

Funktionsüberwachung thermischer Solaranlagen: Abschätzung der Leistungsfähigkeit mittels FSC-Kennzahl

C. Schmelzer¹, M. Georgii¹, J. Orozaliev¹, K. Vajen¹

¹ Univ. Kassel, Institut für Thermische Energietechnik,

Kurt-Wolters-Str. 3, 34125 Kassel

Tel.: +49 561/804-3890, E-Mail: solar@uni-kassel.de, www.solar.uni-kassel.de

Abstract

Im vorliegenden Paper wird ein universeller Leistungsindikator für thermische Solaranlagen auf Grundlage der „Fractional Solar Consumption“ (FSC) aus dem IEA Task 26 vorgestellt. Die FSC-Methodik wird auf ein Kombi-System und ein solares TWW-System anhand von Jahressimulationen angewandt. Es werden einflussreiche System-Parameter aufgezeigt und diskutiert. Des Weiteren behandelt das Paper die Anwendungsmöglichkeit der Methodik zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit und führt dazu den „performance factor“ ein. Anhand eines Fehler-Beispiels wird dargestellt, wie eine Leistungskontrolle mit performance factor funktioniert.

1. Einleitung

Solarthermieanlagen werden in Einfamilienhäusern grundsätzlich nur als Zusatz-Technologie eingesetzt, um ein konventionelles System zu unterstützen. Da dieses im Zweifel auch den gesamten Wärmebedarf deckt, können Funktionsstörungen der Solaranlage lange Zeit unbemerkt bleiben. Hinzu kommt, dass ohne sehr tiefe Fachkenntnisse Betreiber, Nutzer oder Installateure kaum einordnen können, 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 (f_{sav}), solarer Nutzungsgrad o.ä. sind system-, standort- und bedarfsabhängig und lassen sich für verschiedene Anlagen nicht direkt miteinander vergleichen. Die Möglichkeit, die Funktionsfähigkeit des gesamten Wärmeversorgungssystems anhand dieser Kennzahlen und die Performance von mehrerer Anlagen untereinander zu vergleichen, ist somit nicht gegeben.

Um ein einheitlich einsetzbares und vergleichbares Maß für die Funktionsfähigkeit zu erhalten, beschäftigt sich das Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik der Univ. Kassel im Projekt „SolarCheck“ daher mit der Entwicklung eines FSC-basierten Leistungsindikators. Dieser wird automatisiert ermittelt und gibt an, welchen Ertrag die Anlage tatsächlich liefert – relativ zu einem theoretisch zu erwartenden Ertrag, der dynamisch unter Beachtung der solaren Einstrahlung und des Verbrauchs berechnet wird.

2. Zugrunde liegende Methodik

Dem zu ermittelnden Leistungsindikator liegt das FSC-Verfahren zugrunde, welches im Rahmen des IEA SHC Task 26 entwickelt wurde, um solarthermische Kombianlagen mit verschiedenen Hydrauliken und an verschiedenen Standorten in Europa zu vergleichen. Dazu wurde die „Fractional Solar Consumption“ (FSC) definiert, die den maximal möglichen Solar-Anteil am Endenergiebedarf für Trinkwarmwasser (TWW) und Raumheizung (RH) angibt [2]. Dabei wird beachtet, dass je nach

Einstrahlung (bzw. Standort) und Kollektorfläche sowie -aufstellung im Winter nur ein Bruchteil des Bedarfs solar bereitgestellt, solare Überschusswärme im Sommer dagegen nicht genutzt werden kann.

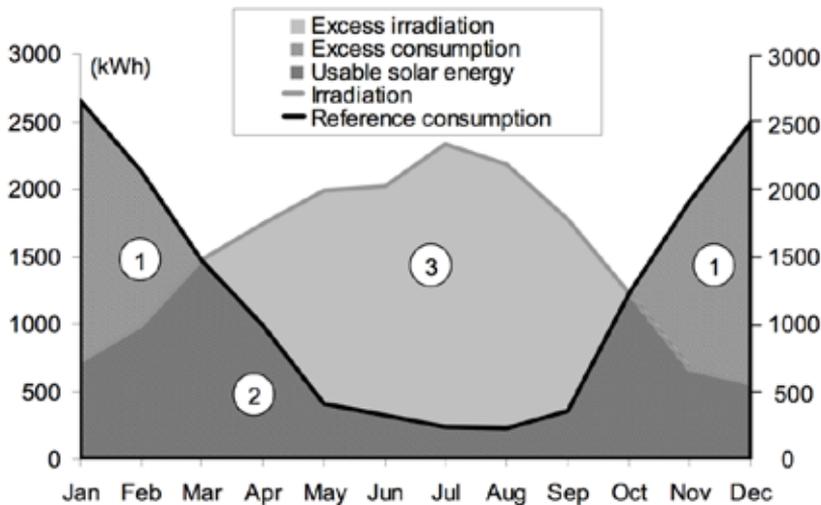


Abbildung 1: Zur Berechnung von FSC wird der Referenzwärmebedarf (schwarze Line) und die solare Einstrahlung auf die Kollektorfläche (graue Linie) benötigt. Zur Berechnung der Kennzahl wird dann der nutzbare Teil der Solarstrahlung (Bereich 2) verwendet. Somit werden überschüssige Energie (Bereich 3) oder Bedarf zu Zeiten geringer Einstrahlung berücksichtigt. Bild aus [2] S. 8

Abbildung 1 stellt die Grundlage der Berechnung von FSC dar. Um die maximal nutzbare solare Energie eines Jahres zu bestimmen, werden im FSC-Verfahren die monatlichen (i) Energiesummen miteinander verglichen.

$$Q_{sol,use} = \sum_{i=1}^{12} \min[(A_{Koll} \cdot H_{t,i}), Q_{ref,i}]$$

Als Bedarf wird hierbei der Wert eines fossilen Referenzsystems angesetzt:

$$Q_{ref} = \sum_{i=1}^{12} \frac{Q_{TWW,i} + Q_{Heating,i} + Q_{loss,i}}{\eta_{boiler,ref}}$$

FSC ergibt sich somit zu:

$$FSC = \frac{Q_{sol,use}}{Q_{ref}}$$

Der Wert des FSC ist demnach abhängig von Kollektorfläche, Standort (bzw. solarer Einstrahlung) sowie dem Referenzenergiebedarf, jedoch unabhängig vom Systemdesign o.ä. Ausgehend vom FSC-Wert lässt sich ein theoretisch erreichbarer $f_{sav,th}$ -Wert berechnen. Der Zusammenhang zwischen FSC und $f_{sav,th}$ wird über (quadratische) Korrelationen abgebildet. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse von Jahressimulationen im Rahmen des Tasks 26. Farblich markiert sind die verschiedenen Systemvarianten, die abgebildet wurden. Jede Linie steht für eine eigenständige Anlagenhydraulik und stellenweise für die Art der fossilen Energieversorgung (Öl/Gas). Die Streuung der jeweiligen Punkte, von denen jeder eine Jahressimulation darstellt, ist gegenüber den quadratischen Regressions-Funktionen relativ gering (R^2 von 0,948 bis 0,991).

Über diese Korrelationen ist es nun möglich, ohne dynamische Systemsimulationen direkt die erwartete fossile Energieeinsparung $f_{\text{save,th}}$ zu berechnen (roter Pfeil in Abbildung 2). Hierfür muss der FSC-Wert über den Wärmebedarf (TWW + RH) und das solare Strahlungsangebot bestimmt werden. Über einen Vergleich der erwarteten und der gemessenen fossilen Energieeinsparung kann also die reale Anlagenperformance bewertet werden. Durch die die Betrachtung der Nachheizung und des Wärmebedarfs, kann ein FSC-basierter Leistungsindikator somit nicht nur den Solarkreis, sondern das gesamte Heizungssystem bewerten.

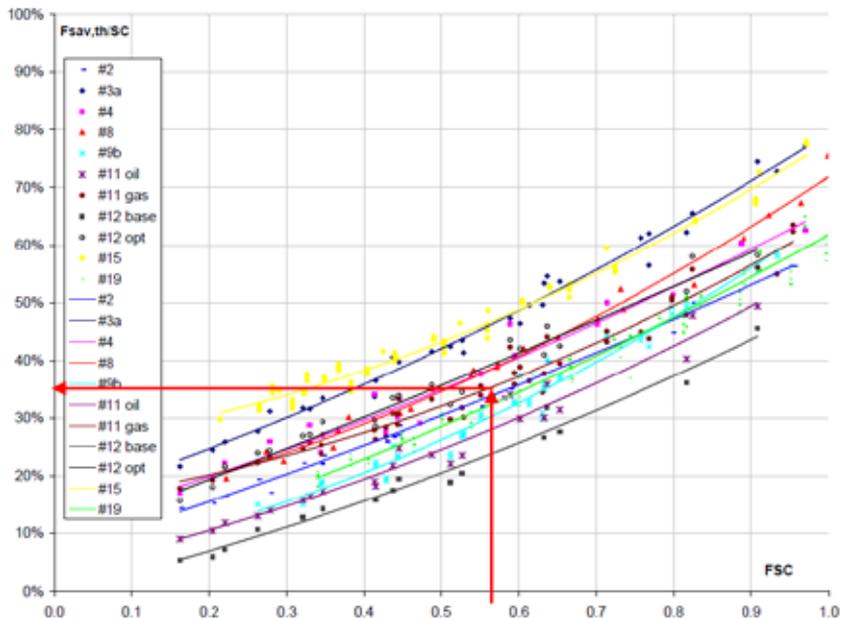


Abbildung 2: FSC-Korrelationen Task 26: Aufgetragen sind die theoretisch zu erwartenden $f_{\text{save,th}}$ -Werte über der FSC-Kennzahl, aus [2] S. 13

Zum Vergleich mit dem nachfolgenden Kombi-Systemen eignet sich System 11 am besten. Die restlichen Systeme des Tasks 26, teils mit direkt solar versorgter Fußbodenheizung, weichen zu sehr von den hier beschriebenen Systemhydrauliken ab. Der Task 26 zielte speziell auf solare Kombi-Systeme, weshalb aller der oben dargestellten Korrelationen eine solare RH-Unterstützung beinhalten. In den folgenden Abschnitten werden eigene Korrelationen unter anderem für ein System mit solarer TWW-Unterstützung (SDHW-System) erstellt.

3. Korrelationen und Einflussparameter

3.1 Solaranlage zur kombinierten Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung

Um die Vorgehensweise und Methodik zunächst an einem erprobten System zu entwickeln, wurde im ersten Schritt ein Kombi-System auf Basis der Task 32¹ Hydraulik aufgebaut. Zentrales Element dieses Hydraulikschemas bildet ein Pufferspeicher, an welchen sämtliche Energiequellen und –senken angeschlossen sind (vgl. Abbildung 3). Die Solaranlage belädt den unteren Teil des Speichers

¹ Im Task 32 wurde ein einheitliches Kombisystem auf Basis der verschiedenen Systemvarianten aus dem Task 26 definiert. Genauere Informationen sind z.B. in [1] zu finden.

über einen externen Wärmeübertrager (nicht geschichtet), die TWW-Bereitstellung geschieht über eine Frischwasserstation und der fossile Kessel beheizt den Bereitschaftsteil des Speichers direkt. Die RH ist ebenfalls direkt an den Speicher angeschlossen und verfügt über eine Rücklaufbeimischung zur witterungsgeführten Einstellung der RH-Vorlauftemperatur. Im Unterschied zum System aus dem IEA Task werden keine Anschlüsse an den Speicher geschichtet eingebracht und es gibt eine TWW-Zirkulationsleitung.

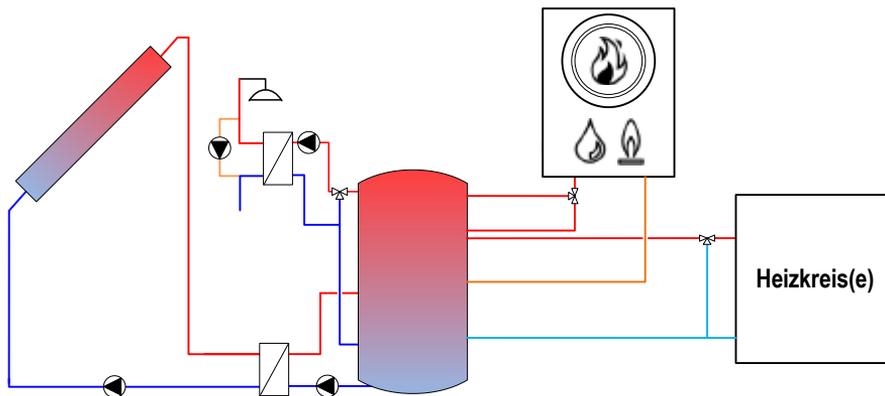


Abbildung 3: Kombi-Systemhydraulik nach Task 32

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse von ca. 3000 Simulationen für diese Systemhydraulik. Dabei wurde der Parameterraum zunächst möglichst breit gewählt, um besonders einflussreiche Größen identifizieren zu können. Variiert wurden im ersten Schritt:

- Standort: Schweden (Stockholm), Deutschland (Würzburg), Spanien (Madrid)
- Gebäudetyp: Wärmebedarf ca. 30, 60 und 100 kWh/(m²a) [für DE-Wetter], eigene Gebäude für Spanien
- Kollektorfläche: 5..50 m²
- Kollektorfeld-Neigungswinkel: 30, 45, 70 °
- Spezifischer Massenstrom im primären Solarkreis: 10..30 l/(m²h)
- Kessel-Vorlauftemperatur: 63..75 °C
- Spezifisches Volumen (je m² Kollektorfläche) des Speichers: 40..100 l/m²
- Zapfmenge und zeitliche Verteilung: 100..400 l/d, 12 h-Verschiebung
- Bereitschaftsvolumen des Speichers

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, gibt es deutlich größere Abweichungen zu einer gemeinsamen Korrelation, als es bei den Untersuchungen des Tasks 26 der Fall war. Wenn für diesen Fall eine theoretische Energieeinsparung anhand eines gemessenen FSC-Wertes berechnet werden sollte, würde sich, wie die schwarzen Pfeile veranschaulichen, eine große Bandbreite von ca. 18 bis 30 % ergeben. Auf dieser Basis ist also noch keine verlässliche Information zur Funktionalität einer Anlage möglich.

Einige der einflussreichen variierten Parameter sind jedoch im Anlagenbetrieb oftmals bekannt. So sollte z.B. die Speichergröße relativ einfach vom Installateur angegeben werden können und die Kessel-Vorlauftemperatur ist im Betrieb sehr einfach messbar. Ebenfalls ist die Energie zur TWW-Erwärmung bekannt, da diese zur Berechnung der FSC-Kennzahl ohnehin gemessen werden muss. Werden diese Parameter fixiert, ergibt sich Abbildung 5. Wie zu sehen ist, lassen sich die übrigen Punkte nach erfolgter Filterung sehr gut über eine quadratische Kurve beschreiben. Über die Kenntnis bzw. die Messung der einflussreichen Parameter, soll später im Verfahren die Gesamtmethodik angepasst und verbessert werden, sodass für jede Systemhydraulik nur eine Korrelation zur Bewertung der Systemleistung und des –ertrags herangezogen werden muss.

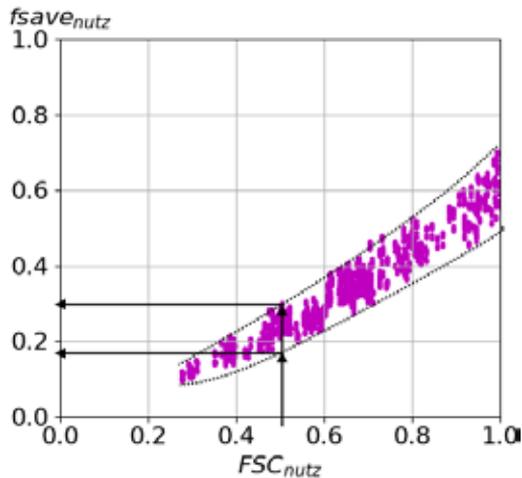


Abbildung 4: FSC-Plot für Task32 Kombi-System anhand von Jahressimulationen

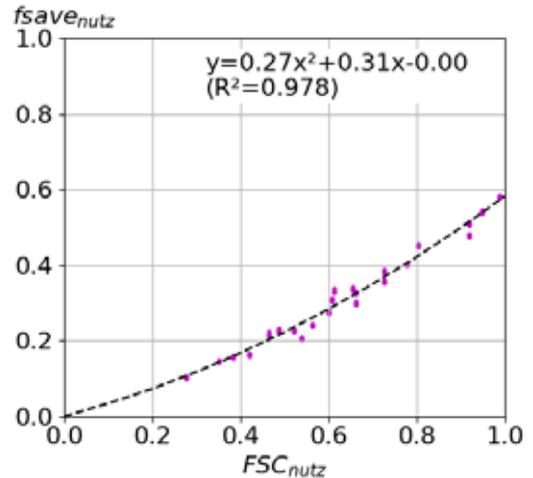


Abbildung 5: Punkte nach Filterung mit Korrelationsfunktion

Im Gegensatz zu den ursprünglichen Veröffentlichungen zu FSC (z.B. [2]) wird bei der Berechnung der verschiedenen Kennzahlen nicht ein festgelegtes Standard-Referenzsystem verwendet. Stattdessen wird die jeweilige Hydraulik als rein fossiles System mit entsprechender Anpassung z.B. der Speichergröße simuliert und für die Referenzenergien herangezogen. Außerdem wird im ersten Schritt mit Nutzenergien gerechnet. Es wird also nur betrachtet, was tatsächlich an den Speicher geliefert wird (solar oder fossil), ohne Berücksichtigung von Bereitschaftsverlusten, Nutzungsgraden o.ä. Dies führt zu etwas veränderten Verläufen der Systemkorrelationen.²

3.2 Standard Trinkwarmwassersystem

Das Forschungsprojekt SolarCheck hat zum Ziel, eine Methodik zu entwickeln, die bei möglichst vielen Solarthermieanlagen angewendet werden kann. Aus diesem Grund liegt der Fokus auf Kleinanlagen für Einfamilienhäuser. Besonders häufig werden in diesem Umfeld Solarsysteme zur Unterstützung der TWW-Erwärmung gebaut. Wie oben stehend bereits erwähnt, wurden im Task 26 ausschließlich Kombi-Systeme betrachtet, sodass hier zunächst überprüft werden muss, ob die Methodik generell anwendbar ist.

Abbildung 6 zeigt das Hydraulikschema des Trinkwarmwasser-Standardsystems (SDHW) mit innenliegenden Wärmeübertragern für Solarkreis und Kessel, Trinkwasserspeicher mit Zirkulation.

² Durch das fixierte Referenzsystem weisen die Original-Korrelationen aus dem Task 26 einen Schnittpunkt mit der y-Achse bei ca. 5.25 % auf.

lationsleitung und Heizkreis, der direkt vom Kessel versorgt wird. Um eine einheitliche Ausgangsbasis für alle Simulationsmodelle zu gewährleisten, wurde dieses System ebenfalls auf Basis des Task 32 Decks erstellt und angepasst.

Auch bei diesem System wurde zunächst mit knapp 3000 Simulationen ein möglichst großer Parameterraum simuliert, um Einflüsse und Sensitivitäten identifizieren und darstellen zu können. Folgende Parameter wurden hierfür variiert:

- Standort: Schweden (Stockholm), Deutschland (Würzburg), Spanien (Madrid)
- Kollektorfläche: 2..8 m²
- Kollektorfeld-Neigungswinkel: 30, 45, 60 °
- Kessel-Vorlauftemperatur: 55..75 °C
- Spezifisches Volumen (je m² Kollektorfläche) des Speichers: 35..60 l/m²
- Zapfmenge und zeitliche Verteilung: 100..400 l/d
- Bereitschaftsvolumen des Speichers: 50, 100, 150 l

Ebenfalls variiert wurde der Gebäudetyp (Wärmebedarf ca. 30, 60 und 100 kWh/(m²a) [für DE-Wetter], eigene Gebäude für Spanien). Zwar handelt es sich um ein reines TWW-System, allerdings sollten auch die Wechselwirkungen zwischen RH- und TWW-Versorgung und deren Auswirkungen auf die Performance des Gesamtsystems betrachtet werden.

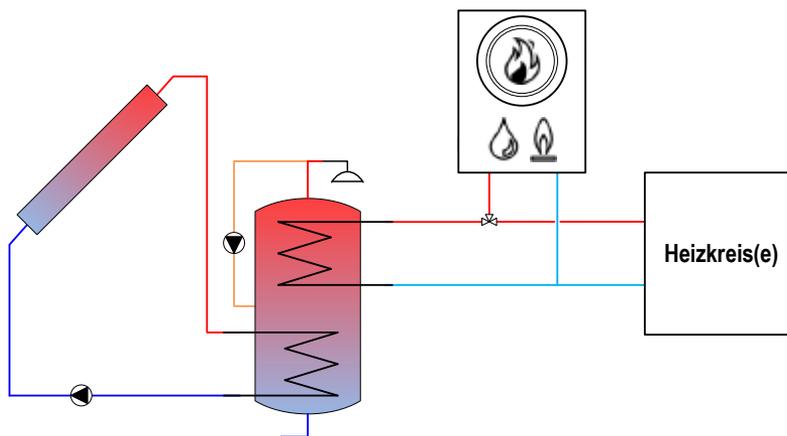


Abbildung 6: Hydraulikschema des SDHW-Systems

Wie Abbildung 7 zeigt, ist die Grundsteuerung beim TWW-System deutlich größer als bei der Kombianlage. Die einzelnen Parameter haben also einen größeren Einfluss auf die Steuerung der Punkte. Einerseits ist dies sicherlich mit dem geringeren Speichervolumen zu begründen. Der große Speicher des Kombi-Systems fängt kurzzeitige Effekte ab, indem Energie je nach Anlagengröße für einige Tage gepuffert werden kann. Andererseits ist der Energiebedarf deutlich geringer, z.B. knapp 4.000 statt 12.000 kWh/a für das EFH in DE mit 60 kWh/(m²a) und 200 l/d TWW-Verbrauch, sodass die Kennzahlen des Systems sensibler reagieren. Zur Berechnung der Kennzahlen wird in E_{ref} und f_{sav} auch jeweils nur der TWW-Bedarf als Referenzenergiebedarf angesetzt. Würde die RH mit

berücksichtigt, lägen die Punkte gesammelt nahe der Null. Ebenfalls erkennbar ist, dass die dargestellten Punkte eher zum rechten Rand mit $FSC_{nutz}=1$ wandern. Auch dies ist mit dem geringeren Energiebedarf zu begründen. Ein FSC von 1 hieße, dass die Monatssummen der auf die Kollektorfläche auftretenden Strahlung ganzjährig größer sind als die des Energiebedarf. Neben der Höhe des Wärmebedarfs ist aber auch die zeitliche Verteilung entscheidend. Werden RH und TWW-Bereitung kombiniert betrachtet, tritt der geringste Bedarf im Sommer auf, weil hier keine RH-Energie benötigt wird. Im Frühling, Herbst und Winter steigt der Bedarf in diesen Systemen, während das Strahlungsangebot abnimmt. Zwar unterliegt auch der TWW-Bedarf leichten jahreszeitlichen Schwankungen mit Minimum im Sommer, allerdings wesentlich weniger stark ausgeprägt als bei der Raumheizung. Dieses gegenläufige Verhalten führt dazu, dass die FSC-Kennzahl für Kombi-Systeme erst bei einer deutlich stärkeren Überdimensionierung in Richtung 1 tendiert, als bei SDHW-Systemen.

Wie zuvor, kann auch beim SDHW-System angenommen werden, dass einige Parameter bekannt sind bzw. andere gemessen werden können. Wenn Speichergröße und Kessel-Vorlauftemperatur bekannt sind, verbessert die Filterung nach diesen Merkmalen das sich ergebende Bild erheblich, wie Abbildung 8 verdeutlicht. Erkennbar ist auch, dass trotz des Filters noch immer eine größere Streuung vorhanden ist. In der Abbildung sind die verschiedenen Zapfprofile farblich gekennzeichnet. Wie sich zeigt, besteht bei dem SDHW-System ein wesentlich größerer Einfluss der TWW-Zapfmenge. Da diese Energie allerdings neben den Referenz-Speicherverlusten den einzigen Bedarf darstellt, ist der starke Einfluss hier zu erwarten.

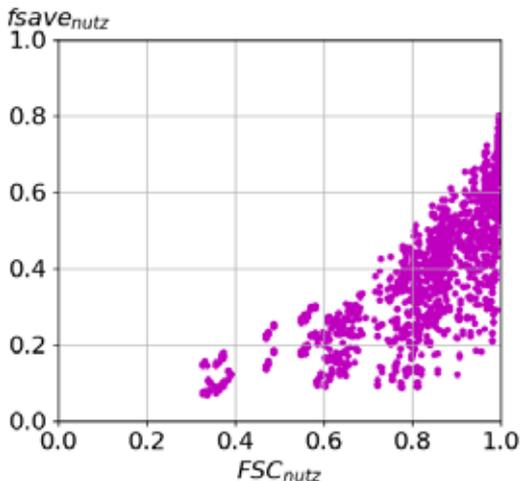


Abbildung 7: FSC-Plot für SDHW-System anhand von Jahressimulationen

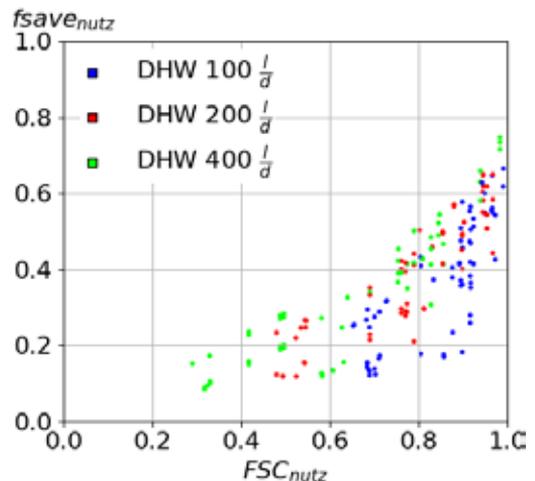


Abbildung 8: FSC-Plot mit Filterung nach Speichergröße und Kessel-Vorlauftemperatur

Natürlich muss auch beim SDHW-System der TWW-Bedarf gemessen werden, um das Verfahren anwenden zu können. Unter dieser Voraussetzung ergeben sich Korrelationen, wie in Abbildung 9 zu sehen. Auffällig ist hierbei, dass das Bestimmtheitsmaß des quadratischen Fits mit steigendem Bedarf zunimmt. Auch dieses Verhalten ist durchaus plausibel, da selbst kleine absolute Bedarfsänderungen, relativ am Gesamtbedarf große Veränderungen darstellen. Die verbliebenen Punkte, welche deutlich über oder unter den Ausgleichspolynomen liegen, müssen im weiteren Projektfortschritt noch einzeln genauer untersucht und durch eine Anpassung der Gesamtmethodik nach Möglichkeit ausgeglichen werden.

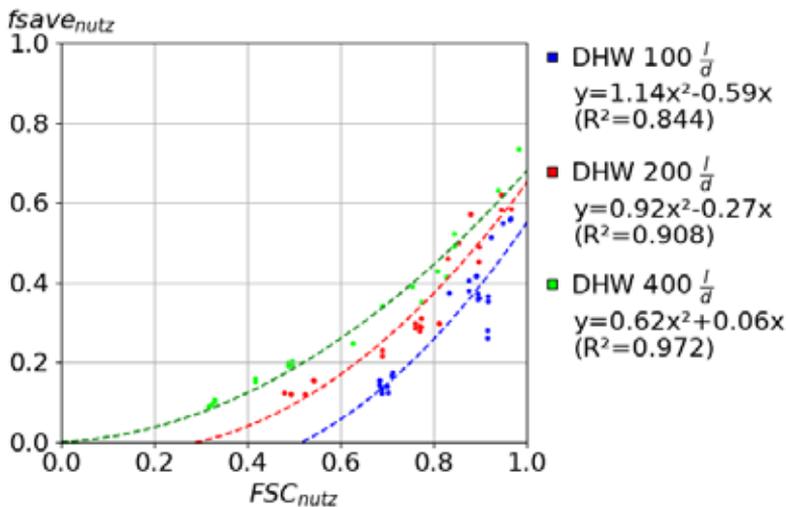


Abbildung 9: FSC-Korrelationen für SDHW-System in Abhängigkeit vom Zapfprofil (100..400 l/d)

3.3 Anwendung zur Funktionskontrolle

Wie bereits bei der zugrunde liegenden Methodik beschrieben, ist es über die FSC-Kennzahl mithilfe der Korrelationen möglich, eine theoretisch erreichbare fossile Energieeinsparung f_{save} zu ermitteln. Wird dieser Wert mit den tatsächlichen, gemessenen Einsparungen verglichen, ergibt sich direkt eine Aussage zur Anlagenperformance, die man z.B. über eine einfache Größe ausdrücken kann:

$$\text{performance factor } PF = \frac{f_{save,real}}{f_{save,FSC}} \cdot$$

Problematisch für eine fortlaufende Funktionskontrolle ist dabei, dass Messdaten für 12 Monate Betrieb vorhanden sein müssen, um die Methodik nutzen zu können. Um Fehler dennoch schon früher zu detektieren, ist ein Ansatz, den FSC-Wert nach einem Jahr Anlagenbetrieb jeden Monat neu zu berechnen und dabei jeweils die vergangenen 12 Monate zu verwenden. Um zu überprüfen, wie sensitiv die Kennzahl auf Anlagenfehler reagiert, wurden in der mehrjährige Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen nach vordefinierter Zeit ein Anlagenfehler auftrat.

Abbildung 10 zeigt die Reaktion des Kombisystems auf einen Pumpenausfall im Herbst. Der oberste Punkt stellt die Ausgangssituation nach einem Jahr fehlerfreien Betriebs dar. Wie zu sehen ist, entfernt sich die Anlage mit jedem weiteren Monat fehlerbehafteten Betriebs weiter von der Korrelation. Die ersten Punkte liegen dabei näher aneinander, weil die Ende Herbst bzw. Anfang Winter gering ausfallen. Die darauf folgenden Punkte liegen weiter voneinander entfernt, weil der theoretisch anhand der Strahlung und des realen Wärmebedarfs erwartete Ertrag in diesen Monaten höher liegt.

Im FSC-Diagramm sind die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Solarthermieanlage durch die Skalierung etwas erschwert. Abbildung 11 stellt deswegen die Reaktion des performance factors auf den Pumpenausfall dar. Hier ist ebenfalls erkennbar, dass die Reaktion in den ersten Monaten geringer ausfällt. Schon im dritten Monat liegt der PF allerdings bereits bei 90 % und fällt danach weiter stark ab. Je nach Genauigkeit der verbauten Sensorik und den von der Methodik bedingten Schwankungen im Vergleich zur Korrelation, könnte der Fehler schnell erkannt und behoben werden.

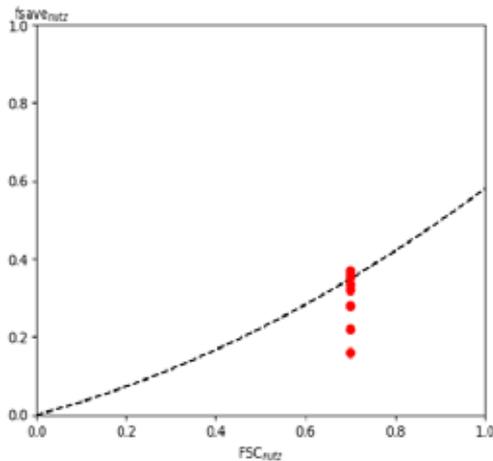


Abbildung 10: FSC-Korrelation, Auswirkungen fehlerhaften Betriebs: Pumpenausfall im Herbst

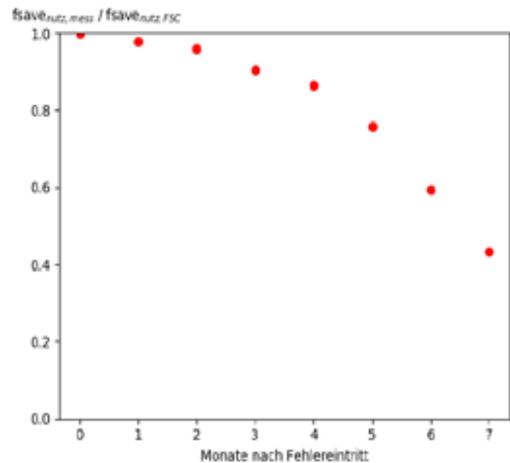


Abbildung 11: performance factor, Reaktion auf Pumpenausfall im Herbst

Der Ausfall der Pumpe im primären Solarkreis wurde als Fehler ausgesucht, weil er sich in der Simulationsumgebung TRNSYS sehr einfach abbilden lässt und weil die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Anlage sehr groß sind. Es ging hierbei in erster Linie darum, die Reaktion des neu definierten Leistungsindikators zu zeigen. Sicherlich kann der komplette Anlagenstillstand durch Pumpenausfall algorithmenbasiert schneller detektiert werden. Ein Vorteil der FSC-PF-Methodik besteht allerdings darin, dass hierbei die Ertragseinbußen quantifiziert werden können, welche mit dem jeweiligen Fehler einhergehen.

Danksagung

Das Forschungsprojekt SolarCheck „Entwicklung eines einheitlichen Verfahrens und eines anschaulichen Indikators zur Feststellung der Funktionsfähigkeit thermischer Solaranlagen für Trinkwarmwasserbereitung und kombinierte Heizungsunterstützung, Teilprojekt: Entwicklung der FSC-basierten Funktionskontrolle thermischer Solaranlagen und von Algorithmen zur Fehlereingrenzung“ wird aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 0325870A gefördert. Wir bedanken uns für diese Unterstützung und insbesondere auch bei unseren Industriepartnern.

4. Literaturverzeichnis

- [1] Heimrath, R.; Haller, M.: The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32, Report A2 of Subtask A, May 2007
- [2] Letz, T.: Validation and background information on the FSC procedure. A Report of IEA SHC Task 26 - Solar Combisystems, Dec. 2002