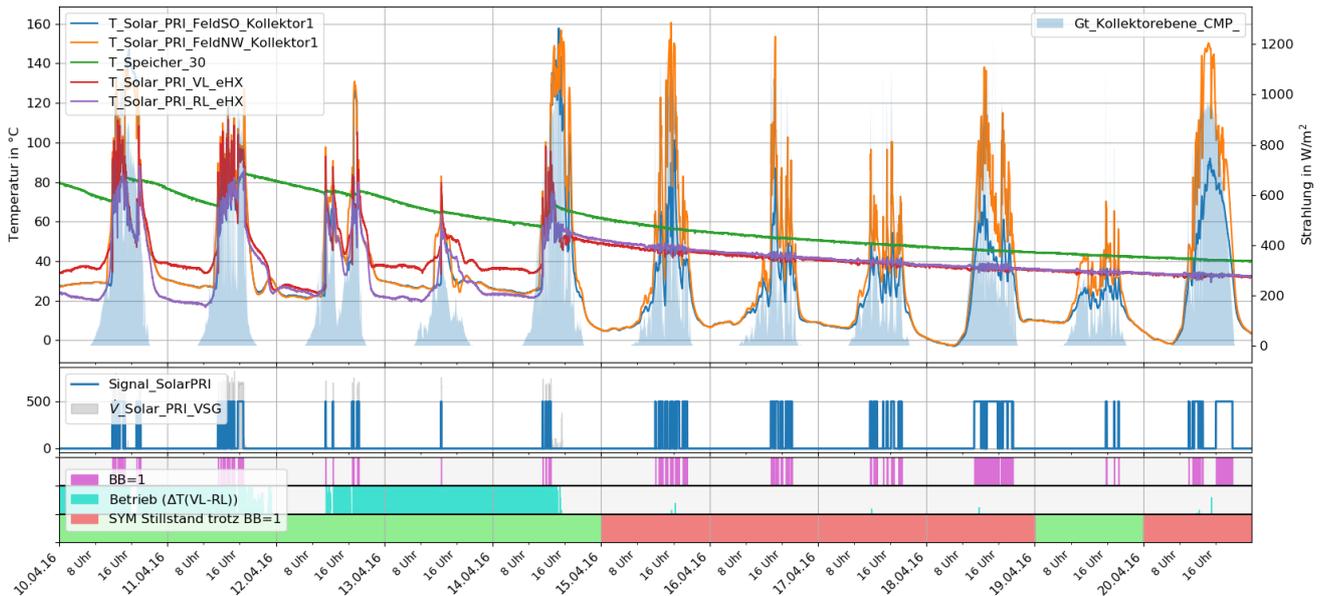


Abbildung 2-3: Test des Symptoms "Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen" an Messdaten einer Anlage mit abgesperrten Solarkreis

Im dargestellten Zeitraum wurde am 15.04. ein Ventil im Solarkreis geschlossen, um einen Fehler zu simulieren. Wie zu erkennen ist, zeigt das Symptom den ungewollten Stillstand der Anlage an Tagen mit ausreichend Einstrahlung an und weist damit auf das Vorhandensein eines Fehlers hin.

2.3.2 Symptom „Volumenstrom im Betrieb zu klein“

Abbildung 2-4 zeigt die Detektionswege des Symptoms „Volumenstrom im Betrieb zu klein“. Auf der linken Seite ist die Vorgehensweise bei vorhandener Volumenstrommessung im Primärkreis dargestellt. Hier kann der Messwert direkt mit einem geeigneten Sollwert verglichen werden. Da bei thermischen Solaranlagen oft kein großes Messtechnik-Budget existiert, ist dieser Sensor jedoch oft nicht vorhanden. Häufiger gibt es stattdessen eine sekundärseitige Messstelle, z.B. mit einem Wärmemengenzähler zur Erfassung des Solarertrages (Fördervoraussetzung bei größeren Anlagen).

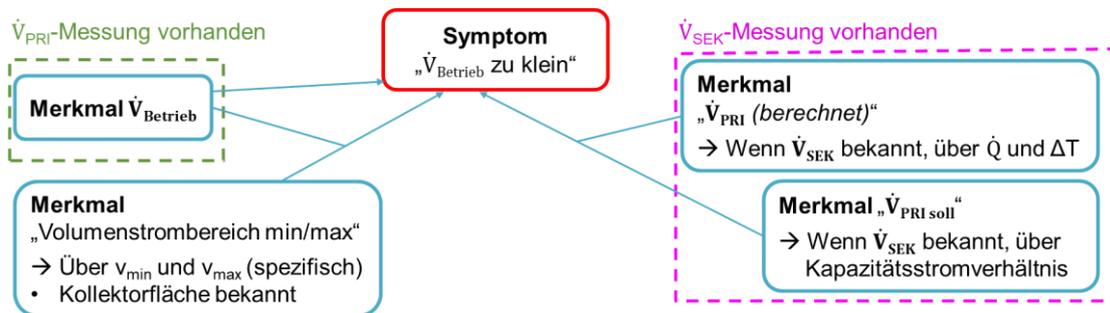


Abbildung 2-4: Detektionswege des Symptoms „Volumenstrom im Betrieb zu klein“

Sind die Vor- und Rücklauftemperaturen primär- und sekundärseitig vorhanden, kann hiermit der primäre Volumenstrom berechnet werden. Die primärseitig abgegebene Leistung sollte, unter Vernachlässigung der thermischen Verluste des Wärmeübertragers, der sekundärseitig aufgenommenen Leistung entsprechen. Weiterhin kann über den Sekundärkreis ein Sollwert

ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS

automatisch generiert werden, da es empfehlenswert ist, kleine und mittlere Solaranlagen (ohne Zieltemperaturregelung) mit ähnlichen Kapazitätsströmen auf Primär- und Sekundärseite zu betreiben.

Abbildung 2-5 zeigt die Anwendung des Symptom-Algorithmus und die berechneten Merkmale an Messdaten einer Versuchsanlage, bei der die Primärkreispumpe am 05.05. stark gedrosselt wurde. Im oberen Bereich sind die gemessenen Volumenströme im Primärkreis (rot) und Sekundärkreis (grün) sowie der berechnete Primärvolumenstrom (blau) und der Sollwert (gelb) dargestellt. Über eine Abschätzung der Messunsicherheiten bzw. -fehler, wird für den berechneten Primärvolumenstrom ebenfalls ein Unsicherheitsbereich (hellblaue Fläche) berechnet.

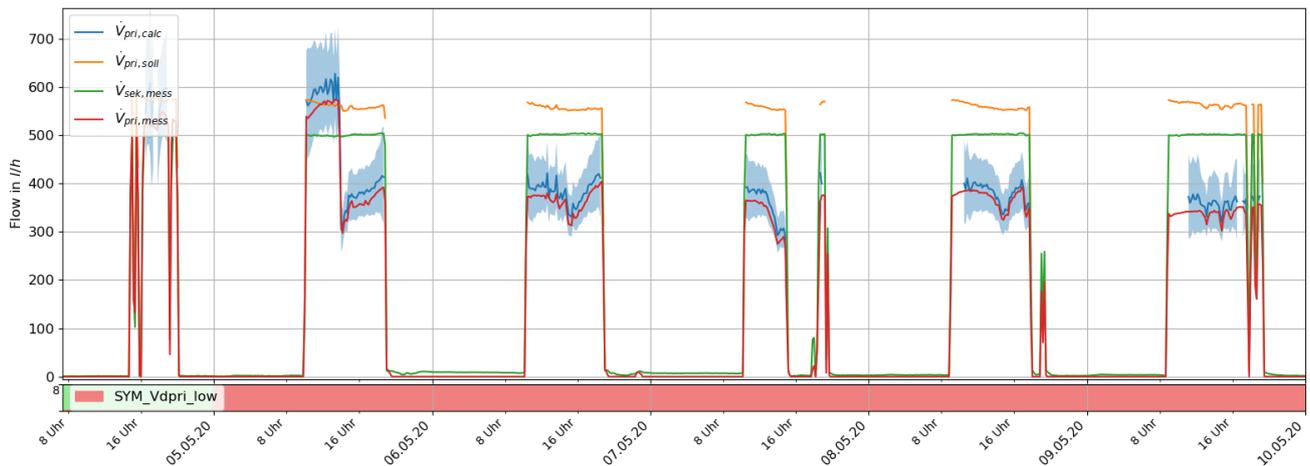


Abbildung 2-5: Test des Symptoms "Volumenstrom im Betrieb zu klein" an Messdaten einer Anlage mit stark gedrosselter Primärkreispumpe

Wie die Abbildung zeigt, liegt der berechnete Volumenstrom sehr nah am tatsächlich gemessenen Volumenstrom und innerhalb des Unsicherheitsbereichs. Außerdem ist erkennbar, dass das Symptom (im unteren Bereich der Abbildung dargestellt), welches den berechneten Volumenstrom mit dem automatisch generierten Sollwert vergleicht, eine Warnung ab dem Tag der Drosselung der Pumpe ausgibt.

2.3.3 Symptom „Temperatur(-differenz) im Betrieb zu hoch“

Verminderte Volumenströme im primären (und sekundären) Solar- kreis führen unmittelbar zu einer erhöhten Betriebstemperatur. Da die Temperaturen allerdings ab- hängig von der Einstrahlung und der unteren Speichertemperatur sind, muss hier zunächst ein geeig- netes Signal zur Auswertung iden- tifiziert werden. Die Analyse der Solarkreistemperaturen hat ge- zeigt, dass sich die Differenz zwis- chen primärer Vor- und Rücklauf- temperatur am besten eignet, den Betrieb zu bewerten. Abbildung 2-6 zeigt diese Temperaturdifferenz für eine Versuchsanlage für den Zeit- raum Januar bis Mai. Rot markiert sind Phasen, zu denen ein vermin- derteter Volumenstrom gefahren wurde.

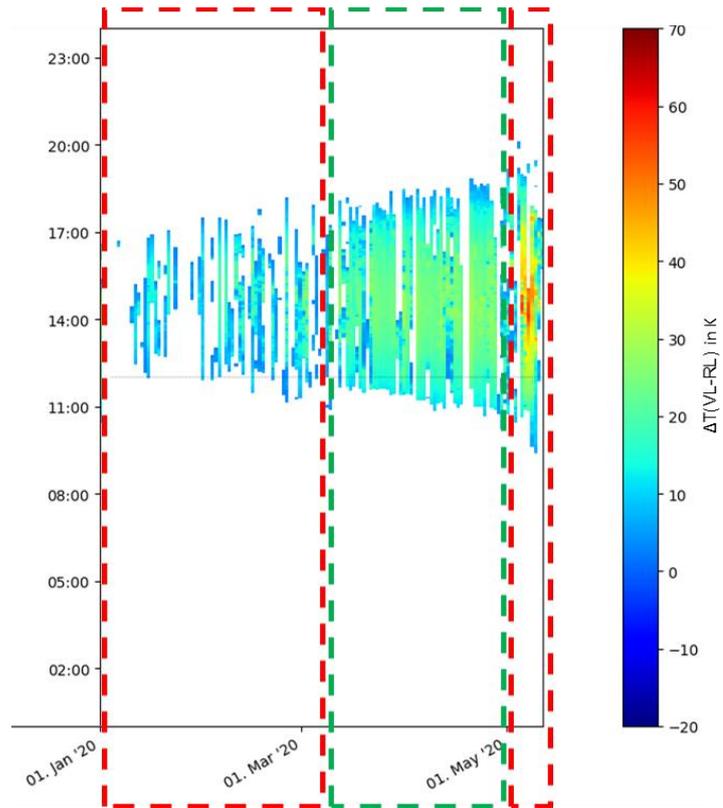


Abbildung 2-6: Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur im primären Solarkreis im Betrieb

Die Auswertung dieser Messdaten und der Vergleich mit weiteren Anlagen hat gezeigt, dass der normale Anlagenbetrieb im Zeitraum Mai-September mit Temperaturdifferenzen im Bereich 5..35 K einhergeht. Im Zeitraum Oktober-April ist der Solarkreis weniger in Betrieb und die Temperaturen sind deutlich niedriger. In der Abbildung ist weiterhin erkennbar, dass der fehlerbehaftete Betrieb Ende Mai mit erhöhten Temperaturdifferenzen von > 40 K (bis zu 55..60 K) einhergeht.

Abbildung 2-7 zeigt die Anwendung des Symptoms zur Detektion hoher Solarkreistemperaturen an einem Solarkreis mit gedrosselter Primärpumpe. Im oberen Bereich sind die Temperaturen von Kollektor, Speicher, Vor- und Rücklauf (linke Achse) und flächig die Volumenströme primär und sekundär (rechte Achse) eingezeichnet. Wie zu sehen ist, wird das Symptom ab dem 05.05 für diese Anlage generiert und weist damit auf Probleme im Solarkreis hin.

Während die angesetzten Grenzwerte bei einigen der betrachteten Anlagen sehr gut passten, schlug der Algorithmus bei anderen Anlagen nicht ohne weiteres an. Es ist demnach empfehlenswert, die Reaktion des Algorithmus bei weiteren Anlagen zu testen und die Grenzwerte ggf. an die jeweilig zu überprüfende Anlage anzupassen.

ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS

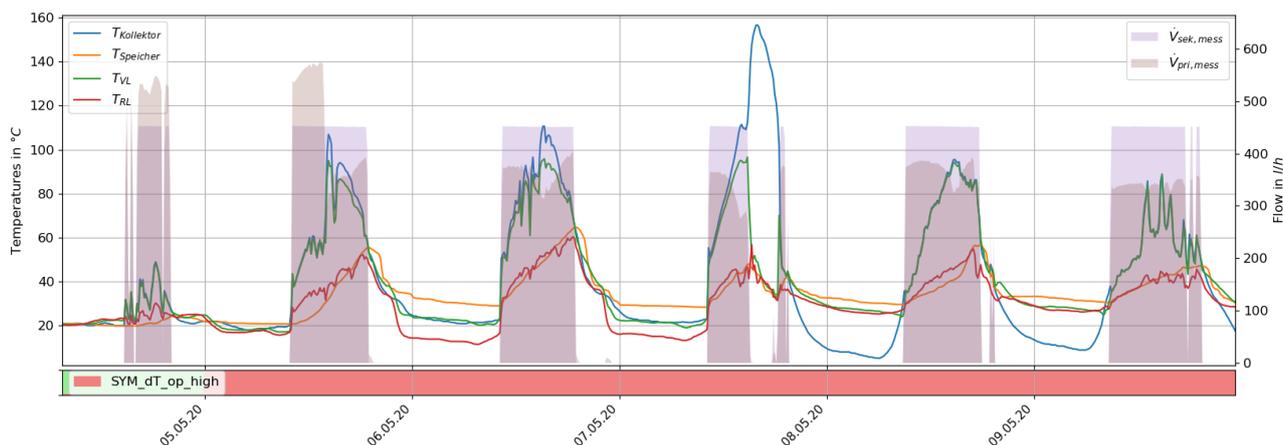


Abbildung 2-7: Anwendung des Symptoms „Temperaturdifferenz im Betrieb zu hoch“ an Messdaten einer Anlage mit gedrosselter Primärkreispumpe

2.3.4 Symptom „Kollektortemperatur unplausibel“

Wird die Kollektortemperatur falsch gemessen, weil bspw. der Kollektorfühler nicht mehr korrekt in der Tauchhülse sitzt, kommt es zu großen Differenzen zwischen der angezeigten Kollektortemperatur und der Vorlauftemperatur (direkt am Anlagenhochpunkt oder im Keller). Wichtig ist es hierbei, dass bei den betrachteten Betriebsphasen Einschaltvorgänge abgeschnitten und nur Phasen zur Auswertung genutzt werden, in denen das System schon sicher im Betrieb und eingeschwungen ist. Bei langen Rohrleitungen zwischen Kollektor- und Vorlauftemperatursensor oder sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten muss diese Zeit entsprechend länger angesetzt werden. Weiterhin gilt es zu beachten, dass parallele Felder (oder Module) mit unterschiedlichen Volumenströmen beaufschlagt sein können und sich hierdurch, trotz ggf. gleicher Feldgrößen, unterschiedliche Kollektortemperaturen ergeben. Im entwickelten Algorithmus wurde dieser Umstand wie folgt berücksichtigt. Wenn eine Kollektortemperatur unterhalb der gemeinsamen Vorlauftemperatur liegt und die andere oberhalb, kann der Betrieb nicht sicher als fehlerhaft (oder fehlerfrei) identifiziert werden. Nur wenn alle Kollektortemperaturen unterhalb der Vorlauftemperatur liegen, werden die Messungen als unplausibel detektiert.

Abbildung 2-8 zeigt die Anwendung des Algorithmus an Messdaten einer Anlage mit schlecht sitzenden Kollektortemperaturfühlern. Im oberen Bereich sind die Kollektortemperaturen von zwei parallelen, annähernd gleich großen Kollektorfeldern blau und orange sowie die Vorlauftemperatur am externen Wärmeübertrager grün aufgezeichnet (linke Achse). Flächig rosa eingetragen, ist das Pumpensignal als Indikator für den Anlagenbetrieb (rechte Achse). Im unteren Bereich der Abbildung sind die Temperaturdifferenzen zwischen den Kollektor- und der Vorlauftemperatur im Betrieb dargestellt.

ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS

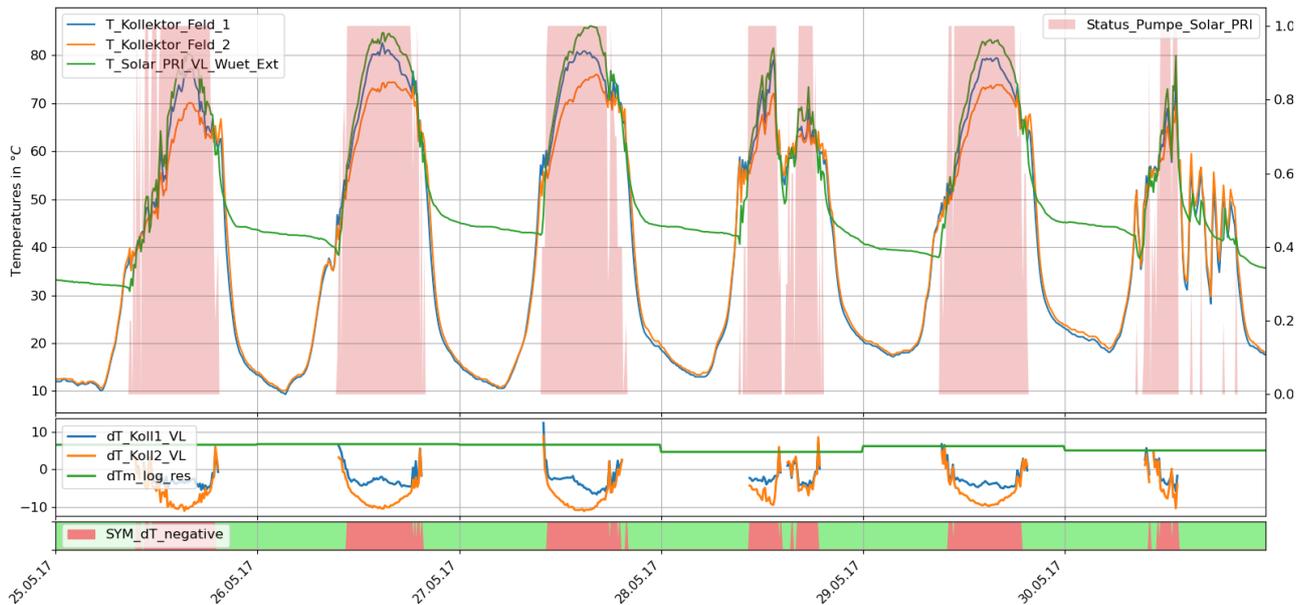


Abbildung 2-8: Anwendung des Symptoms „Kollektortemperatur unplausibel“ an Messdaten einer Anlage mit schlecht sitzenden Kollektortemperaturfühlern

Wie zu erkennen ist, sind die Temperaturdifferenzen im dargestellten Zeitraum gleichzeitig über längere Zeit negativ. Die Vorlauftemperatur im Keller liegt also über den Temperaturen an den Kollektoren. Dieses Verhalten wird als unplausibel detektiert und das Symptom „Kollektortemperatur unplausibel“ wird ausgelöst (rote/grüne Balken im unteren Bereich). Da das Symptom in diesem Anwendungsfall nicht auf Tagesbasis umgerechnet wurde, sondern die Auswertung der Messdaten im Original-Zeitschritt zeigt, sind Bereiche grün gekennzeichnet, in denen die Anlage nicht läuft oder die Temperaturdifferenz unauffällig ist.

2.3.5 Symptom „UA-Wert zu niedrig“

Um den UA-Wert eines Wärmeübertrages im Betrieb berechnen zu können, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Wie Abbildung 2-9 zeigt, werden die Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Volumenströme jeweils primär- und sekundärseitig benötigt. Entscheidend für die Aussagekräftige Berechnung des UA-Wertes ist außerdem das Filtern der Messdaten nach stationären Betriebsphasen. Nur in stationären Phasen lässt sich der UA-Wert mit einfachen Formeln berechnen. Der implementierte Filter erfasst stationäre Phasen über drei Stellschrauben: minimale bzw. maximale Änderung je Zeitschritt, maximal erlaubte Änderung über die gesamte Phase und Schwankungen des Signals im Vergleich zu einem zeitlich geglätteten Signal. Zusätzlich kann eine Mindest-Phasenlänge spezifiziert werden, um kürzere Phasen zu verwerfen. Die gefilterten Messwerte werden dann verwendet, um die abgegebene Leistung des Primärkreises bzw. die aufgenommene Leistung des Sekundärkreises je stationärer Phase zu berechnen. Ebenfalls wird die logarithmische Temperaturdifferenz berechnet (Annahme: Gegenstrom WÜT). Die Merkmale (Leistungen und $\Delta T_{m,\log}$) werden jeweils als Mittelwert für die stationäre Phase berechnet und weitergegeben. Der UA-Wert des Wärmeübertragers ergibt sich dann als das Verhältnis der Leistung zur logarithmischen Temperaturdifferenz ebenfalls als Mittelwert je Phase. Unter Verwendung eines einfachen

ALGORITHMENBASIERTE FEHLERDETEKTION: BEREICH SOLARKREIS

Sollwertes auf Basis der Kollektorfläche ($700..900 \text{ W/m}^2_{\text{Koll}}$) kann hiermit ein Symptom berechnet werden.

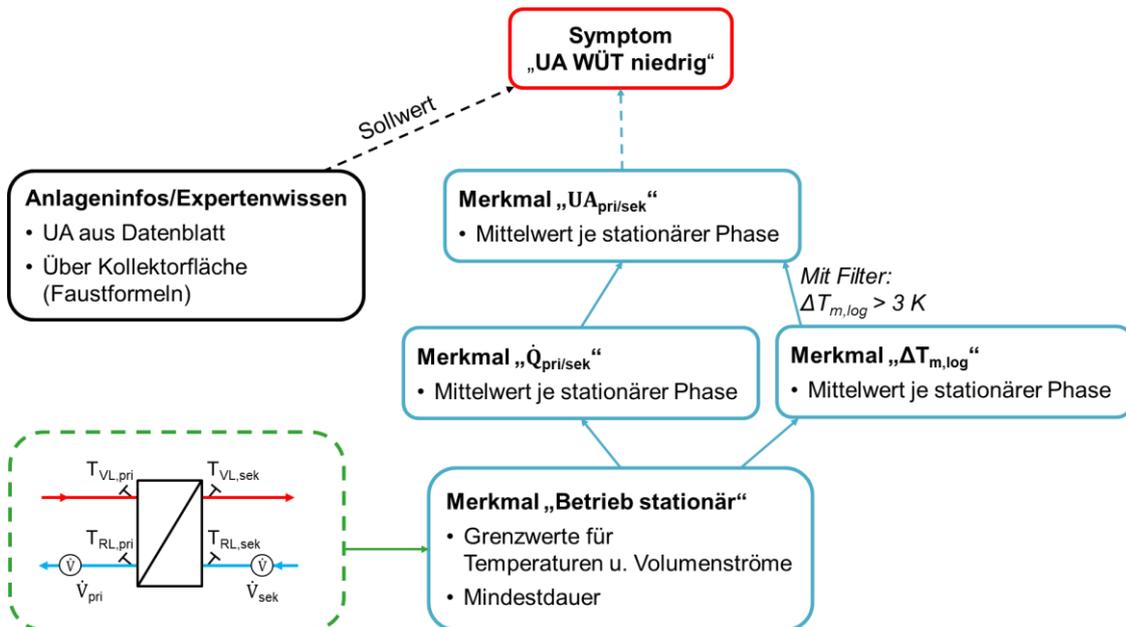


Abbildung 2-9: Vorgehensweise und Merkmale zur Erzeugung des Symptoms „UA-Wert zu niedrig“

Abbildung 2-10 zeigt die statistische Auswertung der UA-Werte des externen Solarkreis-Wärmeübertragers einer Versuchsanlage. Insgesamt wurden hier 651 stationäre Betriebsphasen analysiert. Wie zu erkennen ist, ergibt sich bei der Analyse kein exakter UA-Wert, obwohl die Volumenströme auf Primär- und Sekundärseite einigermaßen konstant waren (keine Drehzahlregelung). Vielmehr zeigen sich deutliche Schwankungen, verursacht durch verschiedene Betriebszustände bzw. -temperaturen. In den Histogrammen ist ein maximum bei ca. 1,3 kW/K zu sehen. Signifikante Unterschiede zwischen Primär- und Sekundärseite als Berechnungsgrundlage sind nicht auszumachen.

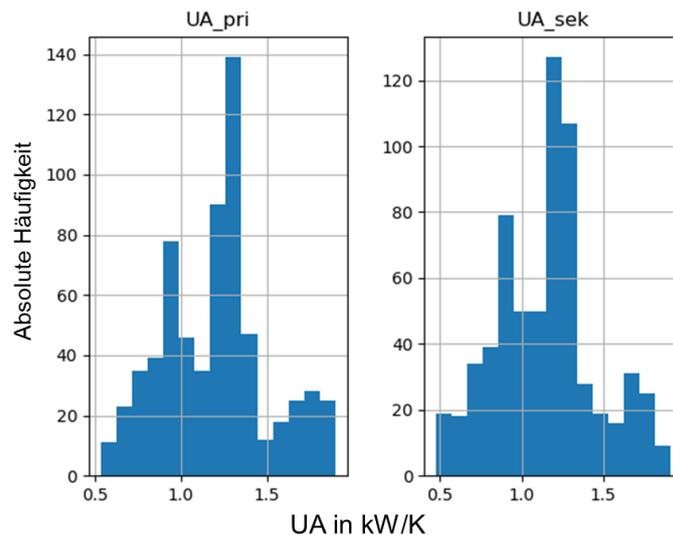


Abbildung 2-10: UA-Werte des externen Solarkreis-Wärmeübertragers einer Versuchsanlage. Berechnet anhand des Wärmestroms auf Primärseite (UA_{pri}) und auf Sekundärseite (UA_{sek}), Auswertung von 651 stationären Phasen

Die Überprüfung des UA-Wertes geschieht anschließend in einem separaten Schritt. Hierbei kann entweder ein z.B. aus dem Datenblatt bekannter Referenzwert angegeben werden, oder es wird per Faustformel mit $700..900 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ verglichen, sofern die Gesamtkollektorfläche bekannt ist.

2.4 Fazit Algorithmenentwicklung Bereich Solarkreis

Mit dem zweiten Schwerpunkt innerhalb des Projektes auf Funktionskontrollalgorithmen auf Komponentenebene sollten vor allem die langsame Reaktionszeit des FSC-basierten Leistungsindikators adressiert und die Möglichkeit zur Fehlerlokalisierung geschaffen werden. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu Algorithmen für 6 übergeordnete Symptome mit verschiedenen Berechnungswegen und Varianten programmiert und an Messdaten von 8..10 Anlagen unterschiedlicher Größe getestet. Die Symptomalgorithmen greifen auf ca. 23 Merkmalalgorithmen und ca. 24 Funktionen zurück. Die entwickelten Algorithmen ermöglichen es, die priorisierten Fehler anhand der auftretenden Symptome im Rahmen einer Funktionskontrolle frühzeitig zu erkennen und die Ursachen des jeweiligen Fehlverhaltens einzugrenzen.

3 Algorithmenbasierte Fehlerdetektion: Bereich Speicher und Nachheizung

Die algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich des Warmwasserspeichers und der Nachheizung ist in einem eigenständigen Dokument im Anhang-Kapitel 8.1 beschrieben. Die behandelten Fehler sind:

- Temperaturfühler im Speicher vertauscht,
- Temperaturfühler im Speicher partiell defekt,
- Nachheiz-Temperaturfühler im Speicher vertikal falsch positioniert bzgl. der Speicheranschlüsse,
- Wärmeverluste des Speichers zu hoch,
- Hysterese der Nachheizungsregelung zu niedrig,
- Volumenstrom der Nachheizung zu niedrig,
- Nachheizung liefert keine Wärme.

Für diese Fehler werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Fehlerdetektion aufgeführt. Für die vielversprechendste Möglichkeit wird ein Algorithmus in Textform und in Form eines Prozessfließbilds beschrieben. Zudem wird eine Fehlerausgabe und eine Handlungsempfehlung für jeden Fehler und Algorithmus vorgeschlagen. Außerdem wird die Dringlichkeit der Fehlerbehandlung bewertet und es werden die Einschränkungen des jeweiligen Algorithmus benannt. Grundlage für alle Algorithmen ist das Großanlagen-Hydraulikschema 2b (vgl. Abbildung 1-2). Anhand dieses Hydraulikschemas werden alle Sensoren gezeigt, die für die Fehlerdetektionen notwendig sind.

Die Dokumentation im Anhang-Kapitel 8.2 dient als Vorlage für die Programmierung der Algorithmen in die entsprechende Software. Durch die Handlungsempfehlungen innerhalb der Fehlerausgabe steht eine Checkliste zur Validierung und Behebung des detektierten Fehlers zur Verfügung.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SolarCheck wurden zwei Möglichkeiten zur automatisierten Funktionsüberwachung thermischer Solaranlagen untersucht: ein FSC-basierter Indikator, der die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems anzeigt, und ein komponentenorientierter Ansatz, welcher auf Grundlagen von Algorithmen gezielt Fehler anzeigt und Informationen zur Ursache liefert.

Die Methodenentwicklung des FSC-basierten Leistungsindikators geschah anhand von über 10.000 TRNSYS-Jahressimulationen. Es wurde gezeigt, dass FSC- f_{sav} -Korrelationen bei breiter Parametervariation eine Streuung aufweisen, die nur ungenaue Aussagen zuließe. Die Genauigkeit der Korrelation kann aber durch Korrekturfunktionen für den TWW-Anteil, den nominellen Kollektorwirkungsgrad, die Speichergröße, Nachheizvolumen und -temperatur auf ca. $\pm 11\%$ (relativ, für f_{sav}) verbessert werden. Dabei genügt es jedoch, eine gemeinsame Korrelation für alle Kombisystem-Hydrauliken zu nutzen. Die Korrekturfunktionen sind jeweils nur von einem Einflussparameter abhängig und können automatisiert aus Anlagenmessdaten und Basisparametern wie Kollektoraperturfläche und Speichervolumen bestimmt werden. Das nur für Kombianlagen gültige Verfahren benötigt als Messpunkte die Wärmemengen in allen Kreisen (außer Solarkreis), wobei bereits eine monatliche Auflösung ausreichend ist. Kalibrierte Wärmemengenzähler sind dafür nicht zwingend erforderlich, jedoch sollten hochwertige Temperatur- und Volumenstromsensoren verwendet werden, da sonst die Messunsicherheit zu groß wird und damit keine gesicherte Aussage über die Funktionsfähigkeit mehr möglich ist. Das Verfahren ermöglicht es also, mit geringem Rechenaufwand bei Kombianlagen automatisiert zu detektieren, ob eine Anlage deutlich geringere Einsparungen liefert als erwartet und damit fehlerhaft oder sehr ineffizient ist. Nachteilig sind die erhöhten Kosten für Sensorik und die aufgrund des jährlichen Bilanzzeitraums träge Reaktion des Leistungsindikators. Außerdem wird durch den Indikator noch nicht die Ursache für die Leistungseinbußen eingegrenzt.

Der FSC-basierte Leistungsindikator wurde außerdem an Messdaten realer Anlagen getestet. Die dazu zur Verfügung stehenden Messdaten stammten aus vorangegangenen Forschungsprojekten und lagen zum größten Teil bereits als vorausgewertete Monats- oder Jahresdaten vor. Der Zeitpunkt der Messdatenerfassung lag bei den Anlagen 10 bzw. 20 Jahre zurück. Aussagen über Regelungseinstellungen, etwaige Probleme im Anlagenbetrieb oder bei der Messdatenerfassung konnten nicht mehr nachvollzogen werden, weshalb diese Messdaten nur sehr eingeschränkt zur Überprüfung des Verfahrens verwendet werden konnten. Zusätzlich wurden deshalb Simulationsdaten aus sogenannten CTSS-Prüfungen auf ihre Eignung zur Verifikation des Verfahrens geprüft. Beim CTSS-Verfahren werden die Hauptkomponenten einer solarthermischen Anlage nach standardisierten Normverfahren geprüft und die Gesamtanlage im zweiten Schritt in einem Simulationsprogramm durch Jahressimulationen unter Referenzbedingungen abgebildet. Die ersten Vergleiche der FSC- f_{sav} -Paare, die aus den Ergebnissen der CTSS-Simulationen gewonnen wurden bestätigen im Wesentlichen die im Projekt erstellten Korrelationen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im zweiten Teil des Projekts wurde ein komponentenorientierter Ansatz verfolgt. Dieser hat seine Stärken in der schnellen Erkennung von einzelnen Fehlfunktionen und kann prinzipiell für beliebige Anlagen und Sensoren verwendet werden. Nachteilig bzw. aufwändig ist hierbei, dass für alle Fehler bzw. Symptome, die vom Verfahren erkannt werden sollen, explizit Algorithmen entwickelt werden müssen. Darüber hinaus werden hier nur Komponenten bzw. kleinere Bereiche einer Anlage kontrolliert, eine Aussage über den Einfluss auf das Gesamtsystem oder dessen Effizienz wird hierbei nicht getroffen.

Ausgangspunkt für die Algorithmenentwicklung in diesem Projekt war eine interne FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse), aus der eine Liste mit priorisiert zu betrachtenden Anlagenfehlern hervorging. Die Fehler im Bereich Solarkreis wurden jeweils analysiert und hinsichtlich ihrer Auswirkungen gruppiert. Für die entscheidenden Auswirkungen (Symptome) und die dazu benötigten Merkmale wurden Algorithmen entwickelt und in Python umgesetzt. Dabei wurden jeweils mehrere Berechnungswege berücksichtigt, um Symptome und Fehler trotz unterschiedlicher Varianten vorhandener Messdaten erkennen zu können. Die Algorithmen wurden nicht nur anhand realer Messdaten entwickelt, sondern auch implementiert und an Messdaten weiterer Anlagen getestet.

Für die Fehler im Bereich Speicher und Nachheizung wurden ebenfalls unterschiedliche Detektionswege aufgeführt und Algorithmen für die am treffsichersten eingeschätzten Detektionswege entwickelt. Zudem wurden Checklisten erstellt, anhand derer die Fehler validiert und behoben werden können. Der Fokus der Algorithmenentwicklung im Bereich Speicher und Nachheizung wurde auf die Anwendung an Großanlagen gelegt, für welche eine hinreichende Sensorik als Basis für die automatisierte Fehlerdetektion angenommen werden kann.

5 LITERATURVERZEICHNIS

[1] T. Letz, C. Bales, und B. Perers, „A new concept for combisystems characterization: The FSC method“, *Solar Energy*, Bd. 83, Nr. 9, Art. Nr. 9, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.05.002.

[2] Christoph Schmelzer, M. Georgii, und K. Vajen, „FeDet – Automatische Fehlerdetektion und Diagnose thermischer Solaranlagen. Entwicklung, Untersuchung und Anwendung von Methoden zur Langzeitüberwachung und automatisierter Fehlerdetektion großer, solarunterstützter Wärmeversorgungssysteme“, Institut für Thermische Energietechnik Universität Kassel, Kassel, Abschlussbericht, Juni 2015.

[2] Harald Drück et al., „Leistungsprüfung und ökologische Bewertung von kombinierten Solar-Wärmepumpenanlage – WPSol“, Forschungsbericht zum BMWi Vorhaben, FKZ 0325967A, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik Universität Stuttgart, Stuttgart, April 2016

6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Grundprinzip der FSC-Methode zur Leistungsbewertung.....	9
Abbildung 1-2 Kombisysteme 1b, 1c und 2b, 2c.....	10
Abbildung 1-3 Kombisystem 3b, 3c.....	11
Abbildung 1-4 TWW-System 4	11
Abbildung 1-5 Kombisystem 5	12
Abbildung 1-6: Softwaretool I - SimulationHandler.....	12
Abbildung 1-7: Softwaretool II – OutFileGatherer u. Datasets.....	13
Abbildung 1-8: Softwaretool III – CorrelationMaker	14
Abbildung 1-9 Gesamtstreuung der Korrelation bei breiter Parametervariation	15
Abb. 1-10 Implizite Abhängigkeit von FSC für einige Kenngrößen	17
Abb. 1-11 Korrelationskoeffizienten	18
Abb. 1-12 Histogramme der relativen Residuen zur Korrelation.....	20
Abbildung 1-13 Residuen vor und nach der Korrektur für die simulierten Systeme.....	21
Abbildung 1-14 Korrelation für solarunterstützte TWW-Systeme	22
Abbildung 1-15: RFSC – Erweiterung der Methodik um einen theoretischen Speicherterm..	23
Abbildung 1-16: fsav, use-RFSC-Punkte des Systems $\text{int}_{\text{sol}} + \text{int}_{\text{DHW}}$ (3b) auf Jahresbasis	24
Abbildung 1-17: fsav, use-RFSC-Punkte des Systems $\text{int}_{\text{sol}} + \text{int}_{\text{DHW}}$ (3b) auf Monatsbasis	24
Abbildung 1-18: fsav, use/RFSC-SLR-Korrelation für das System $\text{int}_{\text{sol}} + \text{int}_{\text{DHW}}$ (3b).....	24
Abbildung 1-19: RFSC- & SLR-Korrelation für das System $\text{int}_{\text{sol}} + \text{int}_{\text{DHW}}$ (3b)	24
Abbildung 1-20: Einfluss der Messunsicherheit auf die Unsicherheitsbereiche der FSC- Korrelation.....	27
Abbildung 1-21: Übersicht der verfügbaren Messdaten	35
Abbildung 1-22: Prinzipieller Ablauf des CTSS-Verfahrens	36
Abbildung 1-23: Hydraulikschema der Referenzanlage.....	37
Abbildung 1-24: Schematische geplante Vorgehensweise bei der Vorverarbeitung	40
Abbildung 1-25: Graphische Gegenüberstellung von Anlagen mit unterschiedlichen Standardhydrauliken	41
Abbildung 1-26: Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren.....	42
Abbildung 1-27: Graphische Darstellung der Ergebnisse der Auswertung der semi- synthetischen Messdaten	44
Abbildung 2-1: Mehrstufiges Verfahren zur Fehlererkennung.....	47
Abbildung 2-2: Detektionswege des Symptoms „Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen“	49
Abbildung 2-3: Test des Symptoms "Stillstand trotz erfüllter Betriebsbedingungen" an Messdaten einer Anlage mit abgesperrten Solarkreis.....	50
Abbildung 2-4: Detektionswege des Symptoms „Volumenstrom im Betrieb zu klein“.....	50
Abbildung 2-5: Test des Symptoms "Volumenstrom im Betrieb zu klein" an Messdaten einer Anlage mit stark gedrosselter Primärkreispumpe	51
Abbildung 2-6: Differenz zwischen Vor- und Rücklaufemperatur im primären Solarkreis im Betrieb.....	52

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-7: Anwendung des Symptoms „Temperaturdifferenz im Betrieb zu hoch“ an Messdaten einer Anlage mit gedrosselter Primärkreispumpe	53
Abbildung 2-8: Anwendung des Symptoms „Kollektortemperatur unplausibel“ an Messdaten einer Anlage mit schlecht sitzenden Kollektortemperaturfühlern	54
Abbildung 2-9: Vorgehensweise und Merkmale zur Erzeugung des Symptoms „UA-Wert zu niedrig“	55
Abbildung 2-10: UA-Werte des externen Solarkreis-Wärmeübertragers einer Versuchsanlage	55

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Variationsparameter und -bereiche.....	14
Tabelle 1-2: Weitere betrachtete Parameter zur Anlagencharakterisierung	15
Tabelle 1-3: Gültigkeitsbereiche der Korrekturfaktoren.....	21
Tabelle 1-4: Ausgewählte Sensorik-Kombinationen	26
Tabelle 1-5: Detektionsbereiche ausgewählter Systeme bei den untersuchten Sensorik-Kombinationen.....	27
Tabelle 1-6: Kosten Temperatursensoren, Internetrecherche	28
Tabelle 1-7: Kosten Durchflusssensoren, Internetrecherche	29
Tabelle 1-8: Kosten Wärmemengenzähler, Internetrecherche	29
Tabelle 1-9: Übersicht der Simulationsparameter ausgewählter Anlagen.....	37
Tabelle 1-10: Übersicht der Systemvarianten der Referenzanlage	42

8 Anhang

8.1 Lastenheft für benötigte Messdaten und Anlageninformationen

ID	Anforderung	Soll-Vorgabe	
		Mind.	Opt.
1	Allgemeine Informationen		
1.1	Standardhydraulik (für Zuordnung s. Übersicht)	-	-
1.2	Standort	Ortsname + PLZ	Koordinaten
1.3	Hydraulikschema		mit Kennzeichnung der Sensoren
1.4	Kollektoren		
1.4.1	Kollektorfläche oder Anzahl Kollektoren (bei Angabe von Hersteller und Typ)		
1.4.2	Ausrichtung (Erforderlich, wenn keine Strahlungsdaten in Kollektorebene verfügbar)		
1.4.3	Anstellwinkel (Erforderlich, wenn keine Strahlungsdaten in Kollektorebene verfügbar)		
1.4.4	Hersteller		
1.4.5	Typ		
1.5	Warmwasserspeicher		
1.5.1	Speichervolumen		
1.5.2	Hersteller		
1.5.3	Typ		
1.6	Nachheizung		
1.6.1	Art der Nachheizung		
1.6.2	Nennleistung		
1.6.3	Hersteller		
1.6.4	Typ		
1.7	Pumpen		
	Hersteller		
	Typ		
2	Sensoren		
2.1	Allgemeine Informationen		
2.1.1	Sensordaten (Zuordnung Sensoren zu Header oder Spalte im Messdatenfile!)		
2.1.2	Informationen über Einheiten der erfassten Messgrößen		
2.2	Solarkreis(e)		
2.2.1	Anzahl der Kreise		
2.2.2	Sensoren im jeweiligen Kreis	Wärmemengenzähler	Temperaturen Vor- und Rücklauf, Volumenstrom
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
2.3	Nachheizkreis		
2.3.1	Sensoren im Kreis	Wärmemengenzähler	Temperaturen Vor- und Rücklauf, Volumenstrom
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
2.3.2	Zusätzlich/alternativ zu Sensoren im Nachheizkreis: Gas-/Öl-Verbrauch	monatlich	höher aufgelöst
2.4	TWW-Einbindung		
2.4.1	Sensoren		
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
2.5	Heizkreis(e)		
2.5.1	Anzahl der Kreise		
2.5.2	Sensoren im jeweiligen Kreis		
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit der Sensoren		
2.6	Sonstige Messtechnik		
2.6.1	Temperaturen im Speicher		
	Position der Sensoren im Speicher		
	Art der Sensoren		
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
2.6.2	sol. Einstrahlung		
	Art des Sensors		
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
	Ausrichtung	-	in Kollektorebene
2.7	andere (z.B. Druck, Wind, Außentemperatur)		
	Position im System		
	Art des Sensors		
	Hersteller		
	Typ		
	Messgenauigkeit		
3	Informationen zur Messdatenerfassung		
3.1	zeitl. Auflösung der Messdaten	monatlich	10 Min. oder feiner
3.2	Informationen zur Art der Messdatenerfassung		
4	Informationen zur Regelung		
4.1	Regelstrategie Nachheizung		
4.2	Regelstrategie Solaranlage		

8.2 Algorithmenbasierte Fehlerdetektion: Bereich Speicher und Nachheizung

SolarCheck

Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im
Bereich Speicher und Nachheizung

Inhalt

1	Nomenklatur.....	3
2	Hydraulik schemata und Fühlerpositionen	6
3	Behandelte Fehler	8
4	Angenommene Regelungsstrategien	9
5	Allgemeine Anmerkungen und Annahmen	11
6	Fehler: Temperaturfühler im Speicher vertauscht.....	12
7	Fehler: Temperaturfühler im Speicher partiell defekt	21
8	Fehler: Nachheiz-Temperaturfühler im Speicher vertikal falsch positioniert bzgl. der Speicheranschlüsse	33
9	Fehler: Wärmeverluste des Speichers zu hoch	38
10	Fehler: Hysterese der Nachheizungsregelung zu niedrig	42
11	Fehler: Volumenstrom der Nachheizung zu niedrig.....	46
12	Fehler: Nachheizung liefert keine Wärme.....	50

1 Nomenklatur

1.1 Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
F	Fernwartung
HP	Heizkreispumpe
KP	Kesselpumpe
NH	Nachheizung
RH	Raumheizung
SP	Solarpumpe
TP	TWW-Pumpe
TWW	Trinkwarmwasser
VO	Vor-Ort-Wartung
WMZ	Wärmemengenzähler

1.2 Formelzeichen

Lateinische Symbole

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
$a_{9,1}$	Faktor 1 für die Wärmemenge des Speichers in Kapitel 9	-
$a_{UA,still}$	Grenzwert für die Wärmeverlustrate aus dem Stillstandsversuch	-
$a_{UA,still,set}$	Grenzwert für die Wärmeverlustrate aus dem Stillstandsversuch gemäß DIN EN 12977-3	-
$a_{UA,WMZ}$	Grenzwert für die Wärmeverlustrate aus Bilanz der Speicherbe- und Entladungen	-
$a_{UA,WMZ,set}$	Grenzwert für die Wärmeverlustrate aus Bilanz der Speicherbe- und Entladungen gemäß DIN EN 12977-3	-
c_p	spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K)
$f_{Brenner}$	Stellwert der Brennerleistung	%
$f_{Brenner,m}$	Zeitlicher Mittelwert des Stellwertes der Brennerleistung	%
$f_{Brenner,set,11,1}$	Sollwert 1 des Stellwertes der Brennerleistung in Kapitel 11	%
I_{glob}	(Sensor für) Globalstrahlung	W/m ²
$I_{glob,set,1}$	Sollwert 1 für Globalstrahlung	W/m ²
$n_{11,1}$	Anzahl an Übergängen 1 in Kapitel 11	-
$n_{set,11,1}$	Sollwert der Anzahl an Übergängen 1 in Kapitel 11	-
Q_{HK}	Vom Speicher in den Heizkreis übertragene Wärmemenge	J
Q_{NH}	Von der Nachheizung in den Speicher übertragene Wärmemenge	J

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

Q_{Sol}	Vom Solarkreis in den Speicher übertragene Wärmemenge	J
Q_{Sp}	Wärmemenge des Speichers	J
$Q_{Sp,B/E}$	Summe der Wärmemengen aller Speicherbe- und entladungen	J
Q_{TWW}	Vom Speicher in den TWW-Kreis übertragene Wärmemenge	J
$Q_{Verlust}$	Verlustwärmemenge des Speichers	J
\dot{Q}_{HK}	Vom Speicher in den Heizkreis übertragener Wärmestrom	W
\dot{Q}_{NH}	Von der Nachheizung in den Speicher übertragener Wärmestrom	W
$\dot{Q}_{NH,set,12,1}$	Sollwert 1 für den von der Nachheizung in den Speicher übertragener Wärmestrom in Kapitel 12	W
\dot{Q}_{sol}	Vom Solarkreis in den Speicher übertragener Wärmestrom	W
\dot{Q}_{TWW}	Vom Speicher in den TWW-Kreis übertragener Wärmestrom	W
$t_{6,1,1}$	Zeit(-raum, -punkt) 1 in Kapitel 6.1 (entsprechend für andere Kapitel)	s
$t_{set,9,2}$	Sollwert für Zeitraum 2 in Kapitel 9 (entsprechend für andere Kapitel und Zeiten)	s
$UA_{Sp,WMZ}$	Wärmeverlustrate des Speichers aus Bilanz der Speicherbe- und Entladungen	W/K
$UA_{Sp,still}$	Wärmeverlustrate des Speichers aus dem Stillstandsversuch	W/K
V_{Sp}	Nennvolumen des Speichers	m ³
\dot{V}_{HK}	(Sensor für) Volumenstrom des Heizkreises	m ³ /s
\dot{V}_{NH}	(Sensor für) Volumenstrom der Nachheizung	m ³ /s
\dot{V}_{sol}	(Sensor für) Volumenstrom des Solarkreises (speicherseitig)	m ³ /s
\dot{V}_{TWW}	(Sensor für) Volumenstrom des Trinkwarmwasserkreises (speicherseitig)	m ³ /s

Griechische Symbole

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
ρ	Dichte	kg/m ³
$\Delta\vartheta_{NH}$	Temperaturdifferenz zwischen Kesselvor- und rücklauf	°C
$\Delta\vartheta_{NH,set,12,1}$	Sollwert 1 für Temperaturdifferenz zwischen Kesselvor- und rücklauf in Kapitel 12 (entsprechend für andere Kapitel)	
$\Delta\vartheta_{set,7.1,1}$	Sollwert 1 für Temperaturdifferenz in Kapitel 7.1 (entsprechend für andere Kapitel)	°C
$\Delta\vartheta_{Sp}$	Temperaturdifferenz zwischen gemittelter Speichertemperatur und Speicherumgebungstemperatur	°C

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

$\Delta\vartheta_{Sp,t}$	Zeitlicher Mittelwert der Temperaturdifferenz zwischen gemittelter Speichertemperatur und Umgebungstemperatur	°C
ϑ_{amb}	(Fühler für) Umgebungstemperatur	°C
$\vartheta_{amb,Sp}$	(Fühler für) Speicher-Umgebungstemperatur	°C
$\vartheta_{HK,1}$	(Fühler für) Vorlauftemperatur des Heizkreis	°C
$\vartheta_{HK,2}$	(Fühler für) Rücklauftemperatur des Heizkreis	°C
$\vartheta_{Kol,1}$	(Fühler für) Kollektoraustrittstemperatur	°C
$\vartheta_{NH,1}$	(Fühler für) Vorlauftemperatur der Nachheizung	°C
$\vartheta_{NH,2}$	(Fühler für) Rücklauftemperatur der Nachheizung	°C
$\vartheta_{sol,1}$	(Fühler für) Vorlauftemperatur des Solarkreises (speicherseitig)	°C
$\vartheta_{sol,2}$	(Fühler für) Rücklauftemperatur des Solarkreises (speicherseitig)	°C
$\overline{\vartheta_{Sp}}$	Gemittelte Speichertemperatur	°C
$\vartheta_{Sp,max}$	Maximaltemperatur des Speichers	°C
$\vartheta_{Sp,o}$	(Fühler für) Speichertemperatur oben	°C
$\vartheta_{Sp,RH}$	(Fühler für) Speichertemperatur zur Regelung der Raumheizung	°C
$\vartheta_{Sp,RH,set,1}$	Sollwert 1 der Temperatur zur Regelung der Raumheizung (Heizkurve)	°C
$\vartheta_{Sp,sol}$	(Fühler für) Speichertemperatur zur Regelung des Solarkreises	°C
$\vartheta_{Sp,TWW}$	(Fühler für) Speichertemperatur zur Regelung des Vorhaltevolumens für Trinkwarmwasser	°C
$\vartheta_{Sp,TWW,set,1}$	Sollwert 1 der Temperatur zur Regelung des Vorhaltevolumens für Trinkwarmwasser	°C
$\vartheta_{TWW,1}$	(Fühler für) Vorlauftemperatur des Trinkwarmwasserkreises (speicherseitig) <u>vor</u> Rücklaufbeimischung	°C
$\vartheta_{TWW,2}$	(Fühler für) Rücklauftemperatur des Trinkwarmwasserkreises (speicherseitig)	°C
τ_{KS}	Kesselstarts pro Tag (Taktung)	1/d
$\tau_{KS,set}$	Sollwert für Kesselstarts pro Tag (Taktung)	1/d

2 Hydraulikschemata und Fühlerpositionen

Grundlage für alle Fehlerbeschreibungen ist das Hydraulikschema 2b.

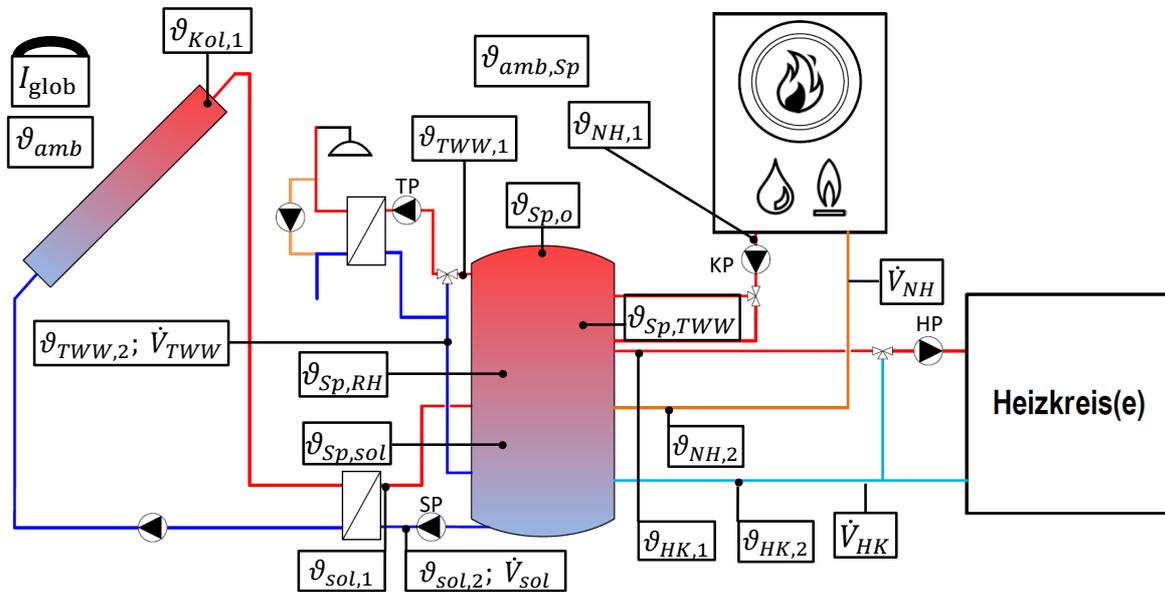


Abbildung 2-1: Hydraulikschema 2b mit zur Fehlerdetektion verwendeten Sensoren. KP: Kesselpumpe; SP: Solarpumpe; HP: Heizkreispumpe; TP: TWW-Kreis-Pumpe.

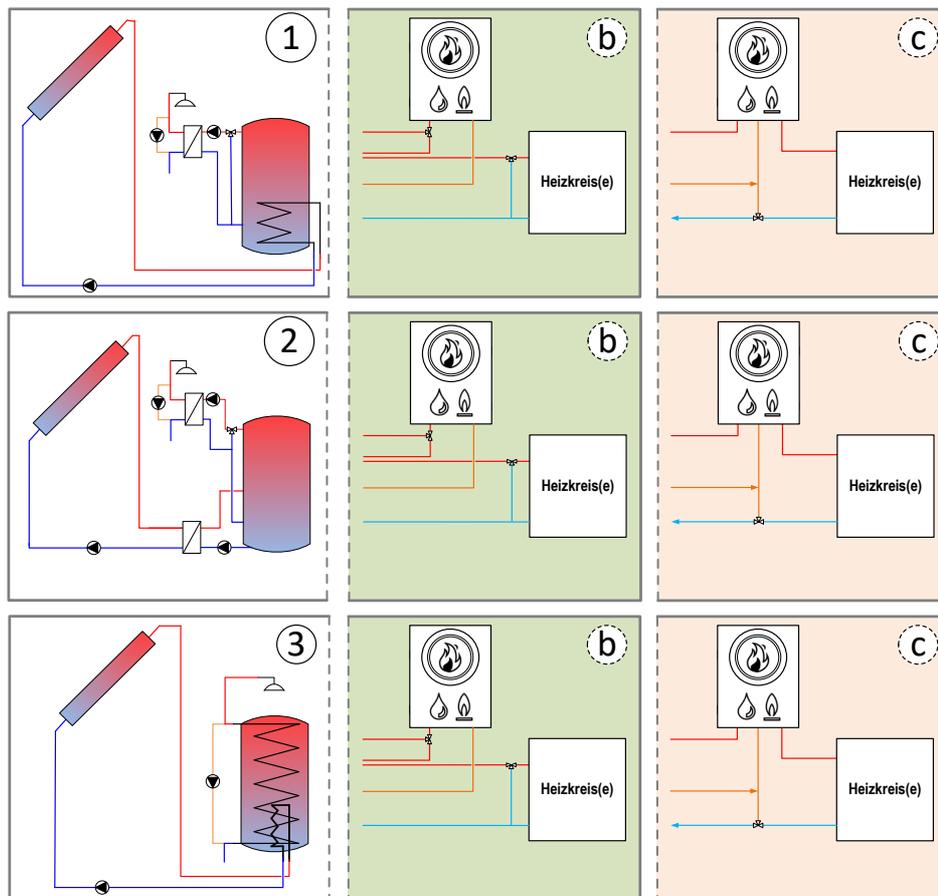


Abbildung 2-2: Hydraulikschemata 1 bis 3

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

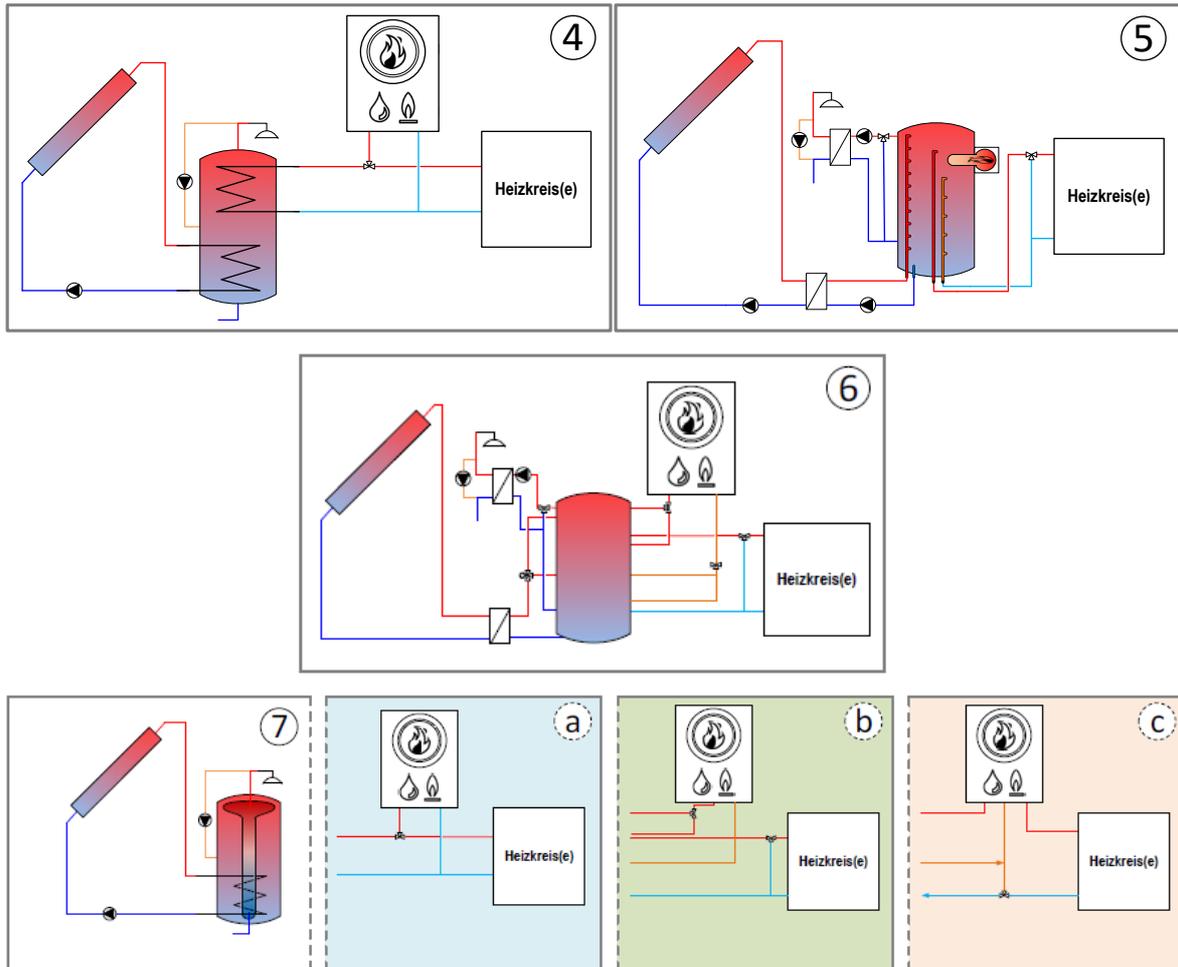


Abbildung 2-3: Hydraulikschemata 4 bis 7

3 Behandelte Fehler

3.1 Bereich Speicher

- **Temperaturfühler im Speicher vertauscht**
- **Temperaturfühler im Speicher partiell defekt**
- **Nachheiz-Temperaturfühler im Speicher vertikal falsch positioniert bzgl. der Speicheranschlüsse**
- **Wärmeverluste des Speichers zu hoch**

3.2 Bereich Nachheizung

- **Hysterese der Nachheizungsregelung zu niedrig**
- **Volumenstrom der Nachheizung zu niedrig**
- **Nachheizung liefert keine Wärme**

4 Angenommene Regelungsstrategien

4.1 Regelungsstrategie des Solarkreises

4.1.1 Ohne Strahlungssensor:

Pumpen Solarkreis an, wenn:

- $\vartheta_{Kol,1} > \vartheta_{Sp,sol}$
 - Hysterese (unbestimmt)
 - ggf. Volumenstromregelung

UND wenn:

- $\vartheta_{Sp,o} < \vartheta_{Sp,max}$ (z. B. 95 °C)
 - Ggf. Mindestlaufzeit der Pumpe
 - Ggf. Mindeststillstandszeit der Pumpe

4.1.2 Mit Strahlungssensor:

Pumpen Solarkreis an, wenn:

- $I_{glob} > I_{glob,set,1}$

UND wenn:

- $\vartheta_{Kol,1} > \vartheta_{Sp,sol}$
 - Hysterese (unbestimmt)
 - ggf. Volumenstromregelung

UND wenn:

- $\vartheta_{Sp,o} < \vartheta_{Sp,max}$ (z. B. 95 °C)
 - Hysterese (unbestimmt)
 - ggf. Volumenstromregelung

4.2 Regelungsstrategie der NH für TWW

Kessel und Kesselpumpe an, sowie Regelventil auf TWW-Einspeisepunkt eingestellt, wenn:

- $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$
 - Hysterese (unbestimmt)
 - Ggf. Mindestlaufzeit des Kessels
 - Ggf. Mindeststillstandszeit des Kessels

4.3 Regelungsstrategie der NH für RH

Kessel und Kesselpumpe an, sowie Regelventil auf RH-Einspeisepunkt eingestellt, wenn

- $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}(\vartheta_{amb})$ (Heizkurve)
 - Hysterese (unbestimmt)
 - Ggf. Mindestlaufzeit des Kessels
 - Ggf. Mindeststillstandszeit des Kessels

UND ggf. wenn:

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- Heizperiode (unbestimmt)
 - Ggf. Mindestlaufzeit des Kessels
 - Ggf. Mindeststillstandszeit des Kessels

5 Allgemeine Anmerkungen und Annahmen

- Keine Kombination der behandelten Fehler betrachtet
- Annahme: Umgebungstemperatur stets kleiner als alle im Speicher gemessenen Temperaturen

6 Fehler: Temperaturfühler im Speicher vertauscht

Anmerkung: Fehlerdetektion für maximal 2 zeitgleich vertauschte Temperaturfühler entwickelt

6.1 Solarregelung nutzt Temperaturfühler zur Überwachung der Maximaltemperatur $\vartheta_{Sp,o}$ und andersherum

6.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Solarpumpe schaltet häufiger nicht ein, oder zu früh ab, da die Regelungsbedingung $\vartheta_{Kol,1} > \vartheta_{Sp,sol}$ (\pm Hysterese) seltener gilt, da Temperatur oben im Speicher höher und vom Kessel bespeist (Vorhaltevolumen)*
- 2) *Höherer Verbrauch der Nachheizung im Vergleich zu anderen Zeiten mit hohen Einstrahlungen I_{glob} um Minderertrag der Kollektoren auszugleichen*
- 3) *Überschreiten der Maximaltemperatur des Speichers zuerst an Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$*
- 4) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. **Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt**
 - b. **Konkret: $\vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,o}$**
 - i. **Bedingungen zur Fehlerausgabe:**
 1. **Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe und Wartezeit $t_{6.1,1}$ auf**

6.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,o}$
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht
 - b. Mindestens 3 Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - c. Mindestens 2 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten

6.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,o}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)
- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,o}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

6.2 Solarregelung nutzt Temperaturfühler für Nachheizung TWW und andersherum

6.2.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Solarpumpe schaltet häufiger nicht ein, oder zu früh ab, da die Regelungsbedingung $\vartheta_{Kol,1} > \vartheta_{Sp,sol}$ (\pm Hysterese) seltener gilt, da Temperatur oben im Speicher höher und vom Kessel bespeist (Vorhaltevolumen)*
- 2) *Höherer Verbrauch der Nachheizung im Vergleich zu anderen Zeiten mit hohen Einstrahlungen I_{glob} um Minderertrag der Kollektoren auszugleichen*
- 3) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. **Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt**
 - b. **Konkret: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW}$**
 - i. **Bedingungen zur Fehlerausgabe:**
 1. **Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe und Wartezeit $t_{6.2,1}$ auf**

6.2.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.2.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW}$
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht
 - b. Mindestens 2 Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - c. Mindestens 2 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten

6.2.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.2.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für FDD-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)

- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.2.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

6.3 Solarregelung nutzt Temperaturfühler für Nachheizung RH und andersherum

6.3.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Solarpumpe schaltet häufiger nicht ein, oder zu früh ab, da die Regelungsbedingung $\vartheta_{Kol,1} > \vartheta_{Sp,sol}$ (\pm Hysterese) seltener gilt, da Temperatur oben im Speicher höher und vom Kessel bespeist (Vorhaltevolumen)*
- 2) *Höherer Verbrauch der Nachheizung im Vergleich zu anderen Zeiten mit hohen Einstrahlungen I_{glob} um Minderertrag der Kollektoren auszugleichen und da die Solltemperatur für die RH-NH scheinbar seltener erreicht wird*
- 3) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. **Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt**
 - b. **Konkret: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$**
 - i. **Bedingungen zur Fehlerausgabe:**
 1. **Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe Wartezeit $t_{6.3,1}$ auf**

6.3.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.3.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht
 - b. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - c. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. hat falsche Kalibrierkonstanten

6.3.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.3.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)

- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)
- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.3.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

6.4 Regelung für Nachheizung RH nutzt Temperaturfühler zur Überwachung der Maximaltemperatur $\vartheta_{Sp,o}$ und andersherum

6.4.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Heizung bleibt häufiger zu kalt (Nutzer merkt Fehlverhalten und meldet es ggf. an Installateur)*
- 2) *Geringerer Nachheizungsverbrauch als gewöhnlich*
- 3) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. **Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt**
 - b. **Konkret: $\vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,sol}$**
 - i. **Bedingungen zur Fehlerausgabe:**
 1. **Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe und Wartezeit $t_{6.4,1}$ auf**

6.4.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.4.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,sol}$
- 1) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht
 - b. Mindestens 2 Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - c. Mindestens 2 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten

6.4.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.4.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)
- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.4.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

6.5 Regelung für Nachheizung RH nutzt Temperaturfühler für Nachheizung TWW und andersherum

6.5.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Heizung bleibt häufiger zu kalt (Nutzer merkt Fehlverhalten und meldet es ggf. an Installateur)*
- 2) *Geringerer Nachheizungsverbrauch als gewöhnlich*
- 3) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. **Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt**
 - b. **Konkret: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$**
 - i. **Bedingungen zur Fehlerausgabe:**
 1. **Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe und RH-NH und Wartezeit $t_{6,5,1}$ auf**

6.5.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.5.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht
 - b. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- c. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. hat falsche Kalibrierkonstanten

6.5.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.5.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)
- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.5.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

6.6 Regelung für Nachheizung TWW nutzt Temperaturfühler zur Überwachung der Maximaltemperatur $\vartheta_{Sp,o}$ und andersherum

6.6.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *TWW kommt zu kalt aus der Leitung – insbesondere im Sommer, wenn kein RH-Bedarf besteht*
- 2) *Geringerer Nachheizungsverbrauch als gewöhnlich (insbesondere im Sommer)*
- 3) **Speicher-Temperaturen nicht gemäß konvektiver Schichtung**
 - a. Allgemein: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
 - b. Konkret: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$
 - i. Bedingungen zur Fehlerausgabe:
 1. Detektionssymptom tritt nach Stillstand von Solarpumpe und Kesselpumpe und Wartezeit $t_{6,6,1}$ auf

6.6.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Mehrere Speicher-Temperaturfühler sind partiell defekt bzw. haben falsche Kalibrierkonstanten
- 2) Mehrere Speicher-Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium

6.6.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht
 - b. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - c. Mindestens 1 Speicher-Temperaturfühler partiell defekt bzw. hat falsche Kalibrierkonstanten

6.6.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

6.6.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

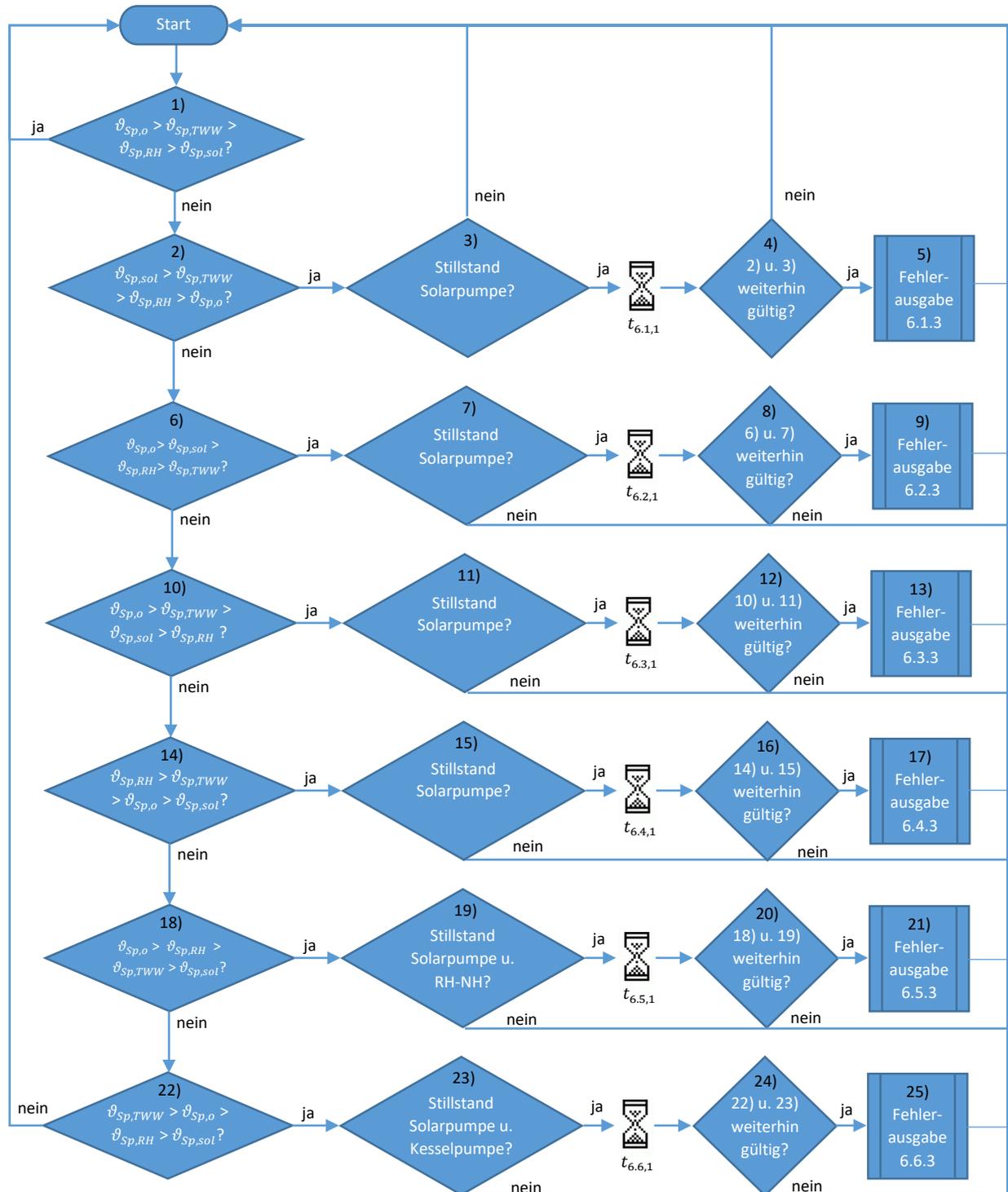
- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt sind (bzw. falscher Fühlertyp eingestellt ist) (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht wurden (F + ggf. VO)
- 5) Sitz aller Speicher-Temperaturfühler in den Tauchhülsen bzw. Klemmleisten kontrollieren und ggf. korrigieren (VO)
- 6) Ggf. Ersatz der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz weiterer Speicher-Temperaturfühler (VO)

6.6.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemaschemata: alle (1–7)

6.7 Zusammenfassung

6.7.1 Prozessflussbild



7 Fehler: Temperaturfühler im Speicher partiell defekt

Anmerkungen:

- „Partiell defekt“ schließt auch: „falsche Kalibrierkonstanten verwendet“ bzw. „falscher Fühlertyp eingestellt“ mit ein
- Voraussetzung: Sicherheitsabschaltung für gemessene „Schadens-Temperaturen“ (z. B. $< 5\text{ °C}$ und $> 95\text{ °C}$) bereits vorhanden
- Fehler „Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium“ hier als möglicher Fehler integriert

7.1 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu hohen Wert

Anmerkungen:

- wenn nicht von oberhalb der Position von $\vartheta_{Sp,o}$ gezapft wird, existiert ein Totvolumen, dass nur durch Wärmeverluste abkühlen kann
- Voraussetzung: Sicherheitsabschaltung für $\vartheta_{Sp,o} \geq \vartheta_{Sp,max}$ bereits vorgesehen

7.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Häufige Sicherheitsabschaltungen*
 - a. *Definition „häufig“ und spezifische Zuordnung zu konkretem Fehler schwierig*
- 2) $\vartheta_{Sp,o} \geq \vartheta_{Sp,max}$ während gilt: $\vartheta_{Sp,o} - \vartheta_{Sp,TWW} > \Delta\vartheta_{set,7.1,1}$
 - a. *geeigneten Wert für $\Delta\vartheta_{set,7.1,1}$ zu definieren kaum möglich. Bei guter Schichtung kann Differenz $\vartheta_{Sp,o} - \vartheta_{Sp,TWW}$ sehr groß werden*
- 3) $\vartheta_{Sp,o} > \text{MAX}(\vartheta_{sol,1})$ UND $\vartheta_{Sp,o} > \text{MAX}(\vartheta_{NH,1})$ der vergangenen Zeit $t_{7.1,1}$
 - a. *In Worten: Wenn Speichertemperatur oben größer ist, als alle gemessenen Beladetemperaturen innerhalb der voranliegenden Zeit $t_{7.1,1}$, könnte Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ defekt sein*
 - b. *Dazu kontinuierliche Speicherung von Messwerten, sowie deren Abrufung und Maximalwertbildung nach jedem Zeitraum $t_{7.1,1}$ nötig. Es wird dann der Einzelwert der Temperatur $\vartheta_{Sp,o}$ am Ende des Zeitraums $t_{7.1,1}$ mit den Maximalwerten von $\vartheta_{sol,1}$ und $\vartheta_{NH,1}$ innerhalb des Zeitraums $t_{7.1,1}$ verglichen*

7.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Entweder $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ oder beide Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Wärmeträgerfluid
- 2) Entweder $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ oder beide Temperaturfühler messen zu geringe Temperaturen (partiell defekt)

7.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Mögliche Fehler (sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Entweder $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ oder beide Temperaturfühler haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Wärmeträgerfluid
 - b. Entweder $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ oder beide Temperaturfühler messen zu geringe Temperaturen (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

- c. $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$, $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$, $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ physisch korrekt installiert sind (VO)
- 5) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$, $\vartheta_{sol,1}$ (VO)
- 8) Ggf. Ersatz weiterer Temperaturfühler (VO)

7.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 2, 6

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

7.2 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu geringen Wert

7.2.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,o} - \vartheta_{Sp,TWW} < \Delta\vartheta_{set,7.2,1}$
 - a. Wert $\Delta\vartheta_{set,7.2,1}$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug
- 2) $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o}$ nach Zeitraum $t_{7.2,1}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen
 - a. Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung

7.2.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$) nach Zeitraum $t_{7.2,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,TWW}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.2.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,TWW} > \dots$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,TWW}$ /*nur wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$)*/*

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
- d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.2.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: hoch (da möglicherweise sicherheitsrelevant)

7.2.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$, $\vartheta_{Sp,TWW}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Speicher-Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)

7.2.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1, 2, 3, 4, 6, 7

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

7.3 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu hohen Wert

Anmerkung: gleiche Detektions-Symptomatik wie 7.2

7.3.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *TWW-NH-Verbrauch geringer als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *TWW bei Nutzer zu kalt*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
 - b. *Nutzer meldet Symptom*
 - c. *Kann dem Ausschluss von Fehler 7.2 dienen!*
- 3) *$\vartheta_{Sp,o}$ auf niedrigeren Werten als üblich, da TWW-NH weniger Wärme liefert*
 - a. *Symptom schwierig auszuwerten und eindeutig zuzuordnen*
- 4) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,o} - \vartheta_{Sp,TWW} < \Delta\vartheta_{set,7.3,1}$
 - a. *Wert $\Delta\vartheta_{set,7.3,1}$ festzulegen schwierig und Symptom nicht eindeutig genug*
- 5) $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{TWW,1}$ *bei Betrieb TWW-Pumpe*
 - a. *nicht verwendet, da vorzugsweise Fehlerbehandlung ohne WMZ wenn möglich, da Einsatz von WMZ nicht als gesichert gelten kann*
- 6) $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o}$ **nach Zeitraum $t_{7.3,1}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen**
 - a. **Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung**

7.3.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$) nach Zeitraum $t_{7.3,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,TWW}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.3.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,TWW} > \dots$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,TWW}$ /*nur wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$)* /
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.3.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: hoch (da möglicherweise sicherheitsrelevant)

7.3.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$, $\vartheta_{Sp,TWW}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Speicher-Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)

7.3.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemata: 1, 2, 3, 4, 6, 7

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemata möglich

7.4 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu niedrigen Wert

7.4.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *TWW-NH-Verbrauch höher als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) $\vartheta_{Sp,o}$ *auf höheren Werten als üblich, da TWW-NH zu viel Wärme liefert*
 - a. *Symptom schwierig auszuwerten und eindeutig zuzuordnen*
- 3) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,TWW} - \vartheta_{Sp,RH} < \Delta\vartheta_{set,7.4,1}$
 - a. *Wert $\Delta\vartheta_{set,7.4,1}$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug*
- 4) $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,RH}$ **nach Zeitraum $t_{7.4,1}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen**
 - a. **Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung**

7.4.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn **zusätzlich** gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$) nach Zeitraum $t_{7.4,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,RH}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.4.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \dots$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,RH}$ /*nur wenn **zusätzlich** gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$)*/*
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
 - d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.4.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.4.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Speicher-Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)

7.4.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1 ,2, 3, 4, 6, 7

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

7.5 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohen Wert

Anmerkung: gleiche Detektions-Symptomatik wie 7.4

7.5.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *RH-NH-Verbrauch geringer als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *Während Heizperiode: Raumheizung bleibt kalt*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
 - b. *Nutzer meldet Symptom*
 - c. *Kann dem Ausschluss von Fehler 7.4 dienen!*
- 3) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,TWW} - \vartheta_{Sp,RH} < \Delta\vartheta_{set,7.5,1}$
 - a. *Wert $\Delta\vartheta_{set,7.5,1}$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug*
- 4) $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,RH}$ nach Zeitraum $t_{7.5,1}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen
 - a. **Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung**

7.5.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu niedrigen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$) nach Zeitraum $t_{7.5,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,RH}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.5.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \dots$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,RH}$ /*nur wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol}$)* /
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
 - d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.5.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.5.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Speicher-Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)

7.5.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1, 2, 3, 4, 6, 7

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

7.6 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu niedrigen Wert

7.6.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *In Heizperiode: RH-NH-Verbrauch höher als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *Raumheizung kann sehr heiß werden*
 - a. *Nutzer meldet Symptom*
 - b. *kann dem Ausschluss von Fehler 7.7 dienen!*
- 3) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,RH} - \vartheta_{Sp,sol} < \Delta\vartheta_{set,7.6,1}$
 - a. *Wert $\Delta\vartheta_{set,7.6,1}$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug*
- 4) $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,sol}$ nach Zeitraum $t_{7.6,1}$ nach Stillstand Solarpumpe (speicherseitig)
 - a. **Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung**

7.6.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{Sp,TWW}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$) nach Zeitraum $t_{7.6,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,sol}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.6.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: ... $> \vartheta_{Sp,RH}$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben
- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,sol}$ /*nur wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{Sp,TWW}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$) */

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
- d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.6.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.6.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$, $\vartheta_{Sp,sol}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Speicher-Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ (VO)

7.6.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

7.7 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu hohen Wert

Anmerkung: gleiche Detektions-Symptomatik wie 7.6

7.7.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Solarertrag geringer als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *Kollektorstagnation häufiger als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen und Festlegen von Grenzwert schwierig*
- 3) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,RH} - \vartheta_{Sp,sol} < \Delta\vartheta_{set,7.7,1}$
 - a. *Wert $\Delta\vartheta_{set,7.7,1} > 0$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug*
- 4) $\vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$ nach Zeitraum $t_{7.7,1}$ nach Stillstand Solarpumpe (speicherseitig)
 - a. **Anmerkung: Fehler nur detektierbar wenn groß genug für o. g. Bedingung**

7.7.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu niedrigen Wert (partiell defekt)
- 3) Wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{Sp,TWW}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$) nach Zeitraum $t_{7.7,2}$ nach Stillstand sämtlicher Beladepumpen → Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,RH}$ → Fehlerausgabe s. Kapitel 6!

7.7.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Speicher-Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: Bedingung $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{Sp,sol}$ verletzt
- 3) Ebene 3: ... $> \vartheta_{Sp,RH}$ //konkrete gemessene Ordnung ausgeben

- 4) Ebene 4: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
- Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit $\vartheta_{Sp,sol}$ /*nur wenn zusätzlich gilt: $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{Sp,TWW}$ (also insgesamt: $\vartheta_{Sp,o} > \vartheta_{Sp,TWW} > \vartheta_{Sp,sol} > \vartheta_{Sp,RH}$) */
 - Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
 - Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.7.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.7.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$, $\vartheta_{Sp,sol}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Speicher-Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ (VO)

7.7.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: alle (1–7)

7.8 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu niedrigen Wert

7.8.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Solarkreispumpe läuft häufiger als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *Kollektorertrag gering, obwohl $\Delta\vartheta = \vartheta_{Kol,1} - \vartheta_{Sp,sol}$ hoch*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 3) $0 < \Delta\vartheta = \vartheta_{Sp,sol} - \vartheta_{sol,2} < \Delta\vartheta_{set,7.8,1}$
 - a. Wert $\Delta\vartheta_{set,7.8,1} > 0$ festzulegen schwierig, bzw. Symptom nicht eindeutig genug
- 4) $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{sol,2}$ bei Betrieb Solarpumpe (speicherseitig) für Mindestzeit $t_{7.8,1}$

7.8.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 2) $\vartheta_{Sp,sol}$ vertauscht mit $\vartheta_{sol,2}$ (oder anderem Temperaturfühler außerhalb des Speichers)
- 3) Temperaturfühler $\vartheta_{sol,2}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)

7.8.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: $\vartheta_{Sp,sol} < \vartheta_{sol,2}$

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- 3) Ebene 3: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
- Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ vertauscht mit $\vartheta_{sol,2}$ (oder anderem Temperaturfühler außerhalb des Speichers)
 - Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ misst zu geringen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)
 - Temperaturfühler $\vartheta_{sol,2}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt/Kalibrierkonstanten falsch)

7.8.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

7.8.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$, $\vartheta_{sol,2}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ physisch korrekt installiert ist (VO)
- 5) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 6) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,sol}$ (VO)
- 7) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{sol,2}$ (VO)

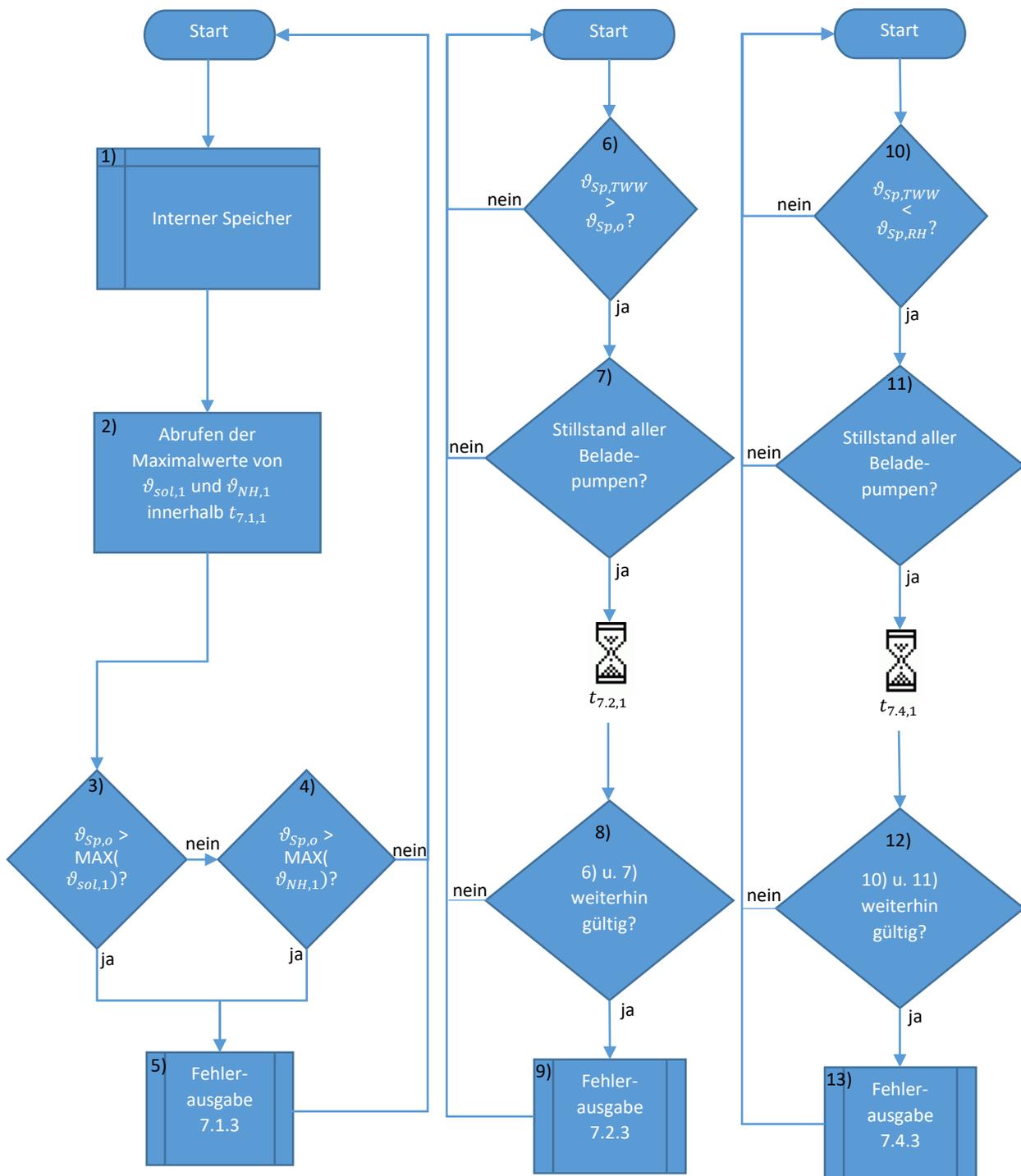
7.8.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemata: 2, 5, 6

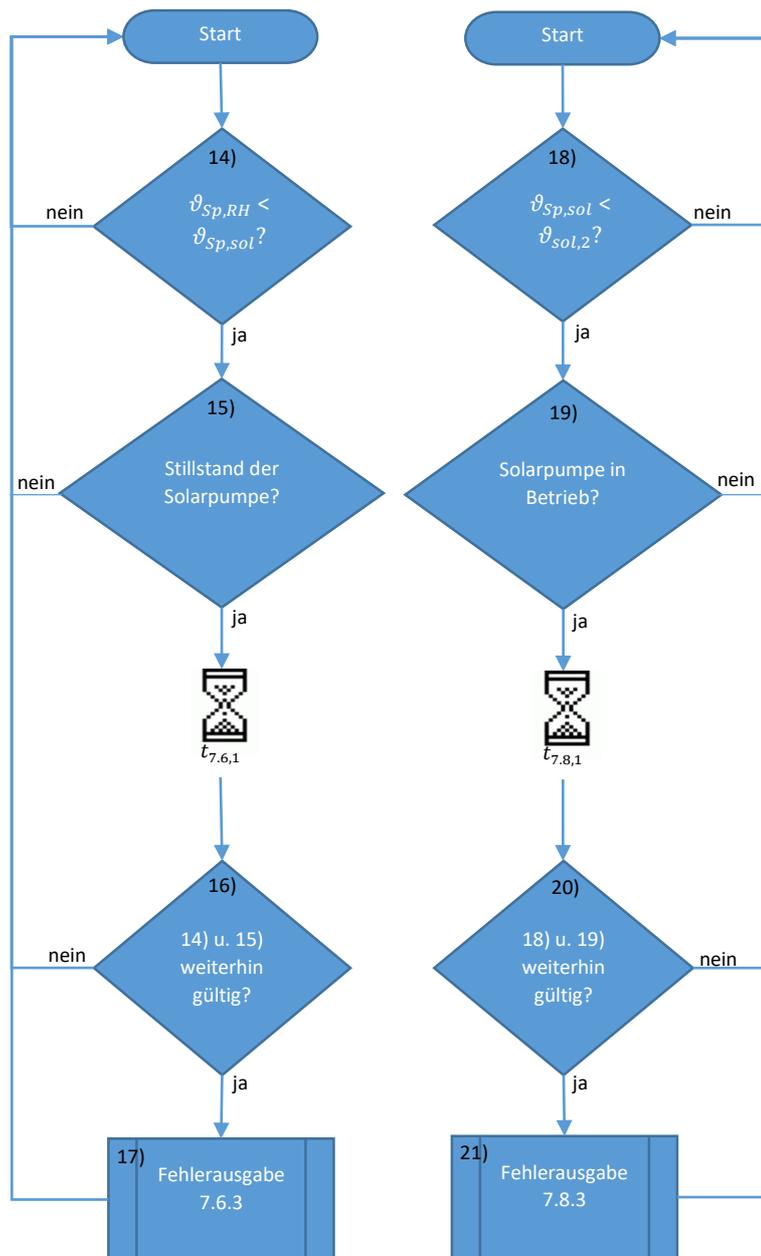
Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemata möglich

7.9 Zusammenfassung

7.9.1 Prozessflussbild



Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung



Vorbedingungen:

- Messwerte von $\vartheta_{sol,1}$ und $\vartheta_{NH,1}$ müssen in hinreichender zeitlicher Auflösung im internen Speicher abgespeichert sein

Anmerkungen:

- Algorithmus für Fehler 7.3 gleich wie 7.2 → gleiche Zeit und gleiche Fehlerausgabe
- Analog: 7.4 und 7.5 sowie 7.6 und 7.7

8 Fehler: Nachheiz-Temperaturfühler im Speicher vertikal falsch positioniert bzgl. der Speicheranschlüsse

Anmerkungen:

- Fall ohne Vertauschung möglich bei Vorhandensein von mehr Tauchhülsen als nötig oder bei Verwendung einer Klemmleiste
- Gleichbedeutend andersherum: entsprechende Anschlüsse sind falsch bzgl. der entsprechenden Temperaturfühler installiert

8.1 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ unterhalb von Kesselrücklauf-Anschluss an Speicher

8.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *TWW-NH-Verbrauch höher als üblich*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 2) *Erhöhte Temperaturen oben im Speicher (an $\vartheta_{Sp,o}$)*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 3) *Erhöhte Wärmeverluste des Speichers*
 - a. *Symptom nicht eindeutig genug zuzuordnen*
- 4) *Wenn WMZ für alle Speicherbe- und entladungen vorhanden: $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ trotz positiver Speicherbilanz von $Q_{Sp,B/E}$ (Summe aller Speicherbe- und entladungen; ohne Wärmeverluste) über Zeitraum $t_{8.1,1}$*
 - a. *Dazu loggen, über Zeit integrieren, speichern und abfragen der o. g. Bilanz nach jedem Zeitraum $t_{8.1,1}$ notwendig*
- 5) *$\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ nach ununterbrochener Kesselaufzeit $t_{8.1,2}$*
- 6) *Unter der Annahme, dass die anderen Temperaturfühler – inkl. $\vartheta_{Sp,RH}$ – korrekt installiert sind, müsste durch den Fehler $\vartheta_{Sp,TWW}$ unterhalb $\vartheta_{Sp,RH}$ liegen, da auch letzterer nicht unterhalb des Kesselrücklauf-Anschlusses am Speicher sein darf*
→ $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,RH}$ nach Zeitraum $t_{8.1,3}$ nach Stillstand sämtlicher Speicherbeladepumpen
→ Symptom bereits in Kapiteln 6 und 7 behandelt
- 7) **$\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{NH,2}$ bei Betrieb Kesselpumpe ($\dot{V}_{NH} > \text{Sollwert}$) für Zeit $t_{8.1,4}$**

8.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 3) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
- 4) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)

8.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{NH,2}$ bei Betrieb Kesselpumpe
- 3) Ebene 3: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ unterhalb von Kesselrücklauf-Anschluss an Speicher installiert

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
- e. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)

8.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

8.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{NH,2}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ (F + ggf. VO)
- 5) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. der Lage zum Kesselrücklauf-Anschluss (Soll: Temperaturfühler oberhalb von Kesselrücklauf-Anschluss) (VO)
- 6) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. thermischem Kontakt zum Speichermedium (VO)
- 7) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 8) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ (VO)
- 9) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ (VO)

8.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1b, 1c, 2b, 2c, 3b, 3c, 6, 7b, 7c

8.2 Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ unterhalb von Kesselrücklauf-Anschluss an Speicher

8.2.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *RH-NH-Verbrauch höher als üblich während Heizperiode*
- 2) *Erhöhte Temperaturen oben im Speicher (an $\vartheta_{Sp,o}$ und $\vartheta_{Sp,TWW}$) während Heizperiode*
- 3) *Erhöhte Wärmeverluste des Speichers während Heizperiode*
- 4) *Wenn WMZ für alle Speicherbe- und entladungen vorhanden: $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}$ trotz positiver Speicherbilanz von $Q_{Sp,B/E}$ (Summe aller Speicherbe- und entladungen; ohne Wärmeverluste) über Zeitraum $t_{8,2,1}$ während Heizperiode*
 - a. *Dazu loggen, über Zeit integrieren, speichern und abfragen der o. g. Bilanz nach jedem Zeitraum $t_{8,2,1}$ notwendig*
 - b. *Dazu Ermittlung von Sollwert für $Q_{Sp,B/E}$ über rechnerische Auslegung oder Erfahrungswert nötig*
- 5) *$\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}$ nach ununterbrochener Kesselaufzeit $t_{8,2,2}$*
- 6) *Wenn Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ außerdem unterhalb $\vartheta_{Sp,sol}$: Fehler bereits in Kapiteln 6 und 7 mit behandelt*
- 7) $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{NH,2}$ bei Betrieb Kesselpumpe ($\dot{V}_{NH} > \text{Sollwert}$) für Zeit $t_{8,2,3}$

8.2.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 3) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
- 4) $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohe Temperatur (partiell defekt)

8.2.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{NH,2}$ bei Betrieb Kesselpumpe
- 3) Ebene 3: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ unterhalb von Kesselrücklauf-Anschluss an Speicher installiert
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
 - e. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohe Temperatur (partiell defekt)

8.2.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

8.2.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$, $\vartheta_{NH,2}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ (F + ggf.VO)
- 5) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. der Lage zum Kesselrücklauf-Anschluss (Soll: Temperaturfühler oberhalb von Kesselrücklauf-Anschluss) (VO)
- 6) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. thermischem Kontakt zum Speichermedium (VO)
- 7) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 8) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 9) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ (VO)

8.2.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1b, 1c, 2b, 2c, 3b, 3c, 6, 7b, 7c

8.3 Fühler $\vartheta_{Sp,RH}$ oberhalb von Heizkreisvorlauf-Anschluss an Speicher

8.3.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Raumheizungen auf nicht ausreichender Temperatur*
 - a. *Nutzer meldet Fehler*
- 2) *RH-NH-Verbrauch niedriger als üblich während Heizperiode*

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- 3) Wenn Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ außerdem oberhalb $\vartheta_{Sp,TWW}$: Fehler bereits in Kapiteln 6 und 7 mit behandelt
- 4) $\vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{HK,1}$ bei Betrieb Heizkreispumpe ($\dot{V}_{HK} > \text{Sollwert}$) für Zeit $t_{8.3,1}$

8.3.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Wärmeträgerfluid
- 3) Hohe Wärmeverluste der Rohrleitung zwischen Speicher und Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$
- 4) Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
- 5) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)

8.3.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Temperaturfühler überprüfen
- 2) Ebene 2: $\vartheta_{Sp,RH} > \vartheta_{HK,1}$ bei Betrieb Heizkreispumpe
- 3) Ebene 3: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$
 - b. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ oberhalb von Heizkreisvorlauf-Anschluss an Speicher installiert
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ hat unzureichenden thermischen Kontakt zum Wärmeträgerfluid
 - d. Hohe Wärmeverluste der Rohrleitung zwischen Speicher und Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$
 - e. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)
 - f. Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)

8.3.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

8.3.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

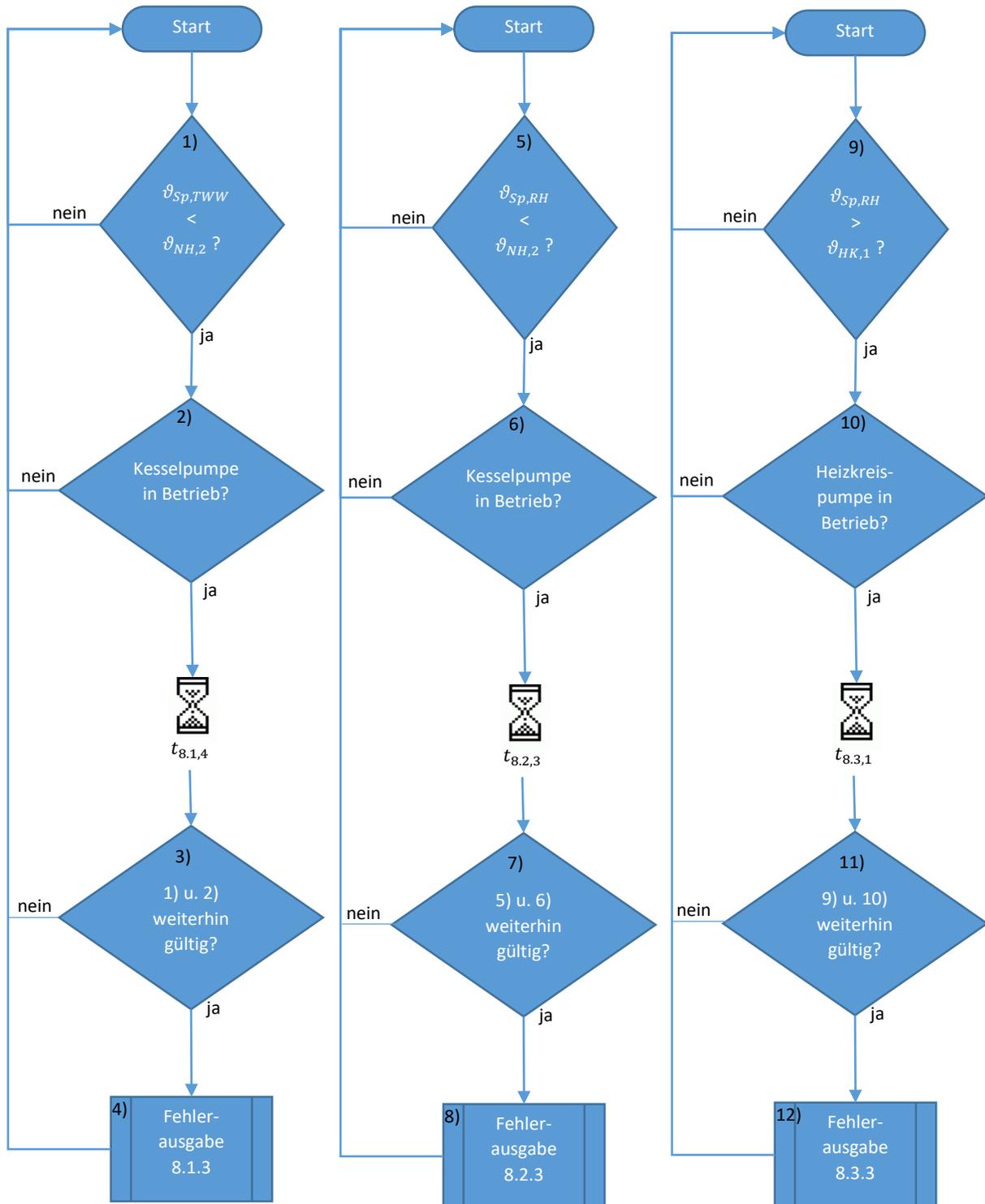
- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$, $\vartheta_{HK,1}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der übrigen Temperaturfühler korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ (F + ggf. VO)
- 5) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. der Lage zum Heizkreisvorlauf-Anschluss an Speicher (Soll: Temperaturfühler oberhalb von Heizkreisvorlauf-Anschluss an Speicher) (VO)
- 6) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ physisch korrekt installiert ist bzgl. thermischem Kontakt zum Wärmeträgerfluid (VO)
- 7) Check, ob übrige Temperaturfühler physisch korrekt installiert sind (VO)
- 8) Check, ob Wärmedämmung der Rohrleitung zwischen Speicher und Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ korrekt angebracht ist
- 9) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 10) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}$ (VO)

8.3.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1b, 2b, 3b, 5, 6, 7b

8.4 Zusammenfassung

8.4.1 Prozessflussbild



9 Fehler: Wärmeverluste des Speichers zu hoch

9.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) Wenn WMZ für alle Speicherbe- und entladungen vorhanden: $a_{UA,WMZ} = \frac{UA_{Sp,WMZ}}{\sqrt{V_{Sp}}} > 0,16$;

mit:

- $UA_{Sp,WMZ} = \frac{Q_{Verlust}}{\Delta\vartheta_{Sp,t}}$
- $Q_{Verlust} = Q_{Sol} + Q_{NH} - Q_{TWW} - Q_{HK}$
- $Q_i = \int_{t=0}^{t=t_{9,1}} \dot{V}_i \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\vartheta_{i,1} - \vartheta_{i,2}) dt$ mit $i = sol, NH, TWW, HK$
- $\Delta\vartheta_{Sp,t} = \frac{\int_{t=0}^{t=t_{9,1}} (\overline{\vartheta_{Sp}} - \vartheta_{amb,Sp}) dt}{t_{9,1}}$ (Zeitlicher Mittelwert der Temperaturdifferenz zwischen gemittelter Speichertemperatur und Speicher-Umgebungstemperatur)
- $\overline{\vartheta_{Sp}} = \frac{\vartheta_{Sp,o} + \vartheta_{Sp,RH} + \vartheta_{Sp,sol} + \vartheta_{Sp,TWW}}{4}$

Auswertung sobald gilt: $|Q_{Sol}| + |Q_{NH}| + |Q_{TWW}| + |Q_{HK}| > a_{9,1} \cdot Q_{Sp}$ mit:

- $Q_{Sp} = V_{Sp} \cdot \rho \cdot c_p \cdot 60 K$ und $a_{9,1} [-]$: frei wählbarer Faktor. Um die zum Zeitpunkt $t = 0$ Im Speicher enthaltene Wärme vernachlässigen zu können, wird $a_{9,1} \geq 100$ vorgeschlagen. Die Zeitspanne bis zum Erreichen der oben genannten Bedingung ist $t_{9,1}$

D. h: Auswertung von $|Q_{Sol}| + |Q_{NH}| + |Q_{TWW}| + |Q_{HK}|$ zu jedem Zeitschritt und sobald diese Summe $> a_{9,1} \cdot Q_{Sp}$, dann Berechnung von $UA_{Sp,WMZ}$ und Prüfung ob

$a = \frac{UA_{Sp,WMZ}}{\sqrt{V_{Sp}}} > 0,16$. Wenn ja: Fehlerausgabe und Neustart der Auswertung. Wenn nein: Neustart der Auswertung.

Anmerkung: Grenzwert $a_{UA,WMZ,set} = 0,16$ in Anlehnung an DIN EN 12977-3

- 2) Wenn keine Speicherbe- und entladungen vorhanden (Stillstandsversuch):

$a_{UA,Still} = \frac{UA_{Sp,Still}}{\sqrt{V_{Sp}}} > 0,16$ mit:

- $UA_{Sp,Still} = \frac{\Delta\vartheta_{Sp}(t_2) - \Delta\vartheta_{Sp}(t_1)}{(t_2 - t_1) \cdot \Delta\vartheta_{Sp,t}} \cdot \sum (V_i \cdot \rho_i \cdot c_p)$.
- $\Delta\vartheta_{Sp} = \overline{\vartheta_{Sp}} - \vartheta_{amb,Sp}$
- $\Delta\vartheta_{Sp,t} = \frac{\int_{t=0}^{t=t_{9,2}} (\overline{\vartheta_{Sp}} - \vartheta_{amb,Sp}) dt}{t_{9,2}}$ (Zeitlicher Mittelwert der Temperaturdifferenz zwischen gemittelter Speichertemperatur und Speicher-Umgebungstemperatur)
- $\overline{\vartheta_{Sp}} = \frac{\vartheta_{Sp,o} + \vartheta_{Sp,RH} + \vartheta_{Sp,sol} + \vartheta_{Sp,TWW}}{4}$

Algorithmus in Worten: Beginnen Speichertemperaturen und Speicher-Umgebungstemperatur zu loggen sobald alle Speicher-Be- und Entladepumpen aus sind, bis zum Zeitpunkt an dem mindestens eine Pumpe wieder eingeschaltet wird. Wenn dieser Zeitraum größer ist als ein bestimmter Mindestzeitraum $t_{set,9,2}$, dann Berechnung von Faktor $a_{UA,Still}$. Wenn gilt $a_{UA,Still} > 0,16$, erfolgt eine Fehlerausgabe.

Anmerkung: Grenzwert $a_{UA,Still,set} = 0,16$ in Anlehnung an DIN EN 12977-3

9.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Thermischer Kontakt zum Speichermedium mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}, \vartheta_{Sp,RH}, \vartheta_{Sp,sol}, \vartheta_{Sp,TWW}$ verringert sich während des Stillstandsversuchs
- 2) Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}, \vartheta_{Sp,RH}, \vartheta_{Sp,sol}, \vartheta_{Sp,TWW}$ erleidet während des Stillstandsversuchs einen Defekt und misst zu geringe Temperaturen
- 3) Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}, \vartheta_{TWW,1}, \vartheta_{NH,1}, \vartheta_{sol,1}$ hat unzureichenden thermische Kontakt zum Wärmeträgerfluid
- 4) Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}, \vartheta_{TWW,1}, \vartheta_{NH,1}, \vartheta_{sol,1}, \vartheta_{Sp,amb}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
- 5) Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,2}, \vartheta_{TWW,2}, \vartheta_{NH,2}, \vartheta_{sol,2}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)
- 6) Mindestens einer der Volumenstromsensoren $\dot{V}_{sol}, \dot{V}_{NH}$ misst zu hohen Volumenstrom
- 7) (partiell defekt)
- 8) Mindestens einer der Volumenstromsensoren $\dot{V}_{TWW}, \dot{V}_{HK}$ misst zu geringen Volumenstrom (partiell defekt)

9.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Wärmeverluste des Speichers zu hoch: $a_{UA,WMZ} = \frac{U_{ASp,WMZ}}{\sqrt{\dot{V}_{Sp}}} = X > 0,16$
- 2) Ebene 2: Wärmeverluste des Speichers zu hoch: $a_{UA,still} = \frac{U_{ASp,still}}{\sqrt{\dot{V}_{Sp}}} = X > 0,16$

Anmerkung: Fehlerausgabe 1) oder 2), je nachdem was zutreffend ist und Einfügen des tatsächlich gemessenen Werts ,X' für $a_{UA,WMZ}$ bzw. $a_{UA,still}$.

- 3) Ebene 3: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Mikrozirkulation in Rohrleitungen
 - b. Wassereintrag in Wärmedämmung (z. B. durch Leckage am Speicher)
 - c. Dämmung hat sich von Speicher Oberfläche gelöst
 - d. Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}, \vartheta_{TWW,1}, \vartheta_{NH,1}, \vartheta_{sol,1}$ hat unzureichenden thermische Kontakt zum Wärmeträgerfluid
 - e. Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,1}, \vartheta_{TWW,1}, \vartheta_{NH,1}, \vartheta_{sol,1}, \vartheta_{Sp,amb}$ misst zu geringe Temperaturen (partiell defekt)
 - f. Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{HK,2}, \vartheta_{TWW,2}, \vartheta_{NH,2}, \vartheta_{sol,2}$ misst zu hohe Temperaturen (partiell defekt)
 - g. Mindestens einer der Volumenstromsensoren $\dot{V}_{sol}, \dot{V}_{NH}$ misst zu hohen Volumenstrom (partiell defekt)
 - h. Mindestens einer der Volumenstromsensoren $\dot{V}_{TWW}, \dot{V}_{HK}$ misst zu geringen Volumenstrom (partiell defekt)
 - i. Thermischer Kontakt zum Speichermedium mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}, \vartheta_{Sp,RH}, \vartheta_{Sp,sol}, \vartheta_{Sp,TWW}$ verringert sich während des Stillstandsversuchs
 - j. Mindestens einer der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,o}, \vartheta_{Sp,RH}, \vartheta_{Sp,sol}, \vartheta_{Sp,TWW}$ erleidet während des Stillstandsversuchs einen Defekt und misst zu geringe Temperaturen

9.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: niedrig

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

9.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

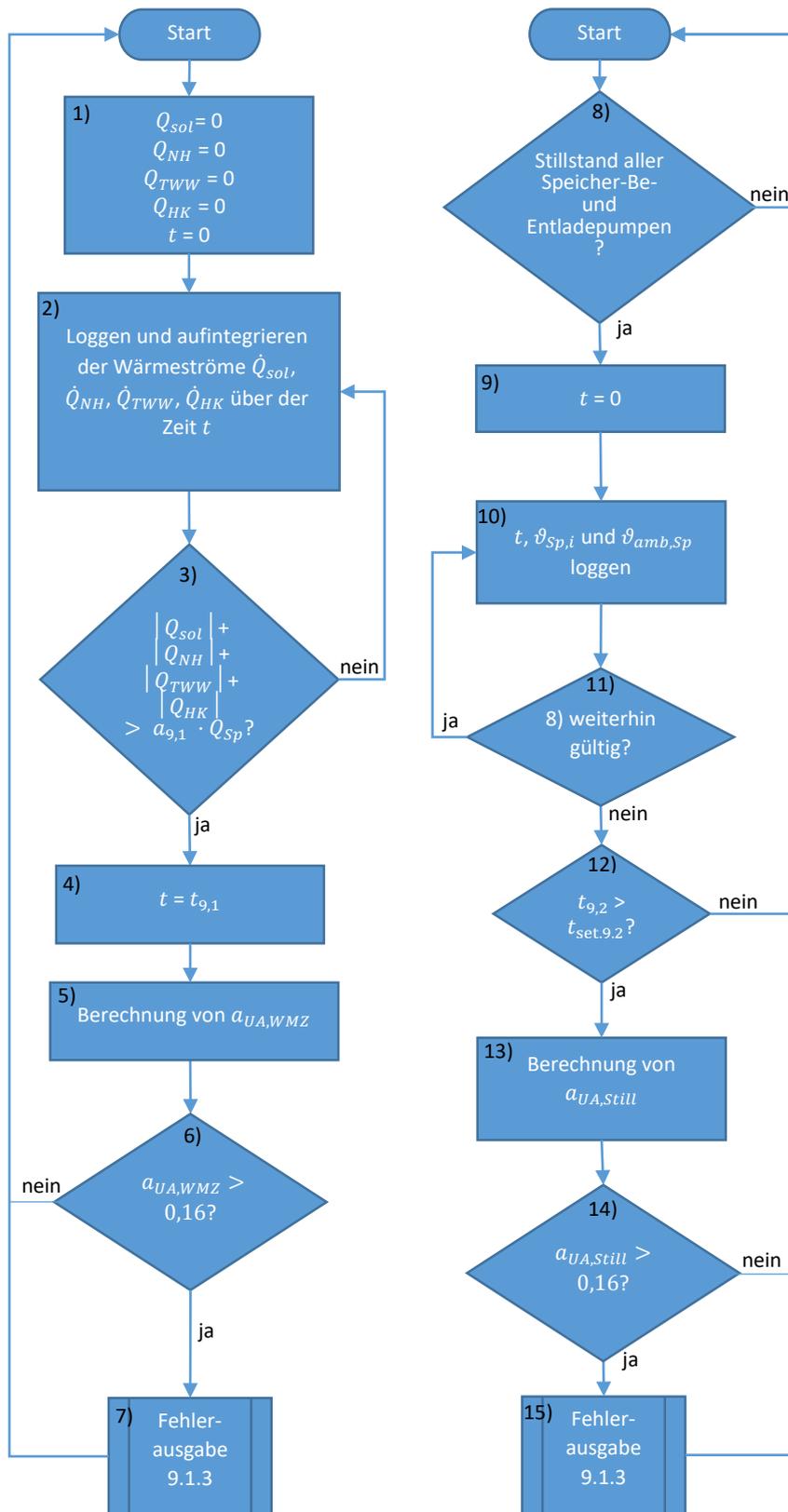
- 1) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten aller Temperaturfühler im Speicher, in den Speicher Zu- und Ableitungen sowie von $\vartheta_{amb,Sp}$ korrekt und Messwerte plausibel (F)
- 3) Check, ob Kalibrierkonstanten der Volumenstromsensoren \dot{V}_{sol} , \dot{V}_{NH} , \dot{V}_{TWW} , \dot{V}_{HK} korrekt sind (F)
- 4) Check, ob aufgrund der Führung der Speicheranschlüsse ungewollte Mikrozirkulation auftreten kann (F + VO)
- 5) Check, ob Dämmung sich von Speicheroberfläche gelöst hat (VO)
- 6) Check, ob Wasser in Wärmedämmung eingetragen wurde (VO)
- 7) Check, ob Leck am Speicher (VO)
- 8) Check, ob alle Temperaturfühler im Speicher, in den Speicher Zu- und Ableitungen sowie $\vartheta_{Sp,amb}$ physisch korrekt installiert sind und ggf. korrigieren (VO)
- 9) Ggf. defekte Temperaturfühler ersetzen (VO)
- 10) Check, ob Volumenstromsensoren physisch korrekt installiert sind und ggf. korrigieren (VO)
- 11) Check, ob Vorrichtungen zur Unterbidung von Mikrozirkulationsbremsen schadhaft sind oder fehlen (falls vorgesehen) (VO)
- 12) Ggf. Mikrozirkulationsbremsen/Siphon einbauen oder Anschlüsse entsprechend neu verlegen. (VO)
- 13) Ggf. defekte Volumenstromsensoren ersetzen (VO)

9.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 2b, 6

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

9.1.5 Prozessflussbild



Anmerkungen:

- Zur Berechnung von 2), 3) und 5) siehe: 9.1.1, 1),
- Zur Berechnung von 13) siehe: 9.1.1, 2)
- Zu 10): Es müssen alle Speichertemperaturen über die Zeit t geloggt werden, woraus dann die mittlere Speichertemperatur $\bar{\vartheta}_{Sp}$ gemäß 9.1.1, 2) berechnet wird.

10 Fehler: Hysterese der Nachheizungsregelung zu niedrig

10.1 Hysterese der TWW-Nachheizungsregelung zu niedrig

10.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) Kesselstarts pro Tag (Taktung τ_{KS} [1/d]) größer als zu wählender Grenzwert $\tau_{KS,set}$ [1/d]
 - a. Als Wert für $\tau_{KS,set}$ eine für die Anlage gewöhnliche maximale Taktung wählen. Ggf. Einlernen über künstliches neuronales Netz während gemonitortem Normalbetrieb, oder so, dass ggf. vom Kesselhersteller angegebener Grenzwert nicht überschritten wird um Gewährleistungsansprüche nicht zu verlieren
 - b. Messung und Speicherung der Kesselstarts notwendig
 - c. Berechnung der Taktung τ_{KS} über Zeitraum $t_{10.1,1}$

10.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Hysterese der RH-NH-Regelung zu niedrig
- 2) Zu geringes Vorhaltevolumen für TWW
- 3) Zu geringes Speichervolumen insgesamt
- 4) Kessel auf zu hohe Leistung ausgelegt
- 5) $\vartheta_{Sp,TWW}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
- 6) $\vartheta_{Sp,RH}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
- 7) Wärmeverluste des Speichers zu hoch
 - a. ggf. Ausschluss, wenn Fehler 9 nicht detektiert wird

10.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Kesseltaktung zu hoch ($\tau_{KS} = X$ 1/d > $\tau_{KS,set} = Y$ 1/d) /* konkrete Werte X und Y ausgeben*/
- 2) Ebene 2: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Hysterese der TWW-Nachheizungsregelung zu niedrig
 - b. Hysterese der RH-Nachheizungsregelung zu niedrig
 - c. Zu geringes Vorhaltevolumen für TWW
 - d. Zu geringes Speichervolumen insgesamt
 - e. Kessel auf zu hohe Leistung ausgelegt
 - f. $\vartheta_{Sp,TWW}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
 - g. $\vartheta_{Sp,RH,set}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
 - h. Wärmeverluste des Speichers zu hoch

10.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

10.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Hysterese der TWW-Nachheizregelung kontrollieren und ggf. hochsetzen (F)
- 2) Hysterese der RH-Nachheizregelung kontrollieren und ggf. hochsetzen (F)
- 3) Check ob Messwert $\vartheta_{Sp,TWW}$ stark schwankt und ggf. austauschen (F + ggf. VO)
- 4) Check ob Messwert $\vartheta_{Sp,RH}$ stark schwankt und ggf. austauschen (F + ggf. VO)

- 5) Check, ob Wärmedämmung am Speicher und an den Rohrleitungen korrekt angebracht und trocken ist (VO)
- 6) Ggf. Erweiterung der Wärmespeicherkapazität (F + VO)
- 7) Ggf. Verwendung eines Kessels mit geringerer Nennleistung (F + VO)

10.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1, 2, 3, 4, 6, 7

Anmerkungen:

- Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

10.2 Hysterese der RH-Nachheizungsregelung zu niedrig

Anmerkung: Gewählter Fehlerdetektions-Algorithmus gleich wie 10.1

10.2.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) Kesselstarts pro Tag (Taktung τ_{KS} [1/d]) größer als zu wählender Grenzwert $\tau_{KS,set}$ [1/d]
 - a. Als Wert für $\tau_{KS,set}$ eine für die Anlage gewöhnliche maximale Taktung wählen. Ggf. Einlernen über künstliches neuronales Netz während gemonitortem Normalbetrieb, oder so, dass ggf. vom Kesselhersteller angegebener Grenzwert nicht überschritten wird um Gewährleistungsansprüche nicht zu verlieren
 - b. Messung und Speicherung der Kesselstarts notwendig
 - c. Berechnung der Taktung τ_{KS} über Zeitraum $t_{10.2,1}$

10.2.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Hysterese der TWW-Nachheizungsregelung zu niedrig
- 2) Zu geringes Vorhaltevolumen für TWW
- 3) Zu geringes Speichervolumen insgesamt
- 4) Kessel auf zu hohe Leistung ausgelegt
- 5) $\vartheta_{Sp,TWW}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
- 6) $\vartheta_{Sp,RH}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
- 7) Wärmeverluste des Speichers zu hoch
 - a. ggf. Ausschluss, wenn Fehler 9 nicht detektiert wird

10.2.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Kesseltaktung zu hoch ($\tau_{KS} = X \text{ 1/d} > \tau_{KS,set} = Y \text{ 1/d}$) /* konkrete Werte X und Y ausgeben*/
- 2) Ebene 2: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Hysterese der TWW-Nachheizungsregelung zu niedrig
 - b. Hysterese der RH-Nachheizungsregelung zu niedrig
 - c. Zu geringes Vorhaltevolumen für TWW
 - d. Zu geringes Speichervolumen insgesamt
 - e. Kessel auf zu hohe Leistung ausgelegt
 - f. $\vartheta_{Sp,TWW}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
 - g. $\vartheta_{Sp,RH,set}$ ist defekt und Messwert schwankt stark
 - h. Wärmeverluste des Speichers zu hoch

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

10.2.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

10.2.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

- 1) Hysterese der TWW-Nachheizregelung kontrollieren und ggf. hochsetzen (F)
- 2) Hysterese der RH-Nachheizregelung kontrollieren und ggf. hochsetzen (F)
- 3) Check ob Messwert $\vartheta_{Sp,TWW}$ stark schwankt und ggf. austauschen (F + ggf. VO)
- 4) Check ob Messwert $\vartheta_{Sp,RH}$ stark schwankt und ggf. austauschen (F + ggf. VO)
- 5) Check, ob Wärmedämmung am Speicher und an den Rohrleitungen korrekt angebracht und trocken ist (VO)
- 6) Ggf. Erweiterung der Wärmespeicherkapazität (F + VO)
- 7) Ggf. Verwendung eines Kessels mit geringerer Nennleistung (F + VO)

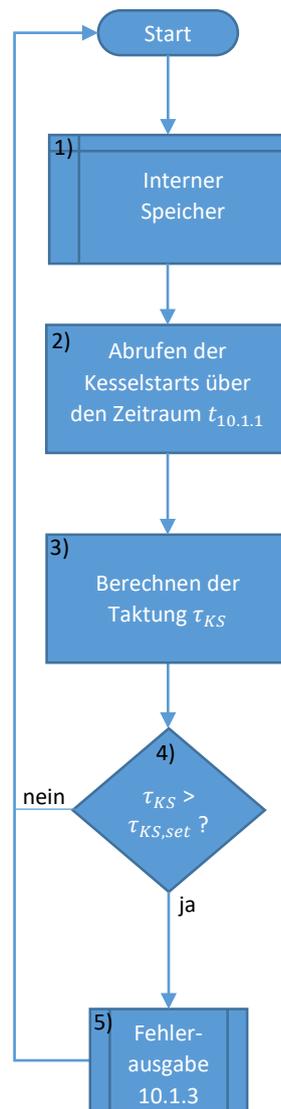
10.2.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1, 2, 3, 4, 6, 7

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen für alle Hydraulikschemas möglich

10.3 Zusammenfassung

10.3.1 Prozessflussbild



Anmerkungen:

- Anzahl der Kesselstarts muss im internen Speicher abgespeichert werden
- Wert für $\tau_{KS,set}$ muss im internen Speicher hinterlegt sein und entspricht einer für die Anlage gewöhnlichen maximalen Taktung
- Algorithmus für Fehler 10.2 gleich wie 10.1 → gleiche Zeit und gleiche Fehlerausgabe

11 Fehler: Volumenstrom der Nachheizung zu niedrig

Anmerkung: Zwei unabhängige Algorithmen für zwei Kesselregelungs-Optionen entwickelt. Algorithmus kann je nach Kesselregelung ausgewählt werden

11.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

1) Wenn Brennerleistung nicht regelbar:

In Worten: Häufiges Abschalten des Kessels aufgrund von häufigen Überschreitungen der Maximaltemperatur während gilt $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ oder $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}(\vartheta_{amb})$ oder beides

Algorithmus: Sobald gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ oder $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}(\vartheta_{amb})$ oder beides: Zählen der Anzahl an Übergängen ($n_{11,1}$) von $\vartheta_{NH,1} < \vartheta_{NH,1,max}$ zu $\vartheta_{NH,1} \geq \vartheta_{NH,1,max}$ solange bis gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} \geq \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ UND $\vartheta_{Sp,RH} \geq \vartheta_{Sp,RH,set,1}(\vartheta_{amb})$. Wenn $n_{11,1} > n_{set,11,1} \rightarrow$ Fehlerausgabe! Und in jedem Fall: Neustart der Zählungen ($n_{11,1} = 0$)

2) Wenn Brennerleistung regelbar:

In Worten: Zeitlicher Mittelwert der Brennerleistung sehr viel kleiner als Nennleistung.

Algorithmus: Wenn gilt: $\vartheta_{Sp,TWW} < \vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ oder $\vartheta_{Sp,RH} < \vartheta_{Sp,RH,set,1}(\vartheta_{amb})$ oder beides: Loggen des Stellwertes der Brennerleistung $f_{Brenner}$ [0 % ... 100 %] Bis o. g. Bedingung nicht mehr gilt. Nach jeder kumulativen zu wählenden Kesselaufzeit $t_{11,1}$: Bildung

des zeitlichen Mittelwerts: $f_{Brenner,m} = \frac{\int_{t=0}^{t=t_{11,1}} f_{Brenner} dt}{t_{11,1}}$. Wenn $f_{Brenner,m} <$

$f_{Brenner,set,11,1}$ (festzulegender Grenzwert, z. B.: 30 %):

\rightarrow Fehlerausgabe und Neustart ($f_{Brenner,m} = 0$). Wenn nicht: Nur Neustart ($f_{Brenner,m} = 0$).

11.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Kesselleistung zu hoch ausgelegt
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
- 3) $f_{Brenner}$ wird nicht korrekt gemessen bzw. angezeigt

11.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Häufiges Erreichen oder Überschreiten der Maximaltemperatur am Kesselaustritt ($\vartheta_{NH,1}$)
- 2) Ebene 2: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Volumenstrom \dot{V}_{NH} zu niedrig
 - b. Kesselleistung zu hoch ausgelegt
 - c. $f_{Brenner}$ wird nicht korrekt gemessen bzw. angezeigt
 - d. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ partiell defekt und misst zu hohen Wert

11.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: mittel

11.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht \rightarrow nächster Punkt

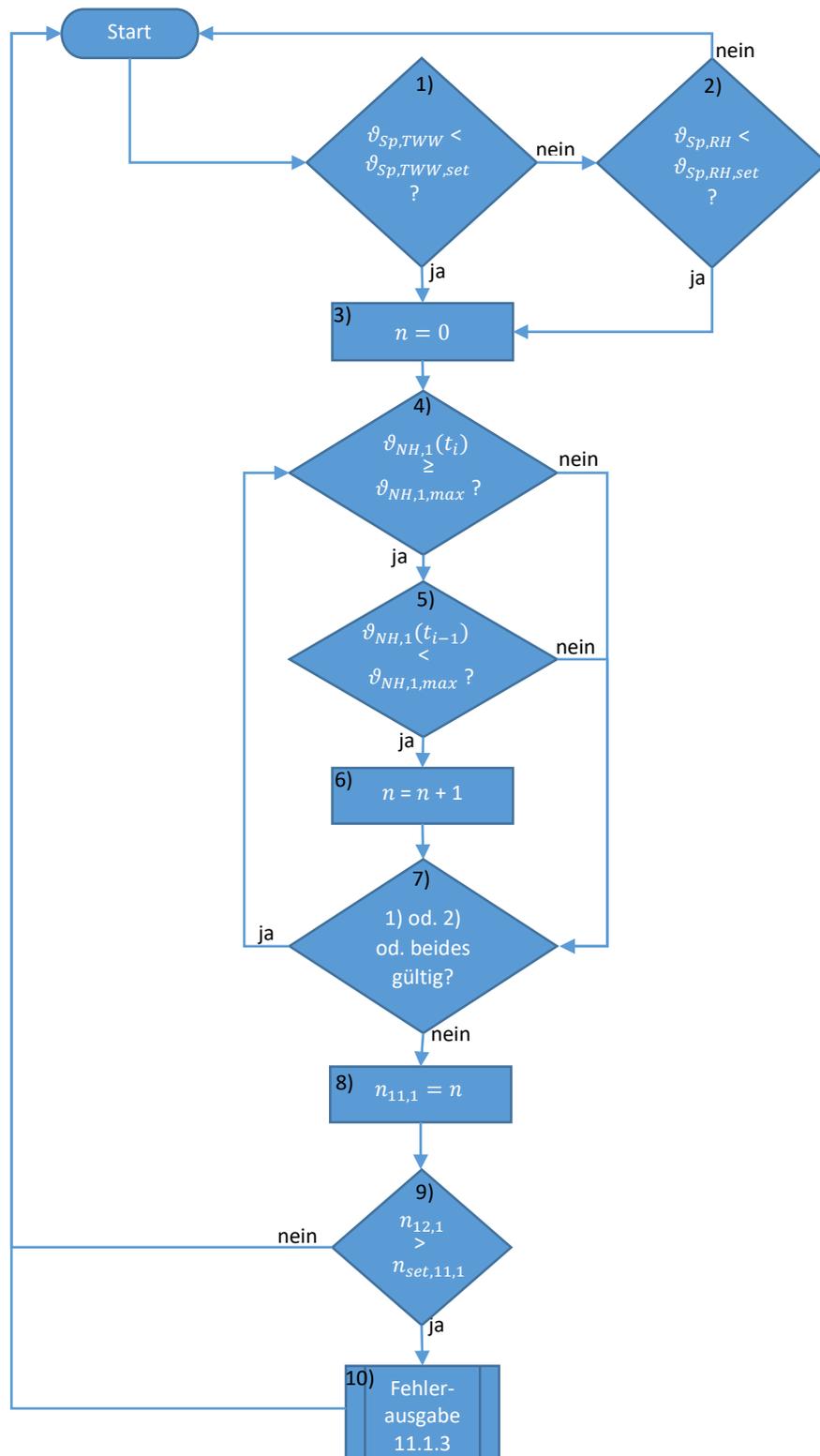
Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

- 1) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 2) Check, ob $f_{Brenner}$ korrekt gemessen und angezeigt wird (F)
- 3) Check, ob Kalibrierkonstanten von $\vartheta_{NH,1}$ korrekt sind und Check der Plausibilität der Werte (F)
- 4) Check, ob Volumenstrom \dot{V}_{NH} signifikant niedriger ist als Sollwert (F)
 - a. ggf. Check, ob Volumenstrom \dot{V}_{NH} korrekt gemessen wird
 - b. ggf. Check, ob Pumpe defekt (VO)
 - c. ggf. Check, ob Fouling oder Leck in den Rohrleitungen der Nachheizung vorhanden ist (VO)
- 5) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ (VO)
- 6) Erhöhung von \dot{V}_{NH} durch Einbau einer Pumpe mit höherem Volumenstrom und ggf. Leitungen und Einbauten mit größerem Strömungsquerschnitt

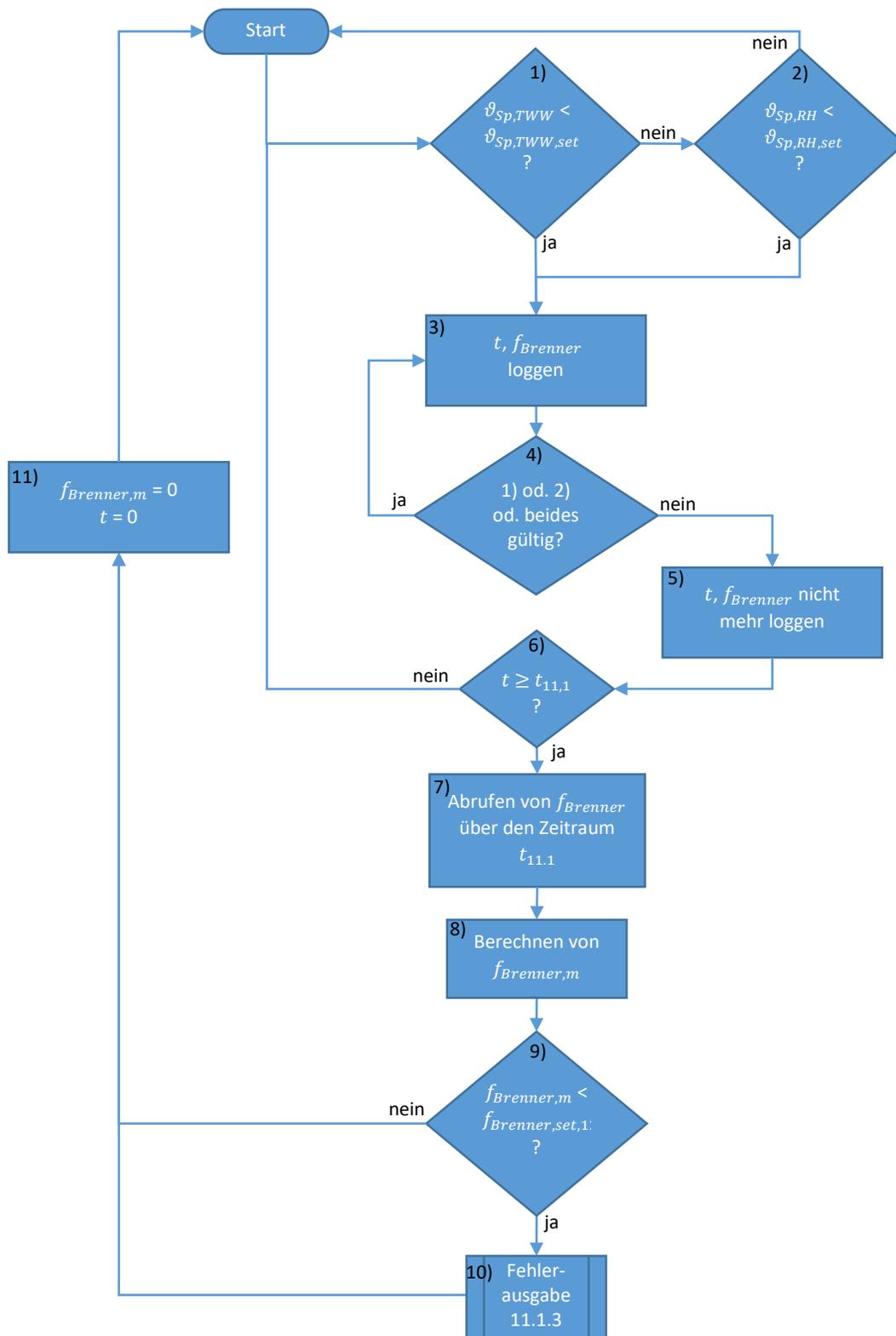
11.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1, 2, 3, 4, 6

11.1.5 Prozessflussbild



Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung



Anmerkung:

- Zu 3): $f_{Brenner}$ muss über die Zeit geloggt werden und im internen Speicher abgespeichert sein
- Zu 6): Bei der Abfrage wird der letzte gespeicherte Wert von t verwendet
- Zur Berechnung von 8): siehe 11.1.1, 2)
- $t_{11,1}$ ist ein selbst zu wählender Zeitraum (z. B. 10 Stunden)

12 Fehler: Nachheizung liefert keine Wärme

12.1.1 Symptome und Detektionsmöglichkeiten

Anmerkung: Zur Detektion verwendete Symptome in grüner Schrift, übrige Symptome in grauer Schrift und kursiv

- 1) *Trinkwarmwasser auf nicht ausreichender Temperatur*
 - a. *Nutzer meldet Fehler*
- 2) *Raumheizungen auf nicht ausreichender Temperatur*
 - a. *Nutzer meldet Fehler*
- 3) **Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ist bei für Zeitraum $t_{12,1}$ laufender Kesselpumpe geringer als ein Grenzwert:**
 - a. $\Delta\vartheta_{NH} = \vartheta_{NH,1} - \vartheta_{NH,2} < \Delta\vartheta_{NH,set,12,1}$
- 4) **Solltemperaturen $\vartheta_{Sp,TWW,set,1}$ und $\vartheta_{Sp,RH,set,1}$ werden über Zeitraum $t_{12,2}$ nicht erreicht**
 - a. **(Symptom weniger eindeutig zuzuordnen als 3)). Ggf. Algorithmus nicht verwenden oder zukünftig mit 3) kombinieren)**
- 5) **Wärmestrom bei für Zeitraum $t_{12,2}$ laufender Kesselpumpe geringer als ein Grenzwert:**
 - a. $\dot{Q}_{NH} < \dot{Q}_{NH,set,12,1}$
 - b. Mit: $\dot{Q}_{NH} = \dot{V}_{NH} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\vartheta_{NH,1} - \vartheta_{NH,2})$
 - c. Anmerkung: Prinzip bereits in 3) enthalten

12.1.2 Andere Fehler, bei denen gleiche Detektionssymptome auftreten können

- 1) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
- 2) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ hat unzureichenden Kontakt zum Wärmeträgerfluid
- 3) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ oder beide haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
- 4) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ misst zu niedrigen Wert (partiell defekt)
- 5) Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
- 6) Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ oder beide messen zu niedrige Werte (partiell defekt)

12.1.3 Fehlerausgabe

- 1) Ebene 1: Nachheizung liefert keine Wärme
- 2) Ebene 2: Mögliche Fehler (Sortiert nach absteigender Wahrscheinlichkeit):
 - a. Brenner defekt
 - b. Kesselpumpe defekt
 - c. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ hat unzureichenden Kontakt zum Wärmeträgerfluid
 - d. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ oder beide haben unzureichenden thermischen Kontakt zum Speichermedium
 - e. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ vertauscht mit Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$
 - f. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ misst zu niedrigen Wert (partiell defekt)
 - g. Temperaturfühler $\vartheta_{NH,2}$ misst zu hohen Wert (partiell defekt)
 - h. Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$, $\vartheta_{Sp,RH}$ oder beide messen zu niedrige Werte (partiell defekt)

12.1.3.1 Einstufung des Fehlers

- Dringlichkeit: hoch

12.1.3.2 Handlungsempfehlung

Anmerkung: Nach jedem Punkt Abfrage ob Problem erkannt und behoben wurde. Wenn nicht → nächster Punkt

Anhang A, Abschlussbericht SolarCheck: Algorithmenbasierte Fehlerdetektion im Bereich Speicher und Nachheizung

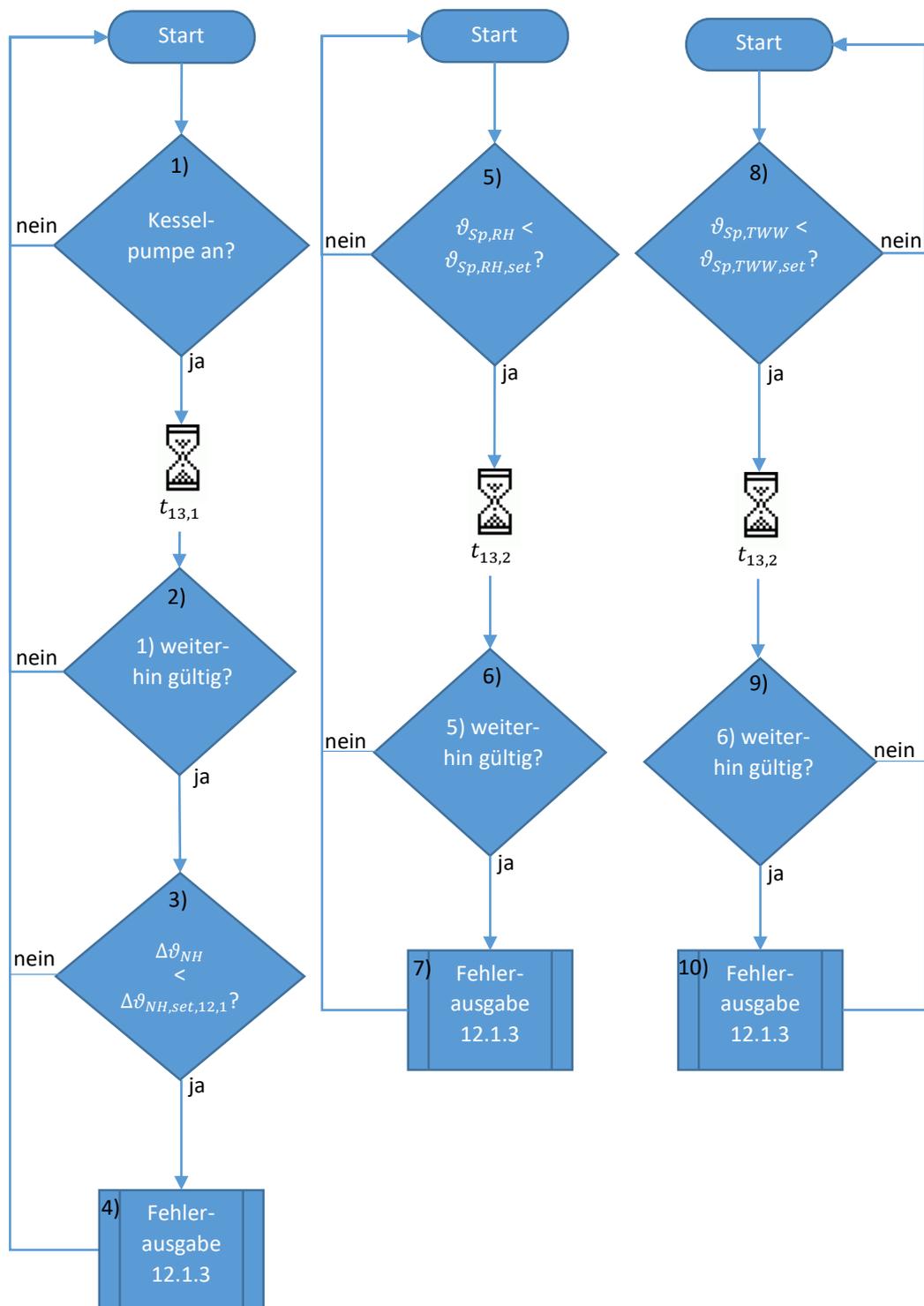
- 1) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ und $\vartheta_{NH,2}$ korrekt (F)
- 2) Check, ob Kalibrierkonstanten der Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ korrekt (F)
- 3) Check, ob Parameter für Fehlerdetektions-Algorithmus korrekt und geeignet (F)
- 4) Check, ob Brenner defekt (VO)
- 5) Check, ob Kesselpumpe defekt (VO)
- 6) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ und $\vartheta_{NH,2}$ physisch korrekt installiert sind (VO)
- 7) Check, ob Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ physisch korrekt installiert sind (VO)
- 8) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{NH,1}$ und $\vartheta_{NH,2}$ (VO)
- 9) Ggf. Ersatz Temperaturfühler $\vartheta_{Sp,TWW}$ und $\vartheta_{Sp,RH}$ (VO)
- 10) Ggf. Ersatz Kesselpumpe (VO)
- 11) Ggf. Ersatz Brenner/Kessel (VO)

12.1.4 Anwendbarkeitsbereich

Hydraulikschemas: 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4, 6

Anmerkung: Das Prinzip des Fehlerdetektions-Algorithmus ist mit Anpassungen auch für 1c, 2c und 3c möglich

12.1.5 Prozessflussbild



Anmerkungen:

- Zur Berechnung von $\Delta\vartheta_{NH}$ siehe: 12.1.1, 3)