



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# PELLETSOLAR

## LEISTUNGSANALYSE UND OPTIMIERUNG EINES PELLET-SOLARKOMBINIERTEN SYSTEMS FÜR HEIZUNG UND WARMWASSER

### Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Lars Konersman, SPF Institut für Solartechnik**

Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil, [lars.konersmann@solarenergy.ch](mailto:lars.konersmann@solarenergy.ch),  
[www.solarenergy.ch](http://www.solarenergy.ch)

**Michel Haller, SPF Institut für Solartechnik / Institut für Wärmetechnik, TU Graz**

Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz, [michel.haller@tugraz.at](mailto:michel.haller@tugraz.at), [www.iwt.tugraz.at](http://www.iwt.tugraz.at)

**Peter Vogelsanger, SPF Institut für Solartechnik**

Oberseestrasse 10, CH-8640 Rapperswil, [peter.vogelsanger@solarenergy.ch](mailto:peter.vogelsanger@solarenergy.ch),  
[www.solarenergy.ch](http://www.solarenergy.ch)

## **Impressum**

Datum: 30. August 2007

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Biomasse

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

BFE-Bereichsleiter, [daniel.binggeli@bfe.admin.ch](mailto:daniel.binggeli@bfe.admin.ch)

BFE-Projektnummer: 101792/152207

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	2
1. Ausgangslage .....	3
2. Ziel der Arbeit .....	3
3. Methode .....	3
3.1 Prüfstand Umbau .....	3
3.2 Messung der temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste .....	6
3.3 Messungen am Pellet-kessel im stationären Betrieb .....	6
3.4 Messungen am Pellet-kessel im instationären/taktenden Betrieb .....	7
3.5 12-Tages-Systemtest (Standardsystem & optimiertes System) .....	7
3.6 Modellbildung und Simulationen zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades .....	9
3.7 Messtellenverzeichnis und Unsicherheitsrechnung .....	11
4. Ergebnisse .....	13
4.1 Stationärer Pellet-kessel-Betrieb .....	13
4.2 Instationärer Betrieb & Vergleiche zum stationären Betrieb .....	14
4.3 12-Tages-Systemtests .....	20
4.4 Jahres-Simulationen .....	24
5. Diskussion .....	27
5.1 Abstrahl und Konvektionsverluste im Stillstand .....	27
5.2 Stationärer Betrieb .....	27
5.3 Instationärer / taktender Betrieb .....	27
5.4 12-Tages-Systemtests .....	28
5.5 Jahres-Simulationen .....	29
6. Schlussfolgerungen .....	32
Symbolverzeichnis .....	34
Referenzen .....	36
Anhang .....	37

## Zusammenfassung

Sowohl Pelletheizungen wie auch solarthermische Systeme befinden sich aktuell auf einer starken Wachstumskurve. Die Kombination dieser beiden Technologien in einem **Pellet-Solar-System** für die Raumheizung und Warmwasseraufbereitung bietet grosses Potential für die Einsparung von fossilen Energieträgern, die verbesserte Ausnutzung der Biomasse und die Reduktion von Emissionen. Ziel des vorliegenden Projektes ist die **energetische Optimierung eines Pellet-Solar-Systems**.

Zur Prüfung von Pellet-Solar-Anlagen wurde der System-Prüfstand des SPF zunächst einigen grösseren Veränderungen unterzogen. Anschliessend wurden die Wirkungsgrade eines 10 kW Pelletkessels bei Vollast, Teillast und im Taktbetrieb bestimmt. In einem zweiten Schritt wurde der Kessel mit einer Solaranlage kombiniert (Pellet-Solar-System), und es wurden zwei 12-tägige Systemtests unter realistischen Lastbedingungen durchgeführt. Basierend auf den Messresultaten erfolgte in einem dritten Schritt die Erstellung eines Simulationsmodells. Analog zum realen Messaufbau des 12-Tages-Systemtests sind im Simulationsmodell Kessel, Solaranlage und Speicher enthalten. Das Modell diente dazu, Jahressimulationen mit realistischen Last-Bedingungen für Raumheizung und Warmwasser durchzuführen, und durch die Veränderung von Parametern deren Einfluss auf die Leistung des Systems zu evaluieren.

Die Messungen am 10 kW Pellet-Kessel und die darauf basierenden Simulationen haben gezeigt, dass der Einfluss von Abstrahl- und Konvektionsverlusten auf den Kesselwirkungsgrad bedeutend ist. Dieser Einfluss steigt mit abnehmender Last. Im realen Einsatz in einem Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland können die Abstrahl- und Konvektionsverluste die feuerungstechnischen Verluste deutlich übertreffen. Der stationäre Betrieb des Kessels schneidet bei gleicher mittlerer Last gegenüber dem taktenden Betrieb vor allem aufgrund des verminderten Bedarfs an elektrischer Hilfsenergie energetisch besser ab. Die durchgeführten Untersuchungen lassen darauf schliessen, dass Potential besteht, den Kesselnutzungsgrad weiter zu verbessern. Einerseits durch Massnahmen im Bereich der Wärmedämmung, andererseits durch einen reduzierten Luftüberschuss bei niedriger Leistungsstufe. Vor allem für den anzustrebenden Modulationsbetrieb dürften solche Massnahmen von besonderer Bedeutung sein, da sich bei der Modulation die Abstrahlverluste durch die verlängerten Laufzeiten anteilmässig besonders stark auswirken.

Der 12-tägige Systemtest konnte die einwandfreie Funktion und die gute Leistung des Pellet-Solar-Systems belegen. Ausserdem konnte mit einer hydraulisch-regeltechnischen Optimierung die Start-Stop-Zyklen des Kessels im Test um ein Drittel reduziert werden. Die erhoffte Verminderung des Pelletverbrauchs stellte sich dadurch jedoch nicht ein. Die Massnahme zur Reduktion der Start-Stop-Zyklen wird dennoch aus anderen Gründen vom projektbeteiligten Kesselhersteller beim Bau der nächsten Kesselserie implementiert werden.

Die Jahresertragsrechnung mit dem Simulationsmodell ergab für das geprüfte Solar-Pellet-System eine Brennstoff-Einsparung von 27% gegenüber einer Pellet-Heizung ohne Solaranlage und ohne Pufferspeicher. Weitere Simulationsrechnungen zeigten, dass eine optimierte Pellet-Solar-Anlage (15 m<sup>2</sup> Kollektorfeld, 950 Liter Speicher) unter den angenommenen Rahmenbedingungen nicht nur den Pelletverbrauch um 32% senkt, sondern auch einen deutlich positiven Effekt auf den Bedarf an elektrischer Energie (-17%), auf die Start-Stop-Zyklen des Kessels (-52%), und auf den Kesselnutzungsgrad (+5% absolut) hat. Diese Werte wurden erreicht, indem ausgehend vom Simulationsmodell Hydraulik und Regeltechnik für die geprüfte Anlage optimiert und die Wärmedämmung von Leitungen, Kessel und Speicher verbessert wurden. Beim untersuchten System lag der jährliche Raumwärmebedarf bei 15'500kWh/a (bzw. 103 kWh/a·m<sup>2</sup><sub>EBF</sub>) und der Warmwasserenergiebedarf bei 2800 kWh/a.

Das durchgeführte Forschungsprojekt konnte wichtige neue Erkenntnisse zur Betriebsweise von Pelletheizungssystemen liefern. Daraus wurden Empfehlungen für die Optimierung solcher Systeme abgeleitet. Die gewählten Mittel zur Systemuntersuchung haben sich dabei als geeignet erwiesen und verfügen über Potential weitere sich aufdrängende Fragestellungen zu untersuchen. In einem nächsten Schritt gilt es die Übertragbarkeit der hier gesammelten Erkenntnisse zu prüfen. Hierzu müssen weitere Systeme auf dem Prüfstand zu untersucht und die Simulations-Studien auf andere Last-Bedingungen (zum Beispiel geringerer Energiebedarf für Raumheizung und Warmwasser, höheres Temperaturniveau des Heizsystems) ausgedehnt werden. Mit dem Umbau des System-Prüfstands besteht nun erstmalig die Möglichkeit, die effektive Leistungsfähigkeit von auf dem Markt angebotenen Pellet-Systemen mit und ohne Solaranlage zu quantifizieren. Bezüglich der Optimierung von Hydraulik und Regeltechnik kann das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Simulations-System dazu dienen, weiteres Verbesserungspotential aufzuzeigen. Zudem stellt sich die Frage, in welchem Ausmass und unter welchen Bedingungen eine Solaranlage durch Brennstoffeinsparung und zusätzliche Reduktion der Start-Stop-Zyklen eine Minderung der Schadstoffemissionen von Pellet-Heizungen bewirken kann.

## 1. Ausgangslage

Der Einsatz von Pellet-Heizungen und von solarthermischen Systemen befindet sich aktuell auf einer starken Wachstumskurve. Die Kombination dieser beiden Technologien in einem **Pellet-Solar-System** für die Raumheizung und Warmwasser-Aufbereitung bietet grosses Potential für die Einsparung von fossilen Energieträgern, das Erreichen der Ziele des Kyoto-Protokolls, die Reduktion von Luftschadstoff-Emissionen, und die effizientere Ausnützung von Primärenergie.

Maximale Einsparungen können jedoch nur erzielt werden, wenn das Zusammenspiel von Pellet-Kessel und Solaranlage optimiert ist. Die Untersuchungen am SPF Institut für Solartechnik an Kombi-Solarsystemen mit Öl- und Gas-Zusatzheizungen im Rahmen des Projektes KombiKompakt+ [3] haben gezeigt, dass gerade diesbezüglich das Optimierungspotential vieler Systeme sehr gross ist. Eine gute Systemlösung braucht häufig 20% weniger Brennstoff als eine schlechte oder falsch eingestellte.

Bei Pellet-Heizsystemen kann davon ausgegangen werden, dass durch einen optimierten Betrieb des Kessels ein noch grosses Potential hinsichtlich der besseren Ausnützung des Brennstoffes ausgeschöpft werden kann. Aufgrund des trägeren und energieintensiveren Anfahrprozesses im vgl. zu Öl und Gas dürfte bei Pellet-Kesseln die richtige Einbindung und der Betrieb eine noch grössere Rolle spielen.

Holzenergie Schweiz geht davon aus, dass längerfristig ca. 10 - 12% des Wärmeenergieverbrauchs mit einheimischer Holzenergie gedeckt werden kann [12]. Durch Effizienzverbesserungen sowie durch die Kombination mit einer Solaranlage kann der Holzverbrauch einer Anlage erheblich reduziert werden. Bei gleich bleibendem Brennstoffangebot und einem solaren Deckungsgrad von 30% können somit rund 40% mehr Anwendungen mit Holzkesseln ausgerüstet werden als ohne Kombination mit Solaranlagen.

## 2. Ziel der Arbeit

Das Ziel des Projektes PelletSolar ist die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit solarthermischen Anlagen kombinieren.

In detaillierten Untersuchungen an einem Pelletkessel in Kombination mit einem Solarsystem im Prüfstand werden relevante Systemparameter unter realen Lastbedingungen bestimmt. Daraus resultieren explizite Grundlagen für die Abbildung des Systems in einem Computermodell. Darauf basierend werden die Jahres-Nutzungsgrade unter Einbezug aller relevanten Betriebszustände inklusive Start- und Stop-Zyklen des Kessels mit Simulationsrechnungen ermittelt.

Im Hinblick auf eine optimale energetische Ausnützung werden Empfehlungen gemacht für die Systementwicklung, das Systemdesign und die Regelstrategien von Pellet-Solar-Systemen. Zudem wird die Frage beantwortet, ob und in welchem Ausmass durch die Solaranlage und den Speicher das Takten der Kesselfeuerung in Jahreszeiten mit wenig Wärmebedarf (Übergangszeiten) verhindert werden kann.

## 3. Methode

Nachfolgend wird das methodische Vorgehen für die einzelnen Arbeitsschritte hinsichtlich der Analyse und der anschliessenden Optimierung des Pellet-Solar-Systems aufgezeigt.

### 3.1 PRÜFSTAND UMBAU

Der am SPF bestehende Prüfstand für die dynamische Messung von Systemnutzungsgraden wurde bis anhin für Öl- und Gaskombinierte Solarsysteme eingesetzt. Für die Durchführung des vorliegenden Projektes mit Pellet-Heizsystemen musste der Prüfstand spezifischen Anpassungen unterzogen werden.

Es wurde ein innovatives Verfahren entwickelt, mit welchem der Verbrauch von Pellets kontinuierlich erfasst werden kann. Hierzu wurde ein 150 kg Pelletlager auf einer Waage montiert, deren Messwerte von der Prüfstand-Software aufgezeichnet werden. Zugleich wurde der Querschnitt des Tages-Vorratsbehälters welcher mit dem Kessel fest verbunden ist verkleinert und ein Füllstandsensordarin angebracht, dessen Signal verwendet wird um die Förderschnecke des auf der Waage stehenden Pellet-Lagers in Betrieb zu setzen. Von dieser Förderschnecke gelangen die Pellets über ein Fallrohr in den Tagesvorratsbehälter des Kessels. Auf diese Weise kann der Pelletverbrauch quasi-kontinuierlich gemessen werden, ohne dass der ganze Kessel

auf die Waage gestellt werden muss oder der Inhalt des Tages-Vorratsbehälter zu Beginn und Ende jeder Messung manuell bestimmt werden muss (Abbildung 2).

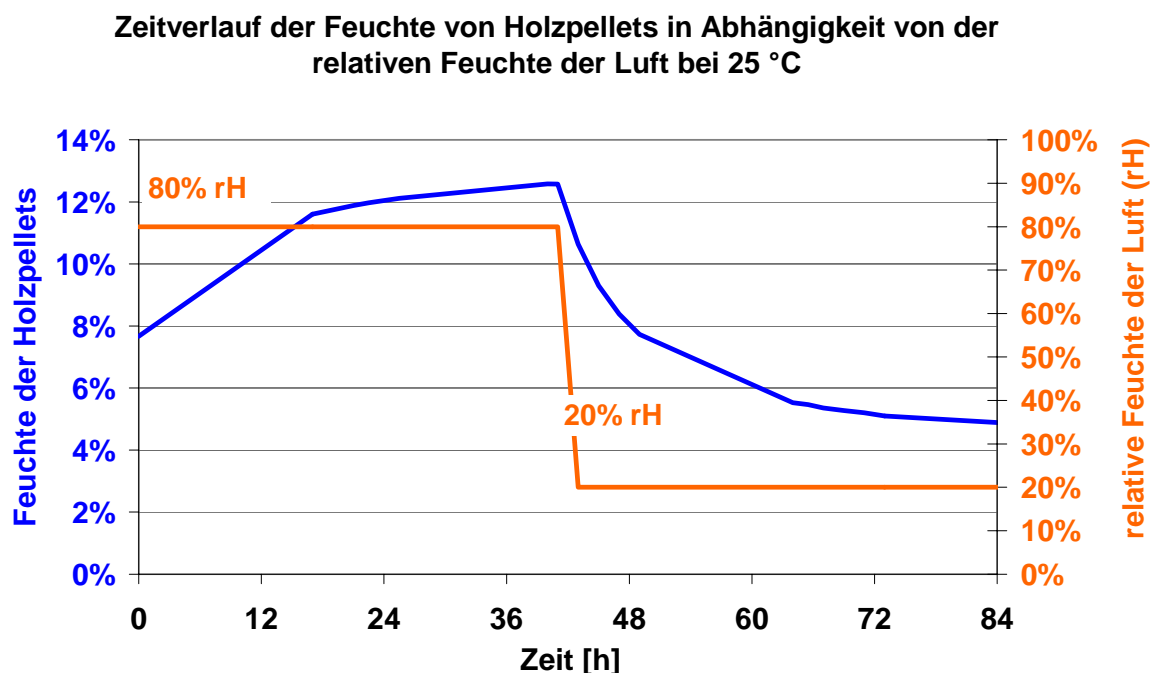


Abbildung 1: Veränderung der Pellet-Feuchte in Abhängigkeit der relativen Feuchte der Luft, gemessen anhand einer kleinen Probe (200 g) in der Klimakammer. Bestimmung der Feuchte zeitlich punktuell über die Veränderung des Gewichts, respektive die Trocknung der Probe bis zur Gewichtskonstanz.

Vorversuche haben gezeigt, dass sich der Feuchtegehalt der Pellets bei sich ändernder relativer Luftfeuchte sehr schnell verändern kann. Eine kleine Probe in der Klimakammer stellt sich innert wenigen Stunden auf die veränderte relative Luftfeuchte ein (Abbildung 1).

Aus diesem Grund wurden Pellet-Vorratsbehälter und Waage in Leichtbauweise eingehaust und die relative Luftfeuchte im Vorratsraum über den gesamten Test-Zeitraum auf 50% $\pm$ 5% konditioniert. Entsprechende Tests mit dem gefüllten Vorratsbehälter auf der Waage zeigten, dass die prozentuale Gewichtsveränderung bei einer Sprunghaften Veränderung der relativen Luftfeuchte zwar viel langsamer verläuft als im Klimaschrank, jedoch über einen längeren Zeitraum durchaus zu Verfälschungen der Resultate führen könnte. Ausserdem konnte durch die Feuchte-Konditionierung des Pellet-Vorrats der Feuchtegehalt der Pellets als konstant angenommen werden, und es musste pro Pellets-Lieferung nur eine – zuvor konditionierte - Probe zur Bestimmung von Feuchte und Heizwert eingesandt werden.

Sowohl die zusätzlichen Fühler für den Füllstand des Tages-Vorrats und die Feuchte im Pellet-Lager als auch die Geräte zur Befeuchtung und Entfeuchtung der Luft sind in die automatische Regelung des gesamten Prüfstandes eingebunden. Dies ermöglicht das automatisierte sequentielle Einstellen und Ausmessen unterschiedlicher Betriebszustände eines Pellet-Kessels ohne manuelle Eingriffe. Es zeigte sich, dass mit dem aufgebauten Mess-Verfahren bei einer Messdauer von über 3 Stunden der Kesselwirkungsgrad im stationären Zustand über den Brennstoffverbrauch und die wasserseitige Energiebilanz mit einer Standardabweichung von 0.3 – 0.9%<sup>1</sup> absolut gemessen werden kann. Kritisch für das Erreichen dieser Werte sind eine ausreichende Verjüngung des Querschnitts des Tages-Vorratsbehälters, insbesondere im Bereich des zu-

<sup>1</sup> Berechnet als Standardabweichung des Mittelwertes aus 3 Auswertungen aufeinanderfolgender Zeitperioden von jeweils 1 h. Zu beachten ist, dass die Standardabweichung des Mittelwertes mit dieser Rechnung überschätzt wird, da auf Grund der Methode zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs eine negative Abweichung des Wertes einer Zeitperiode mit einer positiven Abweichung des Wertes der nächsten Zeitperiode korreliert (d.h. die Unabhängigkeit der Einzelmessungen ist streng genommen nicht gegeben).

sätzlich eingebauten Füllstand-Sensors, sowie bei Ansprechen des Sensors eine nur geringe Nachförderung von Pellets aus dem Pellet-Lager auf der Waage.

Im Zuge der Erweiterungen des Prüfstandes wurde auch die bereits begonnene Umrüstung der Prüfstand-Software von der Programmiersprache C++ auf LabVIEW abgeschlossen. Gleichzeitig konnten auch die Möglichkeiten zur Steuerung und Regelung der Einrichtung erweitert werden.

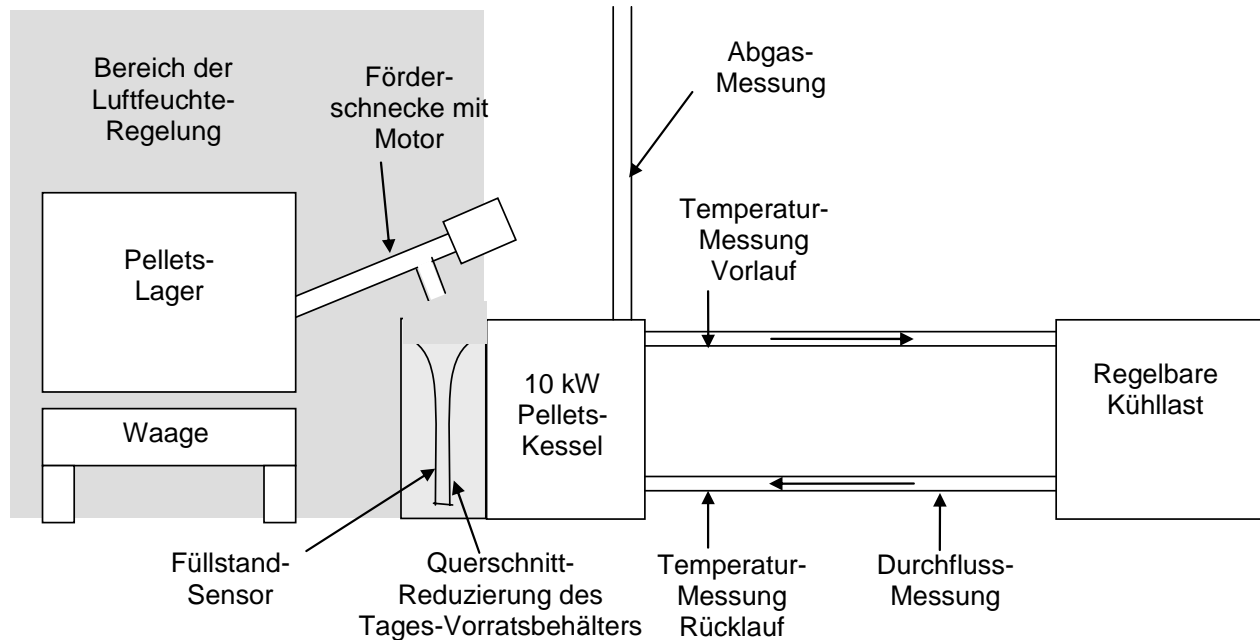


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Messanordnung für die Bestimmung von Nutzungsgraden bei stationären und instationären Betriebszuständen des Pellet-Kessels.

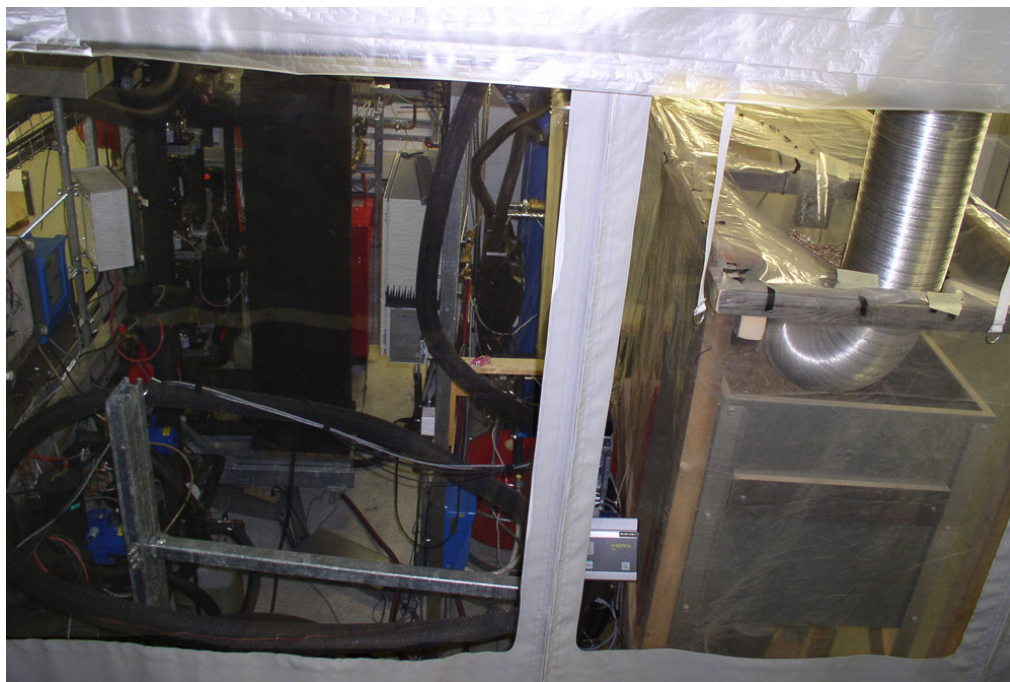


Abbildung 3: Teilaufnahme des SPF Systemprüfstands für Pellet-Solar-Anlagen. Auf der rechten Bildhälfte ist das auf einer Waage installierte Pellet-Lager abgebildet. Das Reservoir ist zur Luftfeuchtekkonditionierung mit einem Plastikvorhang abgedichtet. Das Wellrohr dient der einfacheren Pelletnachfüllung.

### 3.2 MESSUNG DER TEMPERATURABHÄNGIGEN ABSTRAHL- UND KONVEKTIONSVERLUSTE

Die von der Temperatur des Wasserkörpers abhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste des Kessels wurden in einem zweistufigen Verfahren gemessen, wie es auch bei der Bestimmung von Wärmeverluste von Solarspeichern nach EN-12977-3 zur Anwendung kommt. In Anlehnung an diese Norm zur Bestimmung von Speicherverlusten wird zuerst die thermische Masse des Kessels bestimmt. Hierzu wird dieser bei ausgeschaltetem Brenner auf 60 °C konditioniert, und anschliessend die Wärmemenge bestimmt welche dem Kessel über den Heizkreis entzogen werden kann bis zum Erreichen einer Temperatur von 20 °C in Vor- und Rücklauf. In einem zweiten Schritt wird dasselbe Verfahren noch einmal angewendet, jedoch mit einer Wartezeit zwischen dem Konditionieren auf 60° C und der Entnahme der Wärme. Bei den ungleich grösseren und besser gedämmten Solarspeichern beträgt die Wartezeit in der Regel 48 h. Für den Pellet-Kessel, welcher im Vergleich zu Solarspeichern relativ klein und schlecht gedämmt ist, wurde nach einem Vorversuch die Wartezeit auf 4 h festgelegt. Aus den Messresultaten lässt sich der temperaturabhängige Wärmeverlustkoeffizient  $UA_{kessel,AK}$  berechnen (Formel 1).

Formel 1: 
$$UA_{kessel,AK} = LN \left( \frac{Q_{Mtherm}(t)}{Q_{Mtherm}(0)} \right) \cdot \frac{M_{therm}}{t}$$

### 3.3 MESSUNGEN AM PELLETT-KESSEL IM STATIONÄREN BETRIEB

Zur Messung der Effizienz des Pellet-Kessels im stationären Betrieb wird dieser unter 12 verschiedenen Randbedingungen innerhalb des Modulationsbereichs zwischen 4 und 10 kW betrieben. Dabei werden sowohl Vorlauf- und Rücklauftemperatur als auch der Durchfluss variiert. Jede Messung eines Zustands im stationären Betrieb wird jeweils während 6.5 Stunden durchgeführt.

Um Aussagen zum Kessel-Wirkungsgrad zu machen, wird eine präzise Wärmezählung gemacht. Dazu wird je ein kalibrierter vierleiter Pt100 Tauch-Temperaturfühler im Vor- und im Rücklauf sowie ein Durchflussmessgerät (MID) der Firma Krohne ins System integriert. Zur Bestimmung des Kesselwirkungsgrads wird pro Pellets-Lieferung eine Probe entnommen und diese zur Analyse von Heizwert, Brennwert und Feuchte in einem luftdicht verschlossenen Gefäss an die Firma Intertek Caleb Brett eingesandt.

Bei den in diesem Bericht dargestellten Resultaten der Stationärmessungen wurden Messergebnisse verworfen, deren Standardabweichung des aus 3 aufeinanderfolgenden Stunden-Auswertungen ermittelten Mittelwertes höher als 1% lag (vergleiche Fussnote 1).

Für Aussagen in Zusammenhang mit dem feuerungstechnischen Wirkungsgrad wurde von der Firma Verenum ein Messgerät (Testo 300XXXL) bereitgestellt. Von diesem Gerät werden die Abgastemperatur, CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Gehalt sowie die Emissionswerte CO und NO erfasst. Die Werte von O<sub>2</sub>, CO und NO werden über ein Kalibriergas kalibriert. Zur Berechnung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades wurde die Formel von Nussbaumer und Good [10] verwendet.

Eine Schnittstelle am Pellet-Kessel ermöglicht die Erfassung von Daten der Kessel-Regelung (Kesselsoll-/ist-Temperatur, Leistungsmodulation etc.).

Aus der wasserseitigen Energiebilanz und der gemessenen durchschnittlichen Brennstoffleistung wird die Kessel-Effizienz  $\eta_K$  berechnet (Formel 2). Um einen fairen Vergleich insbesondere der taktenden Betriebsweise mit der stationären Betriebsweise zu ermöglichen, wird die Kesseleffizienz auch unter Einbezug der mit Faktor 3 gewichteten elektrischen Leistungsaufnahme berechnet  $\eta_{K,pe+el}$  (Formel 3, vgl. Fussnote 7). Da die Kesseltemperaturen verschiedener Messungen nicht identisch sind, wird auch eine auf Kesseltemperatur 60°C normierte Kesseleffizienz berechnet  $\eta_{K,60C}$ , welche den Einfluss der temperaturbedingten Abstrahl- und Konvektionsverluste des Kessels kompensiert und so das Erkennen des Einflusses anderer Parameter erleichtert.

Formel 2: 
$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Pellet}}$$

Formel 3: 
$$\eta_{K,pe+el} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Pellet} + F_{el} \cdot P_{el}}$$



Formel 4: 
$$\eta_{K,60C} = \frac{\dot{Q}_{Nutz} + \dot{Q}_{temp\_corr}}{\dot{Q}_{Pellet}}$$

Formel 5 
$$\dot{Q}_{temp\_corr} = UA_{kessel,AK} \cdot (T_{kessel} - 60^{\circ}C)$$

Eine detaillierte Beschreibung der Symbole befindet sich im Symbolverzeichnis.

### 3.4 MESSUNGEN AM PELLETT-KESSEL IM INSTATIONÄREN/TAKTENDEN BETRIEB

Zur Bewertung von Start-Stop-Zyklen wird die Heizlast unter 3 kW (30% der Nennleistung) gesetzt. Es werden zwei Messreihen (TM0, TM1) à jeweils über 10 Stunden mit unterschiedlichen Randbedingungen (Durchfluss, Last, min./max. Kesseltemperatur) gefahren und miteinander verglichen.

Im Rahmen einer weiteren Messreihe wird der Nutzungsgrad im Taktbetrieb unter Bedingungen bestimmt, wie sie im 12-Tages-Systemtest aufgetreten sind (TM2). Die wichtigste Änderung gegenüber den ersten beiden Taktmessungen besteht in der deutlich höheren durchschnittlichen Leistungsabnahme (3kW). Zudem werden in diesem Test auch die Kesseltemperaturen so angepasst wie sie zuvor im Systembetrieb gemessen wurden. Diese Messungen des Taktbetriebs lassen einen direkten Vergleich zum Stationärbetrieb bei niedriger Modulationsstufe zu.

### 3.5 12-TAGES-SYSTEMTEST (STANDARDSYSTEM & OPTIMIERTES SYSTEM)

Der 12-Tages-Systemtest wurde nach dem vom SPF entwickelten CCT-Verfahren durchgeführt [2][3][4]. Dieser Test wurde bereits erfolgreich zur Prüfung von Öl- und Gasfeuerungen in solaren Kombisystemen eingesetzt.

Der 12-Tages-Systemtest deckt charakteristisch die Verhältnisse (Witterung, Warmwasserbedarf, Gebäude-last etc.), welche über ein gesamtes Jahr auftreten, ab. Im Prüfstand werden Pellet-Kessel, Pufferspeicher sowie alle Komponenten der Solaranlage ausser den Kollektoren installiert. In Abbildung 4 ist schematisch dargestellt, welche Komponenten des Systems dynamisch simuliert (Kollektoren, Gebäude, Warmwasserbedarf) und welche Komponenten real im Prüfstand installiert werden (Pellet-Kessel, Pufferspeicher, Solarpumpe und -leitungen sowie alle Elemente der Steuerung u. Regelung). Zapfprofile, Witterungsverhältnisse und entsprechende Gebäudelasten können über die Software des Prüfstandes vorgegeben werden.

Die Rahmenbedingungen für die 12-Tages Simulation (Klima, Gebäude-Geometrie, Heizsystem, Warmwasser-Zapfprofil) sowie für die darauf basierenden Jahres-Simulationen basieren auf den bereits für Kombi-Kompakt+ verwendeten Annahmen [4], welche für das Projekt PelletSolar geringfügig adaptiert wurden. Einen Überblick über die Last-Bedingungen gibt Tabelle 1.

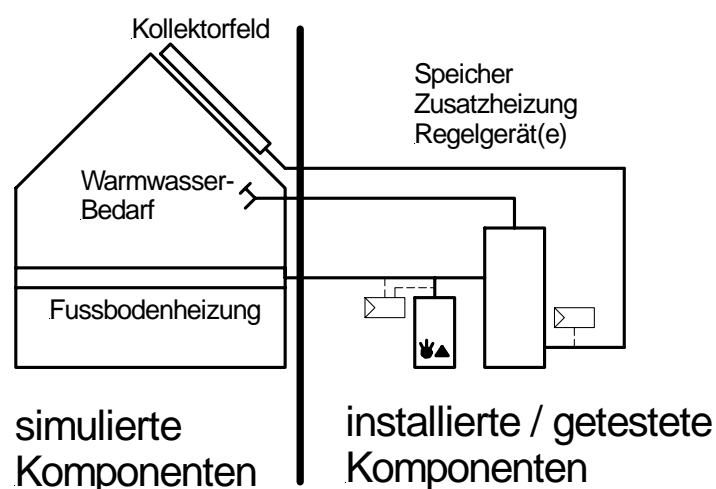


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Prüfumfanges

<b>Klima und Raumwärmebedarf</b>	Das Klima für die Simulation entspricht demjenigen des Schweizerischen Mittel-landes. Die Wärmebedarfscharakteristik entspricht derjenigen eines Einfamilien-hauses mit einer Energiebezugsfläche von 150 m <sup>2</sup> , das mässig bis gut gedämmt ist und keine ausgesprochen hohen passiv solaren Gewinne aufweist. In Bezug auf die thermische Masse liegt das Gebäude zwischen Massiv- und Leichtbau. Der Grundluftwechsel beträgt 0.3 pro Stunde. Steigt die Raumtemperatur über 21 °C, so wird die Luftwechselrate abhängig von Raumtemperatur und Aussen-temperatur erhöht. Die Elektroabwärme beträgt 350 W. Die Personenabwärme entspricht einer sitzenden Person (ISO 7730). Die Fenster werden an Wintertagen nicht beschattet (kein Sonnenschutz). Der Heizenergiebedarf (Nutzwärmebedarf zur Raumheizung) beträgt unter diesen Bedingungen rund 15500 kWh/a, bzw. 103 kWh pro m <sup>2</sup> <sub>EBF</sub> und Jahr.
<b>Heizsystem</b>	Das Heizsystem entspricht einer Fussbodenheizung mit 20 cm Abstand von Rohrmitte zu Rohrmitte und einem Rohr-Aussendurchmesser von 14 mm, einge-bettet in 9 cm Estrich. Unter dem Estrich befindet sich eine Dämmschicht von 3.5 cm Stärke, darüber ein Holzboden von 1 cm Stärke. Die Temperatur des Heiz-kreis-Vorlaufs wird aussentemperaturabhängig geregelt.
<b>Warmwasserbedarf</b>	Der Energiebedarf für Warmwasser entspricht einer typischen Situation eines Ein-familienhauses im Schweizerischen Mittelland. Er beträgt rund 2800 kWh/a bzw. 200 Liter pro Tag. Es wird ein realistischer, d. h. von Tag zu Tag verschiedener Bezug mit jahreszeitlichen Schwankungen des bezogenen Warmwasservolumens angenommen.
<b>Kollektorfeld</b>	Das Kollektorfeld ist nach Süden ausgerichtet. Die Neigung des Kollektorfeldes beträgt 45°.
<b>Speicherraum</b>	Die Speicherumgebungstemperatur beträgt 20°C. Energieverluste des Speichers werden der Raumwärme der beheizten Räume nicht gutgeschrieben.

Tabelle 1: Rahmenbedingungen für die Simulation von Gebäudelast und Warmwasser-Zapfprofil für die Jah-ressimulation, sowie in gekürzter Form für den 12-Tages-Systemtest.

Zum direkten Vergleich der Resultate aus dem 12-Tages-Systemtest werden verschiedene Nutzungsgrade berechnet. Der einfachste System-Nutzungsgrad  $\eta_{S,pe}$  berücksichtigt nur den Energieeintrag durch den Brennstoff Pellets (Formel 4). Bezüglich der Ausnutzung des gesamten thermischen Energieeintrags ist auch der System-Nutzungsgrad unter Berücksichtigung des solaren Energieeintrages relevant  $\eta_{S,pe+so}$  (Formel 5). Der System-Nutzungsgrad  $\eta_{S,pe+el}$  (Formel 8) berücksichtigt die Energie-Einträge durch Pellets und gewichte-te elektrische Hilfsenergie, und gibt damit Auskunft über die Menge nicht-solarer Energie welche im Verhält-nis zur Nutzenergie aufgewendet werden muss. Die Ausnutzung des gesamten Energieeintrags (Pel-lets+Solar+Elektrisch) wird mit  $\eta_{S,pe+so+el}$  (Formel 9) berechnet.

Formel 6: 
$$\eta_{S,pe} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet}}$$

Formel 7: 
$$\eta_{S,pe+so} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + Q_{Solar}}$$

Formel 8: 
$$\eta_{S,pe+el} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + F_{el} \cdot E_{el}}$$

Formel 9: 
$$\eta_{S,pe+so+el} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + Q_{Solar} + F_{el} \cdot E_{el}}$$

### 3.6 MODELLBILDUNG UND SIMULATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES JAHRESNUTZUNGSGRADES

Um aus dem 12-Tages-Systemtest eine Aussage zum Jahresnutzungsgrad der Anlage machen zu können, wurde das gemessene System in einem Modell mit der Simulationssoftware TRNSYS abgebildet [9]. Mit dem Modell wurde das vermessene System mit Simulationsrechnungen nachgerechnet und mit einem Optimierungsverfahren<sup>2</sup> wurden Messung und Modell miteinander abgeglichen. Das TRNSYS-Modell ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Das Modell für den Pellet-Kessel wurde am SPF auf der Basis von Resultaten aus diesem Projekt sowie aus dem Projekt KombiKompakt+ entwickelt und programmiert [16].

In einem nächsten Schritt wurde das Modell dazu verwendet, das Verhalten von weiteren Systemvarianten zu berechnen. Simulationsrechnungen haben gegenüber der Messung den Vorteil, dass mit einem verhältnismässig geringem Zeit- und Arbeitsaufwand neue Konzepte und Varianten bewertet werden können. In Abbildung 6 ist das Modell für ein Referenzsystem ohne Solaranlage und ohne Speicher dargestellt. Dieses Modell wurde für die Simulation der Variante V-0 (siehe Tabelle 7) verwendet.

Zur Bewertung der durch die Solaranlage oder andere Massnahmen zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs erzielten Einsparungen werden zwei im Task 26 des International Energy Agency Solar Heating & Cooling Programms vorgeschlagene Kennzahlen verwendet [14]. Diese sind im folgenden Beschrieben:

Die **fractional thermal energy savings**  $f_{sav,therm}$  geben Auskunft darüber, welcher Prozentsatz des einzusparenden Brennstoffs durchs eine Massnahme am System (zum Beispiel die Solaranlage oder verbesserte Isolation) eingespart werden kann gegenüber einem Referenzsystem. Formel 10 zeigt die Berechnung der fractional thermal energy savings für den Fall, dass der einzusparende Brennstoff Holzpellets sind.

$$\text{Formel 10: } f_{sav,therm} = 1 - \frac{Q_{Pellet}}{Q_{Pellet,ref}}$$

Welchen Prozentsatz an Energie eingespart werden kann, wenn zusätzlich zum Heizwert des Brennstoffs auch der Bedarf an elektrischer Energie berücksichtigt wird, drücken die **extended fractional energy savings**  $f_{sav,ext}$  aus (Formel 11). In dieser Formel wird der elektrische Bedarf mit einem Gewichtungsfaktor (hier  $F_{el} = 3$ ) multipliziert, der einerseits die Verluste bei der Umwandlung von Primärenergie in Strom im europäischen Kraftwerkspark und Übertragungsverluste bis zum Ort des Verbrauchers berücksichtigt, als auch durch den höheren Preis von elektrischer Energie gegenüber Holzpellets gerechtfertigt ist (vgl. Fussnote 7).

$$\text{Formel 11: } f_{sav,ext} = 1 - \frac{Q_{Pellet} + F_{el} \cdot E_{el}}{Q_{Pellet,ref} + F_{el} \cdot E_{el,ref}}$$

---

<sup>2</sup> Optimierungsprogramm Genopt; Algorithmus Hooke Jeeves.

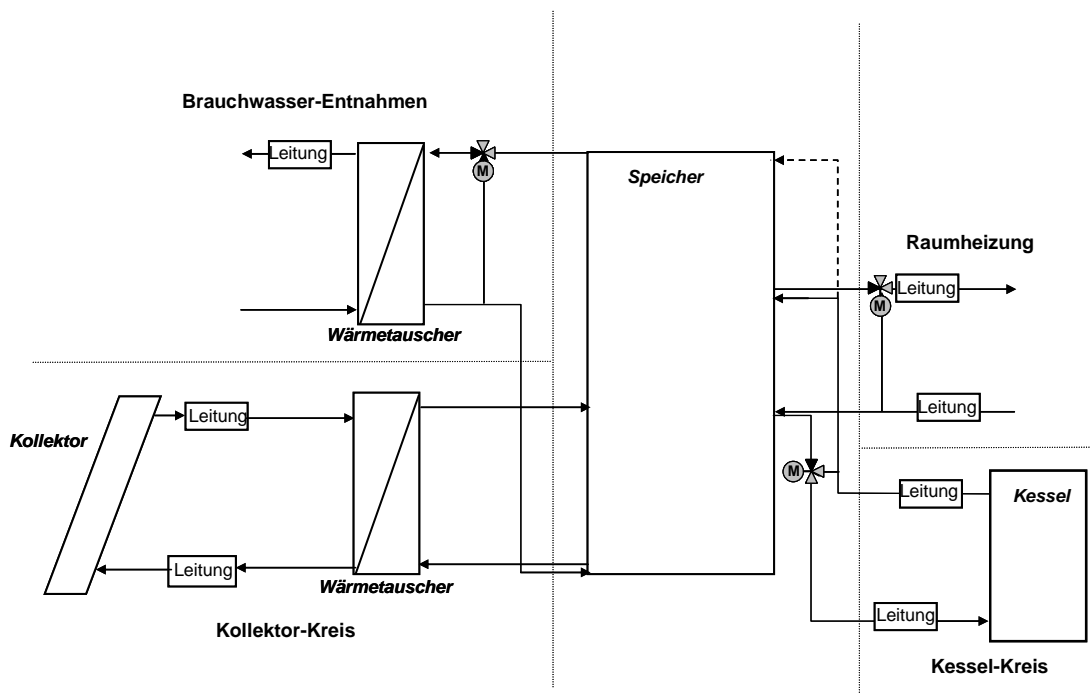


Abbildung 5: Schematische Darstellung des Simulationsmodells zur Abbildung des geprüften Systems in TRNSYS

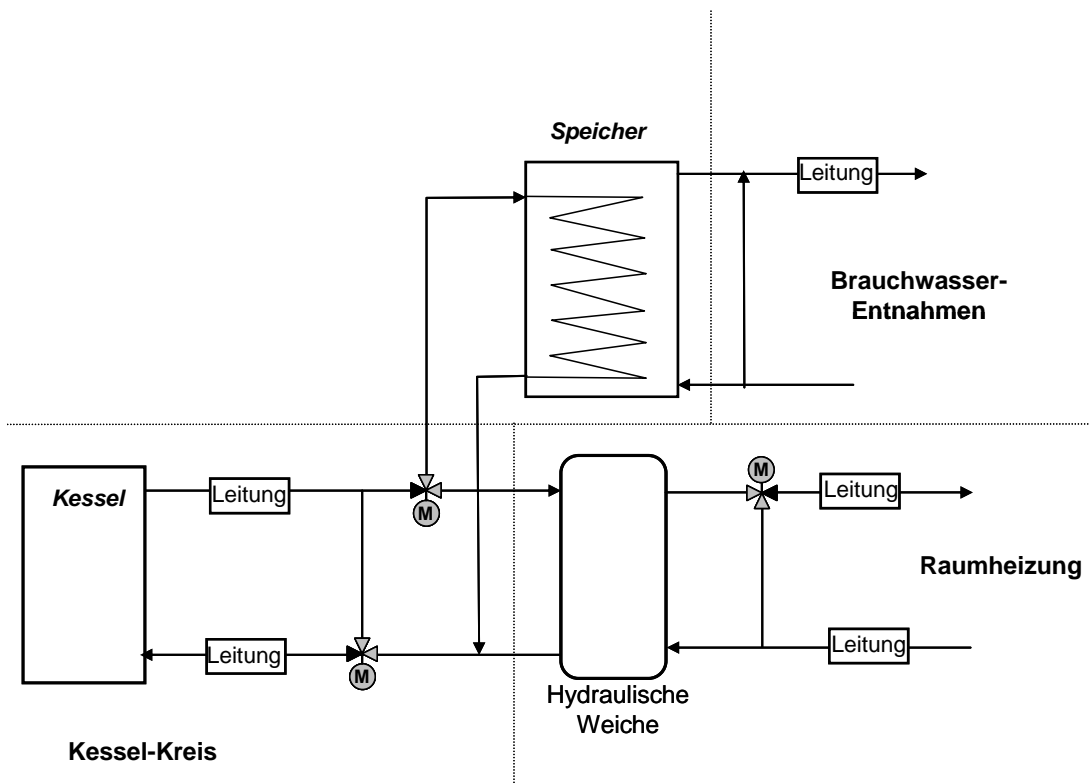


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Simulationsmodells für das Referenzsystem ohne Solaranlage

### 3.7 MESSTELLENVERZEICHNIS UND UNSICHERHEITSRECHNUNG

In Abbildung 7 ist der Prüfstand schematisch inklusive den einzelnen Messstellen dargestellt. Die einzelnen Messpunkte werden nachfolgend in Tabelle 2 beschrieben.

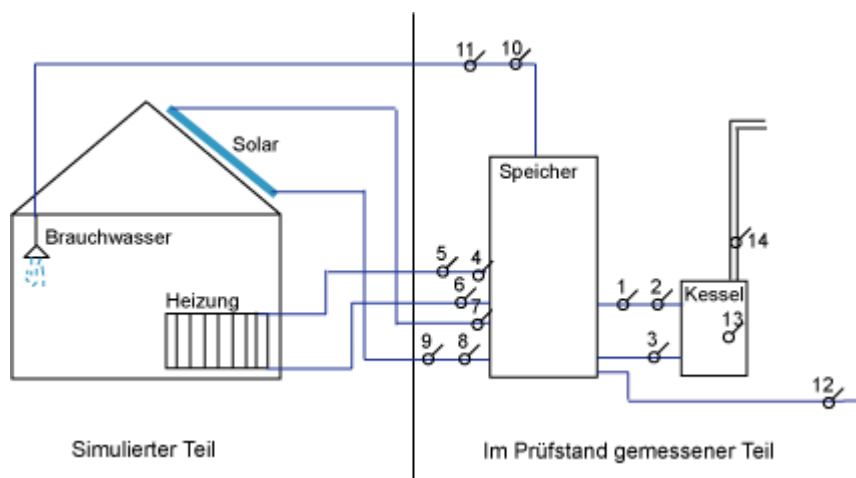


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Prüfstands mit Messstellenverzeichnis (vgl. Tabelle 2).

Nr.	Messgrösse	Messstelle	Einheit
1	Temperatur	Vorlauf Kessel	°C
2	Durchfluss	Vorlauf Kessel	l/h
3	Temperatur	Rücklauf Kessel	°C
4	Temperatur	Vorlauf Heizung	°C
5	Durchfluss	Vorlauf Heizung	l/h
6	Temperatur	Rücklauf Heizung	°C
7	Temperatur	Vorlauf Solarkreis	°C
8	Durchfluss	Rücklauf Solarkreis	l/h
9	Temperatur	Rücklauf Solarkreis	°C
10	Temperatur	Brauchwasser-Entnahme	°C
11	Durchfluss	Brauchwasser-Entnahme	l/h
12	Temperatur	Kaltwasser-Zufuhr	°C
13	Masse	Kessel/Pellet-Lager	kg
14a	Temperatur	Abzug Kessel	°C
14b	Konzentration CO	Rauchgas Kessel	ppm
14c	Konzentration O <sub>2</sub>	Rauchgas Kessel	%
14d	Konzentration NO	Rauchgas Kessel	ppm

Tabelle 2: Tabellarische Darstellung der in Abbildung 7 eingezeichneten Messstellen.

### Unsicherheitsabschätzung für Wärmezählung im Kollektor-, Heiz-, Solar- und Brauchwasserkreis:

Generell wird folgende Formel für Berechnung der abgegebenen Wärmeleistung der einzelnen Kreise angewandt:

$$\dot{Q} = \Delta T \cdot c_p \cdot \dot{m}$$

Davon ausgehend, dass die Fehlerfortpflanzung über die Temperaturmessung  $\Delta T$  und die Durchflussmessung  $\dot{m}$  stattfindet und die Unsicherheit der temperaturabhängigen Grösse  $c_p$  vernachlässigt werden kann, wird die folgende vereinfachte Formel für die Fehlerfortpflanzung eines Produktes angewandt:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_1}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_2}{x_2}\right)^2}$$

Bei  $y$  handelt es sich um den gesuchten Endwert und bei den  $x$ -Werten um die Fehlerbehafteten Messgrössen ( $\Delta T, \dot{m}$ ).

Die Abschätzung der Unsicherheit nach oben genannter Methode ergibt einen maximalen Wert von **1.1%**.

### Unsicherheitsabschätzung für eingetragene Pellets-Energie:

Die Quantifizierung der durch die Holzpellets eingetragenen Energie ist mit einer deutlich grösseren Unsicherheit behaftet. Für die einzelnen Messungen wurden Pellet-Proben zur Bestimmung des Heizwertes eingesandt<sup>3</sup>. Die Pellets wurden sowohl während den Messungen wie auch vor der Analyse bei konstanter relativer Luftfeuchte gelagert. Der Heizwert von Pellets kann natürlicherweise aufgrund der Zusammensetzung (Anteil Nadelholz / Laubholz) stark schwanken. Bei einer kleineren Pelletlieferung kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass die Pellets annähernd homogen zusammengesetzt sind. Von jeder Pelletlieferung wurde ein Sample zur Analyse geschickt. Insgesamt wurden im Laufe des Projektes 3 Samples zur Analyse geschickt. Der Heizwert schwankte dabei zwischen 16.34 und 17.21 MJ/kg. Wäre die Annahme der homogenen Zusammensetzung einer Lieferung nicht zutreffend, ergäbe sich aus dieser Schwankung ein maximal möglicher Fehler von rund 5%. Gemäss Aussagen von Experten aus der Holzbranche<sup>4</sup> ist die Annahme der homogenen Zusammensetzung der Lieferung zulässig und wird in der Praxis angewandt, so dass nicht mit dem maximal möglichen Unsicherheitswert von 5% gerechnet werden muss, sondern von einer Annahme bzgl. der Unsicherheit von rund 1-2% ausgegangen werden kann. Der Messfehler der kalibrierten Waage wird vor diesem Hintergrund vernachlässigbar.

---

<sup>3</sup> Analyse von Aschegehalt, Wassergehalt, Brennwert, Heizwert, Elementaranalyse Kohlenstoff, Elementaranalyse Wasserstoff bei Intertek Caleb Brett aus Schlieren.

<sup>4</sup> Th. Nussbaumer, J. Good, Ingenieurbüro Verenum, Zürich

## 4. Ergebnisse

### 4.1 STATIONÄRER PELLET-KESSEL-BETRIEB

Im stationären Betrieb wurde der Kesselwirkungsgrad auf verschiedenen Modulationsstufen und mit verschiedenen Vorlauftemperaturen gemessen. Die Messresultate sind in Tabelle 8 dargestellt.

Es zeigte sich, dass mit einer Abnahme der Heizlast von 10.3 kW auf 4.1 kW auch die Rauchgastemperatur von 119 °C auf 89 °C sinkt, während der Luftüberschuss (Lambda-Wert) gleichzeitig von 2.3 auf 3.6 steigt. Der Einfluss dieser beiden Tendenzen auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad ist gegenläufig, so dass dieser unabhängig von der Modulationsstufe zwischen 91.1% und 92.1% liegt. Der wasserseitig bilanzierte Gesamt-Wirkungsgrad des Kessels wiederum sinkt mit abnehmender Kesselleistung, weil die Konvektions- und Abstrahlverluste des Kessels bei kleinerer Nutzleistung - jedoch gleicher Kesseltemperatur - stärker ins Gewicht fallen. Bei maximaler Kesselleistung fielen die Konvektions- und Abstrahlverluste mit 6.3% der Feuerungsleistung deutlich geringer aus als die feuerungstechnischen Verluste. Bei der kleinsten gemessenen stationären Leistung jedoch näherten sie sich mit 8.3% bereits den feuerungstechnischen Verlusten (9.5%). Somit sank der Kesselwirkungsgrad von 85.6% bei Nennleistung auf 82.5% bei minimaler gemessener Modulationsstufe (4.1 kW).

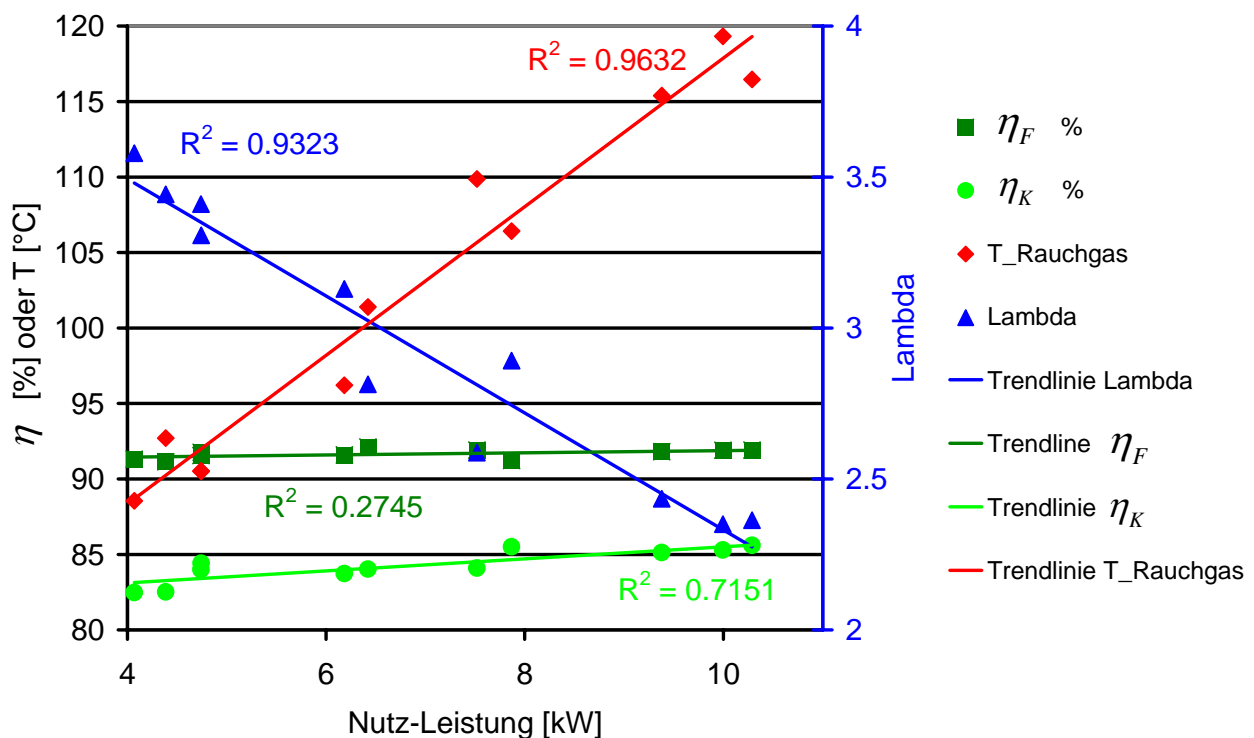


Abbildung 8: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad ( $\eta_F$ ), Kesselwirkungsgrad ( $\eta_K$ ), Rauchgastemperatur ( $T_{\text{Rauchgas}}$ ) und Luftüberschuss (Lambda) bei verschiedenen Modulationsstufen des Kessels im stationären Zustand.

Die Bestimmung der temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste ( $UA_{\text{kessel,AK}}$ ) bei ausgeschaltetem Brenner ergab einen Wert von 6.83 W/K, bei einer thermischen Masse von 87.5 Wh/K. Es zeigte sich, dass der bei eingeschaltetem Brenner gemessene Unterschied zwischen feuerungstechnischem Wirkungsgrad und Kesselwirkungsgrad deutlich höher ist als die auf Grund der Abstrahl- und Konvektionsverluste im ausgeschalteten Zustand berechneten Werte. Die Abweichung korrelierte deutlich mit der Feuerungsleistung ( $R^2 = 0.91$ ). Es wurden die folgenden drei Modelle aufgestellt für die Berechnung der Abstrahl- und Konvektionsverluste bei eingeschaltetem Brenner ( $\dot{Q}_{AK}$ ) und miteinander verglichen (Abbildung 9):

Modell 1:  $\dot{Q}_{AK}$  ist eine lineare Funktion sowohl der Kessel-Übertemperatur als auch der Feuerungsleistung:

$$\text{Formel 12: } \dot{Q}_{AK} = UA_{\text{kessel,AK}} \cdot (T_{\text{kessel}} - T_{\text{Umgebung}}) + q_{AK} \cdot \dot{Q}_{\text{Pellet}}$$

Modell 2:  $\dot{Q}_{AK}$  ist nur eine lineare Funktion der Kessel-Übertemperatur, mit dem im ausgeschalteten Zustand ermittelten Auskühlungskoeffizienten  $UA_{kessel,AK}$ .

Modell 3:  $\dot{Q}_{AK}$  ist nur eine lineare Funktion der Feuerungsleistung

Modell 4:  $\dot{Q}_{AK}$  ist eine lineare Funktion der Kessel-Übertemperatur und eine nicht-lineare Funktion der Feuerungsleistung:

$$\text{Formel 13: } \dot{Q}_{AK} = UA_{kessel,AK} \cdot (T_{kessel} - T_{Umgebung}) + q'_{AK} \cdot \left( \frac{\dot{Q}_{Pellet}}{P_{max}} \right)^n$$

Die in Modell 4 angenommene nicht-lineare Abhängigkeit der Abstrahlungs- und Konvektionsverluste von der Feuerungsleistung führt zwar zu einem kleineren Root-Mean-Square-Error (RMSE) (siehe Abbildung 9), dies wird jedoch erkauft mit der Einführung eines weiteren Fit-Parameters welcher zunächst nicht physikalisch begründet werden kann. Deshalb wird dieses Modell derzeit als Hypothese betrachtet und in den weiteren Berechnungen auf Modell 1 abgestützt. Der Faktor  $q_{AK}$  wurde auf die Messdaten gefittet ( $q_{AK} = 0.0354 \text{ W/W}$  (3.54%)). Der Faktor  $UA_{kessel,AK}$  wurde aus den Kessel-Auskühl-Versuchen bei ausgeschaltetem Brenner ermittelt. Durch das Fitten beider Parameter auf die Messdaten von stationären Betriebszuständen kann der RMSE nicht wesentlich reduziert werden.

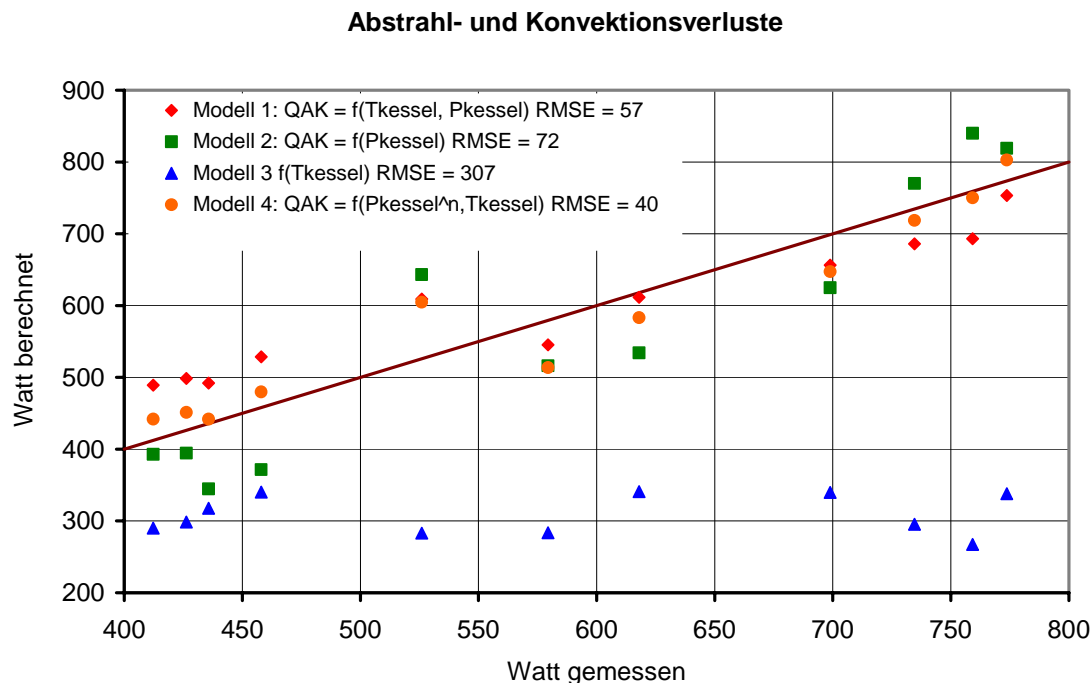


Abbildung 9: Vergleich verschiedener Modelle für die Abstrahl- und Konvektionsverluste. RMSE = Root Mean Square Error

## 4.2 INSTATIONÄRER BETRIEB & VERGLEICHE ZUM STATIONÄREN BETRIEB

Im Folgenden werden die Resultate der Messungen im taktenden Betrieb (TM0-TM2) präsentiert und mit einer Messung im stationären Betrieb (SM0) verglichen.

Die Messungen TM0 und TM1 mit einer Heizlast im Bereich von 1 kW ergaben Nutzungsgrade  $\eta_K$  von unter 65%. Bei der Analyse dieser tiefen Nutzungsgrade wird ersichtlich, dass vor allem die anteilmässig höheren Abstrahlungs- und Konvektionsverluste für diese tiefen Werte verantwortlich sind. Eine weitere Messung im taktenden Betrieb mit einer Nutzleistung von 3 kW (TM2) ergab einen wesentlich höheren Nutzungsgrad von 84 %, der sogar rund 1% höher liegt als der bei vergleichbarer Abnahmeleistung gemessene Nutzungsgrad im Stationärbetrieb (siehe Tabelle 3).

Die Messung TM2 (Taktbetrieb bei einer Leistungsabgabe von 3 kW) lässt sich gut mit dem stationären Betrieb (SM0) vergleichen. Der Kesselnutzungsgrad in diesem Taktbetrieb liegt erstaunlicherweise mit 83.9% rund 1% über dem stationären Betrieb. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die durchschnittlichen Vorlauf-temperaturen der beiden Messreihen deutlich voneinander abweichen. Deshalb wurde ein temperaturbereinigter Nutzungsgrad errechnet (Korrektur der Abstrahl- und Konvektionsverluste auf eine theoretische Vor-



lauftemperatur von 60 °C, Formel 4). Dieser ist für TM0 und TM1 fast identisch, während sich der Unterschied von TM2 auf SSB auf 0.8% verringert.

Bei einer fairen Betrachtung des Nutzungsgrades muss auch der Bedarf an elektrischer Energie für die Zündung, die Ventilatoren und die Kessel-Pumpe berücksichtigt werden (Formel 3). Auf Grund der höheren Wertigkeit von elektrischer Energie gegenüber thermischer Energie wird in dieser Rechnung die elektrische Leistung mit Faktor 3 gewichtet (vergleiche Fussnote 7). Der elektrizitätsbereinigte Nutzungsgrad liegt für den taktenden Betrieb mit 1 kW Leistungsabnahme zwischen 46% und 48%, bei 3 kW zwischen 73% und 77%, wobei hier der stationäre Betrieb auf Grund der eingesparten Zündenergie wesentlich besser abschneidet (+3.6%) als der taktende Betrieb. Führt man gleichzeitig die Temperaturkorrektur durch, dann schneidet der Stationärbetrieb im Vergleich zum taktenden Betrieb noch besser ab.

	TM0	TM1	TM2	SM0
Durchschnittliche Feuerungs-Leistung (Brennstoff-Hu)	1.38 kW	1.61 kW	3.52 kW	3.64 kW
Betriebsart	taktend	taktend	taktend	modulierend
Durchschnittliche abgegebene Leistung (wasserseitig bilanziert) <sup>a</sup>	0.87 kW	1.00 kW	2.95 kW	3.01 kW
Durchschnittliche Kesseltemperatur Vorlauf <sup>a</sup>	65.8 °C	70.8 °C	54.4 °C	61.3 °C
Umgebungstemperatur <sup>a</sup>	20.0 °C	20.0 °C	20.0	20.0 °C
Dauer Brenner ein/ Dauer Brenner aus	53 min ein, 2h 8 min aus	43-54 min ein, 1h52 min aus	1h ein, 1h aus	immer ein
Pumpenbetrieb	durchgehend	durchgehend	10 min. Nachlauf	durchgehend
Nutzungsgrad $\eta_K$ gemessen (Formel 2)	63.3 %	62.3 %	83.9 %	82.8 %
Abstrahl- und Konvektionsverluste <sup>b</sup> $\dot{Q}_{AK}$	28.4 %	29.4 %	7.8 %	8.9 %
Temperaturbereinigter Nutzungsgrad $\eta_{th,tempcorr}$ (Formel 4)	65.6 %	65.2 %	83.6 %	82.8 %
Durchschnittliche gemessene elektrische Leistung	165 W	170 W	172 W	95 W
<b>Elektrizitätsbereinigter Nutzungsgrad <math>\eta_{th+el}</math>, Gewichtung Elektrizität mit Faktor 3 (Formel 3)</b>	<b>46.6 %</b>	<b>47.3 %</b>	<b>73.2 %</b>	<b>76.8 %</b>

Tabelle 3: Messergebnisse der Taktbetriebsmessungen 0-2 (TM0 – TM2), sowie der Stationärmessung (SM0).

<sup>a)</sup> Prüfstand-seitig vier-Leiter Pt100 kalibriert und/oder MID kalibriert

<sup>b)</sup> Unter der Annahme dass  $\dot{Q}_{AK} / \dot{Q}_{Pellet} = \eta_F - \eta_K$ , ( $\eta_F = 91.7\%$ , Mittelwert aus 11 Stationärmessungen)

Für alle 4 in Tabelle 3 aufgeführten Messreihen wurde zudem unter Zuhilfenahme des Modell 1 (Abbildung 9, Formel 12) der Nutzungsgrad basierend auf der durchschnittlichen Feuerungsleistung und der Kessel-Vorlauftemperatur, sowie unter der Annahme eines konstanten feuerungstechnischen Wirkungsgrades von 91.7% berechnet (Tabelle 4).

Die Modellrechnung für die Tieflast-Taktbetriebe TM0 und TM1 ergab einen gegenüber den gemessenen Werten jeweils um 2-4% zu hohen Nutzungsgrad. Eine Hypothese für die verbleibende Differenz zwischen Modell und Messung könnten chemische Verluste bei Start und Stop sowie erhöhte Verluste über den Kamin bei Nachlauf des Rauchgas-Ventilators sein. Jedoch ist aufgrund der relativ geringen Differenz, der involvierten Ungenauigkeiten der Messungen sowie der verwendeten Modelle eine zahlenmässige Abschätzung sol-

cher Verlust-Koeffizienten kaum möglich. Auch steht der Hypothese der Start-Stop-Verluste entgegen, dass die Berechnung für den Taktbetrieb TM2 um 2% tiefer ausfällt als der gemessene Wert.

Für beide Betriebszustände bei 3 kW (TM2 und SM0) ergab die Modellrechnung einen gegenüber den Messungen um 2% zu tiefen Wert. Diese Erkenntnis hat für die Bewertung der nachfolgend beschriebenen Simulationsergebnisse eine Relevanz, da das für die Simulation verwendete Kesselmodell auf diesem Modellansatz basiert.

	TM0	TM1	TM2	SM0
Gemessene Abstrahl- und Konvektionsverluste (siehe Tabelle 8)	28.4 %	29.4 %	7.8 %	8.9 %
Berechnete Abstrahl- und Konvektionsverluste $\dot{Q}_{AK}/\dot{Q}_{Pellet}$ (Formel 12)	26.3 %	25.1 %	10.2 %	11.3 %
Nutzungsgrad $\eta_K$ berechnet <sup>a</sup>	65.4 %	66.6 %	81.5 %	80.4 %
Nutzungsgrad $\eta_K$ gemessen (Formel 2)	63.3 %	62.3 %	83.9 %	82.8 %

Tabelle 4: Vergleich von Mess-Resultaten der Kesseleffizienz mit berechneten Werten auf Grund von Modellen für Abstrahl- und Konvektionsverluste von Taktbetriebsmessung (TM1), Taktbetriebsmessung 2 (TM2) sowie dem Stationär-Betriebs-Messung (SM0).

<sup>a)</sup>  $\eta_K = \eta_F - \dot{Q}_{AK}/\dot{Q}_{Pellet}$ , ( $\eta_F = 91.7\%$ , Mittelwert aus 11 Stationärmessungen)

Der grafische Verlauf von Temperaturen, Modulationsstufe des Kessels und Durchfluss während verschiedenen Messungen (TM1, TM2 und SM0) sind in Abbildung 10 bis Abbildung 12 wiedergegeben. In Abbildung 13 werden die beiden Messungen bei 3 kW Nutzleistung, TM2 (taktend) und SM0 (stationär) gemeinsam präsentiert, was den Vergleich erleichtert. Zusätzlich wird in Abbildung 14 der zeitliche Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme für den Kesselbetrieb (Pumpe, Zündung, Ventilatoren) für die beiden Messreihen TM2 und SM0 dargestellt. Gut ersichtlich sind die Zündphasen im Taktbetrieb TM2. Diese dauern jeweils ca. 15 Minuten und benötigen eine zusätzliche elektrische Leistung von ca. 650 W.

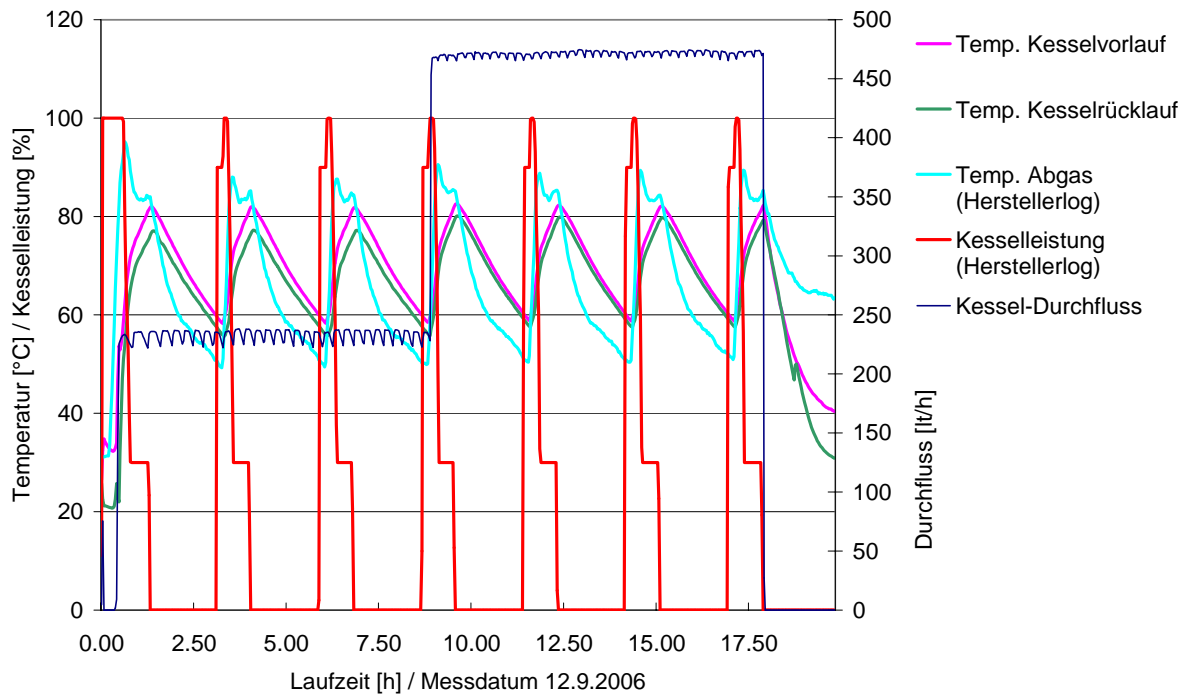


Abbildung 10: Verlauf der Taktbetrieb-Messreihe 1 (TM1)

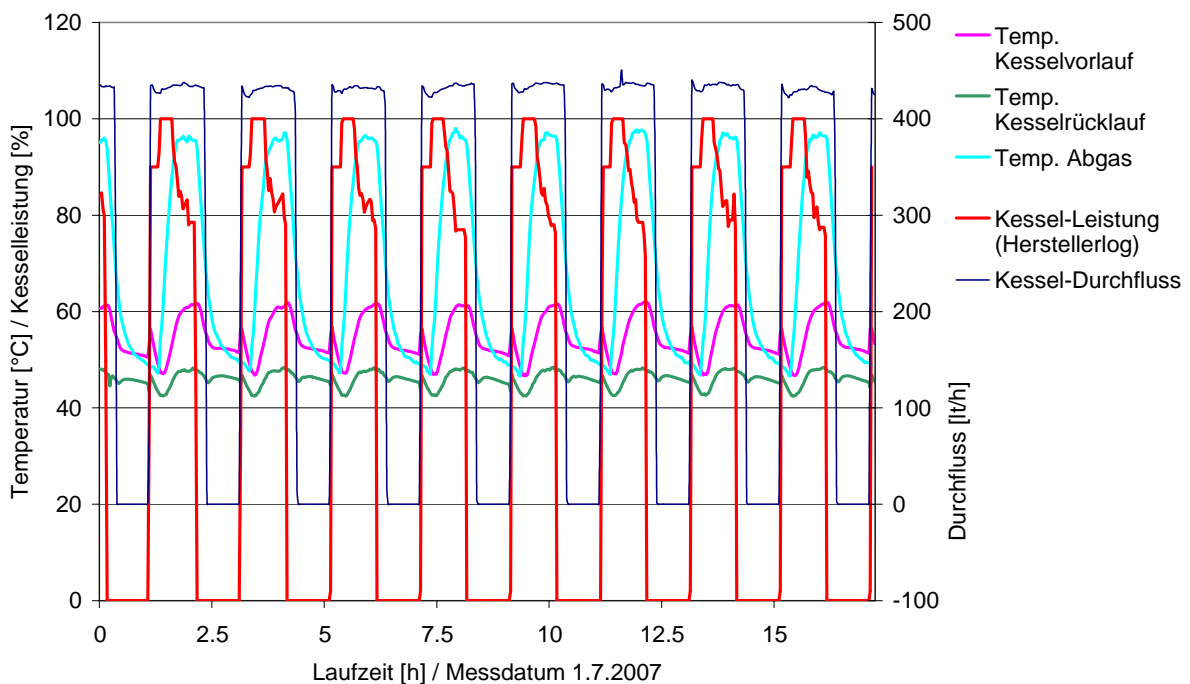


Abbildung 11: Verlauf der Taktbetrieb-Messreihe 2 (TM2)

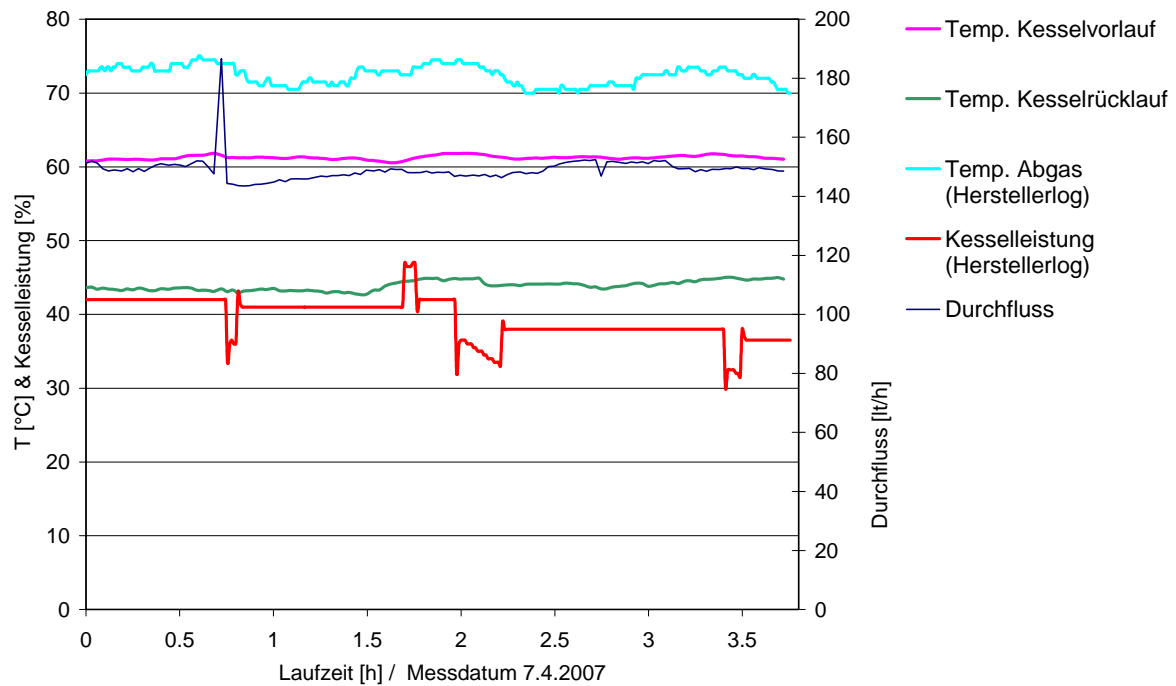


Abbildung 12: Verlauf der Messreihe im stationären Betrieb (SM0) auf tiefer Modulationsstufe

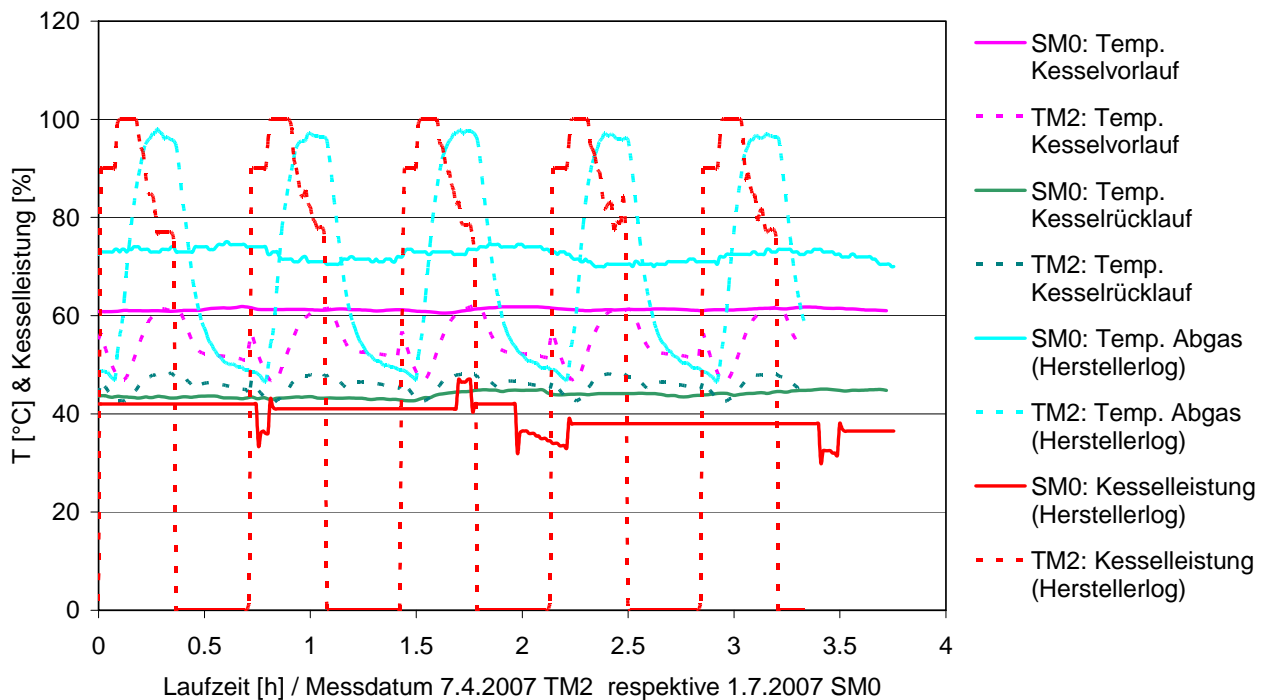


Abbildung 13: Verlauf verschiedener Größen im taktenden Betrieb 2 (TM2) und dem stationären Betrieb (SM0). Die analogen Größen der beiden Betriebsmodi sind jeweils in gleicher Farbe gehalten, wobei die Linie des Taktbetrieb jeweils gestrichelt wiedergegeben ist.

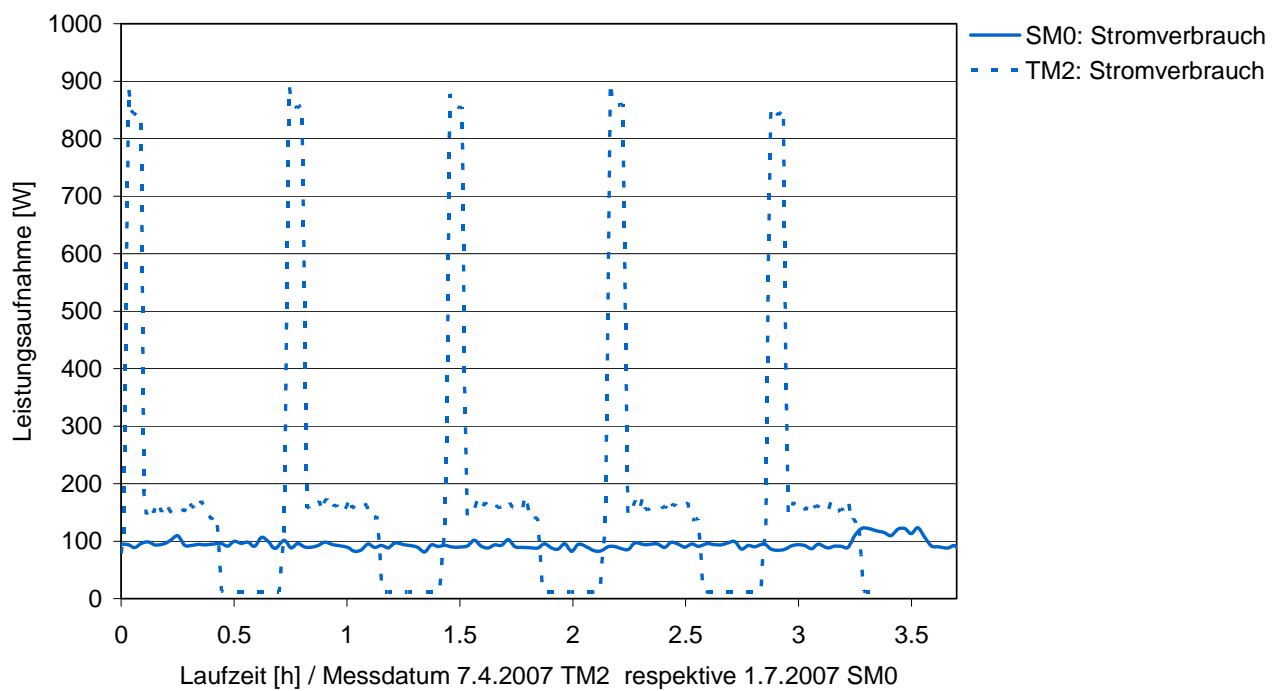


Abbildung 14: Verlauf des Stromverbrauchs von SM0 und TM2. Im Falle des Taktbetriebs TM2 stellt die Pumpe jeweils nach einer 10-minütigen Nachlaufzeit wenn der Brenner ausschaltet ebenfalls aus.

### 4.3 12-TAGES-SYSTEMTESTS

Es wurden zwei 12-Tages-Systemtests nach dem CCT-Verfahren [2] an 10-kW Pellet-Solaranlagen gefahren. Das methodische Vorgehen (simulierte Komponenten, Messaufbau) ist im Kapitel Methodik genauer beschrieben. Bei Systemtest 1 (ST01) handelt es sich um ein System wie es in der Praxis aktuell vom Hersteller eingesetzt wird. Aufgrund der in ST01 gesammelten Erkenntnisse wurde ein zweiter Systemtest (ST02) durchgeführt. Dabei wurde eine Durchflussregelung im Kesselkreislauf eingebaut, um die gesamte Modulationsbreite des Kessels ausnützen zu können.

In den 12-Tages-Systemtests sowie in den darauf basierenden System-Simulationen besteht das simulierte Kollektorfeld aus  $15 \text{ m}^2$  (brutto) verglasten Flachkollektoren mit den Effizienz-Parametern:

- $\eta_0 = 0.724$
- $a_1 = 3.22 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}$
- $a_2 = 0.0079 \text{ W} / \text{m}^2 \text{ K}^2$

Spezifikationen der im Prüfstand aufgebauten Komponenten sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

<i><b>Parameter</b></i>	<i><b>Wert</b></i>
<b>Solarkreis</b>	
Länge Kollektor-Doppelleitung	15 m
Innendurchmesser Kollektorleitung	0.0084 m
Isolationsstärke Kollektorleitung	0.02 m
Durchfluss Kollektorkreis	250 l/h
<b>Kesselkreis</b>	
Leistung Kessel	10 kW
Länge der Doppelleitungen zum Speicher / Heizkreis	2.5 m
Innendurchmesser Doppelleitungen Kessel-Speicher/Heizkreis	0.02 m
Isolation	-
<b>Speicher</b>	
Inhalt	900 liter
Höhe	2 m
Isolationsstärke	0.1 m

Tabelle 5: Parameter der im Prüfstand aufgebauten und geprüften Komponenten des Solarkreises des Kesselkreises und des Speichers, welche sowohl für die Systemtests ST01 und ST02, als auch für die simulierte Systemvariante (V-1) gültig sind.

Abbildung 16 gibt einen Überblick über die Energie-Einträge und Energie-Bezüge welche in den beiden Systemtests ST01 und ST02 stattgefunden haben. In Abbildung 17 bis Abbildung 19 werden Pellets-Verbrauch, Kollektoreintrag und mittlere Speichertemperatur aufgeteilt nach den einzelnen 12 Testtagen der beiden Systemtests wiedergegeben. Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während im adaptierten System (ST02) der Kessel auf die minimale Modulationsstufe herunterfährt und die maximal mögliche Laufzeit von 6 Stunden erreicht, erreicht im Basis-System (ST01) der Kessel die minimale Modulationsstufe deutlich nicht und die Brennerlaufzeit ist entsprechend kürzer (vgl. Abbildung 15).
- Die Anzahl Brenner-Starts konnte aufgrund der eingebauten Durchflussregelung deutlich von 36 (ST01) auf 24 (ST02) reduziert werden. Es wurden jeweils die maximalen Laufzeiten von 6 Stunden erreicht. Nach diesen 6 Stunden ist der Brenner jeweils gezwungen für die automatische Brennertopfreinigung kurz abzuschalten (vgl. Abbildung 15). Es ist davon auszugehen, dass ohne diese Zwangsabschaltung die Laufzeiten noch deutlich höher wären. Typische Laufzeiten ohne Durchflussregelung liegen bei ca. 2 Stunden.
- Im Kesseldurchfluss-geregelten ST02 wurden 2.5% (15 kWh) mehr Brennstoff verbraucht als im Basis-Test ST01.
- Die eingebaute Durchflussregelung von ST02 war noch nicht optimal eingestellt, denn es ergaben sich bei einer Leistungsabnahme von über 40% Schwingungen beim Durchfluss und der gefahrenen Leistung.
- Bei ST02 waren auf Grund der geänderten Regelung die durchschnittlichen Temperaturen im Solar-Pellet-Pufferspeicher um 2.2 K höher, der Solarertrag um 4.1% tiefer (-9.1 kWh), die in die (simulierte) Fussbodenheizung abgegebene Energie um 0.6% höher (3.3 kWh), und die gemessene Warmwasserleistung um 1.2% tiefer (-1.1 kWh).
- Der Systemnutzungsgrad  $\eta_{S,pe}$  (Nutzenergie im Verhältnis zur benötigten Pellets-Energie) ist für das Basis-System ST01 geringfügig besser als für das System mit geregelter Kesseldurchfluss. Jedoch ist die Ausnützung der insgesamt eingetragenen thermischen Energie (Solar und Pellets)  $\eta_{S,pe+so}$  bei beiden Systemen fast identisch 75%.
- Berechnet man den Systemnutzungsgrad der beiden Tests inklusive der Sonnenenergie und der 3-fach gewichteten elektrischen Hilfsenergie ( $\eta_{S,pe+so+el}$ ), so ergeben sich für beide Systeme Werte bei 65%. Der Kesseldurchfluss regulierte Test ST02 schneidet hier sogar geringfügig besser ab, da er sowohl durch die Reduktion der Taktzyklen (hohe Zündenergie) wie auch durch die Reduktion der Laufzeit der Solarpumpe (höhere Speichertemperatur, verminderter Solareintrag) weniger elektrische Hilfsenergie benötigt.
- Zur Beurteilung des nicht-solaren Energiebedarfs der Anlage ist der Systemnutzungsgrad unter Berücksichtigung des Brennstoff-Energiebedarfs sowie des 3-fach gewichteten elektrischen Hilfsenergiebedarfs  $\eta_{S,pe+el}$  ausschlaggebend. Dieser Wert liegt bei beiden Systemen nahe an 85%.

	Einheit	ST01	ST02
Energieeintrag Pellets	kWh	611.3	626.3
Energieeintrag Kollektorkreis	kWh	220.3	211.2
Stromverbrauch Pellet-Kessel	kWh	24.2	22.9
Stromverbrauch Solarteil	kWh	14.7	13.6
Energieverbrauch Raumwärme	kWh	528.2	531.4
Energieverbrauch Brauchwasser	kWh	96.1	94.9
Delta Speicherenergieinhalt	kWh	0.7	0.8
Anzahl Starts	-	36	24
Systemnutzungsgrad $\eta_{S,pe+so+el}$	%	65.8%	66.1%
Systemnutzungsgrad $\eta_{S,pe+so}$	%	75.1%	74.8%
<b>Systemnutzungsgrad <math>\eta_{S,pe+el}</math></b>	<b>%</b>	<b>85.8%</b>	<b>85.1%</b>
Systemnutzungsgrad $\eta_{S,pe}$	%	102.1%	100.0%
Speicher Durchschnittstemperatur	°C	47.9	50.1

Tabelle 6: Übersicht der Messergebnisse der beiden durchgeführten 12-Tages-Systemtests; die linke Spalte enthält die Ergebnisse des Systemtests in der Standardkonfiguration (ST01) währenddem in der rechten Spalte die Ergebnisse des Systemtests 2 (ST02) mit der eingebauten Durchflussregelung zur Laufzeitverlängerung wiedergegeben wird.

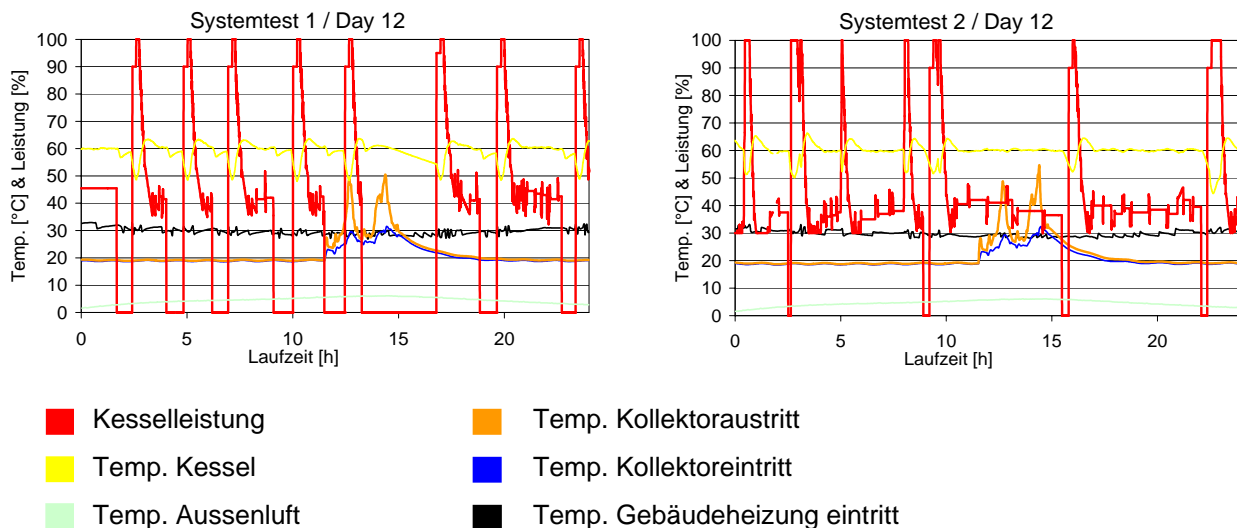


Abbildung 15: Auszug aus dem 12-Tages-Systemtest. Links abgebildet ist Tag 12 des original konfigurierten Systems (ST01) und rechts der 12. Tag des durchflussgeregelten Systems (ST02) mit reduzierten Taktraten.



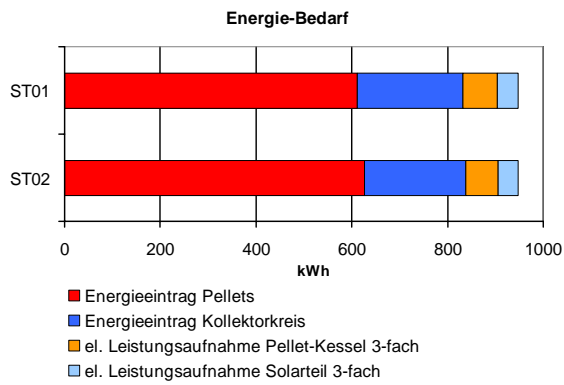


Abbildung 16: Vergleich der Ergebnisse der beiden Systemtests ST01 (Basis) und ST02 (Kessel-Durchflussregelung).

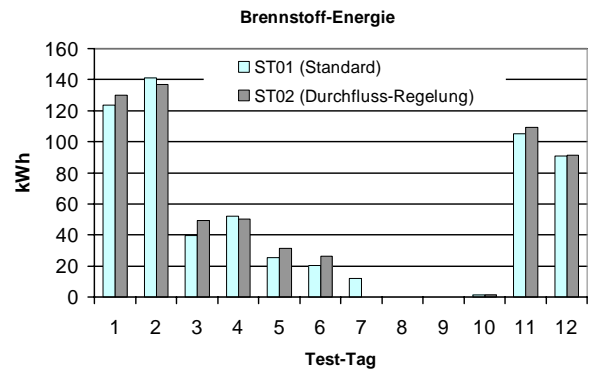


Abbildung 17: Pellets-Energiebedarf an den 12 Testtagen der beiden Systemtests ST01 und ST02.

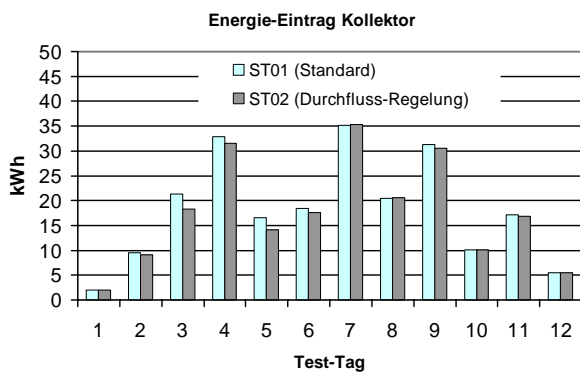


Abbildung 18: Kollektor-Energieeintrag an den 12 Testtagen der beiden Systemtests ST01 und ST02.

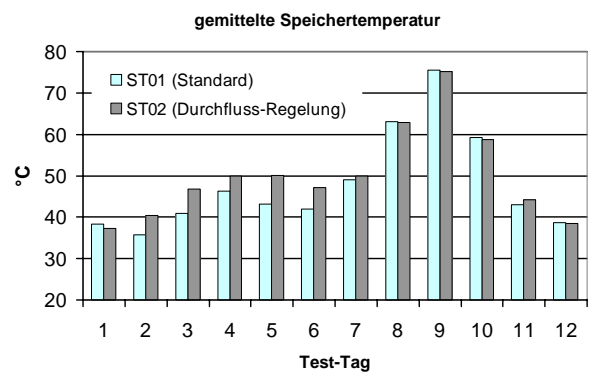


Abbildung 19: Durchschnitts-Speichertemperatur an den 12 Testtagen der beiden Systemtests ST01 und ST02.

#### 4.4 JAHRES-SIMULATIONEN

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden ein Referenzsystem ohne Solaranlage sowie 7 weitere Varianten jeweils in Kombination mit einer Solaranlage simuliert. In Tabelle 7 sind die simulierten System-Varianten beschrieben. Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsrechnungen werden in Abbildung 20 bis Abbildung 29 graphisch wiedergegeben. Die detaillierten Simulationsergebnisse finden sich im Anhang in Tabelle 9 und Tabelle 10.

<b>Variante</b>	<b>Beschrieb</b>
V-0	Referenz-System: Pellet-Heizung ohne Solaranlage. Der Pellet-Kessel versorgt einen 250 Liter Warmwasserspeicher (WW-Speicher) und die Raumheizung erfolgt direkt über eine hydraulische Weiche. Vgl. Abbildung 6. Energieverluste WW-Speicher ca. 650 kWh/a (in Anlehnung an IEA-SHC Task 26)
V-1	Pellet-Solar-System Basis-Variante (basierend auf im Prüfstand gemessenem 10kW-System). Vgl. Abbildung 5.
V-2a	Analog V-1, aber mit Regelung des Kessel-Durchflusses zur Ausnutzung des gesamten Modulationsbereichs
V-2b	Analog V-2a aber ohne steigende Lambda-Werte auf tiefer Modulationsstufe (konstant 2.3, anstatt 2.3 – 3.5, (vergleiche Abbildung 8).
V-3a	Analog V-1, aber mit Isolation der Brauchwasser-Leitung und der Leitung vom Kessel zum Speicher, zudem tief gehaltene Lambda Werte auf 2.3
V-3b	Analog V-3a, aber mit zusätzlich verbesserter Isolation für Kessel und Speicher. Dabei wurde der durch Messungen bestimmte Abstrahlungskoeffizient von 5.76 W/K für den Speicher auf 3.89 W/K reduziert. Für den Kessel wurde der Wert von 5.8 W/K auf 4.17 W/K reduziert.
V-4	Analog V-1, aber mit 20kW-Brenner anstelle des 10kW-Brenners (baugleicher Kessel mit ausgetauschtem Brenner)
V-5	Kombination der beiden Varianten V-2b und V-3b

Tabelle 7: Simulierte System-Varianten im Überblick

#### Simulations-Resultate

V0: Das Referenzsystem ohne Solaranlage hat einen Brennstoffbedarf von 25.9 MWh/a. Der Systemnutzungsgrad liegt bei 71% (Pellets-Energie), respektive bei 61% wenn der elektrische Energiebedarf mit Faktor 3 gewichtet berücksichtigt wird. Der Brenner des Pellet-Kessels erreichte bei dieser Variante 4645 Betriebsstunden und 1468 Takt-Zyklen. Der Kessel-Nutzungsgrad beträgt 80%.

V-1: Die simulierte jährliche Einsparung durch das im Prüfstand vermessene Solarsystem beträgt 27% der Brennstoffenergie ( $f_{sav,therm}$ ), respektive 26% wenn zusätzlich zur Brennstoffenergie auch den elektrischen Bedarf berücksichtigt ( $f_{sav,ext}$ ) wird. Die Brennerlaufzeit reduziert sich gegenüber dem Referenzsystem um 47%, die Brennerstarts um 25%. Die System-Verluste liegen mit der Solaranlage um 20% tiefer, diejenigen Verluste jedoch, welche nicht dem Kessel zuzuordnen sind, liegen auf Grund der höheren Speicherverluste höher als beim Referenzsystem ohne Solaranlage. Eine deutliche Abnahme von Energie-Verlusten kann auch der Leitung zwischen Kessel und Last-Abnehmer (Speicher, Raumheizung) zugeordnet werden.

V-2a: Durch das Einführen einer Regelung des Kessel-Durchflusses verdoppelt sich die Reduktion der Brennerstarts auf 51%, bei gleichzeitig längerer Kessel-Laufzeit. Ein wesentlicher Einfluss auf die Energieeinsparung konnte jedoch mit dem verwendeten Simulations-Modell und den durch Messung zuvor bestimmten Parametern nicht nachgewiesen werden.

V-2b: Eine zusätzliche Verminderung des Luftüberschusses bei geringer Modulationsstufe wirkt sich auf eine Verminderung der feuerungstechnischen Verluste aus, und führt so zu erhöhten Energie-Einsparungen ( $f_{sav,therm}=28\%$ ). Ob diese Verminderung in der Praxis jedoch durchgeführt werden kann, ist aus feuerungstechnischen Gründen (Schadstoffe und Korrosion) fraglich.

V-3a: Alleine durch eine zusätzliche Isolation von Leitungen können die Einsparungen  $f_{sav,therm}$  von 26% auf 30% gesteigert werden.

V3b: Werden zusätzlich zu den Leitungen auch der Kessel und der Speicher besser isoliert, so steigen die Einsparungen auf  $f_{sav,therm} = 31\%$ .

V-4: Wird der 10 kW-Brenner in der Simulation durch einen 20 kW-Brenner ersetzt, so steigt die Anzahl Start-Stop Zyklen gegenüber der Variante V1 um Faktor 2.6. Gleichzeitig vermindert sich die Brennerlaufzeit, und die Einsparungen sinken auf  $f_{sav,therm} = 26\%$ , respektive  $f_{sav,ext} = 22\%$ . Hierbei muss berücksichtigt werden, dass noch erhebliche Unsicherheiten bestehen bezüglich der Modellierung leistungsabhängiger Abstrahl- und Konvektionsverlusten des Kessels, so dass die Simulation eventuell die Kesselverluste bei Einsatz eines grösseren, nicht im Prüfstand vermessenen, Brenners unterschätzt.

V-5: Werden alle Verbesserungsmassnahmen aus den Varianten V2b und V3b im Simulationsmodell abgebildet, so steigen die Energie-Einsparungen auf  $f_{sav,therm} = 32\%$ , respektive  $f_{sav,ext} = 30\%$ .

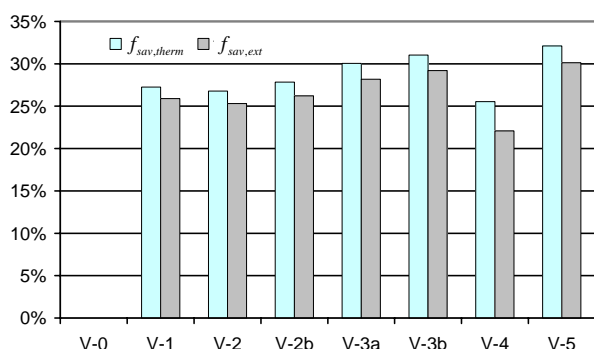


Abbildung 20: Energieeinsparungen der simulierten Varianten, bezogen auf den Energiebedarf des Referenzsystems V-0

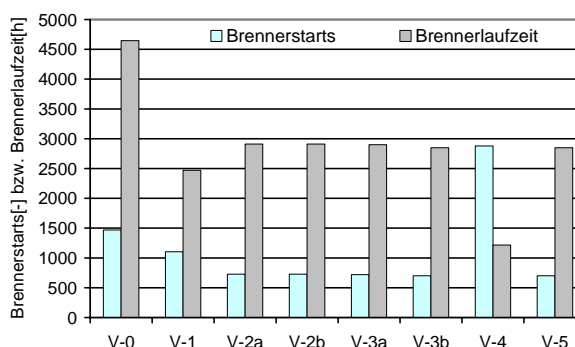


Abbildung 21: Start-Stop-Zyklen und Brennerlaufzeiten der Simulationsvarianten.

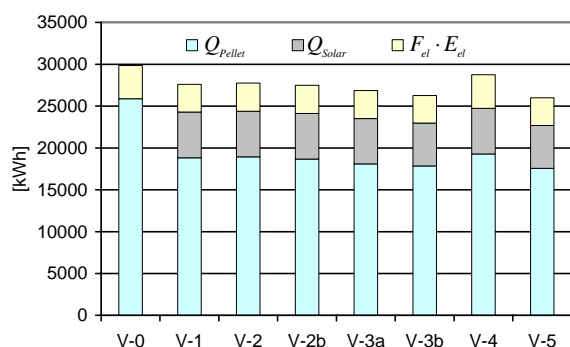


Abbildung 22: Abbildung der ins System eingebrachten Energie Pellets, Solar und elektrische Energie. Letztere wurde mit einer 3-fachen Wertigkeit gewichtet.  $Q_{Solar}$  bezieht sich auf die waserseitig eingetragene Energiemenge.

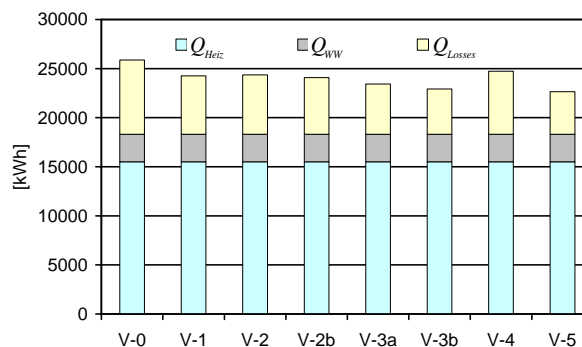


Abbildung 23: Abbildung der Energiesenken Raumheizung, Warmwasser und Verluste.

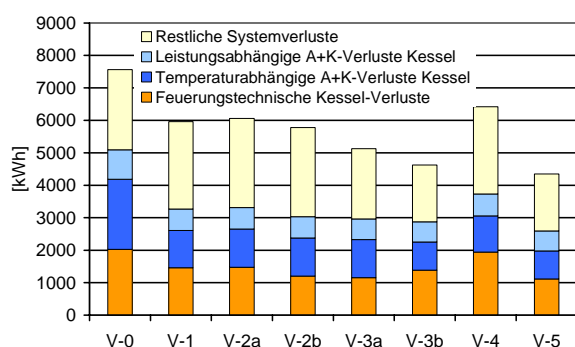


Abbildung 24: Gesamte energetische Verluste der Simulationsvarianten

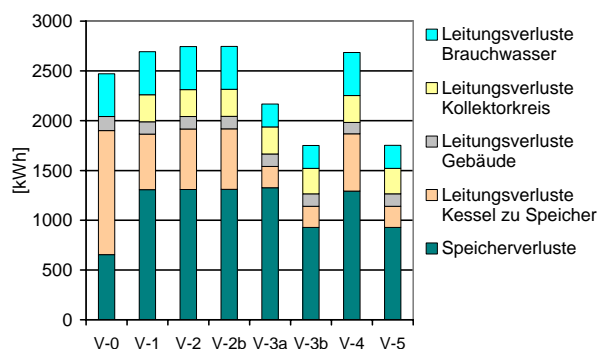


Abbildung 25: Restliche Systemverluste der Simulationsvarianten, einzelnen Leitungen und dem Spei-

cher zugeordnet.

Währenddem in den vorausgehenden Graphiken (Abbildung 20 bis Abbildung 25) jeweils alle insgesamt 8 Simulationsvarianten miteinander verglichen worden sind, werden in den folgenden Darstellungen (Abbildung 26 bis Abbildung 29) nur die beiden Variatnen V-0 (Pellet-Heizung ohne Pufferspeicher und Solaranlage) und V-1 (Pellet-Solar-System wie auf dem Prüfstand installiert) einander gegenübergestellt.

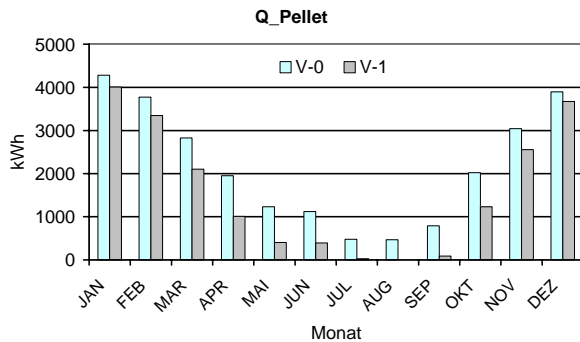


Abbildung 26: Brennstoff-Bedarf übers Jahr ohne und mit Solaranlage

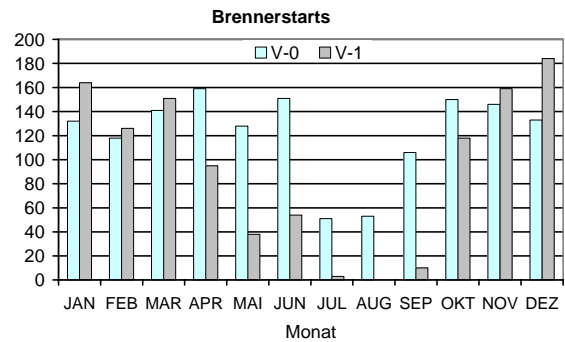


Abbildung 27: Brennerstarts übers Jahr ohne und mit Solaranlage

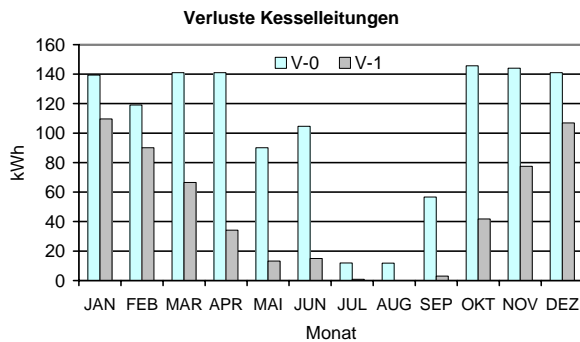


Abbildung 28: Verluste der Kessel-Leitung übers Jahr ohne und mit Solaranlage

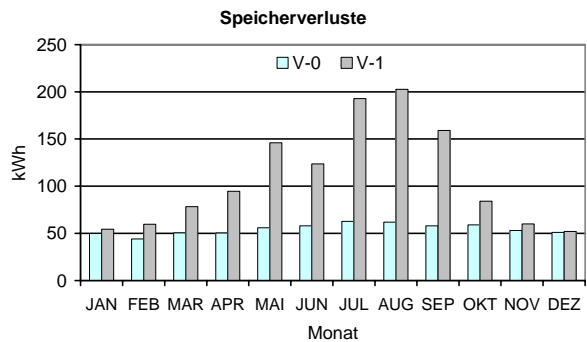


Abbildung 29: Speicher-Verluste übers Jahr ohne und mit Solaranlage

## 5. Diskussion

### 5.1 ABSTRAHL UND KONVEKTIONSVERLUSTE IM STILLSTAND

Die Bestimmung der temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste ( $U_{A_{kessel,AK}}$ ) bei ausgeschaltetem Brenner ergab einen Wert von 6.83 W/K, bei einer thermischen Masse von 87.5 Wh/K. Im Vergleich dazu hat der viel grössere Solarspeicher einen Verlustkoeffizienten von nur 5.76 W/K. Daraus folgt, dass die Verluste des Kessels grösser sind als diejenigen des Solarspeichers, wenn beide dieselbe Temperatur haben. Auf Grund der zusätzlich kleineren thermischen Masse des Kessels kühlt dieser bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C im Stillstand in 3.7 Stunden von 60 °C auf 50 °C ab, während der Solarspeicher für denselben Temperatur-Verlust im Stillstand über zwei Tage braucht.

### 5.2 STATIONÄRER BETRIEB

Die im stationären Betrieb gemessenen Kesselwirkungsgrade liegen in Abhängigkeit der Modulationsstufe zwischen 82.5 und 85.6% Prozent. Im Vergleich zu den über 90%, welche für ein baugleiches Gerät durch die Bundesanstalt für Landtechnik Wieselburg (Österreich) unter Normbedingungen ermittelt wurden, scheint der hier gemessene Wert eher tief. Gemäss Experten der Branche sind die am SPF gemessenen Werte für realistische Installationen und Einstellungen jedoch nicht ungewöhnlich. Im Vergleich zu den Messungen von Wieselburg waren bei den Messungen am SPF die Abgastemperaturen kaum höher, die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas jedoch um ca. 3 Prozentpunkte tiefer. Das heisst der Kessel wurde in Wieselburg mit deutlich tieferem Luftüberschuss geprüft.

Insbesondere im tiefen Modulationsbereich liegen die gemessenen Lambdawerte beim betrachteten Kessel relativ hoch, bei gleichzeitig tieferen Rauchgas-Temperaturen. Beide Werte zeigen eine ausgeprägte Korrelation mit der Feuerungsleistung (vgl. Abbildung 8), und wirken sich mit verschiedenen Vorzeichen auf den feuerungstechnischen Wirkungsgrad aus, so dass dieser unabhängig von der Feuerungsleistung zwischen 91.1% und 92.1% liegt. Da die Betriebsweise auf tiefer Modulationsstufe gerade im Zusammenhang mit der Reduktion der Taktzyklen eine wichtige Rolle spielt, könnten durch eine Reduktion des Luftüberschusses in diesem Bereich Verbesserungen des Wirkungsgrades erzielt werden. Die jährliche Energie-Einsparung, welche sich durch diese Massnahme zusammen mit einer geschickten System-Regelung ergeben würde, wird bei der Diskussion der Simulationsergebnisse genauer betrachtet.

Die Messungen am Pellet-Kessel im stationären Zustand lassen weiter erkennen, dass die Differenz zwischen feuerungstechnischem Wirkungsgrad und Kesselwirkungsgrad nicht allein durch die Abstrahlungs- und Konvektionsverluste des Kessels erklärt werden können, welche im Stillstand gemessen wurden (vgl. Abbildung 9). Die Differenz zeigt eine starke Abhängigkeit von der Feuerungsleistung, weshalb zusätzlich zu den temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverlusten für die Modellbildung Verluste eingefügt werden mussten, welche linear von der Feuerungsleistung abhängig sind. In diesen Verlusten können jedoch auch eventuelle Ungenauigkeiten der Kenntnis des Heizwertes sowie Ascheverluste enthalten sein, weshalb der absolute Wert mit Vorsicht zu geniessen ist. Dass die Verluste an die Umgebung während dem Betrieb in der Regel wesentlich höher sind als im Stillstand wurde bereits von anderen Autoren beschrieben [15], und kann eine Folge sein von Kesseloberflächen, welche in direktem thermischen Kontakt zur Brennkammer stehen. Ob diese Verluste eine lineare Funktion der Feuerungsleistung sind oder besser durch eine andere Funktion (zum Beispiel Modell 4, Formel 13) beschrieben werden, kann mit dieser Studie an einem einzelnen Kessel nicht abschliessend geklärt werden.

### 5.3 INSTATIONÄRER / TAKTENDER BETRIEB

Der Vergleich der Messungen TM2 und SM01 zeigt, dass die Kessel-Nutzungsgrade von stationärem und instationärem Betrieb bei gleicher abgegebener Nutzleistung in der gleichen Grössenordnung liegen. Berücksichtigt man jedoch bei der Berechnung des Wirkungsgrades den Input elektrischer Hilfsenergie, so ergibt sich auf Grund der wesentlich geringeren elektrischen Leistungsaufnahme ein klarer energetischer Vorteil von 3.6 Prozentpunkten für den stationären Modulationsbetrieb (76.8% gegenüber 73.2% bei ca. 3 kW Nutzleistung). Auffällig ist die Verschlechterung des Wirkungsgrades generell, wenn bei geringer thermischer Leistungsabnahme der elektrische Hilfsenergiebedarf (Pumpe, Zündung, Ventilator) mit einem Faktor 3 (höhere Wertigkeit elektrischer Energie) berücksichtigt wird. Dieser Wirkungsgrad  $\eta_{K,pe+el}$  liegt bei 1 kW Nutzleistung nur noch bei 47%, gegenüber 65% ohne Berücksichtigung des Bedarfs an elektrischer Energie.

Bei Projektbeginn ging man davon aus, dass im stationären Betrieb gegenüber dem taktenden Betrieb bei gleicher Heizlast deutlich weniger Pellets verbraucht würden. Dies auf Grund der Überlegung, dass erhöhte bei Start- und Stop des Abbrandes erhöhte chemische Verluste auftreten würden, und in den Phasen ohne Abbrand Auskühlverluste negative Auswirkungen hätten. Diese Erwartung konnte so nicht bestätigt werden. Bei der Betrachtung der beiden Betriebsarten lässt sich erkennen, dass die durchschnittliche Kesseltemperatur im gemessenen Taktbetrieb um ganze 12°C tiefer lag als im Stationärbetrieb, was gegen die Theorie er-

höherer Abstrahlungs- und Konvektionsverluste im Taktbetrieb spricht. Dieser Umstand und eventuell auch die Tatsache, dass bei Start des Kessels die Rauchgastemperaturen erst einmal tiefer sind als im Stationärzustand, scheinen erhöhte chemische Verluste, sofern sie wirklich in relevantem Ausmass auftreten, weitgehend zu kompensieren. Die tiefere durchschnittliche Kesseltemperatur beim Taktbetrieb ist darauf zurückzuführen, dass sich der Wasserkörper bei Brenner-Stillstand auf ca. 40° abkühlt (10-minütige Nachlaufzeit der Pumpe).

Das anhand der Stationärmessungen und des Auskühltests kalibrierte Modell zur Abschätzung der Kessel-Nutzungsgrade im Taktbetrieb erzielte Werte, welche von den gemessenen Werten um 2.1 – 4.3 Prozentpunkte abweichen (vgl. Tabelle 4). Da die Abweichung nicht immer mit demselben Vorzeichen auftritt, erscheint das Einführen eines zusätzlichen Verlustfaktors für den Taktbetrieb nicht gerechtfertigt.

Neben der energetischen Betrachtung muss der Taktbetrieb auch unter dem Aspekt des verstärkten Emissionsausstosses betrachtet werden. Dieses Thema war nicht expliziter Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Studien, welche an anderen Forschungsstätten gemacht worden sind, weisen jedoch darauf hin, dass die Werte für CO und HC in der Start und Stop-Phase um ein Vielfaches höher liegen als im stationären Betrieb [1][6][7][8]. Im Rahmen einer Arbeit an der TU Graz [1] wurden an einem Pellet-Kessel mit 10kW zusätzliche Emissionen pro Taktzyklus von 8624mg CO und 451mg HC nachgewiesen. In der erwähnten Studie hatte dies zur Folge, dass alleine durch das Einführen eines Pufferspeichers welcher die Takt-Zyklen reduziert die CO-Emissionen um 70% gesenkt werden konnten (Simulationsrechnung). Nussbaumer und Klippel untersuchten den Einfluss von Verbrennungsphasen von Stückholzfeuerungen auf Feinstaubemissionen [11]. Auch hier konnte nachgewiesen werden, dass die Feinstaubkonzentration in der Anfahrphase sehr hoch liegt und einen Einfluss auf die gesamthaft ausgestossene Menge an Feinstaub hat. Deshalb ist in jedem Falle eine Verminderung der Taktzyklen auch auf Grund des Emissionsverhaltens anzustreben. Zudem kann vermutet werden, dass sich übermässiges Takten negativ auf die Lebensdauer des Kessels auswirkt.

## 5.4 12-TAGES-SYSTEMTESTS

Es wurden zwei komplette 12-Tages-Systemtest nach der CCT-Methode [2] durchgeführt. Einmal wurde das System in seiner Standardkonfiguration wie es im Feld installiert wird getestet (ST01). Beim zweiten 12-Tages-Systemtest wurde zur besseren Ausnutzung der gesamten Modulationsbreite eine Durchflussregelung im Kesselkreis implementiert (ST02). Das um die Durchflussregelung erweiterte Pellet-Solar-System hat die Anzahl Taktzyklen deutlich von 36 auf 24 reduziert – jedoch wurde die erhoffte gleichzeitige Verbesserung der energetischen Effizienz im Test nicht erreicht.

In Abbildung 15 ist der Verlauf für die beiden Systemtests an einem Tag mit relativ moderaten Aussentemperaturen dargestellt. Währenddem Systemtest 2 auf die minimale Modulationsstufe heruntermoduliert und die maximal mögliche Laufzeit von 6 Stunden erreicht ist in Systemtest 1 die minimale Modulationsstufe deutlich höher und die Brennerlaufzeit deutlich kürzer. Gemäss Aussage des Herstellers seien jedoch bereits die Laufzeiten des Systemtests 1 in der Grössenordnung von rund 2 Stunden bereits positiv zu werten, da Anlagen im Feld häufig deutlich kürzerer Intervallzeiten aufweisen. In Abbildung 15 ist nicht ersichtlich, dass beim Systemtest 2 mit der eingebauten Durchflussregelung noch kein optimaler Betrieb erreicht wurde, da sowohl Durchfluss wie auch Leistung bei Leistungsabnahmen grösser 40% zu schwingen begannen.

Der grösste Anteil der insgesamt leicht schlechteren Performance des zweiten Systemtests mit Durchflussregelung ist auf einen verminderten Solarertrag zurückzuführen (9.1 von 15 kWh). Aus den Grafiken, welche die einzelnen Testtage zeigen, ist ersichtlich, dass der in Systemtest 2 verminderte Solareintrag insbesondere an jenen Tagen zu verzeichnen war, an welchen auch der Kessel betrieben wurde und die Speichertemperaturen auf Grund des geänderten Kesselbetriebes gegenüber dem ersten Systemtest erhöht waren (Abbildung 17 bis Abbildung 19). Die Tage 7-10 jedoch weisen keinen oder kaum Kesselbetrieb auf, haben praktisch keine erhöhten Speichertemperaturen und infolgedessen auch kaum verminderten Solarertrag.

Die auf Grund der geänderten Kesselregelung herbeigeführten höheren Speichertemperaturen mögen zwar mit durchschnittlich 2.2 K gering erscheinen, man muss jedoch bedenken, dass es sich dabei um einen Mittelwert über den ganzen Speicher handelt, und sich insbesondere im mittleren Teil des Speichers durchaus höhere Differenzen ergeben haben. Zusätzlich zu einer Verminderung des Solarertrages haben die höheren Speichertemperaturen zur Folge, dass die Speicherverluste steigen. Mit der zuvor für diesen Speicher ermittelten Wärmeverlustrate kann man abschätzen, dass hier weitere 3.7 kWh verloren gegangen sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Laufzeitverlängerung durch Durchflussregelung unter den hier gegebenen Rahmenbedingungen energetisch nur dann einen Vorteil bringen kann, wenn es gelingt die Regelung dahingehend zu verbessern, dass die Speichertemperaturen tief bleiben. Einen klar positiven Effekt hat die Massnahme jedoch auf das Kesseltakten, was wiederum im Hinblick auf die Verringerung von Schadstoff-Emissionen positiv zu werten ist.

Eine grundsätzlich andere Art der Laufzeitverlängerung besteht darin, dass man den Kessel auch ohne aktuellen Leistungsbedarf laufen lässt, und die überschüssig produzierte Energie zwischenzeitlich in den Pufferspeicher abführt. Vor allem bei Systemen mit geringem Wärmebedarf ist hier abzuwägen, in welchem Masse eine Verminderung von Start-Stop-Zyklen und Emissionen mit erhöhten Speicherverlusten erkauft werden sollen.

Aktuell läuft am SPF ein dritter 12-Tages-Systemtest, bei welchem der Pellet-Kessel nicht über den Pufferspeicher, sondern direkt in den Heizkreis fährt. Hierdurch hat der Kessel eine direktere Rückmeldung des Heizsystems und kann somit seine Modulation besser in Abhängigkeit der Heizlast steuern, jedoch ist zu befürchten, dass der Anteil Solarenergie an der gelieferten Nutzwärme durch die Trennung dieser beiden Kreisläufe niedriger ausfallen wird. Es bleibt abzuwarten, inwiefern sich Vor- und Nachteile dieser Systemkonfiguration auswirken.

## 5.5 JAHRES-SIMULATIONEN

Mit der Simulationssoftware TRNSYS wurde ein Modell für ein Energiesystem erstellt, in welchem der geprüfte Kessel ohne Solaranlage und ohne Pufferspeicher direkt einen 250 Liter Warmwasser-Speicher lädt oder über eine hydraulische Weiche in den Heizkreis fährt (Variante V-0, Abbildung 6). Die im Modell über das Jahr auftretende Energieabnahme entspricht dabei typischen Lastbedingungen eines Einfamilienhauses im Schweizer Mittelland (Tabelle 1). Für das im 12-Tages-Systemtest geprüfte Pellet-Solar-System wurde ebenfalls ein Modell erstellt, (Variante V-1, Abbildung 5), und die Resultate dieser Jahressimulation mit dem Referenzsystem ohne Solaranlage verglichen. Weiter wurde das Modell dazu verwendet, Varianten des Pellet-Solar-Systems zu simulieren, welche sich im Hinblick auf einen oder mehrer Parameter gegenüber dem im Prüfstand vermessenen System unterscheiden (Tabelle 7).

### ***Pellet-Heizung ohne Solaranlage und ohne Pufferspeicher***

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass im Einsatz unter realistischen Bedingungen in einem Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland mit einem Heizenergiebedarf von 100 kWh/a m<sup>2</sup> EBF und 150 m<sup>2</sup> Energiebezugsfläche bei einem kleinen marktüblichen Pellet-Kessel von 10 kW Nennleistung mit einem Kessel-Nutzungsgrad von ca. 80% gerechnet werden kann (V-0, ohne Solaranlage, 250 Liter Warmwasserspeicher und direkte Raumwärmeversorgung über eine hydraulische Weiche), wobei im Gegensatz zum Stationärbetrieb die Abstrahl- und Konvektionsverluste grösser sind als die feuerungstechnischen Verluste. Bei der Betrachtung des Nutzungsgrads ist weiter zu beachten, dass bei Neubauten mit deutlich besserer Isolation und entsprechend weniger Energiebedarf (insbesondere bei Objekten nach Minergie-Standard) mit im Verhältnis zur abgegebenen Leistung wesentlich höheren Abstrahl- und Konvektionsverlusten zu rechnen ist, was den Nutzungsgrad massiv verschlechtert. Wie bereits erwähnt sinkt bei 1 kW Leistungsabnahme der Kessel-Nutzungsgrad in den Bereich von 75%, und gar auf unter 50% wenn man den elektrischen Energiebedarf mit Faktor 3 berücksichtigt. Ohne Solaranlage erreicht der Kessel unter den angenommenen Rahmenbedingungen (das heisst unter anderem ohne Pufferspeicher) 1468 Takt-Zyklen pro Jahr. Auch hier ist zu erwarten, dass bei Objekten mit niedrigerem Energiebedarf oder mit überdimensioniertem Kessel die Taktzyklen noch wesentlich höher liegen. Während der Kessel-Nutzungsgrad 80% betrug, lag der errechnete System-Wirkungsgrad lediglich bei 61% ( $\eta_{S,pe+so+el}$ ). Darin enthalten sind die Systemverluste sowie die gewichtete elektrische Hilfsenergie.

### ***Pellet-Solar-System analog dem installierten und vermessenen System***

Die Jahres-Simulation des im Prüfstand getesteten Systems ergab, dass diese Kombination mit einer Solaranlage 27% des Brennstoffs einspart (V-1). Die Brennstoff-Einsparung fällt sogar um 29% höher aus als die vom Kollektor eingebrachte Solarenergie, obwohl von der eingebrachten Solarenergie ein Teil über die Kollektorleitungs- und Speicher-Verluste wieder verloren geht. Die Gründe dafür sind im Jahres-Nutzungsgrad des Kessels zu suchen, der dafür verantwortlich ist, dass für 1 kWh Nutzenergie 1.25 kWh Brennstoff-Energie aufgewendet werden müssen. Zudem wird der Jahres-Nutzungsgrad des Kessels durch die Solaranlage positiv beeinflusst und steigt auf 83%. Dies wiederum ist bedingt durch die Tatsache, dass der Kessel im Sommer kaum noch Brauchwarmwasser nachheizen muss, und in den Übergangsperioden im Herbst und im Frühling die Solaranlage einen Teil der tiefen Raumheizlasten abdeckt, welche ansonsten einen besonders ineffizienten Betrieb des Kessels gefordert hätten. Dieser Sachverhalt wird illustriert durch Abbildung 26 und Abbildung 30 und stimmt mit Befunden anderer Autoren [7] [17] überein.

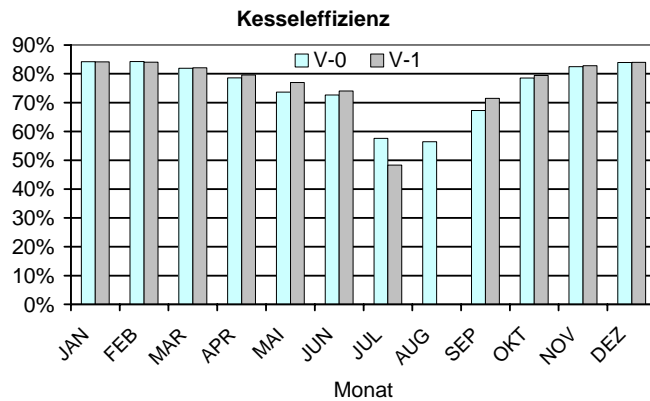


Abbildung 30: Kessel-Nutzungsgrad der beiden Simulations-Varianten V-0 (ohne Solaranlage) und V-1 (mit Solaranlage) über das Jahr.

Die geringere Kesseleffizienz für die Variante V-1 im Monat Juli erstaunt auf den ersten Blick, sie ist jedoch im Zusammenhang mit der im Vergleich zu V-0 um Faktor 20 geringeren Energiemenge zu sehen, welche durch den Kessel in diesem Monat ins System eingebracht wurde. Gleichzeitig ist der Bedarf an elektrischer Energie für das Pellet-Solar-System um 17% geringer als bei der Referenzanlage ohne Solarsystem, weil der zusätzliche Energieaufwand für die Solarpumpe durch die Reduktion von Brennerzündungen sowie der Laufzeit-Reduktion von Kesselpumpe und Abgas-Ventilator(en) mehr als kompensiert wird.

Die Takt-Zyklen des Kessels wurden durch die Standard-Solar-Variante V-1 um 25% verringert, bei gleichzeitiger Reduktion der Brennerlaufzeit um 47%. Daraus lässt sich ableiten, dass im Schnitt die Einschaltdauer des Kessels abgenommen haben muss. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Kesselregelung nicht optimal auf das Zusammenspiel mit Pufferspeicher und Solaranlage reagiert, und öfter als nötig taktet.

### **Simulationen weiterer Systemvarianten**

In der Variante V-2a wird der Kessel-Durchfluss geregelt, um die gesamte Modulationsbreite besser ausnützen zu können. Durch diese Massnahme kann eine Reduktion der Takt-Zyklen von 34% gegenüber der Standard-Solar-Variante V-1 erzielt werden. Im Vergleich zum Referenzsystem ohne Solaranlage (V-0) reduzieren sich die Takt-Zyklen um 51%. Gleichzeitig konnte jedoch die erhoffte Brennstoff-Einsparung gegenüber V-1 nicht erreicht werden, da der Kessel insgesamt länger in Betrieb ist und deshalb im Schnitt sowohl Kessel als auch Kesselleitungen höhere Temperaturen und höhere Verluste aufweisen. Zudem geht das verwendete Simulationsmodell auf Grund der in dieser Studie gemachten Messungen im Taktbetrieb nicht davon aus, dass durch eine Vermeidung des Taktens bei gleicher Heizlast ein energetischer Vorteil resultiert.

Die Variante V-2b, bei welcher zusätzlich zur Regulierung des Kessel-Durchflusses auch die Luftüberschusszahl der Verbrennung für tiefe Modulationsstufen verbessert wurde, erhöht die Brennstoff-Einsparung um 0.5 Prozentpunkte auf 27.8%, weil hier der Kessel auf tiefer Modulationsstufe einen höheren feuerungstechnischen Wirkungsgrad erzielen kann<sup>5</sup>. Gemäss den Angaben des Herstellers sei es technisch kaum machbar, bei Teillast mit ähnlich tiefem Luftüberschuss zu fahren wie bei Vollast. In Anbetracht der technischen Schwierigkeit der Umsetzung und der relativ geringen energetischen Verbesserung ist das Potential dieser Massnahme basierend auf den hier durchgeführten Simulationsrechnungen eher beschränkt.

Hingegen kann durch eine verbesserte Wärmedämmung der Kesselleitung (welche den Kessel mit dem Speicher verbindet) und der Brauchwarmwasser-Leitung eine Steigerung der Brennstoff-Einsparung um 2.8 Prozentpunkte auf 30.1% erreicht werden (V-3a). Eine zusätzlich moderat erhöhte Dämmung des Speichers und des Kessels steigert die Einsparung gegenüber dem Referenz-System ohne Solaranlage auf 31% (V-3b).

In Variante V-4 wurde die Brennerleistung von 10kW auf 20kW erhöht, bei ansonsten baugleichem Kessel. Währenddem sich der Pellet-Verbrauch nur um 2.4% erhöht, steigen die Taktzyklen um Faktor 2.6 gegenüber V-1 und die Energie-Einsparung gegenüber einem System ohne Solaranlage (V-0) beträgt unter Berücksichtigung des elektrischen Bedarfs nur noch 22% anstatt 26% (V-1). In Anbetracht der Tatsache, dass in

<sup>5</sup> Das verwendete Kessel-Modell berücksichtigt sowohl den Einfluss des Luft-Überschusses auf die Temperatur der Verbrennungsprodukte bei adiabater Verbrennung, als auch den Einfluss der Rauchgas-Geschwindigkeit auf den Wärmeübergang zwischen Rauchgas und Kesselmasse.



der Praxis der Kessel häufig zur Sicherstellung des Komforts überdimensioniert wird, ist diesem Resultat entsprechende Beachtung zu schenken. Zudem muss befürchtet werden, dass die Emissionen diverser Schadstoffe wie HC, CO und Feinstaub durch die Wahl eines überdimensionierten Kessels auf Grund der massiven Erhöhung der Start-Stop-Zyklen wesentlich erhöht werden. Bezüglich des nur geringfügig erhöhten Brennstoff-Bedarfs dieser Simulationsvariante muss erwähnt werden, dass insbesondere bezüglich der leistungsabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste des Kessels Unsicherheit besteht, ob die Parameter und Modelle welche den ausgemessenen 10kW-Kessel gut repräsentieren für die nicht im Prüfstand vermessene 20kW-Variante auch akzeptable Resultate liefern. Es besteht die Möglichkeit, dass die Kesselverluste dieser Variante mit dem verwendeten Simulationsmodell beträchtlich unter- (oder auch über-)schätzt werden.

In der Variante V-5 wurden alle Verbesserungsmassnahmen aus V-2b und V-3b gemeinsam gerechnet. Es resultiert daraus ein Pellet-Solar-System, welches 32% weniger Brennstoff benötigt als das Referenzsystem ohne Solaranlage, bei gleichzeitiger Reduktion der Brennerlaufzeit um 39% und der Takt-Zyklen um 52%. Dieses optimierte System weist gegenüber dem im Prüfstand vermessenen Pellet-Solar-System sowohl signifikant höhere Brennstoff-Einsparungen auf, als auch eine doppelt so effiziente Reduktion der Taktzyklen. Diese Verbesserungen sind vor allem auf eine optimierte Regelung (Taktzyklen) als auch auf eine verbesserte Wärmedämmung (Brennstoff-Einsparung) zurückzuführen.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsrechnungen liefern erste Erkenntnisse über das Potential ausgewählter Massnahmen und Systemvarianten. Das erstellte Modell kann nun weiter dazu eingesetzt werden, das Optimierungspotential von Pellet-Heizsystemen mit und ohne Solaranlage umfassend zu beleuchten. Dazu gehört u.a. die Betrachtung von optimierten Regelungsstrategien (Stichwort lastabhängige Leistungsvorgabe) und hydraulischen Einbindungsvarianten (mit/ohne Pufferspeicher) jeweils unter verschiedenen Bedingungen (Lastprofile, Systemdimensionierung). Die Simulationsrechnungen haben gegenüber der Messung im Feld oder im Prüfstand den Vorteil, dass sie deutlich weniger zeit- und kostenintensiv sind. Die aus den Simulationsrechnungen resultierenden Aussagen werden anhand ausgewählter Messungen verifiziert.

Abschliessend muss erwähnt werden, dass sich für andere Lastbedingungen (gegenüber den im Simulationsmodell verwendeten) insbesondere für andere Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems und anderen Heizbedarf des Gebäudes, aber auch für andere Hydrauliken und Speicher-Konzepte, grosse Abweichungen von den hier ermittelten Brennstoff- und Energie-Einsparungen ergeben können. Auch die Resultate der Kesselmessungen, auf welche die Simulationen abstützen, sind nicht ohne weiteres auf Pelletkessel anderer Hersteller, anderer Bauart und anderer Nennleistung übertragbar.

## 6. Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse des Projektes, welche sich aufgrund der durchgeführten Messungen und Simulationen ergeben haben, sind nachfolgend festgehalten:

- Die Erweiterung des Prüfstandes für die Messung von Pellet-Solar-Systemen konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die neu entwickelte innovative Variante der quasi-kontinuierlichen Erfassung des Pellet-Verbrauchs ohne direkte Messung des Gewichts des ganzen Pellet-Kessels hat sich in der Praxis bewährt. Mit dem Umbau wurde die Basis für zukünftige Systemmessungen an Pellet-Solaranlagen geschaffen.
- Obwohl beim geprüften Kessel bei abnehmender Leistung die Abgas-Temperaturen deutlich sanken, konnte gleichzeitig kein Anstieg des feuerungstechnischen Wirkungsgrades verzeichnet werden, da gleichzeitig der Luftüberschuss stieg. Jedoch **nahm der wasserseitig gemessene Kesselwirkungsgrad mit abnehmender Leistung von 85.6% auf 82.5% ab**, da – bei gleicher Kesseltemperatur – die Abstrahl- und Konvektionsverluste im Verhältnis zur abgegebenen Leistung grösser wurden.
- Die im stationären Betrieb gemessenen Kesselwirkungsgrade (82.5%-85.6%) liegen im Vergleich zu den über 90%, welche für ein baugleiches Gerät durch die Bundesanstalt für Landtechnik Wieselburg (Österreich) unter Normbedingungen ermittelt wurden, vergleichsweise tief. Gemäss Experten der Branche sind die am SPF gemessenen Werte für realistische Installationen und Einstellungen jedoch nicht ungewöhnlich.
- Es besteht Potential, den Kesselwirkungsgrad durch Massnahmen im Bereich der verbesserten Wärmedämmung und des reduzierten Luftüberschusses zu verbessern. Vor allem für den anzustrebenden Modulationsbetrieb sind solche Massnahmen von besonderer Bedeutung, da sich hierbei die Abstrahlverluste durch die verlängerten Laufzeiten anteilmässig besonders stark auswirken.
- Die Messungen im Takt-Betrieb haben ergeben, dass sich bei gleicher Nutzleistung von 3 kW die Kessel-Wirkungsgrade vom (erzwungenen) taktenden Betrieb gegenüber dem Stationärbetrieb nicht signifikant voneinander unterscheiden. Berücksichtigt man jedoch für die Berechnung des Wirkungsgrades die elektrische Leistungsaufnahme mit Faktor 3, so ergibt sich ein **klarer energetischer Vorteil des Stationärbetriebs gegenüber dem Taktbetrieb von 3.6 Prozentpunkten**.
- **Je weniger Nutzleistung vom Kessel gefordert wird, umso mehr fallen Abstrahl- und Konvektionsverluste ins Gewicht und umso mehr wird die Aufnahme elektrischer Leistung für die energetische Bilanzierung relevant.** Zum Beispiel sank der Wirkungsgrad des 10 kW Kessels bei einer Leistungsanforderung von 1 kW (10% der Nennleistung) auf ca. 63% ohne Berücksichtigung der elektrischen Leistungsaufnahme und auf unter 50% mit Berücksichtigung der elektrischen Leistungsaufnahme. Eine Abnahme des feuerungstechnischen Wirkungsgrades konnte nicht festgestellt werden (siehe oben).
- Die Messungen am Pellet-Solar-System (12-Tages-Systemtest) haben gezeigt, dass **mit einer hydraulisch-regeltechnischen Optimierung das Takten des Kessels im Test um ein Drittel reduziert werden konnte**. Die erhoffte Verminderung des Pellets-Verbrauchs stellte sich dadurch jedoch nicht ein.
- Die auf den Messungen basierenden Simulationsrechnungen zeigen, dass mit dem geprüften Pellet-Solar-System (15 m<sup>2</sup> Kollektorfeld, 950 Liter Speicher) unter den gegebenen Rahmenbedingungen<sup>6</sup> gegenüber einem Pellet-Heizsystem ohne Solaranlage und ohne Pufferspeicher **im Jahresschnitt 27% des Brennstoffbedarfs und 17% des Elektrizitätsbedarfs eingespart werden kann**. Die Solaranlage hat auch einen deutlich positiven Effekt auf die Reduktion des Kesseltaktens und auf den mittleren Kesselnutzungsgrad. Auf Grund der reduzierten Kesselverluste spart die Solaranlage mehr Brennstoff-Energie ein, als sie an Wärme in das System liefert. Die Simulationen haben zudem gezeigt, dass die Solaranlage den Kesselnutzungsgrad erhöht, da diese häufig den ineffizienten Betrieb in Sommer- und Übergangszeit ersetzt.
- Die Simulationen adaptierter Varianten des geprüften Pellet-Solar-Systems zeigten, dass trotz einwandfreier Funktion und guter Leistung der geprüften Anlage erhebliches Verbesserungspotential besteht. So konnte in der besten Simulationsvariante **die Pellets-Einsparung auf 32% gesteigert werden, bei gleichzeitiger Reduktion der Start-Stop-Zyklen um 52% gegenüber der Referenz-Anlage ohne Solarsystem**. Der mittlere Kesselnutzungsgrad wurde in dieser Variante von 80% (Referenzsystem ohne

---

<sup>6</sup> Beim untersuchten System lag der jährliche Raumwärmebedarf bei 15'500kWh/a (bzw.  $103 \text{ kWh/a} \cdot \text{m}^2_{\text{EBF}}$ ) und der Warmwasserenergiebedarf bei 2800 kWh/a.

Solar) auf 85% gesteigert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verbesserungspotential noch lange nicht ausgeschöpft ist.

- Eine Simulation mit überdimensioniertem Brenner zeigte deutlich, dass diese Variante selbst im Solarsystem mit Pufferspeicher zu einer grossen Zahl Start-Stop-Zyklen führt, welche im Vergleich zu anderen Anlagen mit Solarsystem um Faktor 4 höher liegt. Auch auf den Brennstoffbedarf hat diese Variante einen deutlich negativen Einfluss.

## **Ausblick**

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Arbeiten und erzielten Resultate legen nahe, folgende weiteren Abklärungen durchzuführen:

- Inwiefern die Resultate dieser Studie auf andere Kessel / andere Pellet-Solar-Systeme übertragbar sind, ist noch ungewiss. Zur Klärung dieser Frage sollten weitere Systeme auf dem Prüfstand untersucht werden.
- Die im Stationärbetrieb auf Grund der Differenz von feuerungstechnischem Wirkungsgrad und wasserseitig bilanziertem Wirkungsgrad berechneten Verluste des Kessels waren deutlich höher als die im ausgeschalteten Zustand gemessenen Abstrahl- und Konvektionsverluste. Es zeigte sich, dass die zusätzlichen Verluste stark mit der aktuellen Feuerungsleistung des Kessels korrelieren. Ob es sich dabei primär um Abstrahl- und Konvektionsverluste von Kesselteilen handelt, welche direkt im thermischen Kontakt mit der Brennkammer oder dem Abgas-System des Kessels stehen, oder ob ein beträchtlicher Teil dieser Verluste verursacht wurde durch unvollkommen verbrannte Rückstände in der Asche, konnte in diesem Projekt nicht eruiert werden. Durch Messungen an weiteren Pellet-Kesseln, insbesondere auch mit grösseren Brennerleistungen, sollten diese offene Fragen im Zusammenhang mit der Simulation von Pellet-Kesseln in Energie-Systemen weiter verfolgt werden.
- Die Resultate der Simulationen sind korrekterweise nur für die angenommenen Rahmenbedingungen (insbesondere Energiebedarf für Raumheizung und Warmwasser, Temperaturniveau des Heizsystems) gültig. Insbesondere bei besser wärmedämmten Objekten als auch bei Heizsystemen mit hohen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sind grosse Abweichungen von den hier präsentierten Resultaten zu erwarten. Der Einfluss dieser Rahmenbedingungen sollte mit weiteren Simulationsrechnungen abgeklärt werden.
- Im Rahmen des Projektes wurde die Regelung zwar verbessert, jedoch handelt es sich dabei noch nicht um eine optimale lastabhängige Leistungsregelung, da die Rückmeldung aus dem Gebäudekreis durch den Pufferspeicher mit den standardmässig zur Verfügung stehenden Sensoren (nur ein Temperaturfühler im Speicher) verzerrt bleibt. Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen ist davon auszugehen, dass durch eine in diesem Sinne verbesserte Regelung die Taktzyklen weiter reduziert, Energie eingespart und Emissionen verringert werden könnten. Zur grundsätzlichen Klärung dieser Frage und zur Bestimmung des Potentials dieser Massnahme sind weitere Simulationsrechnungen erforderlich. Sofern sich die untersuchten Massnahmen in den Simulationen als sinnvoll erweisen, sollten diese technisch umgesetzt und deren Wirksamkeit im Prüfstand verifiziert werden.
- Im vorliegenden Projekt konnte gezeigt werden, dass die Start-Stop-Zyklen des Kessels durch eine Solaranlage in Kombination mit einer geschickten Regelung um über 50% reduziert werden können. Andere Studien haben gezeigt, dass die CO- und HC- Emissionen von Pellet-Kesseln in den Start- und Stop-Phasen ein Vielfaches der Emissionen im Stationärbetrieb betragen. Im Bereich der Feinstaub-Emissionen wurde der gleiche Zusammenhang bei Stückholzfeuerungen nachgewiesen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Emissionen einer Pellet-Heizanlage durch eine Solaranlage beträchtlich reduziert werden können. In weiteren Studien sollte deshalb eine genauere Quantifizierung dieser Reduktion von CO-, HC- und Feinstaub-Emissionen angestrebt werden.
- Eine sehr aktuelle und umstrittene Frage in der Pelletbranche ist der Einsatz des Pufferspeichers zur Laufzeitverlängerung auch ohne Solaranlage. Auf der Basis eines Simulationsmodells (wie es in diesem Projekt erstellt wurde) liesse sich nun untersuchen, bei welchen Bedingungen Pufferspeicher und Laufzeitverlängerung auch ohne Solaranlage erforderlich sind. Daraus können konkrete Empfehlungen an die Heizungsplaner und Förderstellen in Behörden abgeleitet werden.
- Weiter können die Systemmessungen im Prüfstand kombiniert mit Simulationsrechnungen dazu dienen, die neu auf dem Markt erhältlichen Brennwertgeräte hinsichtlich des Jahresnutzungsgrads zu untersuchen.

## Symbolverzeichnis

Die im Bericht benützten Symbole sind in diesem Kapitel mit den dazugehörigen SI-Einheiten zusammenzustellen.

$E_{el}$	Elektrischer Energiebedarf des Systems, kWh
$E_{el,ref}$	Elektrischer Energiebedarf des Referenzsystems, kWh
$F_{el}$	Faktor für die Gewichtung von Elektrizität. $F_{el} = 3$ in dieser Studie <sup>7</sup> , -
$f_{sav,therm}$	fractional thermal savings, Einsparung von Heiz-Energie (basierend auf Heizwert des Brennstoffs) gegenüber einem Referenzsystem, %
$f_{sav,ext}$	extended fractional savings, Einsparung von Energie gegenüber einem Referenzsystem, wenn man zusätzlich zum Brennstoff-Bedarf auch den Bedarf elektrischer Energie (inklusive Gewichtung $F_{el}$ ), berücksichtigt, %
$\lambda$	Lambda, Verhältnis der Verbrennungsluftmenge zur stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge, -
$M_{therm}$	thermische Masse des Kessels, Wh/K
$n$	Exponent in Formel für Leistungsabhängige Abstrahl- und Konvektionsverluste, -
$\eta_F$	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad, %
$\eta_K$	Kessel-Nutzungsgrad, wasserseitig bilanziert, %
$\eta_{K,60C}$	Kessel-Nutzungsgrad, korrigiert bezüglich Abstrahl- und Konvektionsverlusten auf 60°C Vorlauf, %
$\eta_{K,pe+el}$	Kessel-Nutzungsgrad unter Einbezug des gewichteten elektrischen Leistungsbedarfs, %
$\eta_{S,pe}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie, jedoch ohne solaren und ohne elektrischen Energieinput, %
$\eta_{S,pe+so}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des solaren Energieinputs, %
$\eta_{S,pe+el}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des gewichteten elektrischen Energieinputs, %
$\eta_{S,pe+so+el}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des solaren und des gewichteten elektrischen Energieinputs, %
$P_{max}$	Maximale Kesselleistung, W
$P_{el}$	Durchschnittlicher elektrischer Bedarf für Pumpe, Ventilator(en), Zündung und Regelung des Kessels, respektive des Gesamtsystems bei der Berechnung von Systemnutzungsgraden, W

---

<sup>7</sup> Da Strom teurer ist und auf Grund seines höheren Exergie-Gehaltes auch thermodynamisch betrachtet eine höhere Wertigkeit besitzt als Wärme, sowie auf Grund der Tatsache dass im derzeitigen Europäischen kalorigen Kraftwerkspark mit Verlusten von 60-70% gerechnet werden muss (Umwandlung von Brennstoffenergie in Strom, zuzüglich der diversen Übertragungs- und Transformationsverlusten bis zum Endverbraucher), muss Strom sowohl aus wirtschaftlicher Sicht (Preis) als auch aus Ressourcenbetrachtungen heraus (eingesetzte Brennstoffmenge zur Produktion von Strom) derzeit mit einem Faktor von 2.5 – 3 gewichtet werden.

$\dot{Q}_{Pellet}$	Verbrennungsleistung, gerechnet mit dem unteren Heizwert des Brennstoffs, W
$\dot{Q}_{Nutz}$	Wasserseitig bilanzierte Wärmeleistung des Kessels, W
$\dot{Q}_{AK}$	Berechnete Abstrahl- und Konvektionsverlust-Leistung, W
$\dot{Q}_{temp\_corr}$	Temperaturkorrektur-Term für die Abstrahl- und Konvektionsverluste, W
$Q_{Heiz}$	Bezogene Nutzwärme für die Raumheizung, kWh
$Q_{WW}$	Bezogene Nutzwärme für Warmwasser, kWh
$Q_{Pellet}$	Brennstoff-Energieeintrag, gerechnet mit dem unteren Heizwert des Brennstoffs, kWh
$Q_{Pellet,ref}$	Brennstoff-Energieeintrag des Referenz-Systems, gerechnet mit dem unteren Heizwert des Brennstoffs, kWh
$Q_{Solar}$	Wärmeeintrag des Kollektors, kWh (wasserseitig abgegebene Energie – kein Bezug zur solaren Einstrahlung bzw. dem Kollektorwirkungsgrad)
$Q_{Losses}$	Verlustenergie des Systems, kWh
$Q_{Mtherm}(t)$	Energie, welche der thermischen Masse des Kessels durch Auskühlung auf die Umgebungstemperatur nach der Wartezeit t entzogen werden kann, Wh
$q_{AK}$	Faktor für Leistungsabhängige Abstrahl- und Konvektionsverluste, W/W
$\dot{q}_{AK}$	Faktor für Leistungsabhängige Abstrahl- und Konvektionsverluste, Modell 4, W
$T_{kessel}$	Vorlauf-Temperatur des Heizkessels (entspricht in etwa der mittleren Temperatur des Heizkessels), °C
$T_{Umgebung}$	Temperatur der Umgebung des Heizkessels oder Wärmespeichers, °C
$t$	Wartezeit zwischen Konditionierung auf 60 °C und Bestimmung der gespeicherten Energiemenge, h
$UA_{kessel,AK}$	temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient des Kessels, W/K

## Referenzen

- [1] A. Heinz, Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik; Fortschrittliche Wärmespeicher zur Erhöhung von solarem Deckungsgrad und Kesselnutzungsgrad sowie Emissionsverringern durch verringertes Takten, Energiesysteme der Zukunft, 2006, Seiten 71-83
- [2] SPF Institut für Solartechnik, Jahresleistungsermittlung von Solarsystemen mit der Concise Cycle Test (CCT) Methode, <http://www.solarenergy.ch/publ/systeme/KombiPruefmethodeCCT.pdf>, 2004
- [3] SPF Institut für Solartechnik, Das Pilot- und Demonstrationsprojekt Kombi-Kompakt+ , <http://www.solarenergy.ch/publ/systeme/KombiKompakt.pdf>, 2004
- [4] SPF Institut für Solartechnik, Referenzbedingungen: Klima, Wärmelast, Kollektorfeldausrüstung und Referenzsystem zur Leistungsbestimmung on Heizsystemen für Raumheizung und Wassererwärmung, <http://www.solarenergy.ch/publ/systeme/Referenzbedingungen.pdf>, 2004
- [5] R.Padinger, Regelungstechnik für die Hausheizung der Zukunft; Untersuchungen zur Regelung von Biomasse-Feuerungen zur emissions- und effizienzoptimierten Beheizung von Wohn- und Bürobauten, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 5/2002, Seiten 82-97
- [6] Neosys AG, Amt für Umwelt, Abteilung Luft, Solothurn, Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungen – Stand der Technik bei Kleinfeuerungen, 2006
- [7] T. Persson, F. Fiedler, M. Rönnelid and C. Bales, Solar Energy Research Center SERC, Increasing efficiency and decreasing CO-emissions for a combined solar and wood pellet heating system for single family houses, Conference Proceedings USB of Pellets, Jönköping, Sweden, 2006, Seiten 87-91
- [8] F. Fiedler, T. Persson, Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems, 3<sup>rd</sup> International Green Energy Conference, Västerås, Sweden, 2007
- [9] S.A. Klein et al. TRNSYS 16, a transient system simulation program – reference manual. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin – Madison, Madison, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>, USA, 2000
- [10] Holzenergie Schweiz et al., Qualitätsmanagement Holzheizwerke, Planungshandbuch erarbeitet von der Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke, 2004, Seite 220
- [11] N. Klippel und Th. Nussbaumer, Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruss, Verenum, Zürich ,Thomas Nussbaumer (Hrsg.) 9. Holzenergie-Symposium, [www.verenum.ch](http://www.verenum.ch) 2006
- [12] Ch. Rutschmann, Holzenergie Schweiz – Jahresbericht 2005, [http://www.holzenergie.ch/fileadmin/pdf/2005\\_Jahresbericht\\_D.pdf](http://www.holzenergie.ch/fileadmin/pdf/2005_Jahresbericht_D.pdf), 2005
- [13] Energieträgerinformation Energieberatungsstelle 2006, Land Steiermark, März 2006
- [14] W. Weiss, Solar Heating Systems for Houses – A Design Handbook for Solar Combisystems, Solar Heating and Cooling Executive Committee of the International Energy Agency (IEA), James & James, London, 2003
- [15] S. Nordlander, Computer Modelling of Wood Pellet Stoves and Boilers connected to Solar Heating Systems, 2nd World Conference on Pellets, Jönköping, Schweden, 2006
- [16] M. Haller, Type 869 Boiler Model, Version 3.00, 22.11.2006
- [17] A. Thür, S. Furbo, L. Jivan Shah, Energy savings for solar heating systems, Solar Energy 89, 2006, Seiten 1463-1474

## Anhang

Nr.	Tvl	Trl	Flow	Tlab	$\dot{Q}_{Pellet}$	$\dot{Q}_{Nutz}$	$\eta_K$	Trg	Tluft	$\lambda$	Vth	Vch	$\eta_F$
--	°C	°C	kg/h	°C	kW	kW	%	°C	°C	--	%	%	%
1	62.4	44.9	233	20.0	5.62	4.74	84.4%	90.5	20.0	3.31	8.0%	0.3%	91.8%
2	61.4	45.7	428	20.0	9.20	7.87	85.5%	106.4	20.4	2.89	8.6%	0.2%	91.2%
3	66.4	49.9	211	20.0	4.93	4.07	82.5%	88.6	20.1	3.58	8.3%	0.4%	91.3%
4	61.3	49.8	463	19.8	7.38	6.18	83.7%	96.2	19.9	3.13	8.2%	0.2%	91.6%
5	59.1	49.9	963	20.0	12.02	10.29	85.6%	116.5	20.4	2.36	8.0%	0.1%	91.9%
6	63.7	54.9	463	20.0	5.64	4.74	84.0%	90.5	20.4	3.41	8.2%	0.3%	91.6%
7	63.2	54.9	962	20.0	11.02	9.38	85.1%	115.4	20.7	2.43	8.1%	0.1%	91.8%
8	69.8	44.9	222	20.0	7.64	6.42	84.0%	101.4	22.0	2.81	7.7%	0.1%	92.1%
9	69.8	49.9	189	20.0	5.31	4.38	82.5%	92.7	20.0	3.44	8.5%	0.3%	91.1%
10	69.5	49.8	438	20.0	11.72	9.99	85.3%	119.3	22.6	2.35	8.0%	0.1%	91.9%
12	69.7	54.9	435	20.0	8.94	7.52	84.1%	109.9	21.7	2.59	8.0%	0.1%	91.9%

Tabelle 8: Resultate von 11 Messungen im stationären Betrieb: Tvl = Temperatur Vorlauf, Trl = Temperatur Rücklauf, Flow = Kessel-Durchfluss, Tlab = Temperatur Labor (Umbegung),  $\dot{Q}_{Pellet}$  = Brennstoff-Energieleistung (Heizwert),  $\dot{Q}_{Nutz}$  = Nutz-Energieleistung (wasserseitig bilanziert), Trg = Temperatur Rauchgas,  $\eta_K$  = Kessel-Wirkungsgrad, Tluft = Temperatur Verbrennungsluft,  $\lambda$  = Lambda-Wert der Verbrennung, Vth = thermische Verluste Abgas, Vch = chemische Verluste Abgas (CO),  $\eta_F$  = Feuerungstechnischer Wirkungsgrad.

	V-0	V-1	V-2a	V-2b	V-3a	V-3b	V-4	V-5
<b>Energieeinsparung</b>								
$f_{sav,therm}$ (Pellets)	0.0%	27.3%	26.8%	27.8%	30.1%	31.0%	25.5%	32.1%
$f_{sav,ext}$ (Pellets + el.)	0.0%	25.9%	25.3%	26.2%	28.2%	29.2%	22.1%	30.1%
<b>Systemnutzungsgrad</b>								
$\eta_{S,pe+so+el}$	61.3%	66.3%	65.9%	66.6%	68.2%	69.7%	63.7%	70.4%
$\eta_{S,pe+so}$	70.7%	75.3%	75.0%	75.9%	77.9%	79.7%	74.0%	80.7%
$\eta_{S,pe+el}$	<b>61.3%</b>	<b>82.7%</b>	<b>82.1%</b>	<b>83.1%</b>	<b>85.3%</b>	<b>86.6%</b>	<b>78.7%</b>	<b>87.7%</b>
$\eta_{S,pe}$	70.7%	97.2%	96.6%	98.0%	101.1%	102.5%	95.0%	104.2%
<b>Energie Input [kWh]</b>								
$Q_{Pellet}$	25886	18831	18952	18677	18106	17854	19276	17571
$Q_{Solar}$	0	5471	5453	5455	5402	5122	5474	5120
$E_{el}$	1326	1098	1118	1118	1114	1097	1332	1098
Total	27212	25400	25523	25250	24622	24073	26082	23789
<b>Energie Output [kWh]</b>								
$Q_{Heiz}$	15507	15507	15507	15507	15507	15507	15507	15507
$Q_{WW}$	2799	2799	2799	2799	2799	2799	2799	2799
$Q_{Losses}$	7560	5957	6057	5775	5125	4623	6417	4341
Energieveränderung Speicher	0	0	0	3	-1	0	-3	-3
Total	25865	24263	24362	24081	23430	22929	24723	22646
<b>Verluste [kWh]</b>								
Kessel	5088	3265	3312	3029	2957	2872	3733	2589
Speicher	654	1307	1310	1311	1327	929	1294	929
Leitungen Kessel zu Speicher	1246	558	607	607	214	211	574	211
Leitungen Raumheizung	142	124	125	125	125	126	114	126
Leitungen Kollektorkreis	0	271	271	272	271	255	270	255
Leitungen Warmwasser	429	432	432	432	230	230	432	230
Total	7560	5957	6057	5775	5125	4623	6417	4341

Tabelle 9: Ergebnisse der Jahressimulationen. Erklärungen zu den einzelnen Simulation sind in Tabelle 5 enthalten.



		V-0	V-1	V-2a	V-2b	V-3a	V-3b	V-4	V-5
Pellets-Energiebedarf	kWh	25886	18831	18952	18677	18106	17854	19276	17571
Wasserseitig bilanzierter Energieeintrag	kWh	20797	15566	15640	15648	15149	14983	15543	14983
Verluste Feuerungstechnisch	kWh	2029	1460	1476	1203	1155	1389	1940	1117
A+K-Verluste Temperaturabhängig	kWh	2158	1150	1176	1175	1172	861	1119	861
A+K-Verluste Leistungsabhängig <sup>a</sup>	kWh	906	659	663	654	634	625	675	615
Kessel-Nutzungsgrad	%	80.3%	82.7%	82.5%	83.8%	83.7%	83.9%	80.6%	85.3%
Anzahl Brennerstarts	-	1468	1102	726	728	719	701	2880	701
Brennerlaufzeit	h	4645	2471	2910	2911	2900	2849	1216	2850

Tabelle 10: Tabellarische Darstellung Kesselspezifischer Ergebnisse der Jahressimulationen der in Tabelle 7 beschriebenen Varianten. A+K-Verluste = Abstrahlungs- und Konvektionsverluste des warmen/heissen Kessels an die Umgebung. a) Der Simulationsparameter welcher zur Berechnung der leistungsabhängigen A+K-Verluste verwendet wird wurde auf die Stationär-Messungen des Kessels gefittet. Diese Verluste enthalten neben den tatsächlichen leistungsabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverlusten entsprechend sowohl chemische Asche-Verluste (Rest-Energiegehalt in der Asche), als auch Unsicherheiten in der Bestimmung des Heizwertes des Brennstoffs. Dieser Wert ist deshalb mit entsprechender Vorsicht zu genießen.