



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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

# PELLETSOLAR-2

SYSTEMOPTIMIERUNG VON PELLETS-FEUERUNGEN  
IN KOMBINATION MIT THERMISCHEN SOLARANLAGEN  
BASIEREND AUF DYNAMISCHEN SIMULATIONEN UND  
MESSUNGEN IM PRÜFSTAND

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Robert Haberl**, Robert.Haberl@solarenergy.ch

**Lars Konersmann**, Lars.Konersmann@solarenergy.ch

**Michel Y. Haller**, Michel.Haller@solarenergy.ch

**Elimar Frank**, Elimar.Frank@solarenergy.ch

**SPF Institut für Solartechnik**

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

## **Impressum**

Datum: 06. Dezember 2010

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

BFE-Projektnummer 101792

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

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

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 .....	3
Abstract .....	3
Resumé .....	3
Executive Summary .....	4
1. Ausgangslage .....	5
2. Ziel der Arbeit .....	5
3. Methode.....	6
3.1 Systemtest am Indoorprüfstand des SPF .....	7
3.2 Messungen an den Pelletkesseln .....	8
3.2.1 Stationäre Betriebszustände .....	8
3.2.2 Instationäre Betriebszustände .....	9
3.2.3 Bestimmung der Abstrahl- und Konvektionsverluste .....	9
3.2.4 Emissionen.....	9
3.3 Messungen an den Wärmespeichern .....	10
3.4 Modellbildung und Simulationen zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades .....	10
3.5 Messtellenverzeichnis.....	11
4. Ergebnisse System 1 .....	12
4.1 Systemtest .....	13
4.2 Messungen des Pelletkessels .....	14
4.2.1 Stationäre Betriebszustände .....	14
4.2.2 Instationäre Betriebszustände .....	15
4.2.3 Emissionsfaktoren.....	19
4.3 Modellbildung und Simulationen zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades .....	20
5. Ergebnisse System 2 .....	23
5.1 Systemtest .....	24
5.2 Messungen des Pelletkessels .....	25
5.2.1 Stationäre Betriebszustände .....	25
5.2.2 Instationäre Betriebszustände .....	26
5.2.3 Emissionsfaktoren.....	29
5.3 Modellbildung und Simulationen zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades .....	30
6. Diskussion .....	33
6.1 Systemtest .....	33
6.2 Messungen an den Pelletkesseln .....	33
6.2.1 Stationäre Betriebszustände .....	33
6.2.2 Instationäre Betriebszustände .....	33
6.2.3 Bestimmung der thermischen Masse.....	34
6.2.4 Emissionsfaktoren.....	34
6.3 Modellbildung und Simulationen zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades .....	35
6.3.1 Energetische Bewertung .....	35
6.3.2 Emissionstechnische Bewertung .....	37
7. Schlussfolgerungen .....	38

8. Ausblick .....	39
Symbolverzeichnis .....	40
Abkürzungsverzeichnis .....	41
Referenzen .....	42
Anhang .....	43
Resultate der Messungen im stationären Betrieb.....	43
Emissionsfaktoren aus gewichteten Konzentrationen.....	43
Verlauf der 12-tägigen Messungen .....	47
Ergebnisse der Jahressimulationen .....	56

## Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes PelletSolar-2 wurden zwei Anlagen für Raumheizung und Warmwasser mit Pelletkessel und Solaranlage am SPF mit der Concise Cycle Test Methode geprüft. Dabei zeigte sich, dass die Pelletkessel beider Anlagen im dynamischen Realbetrieb die vorhandene Möglichkeit der Leistungsmodulation kaum bis gar nicht zu nutzen vermochten. Anhand von Simulationsmodellen, die mit den Messdaten des 12-Tages Tests validiert wurden, konnte ein erhebliches Potential zur Steigerung der Effizienz beider Anlagen auf Systemebene identifiziert werden, insbesondere durch Sicherstellung einer modulierenden Betriebsweise der Pelletkessel. Ergänzend zur energetischen Bewertung wurden die Emissionen der Systeme berücksichtigt. Basis dazu bildeten Emissionsfaktoren für den dynamischen Betrieb, welche an der Hochschule Luzern ermittelt und in die Berechnungen einbezogen wurden. Die Resultate zeigten, dass unter der Voraussetzung guter Betriebsbedingungen bei Teillast die Jahresemissionsfrachten durch leistungsmodulierende Betriebsweise erheblich gesenkt werden können. Ein Gerät mit schlechten Betriebsbedingungen bei Teillast (insbesondere hohe  $\lambda$ -Werte und CO-Emissionen) kann im modulierenden Betrieb jedoch höhere Gesamt-Emissionsfrachten verursachen als im On/Off-Betrieb.

## Abstract

Within the project PelletSolar-2 two combisystems combining automatically fired pellet boilers with solar thermal collectors were tested with a test cycle called the Concise Cycle Test. It was found that both of the pellet boilers weren't able to operate in a power modulation mode under the realistic conditions of the test, even if they had the possibility to do so. Subsequent to the physical test sequence, the acquired data were then used to generate measurement-validated simulation models that were used to evaluate various system setups in light of annual performance summaries. The simulations revealed a considerable potential for improvement in the overall efficiency of the systems, in particular by enabling the power modulation of the boilers. In addition to the evaluation of the energetic efficiency, the emissions (subject to the running mode of the boiler) were also considered. This was achieved on the basis of emission-factors that were determined for transient operation at the Lucerne University of Applied Sciences. The results show that so long as continuous partial-load operation is achieved with low emission-factors, a modulating boiler operation reduces annual emissions significantly. Should a system exhibit bad characteristics while modulating (in particular high  $\lambda$ -values and CO-emissions), the annual emissions can be higher compared with a simple On/Off operation.

## Resumé

Dans le cadre du projet PelletSolar-2, deux systèmes de chauffage combiné avec chaudière d'appoint à pellets ont été testés au SPF avec la méthode du Concise Cycle Test. La possibilité de modulation de puissance lors du fonctionnement dynamique des deux systèmes ne pouvait guère ou pas être constatée. Sur la base de modèles de simulation, qui ont été validés avec des données mesurées lors des tests de 12 jours, une identification d'un potentiel d'accroissement d'efficacité de manière significative a pu être constatée au niveau des installations pour les deux systèmes de chauffage, notamment en assurant un fonctionnement modulant des chaudières à pellets. En complément de l'évaluation énergétique, les émissions des systèmes ont aussi été prises en compte, en utilisant les facteurs d'émissions pour un fonctionnement dynamique déterminé à l'école supérieure de Luzern. En supposant un fonctionnement à charge partielle efficace et pauvre en émissions, les résultats ont montré qu'une réduction du taux d'émissions annuelles durant le fonctionnement modulant peut être atteinte. Un appareil modulant fonctionnant à charge partielle en mauvaises conditions (particulièrement des valeurs  $\lambda$  et des taux d'émissions de CO élevés) peut provoquer des taux d'émissions globale plus important qu'état de marche/arrêt.

## Executive Summary

Ziel des Projektes PelletSolar-2 war die energetische Optimierung von Systemen, welche Pelletkessel mit Solaranlagen kombinieren. Im Zentrum des Projektes stand die Betrachtung kompletter Heiz-Systeme im dynamischen, praxisnahen Betrieb mit einem Jahreszyklus-Test (Concise Cycle Test – CCT). Dabei werden Speicher, Solarbaugruppe, Pelletkessel und Heizkreisverteilung inklusive aller Regel-Geräte und Anschlüsse für Raumheizung und Warmwasser im Prüfstand installiert, analog einer Installation im Heizungskeller eines Einfamilienhauses. Der Aufbau des kompletten Systems ermöglicht es, das Zusammenspiel der Einzelkomponenten aufgrund der hydraulischen und regelungstechnischen Einbindung zu analysieren. Damit geht diese Testmethode weit über die Prüfstandsmessung von Einzelkomponenten im Stationärbetrieb hinaus.

Mit der beschriebenen Jahreszyklus-Test Methode konnte im Rahmen des vorausgegangenen Projektes PelletSolar am Beispiel eines ausgewählten Heiz-Systems das Potential zur energetischen Optimierung von Pellet-Solarkombinierten Systemen aufgezeigt werden. Der energetisch optimierte Betrieb wurde dabei über eine Verbesserung der Regelungsstrategie und der hydraulischen Einbindung erzielt. Insbesondere liess sich die Frequenz der Start-Stop-Zyklen durch eine optimierte Betriebsführung stark reduzieren, was unter Einberechnung der elektrischen Hilfsenergie zu einem verbesserten Nutzungsgrad führte.

Im Rahmen des hier beschriebenen Folgeprojektes PelletSolar-2 wurden zwei weitere Systeme geprüft. Sie zeigten ein fehlerfreies Verhalten im Sinne einer sicheren Wärme-Versorgung für die Raumheizung und zur Bereitung von Brauchwarmwasser. Bei allen Systemen wurde festgestellt, dass der Pelletkessel vorwiegend im taktenden Betrieb arbeitet und die vorhandene Möglichkeit zur Leistungsmodulation kaum bis gar nicht ausnützt.

Die Ergebnisse der Prüfstandsmessungen wurden anschliessend dazu verwendet, Jahreskennzahlen dieser Pellet-Solarkombinierten Systeme mit Simulationsmodellen zu berechnen, und anhand von Parameter-Variationen die Auswirkung von Änderungen an Komponenten, Hydraulik oder Regelung zu analysieren. Dadurch wurde deutlich, dass auf Systemebene noch erhebliches Verbesserungspotenzial besteht, insbesondere durch Sicherstellung eines modulierenden Betriebs der Pelletkessel. Der Systemnutzungsgrad der Anlagen unter Berücksichtigung der eingetragenen Brennstoff-Energie konnte so für System 1 von 86.3 % auf 87.8 %, für System 2 sogar von 91.8 % auf 97.6 % gesteigert werden. Aus energetischer Sicht ist somit, analog zu den Ergebnissen des vorgängigen Projektes PelletSolar, der modulierende Betrieb des Pelletkessels anzustreben.

Neben der energetischen Optimierung umfasste PelletSolar-2 auch die quantitative Bewertung aus emissionstechnischer Sicht. Hierzu wurde ein Verfahren erarbeitet, welches erlaubt die Jahresemissionsfracht eines Pelletheizgerätes im dynamischen Systembetrieb zu bestimmen. Dabei wurden in einem ersten Schritt die Emissionsfaktoren der Pelletkessel in Abhängigkeit des Betriebszustandes durch die Hochschule Luzern – Technik & Architektur ermittelt. Zur Berechnung von Jahresemissionsfrachten wurden die gemessenen Emissionsfaktoren anschliessend in das Simulationsmodell integriert. Da die Start- und Ausbrandphasen zu erhöhten Emissionen an gasförmigen Kohlenwasserstoffen führen kann durch die modulierende Betriebsweise des Pelletkessel die jährliche Emissionsfracht deutlich gesenkt werden. Dies setzt allerdings ein gutes Teillastverhalten des Pelletkessels voraus. Ein Gerät mit schlechten Betriebsbedingungen bei Teillast (insbesondere hohe  $\lambda$ -Werte und CO-Emissionen) verursacht im modulierenden Betrieb höhere Gesamt-Emissionsfrachten als im On/Off-Betrieb.

Mit den energiepolitischen Zielen für den Wärmemarkt in der EU gewinnt die integrale Betrachtung von Heizsystemen entscheidend an Bedeutung. Einerseits bei der Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie andererseits bei den Umsetzungsmassnahmen der EU-Ökodesign-Direktive für Festbrennstofffeuerungen. Vor diesem Hintergrund haben unlängst verschiedene europäische Forschungs- und Prüfinstitutionen damit begonnen, sich verstärkt mit der integralen Betrachtung von Heizsystemen auseinanderzusetzen. Die im Rahmen dieses Projektes entwickelte Methode ermöglicht es Heizsysteme und Biomasseheizgeräte im praxisnahen dynamischen Betrieb zu bewerten. Dementsprechend kann das am SPF über Jahre aufgebaute Know-How einen massgeblichen Beitrag bei der bevorstehenden Erarbeitung von Methoden zur integralen Systembetrachtung auf europäischer Ebene leisten.

## 1. Ausgangslage

Systeme, in denen ein Pelletkessel mit einer Solarthermieranlage für die Bereitstellung von Wärme für Raumheizung und Trinkwarmwasser kombiniert werden (sogenannte „Kombisysteme“), stellen eine Möglichkeit dar, den Wärmebedarf in Einfamilienhäusern ohne die Nutzung fossiler Energieträger zu decken. Um das tatsächliche Potential solcher und ähnlicher Kombinationen untersuchen zu können, wurde am Institut für Solartechnik SPF in Rapperswil ein Verfahren entwickelt, mit dem das Betriebsverhalten von Systemen über ein gesamtes Jahr anhand eines 12-Tages-Tests analysiert werden kann, bei dem das vollständige System im Realbetrieb getestet wird (vgl. [1],[2]). Speziell zur Kombination von Pelletkessel und Solarthermie wurde am SPF im Projekt PelletSolar (wird im Folgenden mit PelletSolar-1 bezeichnet) eine detaillierte Leistungsanalyse eines solchen Systems anhand dieses 12-Tage-Testzyklus (Concise Cycle Test) durchgeführt (vgl. [3]). Eines der zentralen Ergebnisse dieses Projektes zeigt, dass die Verluste durch Konvektion an der Kesseloberfläche bzw. die Abstrahlungsverluste des Kessels die feuerungsbedingten Verluste übersteigen können. Somit kann durch die Kombination des Pelletkessels mit einer Solarthermieranlage aufgrund der Verringerung der Laufzeit des Kessels eine deutliche Verbesserung des Kesselnutzungsgrades erzielt werden. Im zweiten Teil des Projektes wurde eine hydraulische und regelungstechnische Optimierung eines Standardsystems durchgeführt. Dadurch konnte unter anderem die Anzahl der Brennerstarts deutlich reduziert werden, was sich bei dem betrachteten System massgeblich auf die Verringerung des Systemstrombedarfs ausgewirkt hat.

## 2. Ziel der Arbeit

Im Projekt PelletSolar-2 wurden ergänzend zu der Systemanalyse aus PelletSolar-1 zwei weitere Pellet-Solarkombinierte Systeme verschiedener Hersteller detailliert getestet. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Interaktion der verschiedenen Komponenten innerhalb des Systems mit dem Ziel, den Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasserbereitstellung möglichst effektiv zu decken. Dabei ist neben dem absoluten Pellet-Verbrauch auch der Einfluss der Betriebsweise auf die Emissionen und den Stromverbrauch zu beachten. Es wurden also zwei zentrale Ziele verfolgt: Zum einen die Möglichkeit, noch umfassendere Aussagen bezüglich des Einsatzes solcher Systeme treffen zu können, und zum anderen, die vielfältigen Erkenntnisse aus den Systemtests für unterschiedliche Systeme auswerten und vergleichen zu können.

*Prüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus PelletSolar-1: System- und Komponentenmessungen an zwei weiteren Pellet-Solarkombinierten Systemen*

Das vorausgegangene Projekt PelletSolar-1 [3] konnte am Beispiel eines ausgewählten Pellet-Solarkombinierten Systems das Verbesserungspotential zur energetischen Optimierung aufzeigen. Insbesondere liess sich die Frequenz von Start-Stop-Zyklen durch eine optimierte Betriebsweise stark reduzieren. Unter der Einberechnung der elektrischen Hilfsenergie ging dies einher mit einem verbesserten Nutzungsgrad. Im Rahmen des Folgeprojektes PelletSolar-2 soll nun die Allgemeingültigkeit dieser Resultate anhand der Messung von zwei weiteren Systemen geprüft werden. Dazu werden wiederum einzelne Komponenten (Kessel, Pufferspeicher) sowie das System als Gesamtes im dynamischen Systemprüfstand mit dem Concise Cycle Test ausgemessen.

*Ermittlung der Emissionsfaktoren*

Bei der standardmässigen Kesselprüfung [4] werden stationäre Betriebszustände getestet. Dabei werden auch die Emissionen des Gerätes geprüft. Es ist davon auszugehen, dass die Emissionswerte im dynamischen Praxisbetrieb stark von den stationären Prüfstandswerten abweichen. Vor diesem Hintergrund zielt das vorliegende Projekt darauf ab, realitätsnahe Aussagen hinsichtlich des Emissionsverhaltens im dynamischen Systembetrieb von Pelletfeuerungen machen zu können. Insbesondere ist zu prüfen, inwiefern eine Reduzierung der Start-Stop-Zyklen eines Pelletkessel neben der elektrischen Leistungsaufnahme auch die Emissionen, darunter auch die Feinstaubemissionen, reduziert. Um Aussagen zum optimierten Betrieb des Systems aus emissionstechnischer Sicht machen zu können, wurde das laufende Projekt PelletSolar-2 erweitert. In Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern werden typische Emissionsfaktoren von Pelletsgeräten in Abhängigkeit des Betriebszustandes ermittelt (HSLU) [5], um diese anschliessend in das Simulationsmodell zu integrieren. Mit diesem Ansatz können abschliessend Jahresemissionsfrachten bestimmt werden, welche realistischer sind als Hochrechnungen aufgrund von Resultaten welche standardmässig bei der Kesselprüfung bei Stationärzuständen gemessen werden.

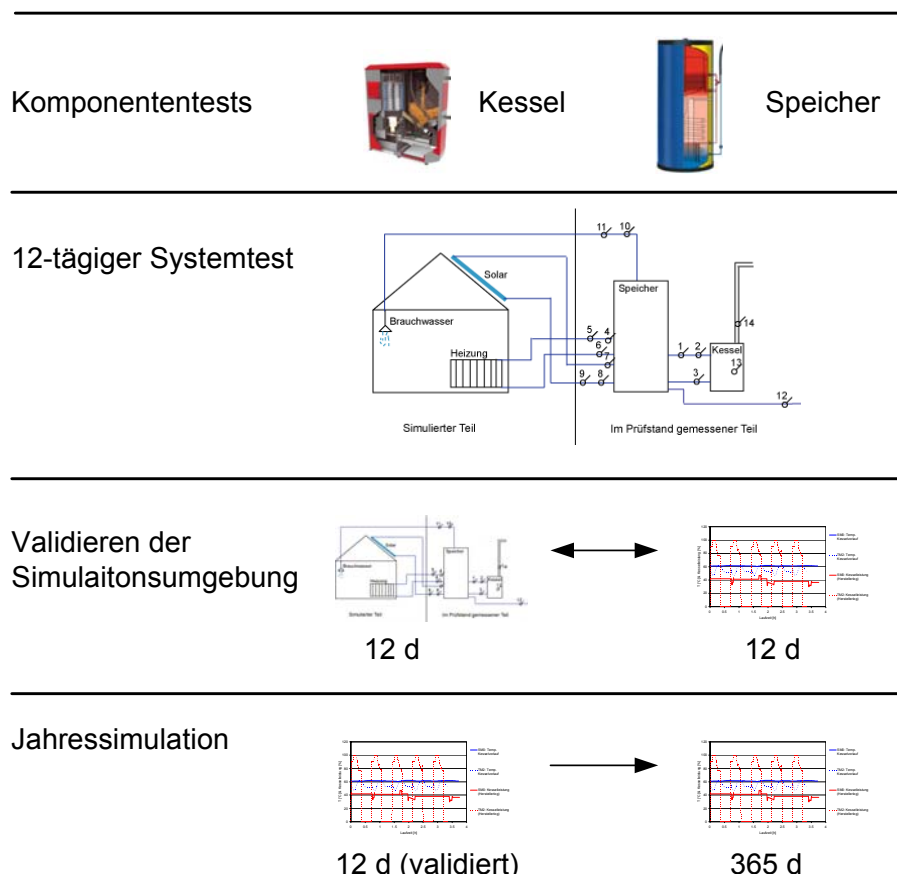
## Erweiterung des Systemprüfverfahrens für Pelletheizungen

Die Systemprüfung mit dem Concise Cycle Test ermöglicht es, das Zusammenspiel eines Gesamtsystems unter realistischen Lastbedingungen zu bewerten und daraus Empfehlungen abzuleiten. Vorausgegangene Projekte mit solarthermischen Kombisystemen haben gezeigt, dass schlecht abgestimmte Systemlösungen einen stark negativen Einfluss auf den Systemnutzungsgrad haben [6]. Ziel von PelletSolar-2 ist es, das Systemprüfverfahren für Pelletsysteme neben der energetischen Beurteilung neu auch den Emissionsausstoss von Pelletsystemen als Beurteilungsgrösse mit einzubeziehen. Anbieter von Pelletsystemen sollten allgemein die Möglichkeit haben, ihr System durch praxisnahe Tests am SPF zu überprüfen und aufgrund der Resultate gezielt weiterentwickeln zu können. Dabei sollte die Erfahrung des SPF im Bereich Pellet-Solarkombinierter Systeme helfen, das Optimierungspotential von Systemen zukünftig schnell und effizient offenzulegen und so der gesamten Branche ein wirksames Instrument zur Verbesserung der Technik anzubieten.

### 3. Methode

Nachfolgend wird das methodische Vorgehen zur Analyse der Pellet-Solarkombinierten Systeme beschrieben. Das zentrale Element der Untersuchung ist die am SPF entwickelte CCT Methode (CCT = Concise Cycle Test) mit einem dynamischen Test des Gesamtsystem in einer 12-tägigen Prüfphase. Diese Methode ermöglicht es, Aussagen zum praxisnahen Jahresbetrieb eines Kombisystems und seinen Komponenten zu machen. Detaillierte Informationen hierzu finden sich unter [1],[2],[7].

Das methodische Vorgehen zur Analyse der Kombisysteme ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Zunächst werden die Hauptkomponenten (Kessel und Speicher) des Systems ausgemessen. Eine wichtige Bestimmungsgrösse sind dabei die Abstrahlungsverluste. Anschliessend wird das Gesamtsystem im Prüfstand praxisnah installiert und dem 12-tägigen CCT unterzogen, wobei jeder Tag vereinfacht ausgedrückt einem Jahresmonat entspricht. Die Resultate aus dem 12-Tagestest werden dazu verwendet ein entsprechendes messdatenbasiertes Simulationsmodell zu validieren. Auch die Resultate der Komponentenmessungen fliessen in die Parametrisierung des Modells ein. Nach abgeschlossener Validierung wird das Modell dazu verwendet, die Resultate auf der Jahresbasis zu berechnen. In den nachfolgenden Abschnitten wird näher auf die einzelnen Testphasen eingegangen.

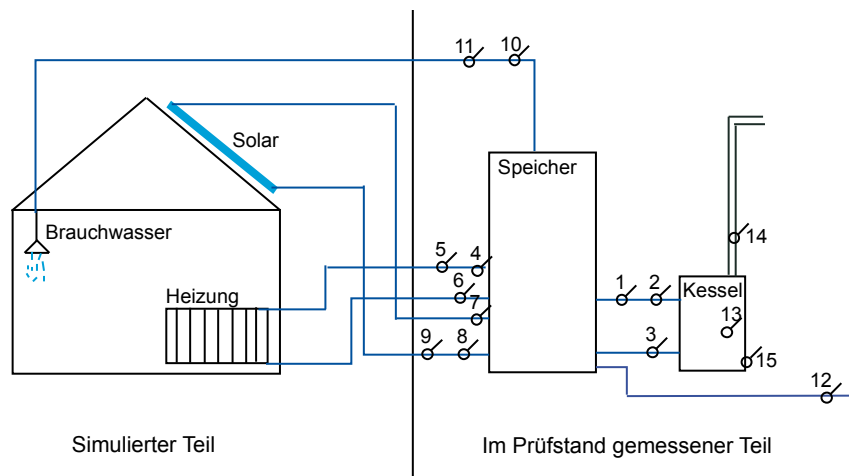


**Abbildung 1: Systematische Darstellung des Verlaufs einer Systemprüfung mit dem 12-tägigen Systemtest nach der CCT Methode als zentrales Element.**

Ergänzend zu diesen auf den Energieverbrauch bzw. die Wärmebereitstellung fokussierten Messungen wurden die Emissionen des Systems näher untersucht. Dazu wurden Emissionsfaktoren bestimmt [5] und in das Simulationsprogramm integriert.

### 3.1 SYSTEMTEST AM INDOORPRÜFSTAND DES SPF

Sowohl die Effizienz einer Heizanlage als auch deren Emissionen hängen stark davon ab, wie die einzelnen Komponenten in ein Gesamtkonzept integriert werden. Um dieses Zusammenspiel der verschiedenen Einzelteile unter realen Lastbedingungen zu testen wird das Gesamtsystem in einem komprimierten Testzyklus geprüft. Dazu werden 12 Typtage, die die Bedingungen eines typischen Jahrs zusammenfassen, aneinandergereiht und aufeinander abgestimmt. Das System wird komplett auf dem Prüfstand installiert, analog zu einer privaten Installation im Heizkeller und regelt sich selbst. Die Last des Gebäudes wird über eine interaktive Simulation vorgegeben die den Energieeintrag des Systems berücksichtigt. Die Referenzbedingungen des Tests sind im Dokument „Referenzbedingungen: Klima, Wärmelast, Kollektorfeldausrüstung und Referenzsystem zur Leistungsbestimmung von Heizsystemen für Raumheizung und Wassererwärmung“ [7] zusammengefasst.



**Abbildung 2: Schematische Darstellung des Prüfstandes mit Messstellenverzeichnis (vgl. Tabelle 1).**

Zum direkten Vergleich der Resultate aus dem 12-Tages-Systemtest werden verschiedene Nutzungsgrade berechnet. Der einfachste System-Nutzungsgrad berücksichtigt nur den Energieeintrag durch den Brennstoff Pellets in Form des unteren Heizwertes (Formel 1). Bezüglich der Ausnutzung des gesamten thermischen Energieeintrags ist auch der System-Nutzungsgrad unter Berücksichtigung des solaren Energieeintrages relevant (Formel 2). Der System-Nutzungsgrad (Formel 3) berücksichtigt die Energie-Einträge durch Pellets und gewichtete elektrische Hilfsenergie, und gibt damit Auskunft über die Menge nicht-solarer Energie welche im Verhältnis zur Nutzenergie aufgewendet werden muss. Die Ausnutzung des gesamten Energieeintrags (Pellets + Solar + Elektrisch) wird mit (Formel 4) berechnet. Der Nutzungsgrad des Kessels über die Messperiode wird durch die wasser-seitig übertragene Wärmemenge und den Pellet-Verbrauch bestimmt (Formel 5).

$$\zeta_{S,pe} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet}}$$

**Formel 1**

$$\zeta_{S,pe+so} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + Q_{Solar}}$$

**Formel 2**

$$\zeta_{S,pe+el} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + F_{el} * E_{el}}$$

**Formel 3**

$$\zeta_{S,pe+so+el} = \frac{Q_{Heiz} + Q_{WW}}{Q_{Pellet} + Q_{solar} + F_{el} * E_{el}}$$

**Formel 4**

$$\zeta_K = \frac{Q_{wat}}{Q_{Pellet}}$$

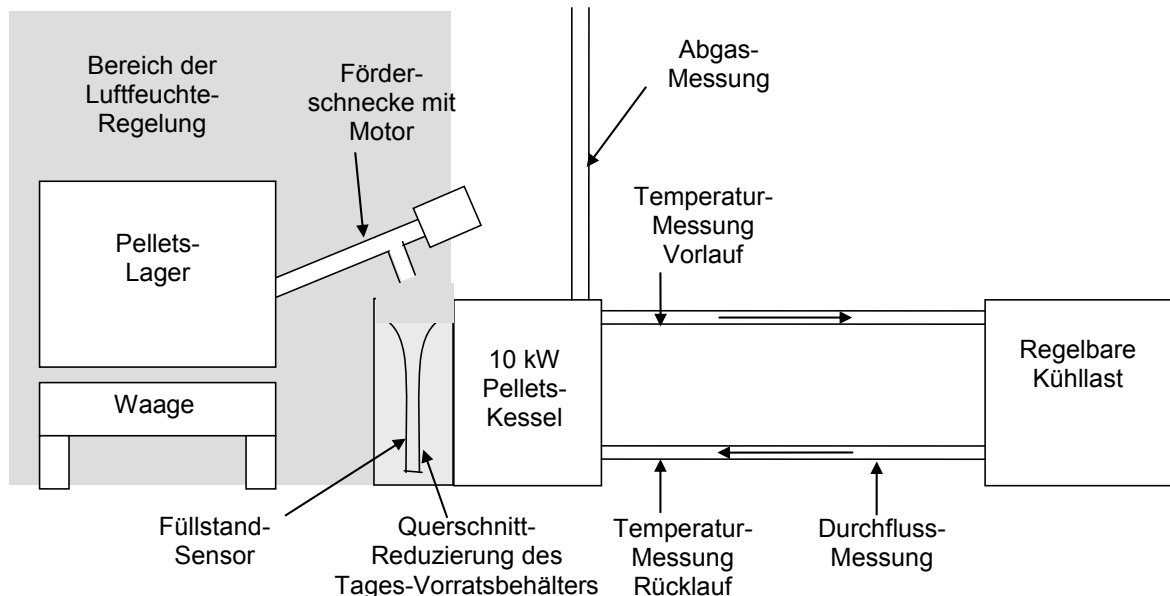
**Formel 5**

### 3.2 MESSUNGEN AN DEN PELLETKESSELN

Der Pelletkessel stellt in üblichen Kombisystemen für die Bereitstellung von ca. 70 % der Wärme verantwortlich. Um ein genaues Abbild des Kessels in einem Simulationsmodell erstellen zu können müssen die wichtigsten Details dieser Komponente in Einzelmessungen ermittelt werden.

#### 3.2.1 Stationäre Betriebszustände

Zur Messung der Effizienz der Pelletkessel wurden diese in verschiedenen Betriebszuständen im stationären Betrieb vermessen. Die Messanordnung der Stationärmessungen ist in Abbildung 3 zu sehen.



**Abbildung 3: Schematische Darstellung der Messanordnung für die Bestimmung von Nutzungsgraden bei stationären und instationären Betriebszuständen der Pellet-Kessel.**

Stationäre Betriebszustände wurden erreicht, indem Rücklauftemperatur, Durchfluss und Lastanforderung an die Pelletkessel so lange auf konstanten Werten gehalten werden bis sich die gemessenen Abgaswerte und Vorlauftemperaturen nicht mehr ändern. Der Zeitraum der ausgewerteten Daten betrug je Messpunkt mindestens eine Stunde. Es wurde analog zum Projekt PelletSolar-1 eine präzise Wärmemengenzählung und Messung des Brennstoffverbrauchs durchgeführt, um nach Formel 6 die Effizienz der Geräte zu bestimmen. Die Wärmemengenzählung basiert auf der Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen sowie des Durchflusses. Zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs wurde die Masse des Pellets-Lagers kontinuierlich erfasst. Damit Heizwert, Brennwert und Feuchte der verbrannten Pellets den Werten der Brennstoffanalyse die durch das Prüfinstitut Kaleb Brett ermittelt wurden entsprechen, wurden diese bei einer relativen Luftfeuchte von 50 % ± 5 % gelagert. Desweiteren wurde die elektrische Leistungsaufnahme und die Abgaszusammensetzung messtechnisch erfasst. Die Effizienz unter Berücksichtigung der mit Faktor 3 gewichteten elektrischen Leistungsaufnahme berechnet sich nach Formel 7. Zur Messung der Abgase wurde das neu in den Prüfstand und insbesondere in die automatisierte Messwerterfassung integrierte Abgasmessgerät der Firma Testo verwendet. Die Abgasmesswerte dienen insbesondere dazu, den feuerungstechnischen Wirkungsgrad zu bestimmen. Dieser wird nach Formel 8 berechnet.

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

**Formel 6**

$$\eta_{K,pe+el} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{Pellet} + F_{el} * P_{el}}$$

**Formel 7**

$$\eta_F = 1 - \frac{q_{ash} + q_{bc} + q_{fg}}{H_i}$$

**Formel 8**

### 3.2.2 Instationäre Betriebszustände

Die getesteten Pelletkessel sind in der Lage, ihre Wärmeleistung an die aktuelle Anforderung des Gebäudes anzupassen (Leistungsmodulation), weshalb die Wirkungsgrade der Pelletkessel in verschiedenen Betriebszuständen bestimmt wurden. In der Realität wird die Wärmelast allerdings häufig durch Ein/Aus Betrieb des Kessels gedeckt. Um den Einfluss dieses Betriebsverhaltens sowohl auf den Pelletbedarf als auch auf den Strombedarf zu untersuchen wurden mehrere Messungen im instationären Betrieb durchgeführt. Die Auswahl der zu erfassenden Betriebszustände erfolgte nach den im dynamischen Test auftretenden Betriebsverhalten.

Der Nutzungsgrad des Pelletkessels wird dann nach Formel 5 berechnet. Der Nutzungsgrad unter Berücksichtigung der mit Faktor 3 einberechneten elektrischen Leistungsaufnahme wird mit Formel 9 berechnet.

$$\zeta_{K,pe+el} = \frac{Q_{wat}}{Q_{Pellet} + F_{el} * E_{el}} \quad \text{Formel 9}$$

Der Nutzungsgrad der Pelletkessel ist unter anderem abhängig von den Verlusten an die Umgebung durch Strahlung und Konvektion und somit auch von der Temperatur des Pelletkessels. Da die Temperaturen des Pelletkessels bei verschiedenen Messungen nicht identisch sind wird ein Nutzungsgrad bestimmt, der auf eine Kesseltemperatur von 60 °C normiert ist. Dadurch können andere Einflüsse auf die Effizienz besser beurteilt werden. Die temperaturbereinigten Nutzungsgrade berechnen sich nach Formel 10 bis Formel 12.

$$\zeta_{K,60^{\circ}C} = \frac{Q_{wat} + Q_{temp\_corr}}{Q_{Pellet}} \quad \text{Formel 10}$$

$$\zeta_{K,pe+el,60^{\circ}C} = \frac{Q_{wat} + Q_{temp\_corr}}{Q_{Pellet} + F_{el} * E_{el}} \quad \text{Formel 11}$$

$$Q_{temp\_corr} = UA_{kessel,AK} * (\overline{T_{kessel}} - 60^{\circ}C) \quad \text{Formel 12}$$

### 3.2.3 Bestimmung der Abstrahl- und Konvektionsverluste

Im Regelfall wird bei der Messung von Kessel- und feuerungstechnischem Wirkungsgrad eine Differenz zwischen den beiden Werten festgestellt die zum grössten Teil in thermischen Verlusten des Kessels an die Umgebung zu erklären ist. Die von der Temperatur des Wasserkörpers abhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste des Kessels wurden ähnlich der Bestimmung von Wärmeverlusten von Solarspeichern nach der europäischen Prüfnorm prEN-12977-3 [8] gemessen. 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 von vier Stunden zwischen dem Konditionieren auf 60° C und der Entnahme der Wärme von 4 h. Aus den Messresultaten lässt sich der temperaturabhängige Wärmeverlustkoeffizient  $UA_{kessel,AK}$  berechnen (Formel 13 bis Formel 16).

$$UA_{kessel,AK} = -\ln\left(\frac{Q_{M_{therm}}(t)}{Q_{M_{therm}}(0)}\right) * \frac{M_{therm}}{t} \quad \text{Formel 13}$$

$$Q_{M_{therm}}(t) = (\theta_{start} - 20) * M_{therm} \quad \text{Formel 14}$$

$$Q_{M_{therm}}(0) = \Delta E - (\theta_{end} - 20) * M_{therm} \quad \text{Formel 15}$$

$$M_{therm} = \frac{\Delta E}{\Delta T} \quad \text{Formel 16}$$

### 3.2.4 Emissionen

Ergänzend zu diesen auf den Energieverbrauch fokussierten Messungen wurden auch Messungen zur Bestimmung des Emissionsausstosses an den Pelletkesseln durchgeführt. Zur Bewertung der Emissionen von Heizgeräten werden üblicherweise die Messungen im Stationärbetrieb (i.d.R. bei Voll-/Teillast) aus den Zulassungsprüfungen beigezogen. Diese Emissionswerte können aber unter Umständen von den Werten im dynamischen, praxisnahen Betrieb stark abweichen und sind somit nicht

zwingend repräsentativ. Insbesondere Start-/Stoppphasen oder Lastwechsel können massiv höhere Emissionswerte aufweisen. Für eine umfassende Bewertung des Gesamtsystems aus emissionstechnischer Sicht muss idealerweise das Verhalten des Pelletkessels im dynamischen Betrieb über das gesamte Jahr hinweg bekannt sein. Auf Basis der Systembetrachtung im Prüfstand des SPF wurden in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern (Horw) die im realen Betrieb relevanten Betriebszustände ermittelt [5]. Diese Betriebsphasen und Zustände wurden dann in Horw gemessen und die zugehörigen Emissionsfaktoren bestimmt. Diese Emissionsfaktoren wurden dann in die Simulationen des SPF integriert um jährliche Emissionsfrachten zu berechnen. Dabei wurden folgende Betriebsphasen betrachtet:

- Kaltstart
- Warmstart
- Stationärbetrieb
  - 100 %
  - 70 %
  - 50 %
  - 30 %
- Lastwechsel
  - 100 % → 70 %
  - 70 % → 50 %
  - 50 % → 70 %
  - 70 % → 100 %
- Stopp
  - 100 % → 0
  - 50 % → 0
- Taktbetrieb
  - Bei 100 %
  - Modulierendes Takten

### 3.3 MESSUNGEN AN DEN WÄRMESPEICHERN

Zur Bestimmung der thermischen Verluste des Speichers wurde der Wärmeverlustkoeffizient in gleicher Weise wie für den Pelletkessel bestimmt. Der einzige Unterschied ist in der Auskühlzeit zu finden. Bei den ungleich grösseren und besser gedämmten Solarspeichern beträgt diese in der Regel 48 h.

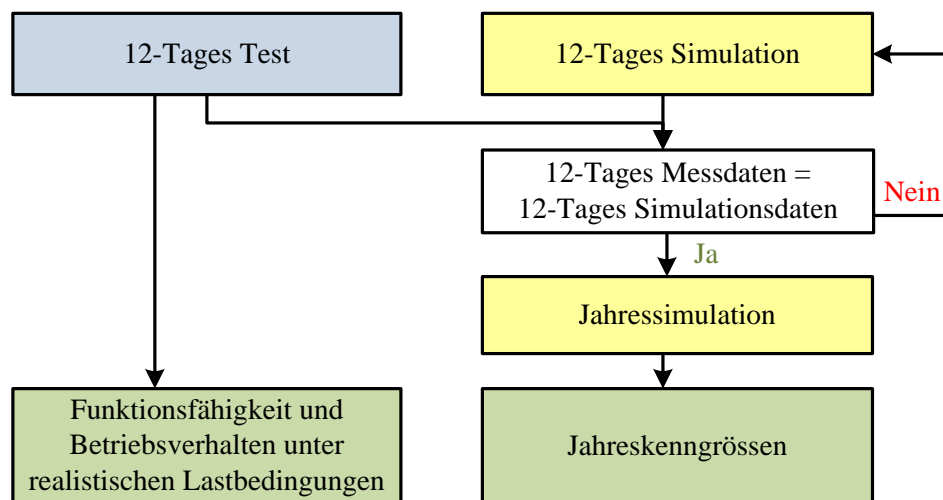
### 3.4 MODELLBILDUNG UND SIMULATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES JAHRESNUTZUNGS- GRADES

Der 12-Tages Test legt das Betriebsverhalten des Systems im Realbetrieb für weitgehend alle denkbaren Zustände offen und ist somit dazu geeignet, Fehlfunktionen zu erkennen und die Funktionalität des Gesamtsystems zu bewerten. Allerdings können die Messergebnisse des 12-Tage-Zyklus nicht direkt (über den Faktor 365/12) zu Jahreswerten extrapoliert werden, da die wichtigsten Faktoren des Systems (Heizung, Warmwasserverbrauch, Klimatische Verhältnisse, Gebäudelast, Einfluss des Speichervolumens) nicht einfachen linearen Abhängigkeiten folgen [1]. Aus diesem Grund ist ein Modell der Anlage zur Jahressimulation nötig. Dieses Modell wird mittels der Messdaten aus dem 12-Tages Test validiert. Dazu findet analog zur interaktiven Gebäudesimulation am Prüfstand das Simulationsprogramm TRNSYS Anwendung [9]. Dieses Programm ist modular aufgebaut. Es werden alle Komponenten des Systems integriert und analog der realen Regelung und Hydraulik miteinander verbunden. Die Simulation des Pelletkessels erfolgt dabei durch ein neu entwickeltes Modell das die wichtigsten Einflussfaktoren auf den Wirkungs-/ Nutzungsgrad möglichst genau abdeckt [10],[11]. Das simulierte Gebäude entspricht einem Einfamilienhaus mit einem Raumwärmebedarf von 15'500 kWh/a (Energiebezugsfläche 150 m<sup>2</sup>) unter den klimatischen Bedingungen des schweizerischen Mittellandes. Der Energiebedarf für Warmwasser beträgt 2'800 kWh/a.

Zur Anpassung der Simulation wurden die an den Schnittstellen zum Prüfstand gemessenen Energieflüsse als Eingabe an das Simulationsprogramm verwendet. Mittels einer Parameteridentifikation werden die Modell-Parameter so weit angepasst, bis die Rechenergebnisse und Messdaten des 12-Tage-Zyklus in engen Grenzen übereinstimmen (siehe Abbildung 4). Mit diesem validierten Modell können anschliessend Jahressimulationen durchgeführt werden um wichtige Jahreskenngrößen wie den Pellet-Verbrauch, Kesseljahresnutzungsgrad, Strombedarf und den solaren Eintrag zu ermitteln.

Durch die Integration der Emissionswerte bei unterschiedlichen Betriebszuständen (Messungen durchgeführt in Horw) ist es möglich auch Aussagen zur Jahresemissionsfracht zu machen.

Zusätzlich wurden in einem nächsten Schritt verschiedene Simulationsvarianten erstellt, die auf dem durch die Messdaten validierten Modell basieren, um Kennwerte dieser Varianten zu ermitteln, ohne weitere aufwändige Testes im Prüfstand durchzuführen.



**Abbildung 4: Vorgehensweise zur Ermittlung jahresbasierter Kennwerte.**

### 3.5 MESSTELLENVERZEICHNIS

In Abbildung 2 ist der Prüfstand schematisch inklusive der einzelnen Messstellen dargestellt. Die Messpunkte werden nachfolgend in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1: Tabellarische Darstellung der in Abbildung 2 eingezeichneten Messstellen.**

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
15a	El. Leistung	Kessel	kJ/h
15b	El. Leistung	Regeleinheit	kJ/h

## 4. Ergebnisse System 1

Im Projekt PelletSolar-2 wurden zwei komplette Kombisysteme mit Pelletkessel und Solaranlage getestet. Das System 1 besteht aus einem 10 kW Pelletkessel, der zusammen mit 12 m<sup>2</sup> thermischen Sonnenkollektoren einen bivalenten Pufferspeicher mit einem Volumen von 950 l belädt. Im Pufferspeicher ist eine Schichteinrichtung sowie ein Wärmeübertrager (WÜ) für den Solarkreis integriert (vgl. Abbildung 5). Zur Trinkwasserbereitung wird eine Frischwasserstation verwendet. Die Spezifikationen des Systems sind in Tabelle 2 dargestellt.

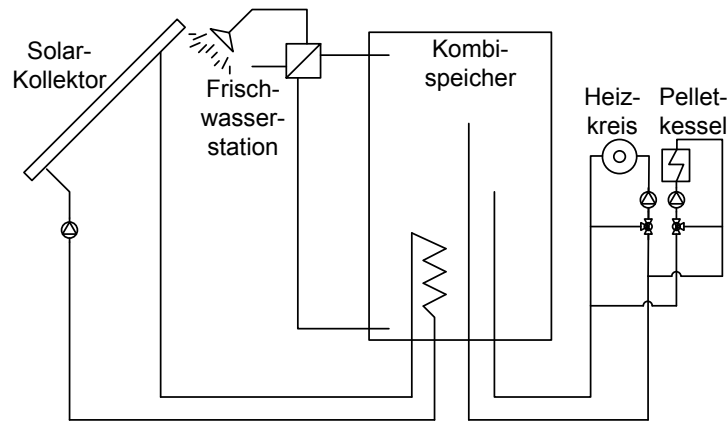


Abbildung 5: Vereinfachtes hydraulisches Schema des ersten getesteten Systems.

Tabelle 2: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 1. Die Daten der Simulationsvarianten sind analog zu den dargestellten Parametern.

<sup>(1)</sup> Bezogen auf die Bruttofläche des Kollektors

Parameter	Einheit	Wert
<b>Kesselkreis</b>		
Nennleistung Kessel	[kW]	10
Länge der Doppelleitung zur Wärmeverteilstation (Verbindung zwischen Speicher, Heizkreis und Kesselkreis)	[m]	5.4
Isolation der Leitung	[ – ]	–
<b>Solarkreis</b>		
Bruttofläche Kollektor	[m <sup>2</sup> ]	12
Konversionsfaktor $\eta_0^{(1)}$	[ – ]	0.765
Verlustbeiwert $a_1^{(1)}$	[W/(m <sup>2</sup> *K)]	2.87
Verlustbeiwert $a_2^{(1)}$	[W/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )]	0.024
Länge der Kollektorkreisleitung	[m]	15
Isolationsstärke der Kollektorleitung	[m]	0.02
<b>Speicher</b>		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	0.95
Höhe	[m]	1.95
Isolationsstärke	[m]	0.1

#### 4.1 SYSTEMTEST

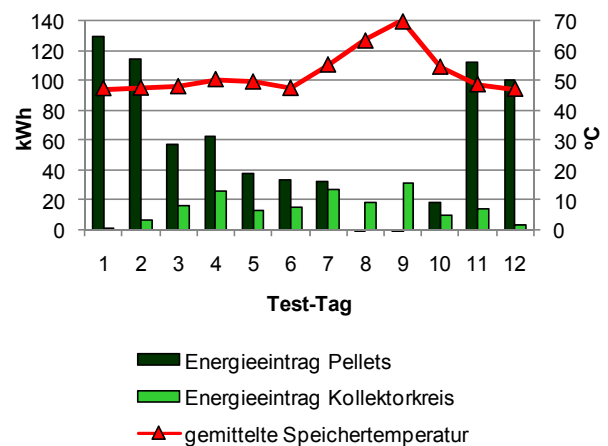
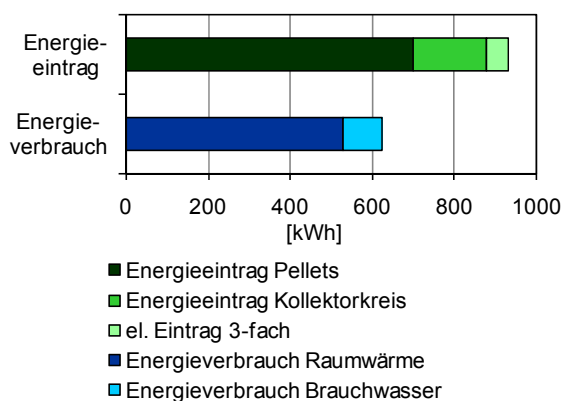
Es wurde ein 12-Tages Test nach der im Kapitel Methode dargestellten CCT-Methode durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgelistet sowie in Abbildung 6 und Abbildung 7 graphisch dargestellt.

Die Ausnützung des gesamten thermischen Eintrages während des 12-tägigen Prüfzyklus ( $\zeta_{S,pe+so}$ ) betrug 71.1 %. Unter Berücksichtigung des gesamten Energieeintrages inklusive der elektrischen Leistungsaufnahme ( $\zeta_{S,pe+so+el}$ ) beträgt der Nutzungsgrad lediglich 60.2 %. Zur Beurteilung des nicht-solaren Energiebedarfs der Anlage ist der Anlagennutzungsgrad unter Berücksichtigung des Bedarfs an Brennstoff und elektrischer Hilfsenergie ( $\zeta_{S,pe+el}$ ) ausschlaggebend. Dieser beträgt 72.8 %.

Die Laufzeit des Pelletkessel während der Prüfzeit (288 h) betrug insgesamt 74.9 h (26%) bei 44 Starts des Brenners. Eine Anpassung der Leistung des Pelletkessel an die jeweilige Last konnte nicht erreicht werden, d.h. der Pelletkessel zeigte ein taktendes Betriebsverhalten (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). Der Nutzungsgrad des Pelletkessel ( $\zeta_K$ ) beträgt 79.8 %.

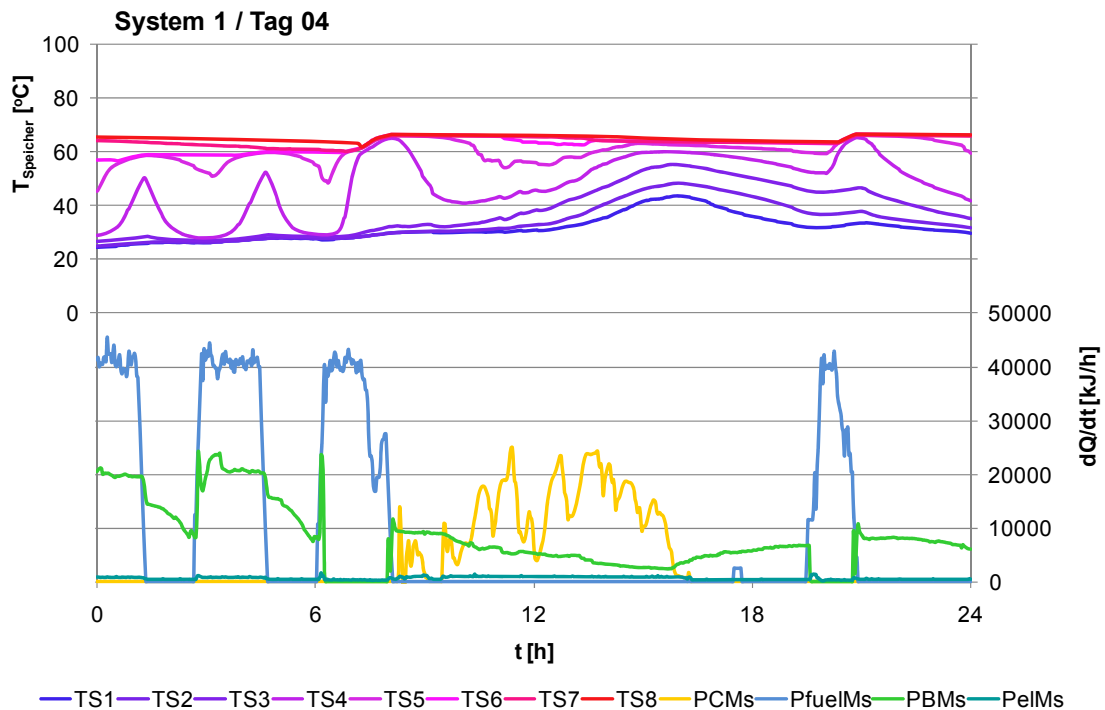
**Tabelle 3: Übersicht der Messergebnisse des 12-tägigen Systemtests von System 1.**

		System 1
Energieeintrag Pellets	[kWh]	698.7
Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	180.1
el. Leistungsaufnahme	[kWh]	53.3
Energieverbrauch Raumwärme	[kWh]	529.3
Energieverbrauch Brauchwasser	[kWh]	95.7
Anzahl Brennerstarts	[ – ]	44
Laufzeit Pelletkessel	[h]	74.9
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	50.2
Delta Speicher-Energieinhalt	[kWh]	-0.9
$\zeta_{S,pe+so+el}$	[%]	60.2
$\zeta_{S,pe+so}$	[%]	71.1
$\zeta_{S,pe+el}$	[%]	72.8
$\zeta_{S,pe}$	[%]	89.5
$\zeta_K$	[%]	79.8

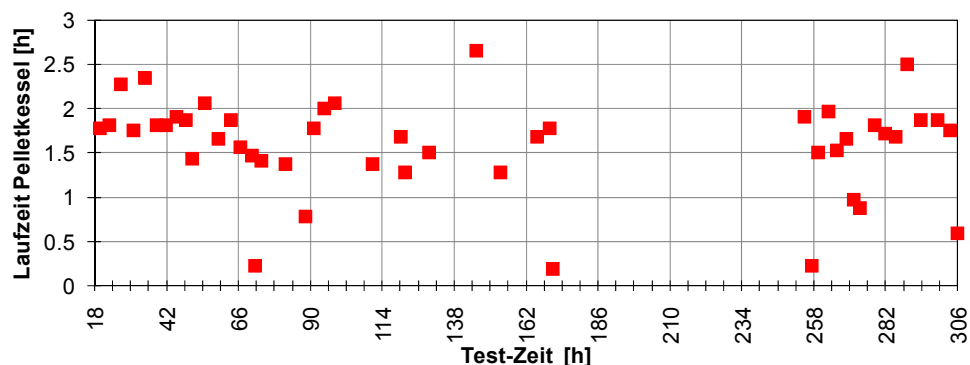


**Abbildung 6: Energieeintrag und Energieverbrauch des 12-tägigen Systemtests von System 1.**

**Abbildung 7: Energieeintrag durch Pellets und Kollektorkreis und gemittelte Speichertemperatur an den 12 Testtagen aus System 1.**



**Abbildung 8: Auszug aus dem 12-Tages Test. Abgebildet ist der Verlauf des vierten Test-Tages. TS1 bis TS8 = Speichertemperaturen; PCMs = Leistung Kollektorkreis; PfuelMs = Brennstoffbezogene Kesselleistung; PBMs = Leistung Gebäudekreis.**



**Abbildung 9: Laufzeiten pro Start des Pelletkessels während des 12-Tage Tests aus System 1.**

## 4.2 MESSUNGEN DES PELLETKESSELS

Der Pelletkessel wurde als einzelne Komponente umfangreichen Tests zur Bestimmung der Effizienz und der Emissionen unterzogen. Die Ergebnisse der Messungen sind nachfolgend gezeigt.

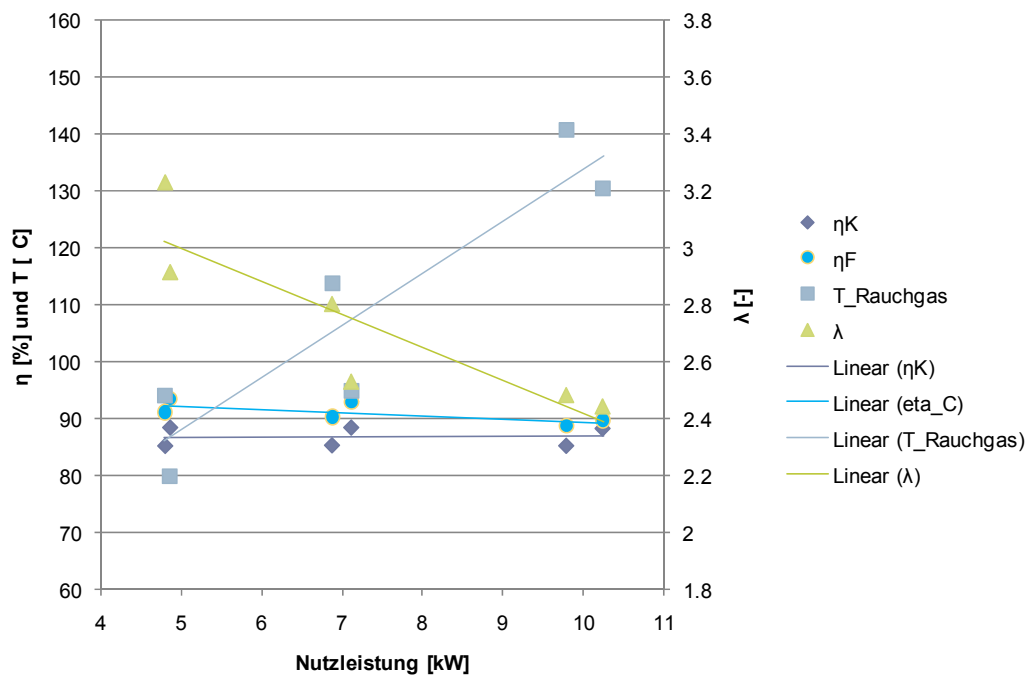
### 4.2.1 Stationäre Betriebszustände

Die stationären Wirkungsgrade des Kessels wurden bei einer Rücklauftemperatur von 50 °C und 70 °C in jeweils drei verschiedenen Leistungsstufen bestimmt. Der Durchfluss wurde jeweils so eingestellt dass eine Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur von ca. 10 K resultierte. Die gewählten 50 °C entsprechen der eingestellten Temperatur der Rücklaufhochhaltung des Kessels. Bei 70 °C Rücklauftemperatur wird die höchst mögliche Vorlauftemperatur von 80 °C erreicht.

Der Kessel arbeitete mit einem Luftüberschuss  $\lambda$  von 2.4 bei Nennleistung und bis zu 3.2 in Teillast. Die Temperatur des Rauchgases beträgt je nach Feuerungsleistung und Rücklauftemperatur zwischen 80 °C und 140 °C. Der resultierende Kesselwirkungsgrad stellte sich bei einer niedrigen Rücklauftemperatur unabhängig von der Nutzleistung relativ konstant auf 88 % ein während er mit 70 °C Rücklauftemperatur 85 % beträgt. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen (SM1 bis SM6) sind im Anhang in Tabelle 10 dargestellt.

Die feuerungstechnischen Wirkungsgrade liegen in Abhängigkeit von der Modulationsstufe und der Kesseltemperatur zwischen 88.7 % (bei Nennleistung und einer Vorlauftemperatur von 77.3 °C) und

93.4 % (bei Teillast und einer Vorlauftemperatur von 62.2 °C). Die Differenz zwischen Kessel- und feuerungstechnischem Wirkungsgrad ist bei der kleinsten Leistung am Grössten (siehe Abbildung 10).



**Abbildung 10: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad ( $\eta_F$ ), Kesselwirkungsgrad ( $\eta_K$ ), Rauchgastemperatur ( $T_{\text{Rauchgas}}$ ) und Luftüberschuss ( $\lambda$ ) bei verschiedenen Modulationsstufen des Kessels im stationären Zustand. Es sind die Messungen SM1 – SM6 abgebildet.**

Die Bestimmung der temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste bei ausgeschaltetem Brenner ergab einen Wert von 24.6 kJ/(h\*K) bei einer thermischen Masse von 360 kJ/K.

#### 4.2.2 Instationäre Betriebszustände

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen an Pelletkessel 1 im taktenden Betrieb präsentiert (TM1 – TM3; vgl. Tabelle 4).

In Messung TM1 wurde bei einer durchschnittlichen abgegebenen Leistung von 3.66 kW und durchgehendem Pumpenbetrieb ein Nutzungsgrad von 79.8 % erreicht. Der Betriebszustand mit durchgehendem Pumpenbetrieb entspricht dabei demjenigen einer Pelletheizung ohne Pufferspeicher. Unter Berücksichtigung der elektrischen Hilfsenergie für die Zündung, die Ventilatoren und die Kessel-Pumpe resultiert ein Nutzungsgrad von 75.9 %.

In Messung TM2 betrug die durchschnittliche abgegebene Leistung 2.67 kW. Die Kessel-Pumpe wurde mit einer Nachlaufzeit von 15 min betrieben. In dieser Messung wurde ein Nutzungsgrad von 75.7 % ohne Einbezug der elektrischen Hilfsenergie und 71.9 % mit Einbezug der elektrischen Hilfsenergie gemessen.

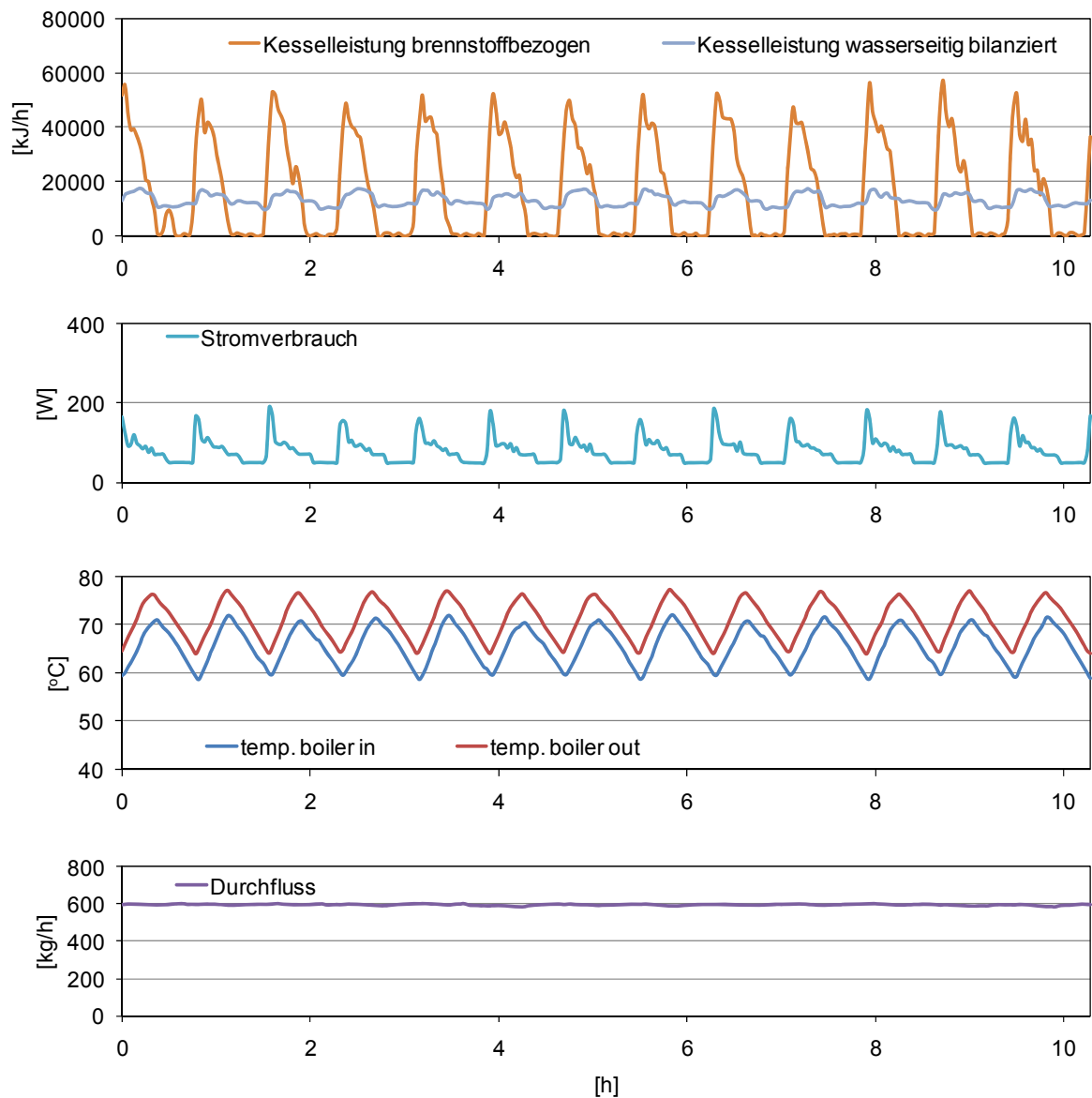
Die Taktzyklen der Messung TM3 entsprechen in etwa denjenigen Betriebszuständen, die während des 12-Tages Tests im Betrieb über einen Pufferspeicher aufgetreten sind. Hier beträgt der Nutzungsgrad 85.5 %. Der gemessene Kesselwirkungsgrad im Stationärbetrieb bei ähnlicher Nutzleistung und Kesseltemperatur (SM1) beträgt 88.4 %.

**Tabelle 4: Ergebnisse der Messungen im taktenden Betrieb (TM1 – TM3) sowie der Stationärmessung SM1 von Kessel 1.**

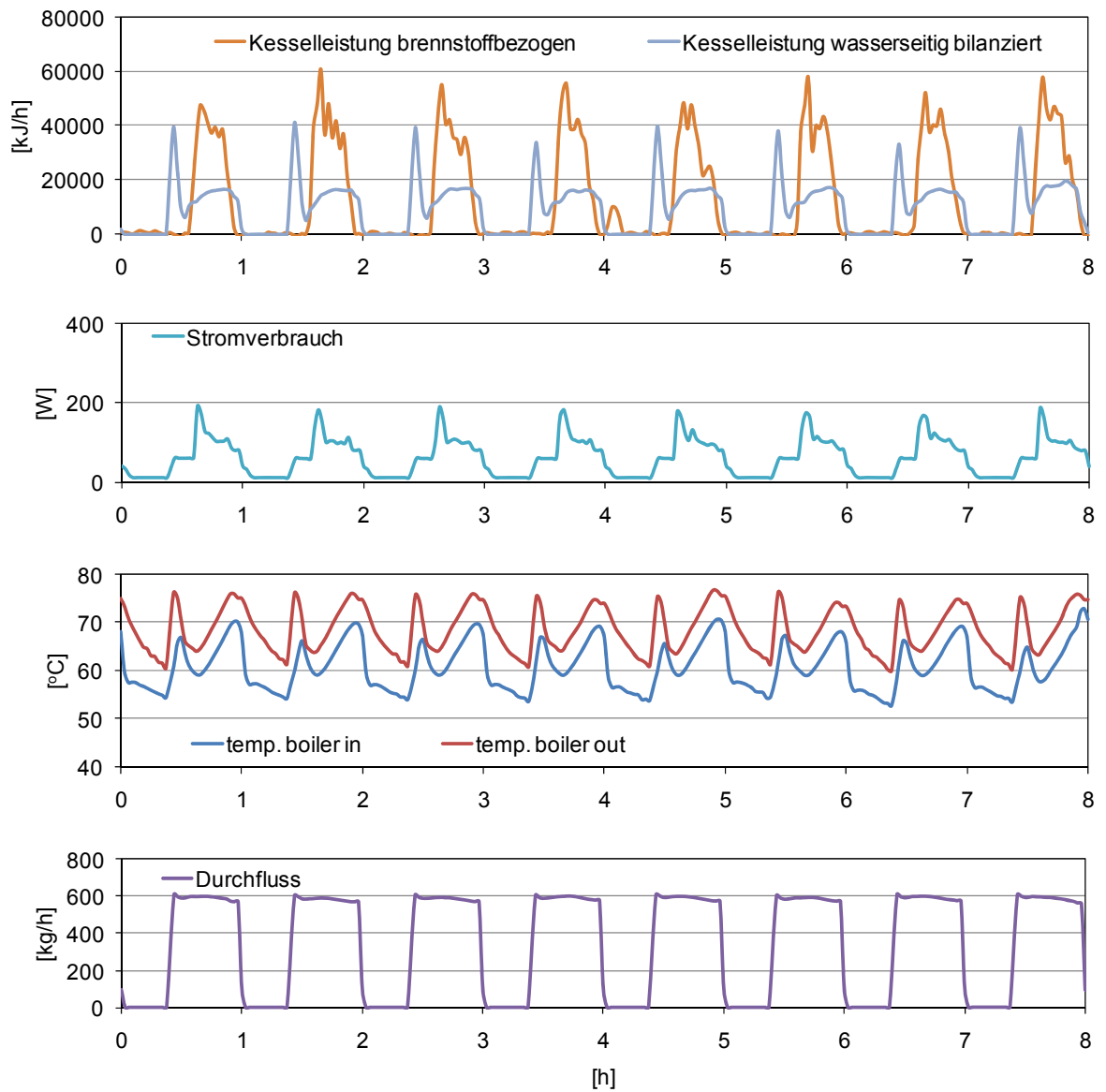
<sup>(1)</sup>Pumpe im Dauerbetrieb.

		TM1	TM2	TM3	SM1
Durchschnittliche Feuerungs-Leistung (bezogen auf $H_i$ )	[kW]	4.59	3.52	5.95	5.50
Durchschnittliche abgegebene Leistung (wasserseitig bilanziert)	[kW]	3.66	2.67	5.08	4.86
Durchschnittliche gemessene elektrische Leistung	[W]	79	61	72	75
Dauer Brenner ein	[min]	24.5	23.6	107.8	immer ein
Dauer Brenner aus	[min]	22.4	36.3	72.2	-
Nachlaufzeit Pumpe	[min]	-( <sup>(1)</sup> )	15	5	( <sup>(1)</sup> )
Nutzungsgrad (Formel 5)	[%]	79.8	75.7	85.4	88.4
Elektrizitätsbereinigter Nutzungsgrad (Formel 9)	[%]	75.9	71.9	82.4	84.9
Temperaturbereinigter Nutzungsgrad (Formel 10)	[%]	80.0	75.9	85.5	88.6
Temperatur- und elektrizitätsbereinigter Nutzungsgrad (Formel 11)	[%]	76.0	72.1	82.5	85.1

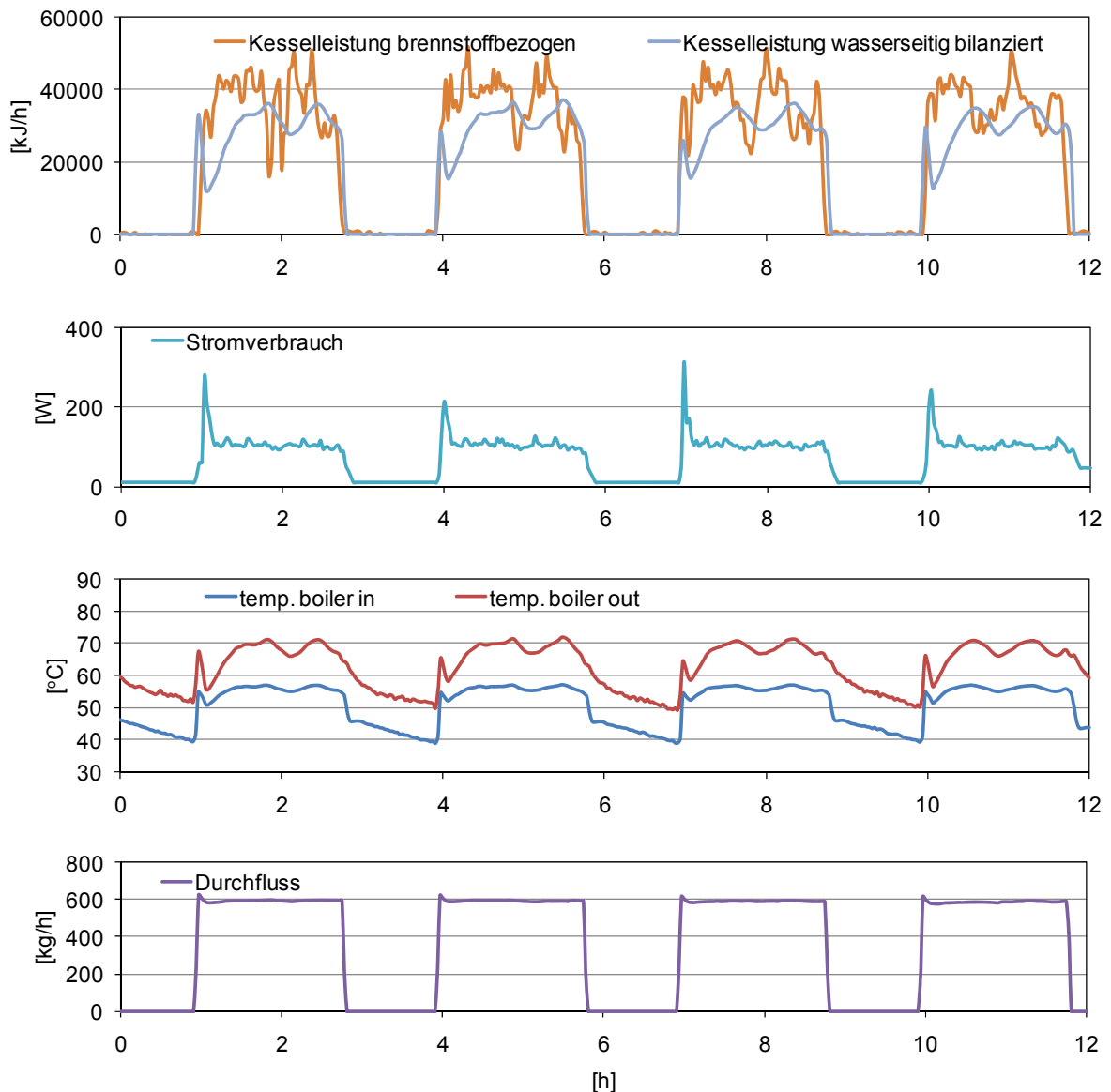
Der Verlauf von Leistung (Nutz- und Brennstoffleistung), Temperaturen (Vor- und Rücklaufftemperatur), Stromverbrauch und Durchfluss der einzelnen Messungen (TM1 bis TM3) sind in Abbildung 11 bis Abbildung 13 dargestellt. Der Stromverbrauch während des Startens ist abhängig von der Dauer der Aus-Phase. Bei kurzen Taktzyklen ist nur ein niedriger Strombedarf im Kesselstart zu erkennen. Dagegen ist der Strombedarf für den Betrieb der Pumpe mit 50 W (siehe Abbildung 11) eher als hoch einzuschätzen.



**Abbildung 11: Verlauf verschiedener Grössen der ersten Messung im taktenden Betrieb des Pelletkessel aus System 1 (TM1).**



**Abbildung 12: Verlauf verschiedener Grössen der zweiten Messung im taktenden Betrieb des Pelletkessel aus System 1 (TM2).**

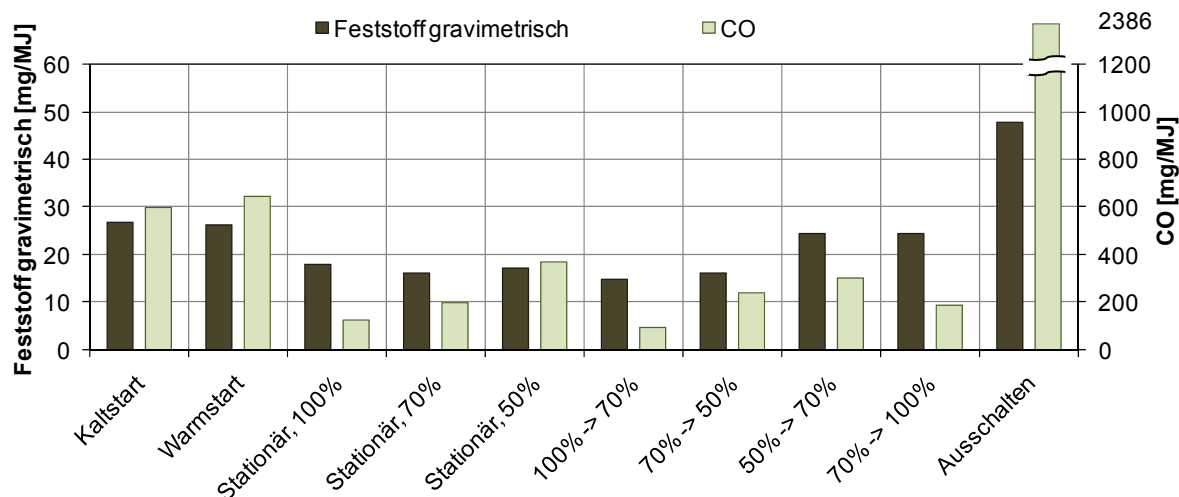


**Abbildung 13: Verlauf verschiedener Größen der dritten Messung im taktenden Betrieb des Pelletkessel aus System 1 (TM3).**

#### 4.2.3 Emissionsfaktoren

Nach Abschluss der Messungen am Kombiteststand des SPF wurden im Labor der HSLU in Horw die Emissionen des Pelletkessel in Abhängigkeit des Betriebszustandes ermittelt [5]. Die zur Ermittlung der Jahresemissionsfrachten nach der hier durchgeführten Methode nötigen Daten sind dabei die Emissionsfaktoren während der verschiedenen Betriebsphasen mit Angabe der jeweils zugehörigen Dauer und zugeführter Energie. Diese Daten sind nachfolgend in Tabelle 11 im Anhang dargestellt.

In Abbildung 14 sind die Emissionsfaktoren der getesteten Betriebszustände von Kohlenmonoxid und gravimetrisch gemessenem Staub zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die spezifischen CO-Emissionen analog zum zuvor gemessenen Luftüberschuss der Verbrennung mit abnehmender Last steigen (etwa um den Faktor 2.5 bei 50% Last verglichen mit 100% Last). Die Startphase hat etwa 6fach höhere spezifische CO-Emissionen als der stationäre Volllastbetrieb, die Ausbrandphase etwa 20fach höhere CO-Emissionen. Demgegenüber verursacht der Teillastbetrieb mit hohem Luftüberschuss und erhöhten CO-Emissionen praktisch keine Erhöhung der Emission von Gesamtstaub. Die Staub-Emissionen in instationären Betriebszuständen (Start- und Ausbrandphase, Lastwechsel) steigen im Vergleich zu stationären Betriebszuständen leicht an.



**Abbildung 14: Gemessene Emissionsfaktoren des Pelletkessel 1 in Abhängigkeit des Betriebszustandes. Angabe in [mg/MJ]. Als Basis für die Energie in [MJ] dient die zugeführte Energie in Form des Heizwertes.**

Sowohl die Start- und Ausbrandphasen als auch der Teillastbetrieb führten im Test zu erhöhten Emissionen an gasförmigen Kohlenwasserstoffen.

#### 4.3 MODELLBILDUNG UND SIMULATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES JAHRESNUTZUNGS- GRADES

Auf der Basis der im Prüfstand aufgenommenen Messdaten wurde ein Simulationsmodell des getesteten Kombisystems erstellt. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden zwei weitere Varianten des Systems simuliert. Eine Beschreibung der Modelle befindet sich in Tabelle 5.

**Tabelle 5: Überblick der auf dem getesteten System 1 basierenden Simulationsmodelle.**

Variante	Beschreibung
JS1-V0	Pellet-Heizung ohne Solaranlage. Der Pelletkessel wurde nach den vorhandenen Messdaten (SM1 – SM6, TM1 – TM3) parametrisiert. Der Kessel ist über eine hydraulische Weiche in das System eingebunden. Ein 300 l Warmwasserspeicher wird durch einen internen WÜ erwärmt. Die Raumheizung wird direkt bedient.
JS1-V1	Basisvariante: Kombisystem mit Pelletkessel und Solaranlage entsprechend dem im Prüfstand gemessenen System 1.
JS1-V2	Modell zur Jahressimulation analog der Variante JS1-V1 aber mit veränderter Regelung um die Leistungsmodulation des Pelletkessel zu ermöglichen und so die Laufzeit des Kessel zu verlängern.

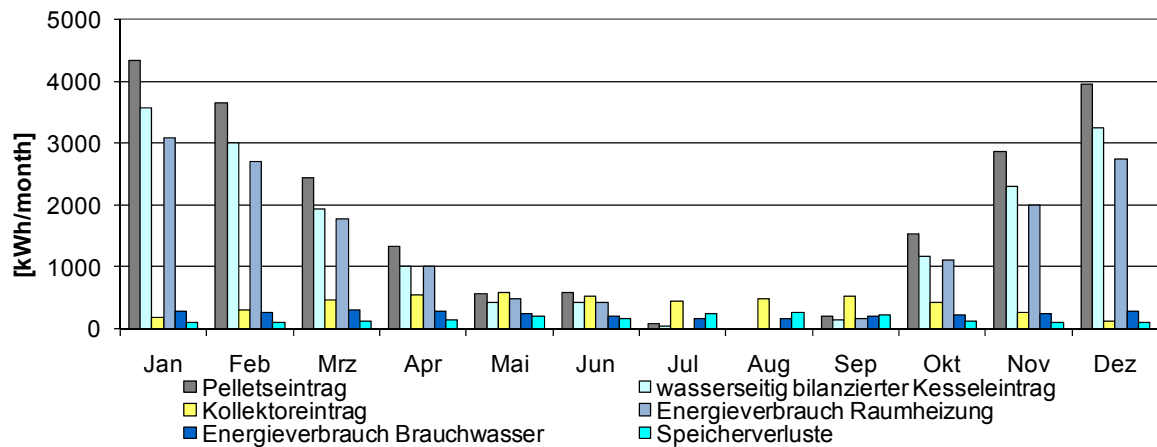
Die Simulationsergebnisse der Basisvariante sind grafisch in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. In tabellarischer Form sind die Ergebnisse betreffend des Energieverbrauchs in Tabelle 13 dargestellt. Tabelle 14 und Tabelle 15 zeigen die Jahresemissionsfrachten und die spezifischen Emissionen.

Der Pelletkessel des Kombisystems verbraucht 21.2 MWh/a an Pellets. Diese Energie wird mit einem Jahresnutzungsgrad des Pelletkessels ( $\zeta_K$ ) von 81.3 % bei 1'372 Brennerstarts umgesetzt. Die Laufzeit des Kessels beträgt 1734 h in Volllast. Die Kollektoren liefern 4.9 MWh/a. Der Strombedarf der gesamten Anlage beträgt 1.4 MWh/a oder 5 % des thermischen Eintrags. Die grössten Verluste des Systems verursacht der Pelletkessel mit 4.2 MWh/a. Durch die nicht gedämmten Leitungen des Kes-

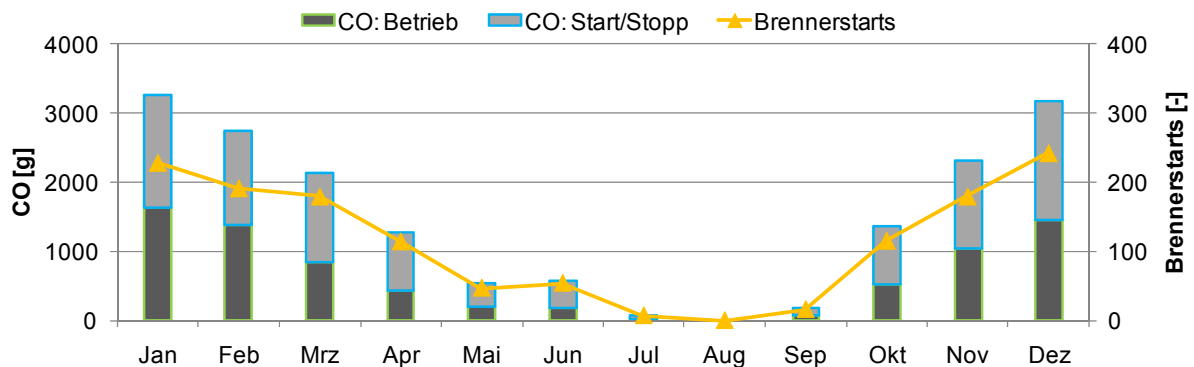
<sup>1</sup> Im Simulationsmodell der Pellet-Heizung ohne Solaranlage wurden Änderungen im Vergleich zu den im Jahresbericht 2009 [19] veröffentlichten Daten gemacht: Die Kesselkreispumpe zwischen der hydraulischen Weiche und dem Pelletkessel ist neu während der gesamten Heizperiode in Betrieb um den Komfort im Gebäude sicher zu stellen. Diese Änderung beeinflusst insbesondere die Anzahl der Brennerstarts.

selkreises summieren sich die Verluste durch die Leitungen mit 1.9 MWh/a auf dieselbe Menge wie die Verluste durch den Speicher.

Der Nutzungsgrad bezogen auf die thermische Energie  $\zeta_{S,pe+so}$  beträgt 70.2 %. Wird zusätzlich die elektrische Energie (gewichtet mit dem Faktor 3) berücksichtigt resultiert ein Nutzungsgrad  $\zeta_{S,pe+so+el}$  von 60.6 %.



**Abbildung 15: Ergebnis der Jahressimulation des im Prüfstand vermessenen Kombisystems mit Pelletkessel und Solaranlage in Monatswerten.**



**Abbildung 16: Simulierte CO-Emissionen aus JS1-V1 in Monatswerten, aufgeteilt auf Emissionen resultierend aus dem Stationärbetrieb sowie der Starts und Stopps.**

Das Simulationsmodell JS1-V2 ist nahezu identisch zur Basisvariante der Anlage. Es wurde lediglich die Regelung verändert. Um eine Leistungsmodulation zu ermöglichen wurden bei einer Leistungsanforderung durch die Raumheizung die Solltemperatur und der Durchfluss des Kessels abgesenkt. Dadurch ist der Kessel in der Lage bei einer Rücklauftemperatur von 50 °C und einem Durchfluss von 400 kg/h die geforderte Temperatur von 60 °C mit 50 % der Nennleistung zu erreichen. Bei einer höheren Heizlast wird das Einschaltkriterium des Fühlers zur Warmwasser-Bereitstellung erreicht ohne dass der Komfort zur Deckung der Heizlast unterschritten wird. Diese regelungstechnischen Änderungen führen zu einer Reduktion der Brennerstarts um mehr als 60 %. Die durchschnittliche Leistung des Pelletkessel während der Betriebszeit von 2792 h beträgt 7 kW. Der Pellet-Verbrauch wird durch die Massnahmen allerdings kaum reduziert und der Stromverbrauch sogar leicht erhöht da die Laufzeit des Kessels und der Pumpe des Solarkreises erhöht werden. Insgesamt resultieren leicht verbesserte Nutzungsgrade dieser Simulationsvariante im Vergleich zur Basisvariante. Die Emissionen verschlechtern sich durch die hohen Emissionswerte bei Teillast zum Teil um mehr als 100 % (flüchtige Kohlenwasserstoffe).

Die Simulationsvariante ohne Solaranlage und Kombispeicher (JS1-V0) hat einen Brennstoffbedarf von 26.1 MWh/a bei einem Jahresnutzungsgrad des Pelletkessel von 79.1 %. Dieser leistet während der 3241 Betriebsstunden durchschnittlich 8 kW bezogen auf den Brennstoff. Die jährlichen CO-Emissionen sind im Vergleich zur Basisvariante JS1-V1 mehr als verdoppelt, bezogen auf den Brennstoff erhöhen sich die CO-Emissionen um 67.5 % auf 386.6 mg/MJ.

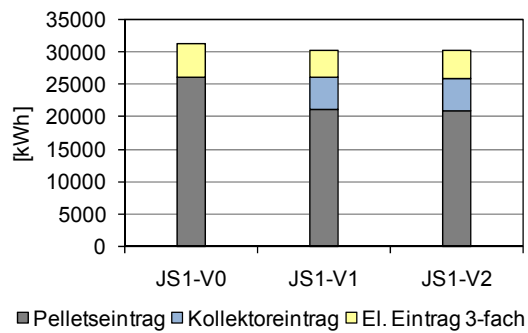


Abbildung 17: Abbildung des jährlichen Energie-eintrages.

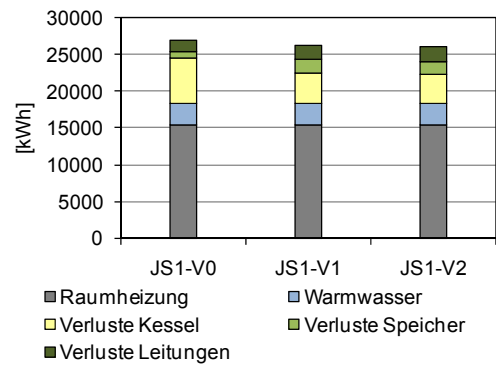


Abbildung 18: Darstellung des Energieverbrauchs und der Verluste.

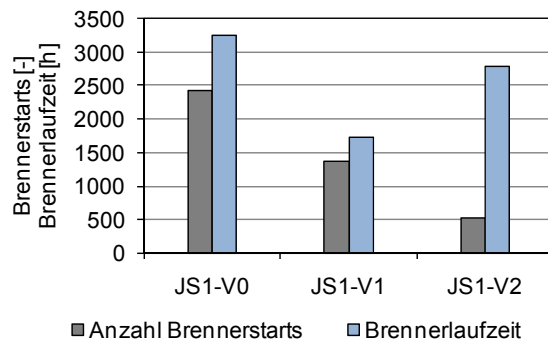


Abbildung 19: Anzahl der Brennerstarts und Laufzeit des Pelletkessel.

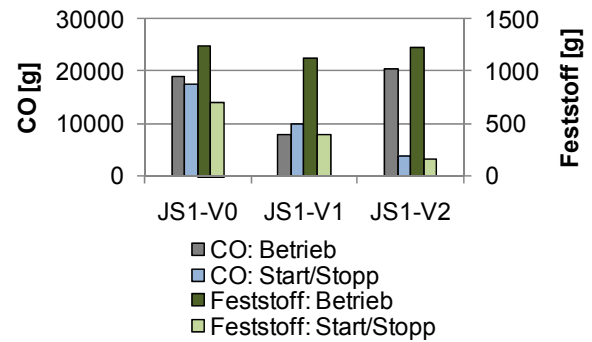


Abbildung 20: CO- und Feststoff (Staub) Emissionen aufgeteilt auf Emissionen resultierend aus dem Stationärbetrieb sowie den Start- und Stopp-Phasen.

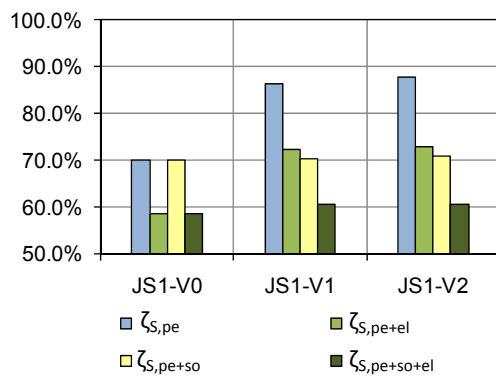


Abbildung 21: Systemnutzungsgrade der verschiedenen Modelle.

## 5. Ergebnisse System 2

Das zweite getestete Kombisystem besteht aus einem 12 kW Pelletkessel, einem bivalenten Kombispeicher mit 750 l Volumen und einer Solaranlage mit 12.5 m<sup>2</sup>. Der Kombispeicher ist ein Tank-in-Tank Speicher mit internem WÜ für den Kollektorkreis (vgl. Abbildung 22). Die Spezifikationen des Systems sind in Tabelle 6 dargestellt. System 2 hat im Vergleich zu System 1 einen nur geringfügig leistungsstärkeren Kessel, eine fast gleiche Kollektorfeldgrösse, aber ein geringeres Speichervolumen und eine andere Methode zur Trinkwarmwassererwärmung.

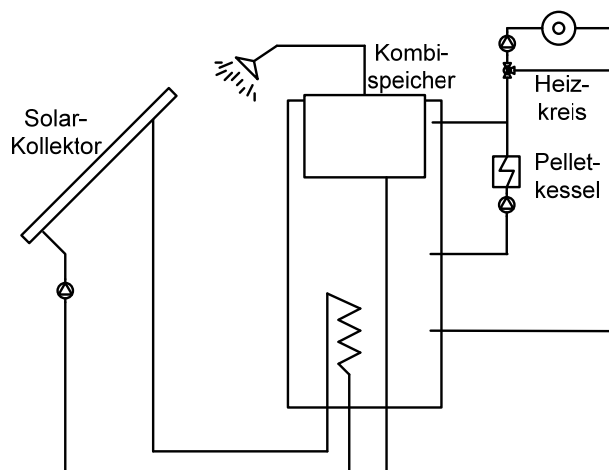


Abbildung 22: Vereinfachtes hydraulisches Schema des zweiten getesteten Systems.

Tabelle 6: Parameter des im Prüfstand gemessenen System 2. Die Daten der Simulationsvarianten sind analog zu den dargestellten Parametern.

<sup>(1)</sup>Bezogen auf die Bruttofläche des Kollektors

Parameter	Einheit	Wert
<b>Kesselkreis</b>		
Nennleistung Kessel	[kW]	12
Länge der Doppelleitung zur Wärmeverteilstation (Verbindung zwischen Speicher, Heizkreis und Kesselkreis)	[m]	5
Isolationsstärke der Leitung	[m]	0.02
<b>Solarkreis</b>		
Bruttofläche Kollektor	[m <sup>2</sup> ]	12.5
Konversionsfaktor $\eta_0^{(1)}$	[ – ]	0.81
Verlustbeiwert $a_1^{(1)}$	[W/(m <sup>2</sup> *K)]	3.844
Verlustbeiwert $a_2^{(1)}$	[W/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )]	0.0107
Länge der Kollektorkreisleitung	[m]	15
Isolationsstärke der Kollektorleitung	[m]	0.02
<b>Speicher</b>		
Inhalt	[m <sup>3</sup> ]	0.75
Höhe	[m]	1.92
Isolationsstärke	[m]	0.1

## 5.1 SYSTEMTEST

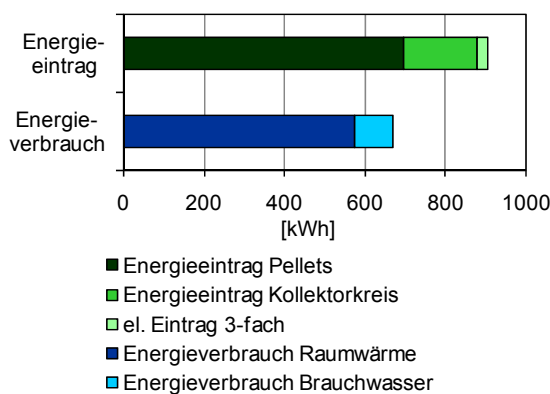
Während des 12-tägigen dynamischen Tests wurden dem System 697.5 kWh Brennstoffenergie und 180.3 kWh Wärme durch den Kollektorkreis zugeführt. Der Energieverbrauch für Raumwärme und Brauchwasser betrug 667.8 kWh. Somit wurde der thermische Eintrag zu 76.1 % ausgenutzt ( $\zeta_{S,pe+so}$ ). Wird zusätzlich die elektrische Leistungsaufnahme von 27.6 kWh berücksichtigt resultiert ein Nutzungsgrad ( $\zeta_{S,pe+so+el}$ ) von 69.5 %.

Die Laufzeit des Pelletkessel betrug 74.5 h. Es wurden während der Prüfdauer 74 Starts des Brenners gezählt. Somit betrug die durchschnittliche Laufzeit des Pelletkessel lediglich eine Stunde (vgl. Abbildung 26). In Abbildung 25 ist ein Auszug aus den Messdaten des 12-Tages Tests zu sehen. Hier wird wiederum die taktende Betriebsweise des Pelletkessels deutlich.

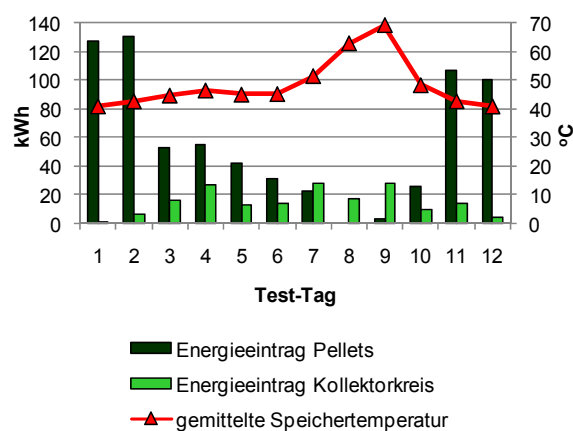
In Abbildung 23 ist der kumulierte Energieeintrag und Energieverbrauch der Anlage während des Tests zu sehen, während Abbildung 24 den Energieeintrag und die Speichertemperaturen der einzelnen Testtage zeigt.

**Tabelle 7: Ergebnisse des 12-Tages Tests von System 2.**

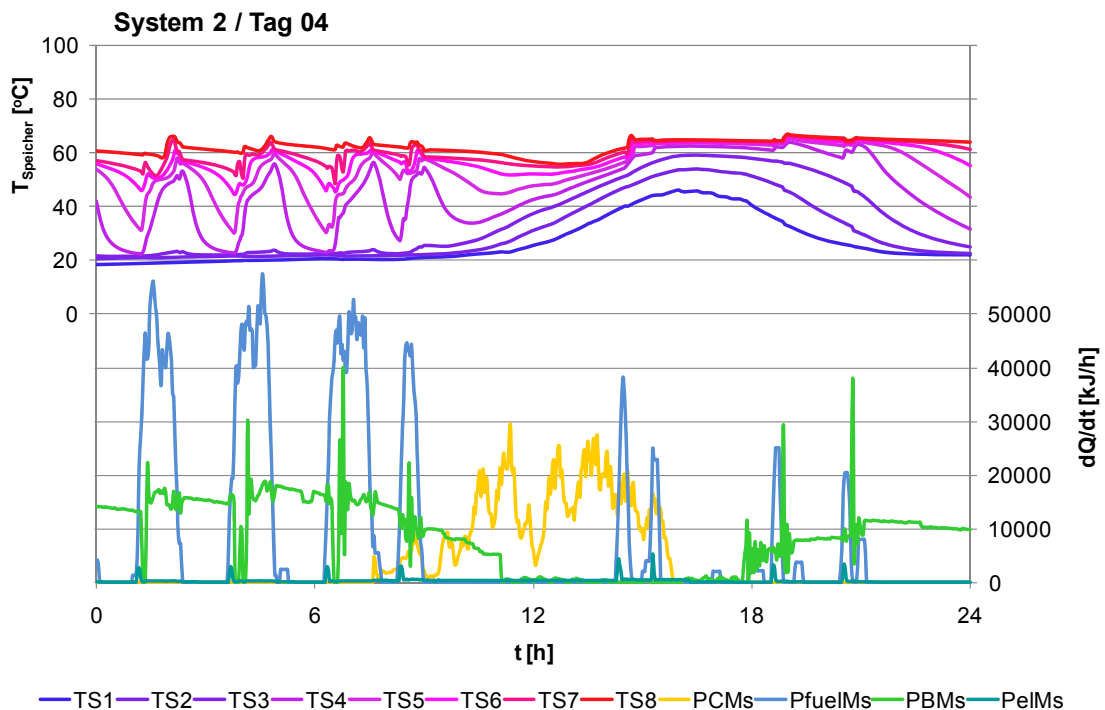
		System 2
Energieeintrag Pellets	[kWh]	697.5
Energieeintrag Kollektorkreis	[kWh]	180.3
el. Leistungsaufnahme	[kWh]	27.6
Energieverbrauch Raumwärme	[kWh]	575.0
Energieverbrauch Brauchwasser	[kWh]	92.8
Anzahl Brennerstarts	[ - ]	74
Laufzeit Pelletkessel	[h]	74.5
Durchschnittliche Speichertemperatur	[°C]	48.4
Delta Speicher-Energieinhalt	[kWh]	0.7
$\zeta_{S,pe+so+el}$	[%]	69.5
$\zeta_{S,pe+so}$	[%]	76.1
$\zeta_{S,pe+el}$	[%]	85.6
$\zeta_{S,pe}$	[%]	95.7
$\zeta_K$	[%]	85.3



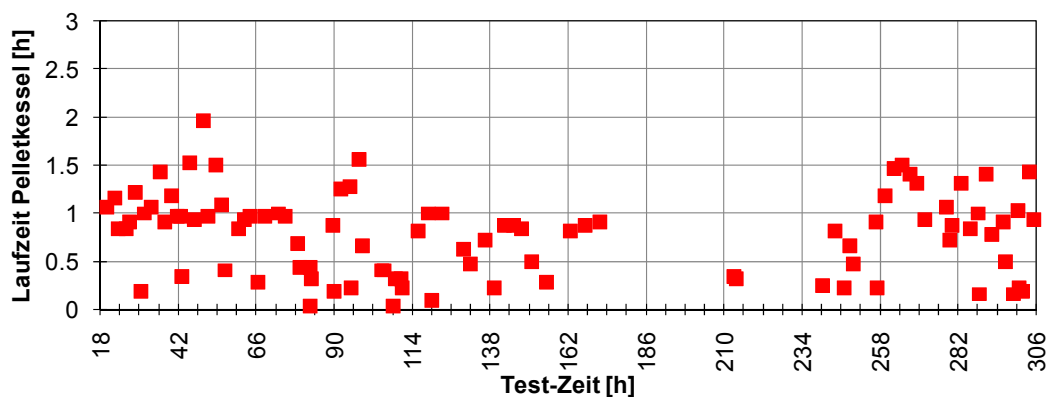
**Abbildung 23: Energieeintrag und Energieverbrauch des 12-tägigen Systemtests von System 2.**



**Abbildung 24: Energieeintrag durch Pellets und Kollektorkreis und gemittelte Speichertemperatur an den 12 Testtagen aus System 2.**



**Abbildung 25: Auszug aus dem 12-Tages Test. Abgebildet ist der Verlauf des vierten Test-Tages. TS1 bis TS8 = Speichertemperaturen; PCMs = Leistung Kollektorkreis; PfuelMs = Brennstoffbezogene Kesselleistung; PBMs = Leistung Gebäudekreis; PelMs = El. Strombezug.**



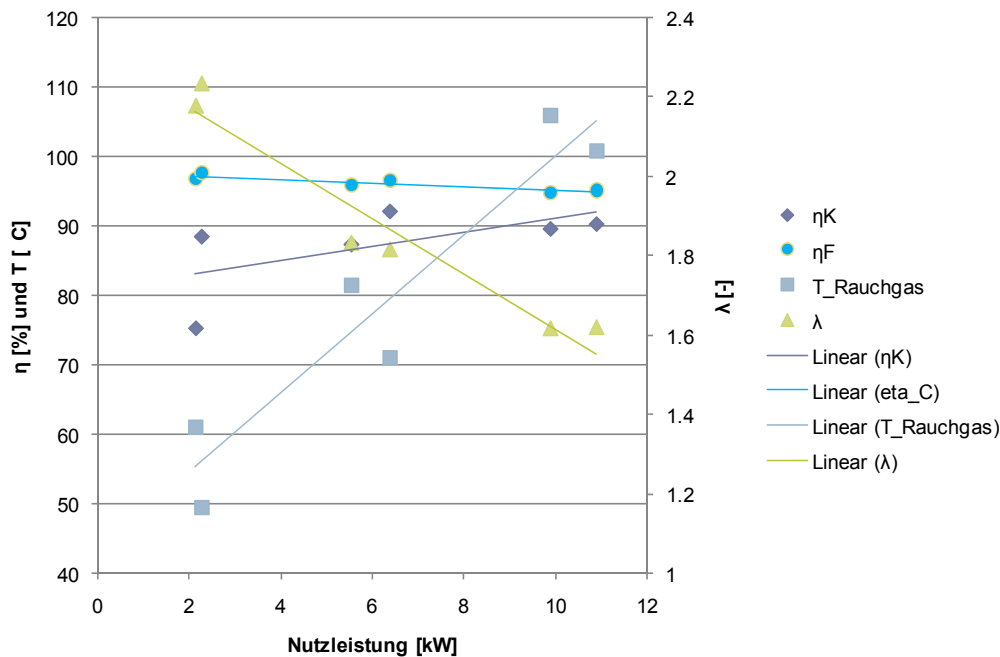
**Abbildung 26: Laufzeiten pro Start des Pelletkessels während des 12-Tage Tests des System 2.**

## 5.2 MESSUNGEN DES PELLETKESSELS

Der Pelletkessel wurde umfangreichen Tests zur Bestimmung der Effizienz und der Emissionen in verschiedenen Betriebszuständen unterzogen. Nachfolgend sind die Ergebnisse dieser Messungen gezeigt.

### 5.2.1 Stationäre Betriebszustände

Die stationären Wirkungsgrade des Kessels wurden bei einer Rücklaufftemperatur von 45 °C und verschiedenen Leistungsstufen sowie bei einer Vorlauftemperatur von 85 °C und ebenfalls verschiedenen Leistungsstufen bestimmt. Dabei entsprechen die 45 °C der tiefst möglichen Rücklaufftemperatur und die 85 °C der maximal erlaubten Vorlauftemperatur. Der Kessel arbeitete mit einem Luftüberschuss  $\lambda$  von 1.6 bei Nennleistung und bis zu 2.2 bei 30 % der Nennleistung. Die Temperatur des Rauchgases betrug je nach Leistung und Rücklaufftemperatur zwischen 50 °C und 105 °C. Der Kesselwirkungsgrad stellte sich bei tiefer Rücklaufftemperatur auf ca. 90 % ein. Zum Erreichen der hohen Vorlauftemperatur wurde die Rücklaufftemperatur ebenfalls angehoben, dabei wurde die höchste Rücklaufftemperatur bei kleinster Leistung auf 78 °C eingestellt. Wie erwartet zeigte sich eine starke Abhängigkeit des Kesselwirkungsgrades von der Vorlauftemperatur.



**Abbildung 27: Feuerungstechnischer Wirkungsgrad ( $\eta_F$ ), Kesselwirkungsgrad ( $\eta_K$ ), Rauchgastemperatur ( $T_{\text{Rauchgas}}$ ) und Luftüberschuss ( $\lambda$ ) bei verschiedenen Modulationsstufen des Kessels im stationären Zustand. Es sind die Messungen SM7 – SM12 abgebildet.**

Die elektrische Leistungsaufnahme im Stationärbetrieb beträgt abhängig von der Kesselleistung von 22.9 W (SM12) bei einer brennstoffbezogenen Leistung ( $\dot{Q}_{\text{Pellet}}$ ) von 2.57 kW bis zu 61.2 W (SM10) bei einer brennstoffbezogenen Leistung von 12.07 kW.

Die Bestimmung der temperaturabhängigen Abstrahl- und Konvektionsverluste bei ausgeschaltetem Brenner ergab einen Wert von 19.0 kJ/(h·K) bei einer thermischen Masse von 148.8 kJ/K.

### 5.2.2 Instationäre Betriebszustände

Es wurden zwei Messungen im taktenden Betrieb des Pelletkessel 2 durchgeführt (TM4 und TM5). Die Ergebnisse sind in tabellarischer Form in Tabelle 8 sowie grafisch in Abbildung 28 und Abbildung 29 zu sehen.

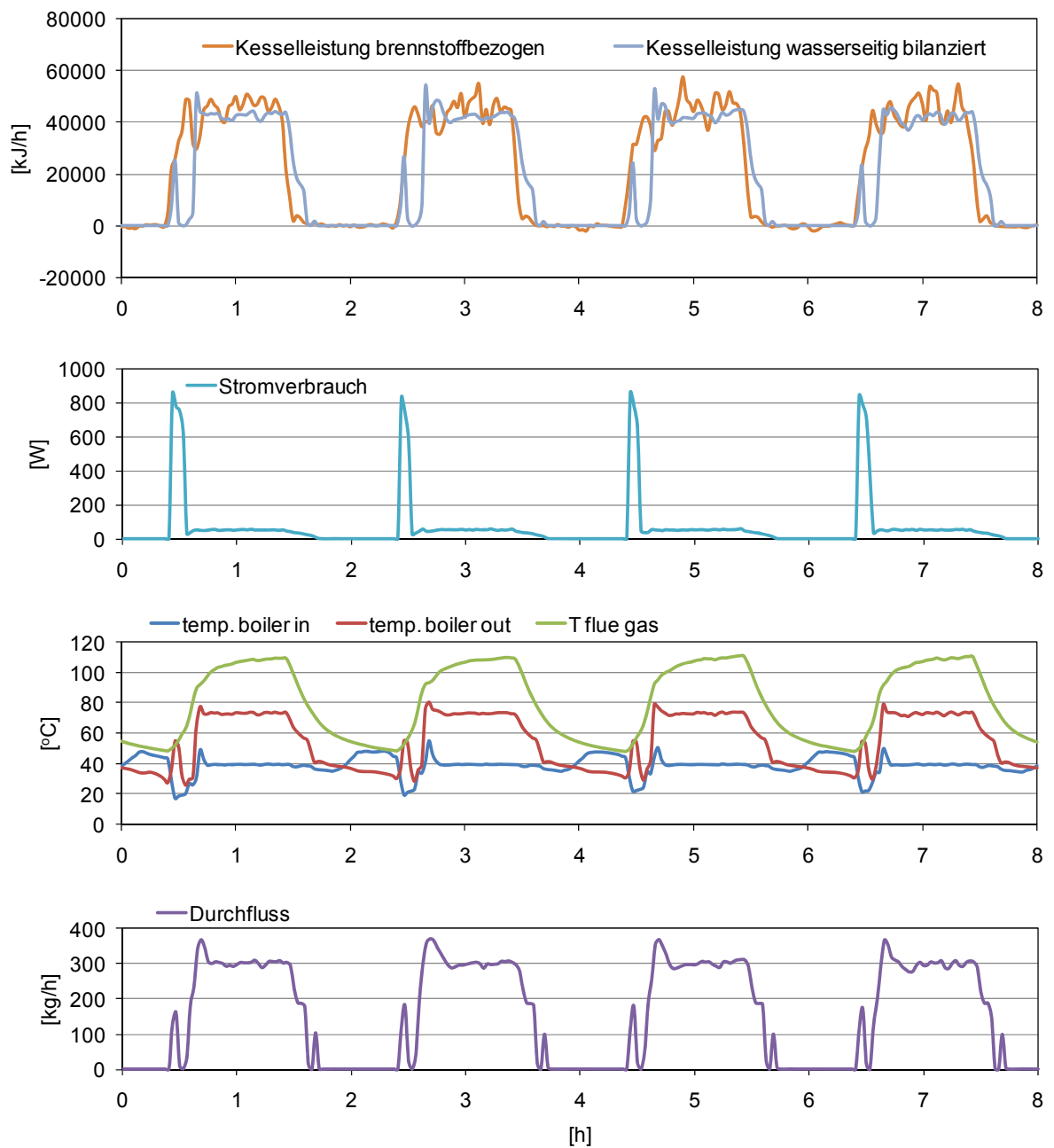
Die durchschnittliche abgegebene Leistung der Messung TM4 betrug 5.5 kW bei einer Dauer der einzelnen Taktzyklen von 120 min (68 min ein und 52 min aus). Die Betriebszeit war somit länger als die durchschnittliche Betriebszeit des Pelletkessel während des dynamischen 12-Tages Tests. Der auf den Brennstoff bezogene Nutzungsgrad 85.9 %. Der elektrizitätsbereinigte Nutzungsgrad beträgt 81.4 %.

In Messung TM5 wurden die Betriebszeit des Pelletkessel auf 42 min verkürzt. Dabei resultiert eine durchschnittliche abgegebene Leistung von 3.07 kW. In dieser Messung wurde der Nutzungsgrad mit 83.2 % bzw. elektrizitätsbereinigt mit 77.0 % bestimmt. Der stationäre Betrieb (Messung SM12) bei einer abgegebenen Leistung (wasserseitig bilanziert) von 2.3 kW schneidet mit einem Wirkungsgrad  $\eta_K$  von 92.1 % wesentlich besser ab.

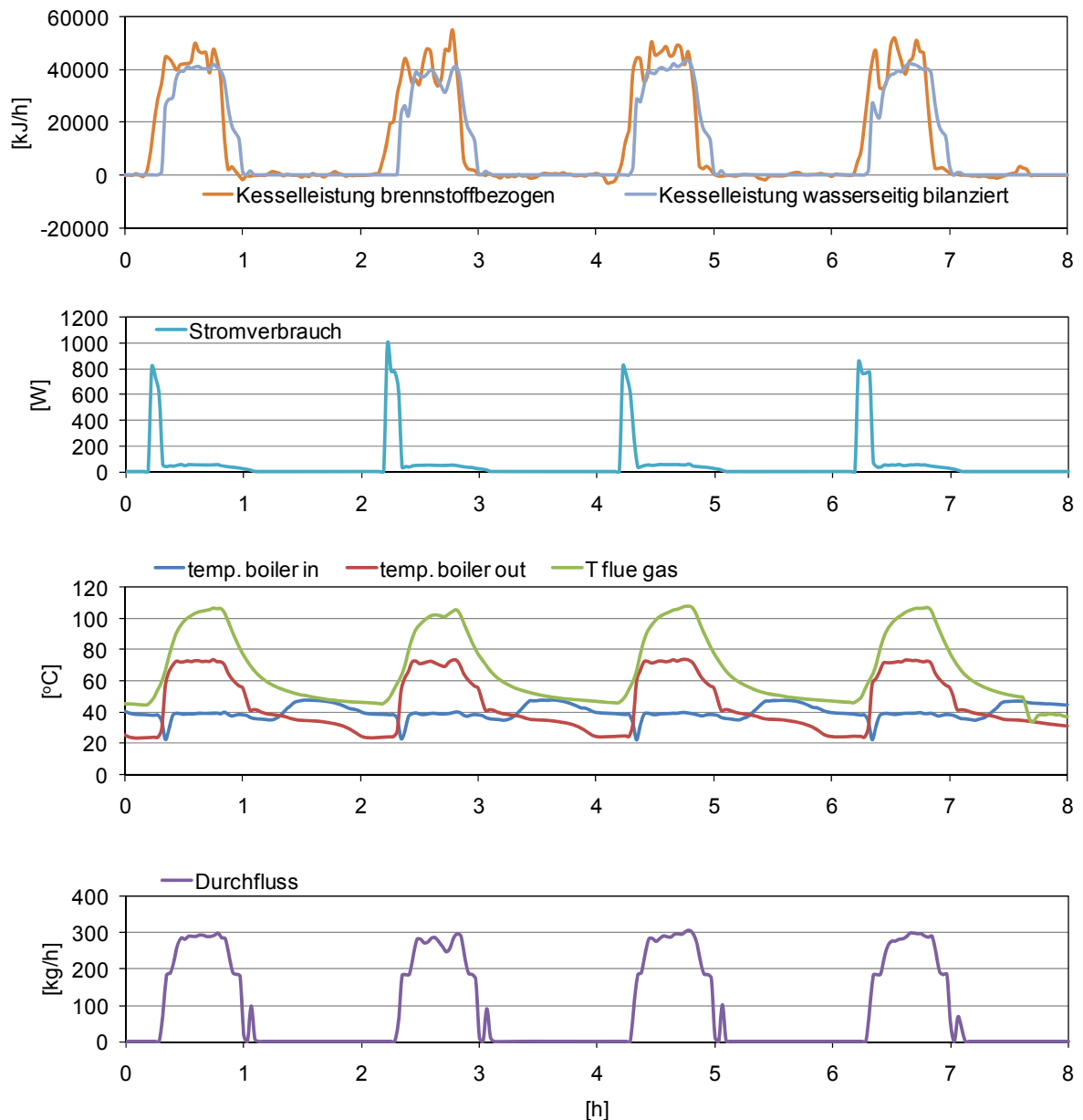
Die nachfolgenden Abbildungen zeigen einen deutlich erhöhten Strombedarf während des Starts des Pelletkessels (ca. 800 W). Während des Betriebs beträgt die elektrische Leistungsaufnahme lediglich 50 W.

**Tabelle 8: Ergebnisse der Messungen im taktenden Betrieb des Pelletkessel aus System 2.**

		TM4	TM5	SM11	SM12
Durchschnittliche Feuerungs-Leistung (bezogen auf $H_i$ )	[kW]	6.42	3.70	6.93	2.57
Durchschnittliche abgegebene Leistung (wasserseitig bilanziert)	[kW]	5.51	3.07	6.39	2.27
Durchschnittliche gemessene elektrische Leistung	[W]	69	61	40	22.9
Dauer Brenner ein	[min]	68.0	42.2	immer ein	
Dauer Brenner aus	[min]	52.0	77.8	-	-
Nachlaufzeit Pumpe	[min]	7.5	5	-	-
Nutzungsgrad (Formel 5)	[%]	85.9	83.2	92.1	88.5
Elektrizitätsbereinigter Nutzungsgrad (Formel 9)	[%]	81.4	77.0	90.6	86.2
Temperaturbereinigter Nutzungsgrad (Formel 10)	[%]	85.8	82.9	92.1	88.7
Temperatur- und Elektrizitätsbereinigter Nutzungsgrad (Formel 11)	[%]	81.4	76.7	90.5	86.3



**Abbildung 28:** Verlauf verschiedener Größen der ersten Taktbetriebmessung des Pelletkessel aus System 2 (TM4).



**Abbildung 29: Verlauf verschiedener Größen der zweiten Taktbetriebmessung des Pelletkessel aus System 2 (TM5).**

### 5.2.3 Emissionsfaktoren

Das Emissionsverhalten des Pelletkessel aus System 2 wurde an der HSLU gemessen [5]. Dabei wurden analog zu den Messungen in System 1 verschiedene stationäre und instationäre Betriebszustände aufgenommen und die zugehörigen Emissionen mit der jeweiligen Dauer und zugeführter Energie in Form von Brennstoff angegeben. Die genauen Messdaten sind im Anhang in Tabelle 12 dargestellt.

Der Kessel zeigt sehr niedrige Emissionswerte im gesamten Modulationsbereich, aber vergleichsweise hohe Emissionen in der Startphase und der Stopphase. Die Messungen zeigen auch, dass die Emissionen von Staub und Feinpartikeln nicht direkt mit den CO-Werten korrelieren. Die Messungen während des Taktbetriebs bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie während des stationären Betriebs.

Aus den Daten kann das Emissionsverhalten in typischen Betriebszuständen berechnet werden. In Abbildung 30 sind die zugeführte Energie und die CO-Emissionen eines Zyklus im taktenden Betrieb bei einer Laufzeit des Kessels von 36 min dargestellt (vgl. Zyklus in Tabelle 12). Die spezifischen CO-Emissionen betragen bei dieser Laufzeit 906 mg/MJ. Die Emissionen während der stationären Phase betragen hier nur 1 % der Gesamtemissionen des Taktzyklus.

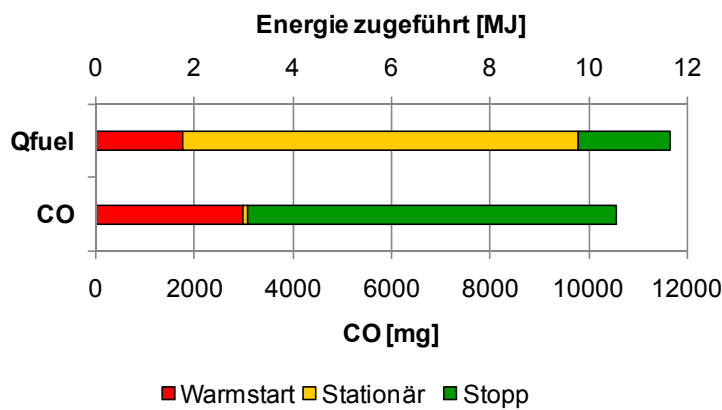


Abbildung 30: Zugeführte Energie und CO-Emissionen des Pelletkessel aus System 2 während eines Taktzyklus mit einer Laufzeit von 36 min.

### 5.3 MODELLBILDUNG UND SIMULATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES JAHRESNUTZUNGS- GRADES

Analog zu den Simulationen des System 1 wurde ein Simulationsmodell der zweiten Anlage erstellt das auf den Messdaten des 12-Tages Tests sowie der einzelnen Komponententests basiert. Zwei weitere Modelle dienen zur Ermittlung der Kennzahlen einer nicht-solaren Pelletheizung mit identischem Kessel sowie eines optimierten Kombisystems mit Pelletkessel und Solaranlage. In der nachfolgenden Tabelle 9 sind die Modelle beschrieben:

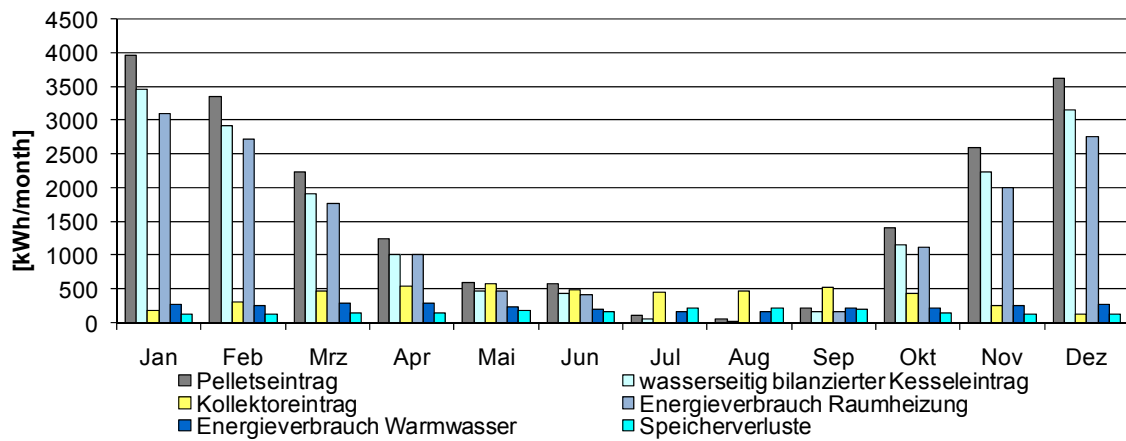
Tabelle 9: Überblick der auf dem getesteten System 2 basierenden Simulationsmodelle.

Variante	Beschreibung
JS2-V0	Pellet-Heizung ohne Solaranlage. Der Pelletkessel wurde nach den vorhandenen Messdaten (SM7 – SM12, TM4, TM5) parametrisiert. Die Einbindung des Kessels erfolgt direkt (ohne hydraulische Weiche). Somit bedient eine Pumpe sowohl den Pelletkessel als auch die Raumheizung. Ein 300 l Warmwasserspeicher wird über einen internen WÜ beladen.
JS2-V1	Basisvariante: Kombisystem mit Pelletkessel und Solaranlage entsprechend dem im Prüfstand gemessenen System 2.
JS2-V2	Modell zur Jahressimulation basierend auf der Variante JS2-V1. Um die Leistungsmodulation des Pelletkessels zu ermöglichen wurden die Positionen der Anschlussstutzen am Speicher für die Raumheizung und den Pelletkessel verändert.

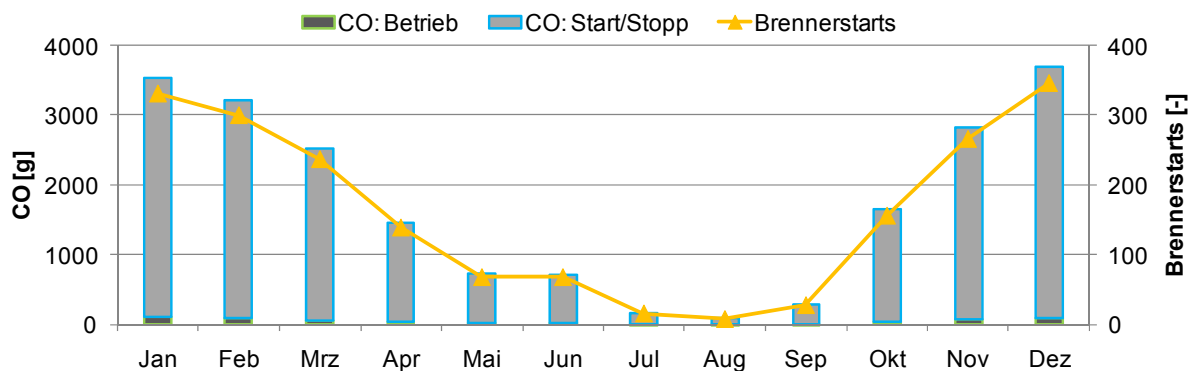
Die Simulationsergebnisse der Basisvariante JS2-V1 sind grafisch in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Die Ergebnisse aller Simulationsmodelle in tabellarischer Form sind in Tabelle 13, und Tabelle 15 dargestellt.

Der Pellet-Verbrauch des im Prüfstand gemessenen Kombisystems beträgt 19.9 MWh/a. Der auf den Pellet-Verbrauch bezogene Nutzungsgrad des Systems  $\zeta_{S,pe}$  beträgt 91.8 %. Unter Berücksichtigung des Strombedarfs von 0.76 MWh/a (3 % des thermischen Eintrages) mit einer Gewichtung von 3 beträgt der Nutzungsgrad  $\zeta_{S,pe+el}$  82.4 %.

Die Einbindung des Pelletkessels führt wie im Test auf dem Systemprüfstand zu einer taktenden Betriebsweise des Kessels. Einer Brennerlaufzeit von 1571 h stehen 1963 Brennerstarts gegenüber. Die auf den Heizwert des Brennstoffes bezogene Energie wird zu 85.1 % in Nutzwärme umgewandelt. Dabei entstehen spezifische und von der Betriebsweise des Pelletkessel abhängige CO-Emissionen von 291.4 mg/MJ.



**Abbildung 31: Ergebnis der Jahressimulation des im Prüfstand gemessenen zweiten Kombisystems mit Pelletkessel und Solaranlage (JS2-V1).**

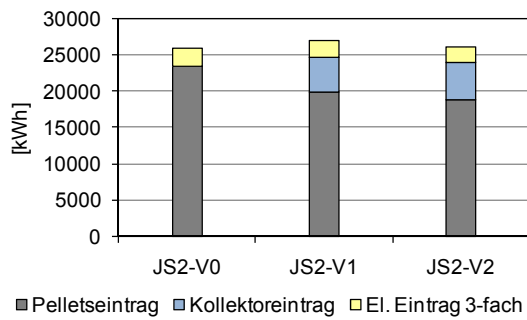


**Abbildung 32: Monatswerte der CO-Emissionen und Anzahl der Brennerstarts des zweiten im Prüfstand gemessenen Kombisystem. Ergebnis der Jahressimulation mit dem Modell JS2-V1.**

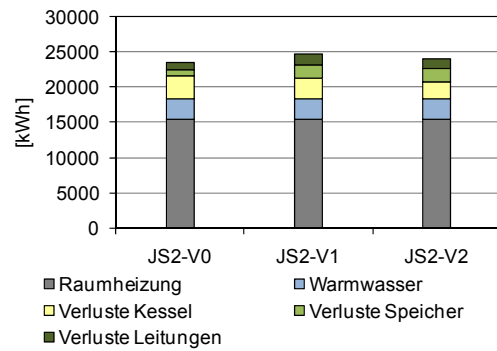
Das Simulationsmodell JS2-V2 basiert auf dem Basismodell der Anlage JS2-V1. Die Veränderungen betreffen die Einbindung des Pelletkessels. Die Position des Anschlusses wurde nach unten versetzt, so dass im Speicher drei verschiedene Zonen entstehen: Der oberste Bereich des Speichers ist für die Bereitstellung des Warmwassers auf einem Temperaturniveau von ca. 55 °C reserviert. Der mittlere Bereich dient nun als Pufferbereich für die Raumheizung und wird entsprechend der Aussentemperatur beladen. Das untere Drittel des Kombispeichers ist für die Solaranlage reserviert.

Diese Änderungen führen zu einer Reduktion der Brennerstarts um 70 % im Vergleich zur Basisvariante und somit auch zu einer Reduktion der spezifischen CO-Emissionen um 67.8 % auf 99.8 mg/MJ. Der Brennstoffbedarf wird um 5.9 % auf 18.8 MWh/a reduziert. Gleichzeitig erhöht sich der Eintrag durch den Kollektorkreis so dass sich der Nutzungsgrad bezogen auf den Brennstoff ( $\zeta_{S,pe}$ ) um 6.3 % verbessert. Der Bezug an elektrischer Energie wird ebenfalls um 7.2 % reduziert.

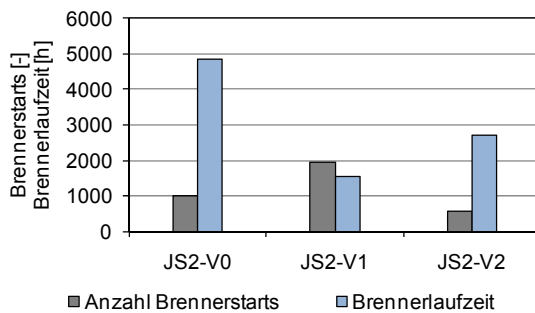
In der Simulationsvariante ohne Solaranlage und Pufferspeicher kann die sehr gute Modulationsfähigkeit des Pelletkessel am Besten ausgenutzt werden. Die durchschnittliche, brennstoffbezogene Leistung des Kessels während der 4849 Betriebsstunden beträgt 4.8 kW. Die Nutzungsgrade dieser Variante bezogen auf den Pelletkessel ( $\zeta_K$ ), die Anlage unter Berücksichtigung des Brennstoffbedarfs ( $\zeta_{S,pe}$ ) und die Anlage unter Berücksichtigung von Brennstoffbedarf und elektrischem Eintrag betragen 86.0 %, 78 % und 70.9 %. Der Verbrauch an elektrischer Energie ist im System ohne Solaranlage mit 786 kWh am höchsten.



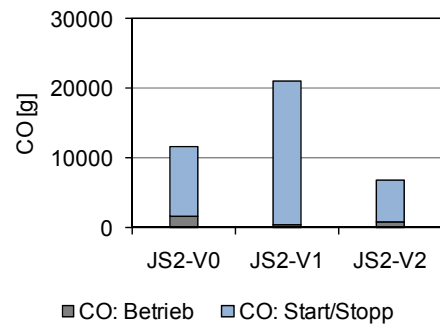
**Abbildung 33: Jährlicher Energieeintrag der auf System 2 basierenden Simulationsmodelle.**



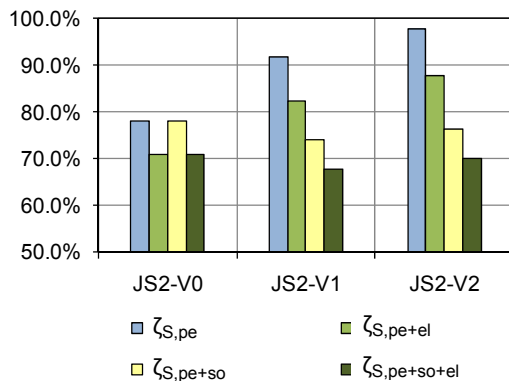
**Abbildung 34: Darstellung des jährlichen Energieverbrauchs und der Verluste.**



**Abbildung 35: Anzahl der jährlichen Brennerstarts und der Brennerlaufzeit.**



**Abbildung 36: Kumulierte CO-Emissionen aufgeteilt auf Emissionen resultierend aus den Start- und Ausbrandphasen sowie während des Betriebes.**



**Abbildung 37: Darstellung der verschiedenen Systemnutzungsgrade.**

## 6. Diskussion

### 6.1 SYSTEMTEST

Es wurden an zwei Kombisystemen verschiedener Hersteller, jeweils mit Pelletkessel und Solaranlage, Systemtests nach der CCT-Methode (Jahreszyklus-Test) durchgeführt. Die Installation erfolgte jeweils in einer Standardkonfiguration, d.h. genau so, wie eine Installation in einer realen Anwendung zu erwarten wäre.

Der Pellet-Verbrauch der beiden Kombisysteme während der 12-tägigen Tests war nahezu identisch (bis auf 0.2 %). Dennoch ist der auf dem Pellet-Verbrauch basierende Nutzungsgrad  $\zeta_{S,pe}$  des zweiten getesteten Systems um 6.9 % (absolut) höher als derjenige des ersten Systems. Dies ist auf den unterschiedlichen Verbrauch für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung zurückzuführen. In System 2 wurde aufgrund der weniger optimalen Heizkreisregelung mehr Wärme an die Fussbodenheizung geliefert, mit der Folge von höheren Raumtemperaturen im simulierten/emulierten Gebäude.

In beiden getesteten Systemen waren leistungsmodulierende Pelletkessel im Einsatz, jedoch vermochte aufgrund der hydraulischen und regeltechnischen Einbindung keines der beiden Geräte die Möglichkeit der Leistungsmodulation zu nutzen: Die Pelletkessel liefen stets im On-/Off-Betrieb und modulierten im dynamischen Betrieb des Heizsystems kaum bis gar nicht. Die Ursache dieser Betriebsweise ist für beide Systeme unterschiedlich.

System 1 hat während der Messungen getaktet, weil aufgrund des konstanten Volumenstroms, der konstanten Rücklauftemperatur und des Vorlauf-Sollwerts eine Leistungsreduktion erst bei einem Anstieg des Rücklaufs deutlich über den für die Rücklaufhochhaltung eingestellten Wert erfolgen konnte. Zu diesem Zeitpunkt war aber der Pufferspeicher jeweils bereits wieder vollständig geladen. Die durchschnittliche Betriebszeit pro Start des Pelletkessel betrug 1.7 Stunden.

Im System 2 wurde die Beladung durch den Kessel und die Entnahme für die Raumheizung am selben Speicheranschluss realisiert. Die Position dieses Anschlusses ist in einer relativen Höhe von 85% der gesamten Höhe des Speichers. Obwohl sowohl der Warmwasser-Bereich des Kombispeichers als auch der Raumheizungsbereich über einen eigenen Temperaturfühler verfügen, welcher die Kesselanforderung regeln sollte, spricht bei dieser Anordnung immer als erstes der Warmwasserfühler an und der Kessel lädt den Speicher praktisch immer im Warmwasser-Modus mit Volllast und einer sehr kurzen Laufzeit von durchschnittlich einer Stunde. Diese Einbindung des Kessels ins Gesamtsystem führte zu einer ungünstigen Betriebsweise des Gerätes.

### 6.2 MESSUNGEN AN DEN PELLETKESSELN

#### 6.2.1 Stationäre Betriebszustände

Die Pelletkessel der beiden Kombisysteme wurden neben dem dynamischen 12-Tages Test verschiedenen stationären und instationären (taktenden) Tests unterzogen. Bei der Messung im stationären Betrieb wurden grosse Unterschiede zwischen beiden Geräten deutlich.

Die ermittelten  $\lambda$ -Werte des Kessels 1 sind mit Werten zwischen  $\lambda = 2.4$  (Nennleistung) und  $\lambda = 3.2$  (Teillast) als hoch zu bewerten. Demgegenüber stehen die niedrigen  $\lambda$ -Werte von Kessel 2 von  $\lambda = 1.6$  (Nennleistung) bis  $\lambda = 2.2$  (Teillast). Auch die Rauchgastemperaturen sind in Kessel 1 relativ hoch (80 °C bei Teillast, 141 °C bei Nennlast) und in Kessel 2 sehr niedrig (50 °C bei Teillast, 105 °C bei Nennlast). Die feuerungstechnischen Wirkungsgrade spiegeln diesen Sachverhalt wieder. Bedingt durch die höhere Enthalpie des Rauchgases liegt der feuerungstechnische Wirkungsgrad des Kessels aus System 1 im Mittel um 5 % tiefer als derjenige des Kessels aus System 2. Um die Effizienz von Kessel 1 zu steigern und die Emissionen des Gerätes zu verringern wären tiefere  $\lambda$ -Werte erstrebenswert (siehe Kapitel 6.2.4 Emissionsfaktoren).

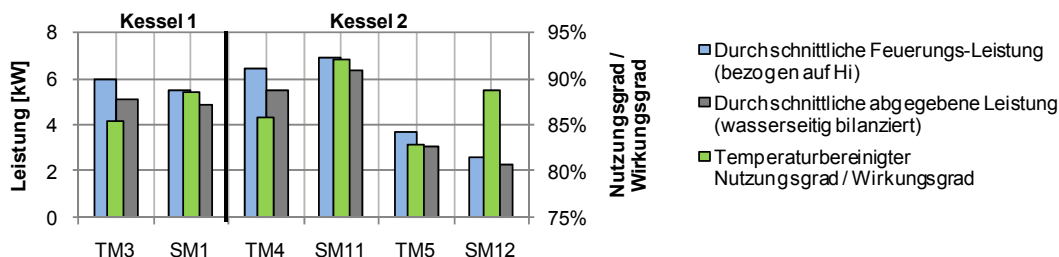
#### 6.2.2 Instationäre Betriebszustände

Der Vergleich von Messungen im stationären und instationären Betrieb zeigt, dass die Kessel-Nutzungsgrade bei ähnlicher abgegebener Leistung im stationären Betrieb deutlich höher sind als diejenigen im taktenden Betrieb<sup>2</sup>. Der eingesetzte Brennstoff wird im Vergleich der Messungen von

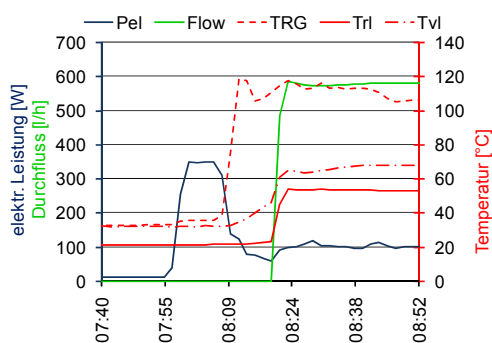
<sup>2</sup> Vergleichbare Paare bilden die Messungen TM3 / SM1 (Kessel 1) sowie TM4 / SM11 und TM5 / SM12 (Kessel 2).

Kessel 1 um 3.7 % effizienter in Nutzwärme umgesetzt, der Vergleich für den Kessel 2 zeigt sogar eine um 7 % höhere Effizienz des modulierenden Stationärbetriebes im Vergleich zum On/Off Betrieb.

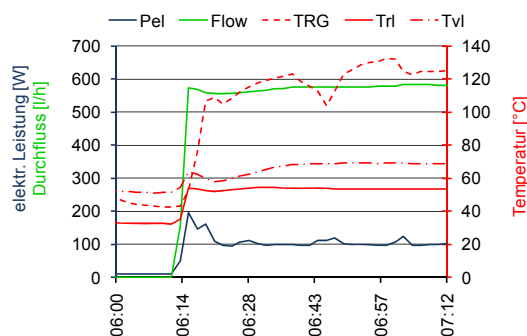
Auch die durchschnittliche Aufnahme an elektrischer Leistung ist stark abhängig von der Betriebsweise, und auch hier besteht ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Geräten. Während Kessel 1 für den Warmstart kaum Strom benötigt (vgl. Abbildung 13, Abbildung 40 und Abbildung 39) kann für Kessel 2 ein deutlicher Peak der bezogenen elektrischen Leistung beobachtet werden (vgl. Abbildung 28 und Abbildung 29). Kessel 1 bezieht im taktenden Betrieb (TM3) um 5 % weniger elektrische Leistung als im Stationärbetrieb (SM1). Kessel 2 jedoch bezieht im taktenden Betrieb (TM4) um 76% mehr elektrische Leistung als im Stationärbetrieb (SM8).



**Abbildung 38: Vergleich von stationären und instationären Betriebszuständen beider Kessel. Die Taktmessung TM3 und die Stationärmessung SM1 wurden an Kessel 1 bei ähnlicher abgegebener Leistung durchgeführt. An Kessel 2 können die Paarungen TM4 / SM11 und TM5 / SM12 verglichen werden.**



**Abbildung 39: Kaltstart des Pelletkessels 1.**  
Pel = elektrische Leistungsaufnahme;  
Flow = Durchfluss des Pelletkessels;  
TRG = Rauchgastemperatur; Trl = Temperatur Rücklauf; Tvl = Temperatur Vorlauf.



**Abbildung 40: Warmstart des Pelletkessels 1.**  
Pel = elektrische Leistungsaufnahme;  
Flow = Durchfluss des Pelletkessels;  
TRG = Rauchgastemperatur; Trl = Temperatur Rücklauf; Tvl = Temperatur Vorlauf.

## 6.2.3 Bestimmung der thermischen Masse

Die thermische Masse des Pelletkessels 1 ist mit 360 kJ/K 2.4 mal grösser als diejenige des Pelletkessels 2. Nach der Ausbrandphase enthalten die Kessel bei einer Kesseltemperatur von 60 °C und einer Umgebungstemperatur von 20 °C also 4 kWh bzw. 1.6 kWh die durch Strahlung und Konvektion an die Umgebung abgegeben werden, sofern der Kessel nicht innert kurzer Zeit wieder in Betrieb genommen wird.

## 6.2.4 Emissionsfaktoren

Die an der HSLU durchgeführten Emissionsmessungen [5] liefern wichtige Erkenntnisse zur Emissionscharakteristik von Pelletkesseln im dynamischen Betrieb. Diese stehen im Gegensatz zu den Emissionsmessungen, welche standardmässig bei Zulassungsprüfungen im Stationärbetrieb durchgeführt werden. Bis dato wurden nur wenige Resultate zu diesem Thema publiziert [12],[13],[14],[15]. Im Vergleich der beiden Kessel wird ein grosser Unterschied im Emissionsverhalten der Geräte deutlich:

Der Kessel aus System 1 zeigt eine deutliche Erhöhung der CO-Emissionen (bei gleichzeitig hohem Luftüberschuss) bei Teillast, während die Emissionen in Start- und Stopp-Phase in Vergleich zu System 2 weniger stark ansteigen (Tabelle 11 und Tabelle 12). Ein errechneter Taktzyklus, der bei einer einstündigen Zyklendauer 50 % der Nennleistung liefert (also mit einer Brennerlaufzeit von 0.5 h in Vollast und anschliessender Stillstandszeit von 0.5 h) erzeugt bei dieser Emissionscharakteristik spezifische CO-Emissionen von 223 mg/MJ, und somit um fast 40 % niedrigere CO-Emissionen als im stationären Betrieb mit Teillast bei gleicher durchschnittlichen Wärmeabgabe.

Der Kessel aus System 2 zeigt dagegen sehr niedrige Emissionswerte im gesamten Modulationsbereich, aber vergleichsweise hohe Emissionen in der Startphase und in der Stoppphase. Hier ist offensichtlich, dass allein aus emissionstechnischer Sicht eine modulierende Betriebsweise zur Reduktion der Anzahl Starts und Stopps anzustreben ist. Der in Tabelle 12 aufgezeigte Zyklus mit einer Laufzeit von 36 min (siehe auch Abbildung 30) verursacht 10'541 mg CO. Bei gleicher zugeführter Energie (in Form von Brennstoff) würden (bei gleichzeitig verbessertem Nutzungsgrad) im Stationärbetrieb nur 329 mg CO entstehen. Es ist also aus emissionstechnischer Sicht unbedingt eine modulierende Betriebsweise dieses Gerätes anzustreben.

Die Messungen zeigen auch, dass die Emissionen von Staub und Feinpartikeln nicht direkt mit den CO-Werten korrelieren. Die Messungen während des Taktbetriebs bewegen sich entgegen den ursprünglichen Erwartungen in der gleichen Grössenordnung wie während des stationären Betriebs.

Die durch die HSLU ermittelten Emissionsdaten im Stationärbetrieb [5] zeigen deutlich höhere Werte als die Emissionsdaten aus dem Typenprüfbericht des Kessels. Dagegen zeigen die Werte des Kessels 2 eine gute Übereinstimmung mit den in der Typenprüfung ermittelten Werten.

### **6.3 MODELLBILDUNG UND SIMULATIONEN ZUR BESTIMMUNG DES JAHRESNUTZUNGS- GRADES**

Es wurden Simulationsmodelle zur Durchführung von Jahressimulationen beider geprüfter Anlagen und verschiedener Varianten der Anlagen erstellt. Die am Prüfstand gemessenen Systeme bilden dabei jeweils die Basisversionen (JS1-V1 und JS2-V1).

Die Simulationsmodelle zeigen das Betriebsverhalten analog zu den jeweiligen Prüfstandsmessungen, also auch eine ungünstige Einbindung des Pelletkessel mit daraus resultierender taktender Betriebsweise. Es wurden weitere Varianten erstellt, die im jeweiligen System zu einer längeren Laufzeit des Kessels und damit zu weniger Starts des Kessels führten (JS1-V2 und JS2-V2).

Um die Einsparung von Brennstoff durch die Solaranlage im Vergleich zu einem System ohne Solaranlage zu eruieren wurden weitere Varianten simuliert, die eine reine Pelletheizung ohne Pufferspeicher und ohne Solaranlage abbilden (JS1-V0 und JS2-V0).

Die Beschreibungen der Spezifikationen der Basisvarianten sind in Tabelle 2 und Tabelle 6 zu finden, die Beschreibung der jeweiligen Simulationsvarianten sind in Tabelle 5 und Tabelle 9 zu finden.

#### **6.3.1 Energetische Bewertung**

##### **Kombisysteme mit Pelletkessel und Solaranlage analog den installierten und vermessenen Systemen**

Der Systemnutzungsgrad unter Berücksichtigung von Pellet-Verbrauch, solarem Eintrag und elektrischem Stromverbrauch (Formel 4) beträgt für System 1 60.6 % (JS1-V1). Dies verdeutlicht die hohen Verluste von Kessel, Speicher und Leitungen. Im getesteten System übersteigen die Leitungsverluste, bedingt durch die nicht isolierten Kesselkreis-Leitungen, die Speicherverluste.

Der Systemnutzungsgrad unter Berücksichtigung aller eingetragenen Energien (Formel 4) beträgt in System 2 67.8 % (JS2-V1). Die Verluste des Systems sind im Vergleich mit System 1 also deutlich geringer. Der grösste Unterschied besteht im Pelletkessel, der trotz der schlechten Einbindung um 4.6 % effektiver arbeitet. Auch die Leitungsverluste sind bedeutend geringer, da sie im Gegensatz zu System 1 gut isoliert sind. Die Verluste des Speichers sind als relativ hoch einzuordnen. Er verliert trotz des kleineren Volumens (und damit der kleineren Oberfläche) mehr an Wärme als derjenige aus System 1.

In beiden Systemen resultieren die grössten Verluste durch die Pelletkessel. Innovative Konzepte zur Verringerung dieser Verluste wären Speicher-integrierte Kessel zur Vermeidung von Verlusten durch

Konvektion und Strahlung an die Umgebung, wie sie zum Beispiel in Haller [16] untersucht wurden, oder kondensierende Kessel welche weniger Abgas-Verluste aufweisen.

### **Kombisysteme mit Pelletkessel und Solaranlage mit verbesserter Einbindung des Pelletkessels zur Reduktion der Brennerstarts**

Eine Reduktion der Brennerstarts durch variable Vorlaufsolltemperatur bei gleichzeitig variablem Durchflusses für die Beladung des Heizungspuffers (Simulation **JS1-V2**) hat folgende Auswirkungen auf das System:

**Pelletkessel:** Die Anzahl der Brennerstarts verringert sich von 1372 Starts auf 519 Starts bei gleichzeitiger Laufzeitverlängerung. Wie der Vergleich der Messungen von stationären und instationären Betriebszuständen des Kessels vermuten liess, verbessert sich der Kessel-Jahresnutzungsgrad durch diese Betriebsweise in geringem Masse (+0.7 %).

**Speicher:** Die niedrigere Temperatur zur Beladung des Speichers führt insgesamt auch zu einer niedrigeren Speichertemperatur, und somit auch zu weniger thermischen Verlusten durch den Speicher an die Umgebung.

**Leitungen:** Die Rohrleitungsverluste fallen bei der verbesserten Version im Vergleich zur Basisversion höher aus. Dies steht damit in Zusammenhang, dass bei der „verbesserten“ Version der Kessel moduliert und längere Laufzeiten aufweist. Das bedeutet gleichzeitig, dass durch die Kesselleitungen über längere Zeit warmes Wasser fliesst. Nun sind die Kesselleitungen analog zur realen Installation des Systems im Prüfstand nicht isoliert. Folglich sind die Leitungsverluste beim modulierenden System aufgrund der längeren Laufzeiten deutlich höher. Selbstverständlich sollten die Rohrleitungen des Heizgerätes unabhängig von der Betriebsweise in jedem Fall isoliert sein. Unter der Annahme, dass die Leitungen isoliert sind, dürfte der Unterschied der Rohrleitungsverluste beider Varianten sehr klein sein und bzgl. der energetischen Gesamtbewertung kaum mehr ins Gewicht fallen.

**Solarteil:** Das bessere Speicher-Management und die insgesamt tieferen Speichertemperaturen führen auch zu tieferen Rücklauftemperaturen für die Solarkollektoren. Dadurch verbessert sich die Effizienz der Kollektoren, was eine leichte Steigerung des Solarertrages von 405.2 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) auf 418.3 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) zur Folge hat.

In der Summe der oben genannten Punkte wird für die Bereitstellung der gleichen Nutzwärme weniger Brennstoffenergie benötigt. Der Nutzungsgrad der Anlage zeigt sich deshalb verbessert.

Auch in der Simulationsversion **JS2-V2**, die auf dem Simulationsmodell des zweiten gemessenen Systems basiert und ebenfalls durch Massnahmen zur Verlängerung der Laufzeit des Pelletkessels angepasst wurde, kann eine deutliche Verbesserung der Effizienz im Vergleich zu der Basisversion des Systems JS2-V1 gezeigt werden. Dabei kann die oben beschriebene Argumentation fast identisch übernommen werden. Einziger Unterschied sind die Verluste durch die Leitungen des Kessels. Sie verhalten sich hier analog zu den Kesselverlusten, sind also niedriger als in der Basisversion. Die Begründung liegt in der guten Isolation der Rohrleitungen welche in Zeiten ohne Durchfluss die Temperatur der Leitungen weniger stark absinken lässt als in System 1.

Die erreichte Verbesserung dieses Kombisystems im Vergleich zur Basisversion ist deutlich grösser als in den entsprechenden Varianten aus System 1. Der Grund dafür ist in der Ausgangsposition, also in den auf dem Prüfstand installierten Systemen, zu finden. In beiden Systemen wurde der jeweilige Kessel so eingebunden, dass eine taktende Betriebsweise resultierte. Die Taktzyklen unterscheiden sich aber deutlich. Die Anzahl der Brennerstarts in System 2 ist um 40 % höher bei gleichzeitig 9 % kürzerer jährlicher Laufzeit des Kessels. Ausserdem tragen die sehr guten Teillast-Eigenschaften des Pelletkessel aus System 2 zu einem sehr guten Ergebnis der optimierten Variante bei.

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

Die Variante **JS1-V0** zeigt, dass im Einsatz unter realistischen Bedingungen in einem Einfamilienhaus im Schweizer Mittelland mit einem Heizenergiebedarf von 100 kWh/(m<sup>2</sup>\*a) und einer Energiebezugsfläche von 150 m<sup>2</sup> der Pelletkessel aus System 1 (ohne Solaranlage) einen Jahresnutzungsgrad von 79.1 % erreicht. Das Heizsystem bezieht dabei mehr elektrischen Strom als die Varianten mit Solaranlage. Bezieht man diesen elektrischen Verbrauch in den Nutzungsgrad des Gesamtsystems ein ( $\zeta_{S,pe+el}$ ) so zeigt sich, dass die eingetragene Energie nur zu 58.7 % in Nutzwärme umgesetzt wird.

Im Vergleich mit der Variante JS1-V2 zeigt sich, dass durch die Integration einer Solaranlage 20 % Pellets eingespart werden können und zugleich der Nutzungsgrad des Pelletkessels erhöht wird.

Das Pellet-Heizsystem mit dem Kessel aus System 2 (**JS2-V0**) erreicht dank der hohen Effizienz und der guten Modulationsfähigkeit des Gerätes einen deutlich höheren Systemnutzungsgrad  $\zeta_{S,pe+el}$  von 70.9 %. Die Einsparung an Pellets durch die Integration einer Solaranlage beträgt auch hier 20 %.

### 6.3.2 Emissionstechnische Bewertung

#### Kombisysteme mit Pelletkessel und Solaranlage analog den installierten und vermessenen Systemen

Die Resultate zeigen deutlich, dass die Emissionsfracht des Pelletkessels sowohl von dessen Emissionscharakteristik als auch von dessen Einbindung in das Heizsystem und somit der dynamischen Betriebsweise abhängt.

Der Pelletkessel in System 1 arbeitete im On/Off Betrieb. Nach den Erkenntnissen aus den Emissionsmessungen des Gerätes führt dieser Betriebszustand zu den niedrigsten Emissionen die mit diesem Kessel möglich sind. Eine Reduktion der Emissionen könnte nur durch die Verlängerung der Taktzyklen bei Vollast, also durch einen Lastausgleichspuffer, erfolgen. Bei der durchschnittlichen Laufzeit des Kessels von 1.3 h resultieren spezifische CO-Emissionen von 230.8 mg/MJ, wobei die Start- und Stopp-Phasen für etwa die Hälfte der Emissionen verantwortlich sind (vgl. Abbildung 16).

Demgegenüber sind die spezifischen Jahres-Emissionen des Kessels aus System 2 bedingt durch die taktende Betriebsweise im Vergleich zu den erreichbaren Werten im Stationärbetrieb stark erhöht. In Abbildung 32 wird deutlich, dass die CO-Emissionen dieses Gerätes im taktenden Betrieb fast ausschließlich aus Emissionen der Start- und Stopp-Phase bestehen.

#### Simulationen weiterer Systemvarianten

In **System 1** führt die veränderte Betriebsweise des Pelletkessels mit einem längeren Teillast-Betrieb (JS1-V0 und JS1-V2) zu einer Erhöhung der Emissionen an gasförmigen unverbrannten Schadstoffen. Die spezifischen Emissionen an CO erhöhen sich von 230.8 mg/MJ in der Pellet-Solarkombinierten Basisvariante (JS1-V1) um fast 40 % in der Version mit verlängerter Laufzeit (JS1-V2) und um mehr als 2/3 in der Version ohne Solaranlage (JS1-V0). Somit steigen die spezifischen CO-Emissionen in beiden Varianten durch den Teillast-Betrieb über den Emissionswert des BAFU [17] (250 mg/MJ). Die spezifischen Emissionen an Gesamt-KW (Methan und Nichtmethan-KW) steigen von 4.9 mg/MJ (JS1-V1) auf 9.7 mg/MJ (JS1-V2) bzw. 8.7 mg/MJ (BAFU Grenzwert: 27 mg/MJ). Die hohen Emissionen in Teillast bei hohem Luftüberschuss wirken sich hier stärker aus als die ebenfalls erhöhten Emissionen in der Start- und Stoppphase.

Für **System 2** ist die Sachlage genau umgekehrt. Aufgrund der Charakteristik des Emissionsverhaltens mit niedrigen Emissionen im gesamten Modulationsbereich aber stark erhöhten Emissionen in der Start- und Stoppphase dieses Gerätes führt die modulierende Betriebsweise mit wenigen Brennerstarts zu einer substantiellen Verbesserung der spezifischen Emissionen. Die spezifischen CO-Emissionen können von 291.4 mg/MJ auf 99.8 mg/MJ (-66 %) in der Variante JS2-V2 gesenkt werden, was deutlich weniger ist als der Emissionsfaktor des BAFU von 250 mg/MJ. Die Emissionen an gasförmigen unverbrannten Schadstoffen können, ausgehend von einem ohnehin niedrigen Emissionswert in der Basisvariante, noch weiter gesenkt werden. Durch die Pellet-Solarkombinierte Variante mit verbesserter Einbindung des Kessels resultieren 6735 g/a an CO-Emissionen. Durch die niedrigen Werte des Pellet-Verbrauchs und der spezifischen Emissionen dieser Version resultiert hier eine Verringerung der Gesamt-Emissionen um 67.8 %. Diese Zahlen verdeutlichen die Notwendigkeit der richtigen Einbindung des Pelletkessels im Hinblick auf Heizanlagen mit tiefen Jahres-Emissionswerten.

## 7. Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen, welche aus den durchgeführten Messungen und Simulationen des Projektes gezogen werden können, sind nachfolgend festgehalten:

- Alle bisher am SPF getesteten Kombianlagen mit Pelletkessel und Solaranlage waren in der Lage, den Wärmebedarf für Raumheizung und Warmwasser sicher zu decken. Die Effizienz der einzelnen Anlagen kann jedoch noch deutlich gesteigert werden. Die Ursachen für die verbesserungsfähigen Jahresnutzungsgrade der Gesamtsysteme liegen vor allem auf der Systemebene und dabei insbesondere bei der Regelung und Hydraulik der Anlagen. Die einzelnen Komponenten sowie deren Regelstrategie sollten besser auf den realen Betrieb abgestimmt und deren Eignung in einem realitätsnahen Test geprüft werden. Dafür haben sich der Teststand am SPF und die CCT-Methode erneut bewährt.
- Beim realitätsnahen Praxisbetrieb zeigte sich, dass beide untersuchten Pelletkessel die Möglichkeiten der Leistungsregelung und des Teillastbetriebs nicht ausschöpfen. Im ersten System verursacht der vergleichsweise hohe und bei Teillast noch ansteigende Luftüberschuss hohe Verluste und erhöhte CO-Emissionen. Im Fall des zweiten Pelletkessels kommt die Möglichkeit des stufenlosen Teillastbetriebs durch die ungeeignete Einbindung ins System praktisch nicht zum Einsatz, so dass als Folge davon ein On-/Off-Betrieb mit kurzen Takt-Zyklen und häufigen Start- und Ausbrandphasen resultiert, was zu erhöhten Verlusten und CO-Emissionen führt.
- Der modulierende Betrieb der Pelletkessel ist aus energetischer wie auch aus emissionstechnischer Sicht anzustreben. Dies setzt aber voraus, dass das Heizgerät eine gute Betriebscharakteristik im Teillastbereich aufweist, sprich nicht mit zu hohem Luftüberschuss betrieben wird. Leider sieht der Teillastbetrieb von Biomasseheizgeräten in der Praxis oft deutlich schlechter aus als in den Zulassungsprüfungen. Ein Gerät mit schlechtem Teillastverhalten kann im modulierenden Betrieb höhere Gesamt-Emissionsfrachten verursachen als im On/Off-Betrieb.
- Die Differenz zwischen der Effizienz von stationärem gegenüber dem instationären Betrieb zeigt, dass vor allem im Fall des Kessels aus System 2 aus energetischer Sicht das Takten zwingend vermieden werden muss, um sowohl den Verbrauch an Pellets und Strom als auch der Emissionen zu reduzieren.
- Die Start- und Ausbrandphasen führten auch zu erhöhten Emissionen an gasförmigen Kohlenwasserstoffen, während die gravimetrisch gemessenen Feststoffe nur geringfügig anstiegen. Der Teillastbetrieb mit hohem Luftüberschuss und erhöhten CO-Emissionen verursacht praktisch keine Erhöhung an Gesamtstaub. Ein hoher Luftüberschuss bei Teillast ist jedoch aufgrund der höheren Verluste und der höheren CO-Emissionen zu vermeiden.
- Die fehlende Wärmedämmung von Rohrverbindungen oder eine schlechte Ausführung von Speicheranschlüssen führt zu vergleichsweise hohen und einfach vermeidbaren Verlusten.
- Sowohl im Hinblick auf Speicherverluste, als auch im Hinblick auf einen möglichst hohen Solarertrag, sollte ein solarer Pufferspeicher durch den Pelletkessel erst dann beladen werden, wenn der Pelletkessel auch bei kleinster Leistungsstufe immer noch mehr Energie liefert als gleichzeitig von den Verbrauchern abgenommen wird. Die gängige Praxis sieht heute jedoch oft so aus, dass der Kessel den Speicher erst einmal mit maximaler Leistung belädt, und erst dann die Leistung reduziert wenn die Rücklauftemperaturen steigen, d.h. wenn der Speicher voll ist. Anstatt den Speicher so lange wie möglich bei tiefen Temperaturen zu halten, wird so der Speicher immer auf hohen Temperaturen gehalten, was sowohl erhöhte Speicherverluste als auch weniger Solarertrag zur Folge hat.
- Bei den untersuchten Systemen konnten massive Unterschiede im Stromverbrauch festgestellt werden. Dies ist hauptsächlich auf die Art der eingesetzten Pumpen zurückzuführen. Da der Stromverbrauch einen nicht zu vernachlässigenden Teil des gesamten Primärenergieverbrauchs des Systems ausmacht, sollten Hersteller und Anbieter von Systemen darauf achten, dass das System mit effizienten Pumpen ausgestattet ist. Auch bei der Zündungsenergie wurden grosse Unterschiede festgestellt. Bei manchen Geräten ist der elektrische Energiebedarf für den Zündungsvorgang so hoch, dass dieser bei häufigerem Takten einen deutlichen Einfluss auf den Nutzungsgrad haben kann [3].

## 8. Ausblick

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass Pelletheizsysteme in Kombination mit Solarthermischen Anlagen energetisch und emissionstechnisch noch deutlich optimiert werden könnten. Die bisher untersuchten drei Systeme waren Standard-Systeme und Standard-Komponenten, wie sie in der Praxis heute eingesetzt werden. In einem nächsten Schritt sollten die Untersuchungen auf neue innovative Ansätze für Systeme und Komponenten ausgeweitet werden. Diese sind zum Beispiel speicherintegrierte Pelletbrenner, kondensierende Pelletheizgeräte und alternative Systemregelungskonzepte. Weiter sollten die im Labor ermittelten Erkenntnisse aus 12-Tages-Messungen mit länger dauernden Feldstudien ergänzt und verifiziert werden.

Das im Rahmen dieses Projektes entwickelte Verfahren zur Bestimmung von Jahresemissionsfrachten in Zusammenarbeit mit der Hochschule Luzern – Technik & Architektur (HSLU) konnte als eines der ersten Forschungsprojekte auf diesem Gebiet zeigen, welche Emissionen im praxisnahen dynamischen Jahresbetrieb zu erwarten sind. Damit erlaubt das Verfahren zur Prüfung von Pellet-Solarkombinierten Systemen, Anlagen gesamthaft zu bewerten. Die hier gezeigten Resultate verdeutlichen, dass ein System nicht nur „die Summe seiner Einzelteile“ ist, sprich die Messungen an einzelnen System-Komponenten erlauben in der Regel nicht, auf die Systemeffizienz zu extrapolieren.

Bei den derzeit vorgeschriebenen Norm-Prüfungen von Pelletkesseln, welche je eine Stationär-Messung bei 100% Leistung und bei 30% Leistung vorschreiben, besteht leider kaum ein Anreiz für den Hersteller, die Regelung der Modulation so weit zu verbessern, dass der Kessel seine Feuerungsleistung bei Bedarf selbständig (d.h. ohne manuelle Eingriffe) auf eine tiefe Dauerleistung mit tiefen Lambda-Werten und tiefen Emissionen anpasst. Wie die vorliegende Studie gezeigt hat, ist jedoch ein solches Verhalten Voraussetzung für das Ausschöpfen des Potentials zur Verminderung von Emissionen und zur Steigerung der Effizienz. Eine Anpassung der Prüfvorschriften zur Berücksichtigung des tatsächlichen Verhaltens des Kessels bei einer Reduktion der Wärmeleistungsabnahme ist deshalb erstrebenswert und unabdingbar für einen fairen Vergleich verschiedener Produkte.

Mit den energiepolitischen Zielen für den Wärmemarkt in der EU gewinnt die integrale Betrachtung von Heizsystemen entscheidend an Bedeutung. Einerseits bei der Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie andererseits bei den Umsetzungsmassnahmen der EU-Ökodesign-Direktive [18] für Festbrennstofffeuerungen. Es zeichnet sich ein starker Trend ab, dass sich europäische Forschungs- und Prüfinstitutionen verstärkt mit der Fragestellung der Systembetrachtung und dem praxisnahen dynamischen Betrieb von Biomasse-Heizgeräten auseinanderzusetzen. Am Institut für Solartechnik SPF wurde genau dieser Forschungsbereich über viele Jahre hinweg aufgebaut und entsprechendes Know-How erarbeitet. Vor diesem Hintergrund ist anzustreben, als Schweizer Forschungsstätte einen massgeblichen Beitrag bei der bevorstehenden Erarbeitung von Standards zur integralen Betrachtung von Heizsystemen – und Geräten auf europäischer Ebene leisten.

## Symbolverzeichnis

Im Folgenden sind Symbole aufgeführt, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Die Symbole sind alphabetisch sortiert, zunächst nach lateinischen Buchstaben, anschliessend nach griechischen.

$E_{el}$	Elektrische Energie.	[kWh]
$F_{el}$	Faktor für die Gewichtung von elektrischer Energie. $F_{el} = 3$ in dieser Studie.	
$H_s$	Brennwert (oberer Heizwert).	[kJ/kg]
$H_i$	Heizwert (unterer Heizwert).	[kJ/kg]
$M_{therm}$	Thermische Masse.	[kJ/K]
$P_{el}$	Elektrische Leistung.	[kW]
$Q_{Heiz}$	Bezogene Nutzwärme für die Raumheizung.	[kWh]
$Q_{M_{therm}}(t)$	Energie, welche der thermischen Masse des Kessels durch Abkühlung auf die Umgebungstemperatur nach der Wartezeit $t$ entzogen werden kann.	[kJ]
$Q_{Pellet}$	Brennstoff-Energieeintrag, bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffes.	[kWh]
$Q_{temp,corr}$	Korrektur-Term für die Berechnung der Abstrahl- und Konvektionsverluste bei einer Kesseltemperatur von 60 °C.	[kW]
$Q_{Solar}$	Wärmeeintrag des Kollektors, wasserseitig bilanziert (kein Bezug zur solaren Einstrahlung).	[kWh]
$Q_{WW}$	Bezogene Nutzwärme für die Warmwasserbereitung.	[kWh]
$\dot{Q}_{Nutz}$	Wasserseitig bilanzierte Wärmeleistung des Kessels.	[kW]
$\dot{Q}_{Pellet}$	Verbrennungsleistung, gerechnet mit dem unteren Heizwert des Brennstoffes.	[kW]
$UA_{Kessel,AK}$	Temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient des Pelletkessel.	[kJ/(h*K)]
$UA_{Speicher}$	Temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient des Speichers	[kJ/(h*K)]
$\eta_F$	Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	[%]
$\eta_K$	Kesselwirkungsgrad, wasserseitig bilanziert	[%]
$\eta_{K,el}$	Kesselwirkungsgrad, wasserseitig bilanziert, unter Berücksichtigung des elektrischen Energieeintrags	[%]
$\theta_{start}$	Temperatur.	[°C]
$\theta_{end}$	Temperatur.	[°C]
$\lambda$	Luftüberschuss der Verbrennung. Verhältnis der Verbrennungsluftmenge zur stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge.	[-]
$\zeta_K$	Nutzungsgrad des Pelletkessel, wasserseitig bilanziert.	[%]
$\zeta_{K,pe+el}$	Nutzungsgrad des Pelletkessel unter Berücksichtigung von Brennstoff-Verbrauch und elektrischem Verbrauch.	[%]
$\zeta_{K,60^\circ C}$	Nutzungsgrad des Pelletkessel, normiert auf eine Kesseltemperatur von 60 °C.	[%]
$\zeta_{K,pe+el,60^\circ C}$	Nutzungsgrad des Pelletkessel unter Berücksichtigung von Brennstoff-Verbrauch und elektrischem Verbrauch, normiert auf eine Kesseltemperatur von 60 °C.	[%]
$\zeta_{K,pe+el}$	Jahresnutzungsgrad des Pelletkessel unter Berücksichtigung des elektrischen Energieeintrags.	[%]

$\zeta_{S,pe}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie, jedoch ohne solaren und ohne elektrischen Energieeintrag	[%]
$\zeta_{S,pe+so}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des solaren Energieeintrages	[%]
$\zeta_{S,pe+el}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des gewichteten elektrischen Energieeintrages	[%]
$\zeta_{S,pe+so+el}$	Systemnutzungsgrad unter Einbezug der Brennstoffenergie sowie des solaren und des gewichteten elektrischen Energieeintrages	[%]

## Abkürzungsverzeichnis

Die im Bericht verwendeten Abkürzungen sind hier dargestellt.

HSLU	Hochschule Luzern
SPF	Solartechnik Prüfung Forschung
TRNSYS	Transient Energy System Simulation Tool
WÜ	Wärmeübertrager

## Referenzen

- [1] Vogelsanger, P., 2002. The Concise Cycle Test Method - A Twelve Day System Test. IEA SHC Task 26 Technical Report.
- [2] Haberl, R., Frank, E., Vogelsanger, P., 2009. Holistic System Testing – 10 Years of Concise Cycle Testing, Proceedings of ISES Solar World Congress, Johannesburg.
- [3] Konersmann, L., Haller, M., Vogelsanger, P., 2007. PelletSolar – Leistungsanalyse und Optimierung Pellet-Solkombinierter Systeme für Heizung und Warmwasser, Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE, Schweiz. <http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009364.pdf&name=000000270060.pdf>.
- [4] EN 303-5: Heizkessel/ Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, hand- und automatisch beschickte Feuerungen, Nenn-Wärmeleistung bis 300 kW/ Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung. 1999-07-01
- [5] Good, J., Nussbaumer, T., 2009. Emissionsfaktoren moderner Pelletkessel unter typischen Heizbedingungen, Schlussbericht, Bundesamt für Energie BFE Schweiz.
- [6] Vogelsanger, P., Haller, M., 2003. Kompakte Kombi-Solarsysteme auf dem Prüfstand unter Einbezug der Zusatzheizung, Tagungsband des 13. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- [7] Vogelsanger, P., 2004. Referenzbedingungen: Klima, Wärmelast, Kollektorfeldausrüstung und Referenzsystem zur Leistungsbestimmung von Heizsystemen für Raumheizung und Wassererwärmung, <http://www.spf.ch/Concise-Cycle-Test.192.0.html?&L=QEV3UVuu>.
- [8] prEN 12977-3:2006. Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen - Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen.
- [9] Klein, S. A. et al., 2000. TRNSYS 16, a transient system simulation program – reference manual. Solar Energy Laboratory University of Wisconsin – Madison, USA, <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>.
- [10] Haller, M.Y., Paavilainen, J., Konersmann, L., Haberl, R., Dröscher, A., Frank, E., Bales, C. & Streicher, W., 2010. A Unified Model for the Simulation of Oil, Gas, and Biomass Space Heating Boilers for Energy Estimating Purposes - Part I: Model Development. Journal of Building Performance Simulation, 4: 1, 1 – 18.
- [11] Haller, M.Y., Paavilainen, J., Konersmann, L., Haberl, R., Dröscher, A., Frank, E., Bales, C. & Streicher, W., 2010. A Unified Model for the Simulation of Oil, Gas, and Biomass Space Heating Boilers for Energy Estimating Purposes - Part II: Parameterization and Comparison with Measurements. Journal of Building Performance Simulation, 4: 1, 19 – 36.
- [12] Friedl, G., Heckmann, M., Rossmann, P., 2009. Nutzungsgradsteigerung bei Pelletsfeuerungen, 9. IndustrieForum Pellets, Stuttgart.
- [13] Heinz, A., 2007. Application of Thermal Energy Storage with Phase Change Materials in Heating Systems. PhD Thesis, Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology.
- [14] Fiedler, F., Persson, T., 2008. Carbon monoxide emissions of combined pellet and solar heating systems. Applied Energy 86/2, 135–143.
- [15] Persson T, Fiedler F, Rönnelid M, Bales C, 2006. Increasing efficiency and decreasing CO-emissions for a combined solar and wood pellet heating system for single-family houses. In: Pellets 2006 conference, Jönköping, Sweden.
- [16] Haller, M.Y., 2010. Combined Solar and Pellet Heating Systems - Improvement of Energy Efficiency by Advanced Heat Storage Techniques, Hydraulics, and Control. PhD Thesis, Graz University of Technology, Graz, Austria.
- [17] Arbeitsblatt Emissionsfaktoren Feuerungen, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute BAFU), Stand Oktober 2005 (10.30/2005-00180/03/2005.03.01-071/E244-0547).
- [18] DIRECTIVE 2005/32/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL DIRECTIVE 2005/32/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council
- [19] Haberl, R., Konersmann, L., Frank, E., 2009: PelletSolar-2 - Systemoptimierung von Pelletfeuerungen in Kombination mit thermischen Solaranlagen basierend auf dynamischen Simulationen und Messungen im Prüfstand. Jahresbericht, Bundesamt für Energie BFE, Bern.

## **Anhang**

### **RESULTATE DER MESSUNGEN IM STATIONÄREN BETRIEB**

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen an den Pelletkesseln im stationären Betrieb sind in Tabelle 10 dargestellt.

### **EMISSIONSFAKTOREN AUS GEWICHTETEN KONZENTRATIONEN**

In Tabelle 11 und Tabelle 12 werden die an der HSLU ermittelten Emissionsfaktoren der Pelletkessel dargestellt.

**Tabelle 10: Resultate der Messungen im stationären Betrieb der beiden Pelletkessel. Die Messungen SM1 bis SM6 wurden an Kessel 1 durchgeführt, SM7 bis SM12 an Kessel 2.**

$T_{vl}$  = Vorlauftemperatur;  $T_{rl}$  = Rücklauftemperatur; Flow = Kessel-Durchfluss;  $\dot{Q}_{Pellet}$  = Brennstoffleistung;  $\dot{Q}_{Nutz}$  = Nutzleistung;  $P_{el}$  = Elektrische Leistungsaufnahme;  $T_{rg}$  = Rauchgastemperatur;  $\lambda$  = Luftüberschuss;  $\eta_K$  = Kessel-Wirkungsgrad;  $\eta_{K,pe+el}$  = Kessel-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der elektrischen Leistungsaufnahme;  $\eta_F$  = Feuerungstechnischer Wirkungsgrad.

	Nr.	$T_{vl}$ [°C]	$T_{rl}$ [°C]	Flow [kg/h]	$\dot{Q}_{Pellet}$ [kW]	$P_{el}$ [W]	$\dot{Q}_{Nutz}$ [kW]	$T_{rg}$ [°C]	$\lambda$ [ - ]	$\eta_K$ [%]	$\eta_{K,pe+el}$ [ - ]	$\eta_F$ [%]
<b>Kessel 1</b>	SM1	62.2	52.1	415	5.50	75.4	4.86	79.8	2.91	88.4	84.9	93.4
	SM2	63.5	53.3	604	8.05	93.2	7.12	94.7	2.53	88.4	85.5	92.9
	SM3	61.7	51.1	833	11.61	118.9	10.25	130.4	2.44	88.3	85.6	89.7
	SM4	77.3	67.6	865	11.49	121.5	9.80	140.6	2.48	85.2	82.6	88.7
	SM5	79.4	69.4	588	8.06	92.7	6.88	113.7	2.80	85.3	82.5	90.2
	SM6	78.3	68.5	421	5.63	75.9	4.80	94.0	3.23	85.2	81.9	91.0
<b>Kessel 2</b>	SM7	84.6	61.9	375	11.04	59.8	9.89	105.7	1.62	89.6	88.2	94.7
	SM8	83.6	71.0	376	6.34	39.2	5.54	81.4	1.83	87.4	85.8	95.8
	SM9	83.4	78.5	375	2.85	32.1	2.15	61.0	2.18	75.2	72.8	96.7
	SM10	69.5	44.9	381	12.07	61.2	10.90	100.7	1.62	90.3	88.9	95.0
	SM11	59.6	45.1	379	6.93	40.2	6.39	71.1	1.81	92.1	90.6	96.5
	SM12	61.1	44.9	122	2.57	22.9	2.27	49.6	2.23	88.5	86.2	97.6

**Tabelle 11: Emissionsfaktoren (aus gewichteten Konzentrationen), Betriebsphasen und Energieflüsse des Pelletkessel von System 1. Quelle: [5]**

		Stationär				Instationär						
		100%	70%	50%	30%	100% --> 70%	70% --> 50%	50% --> 70%	70% --> 100%	Kalt- start	Warm- start	Aus- schalten
Luftüberschuss	[-]	2.3	2.6	2.9	3.1	2.5	3.1	2.7	2.3	9.7	3.2	9.8
CO	[mg/MJ]	123.9	196.6	365.3	777.3	94.4	239.6	299.6	184.1	593.8	644.2	2386.4
Gesamt-KW	[mg/MJ]	2.2	1.4	11.1	5.3	0.3	0.6	0.8	0.5	61.6	10.7	66.3
Methan	[mg/MJ]	1.4	1.2	10.6	2.5	0.3	0.4	0.3	0.1	18.2	4.7	30.9
Nichtmethan-KW	[mg/MJ]	2.1	1.4	10.7	2.8	0.6	0.2	0.5	0.4	46.6	7.2	35.4
NO <sub>x</sub>	[mg/MJ]	63.3	64.5	61.8	59.3				58.9	40.8	68.3	37.2
Feststoff gravimetrisch	[mg/MJ]	17.9	16.0	17.1	20.5	14.7	16.0	24.3	24.3	26.9	26.2	
Feinpartikel SMPS+OPC	[mg/MJ]	19.8	17.8	30.0	34.5	21.5	33.8	19.6	17.2	37.7	16.0	
Dauer	[min]	360.0	360.0	360.0	360.0	19.8	30.0	19.8	27.0	18.6	15.0	10.0
Zugeführte Energie	[MJ]	269.6	233.3	177.98	84.67	13.12	12.96	10.83	22.55	12.86	10.37	0.18
Zugeführte Leistung	[kW]	12.5	10.8	8.2	3.9	11.0	7.2	9.1	13.9	11.5	11.5	0.3

**Tabelle 12: Emissionsfaktoren (aus gewichteten Konzentrationen), Betriebsphasen und Energieflüsse des Pelletkessel von System 2. Quelle: [5]**

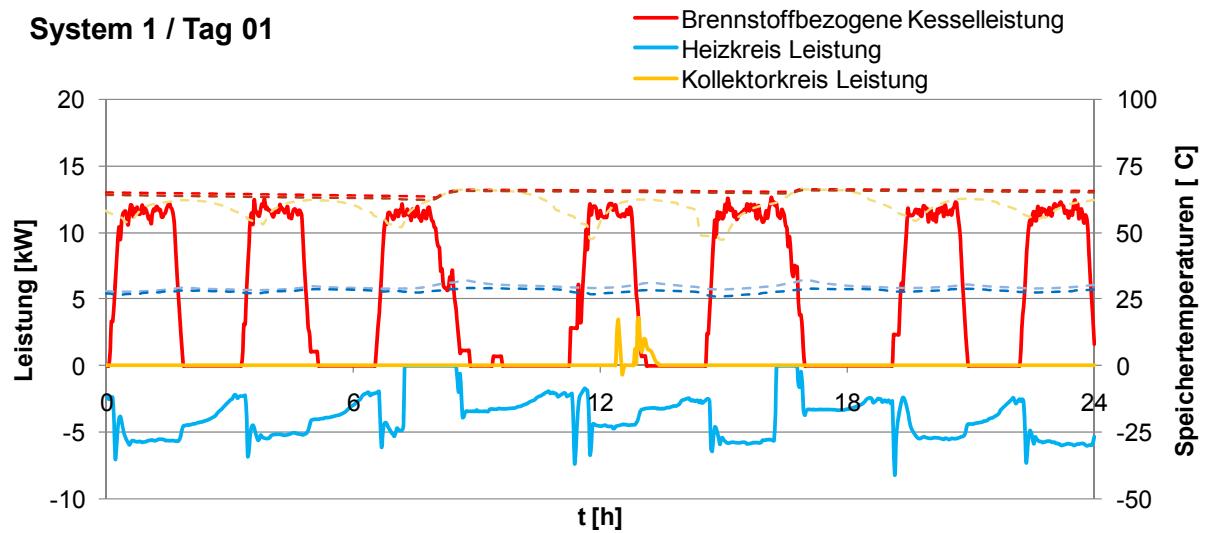
		Stationär			Kaltstart	Takten			
		100%	70%	30%		Zyklus	Warmstart	Stationär	Stop
Luftüberschuss	[-]	1.7	1.8	2.2	8.1	3.1	4.6	1.7	7.4
CO	[mg/MJ]	7.6	1.5	28.3	802.5	1032.9	1691.9	13.3	4017.2
Gesamt-KW	[mg/MJ]	0.2	0.2	0.4	48.7	16.3	83.8	2.1	72.3
Methan	[mg/MJ]	0.1	0.1	0.2	12.8	4.0	20.4	0.2	14.1
Nichtmethan-KW	[mg/MJ]	0.1	0.1	0.2	35.8	12.4	63.4	1.9	58.3
NOX	[mg/MJ]	68	68	66	73	71	76	66	50
Feststoff gravimetrisch	[mg/MJ]	12.7	10.0	6.0	14.3	11.7			
Feinpartikel SMPS+OPC	[mg/MJ]	15.4	10.2	13.1	40.3	13.1			
Dauer	[min]	360.0	360.0	360.0	14.1	35.9	8.0	12.2	15.8
Zugeführte Energie	[MJ]	264.38	181.44	69.12	3.28	11.64	1.76	8.02	1.85
Zugeführte Leistung	[kW]	12.2	8.4	3.2	3.9	5.4	3.7	11.0	2.0

## **VERLAUF DER 12-TÄGIGEN MESSUNGEN**

In den nachfolgenden Grafiken (Abbildung 41 bis Abbildung 52) ist der Verlauf der 12-tägigen Messung des Systemtests von System 1 dargestellt.

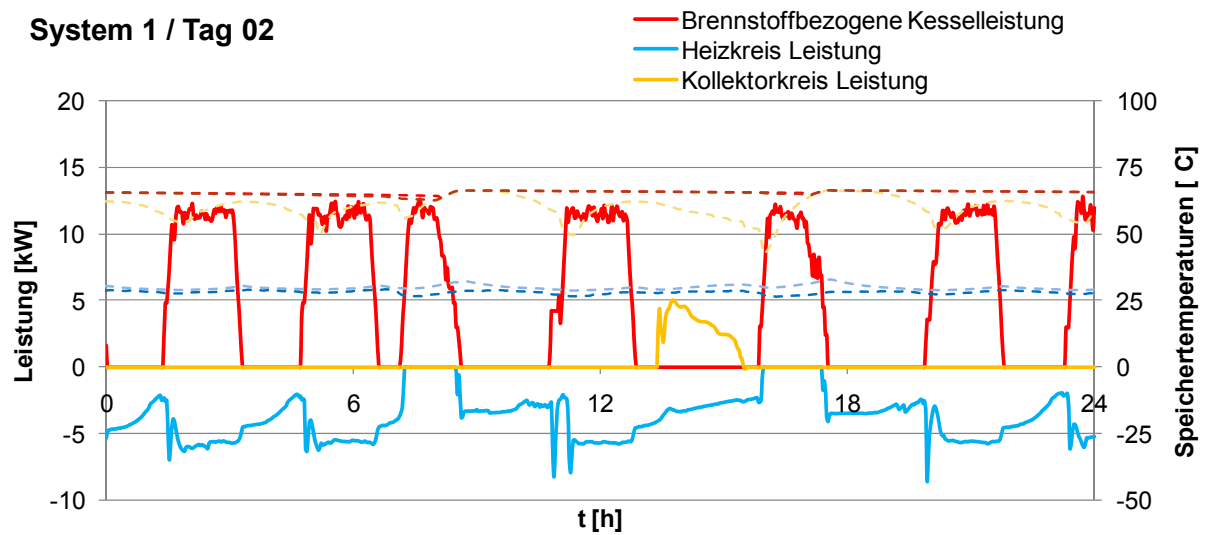
In den nachfolgenden Grafiken (Abbildung 53 bis Abbildung 64) ist der Verlauf der 12-tägigen Messung des Systemtests von System 2 dargestellt.

**System 1 / Tag 01**



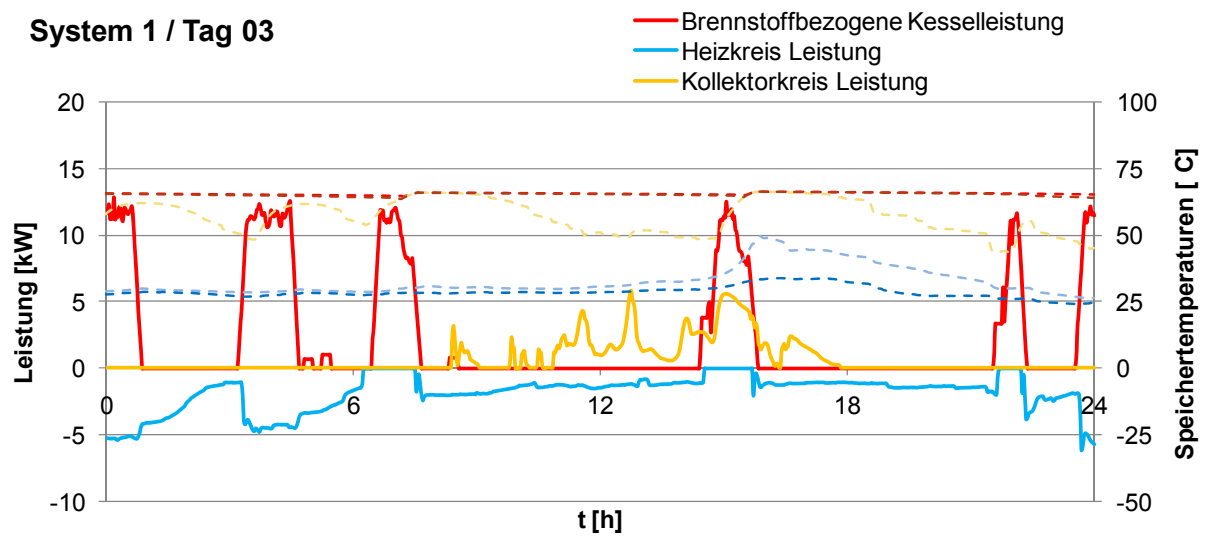
**Abbildung 41**

**System 1 / Tag 02**



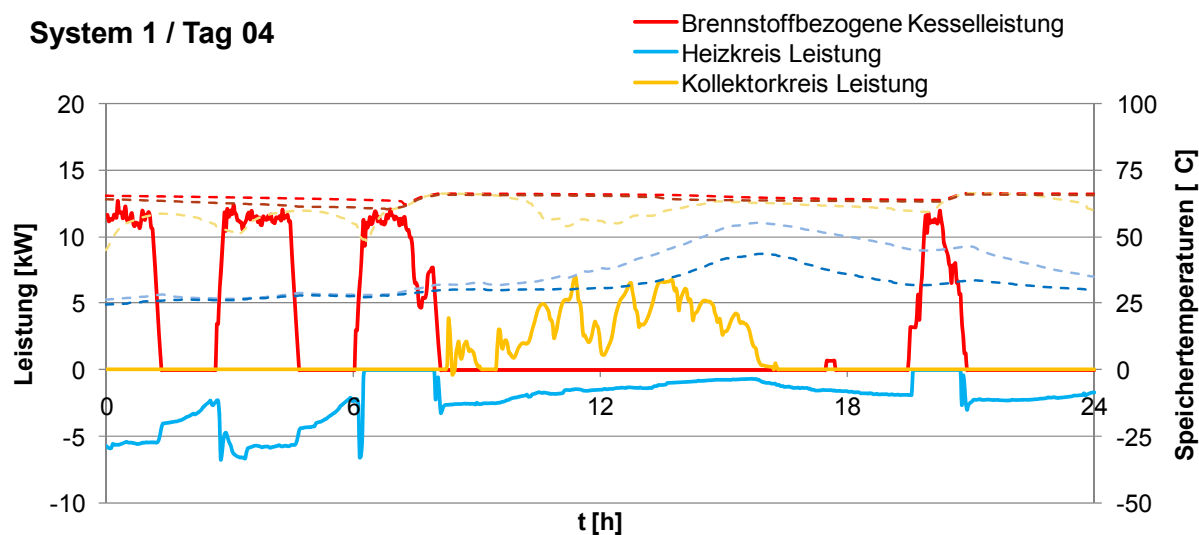
**Abbildung 42**

**System 1 / Tag 03**



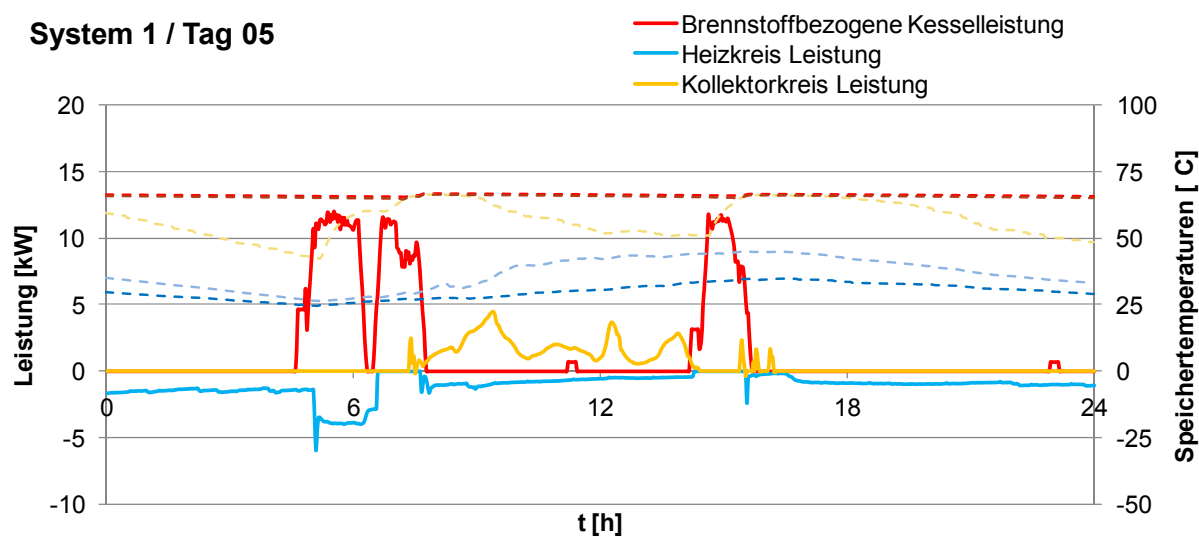
**Abbildung 43**

**System 1 / Tag 04**



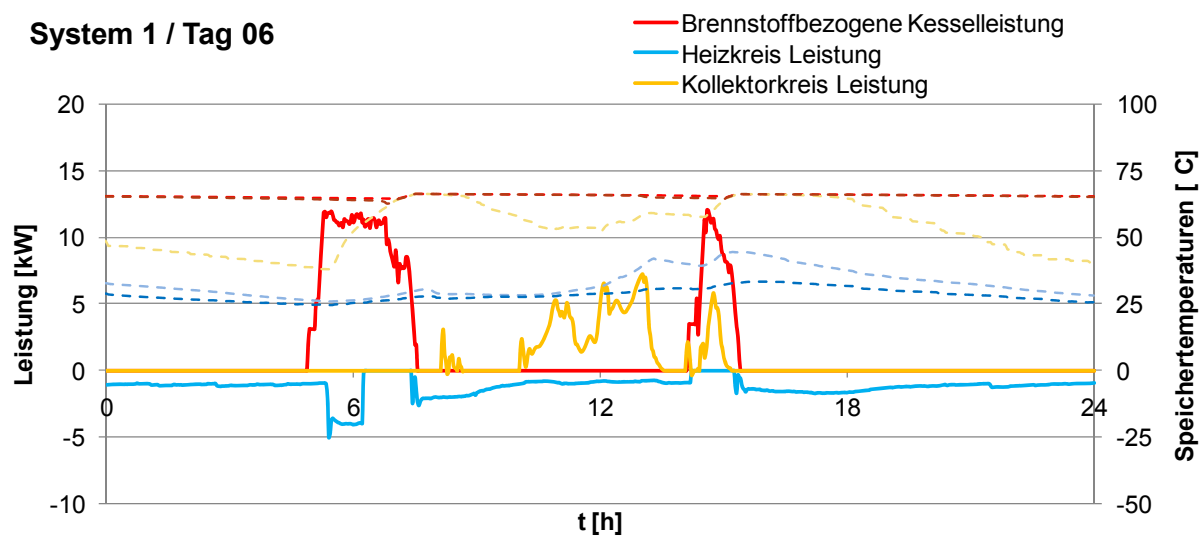
**Abbildung 44**

**System 1 / Tag 05**



**Abbildung 45**

**System 1 / Tag 06**



**Abbildung 46**

### System 1 / Tag 07

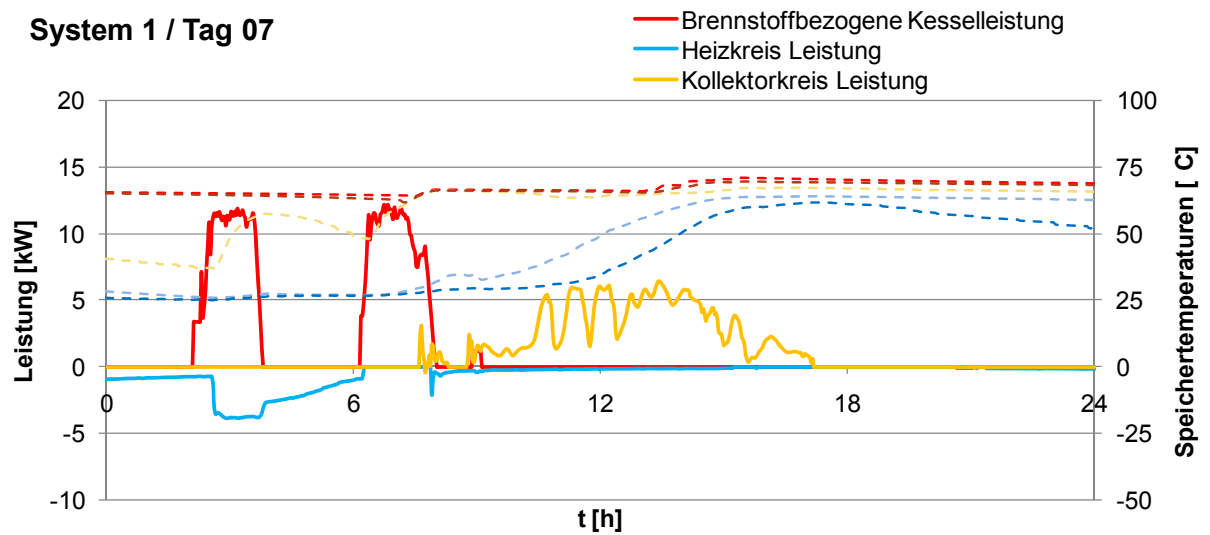


Abbildung 47

### System 1 / Tag 08

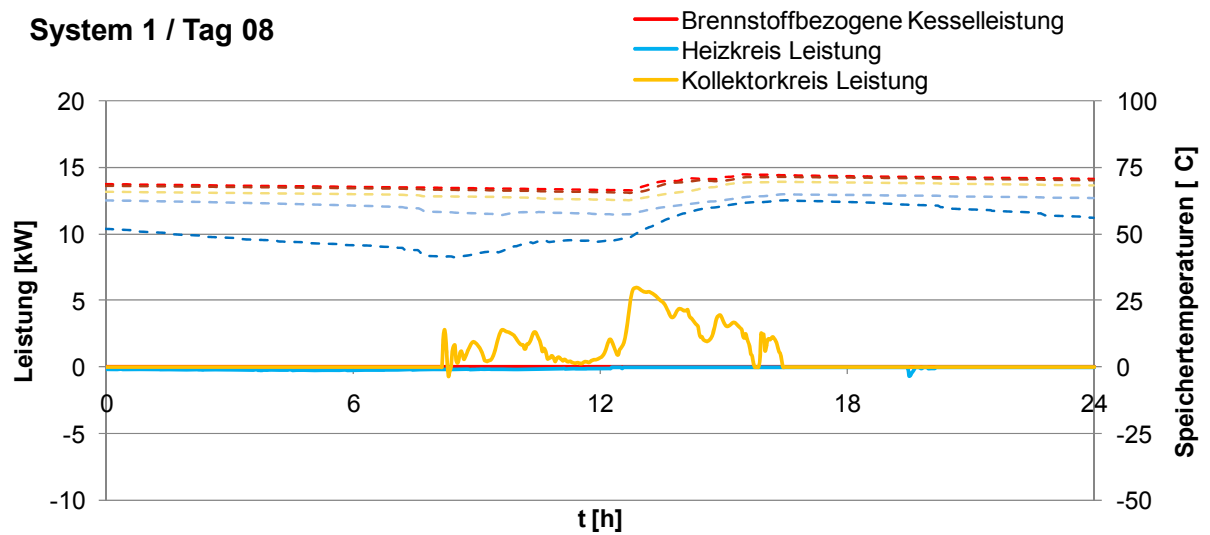


Abbildung 48

### System 1 / Tag 09

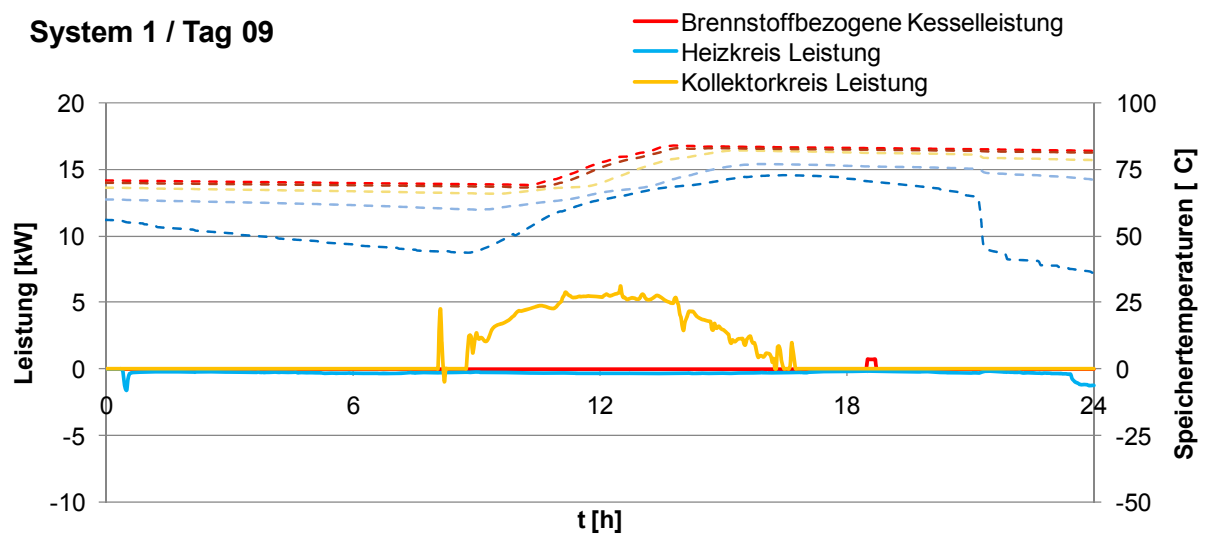
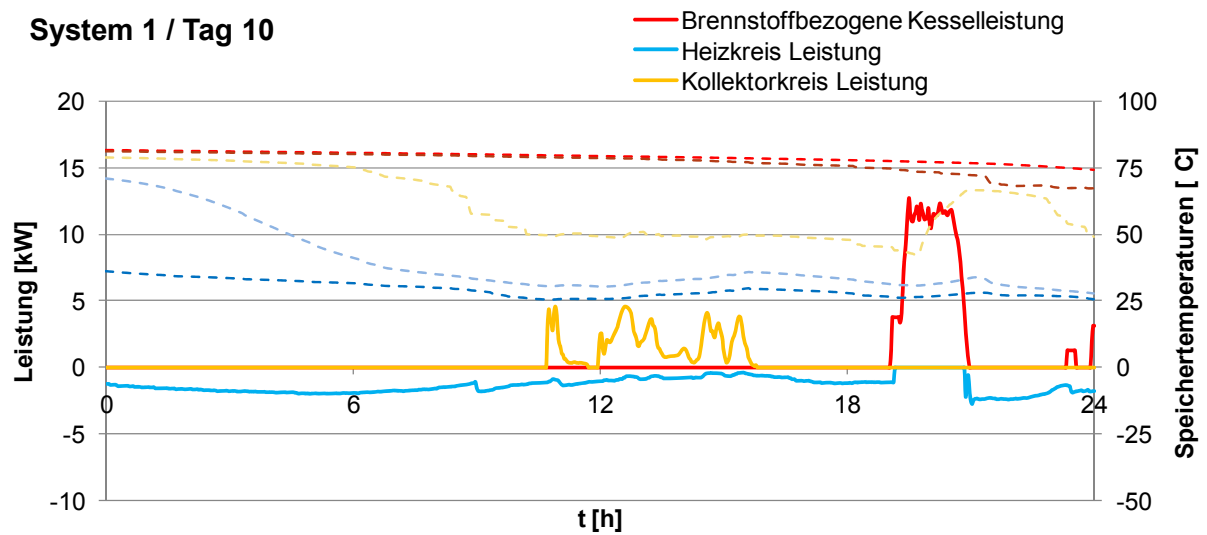


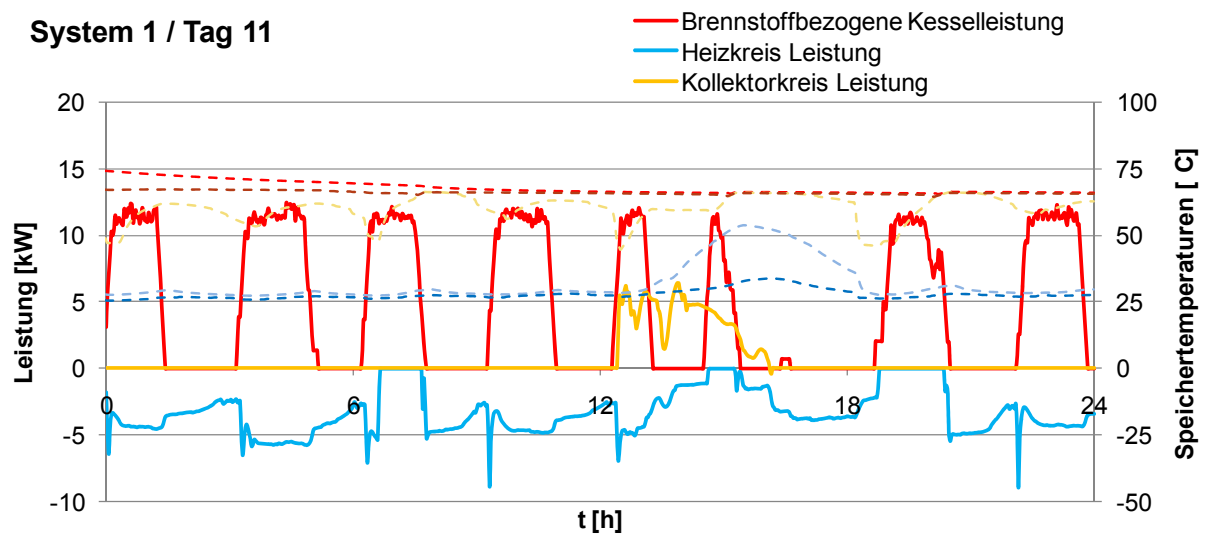
Abbildung 49

**System 1 / Tag 10**



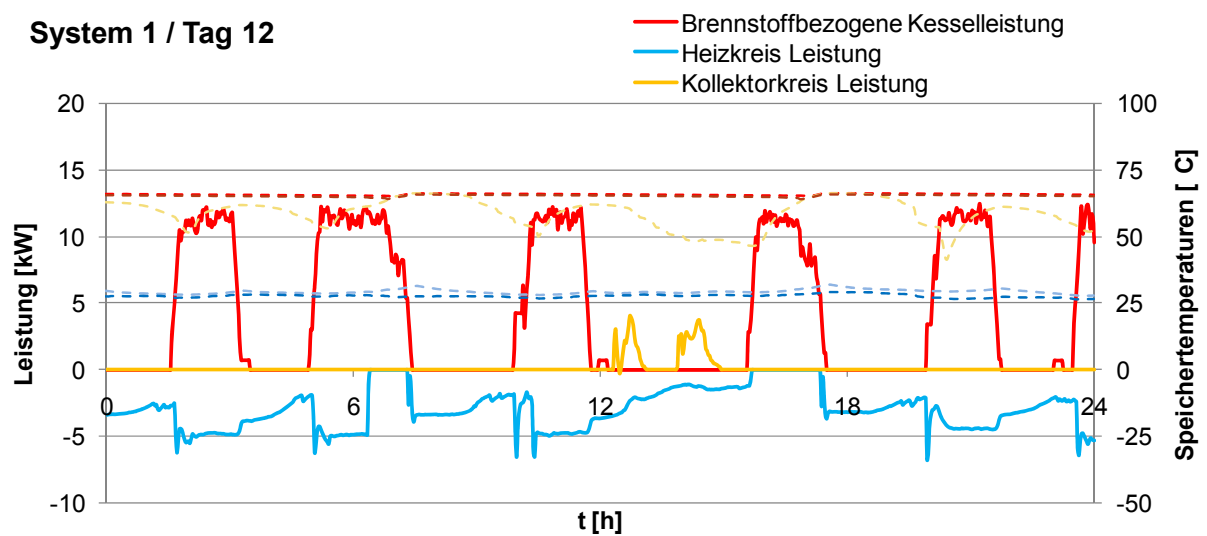
**Abbildung 50**

**System 1 / Tag 11**



**Abbildung 51**

**System 1 / Tag 12**



**Abbildung 52**

### System 2 / Tag 01

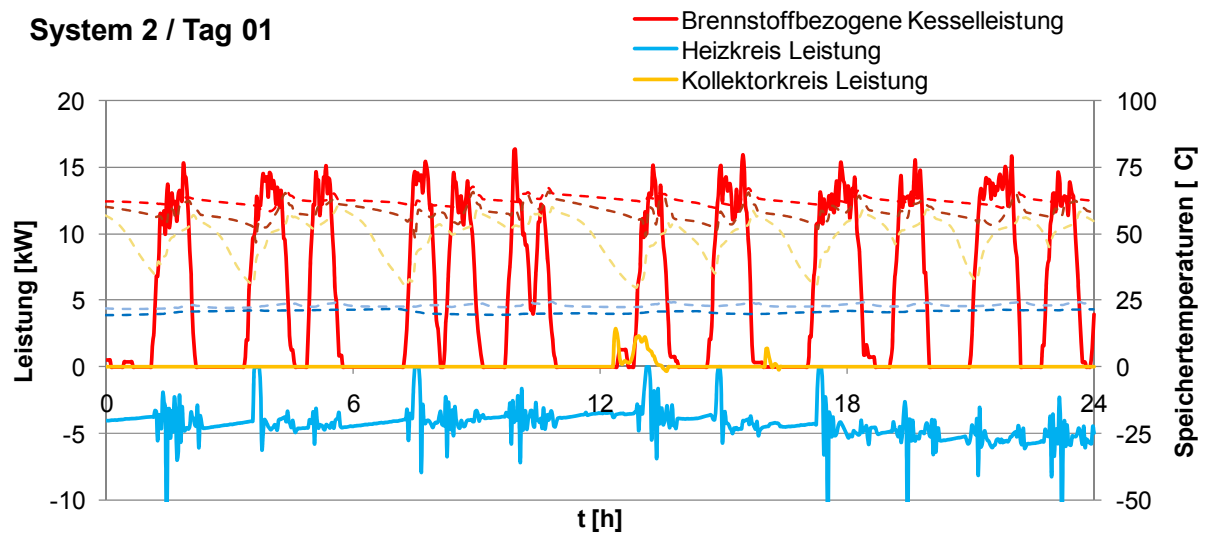


Abbildung 53

### System 2 / Tag 02

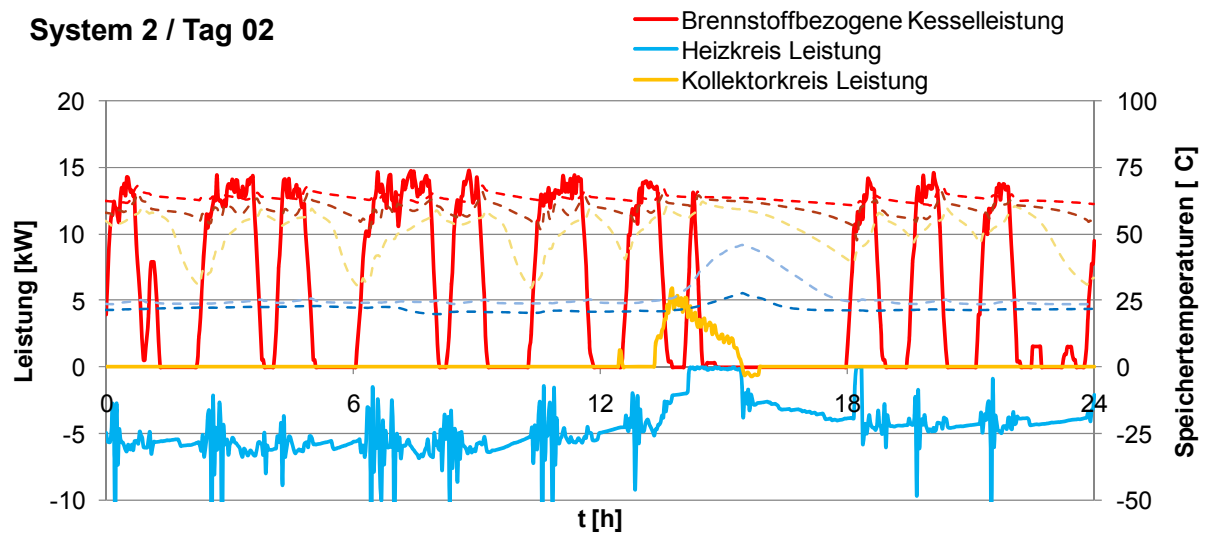


Abbildung 54

### System 2 / Tag 03

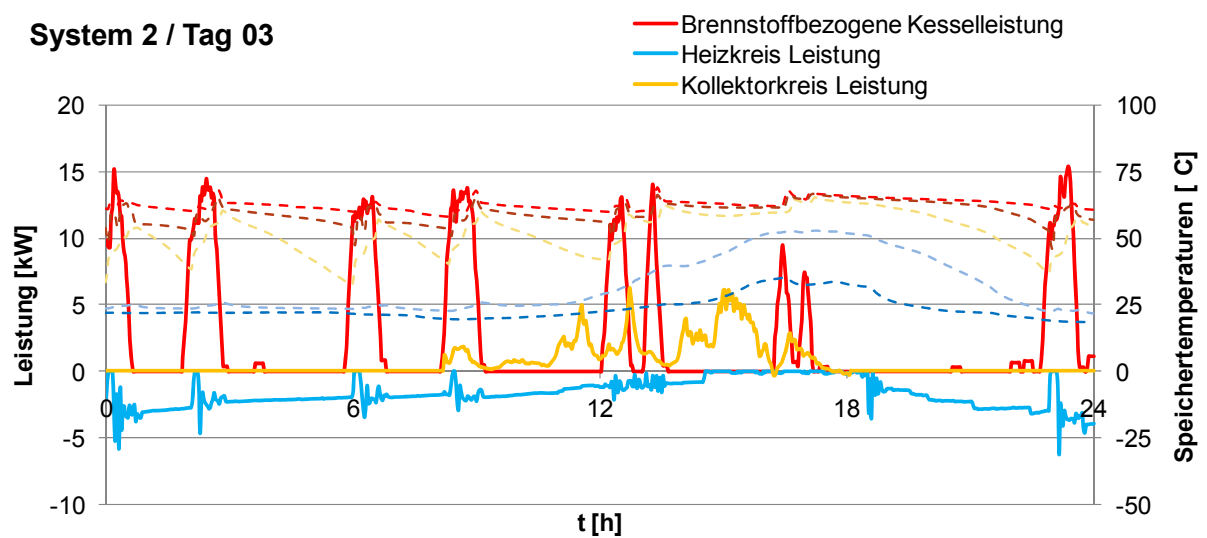


Abbildung 55

### System 2 / Tag 04

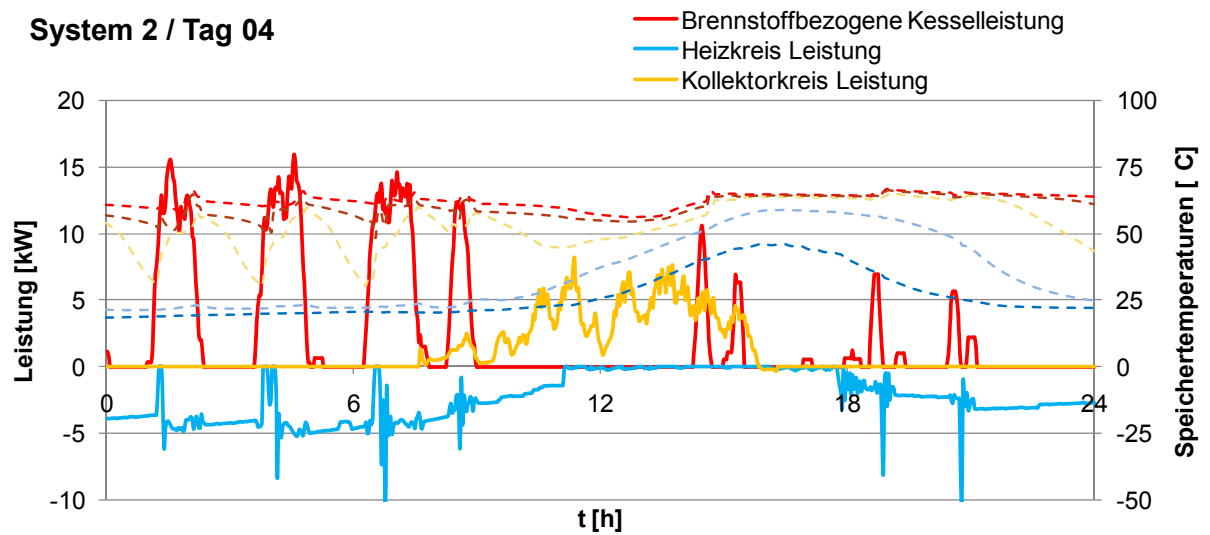


Abbildung 56

### System 2 / Tag 05

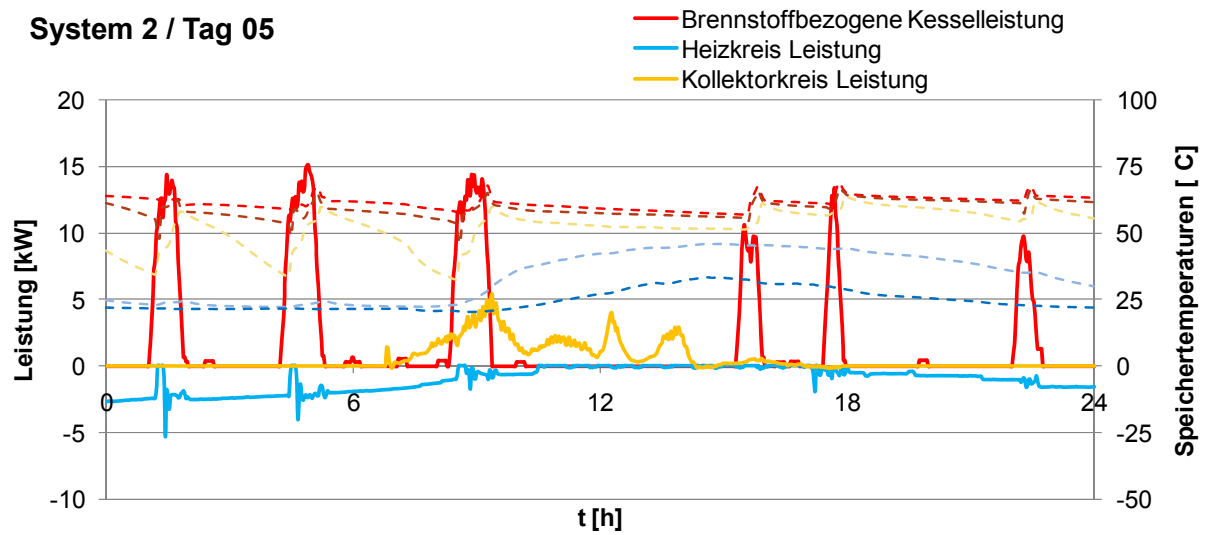


Abbildung 57

### System 2 / Tag 06

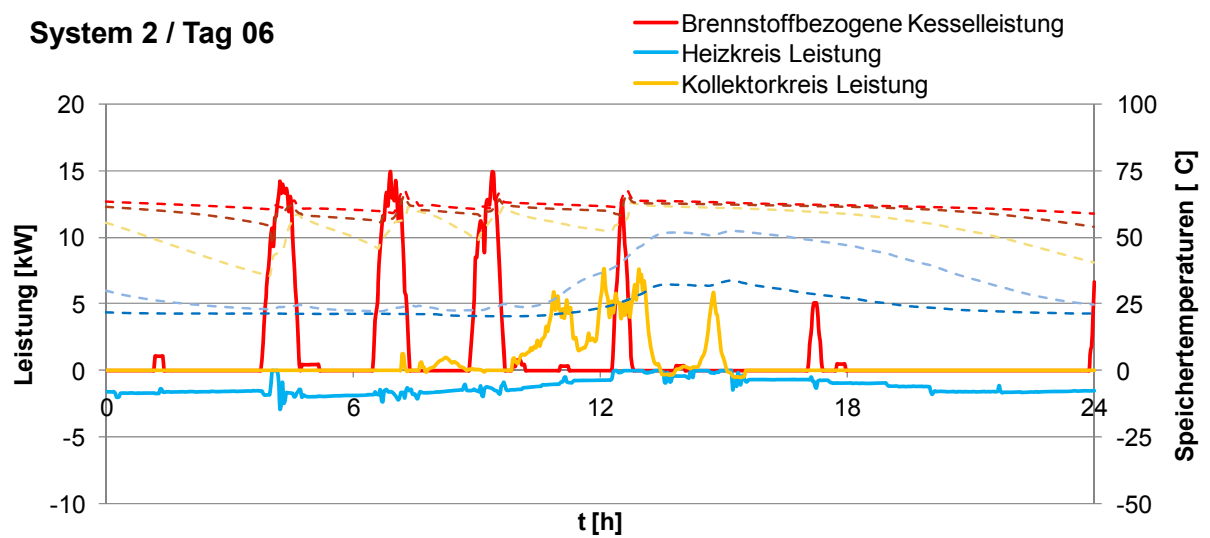


Abbildung 58

### System 2 / Tag 07

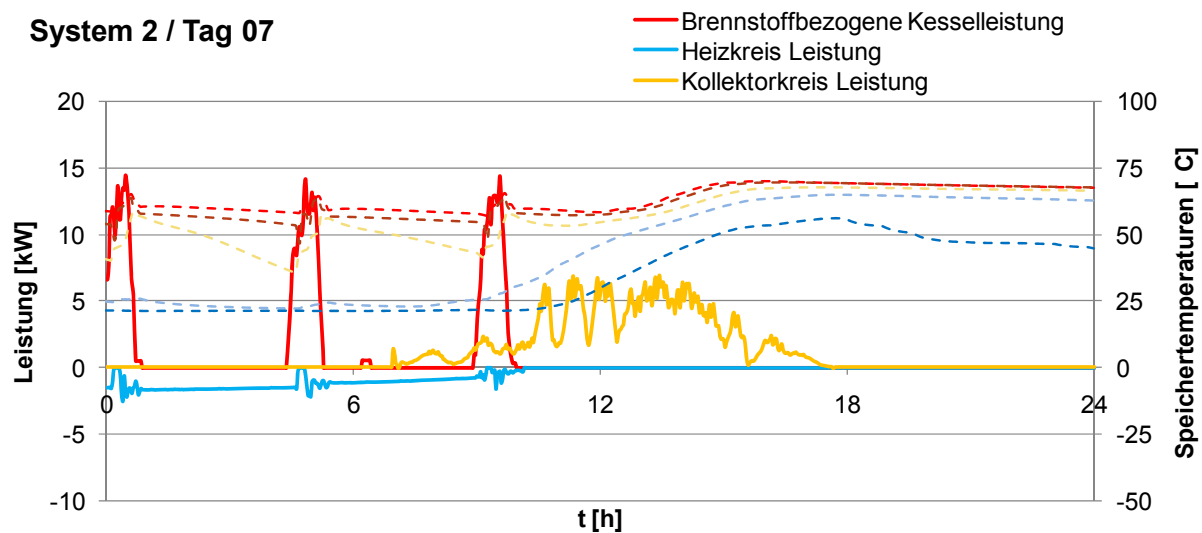


Abbildung 59

### System 2 / Tag 08

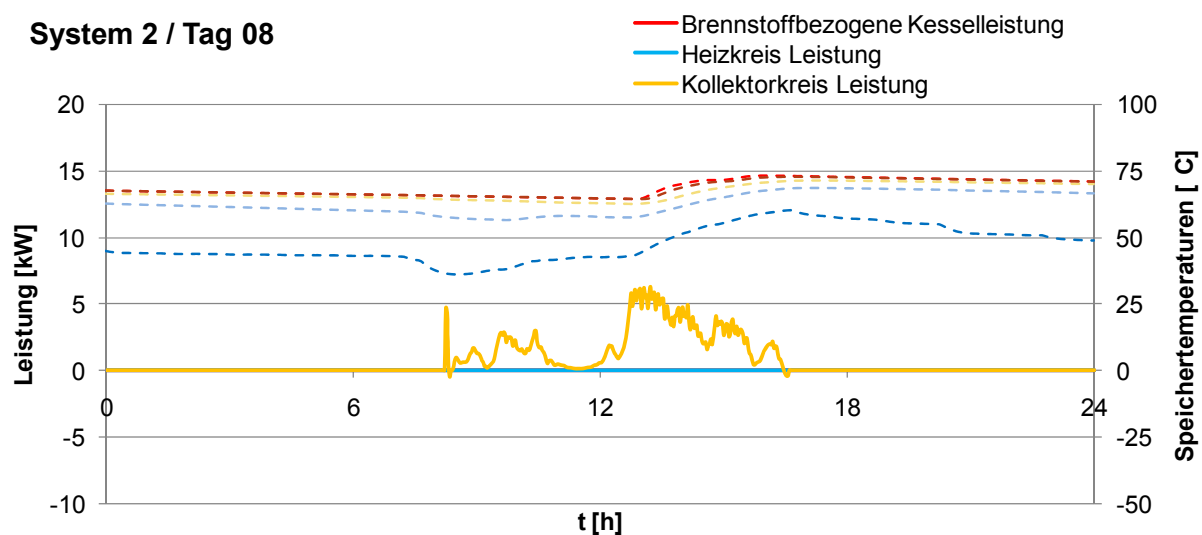


Abbildung 60

### System 2 / Tag 09

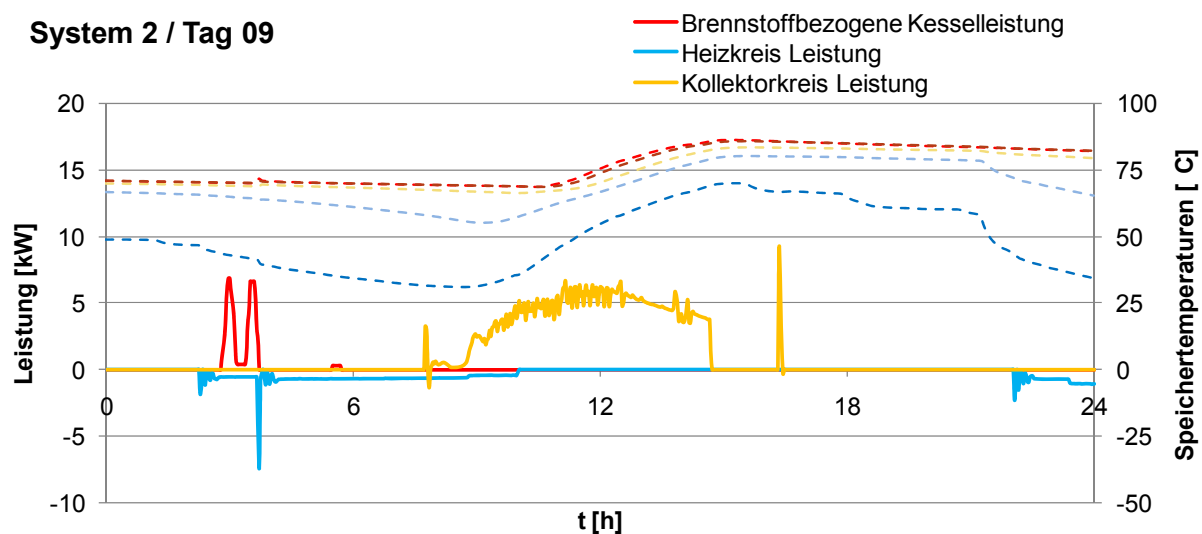


Abbildung 61

### System 2 / Tag 10

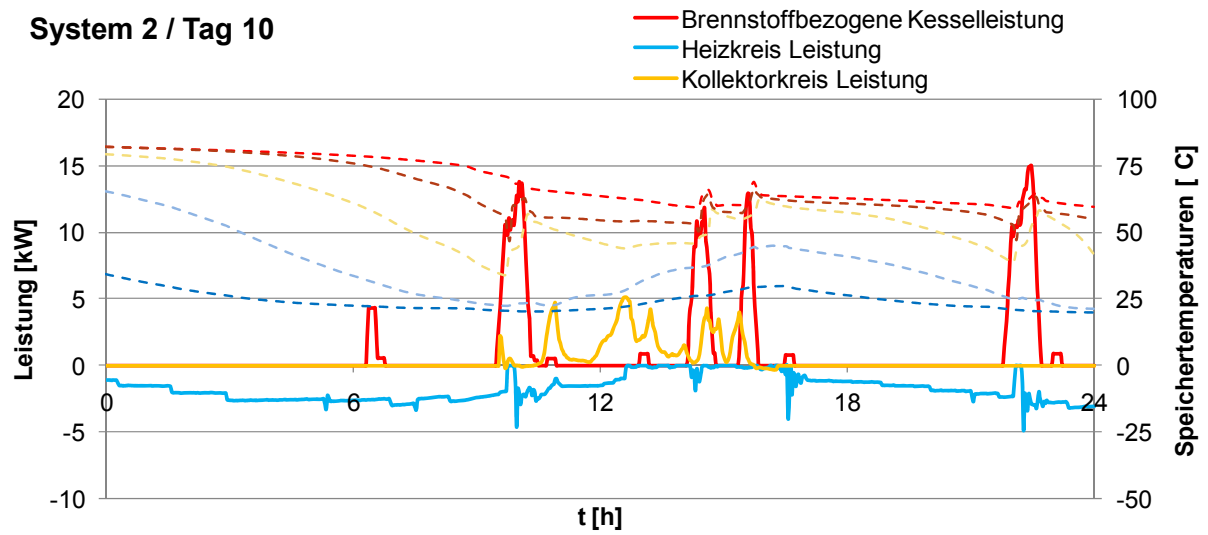


Abbildung 62

### System 2 / Tag 11

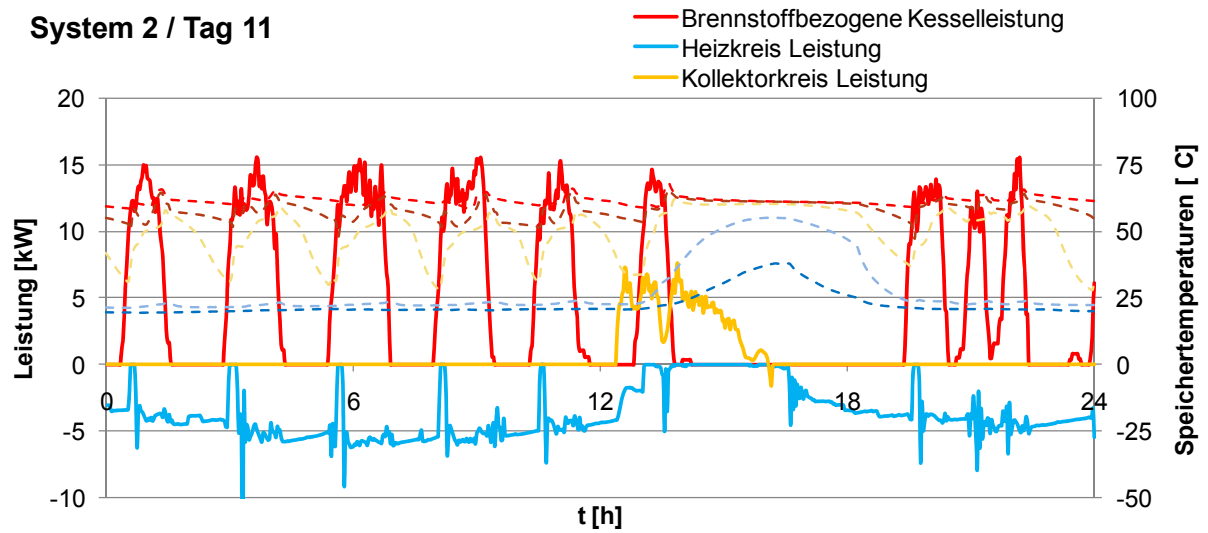


Abbildung 63

### System 2 / Tag 12

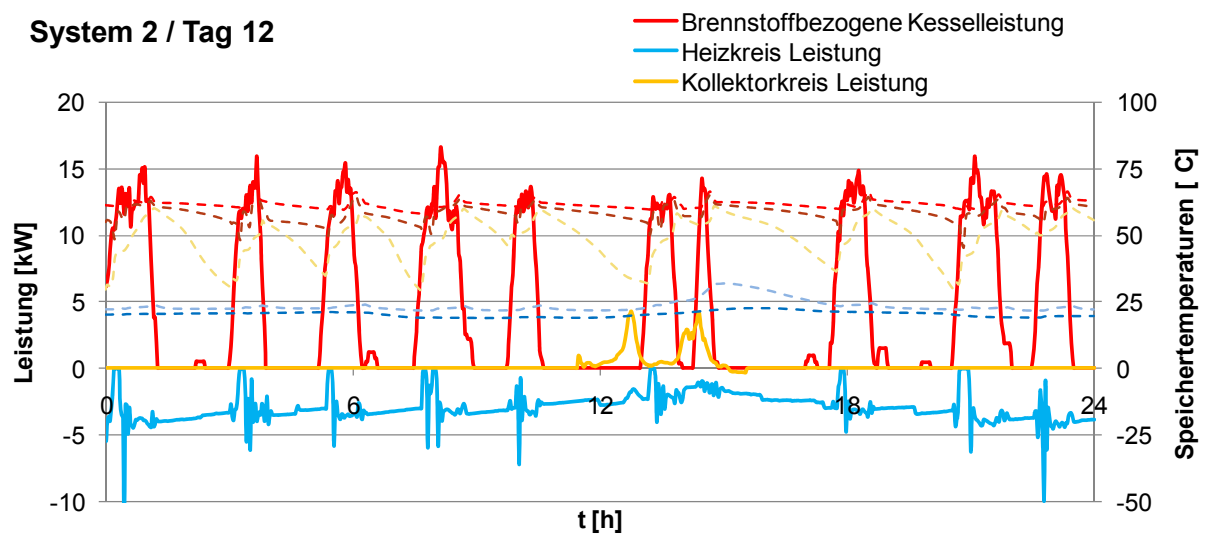


Abbildung 64

## ERGEBNISSE DER JAHRESSIMULATIONEN

**Tabelle 13: Tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Jahressimulationen. Erklärungen zu den einzelnen Simulationsmodellen sind in Tabelle 2 und Tabelle 5 sowie in Tabelle 6 und Tabelle 9 zu finden.**

	JS1-V1	JS1-V2	JS1-V0	JS2-V1	JS2-V2	JS2-V0
<b>Energie Input [kWh]</b>						
Pelletseintrag	21'203	20'860	26'147	19'938	18'752	23'479
Kollektoreintrag	4'862	5'020	0	4'801	5'267	0
Elektrischer Eintrag	1'378	1'424	1'686	760	705	786
Elektrischer Eintrag (gewichtet)	4'135	4'271	5'058	2'280	2'116	2'358
Total	27'444	27'304	27'833	25'498	24'725	24'265
Total (gewichtet)	30'200	30'151	31'205	27'018	26'136	25'837
<b>Energie Output [kWh]</b>						
Raumheizung	15'507	15'507	15'506	15'507	15'507	15'507
Warmwasser	2'799	2'799	2'799	2'799	2'799	2'799
Verluste	8'039	7'912	8'654	6'411	5'699	5'161
ESSto	1	-3	0	0	0	0
Total	26'344	26'217	26'959	24'717	24'004	23'466
<b>Verluste [kWh]</b>						
Kessel	4'170	4'020	6'178	2'967	2'515	3'278
Speicher	1'878	1'740	904	1'929	1'824	934
Leitungen	1'903	2'066	1'463	1'511	1'356	944
<b>Kesselspezifische Werte</b>						
Wasserseitig bilanzierter Energieeintrag [kWh]	17'248	17'097	20'685	16'966	16'233	20'196
Anzahl Brennerstarts [-]	1'372	519	2'435	1'963	585	998
Brennerlaufzeit [h]	1'734	2'792	3'241	1'571	2'698	4'849
<b>Nutzungsgrade</b>						
$\zeta_K$	81.3%	82.0%	79.1%	85.1%	86.6%	86.0%
$\zeta_{S,pe}$	86.3%	87.8%	70.0%	91.8%	97.6%	78.0%
$\zeta_{S,pe+so}$	70.2%	70.7%	70.0%	74.0%	76.2%	78.0%
$\zeta_{S,pe+el}$	72.2%	72.8%	58.7%	82.4%	87.7%	70.9%
$\zeta_{S,pe+so+el}$	60.6%	60.7%	58.7%	67.8%	70.0%	70.9%

**Tabelle 14: Tabellarische Darstellung der jährlichen Emissionsfrachten aus den Jahressimulationen.**  
<sup>(1)</sup> Die Feststoff- und Feinpartikel Emissionen konnten in den auf System 2 basierenden Simulationsmodellen nicht ermittelt werden da die Emissions-Messdaten des Pelletkessel nicht für eine entsprechende Parametrisierung des Simulationsmodells ausreichen.

		JS1-V1	JS1-V2	JS1-V0	JS2-V1	JS2-V2	JS2-V0
CO	[g]	17'614	24'184	36'390	20'913	6'735	11'594
Gesamt-KW	[g]	376	726	815	569	190	319
Methan	[g]	177	590	541	128	47	79
Nichmethan-KW	[g]	294	664	672	441	143	240
NO <sub>x</sub>	[g]	4'901	4'681	5'172	4'843	4'534	5'632
Feststoff	[g]	1'515	1'376	1'926	(1)	(1)	(1)
Feinpartikel	[g]	1'502	2'021	2'267	(1)	(1)	(1)

**Tabelle 15: Spezifische Emissionen der Systeme berechnet aus den Jahressimulationen. Emissionsfaktoren des BAFU [17].**

		JS1-V1	JS1-V2	JS1-V0	JS2-V1	JS2-V2	JS2-V0	BAFU
CO	[mg/MJ]	230.8	322.0	386.6	291.4	99.8	137.2	250.0
Gesamt-KW	[mg/MJ]	4.9	9.7	8.7	7.9	2.8	3.8	27.0
Methan	[mg/MJ]	2.3	7.9	5.7	1.8	0.7	0.9	20.0
Nichmethan-KW	[mg/MJ]	3.9	8.8	7.1	6.1	2.1	2.8	7.0
NO <sub>x</sub>	[mg/MJ]	64.2	62.3	54.9	67.5	67.2	66.6	170
Feststoffe	[mg/MJ]	19.9	18.3	20.5				30
Feinpartikel	[mg/MJ]	19.7	26.9	24.1				30