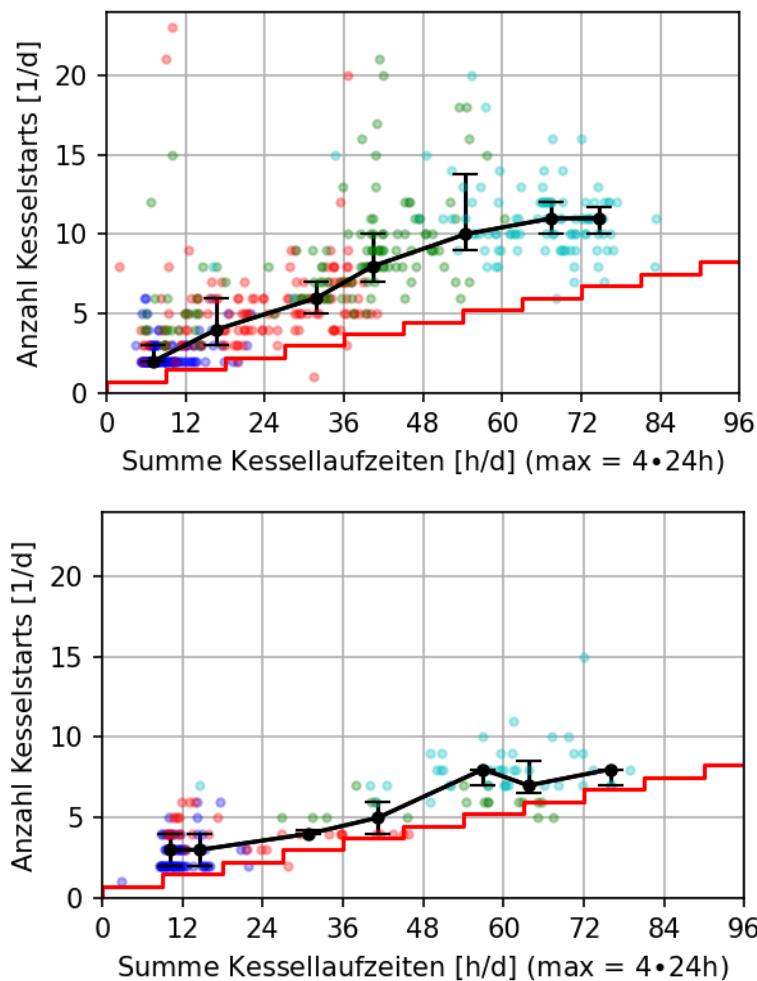




Schlussbericht vom 21. April 2022

Holzkessel Kaskadenanlagen mit Speicher (HoKaSpe)

Dimensionierung und Regelung von Kaskadenanlagen mit
Holzheizungen und Wärmespeicher



Anzahl täglicher Kesselstarts in Funktion der summierten Betriebsstunden einer Kaskade mit vier Kesseln.

Oben: vor Optimierung, unten: nach Optimierung.

Anzahl Kessel in Betrieb: blau = 1, rot = 2, grün = 3, türkis = 4.

Schwarz: Median und Quartile. Rote Linie: Starts durch Entaschungen alle 12 Stunden.

Quelle: Verenum AG, Zürich 2022.

Datum: 21. April 2022

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfängerinnen:

Hochschule Luzern - Technik & Architektur, 6048 Horw, www.hslu.ch
Verenum AG, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich, www.verenum.ch

Autoren:

Thomas Nussbaumer, Hochschule Luzern, Horw und Verenum AG, Zürich
Jürgen Good, Verenum AG, 8006 Zürich
Felix Schumacher, Hochschule Luzern - Technik & Architektur, 6048 Horw
Adrian Lauber, Verenum AG, Zürich

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch
Daniel Binggeli, daniel.binggeli@bfe.admin.ch

Mitarbeit:

Jürg Fehlmann, Liebi LNC AG, 3753 Oey-Diemtigen
Markus Heitzmann, Holzfeuerungen Schweiz HFS und Heitzmann AG, 6105 Schachen
Andres Jenni, Ardens GmbH, 4410 Liestal
Andreas Keel, Holzenergie Schweiz, 8005 Zürich
Christoph Kohler, Allotherm AG, 3645 Gwatt
Jörg Marti, Schmid AG energy solutions, 8360 Eschlikon
Daniel Obermayr, Heitzmann AG, 6105 Schachen
Urs Rhyner, Energie Ausserschwyz AG, 8854 Galgenen

BFE-Vertragsnummer: SI/501909-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.

Zusammenfassung

Im Projekt wird das Verhalten von Heizzentralen mit drei und vier in Kaskade und mit Wärmespeichern betriebenen automatischen Holzkesseln untersucht. Dazu wurden Betriebsdaten von drei Heizzentralen analysiert und ein Simulationsmodell für ein typisches Wärmebedarfsprofil entwickelt. Das Modell wurde mit Betriebsdaten validiert und zum Vergleich verschiedener Konfigurationen und Regelkonzepte eingesetzt. Die Untersuchung zeigt, dass mit Kaskadenanlagen eine monovalente und fossilfreie Wärmeerzeugung möglich ist, die Kessel dabei durchschnittlich 4 bis 12 Stunden unterbruchfrei laufen und rund 350 bis 1000 Anfahrphasen pro Jahr aufweisen, von denen rund die Hälfte durch die automatische Entaschung verursacht werden. Anhand des Modells wird mit einer Sensitivitätsanalyse der Einfluss der Parameter beschrieben und gezeigt, dass der Einsatz einer Wärmespeicherung vorteilhaft und eine Speicherkapazität von rund einer Stunde für zwei Drittel der Gesamtleistung sinnvoll ist. Vorteilhaft ist zudem ein Betrieb mit Leistungsmodulation der Kessel und der Einsatz einer Kaskadenregelung, die einen geeignet definierten Speicherladezustand berücksichtigt.

Résumé

Le projet étudie des centrales de chauffage avec trois et quatre chaudières à bois automatiques fonctionnant en cascade et avec des accumulateurs de chaleur. Les données d'exploitation de trois centrales de chauffage ont été analysées et un modèle de simulation a été développé pour un profil de demande de chaleur typique. Le modèle a été validé avec des données d'exploitation et utilisé pour comparer différentes configurations et différents concepts de régulation. L'étude montre que les installations en cascade permettent une production de chaleur monovalente et exempte d'énergie fossile, que les chaudières fonctionnent en moyenne 4 à 12 heures sans interruption et qu'elles présentent environ 350 à 1000 phases de démarrage par an, dont la moitié environ sont dues au nettoyage automatique de la grille. Le modèle permet de décrire l'influence des paramètres à l'aide d'une analyse de sensibilité et de montrer que l'utilisation d'un accumulateur de chaleur est avantageuse et qu'une capacité d'accumulation d'environ une heure pour deux tiers de la puissance totale est raisonnable. Il est en outre avantageux d'équiper les chaudières avec une modulation de puissance et d'utiliser une régulation de cascade qui tient compte d'un état de charge de l'accumulateur défini de manière appropriée.

Summary

The project investigates the behaviour of central heating systems with three and four automatic wood boilers operated in cascade and with heat accumulators. For this purpose, operating data of three central heating plants were analysed and a simulation model for a typical heat demand profile was developed. The model was validated with operating data and used to compare different configurations and control concepts. The study shows that monovalent and fossil-free heat generation is possible with cascade systems, with the boilers running for an average of 4 to 12 hours without interruption and with around 350 to 1000 start-up phases per year, around half of which are caused by the automatic de-ashing of the grate. Using the model, the influence of the parameters is described with a sensitivity analysis and it is shown that the use of heat storage is advantageous and that a capacity of around one hour for two thirds of the total heat output is suitable. It is also advantageous to operate the boilers with power modulation and to use a control system for the cascade that takes into account a suitably defined storage charging level.

Take-Home Messages

- Die an Praxisanlagen und durch Modellierung untersuchten Kaskadenanlagen mit drei oder vier Holzkesseln und Wärmespeichern ermöglichen eine monovalente, fossilfreie Wärmeerzeugung mit Energieholz zur Versorgung typischer Fernwärmennetze.
- Bei den in der Praxis untersuchten Anlagen weisen die Kessel unterbruchfreie Laufzeiten von durchschnittlich 4 bis 12 Stunden auf. Wenn sowohl Anfahrphasen aus kaltem Zustand als auch solche aus betriebswarmem Zustand (zum Beispiel nach kurzem Stillstand zur periodischen Entaschung) als Starts gezählt werden, treten im Mittel zwischen rund 350 und 1000 Starts pro Jahr und Kessel sowie zwischen rund 1400 und 2600 Starts pro Jahr und Anlage auf
- Bei den untersuchten Feuerungen handelt es sich um Seriengeräte, die über eine periodische Entaschung verfügen, welche zu einer Abschaltung der Kessel in der Regel nach sechs bis 12 Stunden Betrieb führt. Durch die Modellierung wird beschrieben und durch die Praxisuntersuchung bestätigt, dass die periodische Entaschung rund 50 % der Starts verursacht und dass diese Starts weder durch eine Vergrösserung der Wärmespeicherkapazität noch durch Anpassungen der Regelparameter vermieden werden können.
- Im Rahmen der Praxisuntersuchungen konnten Methoden aufgezeigt werden, mit denen die Häufigkeit von Starts bewertet und Massnahmen zur Reduktion der Anzahl Starts identifiziert werden können. Auf einer Anlage mit vier Kesseln konnte die jährliche Anzahl Starts mit folgenden Massnahmen um über 40 % vermindert werden: Veränderung des Regelungskonzepts der Zu- und Abschaltbedingungen, Aufhebung von Beschränkungen der Leistungsmodulation, Vermeidung von durch die periodische Entaschung entstehenden Lücken in der Wärmeproduktion und Vermindern von Lastsprüngen als Folge gleichzeitiger Boilerladungen.
- Die Untersuchung zeigt den Nutzen eines Wärmespeichers und sie bestätigt, dass die Empfehlung von QM Holzheizwerke für eine Stunde Speicherkapazität bezogen auf zwei Drittel der gesamten installierten Kesselleistung eine sinnvolle Mindestgröße darstellt. Eine grössere Speicherkapazität ermöglicht zwar eine geringere Anzahl Starts, die Anzahl wird aber noch durch weitere Faktoren beeinflusst, die bei den untersuchten Anwendungen zum Teil einen grösseren Einfluss haben. Eine positive Wirkung hat insbesondere der Einsatz einer zeitlich unbegrenzten Leistungsmodulation aller Kessel ab 50 % der Nennleistung.
- Die Bearbeitung anhand von Betriebsdaten von Praxisanlagen mit einer begleitenden Prozessmodellierung hat sich als geeignetes Vorgehen erwiesen. Der Vergleich zwischen einem modellierten und einem bei ähnlichen Bedingungen in der Praxis erzielten Betrieb ermöglicht die Abschätzung des Verbesserungspotenzials anhand von Sensitivitätsanalysen einzelner Betriebsparameter wie Wärmebedarfsprofil, Anzahl Kessel, Regelansatz, Regelparameter, Wärmespeicherkapazität und Leistungsmodulation.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé	3
Summary	3
Take-Home Messages	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1. Einleitung.....	9
1.1. Ausgangslage und Hintergrund.....	9
1.2. Motivation des Projekts	10
1.3. Projektziele.....	10
2. Grundlagen und Begriffe	11
2.1. Wärmespeicher	11
2.1.1. Anforderungen	11
2.1.2. Anordnung von Temperaturfühlern im Wärmespeicher.....	11
2.2. Speicherladezustand.....	12
2.2.1. Berechnung des Speicherladezustands nach QMH	12
2.2.2. Plateaus im Speicherladezustand	14
2.3. Regelung einer Anlage mit zwei Holzkesseln nach QMH	15
2.3.1. Regelung des Speicherladezustands nach QMH	15
2.3.2. Schwachlastbetrieb im Sommer	15
2.3.3. Regelungskonzept für zwei Holzkessel nach QMH	15
2.3.4. Regelungskonzepte für Kaskadenanlagen nach QMH.....	16
2.4. Kaskadenanlagen mit Seriengeräten	17
2.4.1. Definition von Kaskadenanlage	17
2.4.2. Besonderheiten von Seriengeräten	17
2.4.3. Leistungsbereich.....	17
2.4.4. Leistungsmodulation	17
2.4.5. Entaschung	17
2.4.6. Regelung der Kaskade – Zuschalten/Abschalten von Holzkesseln.....	17
2.4.7. Alternierung der Zuschaltreihenfolge der Holzkessel in der Kaskade	19
2.5. Kaskadenanlagen mit industriellen Holzkesseln	19
2.6. Übersicht von Regelkonzepten für Kaskadenanlagen	20
3. Beschreibung der untersuchten Anlagen	24
3.1. Anlage 1: Wärmeverbund WV Schachen.....	24
3.1.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung	24
3.1.2. Regelkonzept.....	25
3.2. Anlage 2: Wohnüberbauung WUEB Roggwil.....	28
3.2.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung	28
3.2.2. Regelkonzept.....	29
3.3. Anlage 3: Wohnüberbauung Schliern	32
3.3.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung	32

3.3.2. Regelkonzept.....	33
3.4. Übersicht der Eigenschaften und Regelkonzepte der untersuchten Kaskadenanlagen	34
4. Vorgehen und Methode	35
4.1. Teil 1 – Praxisuntersuchung.....	35
4.1.1. Datenerfassung	35
4.1.2. Vorgehen bei Anlage 1: WV Schachen	35
4.1.3. Vorgehen bei Anlage 2: WUEB Roggwil.....	36
4.1.4. Vorgehen bei Anlage 3: WUEB Schliern	36
4.1.5. Übersicht von Veränderungen der Regelungseinstellungen	36
4.2. Teil 2 – Prozessmodellierung.....	37
4.2.1. Beschreibung des Modells.....	37
4.2.2. Funktion des Wärmespeichers	38
4.2.3. Funktion Regelsystem	39
4.2.4. Kaskadenregelung.....	40
4.2.5. Leistungsregelung	41
4.2.6. Regelstrecke.....	42
4.2.7. Wärmeleistungsbedarf.....	42
5. Ergebnisse und Diskussion	46
5.1. Teil 1 – Praxisuntersuchung.....	46
5.1.1. Wärmespeicher.....	46
5.1.2. Eigenschaften der Holzkessel	52
5.1.3. Wärmebezüger	60
5.1.4. Regelungskonzepte für Kaskaden.....	63
5.1.5. Erkenntnisse aus den Praxisuntersuchungen	78
5.2. Teil 2 – Prozessmodellierung.....	80
5.2.1. Modellparameter.....	80
5.2.2. Resultate der Modellberechnungen.....	80
5.2.3. Einfluss von Entaschung, Leistungsmodulation und Speicherkapazität.....	85
5.2.4. Einfluss der Kaskadenregelung	87
5.2.5. Einfluss von Lastspitzen	89
5.2.6. Vergleich mit Praxisuntersuchung	91
5.2.7. Erkenntnisse aus der Prozessmodellierung	92
6. Schlussfolgerungen	96
6.1. Fazit aus Praxisuntersuchungen und Prozessmodellierung	96
6.2. Optimierungsmassnahmen aus Praxisuntersuchungen.....	97
6.3. Optimierungsmassnahmen aus Prozessmodellierung	98
7. Ausblick und künftige Umsetzung	99
8. Nationale und internationale Zusammenarbeit.....	101
9. Kommunikation.....	102
10. Publikationen.....	103
11. Literaturverzeichnis	104

Abkürzungsverzeichnis

D	Differentialteil der Kaskadenregelung mit PD Charakteristik	%
e_S	Regelabweichung der Leistungsregelung	%
f_{bezier}	Einstellungsfaktor der Bézierskurve zur Berechnung des Temperaturverlaufs in der Sprungschicht	–
f_K	Stellwert der Leistungsregelung für die Kesselleistung	%
f_K^*	Stellwert der Leistungsregelung für die Kesselleistung vor der Stellwertbegrenzung	%
f_S	Speicherladezustand	%
$f_{S,soll}$	Sollwert des Speicherladezustands	%
$f_{S,zu,i}$	Individuelle Zuschaltbedingung für den Kessel i	%
$f_{S,ab,i}$	Individuelle Abschaltbedingung für den Kessel i	%
h_i	Höhenvariabel i zur Berechnung des Temperaturverlaufs in der Sprungschicht mit Bézierskurven	cm
h_S	Höhe des Wärmespeichers	cm
Δh	Sprungschichtdicke	cm
K_I	Integraler Verstärkungsfaktor der Leistungsregelung	s^{-1}
K_P	Proportionaler Verstärkungsfaktor der Leistungsregelung	–
n_{12h}	Mittlere und gerundete Anzahl in Betrieb stehender Kessel während den letzten 12 Stunden	–
$n_{aktuell}$	Anzahl der in Betrieb stehender Kessel	–
n_K	Anzahl der Holzkessel	–
P	Proportionalteil der Kaskadenregelung mit PD Charakteristik	%
PD	Verrechnung von Proportional- und Differentialteil der Kaskadenregelung mit PD-Charakteristik	%
t	Zeit	s
Δt_{ab}	Zeitdauer seit dem letzten Abschalten eines Kessels	s
Δt_{ent}	Zeitdauer seit der letzten Entaschung des Kessels	s
Δt_{zu}	Zeitdauer seit dem letzten Zuschalten eines Kessels	s
T_A	Tagesmittelwert Aussentemperatur	$^{\circ}C$
T_{kalt}	Referenztemperatur Fühler Kalt	$^{\circ}C$
T_{RL}	Rücklauftemperatur aus dem Wärmenetz	$^{\circ}C$
$T_{S,i}$	Beim Temperaturfühler i gemessene Speichertemperatur	$^{\circ}C$
$T_{S,y}$	Temperatur in der Sprungschicht	$^{\circ}C$
T_{VL}	Vorlauftemperatur ins Wärmenetz	$^{\circ}C$
T_{warm}	Referenztemperatur Fühler warm	$^{\circ}C$
Q_S	Im Wärmespeichertank gespeicherte Wärme	J
$Q_{S,nenn}$	Speicherkapazität des Wärmespeichertanks	J

\dot{Q}_B	Wärmeleistungsbedarf der Verbraucher am Wärmenetz	W
\dot{Q}_{BN}	Wärmeleistungsbedarfs des Wärmenetzes unter Berücksichtigung allfälliger Wärmemankos in der Vergangenheit	W
\dot{Q}_K	Summe aller Kesselleistungen	W
$\dot{Q}_{K,i}$	Kesselleistung des Kessels i	W
$\dot{Q}_{K,min,i}$	Minimale Kesselleistung des Kessels i	W
$\dot{Q}_{K,nenn,i}$	Maximale Kesselleistung des Kessels i	W
\dot{Q}_V	Wärmeverteilverluste	W

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage und Hintergrund

Holzenergie deckt heute knapp 5 % der schweizerischen Energieversorgung und kann in den nächsten Jahren noch um rund 50 % ausgebaut werden [1], [2]. Dabei sind zwei Randbedingungen zu beachten: Heute tragen die Holzfeuerungen überproportional zu Feinstaub und organischen Schadstoffen in der Umgebungsluft bei [3]. Um diesen Beitrag weiter zu reduzieren, ist eine gute Betriebsweise der Anlagen in der Praxis sicher zu stellen. Dazu gilt es unter anderem Anfahrphasen mit hohen Emissionen sowie Betriebsphasen zu vermeiden, in denen Feuerungen mit einer Leistung betrieben werden, bei der sie erhöhte Emissionen aufweisen. Um solche Betriebsphasen zu vermeiden, verlangt QM Holzheizwerke® (QMH) für Holzheizkessel die Einbindung von Wärmespeichern. Als Richtlinie zur Dimensionierung einer Einkesselanlage wird eine Speicherkapazität von einer Betriebsstunde bei Nennleistung des Holzkessels gefordert [4]. Bei Anlagen mit zwei Holzkesseln fordert QMH, dass der Speicher auf mindestens eine Betriebsstunde der Nennleistung des grösseren Kessels bzw. auf zwei Dritteln der Gesamtleistung beider Kessel dimensioniert wird. Ausserdem muss der Speicher eine Temperaturschichtung aufweisen und mit einem geeigneten Speicherlademanagement ausgerüstet sein.

Trotz Einsatz von Speichern werden Holzheizwerke aus betrieblichen Gründen bis anhin meist als bivalente Anlagen ausgeführt, wobei zur Deckung der Spitzenlast und der Schwachlast fossile Kessel eingesetzt werden. Der oder die Holzkessel werden dabei meist auf 50 % bis 60 % des Wärmeleistungsbedarfs und der oder die Öl- und Gaskessel auf 100 % des Bedarfs ausgelegt. Bei dieser Auslegung können die Holzkessel bei idealem Betrieb rund 80 % bis 90 % des Jahreswärmebedarfs abdecken, während der Anteil bei nicht-idealem Betrieb auf unter 70 % sinken kann [5]. Heizzentralen mit automatischen Holzheizungen weisen deshalb oft einen Anteil von 15 % bis 30 % an fossiler Energie auf. Da dies die Erreichung der Klimaziele beeinträchtigt, sind Massnahmen notwendig, die einen Betrieb ohne fossile Energien ermöglichen. Eine mögliche Massnahme sind monovalente Holzheizwerke. Dies kann jedoch zu Nachteilen in Bezug auf Luftreinhaltung und Anlagenbetrieb führen, weil automatische Holzkessel nur langsame Leistungsänderungen ermöglichen und beim An- und Abfahren sowie im Schwachlastbetrieb hohe Emissionen verursachen können. Um diese Nachteile zu vermeiden, kommen folgende zusätzlichen Massnahmen infrage:

1. Der Einsatz von Wärmespeichern mit mehr als einer Stunde Speicherkapazität und/oder
2. Der Einsatz von Anlagen mit drei oder mehr Holzkesseln meist identischer Leistung, die in Kaskadenschaltung betrieben und als «Kaskadenanlagen» bezeichnet werden.

In den letzten Jahren wurden in der Schweiz zahlreiche Kaskadenanlagen installiert, was durch folgende Vorteile und Trends unterstützt wurde:

- Seit einigen Jahren werden im Leistungsbereich von 70 kW bis ca. 500 kW Seriengeräte automatischer Holzfeuerungen angeboten, die als Kaskade bis zu 1500 kW Leistung mit tieferen Investitionskosten als ein einzelner grösserer Heizkessel ausgeführt werden können.
- Eine Kaskade von Feuerungen kann mit geringerer Bauhöhe ausgeführt werden und ist dadurch geeignet für den Ersatz von fossilen Heizkesseln in bestehenden Heizräumen.
- Der Einsatz einer grösseren Anzahl von Kesseln kann für die Etappierung von Fernwärmennetzen mit schrittweisem Ausbau der Anschlussleistung vorteilhaft sein.
- Im Weiteren werden Kaskadenanlagen zunehmend von Projekteignern realisiert, die eine fossil-freie Heizzentrale wünschen.

Bis anhin fehlen Grundlagen zur Dimensionierung und Regelung sowohl von Wärmespeichern mit mehr als einer Stunde Kapazität als auch von Kaskadenanlagen mit automatischen Holzheizungen. Aus diesem Grund fehlen auch Empfehlungen zu deren Auslegung nach QM Holzheizwerke® sowie Richtlinien der Kantone zur Ausführung und Kontrolle entsprechender Anlagen.

1.2. Motivation des Projekts

Kaskadenanlagen mit automatischen Holzheizungen und Heizzentralen mit Wärmespeichern bieten interessante Einsatzmöglichkeiten für eine 100 % erneuerbare Wärmeerzeugung für Gebäude und thermische Netze. Bis anhin fehlen jedoch Grundlagen zur Auslegung von Kaskadenanlagen mit automatischen Holzheizungen sowie der Dimensionierung und der Regelung von Wärmespeichern für solche Anwendungen. Die Motivation für das Projekt ist es, die Grundlagen zur Dimensionierung und Regelung von Kaskadenanlagen mit Holzheizungen zu erarbeiten, um daraus Empfehlungen und Richtlinien für eine optimale Ausführung solcher Anlagen bereit zu stellen.

1.3. Projektziele

Ziel des Projekts ist die Erarbeitung der Grundlagen für den Einsatz von Kaskadenanlagen mit drei oder mehr automatischen Holzheizungen und Wärmespeichern, welche für monovalente¹ Anlagen einen Anteil von 100 % Holz und für bivalente Anlagen einen möglichst hohen Anteil von Holz erreichen (mindestens 90 % im Vergleich zum Zielwert von 80 % nach QMH) und durch geeignete Dimensionierung und Regelung gleichzeitig einen minimalen Schadstoffauswurf und einen wartungsarmen Betrieb erzielen. Die Praxisuntersuchung beschränkt sich dabei auf Anlagen mit Seriengeräten, welche über eine periodische Entaschung mit Abschaltung der Feuerung verfügen. Die Auslegung soll nebst der Speicherkapazität die Fähigkeit der Leistungsmodulation und den Einfluss der automatischen Entaschung berücksichtigen. Auf Basis der erarbeiteten Grundlagen sollen Empfehlungen für den Einsatz von Kaskadenanlagen mit automatischen Holzkesseln abgeleitet und im Anschluss in den Aktivitäten und Dokumenten von QMH berücksichtigt werden.

¹ Nach QMmini ausgeführte Anlagen mit Leistungen ab 70 kW bis maximal 500 kW installierter Gesamtleistung werden praktisch ausnahmslos als monovalente Heizanlagen ausgeführt, wobei Mehrkesselanlagen in der Regel den Ganzjahresbedarf abdecken, während bei Einkesselanlagen die reine Warmwassererzeugung im Sommer in der Regel durch elektrische Zusatzheizung (inklusive Wärmepumpen) erfolgt. Eine Anlage mit elektrischer Warmwasseraufbereitung im Sommer wird der Kategorie der «monovalenten» Anlagen zugerechnet.

2. Grundlagen und Begriffe

2.1. Wärmespeicher

2.1.1. Anforderungen

Ein Wärmespeicher hat die Aufgabe, Leistungsunterschiede zwischen der Wärmeerzeugung und der Wärmeabnahme auszugleichen. Verlangt die Wärmeabnahme plötzlich und rasch mehr Leistung, nimmt der Speicherladezustand als Indikator dieser Leistungsänderung ab und die Holzkessel können durch eine langsame Erhöhung der Kesselleistung darauf reagieren. Ein Wärmespeicher ermöglicht damit, dass die Holzkessel entsprechend ihrer Trägheit den Leistungsänderungen langsam folgen können.

Der Wärmespeicher soll eine gute Temperaturschichtung aufweisen, sodass sich im oberen Bereich heißes Wasser auf dem Temperaturniveau der Kesselvorlauftemperatur befindet und im unteren Bereich kälteres Wasser auf dem Temperaturniveau der Rücklauftemperatur des Wärmeabnahmesystems (Gebäude, Fernwärmennetz). Damit die Temperaturschichtung erhalten bleibt, darf das Ein- und Ausströmen des Wassers keine Verwirbelungen im Speicher auslösen. Die Zone zwischen dem heißen Bereich und dem kalten Bereich im Speicher wird als Sprungschicht oder Thermokline bezeichnet. Bei einer ausgeprägten Temperaturschichtung im Speicher kann diese Zone dünn sein.

Die Auslegung des Speichervolumens bzw. der Speicherkapazität richtet sich nach der installierten Holzkesselleistung und der im Auslegezustand bei kalter Witterung nutzbaren Temperaturdifferenz über dem Wärmespeicher. Die Temperaturdifferenz eines hier vorausgesetzten Schichtspeichers ist gegeben durch die Temperatur oben im Speicher (die hier als mit der Kesselvorlauftemperatur identisch angenommen wird) und der Temperatur unten im Speicher (die hier als mit der Rücklauftemperatur der Wärmeabnehmer bzw. des Wärmenetzes identisch angenommen wird). QMH empfiehlt, das Speichervolumen mindestens so auszulegen, dass die während einer Stunde bei Nennleistung produzierte Wärme mit der im Auslegezustand bei kalter Witterung nutzbaren Temperaturdifferenz gespeichert werden kann. Bei zwei oder mehr Holzkesseln empfiehlt QMH, das Speichervolumen mindestens für zwei Drittel der installierten Nennleistung auszulegen. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Wärmespeicher jederzeit eine stabile, gute Temperaturschichtung aufweist.

2.1.2. Anordnung von Temperaturfühlern im Wärmespeicher

Gemäß den Empfehlungen von QMH sollen mindestens fünf Temperaturfühler gleichmäßig über die Höhe des Speichervolumens verteilt werden. Bild 1 zeigt links die empfohlene Anordnung von fünf Temperaturfühlern in einem Speicher und rechts die Anordnung von fünf Fühlern (als Mindestlösung) und alternativ von 10 Fühlern bei zwei in Serie geschalteten Speichern.

Bild 2 zeigt eine Empfehlung für die gleichmäßige Anordnung von fünf Temperaturfühlern in bis zu fünf in Serie geschalteten Wärmespeichern.

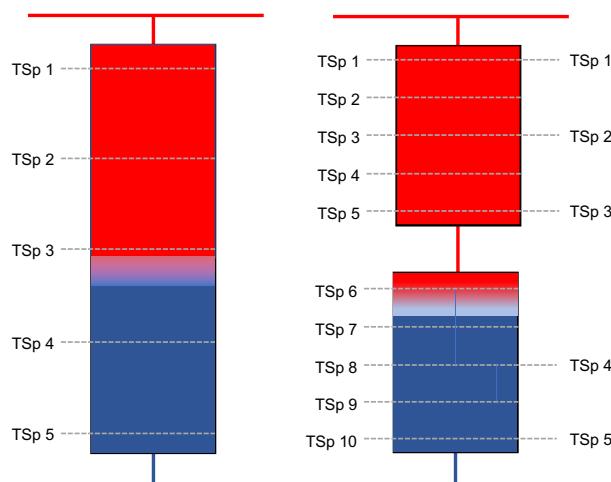


Bild 1 Empfohlene Anordnung von fünf gleichmäßig über die Speicherhöhe verteilten Temperaturfühlern (links) und von zehn bzw. fünf gleichmäßig über die Speicherhöhe von zwei in Serie angeordneten Speicher verteilten Temperaturfühlern.

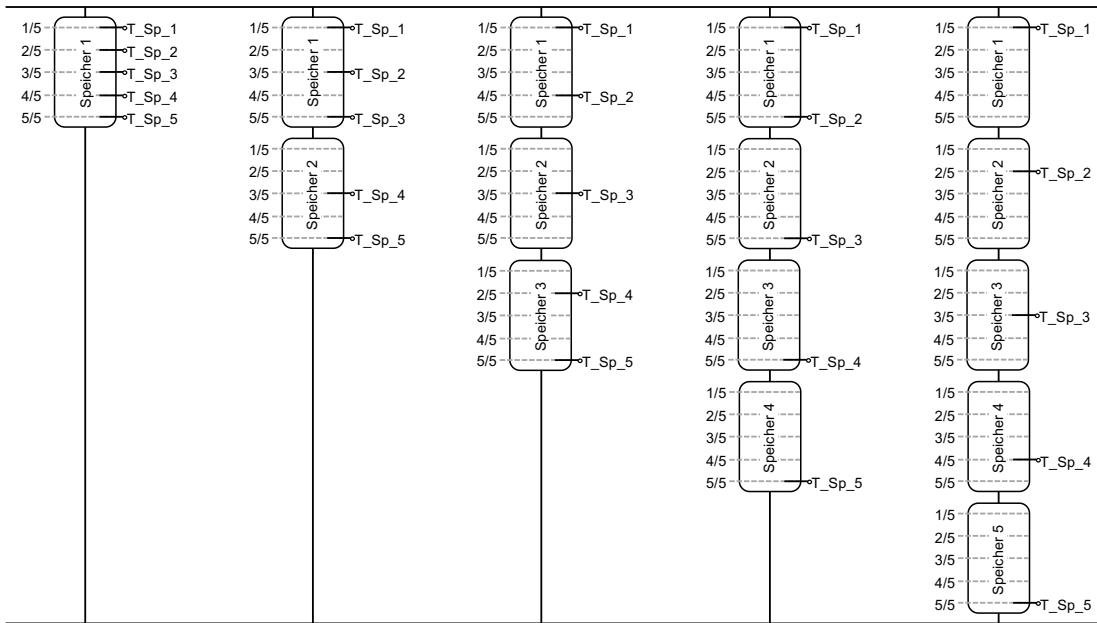


Bild 2 Empfohlene Anordnung von fünf gleichmäßig über die Speicherhöhe verteilten Temperaturfühlern, wenn das Speichervolumen auf mehrere in Serie geschaltete Wärmespeicher verteilt ist.

2.2. Speicherladezustand

2.2.1. Berechnung des Speicherladezustands nach QMH

In den *Standard-Schaltungen – Teil I* [6] schlägt QMH vier Varianten vor, wie der Ladezustand des Speichers bestimmt werden kann (Tabelle 1). Für die Berechnung des Speicherladezustands sollen mindestens fünf Temperaturfühler gleichmäßig über die Höhe des Speichers verteilt sein. Bei den Varianten 1 bis 3 wird den einzelnen Temperaturfühlern eine Wertigkeit in Prozent zugeordnet. Bei fünf Temperaturfühlern entspricht die Wertigkeit des einzelnen Fühlers damit 20 %. Aus der Wertigkeit der einzelnen Fühler wird ein Ladezustand des Speichers zwischen 0 % und 100 % ermittelt. Der so berechnete Istwert des Speicherladezustand weist dadurch ein eher stufiges Signalverhalten mit Plateaus auf. Damit den Temperaturfühlern eine Wertigkeit in Prozent zugeordnet werden kann, werden Referenzwerte für ‚Fühler warm‘ und ‚Fühler kalt‘ definiert.

Als Beispiel empfiehlt QMH bei Variante 1 einen engen Temperaturbereich mit der Referenztemperatur für ‚Fühler warm‘ von $\geq 75^\circ\text{C}$ und für ‚Fühler kalt‘ von $\leq 65^\circ\text{C}$. Variante 3 soll das stufige Signalverhalten von Variante 1 glätten, indem ein etwas grösserer Temperaturbereich gewählt wird mit den Referenzwerten für ‚Fühler warm‘ von $> 80^\circ\text{C}$ und für ‚Fühler kalt‘ von $< 60^\circ\text{C}$. Als aktiver Temperaturföhler wird jeweils im Speicher von oben her derjenige Temperaturföhler gewählt, der als erster innerhalb dieses Temperaturbereichs liegt. Ihm wird eine prozentuale Wertigkeit innerhalb des definierten Temperaturbereichs zugeordnet. Alle Temperaturen unter 60°C haben keinen Einfluss auf den Ladezustand des Speichers. Mit diesen beiden Temperaturbegrenzungen ist der Ladezustand nach Variante 1 und 3 ein Mass dafür, wie viel Wärme auf einem für die Wärmeabnehmer bzw. für das Fernwärmennetz nutzbarem Temperaturniveau noch aus dem Speicher bezogen werden kann. Die Varianten 1 und 3 sind empfindlich auf schwankende Kesselvorlauftemperaturen, die den oberen Bereich des Speichers abkühlen können. Auch ein gleichmässiges Auskühlen des ganzen Speichers ohne Nutzwärmeabgabe kann aufgrund von Abstrahlung oder Mischeffekten innerhalb des Speichers dazu führen, dass alle fünf Temperaturfühler eine Temperatur von z.B. 79°C aufweisen, was den Speicherladezustand von 100 % direkt auf 20 % senken würde. Im Sommerbetrieb kann somit der mit Variante 3 von QMH berechnete Speicherladezustand deutlich vom nutzbaren Speichervolumen nach Variante 1 abweichen (siehe Kapitel 5.1.1).

In Variante 4 wird die Mitteltemperatur aus den Temperaturfühlern im Speicher bestimmt und als Mass für den Speicherladezustand verwendet. Der so berechnete Istwert des Speicherladezustands weist dadurch ein Signalverhalten ohne Stufen auf. Nachteilig ist hier, dass der Speicherladezustand stark von der Rücklauftemperatur der Wärmeabnehmer bzw. des Wärmenetzes beeinflusst wird. Der nach

dieser Methode berechnete Speicherladezustand ist im Gegensatz zu den Varianten 1 und 3 ein Mass dafür, wie viel Wärme noch in den Speicher geladen werden kann.

Als weitere Möglichkeit empfiehlt QMH, für die Varianten 1 bis 4 die Anzahl der Temperaturfühler im Speicher zu vergrößern, um damit das stufige Signalverhalten zu glätten.

Die neu vorgeschlagene Variante (MT 60-80) berechnet den Speicherladezustand als Summe der prozentualen Wertigkeit aller Temperaturfühler im Temperaturbereich von 60 °C bis 80 °C (Tabelle 1). Dies entspricht der Variante 3 ohne Berücksichtigung eines aktiven Temperaturfühlers. Dies entspricht auch der Berechnung einer Speichermittemperatur mit einer entsprechenden Begrenzung der Temperaturwerte von jedem einzelnen Fühler im Temperaturbereich von 60 °C bis 80 °C. Diese neue Variante zeichnet sich durch eine gute Signaldämpfung mit weniger Stufen aus und sie ist ein Mass dafür, wie viel Wärme auf einem nutzbaren Temperaturniveau noch aus dem Speicher bezogen werden kann. Sie ist auch toleranter gegenüber einer schlechten Temperaturschichtung im Speicher und vermeidet Fehlinterpretationen, wie sie mit Variante 3 von QMH möglich sind.

Tabelle 1 Methoden zur Bestimmung des Speicherladezustands aus [QMH Standardschaltungen – Teil 1, 2010]. Zusätzlich eine Kombination aus der Variante 3 und Variante 4 bezeichnet als MT für Mitteltemperatur. Beispiele für Speicher mit fünf Temperaturfühlern und einer Vorlauftemperatur von 80 °C.

Variante	Methode zur Berechnung des Speicherladezustands	Charakteristik
QMhv1	<ul style="list-style-type: none"> Warm: 20 % pro Fühler; $T_{\text{warm}} \geq 75^\circ\text{C}$ Kalt: 0 % pro Fühler; $T_{\text{kalt}} \leq 65^\circ\text{C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Stufiges Signal des Speicherladezustands Werte 0/20/40/60/80/100 % Fokus auf der Abbildung des nutzbaren Wärmebezugs aus dem Speicher Ungeeignet bei schlechter Temperaturschichtung im Speicher
QMhv3	<ul style="list-style-type: none"> Warm: 0 – 20 % $\approx 60 – 80^\circ\text{C}$ des jeweils aktiven Temperaturfühlers + 20 % pro Fühler $> 80^\circ\text{C}$ 	<ul style="list-style-type: none"> Dämpfung des stufigen Signals von Variante 1 durch den aktiven Fühler Signal kann dennoch stufig sein beim Wechsel auf den nächsten aktiven Temperaturfühler Beim Auskühlen des Speichers können durch Wärmeverluste oder bei schwankenden Vorlauftemperaturen Signalsprünge auftreten (z.B. wenn alle Fühler 79 °C anzeigen) Ungeeignet bei schlechter Temperaturschichtung im Speicher
QMhv4	<ul style="list-style-type: none"> Speichermittemperatur als Mass für Speicherladezustand im Temperaturbereich von 20°C bis 80°C 	<ul style="list-style-type: none"> Fokus auf der Abbildung des noch möglichen Wärmeeintrags in den Speicher Geringe Aussagekraft über den nutzbaren Wärmebezug aus dem Speicher Rücklauftemperatur der Wärmebezüger / des Fernwärmennetzes hat einen erheblichen Einfluss auf den Speicherladezustand.
MT 60-80	<ul style="list-style-type: none"> Für jeden Temperaturfühler wird pro Fühler ein Speicherladezustand mit 0 – 20 % $\approx 60 – 80^\circ\text{C}$ berechnet Speicherladezustand als Summe aller Fühler 	<ul style="list-style-type: none"> Gute Signaldämpfung ohne Signalsprünge Stärker gedämpft im Vergleich zu Variante 1 und 3 Fokus auf der Abbildung des nutzbaren Wärmebezugs aus dem Speicher Geeignet bei schlechter Temperaturschichtung im Speicher

2.2.2. Plateaus im Speicherladezustand

In einem Speicher mit einer dünnen Sprungschicht kann die von den fünf Temperaturfühlern erfasste Temperatur beim Entladen des Speichers in kurzer Zeit von warm ($> 80^{\circ}\text{C}$) zu kalt ($< 60^{\circ}\text{C}$) wechseln und umgekehrt beim Laden des Speichers (Bild 3). Dies kann insbesondere bei Variante 1 und 3 zu deutlichen Plateaus und Sprüngen im Speicherladezustand führen (Bild 4). Die Plateaus sind außerdem beim Entladen und Laden des Speichers nicht auf dem identischen Niveau, sondern leicht versetzt. Die Wahl der Referenztemperatur für 'Fühler kalt' beeinflusst das Niveau der Plateaus des Speicherladezustands. Dies beeinflusst die Festlegung von Sollwerten des Speicherladezustands oder von Zuschaltbedingungen für einzelne Holzkessel. In der Regel soll die Referenztemperatur für 'Fühler kalt' deshalb nicht unter 50°C liegen. Die Plateaus des Speicherladezustands sollten bei der Definition der Zu- und Abschaltbedingungen der Kaskade berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5.1.1).

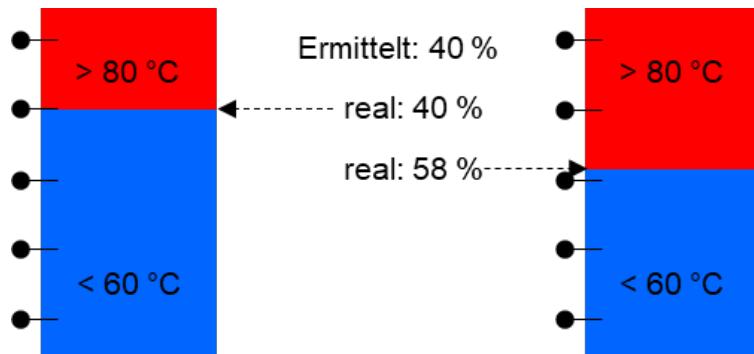


Bild 3 Schematische Darstellung eines Wärmespeichers mit einer Sprungschicht. In beiden Speichern ergibt der mit fünf Temperaturfühlern ermittelte Speicherladezustand einen Wert von 40 %. Der rechte Speicher ist aber effektiv zu 58 % geladen.

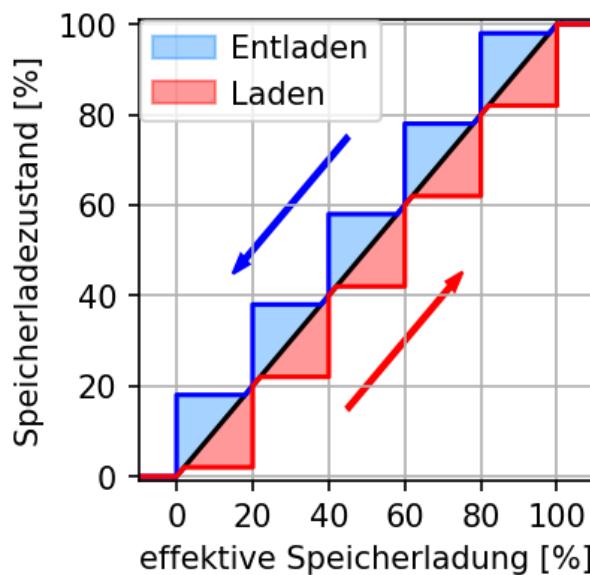


Bild 4 Mögliche Abweichung zwischen dem Speicherladezustand und der effektiven Speicherladung in einem Speicher mit Sprungschichten, fünf Temperaturfühlern und den Speicherbezugstemperaturen von 60°C und 80°C für kalt und warm.

2.3. Regelung einer Anlage mit zwei Holzkesseln nach QMH

2.3.1. Regelung des Speicherladezustands nach QMH

Der Istwert des Speicherladezustands soll durch einen stetigen Regler mit PI-Charakteristik auf einen konstanten Sollwert geregelt werden. Als Stellgröße dient die Vorgabe der Feuerungsleistung des oder der Holzkessel.

Der Sollwert des Speicherladezustands soll unabhängig von der Umgebungstemperatur im Bereich von z.B. 50 % liegen. Wenn die Wärmeabnehmer plötzlich mehr Leistung verlangen, sinkt der Speicherladezustand und die Feuerungsleistung wird erhöht. Wenn plötzlich weniger Leistung gebraucht wird, steigt der Speicherladezustand und die Feuerungsleistung wird zurückgeregelt. Im ersten Fall steht die obere Hälfte des Speichers als Leistungsreserve zur Verfügung bis der Holzkessel reagiert hat und im zweiten Fall kann der Holzkessel den vorübergehenden Leistungsüberschuss an die untere Speicherhälfte abgeben.

2.3.2. Schwachlastbetrieb im Sommer

Sobald die notwendige Heizleistung unter die Minimalleistung des Holzkessels fällt, also bei Schwachlastbetrieb, erfolgt eine Umschaltung des Regelungskonzepts von stetiger Regelung des Speicherladezustands auf den Modus «füllen/entleeren». Der Holzkessel wird, bevorzugt mit automatischer Zündung, bei fast leerem Speicher gestartet und mit reduzierter Kesselleistung betrieben, bis der Speicher durchgeladen ist.

Als neue Variante für den Sommerbetrieb kann die stetige Regelung des Speicherladezustands beibehalten werden, aber mit Sommersettings für die Regelungsparameter. So soll der Sollwert des Speicherladezustands auf z.B. 30 % gesenkt werden. Der Holzkessel soll mit reduzierter Kesselleistung betrieben und bei durchgeladenem Speicher ausgeschaltet werden. Beim anschliessenden Absinken des Speicherladezustands soll der Holzkessel beim Unterschreiten eines Speicherladezustands von z.B. 50 % (wenig über dem Sollwert des Speicherladezustands) wieder zugeschaltet werden.

Für die Umschaltung vom Betriebsmodus für Schwachlastbetrieb auf stetige Regelung bzw. auf Sommersettings der Regelungsparameter und zurück ist ein geeignetes Umschaltkriterium zu definieren (z. B. manuelle Umschaltung oder Umschaltung nach Außentemperatur).

2.3.3. Regelungskonzept für zwei Holzkessel nach QMH

QMH beschreibt bisher nur Regelungskonzepte für Anlagen mit zwei Holzkesseln. Das folgende Beispiel geht von einer Leistungsaufteilung der beiden Holzkessel von 33 % für Holzkessel 1 und 67 % für Holzkessel 2 aus, also 1/3 zu 2/3. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtleistung der beiden Holzkessel. In Tabelle 2 werden die verschiedenen Phasen des Betriebs der beiden Holzkessel beschrieben und in Bild 5 grafisch dargestellt:

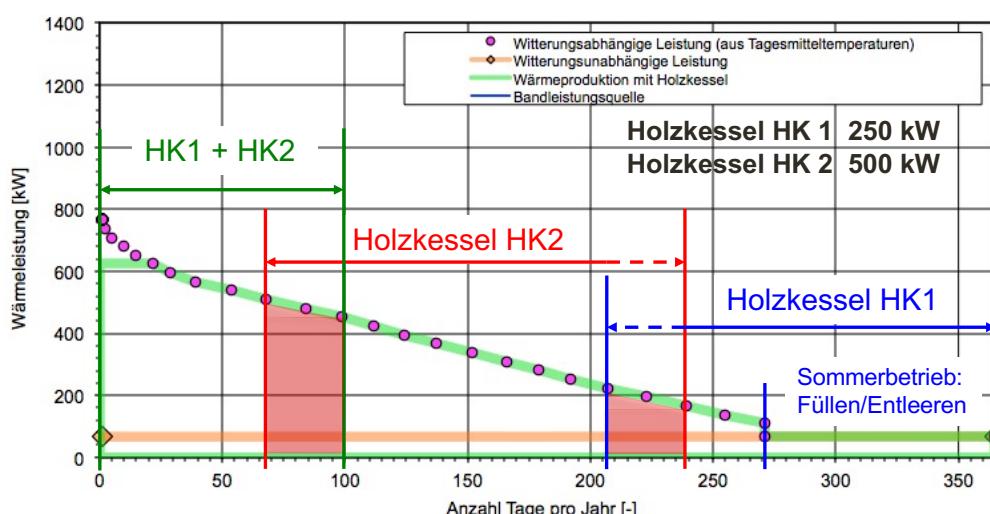


Bild 5 Darstellung des Regelungskonzepts für zwei Holzkessel nach QMH in der Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs.

Tabelle 2 Regelungskonzept für zwei Holzkessel nach QMH.

Klimatische Bedingung	Holzkessel in Betrieb	Leistungsregelung	Leistungsbereich in % der Gesamtleistung
Sommer	Holzkessel 1	Füllen/Entleeren des Speichers mit konstanter, geringer Kesselleistung	10...15%
Manuelle Umschaltung			
Herbst/warm	Holzkessel 1	Stetige Regelung der Kesselleistung in Funktion des Speicherladezustands	10...33%
Manuelle Umschaltung			
Herbst/kalt	Holzkessel 2	Stetige Regelung der Kesselleistung in Funktion des Speicherladezustands	20...67%
Automatische Folgeschaltung			
Winter	Holzkessel 1+2	<ul style="list-style-type: none"> Automatische Zuschaltung von Holzkessel 1 mittels automatischer Zündung, wenn Holzkessel 2 den stündlichen Wärmeleistungsbedarf nicht mehr decken kann. Stetige Regelung der Kesselleistung in Funktion des Speicherladezustands. Beide Kessel mit gleicher Leistungsvorgabe. Automatische Rückschaltung auf Holzkessel 2 allein (20...67%), wenn der stündliche Wärmeleistungsbedarf unter die Summe der beiden Minimalleistungen von 30% fällt. 	30...100%
Automatische Folgeschaltung			
Frühling/kalt	Holzkessel 2	Stetige Regelung der Kesselleistung in Funktion des Speicherladezustands	20...67%
Manuelle Umschaltung			
Frühling/warm	Holzkessel 1	Stetige Regelung der Kesselleistung in Funktion des Speicherladezustands	10...33%
Manuelle Umschaltung			
Sommer	Holzkessel 1	Füllen/Entleeren des Speichers mit konstanter, geringer Kesselleistung	10...15%

2.3.4. Regelungskonzepte für Kaskadenanlagen nach QMH

QMh hat bisher keine Empfehlungen für die Regelung von Anlagen mit drei oder mehr Holzkesseln abgegeben. Der vorliegende Bericht dient für QMh als Grundlage, Empfehlungen für die Regelung von Kaskadenanlagen zu entwickeln und in eine Überarbeitung der Standard-Schaltungen zu integrieren.

2.4. Kaskadenanlagen mit Seriengeräten

2.4.1. Definition von Kaskadenanlage

Heizzentralen mit zwei Holzkesseln werden als Doppel-Holzkesselanlage bezeichnet. Eine Heizzentrale mit drei oder mehr Holzkesseln wird als Kaskadenanlage bezeichnet und in der Regel ohne fossilen Kessel ausgeführt. Sie kann ein oder mehrere Gebäude beheizen oder ein Fernwärmennetz mit Wärme versorgen.

2.4.2. Besonderheiten von Seriengeräten

Seriengeräte werden nicht individuell, sondern als Serienprodukte gefertigt und zeichnen sich durch eine leichte Bauweise mit wenig Schamottierungsmasse aus. Weil sie automatisch gezündet werden können, wird vor dem Abschalten der verbleibende Brennstoff auf dem Rost vollständig ausgebrannt. Seriengeräte weisen daher keinen Betrieb mit Glutbetterhalt auf, sondern verfügen in der Regel über eine periodische Entaschung, wie nachfolgend in Kapitel 2.4.5 beschrieben.

2.4.3. Leistungsbereich

Die Nennleistung von Seriengeräten in Kaskadenanlagen liegt bisher im Bereich von rund 50 kW bis rund 350 kW.

2.4.4. Leistungsmodulation

Teilweise werden Seriengeräte mit begrenzter Leistungsmodulation betrieben, d.h. hauptsächlich bei Nennleistung. Seriengeräte mit Leistungsmodulation werden in der Regel im Leistungsbereich zwischen 100 % bis 50 % der Nennleistung betrieben, teilweise können sie auch bis 30 % modulieren (siehe Kapitel 5.1.2).

2.4.5. Entaschung

Seriengeräte verfügen in der Regel über einen Festrost, der periodisch gereinigt wird. Dies erfolgt automatisiert wobei der Verbrennungsvorgang unterbrochen und der Verbrennungsrost zum Beispiel durch Kippen von Asche gereinigt wird. In der Regel wird alle paar Stunden eine kleine Entaschung durchgeführt, die sich am Sauerstoffgehalt im Abgas leicht bemerkbar macht. Nach einer Betriebsdauer von rund 6 bis 12 Stunden wird eine grosse Entaschung durchgeführt. Dabei wird der Holzkessel ausgeschaltet, wobei der verbleibende Brennstoff auf dem Rost vollständig ausgebrannt wird. Anschliessend wird der Verbrennungsrost durch mechanische Bewegungen drehbarer oder kippbarer Rostteile gereinigt. Danach kann der Holzkessel entweder ausgeschaltet bleiben oder er wird gleich wieder zugeschaltet. Die grosse Entaschung führt zu einer Unterbrechung der Wärmeleitung. In der vorliegenden Untersuchung wird dies als periodische Entaschung oder kurz Entaschung bezeichnet und das nachfolgende Anfahren des Kessels wird als Start bewertet.

2.4.6. Regelung der Kaskade – Zuschalten/Abschalten von Holzkesseln

Das Zuschalten des ersten Holzkessels sowie das Zuschalten von weiteren Holzkesseln erfolgt meist in Abhängigkeit des Speicherladezustands, in Abhängigkeit einer Veränderung des Speicherladezustands pro Zeiteinheit oder in Abhängigkeit von aufsummierten Zeitdauern. Teilweise wird zusätzlich auch die Umgebungstemperatur berücksichtigt, um damit z.B. eine Grundlast zu berechnen. Auch das Abschalten einzelner in Betrieb stehender Holzkessel sowie des letzten in Betrieb stehenden Holzkessels erfolgt meist über den Speicherladezustand oder über Zeitfunktionen. Das Zu- und Abschalten kann zum Beispiel erfolgen über:

- **Individuelle Zuschalt- und Abschaltbedingungen (individuell für jeden einzelnen Holzkessel)**

Jeder Holzkessel der Kaskade hat eine eigene, individuelle Zuschaltbedingung in Funktion des Speicherladezustands. Mit abnehmendem Speicherladezustand werden weitere Holzkessel der Kaskade zugeschaltet. Mit zunehmendem Speicherladezustand werden die in Betrieb stehenden Holzkessel nacheinander mit individuellen Abschaltbedingungen abgeschaltet (Tabelle 3).

Tabelle 3 Beispiel für individuelle Zuschalt- und Abschaltbedingungen für eine Anlage mit 4 Holzkesseln. Zuschalten in Funktion des Speicherladezustands. Das Beispiel hat nur erläuternden Charakter und ist nicht als Empfehlung für Zu- und Abschaltbedingungen zu verstehen, weil es verschiedene wichtige Aspekte für die Festlegung von individuellen Zuschalt- und Abschaltbedingungen (z.B. Plateaus im Wärmespeicher) nicht berücksichtigt.

Holzkessel	Erster	Zweiter	Dritter	Vierter
Individuelle Zuschaltbedingungen bei Speicherladezustand	80%	60%	40%	20%
Individuelle Abschaltbedingungen bei Speicherladezustand	100%	95%	90%	85%

- Allgemeine Zu- und Abschaltschwellen (allgemeine Bedingung für jeden Holzkessel)**

Die Holzkessel der Kaskade werden beim Unterschreiten von einer oder von mehreren allgemeinen Zuschaltschwellen nacheinander zugeschaltet (Tabelle 4). Eine Zuschaltschwelle kann dabei auch mehrmals unterschritten werden, was jedes Mal zu einer Kesselzuschaltung führt. Wenn beispielsweise der Speicherladezustand eine Zuschaltschwelle unterschreitet, nach dem Zuschalten eines Holzkessels wieder überschreitet und anschliessend nochmals unterschreitet, wird an derselben Zuschaltschwelle ein weiterer Holzkessel zugeschaltet.

Das Abschalten kann über individuell festgelegte Betriebslaufzeiten der Holzkessel, über individuelle Abschaltbedingungen oder über allgemeine Abschaltschwellen (Tabelle 5) erfolgen.

Tabelle 4 Zwei Beispiele für allgemeine Zuschaltschwellen für eine Anlage mit 4 Holzkesseln.

Holzkessel	Eine Kessel-Zuschaltung pro Unterschreitung			
Beispiel 1: Mehrere Zuschaltschwellen bei Speicherladezustand	80%	60%	40%	20%
Beispiel 2: Zwei Zuschaltschwellen bei Speicherladezustand	60%	30%		

Tabelle 5 Zwei Beispiele für allgemeine Abschaltschwellen für eine Anlage mit 4 Holzkesseln.

Holzkessel	Letzte Kessel-Abschaltung bei Überschreitung	Eine Kessel-Abschaltung pro Überschreitung	Eine Kessel-Abschaltung pro Überschreitung	Eine Kessel-Abschaltung pro Überschreitung
Beispiel 1: Mehrere Abschaltschwellen bei Speicherladezustand	100%	90%	80%	70%
Beispiel 2: Zwei Abschaltschwellen bei Speicherladezustand	100%	90%		

2.4.7. Alternierung der Zuschaltreihenfolge der Holzkessel in der Kaskade

Kaskadenanlagen weisen oft eine Alternierung der Zuschaltschaltreihenfolge der Holzkessel auf (Tabelle 6). Für die Alternierung gibt es praktische Gründe:

- Bei Seriengeräten werden die Aschesammelbehälter oft manuell entleert. Bei einer Alternierung werden die Aschebehälter gleichmäßig gefüllt, sodass alle Holzkessel möglichst lange ohne Eingriff durch den Anlagewart betrieben werden können.
- Bei Heizzentralen mit mehreren Silos können die Silos durch eine Alternierung gleichmässiger entleert werden. Dies kann für die Bewirtschaftung vorteilhaft sein, wenn zum Beispiel einzelne Silos von unterschiedlichen Brennstofflieferanten versorgt werden.
- Dank der Alternierung weisen die Holzkessel über ein Betriebsjahr annähernd gleich viele Betriebsstunden auf. Durch die gleichmässige Auslastung wird auch die Abnutzung und der Verschleiss gleichmäßig auf die einzelnen Holzkessel verteilt.

Tabelle 6 Beispiel für die Alternierung der Startreihenfolge der Holzkessel in einer Anlage mit 4 Holzkesseln.

Zuschaltreihenfolge der Kessel in der Kaskade	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4
	Erster	Zweiter	Dritter	Vierter
Alternierung	Vierter	Erster	Zweiter	Dritter
Alternierung	Dritter	Vierter	Erster	Zweiter
Alternierung	Zweiter	Dritter	Vierter	Erster
Alternierung, usw.	Erster	Zweiter	Dritter	Vierter

2.5. Kaskadenanlagen mit industriellen Holzkesseln

Kaskadenanlagen werden auch mit industriellen Holzkesseln realisiert, z.B. mit drei Holzkesseln à je 1'500 kW. Holzkessel mit industrieller Bauweise können im Vergleich zu Seriengeräten einen breiteren Bereich der Brennstoffqualität (Wassergehalt, Stückgrösse) abdecken und die Leistung in der Regel im Bereich von 100 % bis 30 % modulieren. Industrielle Holzkessel mit mehr als 1'000 kW Leistung können aber nicht mehr automatisch gezündet werden. Um bei Schwachlastbetrieb längere Betriebsphasen ohne Wärmeabnahme zu überbrücken und ohne manuelles Eingreifen wieder starten zu können, werden sie deshalb rund stündlich kurz angefahren, um das Glutbett zu erhalten. Dieser Gluterhaltebetrieb ist jedoch auf rund 12 Stunden beschränkt. Danach wird der Holzkessel ausgeschaltet und muss manuell gestartet werden.

2.6. Übersicht von Regelkonzepten für Kaskadenanlagen

Wie in Kapitel 2.4 und 2.5 beschrieben sind verschiedene Konzepte zur Regelung oder Steuerung von Kaskadenanlagen anwendbar. Nachfolgend werden in Tabelle 7 mögliche und übliche Konzepte zur Regelung von Kaskadenanlagen mit Seriengeräten und mit industriellen Feuerungen aufgeführt.

Tabelle 7 Übersicht von üblichen Regelungen von Kaskadenanlagen mit Seriengeräten bzw. mit industriellen Holzkesseln.

Regelung von Kaskaden-anlagen mit drei oder mehr Holzkesseln	Seriengeräte	Industrielle Holzkessel
Leistungsbereich der einzelnen Kessel	50 kW bis 500 kW	180 kW bis 1'500 kW
Brennstoffqualität	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 200 kW: Qualitätshackschnitzel fein und grob (Trockene, gesiebt Holzhackschnitzel) • > 200 kW: WS/IS-P31S-M35 • Gesamter Leistungsbereich: Pellets 	Alle Brennstoffqualitäten je nach Feuerungstyp möglich (siehe QMH / FAQ 36 Tabelle 4)
Leistungsmodulation	<ul style="list-style-type: none"> • Ohne (nur Betrieb bei Nennleistung) • Teils 100% bis 60%, teils 100% bis 30% 	100% bis 30%
Automatische Zündung	ja	<ul style="list-style-type: none"> • Ja, wenn Wassergehalt < 35% und Leistung < 1000 kW • Sonst: Anfahren aus Gluterhaltebetrieb
Gluterhaltebetrieb	nein	Gluterhaltebetrieb bis max. 12h, danach Ausschalten
Manuelles Anfeuern	nein	<ul style="list-style-type: none"> • Bei erster Inbetriebnahme während der Heizperiode • Nach Gluterhaltebetrieb > 12h
Entaschung	Periodische Entaschung des Verbrennungsrostes: Unterbruch der Verbrennung alle 6h bis 12h	Automatisch: Kontinuierlicher Betrieb ohne Unterbrechung der Verbrennung
Entleerung Aschesammel-behälter / Intervall bei kalter Witterung	Manuelles Entleeren/Aussaugen der Ascheschublade / wöchentlich	Automatischer Transport in externen Grossbehälter / alle 2 bis 4 Wochen
Alternierung	Ja, im Bereich von 6h bis 50h	Nein
Thermische Trägheit	gering	hoch
Auslegung Speichervolumen nach LRV	25 Liter pro kW der installierten Holzkesselleistung	25 Liter pro kW der installierten Holzkesselleistung
Auslegung Speichervolumen nach QMH	1h für 2/3 der installierten Holzkesselleistung	1h für 2/3 der installierten Holzkesselleistung

Regelung von Kaskadenanlagen mit drei oder mehr Holzkesseln	Seriengeräte	Industrielle Holzkessel
Regelung der Kaskade Zuschalten von Kesseln	<ul style="list-style-type: none"> • Für jeden Holzkessel individuelle Zuschaltbedingungen in Funktion des Speicherladezustands • Eine oder mehrere allgemeine Zuschaltschwellen in Funktion des Speicherladezustands • Über das Absinken des Speicherladezustands pro Zeit, z.B. in $\Delta\%$ pro 10 Minuten • Über die Abweichung vom Sollwert des Speicherladezustands pro Zeit • Zeitdauer bei hoher Leistung der sich in Betrieb befindenden Holzkessel • Absinken der Temperatur des obersten Temperaturfühlers im Speicher unter einen Sollwert • Unterschreiten eines minimalen Speicherladezustands • Kombinationen der oben aufgeführten Varianten 	Nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung
Abschalten von Kesseln	<ul style="list-style-type: none"> • Für jeden Holzkessel individuelle Abschaltbedingungen in Funktion des Speicherladezustands • Eine oder mehrere allgemeine Abschaltschwellen in Funktion des Speicherladezustands • Über das Ansteigen des Speicherladezustands pro Zeit, z.B. in $\Delta\%$ pro 10 Minuten • Über die Abweichung vom Sollwert des Speicherladezustands pro Zeit • Zeitdauer bei minimaler Leistung der sich in Betrieb befindenden Holzkessel • Ansteigen der Temperatur des untersten Temperaturfühlers im Speicher über einen Sollwert • Überschreiten eines maximalen Speicherladezustands • Kombinationen der oben aufgeführten Varianten 	Nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung

Regelung von Kaskadenanlagen mit drei oder mehr Holzkesseln	Seriengeräte	Industrielle Holzkessel
Regelung der Kesselleistung	<ul style="list-style-type: none"> • Keine (Betrieb bei Nennleistung) • Regelung auf allgemeinen Sollwert des Speicherladestands. Daraus folgt: alle Kessel mit gleichem Sollwert und entsprechend identischer Leistungsvorgabe 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelung auf allgemeinen Sollwert des Speicherladestands. Daraus folgt: alle Kessel mit gleichem Sollwert und entsprechend identischer Leistungsvorgabe • Regelung auf individuellen Sollwert des Speicherladestands. Daraus folgt: ein Kessel moduliert seine Leistung, die anderen werden entweder alle bei Nennleistung oder entsprechend alle Kessel bei minimmaler Leistung betrieben
Regelung der Kesselaustrittstemperatur	<ul style="list-style-type: none"> • Ja 	<ul style="list-style-type: none"> • Ja

3. Beschreibung der untersuchten Anlagen

3.1. Anlage 1: Wärmeverbund WV Schachen

3.1.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung

Wärmeabnehmer

Der Wärmeverbund versorgt seit 2017 Teile des Dorfes Schachen ganzjährig mit Wärme für Raumheizung und Warmwasser. Der Wärmeverbund wurde seit der Inbetriebnahme laufend weiter ausgebaut, der Endausbau ist Ende 2021 noch nicht erreicht.



Bild 6 Heizzentrale des Wärmeverbunds WV Schachen.

Heizzentrale

Die 2017 neu erstellte Heizzentrale wurde in das bestehende Gebäude einer ehemaligen Käserei integriert. Angrenzend ans Gebäude wurden drei separate Silokompartimente erstellt (Bild 6). Entsprechend dem fortschreitenden Ausbaustand des Wärmeverbunds wurden zunächst zwei Holzkessel installiert, im Sommer 2019 wurde ein dritter Holzkessel und im Herbst 2020 wurde ein vierter Holzkessel installiert. Im Endausbau werden fünf Holzkessel mit einer Nennleistung von je 330 kW installiert sein. Die installierte Leistung beträgt somit aktuell 4 mal 330 kW, also 1'320 kW. Im Endausbau wird die installierte Leistung rund 1'650 kW betragen.

Die Heizzentrale umfasst per Ende 2021 folgende Komponenten:

- Holzkessel:
 - Kessel KA 330 kW
 - Kessel KB 330 kW
 - Kessel KC 330 kW
 - Kessel KD 330 kW
 - Kessel KE 330 kW
 - Installierte Leistung 1'320 kW
- Feinstaubabscheider:
 - Kessel KA – Abscheider Typ 1
 - Kessel KB – Abscheider Typ 2
 - Kessel KC – Abscheider Typ 1
 - Kessel KE – Abscheider Typ 2
- Technischer Wärmespeicher 22.4 m³ (4 Speicher à 5.6 m³, in Serie angeordnet)

Jeder Kessel ist mit einem Elektroabscheider ausgerüstet vom Typ 1 bzw. Typ 2. Die Elektroabscheider befinden sich in der Verbindungsleitung zwischen Kessel und Kaminanlage. Sie werden mit Heizungswasser aus dem Hauptvorlauf beheizt.

Brennstoff

Es sind drei separate Silokompartimente à je 100 m³ Bruttovolumen vorhanden, die mit Holzhackschnitzeln von drei unterschiedlichen lokalen Brennstofflieferanten gefüllt werden. Die Austragung aus den drei Silos erfolgt über Federkern-Rundaustragungen. Die drei Brennstofftransportleitungen zu den Holzkesseln sind den 5 Kesseln fix zugeordnet. Alle Holzkessel sind mit Wärmezählern ausgerüstet.

Die Abrechnung der gelieferten Holzhackschnitzel erfolgt über die Wärmezähler der den jeweiligen Silokompartimenten zugeordneten Holzkesseln.

Die Qualität der Holzhackschnitzel entspricht gemäss Brennstoffliefervertrag der Stückigkeitsklasse P16S bis P31S. Für die installierten Holzkessel ist ein Wassergehalt bis 35% zugelassen. Die Bezeichnung der Brennstoffqualität ist somit WS-P31S-M35.

Wärmespeicher

Das Speichervolumen gemäss Luftreinhalte-Verordnung LRV verlangt 25 Liter pro kW installierte Leistung, für die Nennwärmeleistung der 4 installierten Holzkesseln von 1'320 kW somit rund 33 m³. Das Speichervolumen gemäss QMH, um die während einer Betriebsstunde von 4 installierten Holzkesseln mit 1'320 kW und mit einer Temperaturspreizung über dem Speicher von ca. 40 K produzierte Wärme aufzunehmen, beträgt rund 29 m³. Das installierte Speichervolumen von 22.4 m³ kann die installierte Leistung von 1'320 kW während rund 46 Minuten aufnehmen. Mit der 2/3-Regel von QMH, wonach bei Anlagen mit zwei oder mehr Holzkesseln zur Berechnung des notwendigen Speichervolumens nur 2/3 der installierten Leistung berücksichtigt wird bzw. das Speichervolumen für 2/3 einer Betriebsstunde reichen muss, beträgt das notwendige Speichervolumen rund 19 m³. Das installierte Speichervolumen erfüllt für vier Holzkessel die 2/3-Regel von QMH, die Anforderung der LRV ist nicht erfüllt.

Kaminanlage

Es sind drei Kamine installiert, die jeweils am Kaminfuss mit einer Kaminzugregelklappe ausgerüstet sind. Zwei der Holzkessel sind separat mit je einem eigenen Kamin verbunden. Bei den anderen beiden Holzkesseln werden die Abgasleitungen nach den Elektroabscheidern zusammengeführt und gemeinsam ein weiteres Kamin geführt.

Prinzipschema

Die vier Kessel sind hydraulisch parallel und Wärmespeicherung hydraulisch parallel zueinander angeordnet. Die vier Wärmespeicher bilden dabei eine Einheit von vier in Serie zueinander angeordneten Speichern. Die Kessel sind mit Rücklaufhochhaltung ausgeführt. Bei jedem Kessel ist ein Wärmezähler installiert. Zusätzlich erfassen ein Wärmezähler die Beheizung aller Elektroabscheider und einer den Wärmebezug des Gebäudes der Heizzentrale. Am Abgang der Fernleitung in der Heizzentrale ist kein Wärmezähler installiert.

3.1.2. Regelkonzept

Berechnung des Speicherladezustands

Die Berechnung des Speicherladezustands erfolgt in der Kesselsteuerung, es stehen dazu fünf Temperaturfühler zur Verfügung, die gleichmäßig über die 4 Speicher verteilt angeordnet sind (Bild 7, linke Anordnung der Temperaturfühler). Jedem Temperaturfühler wird ein prozentualer Wert zwischen 0% (z.B. bei 20°C) und 100% (z.B. bei 80°C) zugeordnet, der in Funktion der Definition für Temperaturfühler = Heiss und Temperaturfühler = kalt berechnet wird. Den untersten beiden Temperaturfühlern ist allerdings eine andere Bezugstemperatur für Temperaturfühler = Heiss zugeordnet, die für das Beenden der Speicherladung etwas tiefer gesetzt ist (z.B. 100% bei 72°C). Der Speicherladezustand wird als Mittelwert aus den Beiträgen der einzelnen Temperaturfühler berechnet.

Das Leitsystem verwendet acht eigene Temperaturfühler, die entsprechend Bild 7 (linke Anordnung der Temperaturfühler) jeweils oben und unten in den vier Speichern angeordnet sind.

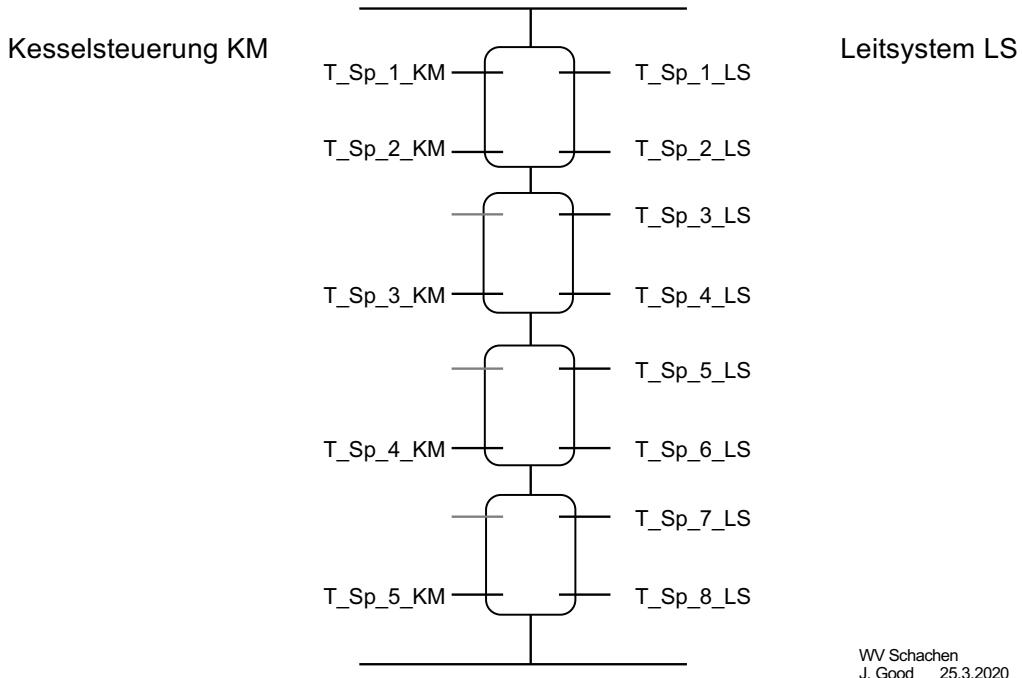


Bild 7 WV Schachen: Anordnung der Temperaturfühler in den vier Speichern.

Zu- und Abschalten der Kessel (Regelung der Kaskade)

Mit der Kaskadensteuerung beim WV Schachen können bis zu sechs Holzkessel unterschiedlicher Nennleistung im Verbund betrieben werden, bei der untersuchten Anlage sind es vier Holzkessel. Das Konzept für die Regelung der Kaskade ist vergleichsweise komplex aufgebaut und hängt von einer Fülle von Parametern ab. Dadurch ist das Nachvollziehen von Zu- und Abschaltungen der Holzkessel erschwert. Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der allgemeinen Zu- und Abschaltschwellen der Holzkessel in der Standard-Version.

Tabelle 8 Allgemeine Zu- und Abschaltschwellen bei Anlage 1 (WV Schachen); Standard-Variante.

	Zu- und Abschaltschwellen
Allgemeine Zuschaltschwellen	70% / 50% / 35%
Zuschalten plus ein Kessel	Ein Kessel ist länger als 30 Minuten über 90% der Kesselleistung
Zuschalten plus ein Kessel	Oberster Speicherfühler sinkt unter 76°C
Zuschalten plus ein Kessel	Oberster Speicherfühler bleibt über 180 Minuten unter 76°C
Abschalten minus ein Kessel	Kessel wird über 10 Minuten bei Minimalleistung betrieben
Abschalten gleichzeitig alle Kessel	Unterster Speicherfühler steigt über 76°C

Regelung der Kesselleistung

Der Speicherladezustand wird mittels eines PI-Reglers auf einen konstanten Sollwert geregelt. Die Stellgrösse des PI-Reglers ist die Leistungsvorgabe der Holzkessel. Genaue Angaben zum PI-Regler liegen nicht vor.

Der Modulationsbereich der Leistungsregelung ist auf 100% bis 60% begrenzt. Während der Beobachtungsphase wurde die untere Schwelle der Leistungsmodulation von 60% auf 50% gesenkt.

Die Freigabe der Leistungsmodulation erfolgt erst ab einem Speicherladezustand von 85 %.

Regelung der Kesseltemperatur

Die Kesselaustrittstemperatur wird auf einen konstanten Wert geregelt.

Rostentaschung

Die Rostentaschung der Holzkessel erfolgt rund alle 6 bis 12 Betriebsstunden. In einer späteren Projektphase wurden die Enttaschungsvorgänge wie folgt optimiert, um die Anzahl Kesselschaltungen zu vermindern:

- Ist der Speicherladezustand zu Beginn einer Rostentaschung niedrig, wird ein neuer Holzkessel zugeschaltet.
- Der wegen einer Rostentaschung neu zugeschaltete Kessel bleibt in Betrieb. Derjenige Kessel, der die Rostentaschung durchgeführt hat, geht erst wieder in Betrieb, sobald eine neue Kesselzuschaltung erforderlich wird.

Die Ascheboxen müssen bei kalter Witterung rund dreimal pro Woche entleert werden, bei warmer Witterung rund zweimal pro Woche

Alternierung der Kessel

Die Alternierung der Zuschaltreihenfolge erfolgt, sobald der in Betrieb stehende Holzkessel mindestens 6 bis maximal 18 Betriebsstunden mehr aufweist als die anderen Holzkessel. Die Alternierungsgrenzen können für jeden Holzkessel separat vorgegeben werden.

3.2. Anlage 2: Wohnüberbauung WUEB Roggwil

3.2.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung

Wärmeabnehmer

Die Wohnüberbauung besteht aus zwei bestehenden Gebäuden, drei Neubauten und einer Einstellhalle. Die bestehenden Gebäude wurden saniert und mit einem vierten Wohngeschoss aufgestockt. Die Neubauten sind nach Minergie zertifiziert.

Der Wärmeleistungsbedarf der beiden wärmotechnisch sanierten Gebäude und der drei Neubauten beträgt gemäss der Situationserfassung nach QM Holzheizwerke insgesamt rund 170 kW, der Jahreswärmebedarf für Heizung und Warmwasser rund 390 MWh/a, davon rund 120 MWh/a (31%) für Warmwasser:

- Jahreswärmebedarf 390 MWh/a
- davon Warmwasser 120 MWh/a (31%)
- Wärmeleistungsbedarf ca. 170 kW

Heizzentrale

Die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser erfolgt durch eine in einen der Neubauten integrierte Heizzentrale (Bild 8). Die Heizzentrale umfasst folgende Komponenten:

- | | |
|--------------------------------|---|
| • Brennstoff | Pellets |
| • Pelletkessel Master | 100 kW |
| • Pelletkessel Slave 1 | 80 kW |
| • Pelletkessel Slave 2 | <u>80 kW</u> |
| • Installierte Leistung Gesamt | 260 kW |
| • Feinstaubabscheider | keine |
| • Technischer Wärmespeicher | 6.9 m ³ (3 mal 2.3 m ³ , in Serie angeordnet) |
| • Betriebsweise | Ganzjahresbetrieb für Raumwärme und Warmwasser. |



Bild 8 WUEB Roggwil mit drei Pelletkesseln mit zweimal 80 kW und einmal 100 kW Leistung.

Brennstoff

Die Pellets werden in einem Pelletsilo mit einem Inhalt von knapp 50 m³ gelagert. Die Befüllung des Silos erfolgt über drei fest montierte Leitungen. Sie werden über drei separate Förderschnecken aus dem Silo ausgetragen und von dort pneumatisch mittels Luft zu den drei Tagesbehältern geblasen.

Wärmespeicher

Das Speichervolumen gemäss Luftreinhalte-Verordnung LRV verlangt 25 Liter pro kW installierte Leistung, somit rund 6.5 m³. Das Speichervolumen gemäss QMH, um die während einer Betriebsstunde bei der gesamten Nennwärmeleistung von 260 kW mit einer Temperaturspreizung über dem Speicher von 40 K produzierte Wärme aufzunehmen beträgt rund 5.7 m³. Das installierte Speichervolumen von 6.9 m³ kann die installierte Leistung von 260 kW während rund 73 Minuten aufnehmen.

Mit der 2/3-Regel von QMH, wonach bei Anlagen mit zwei oder mehr Holzkesseln zur Berechnung des notwendigen Speichervolumens nur 2/3 der installierten Leistung berücksichtigt wird bzw. das Speichervolumen für 2/3 einer Betriebsstunde reichen muss, beträgt das notwendige Speichervolumen rund 3.8 m³. Das installierte Speichervolumen von rund 6.9 m³ ist grosszügig dimensioniert und kann somit auch kurze Spitzen des Leistungsbedarfs überbrücken.

Kaminanlage

Es sind zwei Kamine installiert. Die beiden Pelletkessel mit je 80 kW werden gemeinsam in ein Kamin mit einem Durchmesser von 300 mm geführt, der Pelletkessel mit 100 kW in ein Kamin mit einem Durchmesser von 200 mm.

Prinzipschema

Die drei Pelletkessel und die Wärmespeicherung sind hydraulisch parallel zueinander angeordnet. Die drei Wärmespeicher bilden dabei eine Einheit von drei in Serie zueinander angeordneten Speichern. Die Pelletkessel sind ohne Dreiwegeventil zur Rücklaufhochhaltung ausgeführt, die Rücklaufhochhaltung wird über die Drehzahl der Kesselpumpen sichergestellt. Ein einzelner Wärmezähler ist nach den Speichern angeordnet. Er kann somit nicht die Leistung der Pelletkessel allein anzeigen, sondern er erfasst überlagert auch die Leistungsabgabe bzw. Leistungsaufnahme der Wärmespeicher. Er zeigt somit den Wärmeleistungsbedarf der Abnehmer.

3.2.2. Regelkonzept

Berechnung des Speicherladezustands

Die Berechnung des Speicherladezustands erfolgt in der Kesselsteuerung, es stehen dazu vier (bis maximal acht) Temperaturfühler zur Verfügung. Bild 9 links zeigt die Anordnung der Temperaturfühler in den Speichern:

- Die Temperaturfühler sind nicht gleichmäßig über die Speicher verteilt
- Der oberste und der unterste Temperaturfühler lassen ein grosses Speichervolumen ungenutzt.
- Empfehlung für Verbesserung der Position der Temperaturfühler (Bild 9 rechts)
- Die Empfehlung wurde nicht umgesetzt.

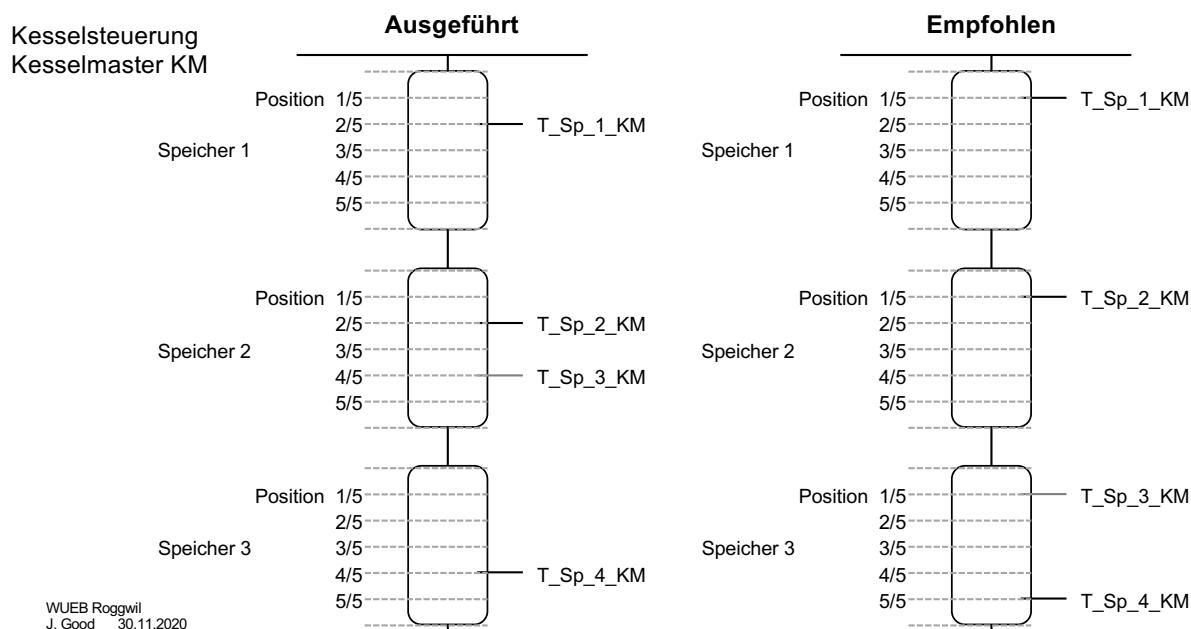


Bild 9 WUEB Roggwil: Anordnung der Temperaturfühler in den drei Wärmespeichern (Links: gemäss Ausführung, Rechts: empfohlen).

Ein Ladezustand von 100% ist erreicht, wenn der Mittelwert der vier Temperaturfühler der Kesseltemperatur von rund 73°C entspricht, ein Ladezustand von 0% tritt auf, wenn der Mittelwert der vier Temperaturfühler 20°C bzw. 30°C entspricht. Zur Berechnung des Speicherladezustands wird die Mitteltemperatur der vier Temperaturfühler berechnet und daraus gemäss Bild 10 der Speicherladezustand berechnet. Zum Vergleich ist in Bild 11 auch die Berechnungsmethode des Speicherladezustand angegeben, wenn nur der Temperaturbereich zwischen kalt = 60°C und heiss = 80°C für die Berechnung des Speicherladezustands verwendet würde. Mit einer Mitteltemperatur von 60°C wäre gemäss Bild 11 bereits einen Speicherladezustand von 0% erreicht, mit der Methode gemäss Bild 10 (rechts) würde der Speicherladezustand noch rund 60% betragen.

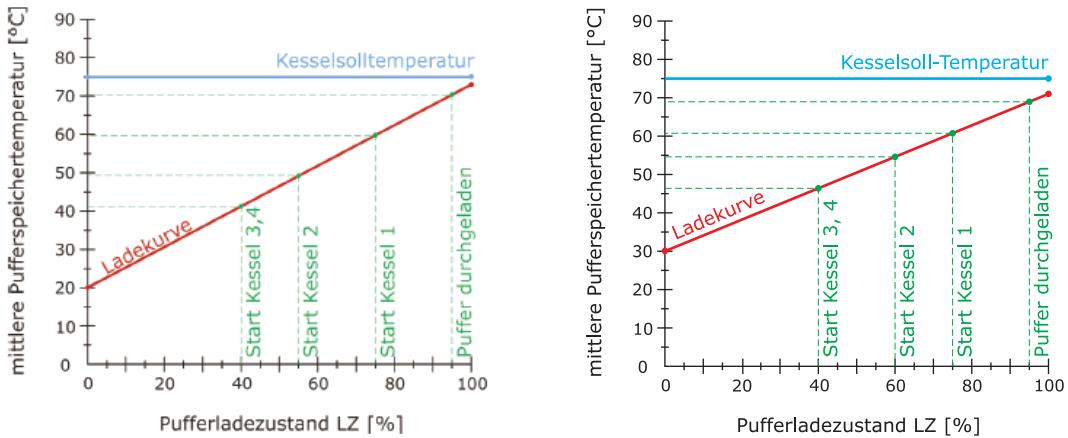


Bild 10 Regelkonzept von Anlage 2 für Mehrkessel-Kaskaden: Ladekurve mit individuellen Kesselzuschaltbedingungen (Basis für einen Pufferladezustand bzw. Speicherladezustand von 0 %: links 20 °C, rechts 30 °C).

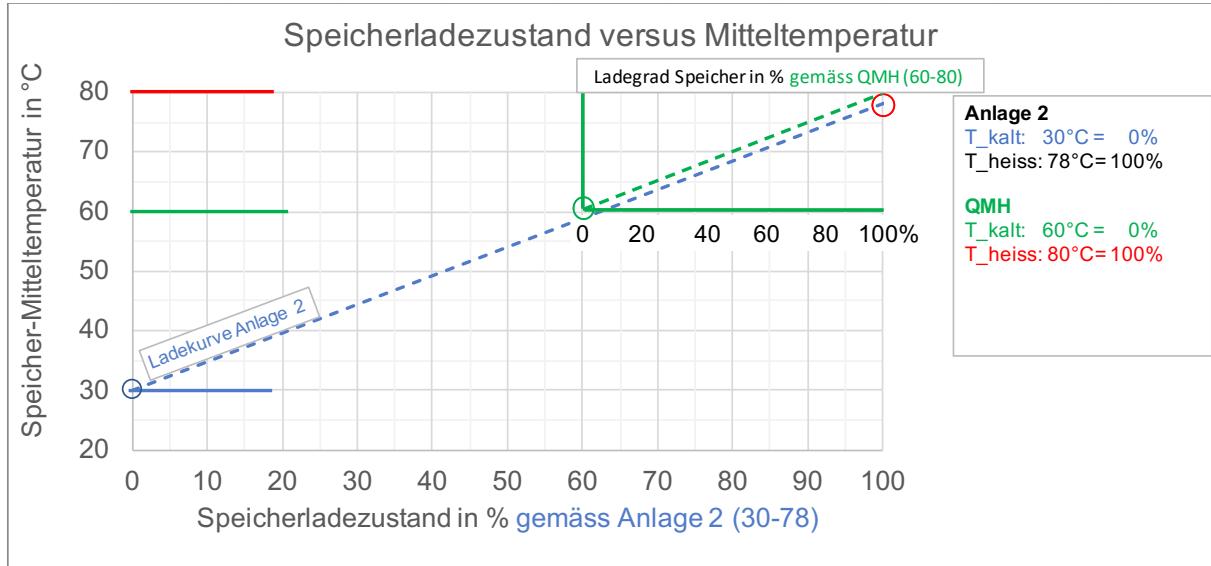


Bild 11 Zusammenhang zwischen der Speicher-Mitteltemperatur und dem daraus berechneten Speicherladezustand
Blau: Regelkonzept von Anlage 2 mit kalt = 30°C = 0% und heiss = 78°C = 100%
Grün: Empfehlung von QMH mit kalt = 60°C = 0% und heiss = 80°C = 100%.

Zu- und Abschalten der Kessel (Regelung der Kaskade)

Mit der Kaskadensteuerung von Anlage 2 können bis zu vier Holzkessel unterschiedlicher Nennleistung im Verbund betrieben werden, bei der untersuchten Anlage sind es drei Pelletkessel. Für jeden der drei Pelletkessel ist ein bestimmter Speicherladezustand als Startpunkt definiert, z.B. Kessel 1 startet beim Unterschreiten des Speicherladezustands von 60%, Kessel 2 bei 50% und Kessel 3 bei 35%. Ein Schnellstart erfolgt, wenn die Speicherladung um einen vorgegebenen Wert von z.B. 15% innerhalb 10 Minuten absinkt. Der zweite oder dritte zugeschaltete Holzkessel schaltet wieder ab, sobald er den Zuschaltpunkt des vor ihm gestarteten Holzkessels um 5% übersteigt. Der letzte Holzkessel sowie alle noch in Betrieb stehenden Holzkessel werden bei einem Speicherladezustand von 95% gleichzeitig abgeschaltet. Tabelle 9 zeigt eine Übersicht der individuellen Zu- und Abschaltbedingungen der Holzkessel in der Standard-Version.

Tabelle 9 Individuelle Zu- und Abschaltbedingungen bei Anlage 2 (WUEB Roggwil); Standard-Variante.

	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4
Individuelle Zuschaltbedingungen bei Speicherladezustand	70%	40%	10%	10%
Schnellstart	Speicherladung sinkt um mehr als 15% innert 10 Minuten			
Zuschalten bei Rostreinigung	Wenn der Speicherladezustand bei der Rostreinigung < 75 ist			
Individuelle Abschaltbedingungen bei Speicherladezustand	95%	75%	45%	45%

Tabelle 10 Individuelle Zu- und Abschaltbedingungen bei Anlage 2 (WUEB Roggwil); Sommersetting Juni 2021.

	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4
Individuelle Zuschaltbedingungen bei Speicherladezustand	40%	0%	0%	0%
Schnellstart	Speicherladung sinkt um mehr als 40% innert 10 Minuten			
Zuschalten bei Rostreinigung	Wenn der Speicherladezustand bei der Rostreinigung < 75 ist			
Individuelle Abschaltbedingungen bei Speicherladezustand	95%	45%	45%	45%

Regelung der Kesselleistung

Nur der erste zugeschaltete Holzkessel der Kaskade kann seine Leistung im Bereich zwischen 100% bis ca. 40% modulieren, alle nachfolgend zugeschalteten Holzkessel werden nur bei Nennleistung betrieben oder entsprechend den Abschaltkriterien wieder ausgeschaltet.

Die Leistungsmodulation wird nur innerhalb eines engen Bereichs des Speicherladezustands freigegeben. Die Freigabe erfolgt, wenn der Speicherladezustand die Zuschaltbedingung des ersten Holzkessels um 5 Prozentpunkte überschreitet, die Freigabe wird wieder entzogen, wenn der Speicherladezustand die Zuschaltbedingung des ersten Holzkessels wieder unterschreitet.

Wenn die Leistungsmodulation freigegeben ist, wird der Speicherladezustand über die Modulation der Kesselleistung auf einen konstanten Sollwert geregelt.

Regelung der Kesseltemperatur

Die Holzkessel werden alle auf dieselbe Kesselvorlauftemperatur geregelt.

Rostentaschung

Die Rostentaschung der Holzkessel erfolgt rund alle 8 Betriebsstunden.

Alternierung der Kessel

Die Alternierung der Zuschaltreihenfolge der Holzkessel erfolgt alle 50 Stunden.

3.3. Anlage 3: Wohnüberbauung Schliern

3.3.1. Eigenschaften der Wärmeerzeugung

Wärmeabnehmer

Die Wohnüberbauung besteht aus vier bestehenden Gebäuden in Schliern bei Köniz. Bei allen Gebäuden wurde die Gebäudehülle bis auf das Ersetzen der Fenster saniert.

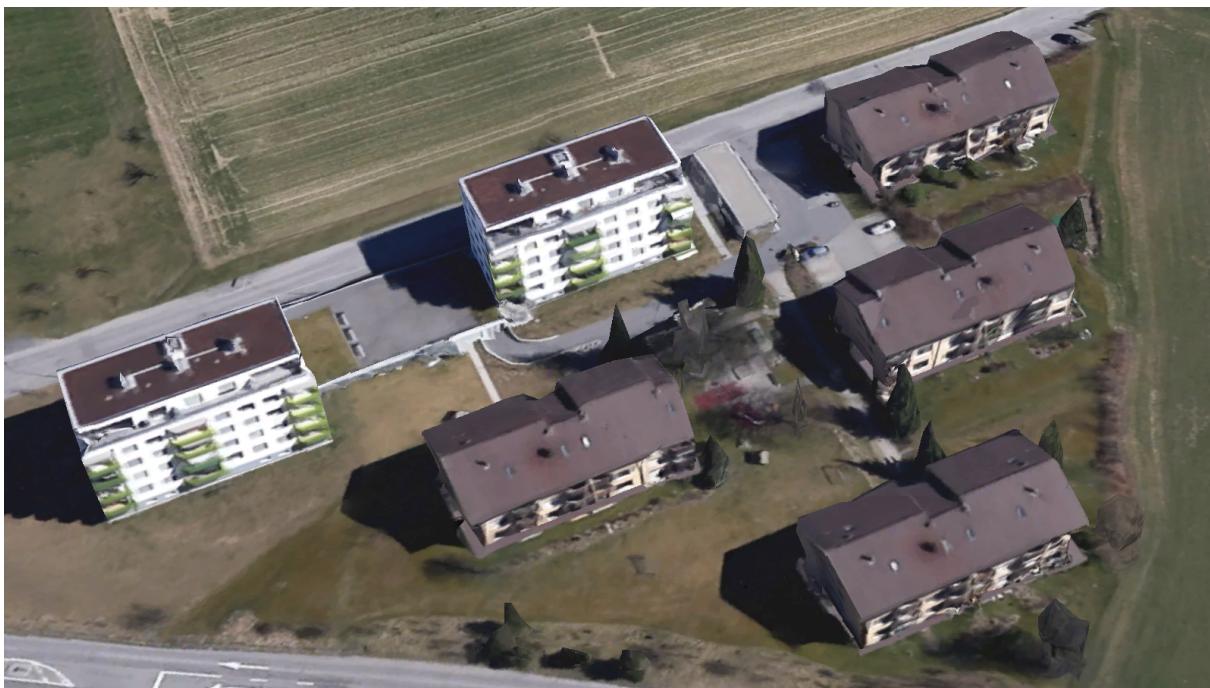


Bild 12 Wohnüberbauung WUEB Schliern bei Köniz

Der Wärmeleistungsbedarf der wärmetechnisch sanierten Gebäude beträgt gemäss der Situations erfassung nach QM Holzheizwerke insgesamt rund 200 kW, der Jahreswärmebedarf für Heizung und Warmwasser rund 483 MWh/a. Die Jahreswärmeproduktion beträgt rund 550 MWh/a, die Verluste des Wärmenetzes werden auf rund 12% geschätzt:

• Nutzwärmebedarf gesamt	483 MWh/a
• Verluste Wärmenetz	<u>66 MWh/a</u>
• Wärmeproduktion	549 MWh/a
• Wärmeleistungsbedarf ca.	200 kW

Heizzentrale

Die Wärmeerzeugung für Heizung und Warmwasser erfolgt durch eine in einer zentralen Einstellhalle integrierte Heizzentrale (Bild 12). Die Heizzentrale umfasst folgende Komponenten:

• Brennstoff	Pellets
• Pelletkessel 1	85 kW
• Pelletkessel 2	<u>85 kW</u>
• Installierte Leistung Gesamt	170 kW
• Feinstaubabscheider	in Holzkessel integriert
• Technischer Wärmespeicher	4.2 m ³ (2 mal 2.1 m ³ , in Serie angeordnet)
• Betriebsweise	Ganzjahresbetrieb für Raumwärme und Warmwasser.

Brennstoff

Die Pellets werden in einem Pelletsilo mit einem Inhalt (netto) von ca. 47 m³ (rund 31 t) gelagert. Die Befüllung des Silos erfolgt über drei fest montierte Leitungen. Sie werden über zwei separate Förderschnecken aus dem Silo ausgetragen und von dort über zwei separate Förderschnecken zu den beiden Pelletkesseln geführt.

Wärmespeicher

Das Speichervolumen gemäss Luftreinhalte-Verordnung LRV verlangt 25 Liter pro kW installierte Holzkesselleistung, somit rund 4.3 m³. Das Speichervolumen gemäss QMH, um die während einer

Betriebsstunde bei der gesamten Nennwärmeleistung von 170 kW mit einer Temperaturspreizung über dem Speicher von 30 K produzierte Wärme aufzunehmen beträgt rund 4.2 m³. Das installierte Speichervolumen von 4.2 m³ kann die installierte Leistung von 170 kW während rund 60 Minuten aufnehmen.

Mit der 2/3-Regel von QMH, wonach bei Anlagen mit zwei oder mehr Holzkesseln zur Berechnung des notwendigen Speichervolumens nur 2/3 der installierten Leistung berücksichtigt wird bzw. das Speichervolumen für 2/3 einer Betriebsstunde reichen muss, beträgt das notwendige Speichervolumen rund 3.3 m³.

Kaminanlage

Es sind zwei Kamine installiert.

Prinzipschema

Die beiden Pelletkessel und die Wärmespeicherung sind hydraulisch parallel zueinander angeordnet. Die beiden Wärmespeicher bilden dabei eine Einheit von zwei in Serie zueinander angeordneten Speichern. Bei beiden Pelletkesseln ist ein Wärmezähler installiert.

3.3.2. Regelkonzept

Berechnung des Speicherladezustands

Die Berechnung des Speicherladezustands erfolgt in der Kesselsteuerung, es stehen dazu fünf Temperaturfühler zur Verfügung, die gleichmäßig über die beiden Wärmespeicher verteilt sind. Aus den Temperaturwerten wird ein Speichertemperaturmittelwert berechnet. Der Speicherladezustand wird aus dem Mittelwert der Speichertemperatur, der Rücklauftemperatur der Verbraucher und der Speichersolltemperatur berechnet. Ein Speicherladezustand von 0% bezieht sich auf die Rücklauftemperatur der Verbraucher. Der Sollwert des Speicherladezustands wird über die Aussentemperatur vorgegeben.

Zu- und Abschalten der Kessel (Regelung der Kaskade)

Mit der Kaskadensteuerung bei Anlage 3 können bis zu drei Kessel unterschiedlicher Nennwärmeleistung im Verbund betrieben werden. Das Zuschalten des ersten Kessels erfolgt, wenn das System Wärme anfordert und entweder die Speichertemperatur unter die Einschalttemperatur am Einschaltfühler (Position wählbar, oben im Speicher) sinkt oder der Speicherladezustand unter den Sollwert des Speicherladezustands sinkt.

Das Abschalten des letzten Kessels erfolgt, wenn die Speichertemperatur unter die Ausschalttemperatur am Ausschaltfühler (Position wählbar, unten im Speicher) sinkt.

Das Zu- oder Abschalten des zweiten Kessels, des Folgekessels, erfolgt über die Kaskadeneinstellung. Dazu wird eine Leistungsanforderung in Prozent der Nennleistungen berechnet, die für zwei Kessel einen Wert von 0% bis 200% annehmen kann. Das Zu- oder Abschalten des zweiten Kessels erfolgt über eine Zuschaltschwelle z.B. bei einer Leistungsanforderung von 120% und über eine Abschaltschwelle z.B. bei einer Leistungsanforderung von 80%. Die Zuschaltung des Folgekessels erfolgt jedoch nur, wenn sie über die Aussentemperatur freigegeben wird. Übersteigt die Aussentemperatur einen vorgegebenen Wert, wird der Folgekessel nicht freigegeben.

Regelung der Kesselleistung

Die Kesselleistung wird nicht über den Speicherladezustand geregelt. Die Kesselleistung wird vorgegeben über die Berechnung einer Leistungsanforderung. Diese ergibt sich aus der Leistungsanforderung der Verbraucher (Heizgruppen und Brauchwarmwasser) und der Leistungsanforderung zum Laden des Speichers.

Regelung der Kesseltemperatur

Die Holzkessel werden alle auf dieselbe Kesseltemperatur geregelt. Die Regelung der Kesseltemperatur erfolgt über die Anpassung des Sollwerts der Regelung der Kesselrücklauftemperatur.

Rostentaschung

Die Rostentaschung der Holzkessel erfolgt in Abhängigkeit der verbrannten Pelletmenge. Bei einer Nennleistung von 80 kW erfolgt die Rostreinigung, sobald eine Pelletmenge von rund 70 kg bis 110 kg verbrannt worden ist. Bei Dauerbetrieb entspricht rund 4 bis 7 Betriebsstunden bei Nennleistung, die Leistungsmodulation kann die Betriebszeit verlängern.

Alternierung der Kessel

Die Alternierung der Zuschaltreihenfolge erfolgt nach jeder Kalenderwoche, also alle rund 170 Stunden.

3.4. Übersicht der Eigenschaften und Regelkonzepte der untersuchten Kaskadenanlagen

Tabelle 11 zeigt eine Zusammenstellung der Eigenschaften der untersuchten Kaskadenanlagen, der untersuchten Regelkonzepte und der vorgenommenen Veränderungen der Regelparameter.

Tabelle 11 Zusammenstellung der wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Anlagen.

Kessel	Anlage 1: WV Schachen	Anlage 2: WUEB Roggwil	Anlage 3: WUEB Schlieren
Anzahl Holzkessel	4	3	2
Brennstoff	Holzhackschnitzel	Pellets	Pellets
Elektroabscheider	Ja, extern	nein	Ja, integriert
Max. Leistungsbedarf	1'200 kW	160 kW	150 kW
Installierte Leistung	1'320 kW	260 kW	170
Kesselaufteilung	330/330/330/330	100/80/80	85/85
Vollbetriebsstundenzahl	ca. 2000 h/a	ca. 1600 h/a	ca. 3200 h/a
Wärmespeicher			
Speichervolumen	22.4 m ³ (4 x 5.6 m ³)	6.9 m ³ (3 x 2.3 m ³)	4.2 m ³ (2 x 2.1 m ³)
Speicherkapazität bei 100% der installierten Leistung und bei ΔT	$\Delta T=40\text{ K} : 46\text{ min}$	$\Delta T=40\text{ K} : 73\text{ min}$	$\Delta T=40\text{ K} : 68\text{ min}$
Kaskade: Kesselzuschaltung			
Allgemeine Zuschaltschwellen in Funktion des Speicherladezustands	Unterschreitung von 65% / 30% (bis Juni 2021)	–	–
Individuelle Zuschaltbedingungen in Funktion des Speicherladezustands		K1:70% / K2: 40% / K3: 10%	–
Wärmeanforderung	–	–	Wärmeanforderung und Speicherladezustand bzw. Speicherzuschalttemperatur zu tief
Kaskade: Kesselabschaltung			
Individuelle Abschaltbedingungen	Über Laufzeitbegrenzungen	K1:95% / K2: 75% / K3: 45%	Speicherabschalttemperatur
Leistung/Rostreinigung/ Alternierung			
Leistungsmodulation	Alle Kessel 100% – 60% Freigabe bei Speicherladezustand $\leq 85\%$	Erster/letzter Kessel 100% – 40%	Alle Kessel 100% – 35%
Leistungsregelung über	Regelung des Speicherladezustands	Regelung des Speicherladezustands	Summe Leistungsanforderungen von Speicherladung, Warmwasserladung und Heizung
Rostreinigung alle	6 h bis 12 h	8 h	4 h bis 7 h
Alternierung alle	6 h bis 18 h	50 h (2 Tage)	170 h (7 Tage)

4. Vorgehen und Methode

4.1. Teil 1 – Praxisuntersuchung

4.1.1. Datenerfassung

Tabelle 12 zeigt, welche Anlagedaten der drei untersuchten Praxisanlagen erfasst und wie sie übermittelt wurden.

Tabelle 12 Kennwerte der erfassten Betriebsdaten für die Praxisuntersuchung.

	WV Schachen	WUEB Roggwil	WUEB Schliern
Daten	4.2.2020 – 31.12.2021	24.8.2020 – 6.7.2021	1.3.2020 – 30.6.2021
Zeitauflösung	30 s	30 s	5 Min.
Datenerfassung	Wochenfiles von Kesseln und Leitsystem erstellt durch die Firma Heitzmann	Echtzeiterfassung via Modbus aus den Kesselsteuerungen und Übertragung via Mobilfunk in Datencloud von Verenum.	Datenexport aus dem Leitsystem durch Verenum
Kesseldaten	Kenngrössen und Betriebszustände	Kenngrössen und Betriebszustände	Kenngrössen
Wärmezählerdaten	Kessel und Bezüger (15 Min.)	Abgang aus Zentrale (Tageswerte)	Kessel und Bezüger (5 Min.)

4.1.2. Vorgehen bei Anlage 1: WV Schachen

Seit Februar 2020 bis November 2021 wurden Anlagedaten gemäss Tabelle 12 ausgewertet. Im Untersuchungszeitraum wurden mehrmals verschiedene Regelparameter verändert und deren Einfluss auf das Regelverhalten der Kaskade untersucht. Aufgrund der Zwischenerkenntnisse wurden mehrmals neue Software-Updates erstellt und auf der Anlage installiert. Wichtige Veränderungen waren:

- Parameterveränderungen
 - Referenztemperatur kalt für 0%: von 20 °C angehoben, belassen bei 40 °C
 - Früheres Freigeben der Leistungsmodulation der Kessel
 - Bereich der Leistungsmodulation von 100% bis 60% auf 100% bis 50% vergrössert
 - Kessel später ausschalten, erst bei Speicherladung von 100%
 - Längere Laufzeit der Kessel bei Teilleistung ermöglichen
 - Längere Laufzeit der Kessel bei Nennleistung ermöglichen
 - Zuschaltbedingungen verändert
- Software-Updates
 - Mai 2020, Software-Update: Umstellung von allgemeinen Zuschaltbedingungen zu individuellen, für jeden Holzkessel separaten Zuschaltbedingungen
 - März 2021 Software-Update: Fehlerbehebung bei Leistungssignal
 - Juni 2021 Software-Update: Neues Regelverhalten
- Optimierung der Boilerladungen
 - Optimieren der Boilergruppen
 - Optimieren der Ladefenster der Boilergruppen

Mit Hilfe der Anlagedaten wurde das Betriebsverhalten analysiert. Auffälliges Fehlverhalten der Kaskade wie Mehrfachzu- und -abschaltungen wurden vertieft analysiert. Es wurde versucht, die Ursachen zu ermitteln und daraus Erkenntnisse und Empfehlungen abzuleiten.

4.1.3. Vorgehen bei Anlage 2: WUEB Roggwil

Mit Hilfe der Anlagedaten und der Echtzeiterfassung wurde das Betriebsverhalten analysiert. Auffälliges Fehlverhalten der Kaskade wie Mehrfachzus- und -abschaltungen wurden vertieft analysiert. Es konnten kurzfristig Optimierungen an den Regelparametern vorgenommen werden, um das Betriebsverhalten zu testen und zum Beispiel für den Sommerbetrieb verbesserte Regelparameter für die Kaskade mit weniger Kesselstarts pro Tag zu finden. Die Position der Temperaturfühler im Speicher wurde analysiert, die Empfehlung zum Versetzen der Temperaturfühler (Bild 9) wurde jedoch nicht ausgeführt.

4.1.4. Vorgehen bei Anlage 3: WUEB Schliern

Mit Hilfe des Datenexports aus dem Leitsystem konnte das Betriebsverhaltens der Anlage analysiert werden und Schwächen im Betriebsverhalten aufgezeigt werden. Es wurden keine Veränderungen von Regelparametern der Kaskade vorgenommen. Der Kessel-/Steuerungslieferant konnte jedoch aufgrund der Analyse einen Software-Fehler identifizieren und beheben.

4.1.5. Übersicht von Veränderungen der Regelungseinstellungen

Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der Veränderungen der Zu- und Abschaltbedingungen der untersuchten Kaskadenanlagen.

Tabelle 13 Übersicht der Veränderungen der Zu- und Abschaltbedingungen.

Kessel	Anlage 1: WV Schachen	Anlage 2: WUEB Roggwil
Ausgangslage Kesselzuschaltung		
Allgemeine Zuschaltschwellen in Funktion des Speicherladezustands	65% / 30%	–
Individuelle Zuschaltbedingungen in Funktion des Speicherladezustands		70% / 40% / 10%
Veränderungen Kesselzuschaltung		
Individuelle Zuschaltbedingungen	70% / 50% / 30%	40% / 0% / 0% (Sommersettings 2021)
Individuelle Zuschaltbedingungen (ab Sommer 2020)	70% / 50% / 30% / 20%	75% / 55% / 40%
Ausgangslage Kesselabschaltung		
Individuelle Abschaltbedingungen	Über Laufzeitbegrenzungen	95% / 75% / 45%
Veränderungen Kesselabschaltung		
Individuelle Abschaltbedingungen		95% / 80% / 60%

4.2. Teil 2 – Prozessmodellierung

4.2.1. Beschreibung des Modells

Das Modell beschreibt die thermodynamischen und regelungstechnischen Vorgänge in einem Holzheizwerk bei einer dynamischen Wärmeabnahme (Bild 13). Das Modell umfasst die Wärmeerzeugung mit einer beliebigen Anzahl von Holzkesseln, einen geschichteten Wärmespeicher mit einer beliebigen Speicherkapazität, eine dynamische Wärmeleistungsabnahme und einen Regler, in dem verschiedene Konzepte zur Regelung der Kaskade (Zu- und Abschalten der Kessel, Leistungsregelung, automatische Entaschung etc.) simuliert werden können. Bei der Wärmeabnahme wird ein dynamischer Wärmeleistungsbedarf eines einzelnen Wärmeabnehmers oder eines ganzen Wärmenetzes vorgegeben, der ein ganzes Jahr abbilden kann. Der Regler erfasst die zeitliche Veränderung des Speicherladezustands über eine beliebige Anzahl gleichmäßig über den Wärmespeicher verteilter Temperaturfühler und versucht den Speicherladezustand über das Zu- und Abschalten und über die Leistungsmodulation der Kessel konstant zu halten. Der Wärmespeicher soll dabei kurzfristige Unterschiede zwischen dem Wärmeleistungsbedarf und der Wärmeleistungsproduktion ausgleichen.

Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf Kaskadenanlagen, also auf Anlagen mit drei oder mehr Holzkesseln. Das Modell kann jedoch auch auf Anlagen mit einem oder mit zwei Holzkesseln angewendet werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das Modell bzw. die Zu- und Abschaltbedingungen nicht für Anlagen mit einem oder zwei Holzkesseln optimiert wurden.

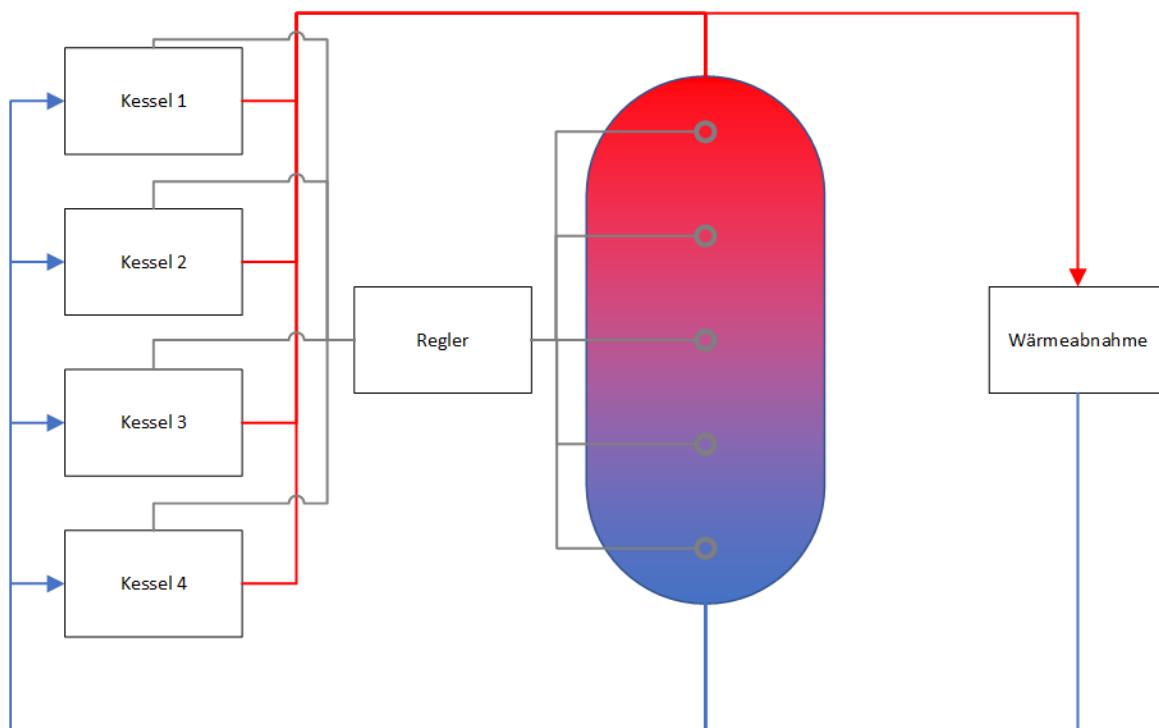


Bild 13 Fliessbild des Modells.
 Blaue Linien: Rücklaufleitungen mit tiefer Temperatur.
 Rote Linien: Vorlaufleitungen mit hoher Temperatur.
 Graue Linien: Signale der Temperaturmessung im Wärmespeicher und Stellsignale des Reglers an die Kessel.

4.2.2. Funktion des Wärmespeichers

Basis des Modells bildet die Energiebilanz über den Wärmespeicher. Die gespeicherte Wärme Q_S wird genutzt, um temporäre Unterschiede zwischen der zugeführten Wärmeleistung der Kessel \dot{Q}_K und des abgegebenen Wärmeleistungsbedarfs des Wärmenetzes \dot{Q}_{BN} auszugleichen.

$$\frac{\partial Q_S}{\partial t} = \dot{Q}_K - \dot{Q}_{BN}$$

Die von den Holzkesseln zugeführte Wärmeleistung entspricht der Summe aller Kesselleistungen.

$$\dot{Q}_K = \sum_{i=1}^{n_K} \dot{Q}_{K,i}$$

Die im Wärmespeicher gespeicherte Wärmemenge wird durch die Speicherkapazität $Q_{S,nenn}$ begrenzt.

$$0 \leq Q_S \leq Q_{S,nenn}$$

Die Speicherkapazität wird anhand einer Zeitkonstante τ_S angegeben, die das Verhältnis der Speicherkapazität zur Summe der installierten Kesselleistungen $\dot{Q}_{K,nenn,i}$ angibt.

$$Q_{S,nenn} = \tau_S \cdot \sum_{i=1}^{n_K} \dot{Q}_{K,nenn,i}$$

Beim Erreichen der oberen Grenze (Speicher voll) müssen die Kessel abgeschaltet werden, um eine Überhitzung des Speichers und der Kessel zu verhindern. Beim Erreichen der unteren Grenze (Speicher leer) kann der Speicher keine Wärmeleistung zur Deckung des Wärmeleistungsbedarfs bereitstellen. Ist der Wärmeleistungsbedarf bei leerem Speicher höher als die zugeführte Kesselleistung, entsteht ein Wärmemanko, das möglichst schnell gedeckt werden soll. Im Modell wird das Wärmemanko berücksichtigt, indem zwischen dem Wärmeleistungsbedarf der Verbraucher \dot{Q}_B und dem Wärmeleistungsbedarf des Netzes \dot{Q}_{BN} unterschieden wird. Der Wärmeleistungsbedarf der Verbraucher ist unabhängig vom Betrieb des Heizwerks. Der Wärmeleistungsbedarf des Wärmenetzes hingegen berücksichtigt ungedeckten Wärmeleistungsbedarf der Vergangenheit.

$$\dot{Q}_{BN} = \dot{Q}_{BN} + \dot{Q}_K - \frac{\partial Q_S}{\partial t} - \dot{Q}_B$$

Das Modell bildet einen Schichtspeicher ab. Beim Laden des Schichtspeichers fliesst warmes Wasser mit der Kesselvorlauftemperatur T_{VL} von oben in den Speicher, während kaltes Wasser mit der Netzrücklauftemperatur T_{RL} den Speicher unten verlässt. Die Entladung verläuft vice versa. Es bildet sich eine warme Schicht oben im Speicher, eine kalte Schicht unten und eine Sprungschicht dazwischen. In der Sprungschicht sinkt die Temperatur von oben nach unten von der Vor- auf die Rücklauftemperatur. Der Verlauf der Speichertemperatur T_S über die Speicherhöhe h_s wird anhand einer Bézierskurve berechnet (Bild 14). Das Temperaturprofil kann mit der Sprungschichtbreite Δh und dem Einstellungsfaktor f_{bezier} auf einen bestimmten Speichertank angepasst werden. Die Auflösung des Temperaturprofils ist durch die Auflösung der Laufvariablen γ bestimmt.

$$\begin{aligned} T_{S,\gamma} &= [(1-\gamma)^3 + 3 \cdot (1-\gamma)^2 \cdot \gamma] \cdot T_{RL} + [3 \cdot (1-\gamma) \cdot \gamma^2 + \gamma^3] \cdot T_{VL} \\ h_{S,\gamma} &= (1-\gamma)^3 \cdot h_1 + 3 \cdot (1-\gamma)^2 \cdot \gamma \cdot h_2 + 3 \cdot (1-\gamma) \cdot \gamma^2 \cdot h_3 + \gamma^3 \cdot h_4 \\ h_1 &= f_s - \frac{\Delta h}{2} \\ h_2 &= f_s - \frac{\Delta h}{2} + f_{bezier} \cdot \Delta h \\ h_3 &= f_s + \frac{\Delta h}{2} - f_{bezier} \cdot \Delta h \\ h_4 &= f_s + \frac{\Delta h}{2} \\ 0 &\leq \gamma \leq 1 \end{aligned}$$

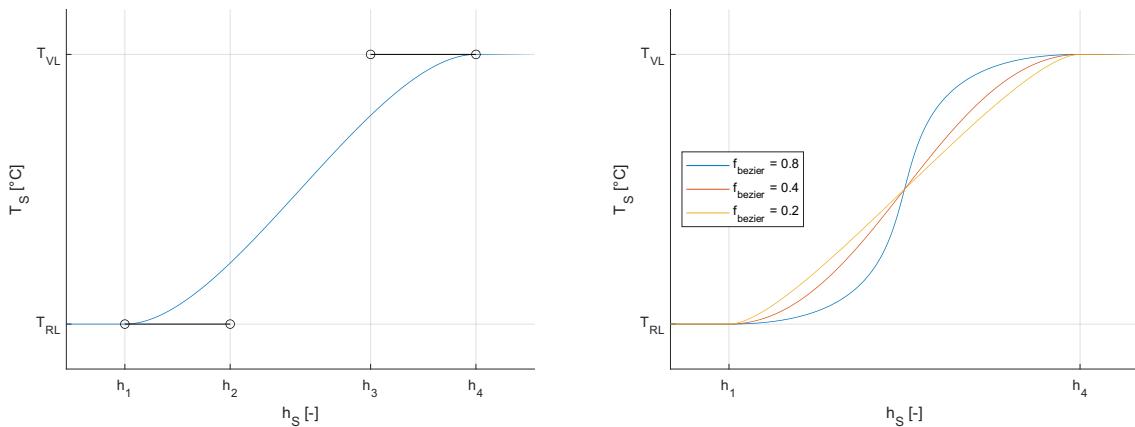


Bild 14 Modellierung des Temperaturverlaufs in der Sprungschicht anhand von Bézierskurven.

4.2.3. Funktion Regelsystem

Das Regelsystem besteht aus zwei Regelkreisen (Bild 15). Der äussere Regelkreis (Kaskadenregelung) beschäftigt sich mit dem Zu- und Abschalten der Kessel und dem Einleiten der Entaschungen. Der innere Regelkreis (Leistungsregelung) regelt die Wärmeleistungen der Kessel im Betriebszustand. Die Kaskadenregelung erteilt der Leistungsregelung eine Betriebsvorgabe. Die Betriebsvorgabe definiert, welche Kessel in Betrieb sind und welche Kessel zu- oder ausgeschaltet werden sollen.

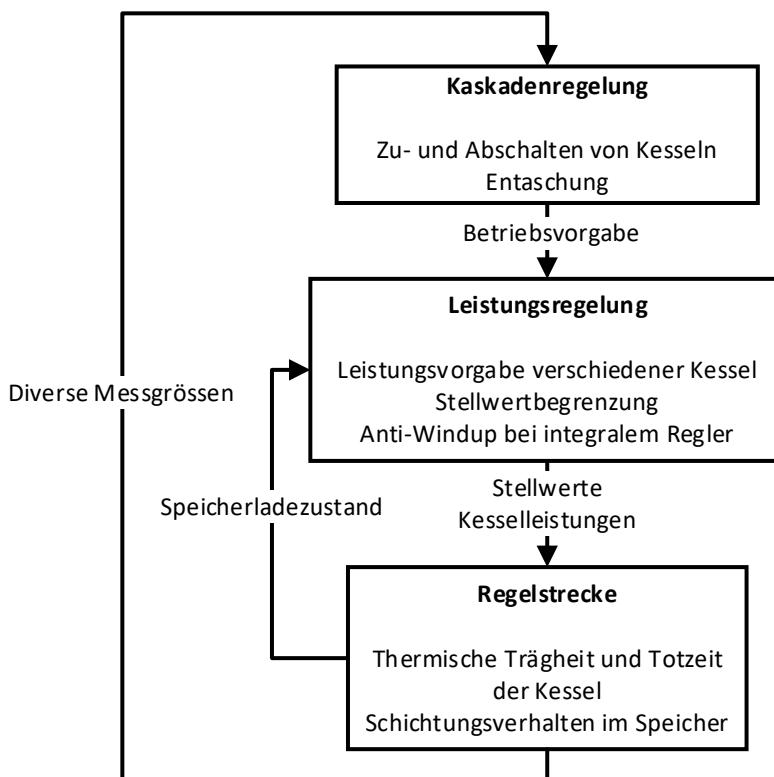


Bild 15 Aufbau des Regelsystems.

4.2.4. Kaskadenregelung

Variante 1

Im Modell wurden unterschiedliche Varianten der Kaskadenregelungen implementiert. Die erste Variante basiert auf individuellen Zu- und Abschaltbedingungen. Die Zuschaltbedingungen wurden mit der folgenden Formel berechnet und sind in *Tabelle 14* dargestellt. Die Abschaltbedingungen basieren auf Erfahrungswerten aus dem Praxisteil und sind in der *Tabelle 15* dargestellt.

$$f_{S,zu,i} = 1 - \frac{i}{n_K + 1}$$

Tabelle 14 Variante 1: Individuelle Zuschaltbedingungen bezogen auf den Speicherladezustand.

	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4
1-Kessel-Anlage	50 %			
2-Kessel-Anlage	67 %	33 %		
3-Kessel Anlage	75 %	50 %	25 %	
4-Kessel-Anlage	80 %	60 %	40 %	20 %

Tabelle 15 Variante 1: Individuelle Abschaltbedingungen bezogen auf den Speicherladezustand.

	Kessel 1	Kessel 2	Kessel 3	Kessel 4
1-Kessel-Anlage	100 %			
2-Kessel-Anlage	100 %	90 %		
3-Kessel-Anlage	100 %	90 %	80 %	
4-Kessel-Anlage	100 %	90 %	80 %	70 %

Variante 2

Die zweite Variante der Kaskadenregelung berücksichtigt das Regelverhalten der Anlage während der letzten 12 Stunden. Die Zu- und Abschaltbedingungen sind abhängig von der Abweichung der aktuellen Anzahl in Betrieb stehender Kessel $n_{aktuell}$ zu der während den letzten 12 Stunden durchschnittlich in Betrieb gestandenen Anzahl Kessel n_{12h} . Die Zahl n_{12h} ist auf die nächste ganze Zahl zu runden, darf aber nicht kleiner als eins sein.

$$n_{12h} = \frac{\int_{t-12h}^t n_{aktuell} dt}{12h}$$

Aus der Differenz zwischen der aktuellen und der über 12 Stunden gemittelten Anzahl in Betrieb stehender Kessel und dem jeweiligen Speicherladezustand ergeben sich die in *Tabelle 16* aufgeführten Zu- und Abschaltbedingungen (siehe auch Kapitel 5.1.4.7).

Tabelle 16 Variante 2: Zu- und Abschaltbedingungen bezogen auf den Speicherladezustand

Zuschaltbedingung bei Speicherladezustand	Abschaltbedingung bei Speicherladezustand
$n_{aktuell} < n_{12h}$	$n_{aktuell} = 1$ 100 %
$n_{aktuell} = n_{12h}$	$n_{aktuell} = 2$ 90 %
$n_{aktuell} > n_{12h}$	$n_{aktuell} \geq 3$ 75 %

Variante 3

Die dritte Variante der Kaskadenregelung berücksichtigt den Speicherladezustand und die zeitliche Veränderung des Speicherladezustands in einem Proportional-Differential-Regler (PD-Regler). Der Proportionalteil P wird aus der Abweichung zwischen dem Speicherladezustand f_S und dessen Sollwert $f_{S,soll}$ berechnet. Der Differentialteil D entspricht der Veränderung des Speicherladezustands während

den letzten 30 Minuten. Der Proportional- und Differentialteil werden zur Entscheidungsvariablen PD verrechnet.

$$P = f_{s,soll} - f_s$$

$$D = f_s(t - 30 \text{ Min}) - f_s(t)$$

$$PD = P + 2 \cdot D$$

Zur Vermeidung von Mehrfachzuschaltungen werden Wartezeiten eingeführt, innerhalb derer keine Zu- bzw. Abschaltungen erfolgen. Die Zeitintervalle Δt_{zu} und Δt_{ab} entsprechen der Zeitdauer, die seit dem letzten Zu- bzw. Abschalten eines Kessels verstrichen ist. Die daraus resultierenden Zu- und Abschaltbedingungen sind in *Tabelle 17* aufgeführt.

Tabelle 17 Variante 3: Zu- und Abschaltbedingungen bezogen auf den Speicherladezustand

Zuschaltbedingung		Abschaltbedingung	
$\Delta t_{zu} \geq 30 \text{ Min}$	$PD \geq 60 \%$	$\Delta t_{ab} \geq 30 \text{ Min}$	$PD \leq -30 \%$
$\Delta t_{zu} \geq 60 \text{ Min}$	$PD \geq 30 \%$	$n_{aktuell} = 1$	$f_s = 100 \%$

Rostentaschung

Alle drei Varianten der Kaskadenregelungen leiten eine Kesselentaschung ein, sobald die Laufzeit des jeweiligen Kessels das Entaschungsintervall Δt_{ent} übersteigt.

Alternierung der Kessel

Eine Alternierung der Startreihenfolge der Kessel wird im Modell nicht nachgebildet.

4.2.5. Leistungsregelung

Die Leistungsregelung gibt den Kesseln den Stellwert für die Kesselleistung vor und berücksichtigt dabei die Betriebsvorgabe der Kaskadenregelung. Ein PI-Regler regelt den Speicherladezustand auf einen konstanten Sollwert. Er berechnet den Stellwert der Leistungsvorgabe über die Veränderung des Speicherladezustands. Da der Leistungsbereich bzw. der Modulationsbereich der Kesselleistung beschränkt ist, folgt dem PI-Regler eine Stellwertbegrenzung. Zusätzlich erfolgt eine Anti-Windup Korrektur des Integralteils [7]. Der Stellwert für die Kesselleistungen bezieht sich auf alle Kessel, die sich momentan im Betrieb befinden. Die geforderte Kesselleistung wird gleichmäßig auf diese Kessel aufgeteilt.

$$\dot{Q}_{K,min,i} \leq \dot{Q}_{K,i} \leq \dot{Q}_{K,nenn,i}$$

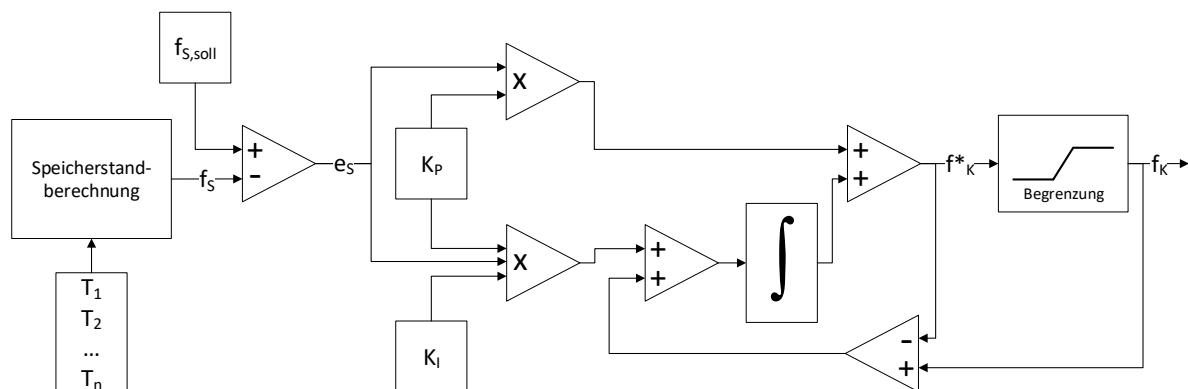


Bild 16 Aufbau des PI-Reglers für die Leistungsregelung der Kessel mit Stellwertbegrenzung und Anti-Windup Korrektur.

4.2.6. Regelstrecke

Thermische Trägheit und Totzeit der Kessel

Für das Zuschalten eines Kessels wird eine Totzeit von 15 Minuten vorgesehen. Während dieser Totzeit bereitet sich der Kessel auf das Zünden des Brennstoffs vor. Nach dem Zünden wird eine Anlaufdauer von weiteren 15 Minuten für das Hochfahren des Kessels auf Nennleistung angenommen. Das Abschalten eines Kessels erfolgt unverzögert, also ohne Totzeit. Auch hier wird für das Abfahren des Kessels eine Abfahrdauer von 15 Minuten angenommen. Die Annahmen wurden aus den Praxisuntersuchungen übernommen (siehe Kapitel 5.1.2.2).

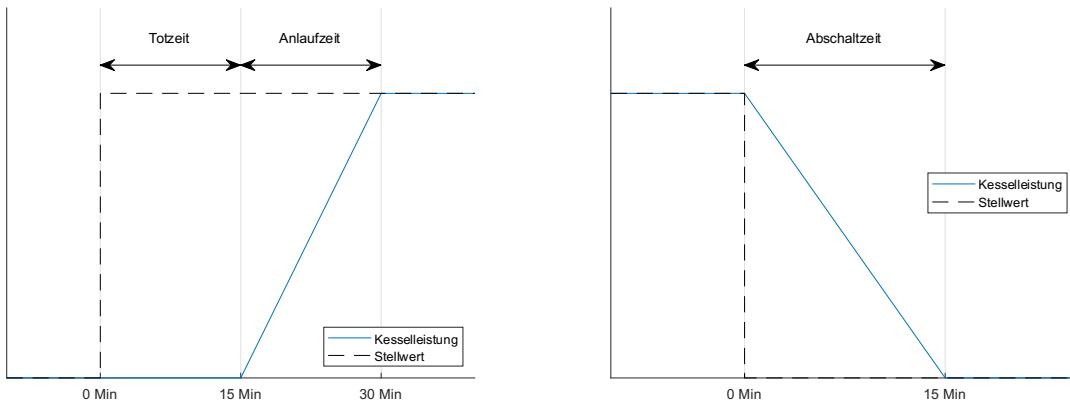


Bild 17 Kesseldynamik bei einer Zu- oder Abschaltung eines Kessels.

Speicherladezustand

Der Speicherladezustand f_S wird anhand von Temperaturmessungen T_S im Speicher berechnet. Die Temperatursensoren sind gleichmäßig über der Speicherhöhe verteilt. Für die Berechnung des Speicherladezustands wird eine untere und eine obere Referenztemperatur für Fühler kalt T_{kalt} und Fühler warm T_{warm} eingeführt. Temperaturwerte über T_{warm} und unter T_{kalt} werden auf die Referenztemperaturen T_{warm} und T_{kalt} gesetzt. Die Anzahl Temperaturfühler und die Referenztemperaturen sind in Tabelle 18 aufgeführt.

$$f_S(t) = \frac{\sum_i^{n_T} \frac{T_{S,i}(t) - T_{kalt}}{T_{warm} - T_{kalt}}}{n_T}$$

Tabelle 18 Kennwerte für die Berechnung des Speicherladezustands.

Anzahl Temperaturfühler	n_T	5
Referenztemperatur Fühler kalt	T_{kalt}	60 °C
Referenztemperatur Fühler warm	T_{warm}	80 °C

4.2.7. Wärmeleistungsbedarf

Für eine realistische Simulation der Dynamik von Kesselkaskaden werden Lastprofile benötigt, die den zeitlichen Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs von typischen Verbrauchern repräsentieren. Die Lastprofile sollen sowohl saisonale als auch tageszeitliche Schwankungen des Wärmeleistungsbedarfs berücksichtigen.

Die Berechnung des Wärmeleistungsbedarfs basiert auf gemessenen Tageslastprofilen, die im Fernwärmennetz in Schachen im Jahr 2021 gemessen wurden. Vier Tageslastprofile sind als Beispiel in Bild 18 dargestellt. Das Fernwärmennetz dient hauptsächlich zur Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser. Die Lastprofile zeigen unter anderem stark ausgeprägte Lastspitzen vor 6:00 h und vor 18:00 h, die durch die Bereitstellung von Warmwasser entstehen. Das als Beispiel ausgewählte Fernwärmennetz stellt somit hohe Anforderungen an die Kaskaden- und Leistungsregelung der Wärmeerzeugung.

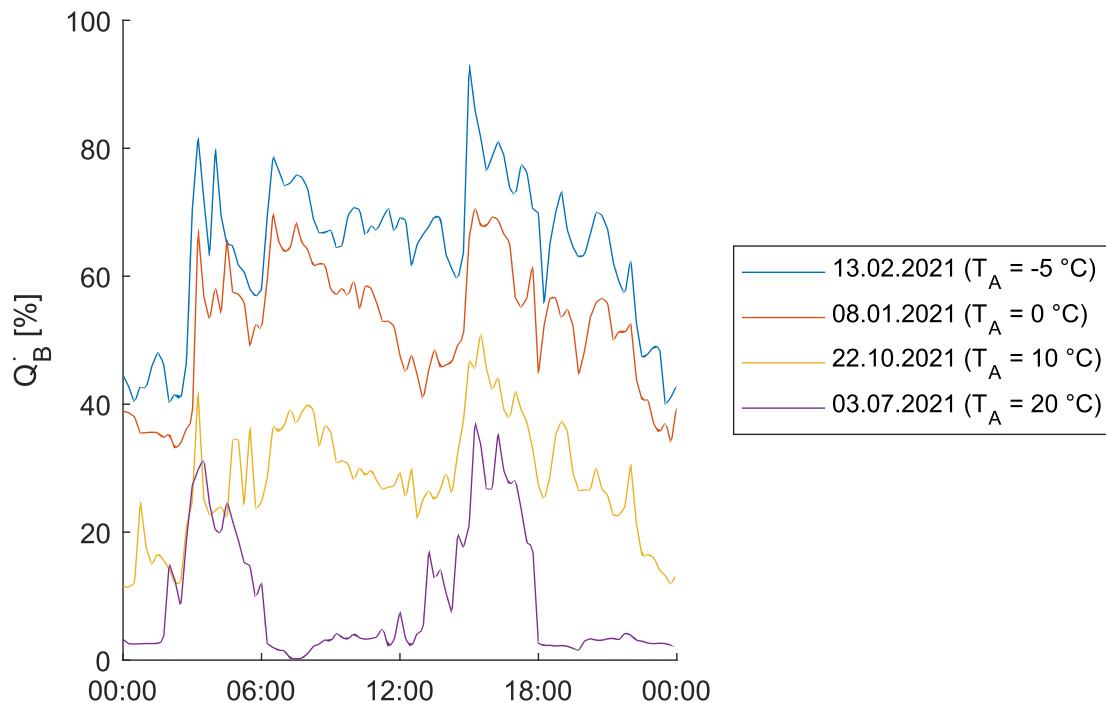


Bild 18 Gemessene Tageslastprofile zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs des Wärmeleistungsbedarfs.

Die Modellierung untersucht das ganzjährige Verhalten einer Wärmebereitstellung mit einem oder mehreren Holzkesseln. Somit wird ein Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs ab Heizzentrale (Wärmeabnehmer plus Wärmeverteilverluste) über ein ganzes Jahr benötigt. Mit der folgend beschriebenen Methode wird der Wärmeleistungsbedarf an jedem Tag eines Jahres aus den gemessenen Tageslastprofilen und einer Messung der Umgebungstemperatur in der Region des betrachteten Fernwärmennetzes abgeleitet.

Der Zusammenhang zwischen dem Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur und dem mittleren täglichen Wärmeleistungsbedarf wird in Bild 19 dargestellt. Der Wärmeleistungsbedarf wird dabei aufgeteilt in Raumwärme, Warmwasser und Wärmeverteilverluste übereinander gestapelt dargestellt. Der Wärmeleistungsbedarf für Raumwärme und Warmwasser wurde anhand der gemessenen Tageslastgänge berechnet. Die Wärmeverteilverluste \dot{Q}_V wurden anhand der Messdaten aus der Praxisuntersuchung berechnet, indem die Differenz zwischen dem Wärmeleistungsbedarf $\dot{Q}_{B,gemessen}$ für Raumwärme und Warmwasser und den gemessenen Kesselleistungen $\dot{Q}_{K,i,gemessen}$ gebildet und über ein ganzes Jahr gemittelt wurde.

$$\dot{Q}_V = \frac{\int_{t=0h}^{t=8760h} \sum_{i=1}^{i=4} \dot{Q}_{K,i,gemessen} - \dot{Q}_{B,gemessen}}{8760h}$$

Der Wärmeleistungsbedarf wird in Prozent der gesamten installierten Kesselleistung angegeben. Die Auslegung der Kesselleistung wurde gemäss der Situationserfassung von QMH durchgeführt.

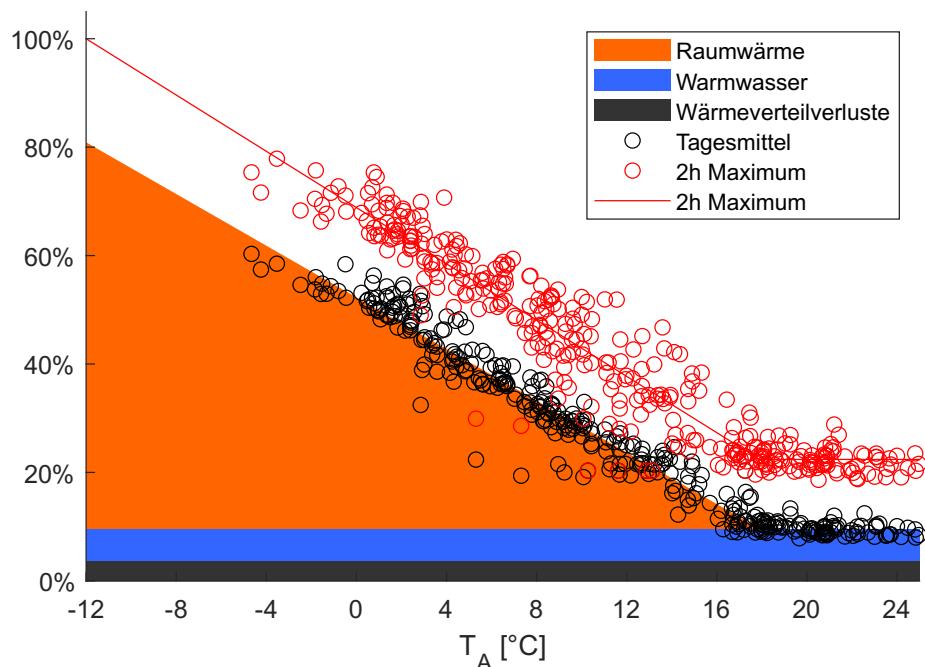


Bild 19 Gestapelte Lastkennlinie des mittleren täglichen Wärmeleistungsbedarfs ab Heizzentrale in Funktion des Tagesmittelwerts der Umgebungstemperatur. Der mittlere tägliche Wärmeleistungsbedarf bezieht sich auf die gesamte installierte Kesselleistung in %. Die markierten Punkte beziehen sich auf die gemessenen täglichen Wärmeleistungsbedarfe.

Bild 20 zeigt die Tagesverläufe des Wärmeleistungsbedarfs für vier beispielhafte Tage mit unterschiedlichem Tagesmittelwert der Umgebungstemperatur. Ein Tagesverlauf entspricht einer Markierung im Bild 19. Bei der Modellierung des Wärmeleistungsbedarfs für ein ganzes Jahr wird an jedem Tag der Tagesverlauf mit der besten Übereinstimmung der mittleren Außentemperatur verwendet.

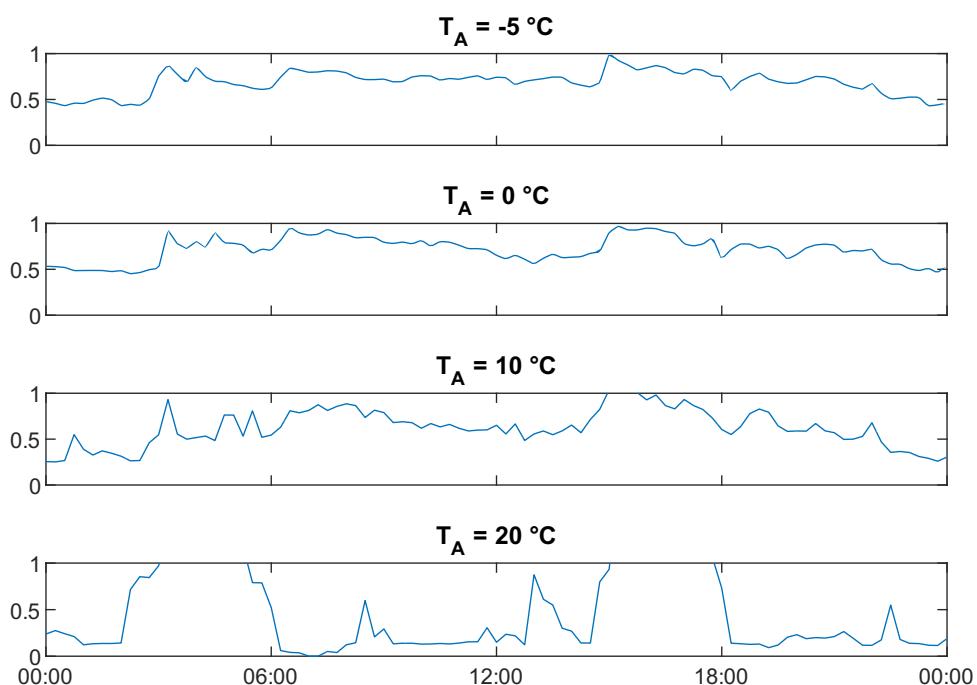


Bild 20 Verlauf des Wärmeleistungsbedarfs ab Heizzentrale bei unterschiedlichen Tagesmitteltemperaturen. Die Tageslastprofile wurden auf den maximalen Wärmeleistungsbedarf an dem betrachteten Tag normiert.

Bild 21 zeigt den aus dem Jahresverlauf der Umgebungstemperatur berechneten Wärmeleistungsbedarf ab Heizzentrale (im Tagesmittel sowie als 2h-Maximalwert und als 2h-Minimalwert), der für die Simulation verwendet wird. Die Umgebungstemperaturen stammen von Meteo Schweiz [8] und repräsentieren einen typischen Jahresverlauf im Schweizer Mittelland.

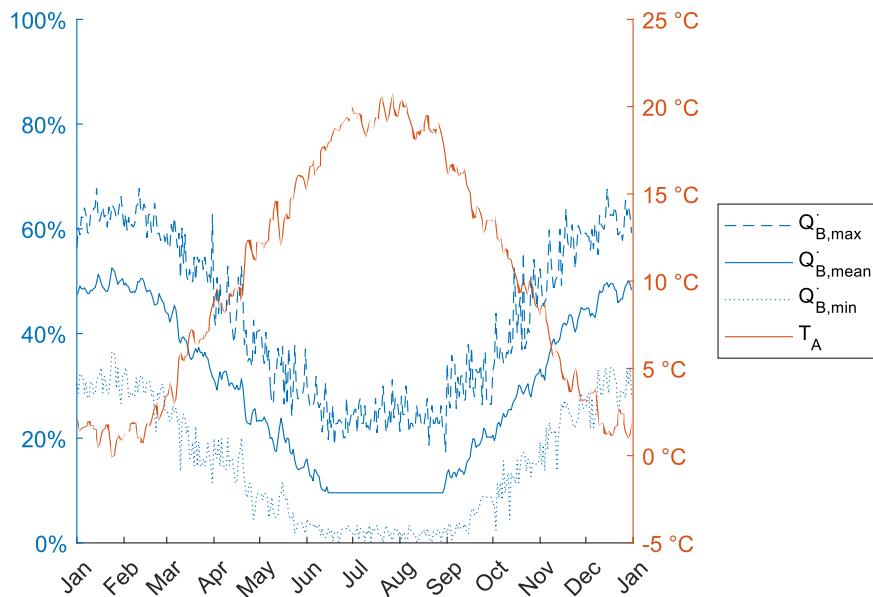


Bild 21 Simulierter Jahresverlauf des Wärmeleistungsbedarfs ab Heizzentrale bei gegebener Tagesmitteltemperatur. Der Wärmeleistungsbedarf bezieht sich auf die gesamte installierte Kesselleistung in %. Die durchgezogene blaue Linie stellt das Tagesmittel des Wärmeleistungsbedarfs dar, während die unterbrochenen Linien das 2-Stunden-Maximum oder -Minimum darstellen.

Aus dem simulierten Jahresverlauf des Wärmeleistungsbedarfs ab Heizzentrale kann eine Jahresdauerlinie berechnet werden, die in Bild 22 dargestellt wird.

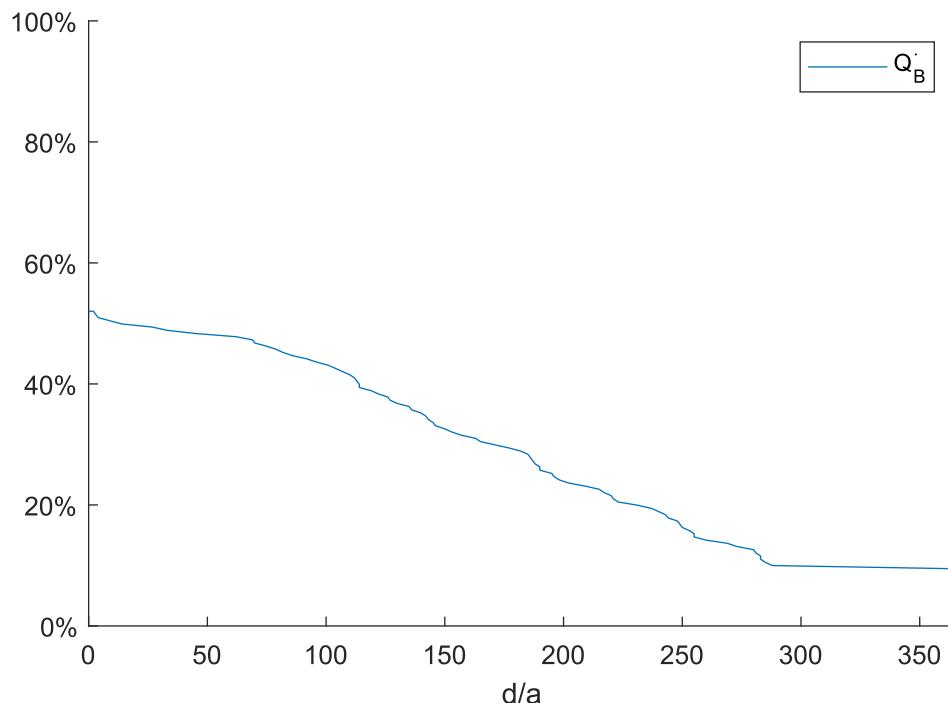


Bild 22 Jahresdauerlinie des Wärmeleistungsbedarfs.

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Teil 1 – Praxisuntersuchung

5.1.1. Wärmespeicher

5.1.1.1. Berechnung des Speicherladezustands

Bei den untersuchten Praxisanlagen erfolgt die Bestimmung des Speicherladezustands über die Berechnung der Speichermittemperatur gemäss der Variante QMHv4 (Tabelle 1). In Abweichung zu den Empfehlungen von QMH wurden dabei jedoch deutlich tiefere Referenztemperaturen für den Speicherladezustand von 0 % (Fühler kalt) gewählt, nämlich im WV Schachen zu Beginn der Untersuchungen 20 °C, in der WUEB Roggwil 30 °C und in der WUEB Schliern 40 °C.

Somit ist der berechnete Speicherladezustand ein Mass dafür, wieviel Wärme noch in den Speicher eingetragen werden kann und nicht dafür, wieviel nutzbare Wärme noch im Speicher verfügbar ist.

Wird die Referenztemperatur für 0 % tiefer als die minimale Rücklauftemperatur der Wärmebezüger gewählt, kann der Speicherladezustand den Wert 0 % gar nicht erreichen, das Minimum des ermittelten Speicherladezustands wird dadurch erhöht (Bild 23). Das mögliche Minimum des Speicherladezustands wird erreicht, wenn die Referenztemperatur für 0 % der Rücklauftemperatur der Wärmebezüger entspricht. Bei einer Rücklauftemperatur der Wärmebezüger von beispielsweise 40 °C bis 50 °C und einer Referenztemperatur von 20 °C für 0 % fällt der Speicherladezustand nie unter 50 %.

Wird die Referenztemperatur für 100 % grösser gewählt als die Vorlauftemperatur der Holzkessel, kann der Speicherladezustand sein Maximum von 100 % nicht erreichen. Wie Bild 23 zeigt, wird im WV Schachen und in der WUEB Schliern während bis zu 15 % der Zeit ein Speicherladezustand von 100 % erreicht. Dies zum einen, weil die Referenztemperatur für 100 % um 2 °C unter der Vorlauftemperatur des Kessels liegt, zum anderen aber auch, weil die Abschaltbedingungen der Holzkessel nahe bei einem Speicherladezustand von 100 % gesetzt sind. In der WUEB Roggwil wird dagegen ein Speicherladezustand von 100 % kaum erreicht, weil die Abschaltbedingungen der Holzkessel weit unter einem Speicherladezustand von 100 % liegen. Um einen Wärmespeicher bestmöglich zu nutzen, sollte der Wertebereich des Speicherladezustands den gesamten Bereich zwischen 0 % und 100 % ausnutzen können, wie das in Kapitel 5.1.1.3 beschrieben wird.

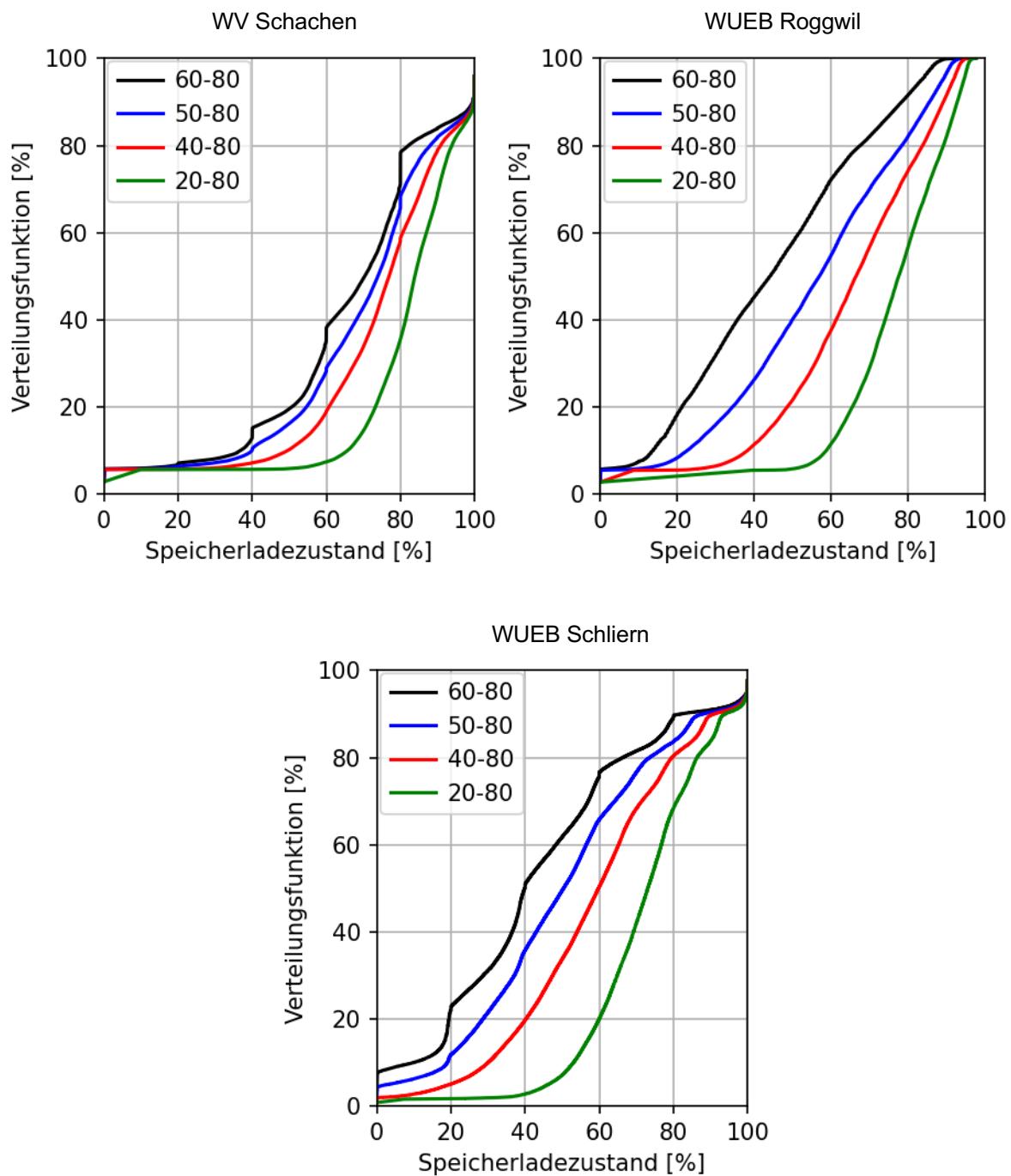
Die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Plateaus im Speicherladezustand durch eine ausgeprägte Temperaturschichtung im Speicher zeigt das ausgewählte Beispiel des WV Schachen in Bild 24. Dies ist sowohl am Verlauf des berechneten Speicherladezustands als auch an den Signalen der Temperaturfühler deutlich erkennbar. Die Lage dieser Plateaus, also bei welchem Speicherladezustand sie auftreten, wird hauptsächlich durch die Referenztemperaturen für 0 % und für 100 % sowie der Rücklauftemperatur der Wärmebezüger beeinflusst.

Der Vergleich zwischen den mit Referenztemperaturen für 0 % von 40 °C (schwarze Linien in Bild 24) und von 60 °C (schwarz gestrichelt in Bild 24) ermittelten Verläufen des Speicherladezustands zeigt deutliche Unterschiede. Während mit der Referenztemperatur für 0 % von 60 °C die Plateaus deutlich erkennbar sind, wird der Verlauf des Speicherladezustands mit der Referenztemperatur für 0 % von 40 °C stärker geglättet. Diese Glättung des Signals des Speicherladezustands bei tieferer Referenztemperatur zeigt auch die Verteilungsfunktion in Bild 23. In der WUEB Roggwil treten im Speicher offenbar keine ausgeprägten Sprungschichten auf, denn es sind keine ausgeprägten Plateaus im Speicherladezustand erkennbar.

Der Nachteil einer tiefen Referenztemperatur für 0 % ist der hohe Einfluss der Rücklauftemperatur auf den ermittelten Speicherladezustand, Bild 24 zeigt dies beispielhaft. Um 3:45 Uhr sinkt die Temperatur des obersten Temperaturfühlers 1, der Speicherladezustand muss deshalb ebenfalls sinken. Der Speicherladezustand berechnet mit einer hohen Referenztemperatur für 0 % von 60 °C (schwarze Linie in Bild 24 oben) sinkt wie erwartet ab. Der Speicherladezustand berechnet mit einer tiefen Referenztemperatur für 0 % von 40 °C (schwarz gestrichelte Linie in Bild 24 oben) sinkt jedoch nicht ab, weil zum gleichen Zeitpunkt die Rücklauftemperatur des Fernwärmnetzes ansteigt und dadurch das Absinken des Speicherladezustands verhindert.

Weil eine Erhöhung der Referenztemperatur für 0 % einen hohen Einfluss hat auf den berechneten Wert des Speicherladezustands hat und die Amplitude des Signals des Speicherladezustands vergrössert, hat sie auch Auswirkungen auf viele andere Elemente des Regelkonzepts wie die Zu- und Abschaltbedingungen, den Schwellenwert zur Freigabe der Leistungsmodulation oder den Sollwert des Speicherladezustands zur Regelung der Kesselleistung. Bei einer Änderung der Referenztemperatur

für 0 % müssen die anderen Elemente des Regelkonzepts ebenfalls sinngemäss angepasst werden. Erfolgt diese Abstimmung nicht ausreichend, kann es zu ungewollten Instabilitäten im Regelsystem führen, wie z.B. dass die Kesselleistung in kurzer Folge zwischen 100 % und 50 % pendelt (Bild 25).



*Bild 23 Verteilungsfunktion des berechneten Speicherladezustands mit Referenztemperaturen für kalt bzw. 0 % von 20, 40, 50 und 60 °C. Die Referenztemperatur für warm bzw. 100 % wurde bei allen Berechnungen mit 80 °C gewählt. Berechnet wurde die Speichermittestemperatur (MT).
Oben links: Daten des WV Schachen.
Oben rechts: Daten der WUEB Roggwil.
Unten: Daten der WUEB Schliern.*

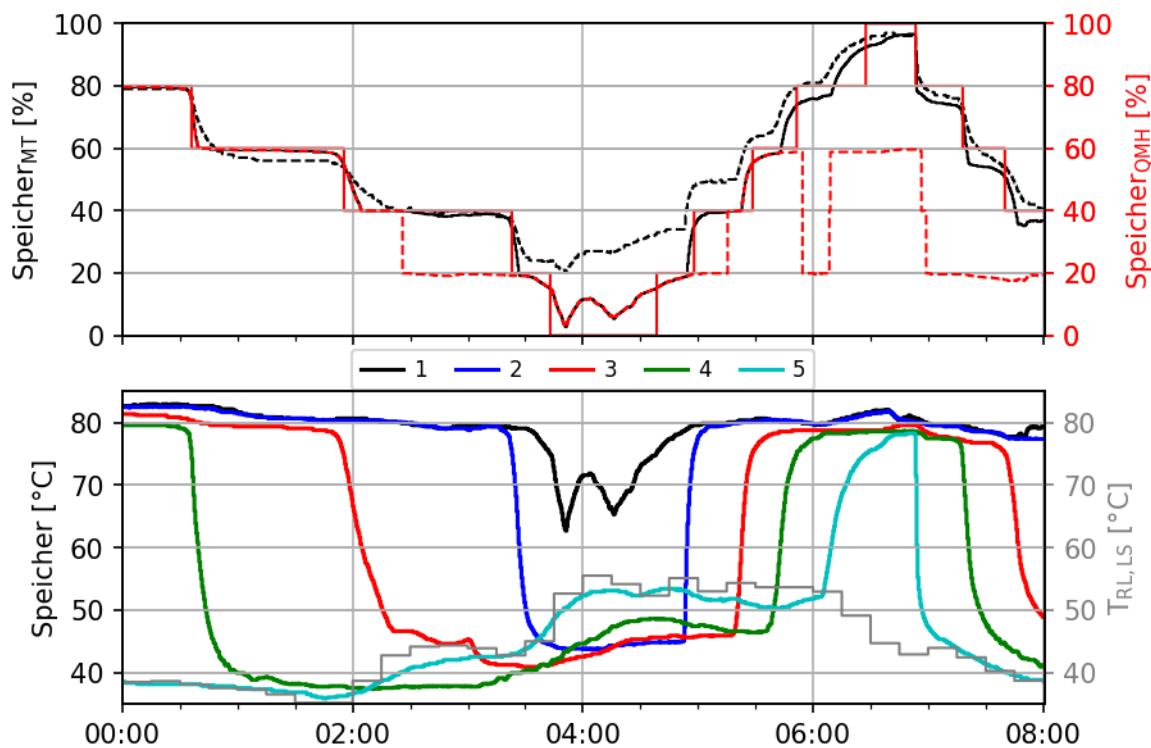


Bild 24 Vergleich der Methoden zur Bestimmung des Speicherladezustands anhand von Betriebsdaten des VW Schachen vom 8.4.2021.
 Oben, Skala links: Speicherladezustand nach der Speichermitteltemperatur (MT) mit Referenztemperaturen 60-80°C (schwarze Linie) und 40-80°C (schwarz gestrichelt).
 Oben, Skala rechts: Speicherladezustand nach QMH Variante 1 (rote Linie) und Variante 3 (rot gestrichelt).
 Unten, Skala links: Verlauf der fünf Temperaturfühler in den drei Speichern.
 Unten, Skala rechts: Rücklauftemperatur des Wärmenetzes ($T_{RL,LS}$).

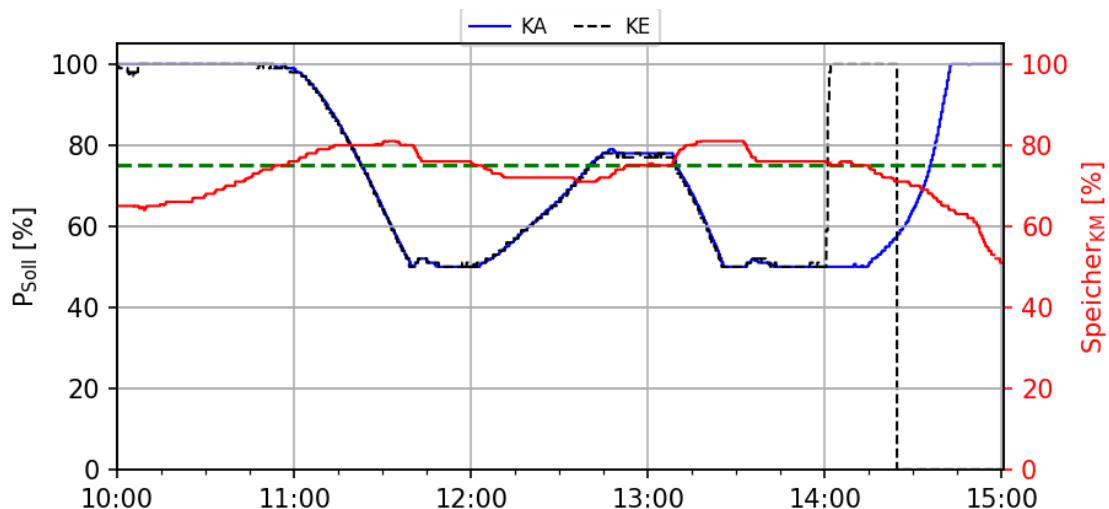


Bild 25 Reaktion der Regelung für den Sollwert der Leistungsvorgabe für die Kessel in Vergleich zum vom Kessel ermittelten Speicherladezustand im WV Schachen am 2.11.2021.
 Grün gestrichelt: Schwellenwert für den Beginn der Leistungsmodulation.
 Blau: Sollwert der Kesselleistung von Kessel A
 Schwarz gestrichelt: Sollwert der Kesselleistung von Kessel E
 Rot: Sollwert der Kesselleistung von Kessel A
 Rot: Speicherladezustand nach der Speichermitteltemperatur (MT) mit Referenztemperaturen 40-80°C

5.1.1.2. Speicherladezustand als Zuschaltkriterium für Kessel in der Kaskade

Zur Regelung des Sollwerts für die Leistung der Kessel und als Kriterium für das Abschalten eines Kessels ist relevant, wieviel Energie im Speicher gespeichert ist bzw. wieviel Energie noch in den Speicher geladen werden kann. Aus dieser Betrachtungsweise ist die Verwendung einer tiefen Referenztemperatur für 0 % bei der Berechnung des Speicherladezustands sinnvoll. Ein Speicherladezustand grösser null kann bei dieser Betrachtungsweise aber nicht sicherstellen, dass immer ausreichend Energie auf einem für die Wärmeabnehmer nutzbaren Temperaturniveau bezogen werden kann.

Damit für die Wärmebezüger immer ausreichend Energie auf einem nutzbaren Temperaturniveau zur Verfügung steht, muss eine Mindestvorlauftemperatur im Fernwärmennetz sichergestellt werden. Die Vorlauftemperatur zum Wärmenetz ergibt sich aus den Volumenströmen und den Temperaturen auf Seite der Wärmeproduktion aller Holzkessel und auf Seite des Fernwärmennetzes. Die Differenz der Volumenströme bestimmt, in welchem Verhältnis sich die Vorlauftemperatur der Holzkessel und die Temperatur zuoberst im Speicher mischen. Aus diesem Grund darf die Temperatur oben im Speicher nur wenig unter den Sollwert für die Vorlauftemperatur des Fernwärmennetzes absinken.

Als Kriterium für das Zuschalten eines Holzkessels in einer Kaskade ist somit das nutzbare Volumen des Speichers mit einer genügend hohen Temperatur relevant. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, verwendet die Variante 1 von QMH deshalb eine Referenztemperatur von 70 °C mit einer Hysterese von ± 5 K um dies möglichst abzubilden.

Bild 26 zeigt für die drei untersuchten Anlagen einen Vergleich zwischen dem Speicherladezustand berechnet nach QMH Variante 1 und einem Speicherladezustand ermittelt nach der Methode der Speichermittemperatur (Methode MT) mit einer Referenztemperatur für 0 % von 40 °C und von 60 °C. Bei einer Referenztemperatur für 0 % von 40 °C (Bild 26, Diagramme links) ist bei allen drei Anlagen bei einem scheinbar ausreichenden Speicherladezustand von 40 % bis 50 % damit zu rechnen, dass nur noch wenig Energie an die Wärmebezüger abgegeben werden kann, weil das für sie nutzbare Speichervolumen berechnet nach QMH Variante 1 bereits unter 20 % gesunken ist.

Die linken Diagramme in Bild 26 zeigen außerdem, dass mit einer tiefen Referenztemperatur für 0 % das nutzbare Speichervolumen nur ungenügend abgeschätzt werden kann, da es erhebliche Überschneidungen der Bereiche des Speicherladezustands gibt. Weil aber noch tiefere Referenztemperaturen für 0 % verwendet werden, sind die negativen Effekte noch grösser. Wenn die Referenztemperatur für 0 % nicht angehoben wird, sollte deshalb zumindest ein anderes Kriterium für das Zuschalten der Holzkessel verwendet werden. Dies kann zum Beispiel der Speicherladezustand berechnet nach Variante 1 QMH sein.

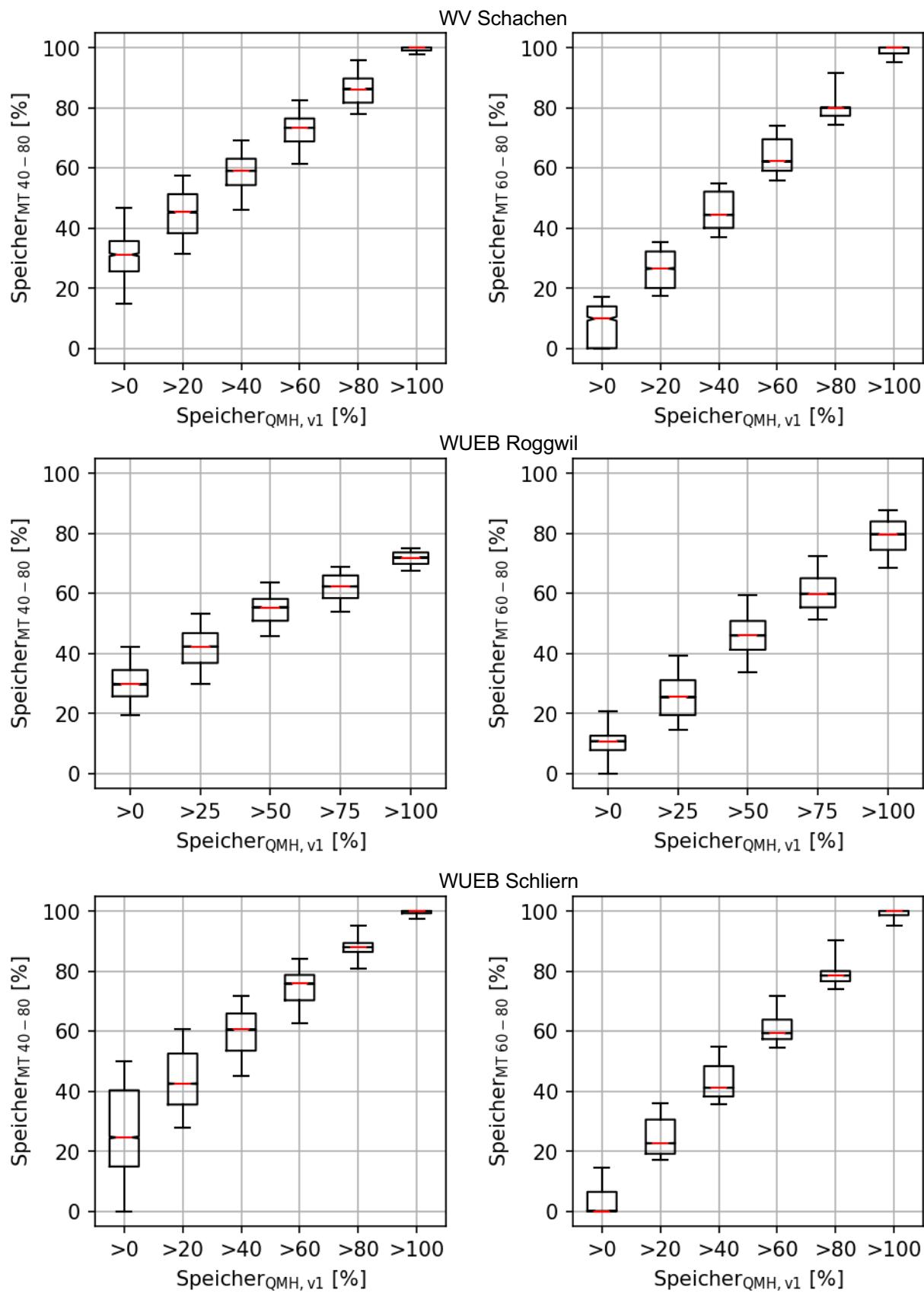


Bild 26 Speicherladezustand nach der Methode MT mit unterschiedlichen Referenztemperaturen in Funktion des stufigen Speicherladezustands nach QMH Variante 1.
 Links: Speicherladezustand berechnet mit Referenztemperaturen 40 °C bis 80 °C.
 Rechts: Speicherladezustand berechnet mit Referenztemperaturen 60 °C bis 80 °C gemäss Empfehlungen QMH.
 Ausgewertet wurden Mittelwerte über fünf Minuten. Dargestellt sind q5, q25, q50, q75 und q95.
 Oben: WV Schachen / Mitte: WUEB Roggwil (4 Temperaturfühler) / Unten: WV Schliern.

5.1.1.3. Erkenntnisse zum Wärmespeicher

Die Referenztemperatur für 100 % sollte der Vorlauftemperatur der Kessel entsprechen oder ganz wenig darunter liegen. Damit kann auch der oberste Teil des Speichers für die Regelung der Wärmeerzeuger genutzt werden.

Die von QMH empfohlenen Referenztemperatur für 0 % von 60 °C ist ein Kompromiss zwischen einem geglätteten Signal für eine gute Regelung des Sollwerts für die Leistungsvorgabe der Kessel und einer verlässlichen Information über das für die Wärmebezüger nutzbare Speichervolumen. Mit einer tiefen Referenztemperatur für 0 % entsprechend der Standard-Vorgabe der Hersteller von beispielsweise 30 °C sinkt der ausgewiesene Speicherladezustand dagegen kaum unter 50 % und suggeriert eine nicht nutzbare Reserve.

Gegenüber den in [6] beschriebenen Varianten zur Bestimmung des Speicherladezustands ermöglicht die in Tabelle 1 in Kapitel 2.2.1 beschriebene Methode (MT) eines pro Fühler ermittelten Speicherladezustands mit den von QMH empfohlenen Bezugstemperaturen von 60 °C und 80 °C eine bessere Glättung und gegenüber Variante 3 von QMH weniger grosse Abweichungen zum tatsächlich nutzbaren Speichervolumen.

Wird diese Referenztemperatur für 0 % von 60 °C weiter gesenkt, kann eine bessere Glättung des Signals für den Leistungsregler erzielt werden. Mit sinkender Referenztemperatur sinkt aber auch die Verlässlichkeit des Speicherladezustands als Signal für das Zuschalten von Kesseln in einer Kaskade, weil das nutzbare Speichervolumen nicht mehr zuverlässig angezeigt wird.

Wenn der Speicherladezustand als Kriterium für die Zuschaltung von Kesseln in der Kaskade verwendet wird, soll die Referenztemperatur für 0 % nicht unter der maximalen Rücklauftemperatur des Wärmenetzes liegen. Ansonsten ist das Verhalten der Kaskade kaum vorhersehbar. Bei den drei Praxisanlagen war die Rücklauftemperatur des Wärmenetzes immer dann am höchsten, wenn die Boiler der Bezüger fast durchgeladen waren.

Bei einer Erhöhung der Referenztemperatur für 0 % von der Standard-Vorgabe der Hersteller auf die von QMH empfohlenen 60 °C muss deren Einfluss auf alle anderen Einstellungsparameter des Regelungskonzepts der Kaskade (Zu- und Abschaltbedingungen, Freigabe der Leistungsmodulation, Leistungsregelung der Kessel) beachtet werden. Ist eine Erhöhung der Referenztemperatur nicht erwünscht, ist die Verwendung eines zusätzlichen Kriteriums, z.B. der Speicherladezustand nach QMH Variante 1, in Betracht zu ziehen, um sowohl eine gute Leistungsregelung als auch eine gute Funktion der Kaskade zu ermöglichen. Dies wäre gleichbedeutend wie die direkte Verwendung der einzelnen Temperaturfühler im Wärmespeicher als Zuschaltkriterium für die einzelnen Kessel.

Die Plateaus im Signal des Speicherladezustands sind für allfällige Zuschaltkriterien einer Kaskade zu beachten.

5.1.2. Eigenschaften der Holzkessel

5.1.2.1. Sprungantwort von Holzfeuerungen in massiver, industrieller Bauweise

Kaskaden mit Feuerungen im Leistungsbereich grösser 500 kW verfügen oft über einen Unterschub- oder Vorschubrost. Solche Feuerungen weisen meist eine massive Bauweise mit entsprechend grosser Wärmeträger auf und sie können kontinuierlich betrieben werden, das heisst ohne Unterbrüche für eine automatische Entaschung. Bei Schwachlastbetrieb können Betriebsphasen im Standby bzw. mit Glutbetterhalt auftreten. Dank des Primärluft-Ventilators können diese Feuerungen forciert aus dem Standby angefahren werden. Bild 27 zeigt, dass die Nennleistung von 2.5 MW nach einer mehrstündigen Standby-Phase innerhalb von 30 Minuten erreicht wird.

Durch einen breiten Bereich der Leistungsmodulation können solche Feuerungen weitgehend auf Änderungen im Wärmeleistungsbedarf reagieren. Da solche Feuerungen aufgrund ihrer hohen thermischen Trägheit mehr Speicherbereich für Überschusswärme benötigen, unterscheiden sich Kaskaden mit industriellen Feuerungen wesentlich von den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Seriengeräten.

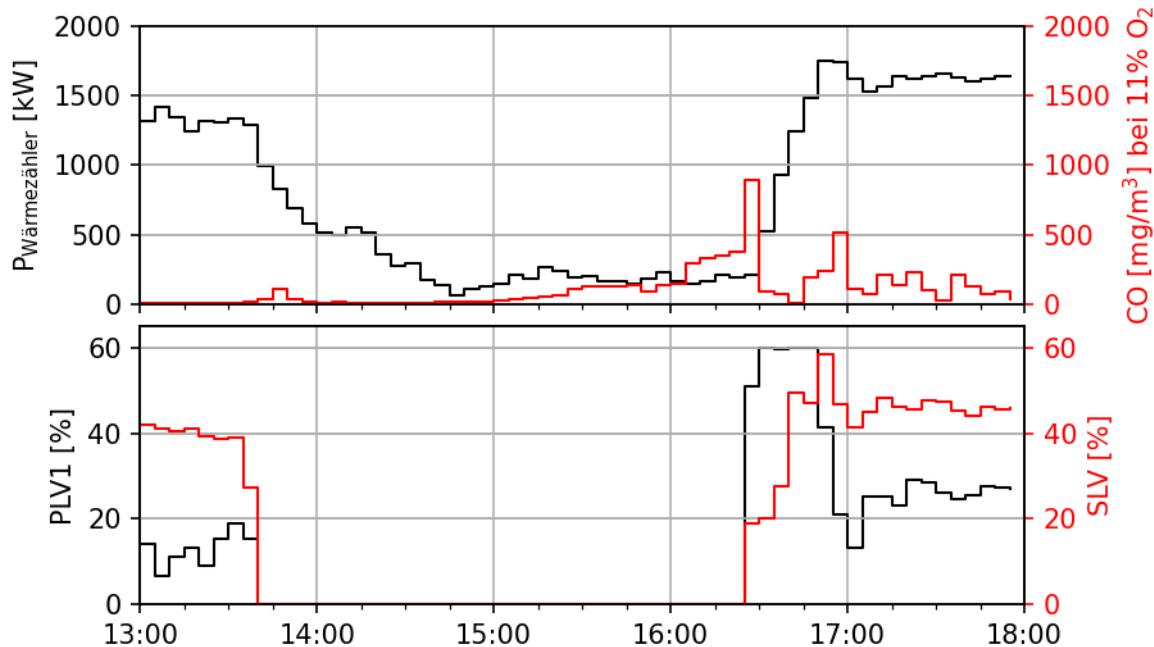


Bild 27 Beispiel einer Sprungantwort einer 2.5 MW Treppenrost-Feuerung. Die Daten stammen aus einem früheren Forschungsprojekt [9]. Dargestellt sind Mittelwerte über fünf Minuten von Signalen aus dem Leitsystem einer Anlage mit kontinuierlicher Emissionsüberwachung. Die Ventilatoren von Primärluft der Zone 1 (PLV1) und Sekundärluft (SLV) zeigen den Feuerungsbetrieb.

5.1.2.2. Sprungantwort von Seriengeräten der untersuchten Anlagen

Bei den drei untersuchten Praxisanlagen wurde festgestellt, dass der Anfahrvorgang von der Leistungsanforderung bis zum Erreichen der Wärmeabgabe bei Nennleistung der Kessel rund 30 Minuten dauert (Bild 28, Bild 29 und Bild 30).

Aufgrund von feuerungsinternen Vorgängen zwischen der Leistungsanforderung und dem Zünden des Brennstoffs dauert es in der Regel rund 10 bis 15 Minuten, bis die Abgastemperatur anzusteigen und der mit der Lambda-Sonde gemessene O₂-Gehalt zu sinken beginnt. Die Dauer zwischen dem Zündvorgang bis zur Wärmeabgabe bei Nennleistung ist abhängig von der vorangegangenen Stillstandsdauer des Kessels. Je länger der Kessel ausgeschaltet war desto länger dauert das Aufwärmen des Kessels und somit die Zeit, bis die Nennleistung abgegeben werden kann. Die Dauer zwischen dem Zündvorgang und bis zur Wärmeabgabe bei Nennleistung beträgt weitere rund 15 Minuten.

Dies widerspricht der gängigen Meinung, dass Seriengeräte im Vergleich zu industriellen Feuerungen deutlich 'flinker' seien. Im Vergleich zur Anlage mit 2.5 MW Leistung in Bild 27 wird die Nennleistung nicht schneller erreicht, da diese Seriengeräte keinen Primärluft-Ventilator haben.

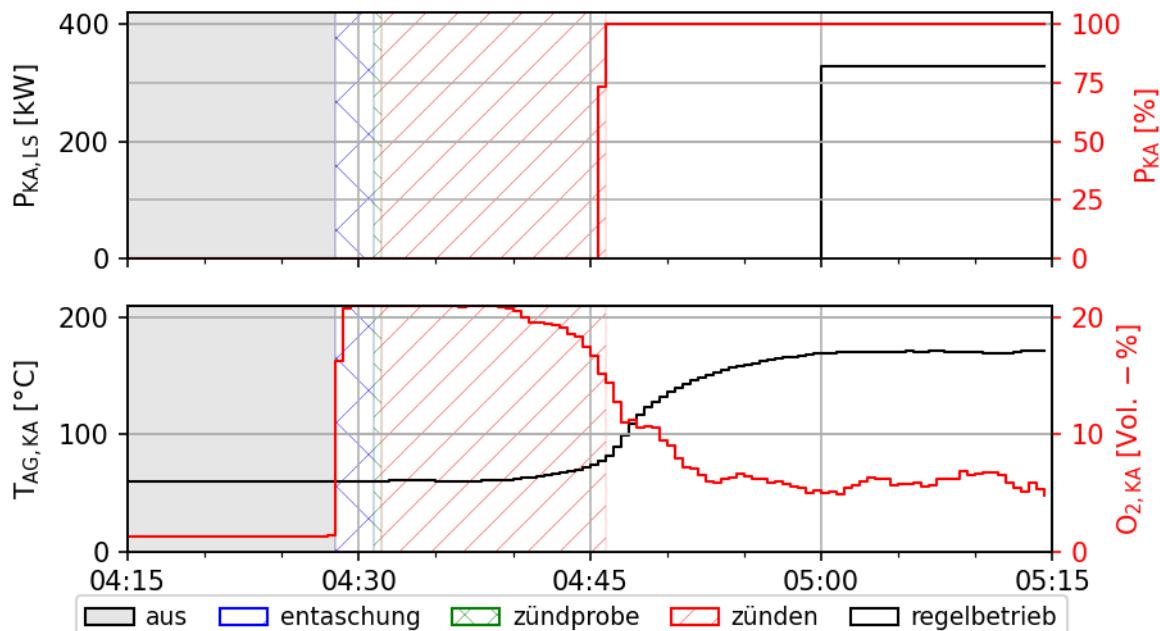


Bild 28

Beispiel einer Sprungantwort von Kessel A des WV Schachen.

Dargestellt sind das Signal des Wärmezählers ($P_{KA,LS}$) sowie die Sollleistung (P_{KA}), die Abgastemperatur ($T_{AG,KA}$) und die Sauerstoffkonzentration ($O_{2,KA}$) aus der Steuerung des Kessels.

Anmerkung: Die Wärmezählerdaten liegen nur als Momentanwerte mit einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten vor. Der Verlauf der Freisetzung der Wärmeleistung kann deshalb nur in entsprechend grober zeitlicher Auflösung ausgewiesen werden.

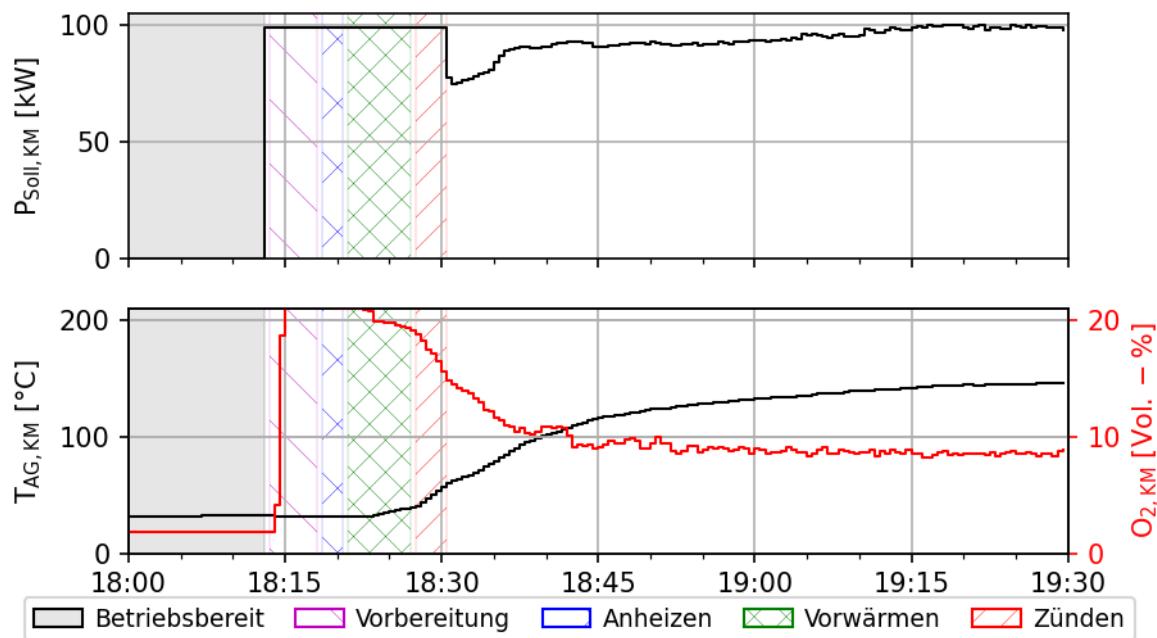


Bild 29 Beispiel einer Sprungantwort vom Master-Kessel der WUEB Roggwil.
Dargestellt sind die Sollleistung ($P_{Soll,KM}$), die Abgastemperatur ($T_{AG,KM}$) und die Sauerstoffkonzentration (O_2,KM) aus der Steuerung des Kessels.

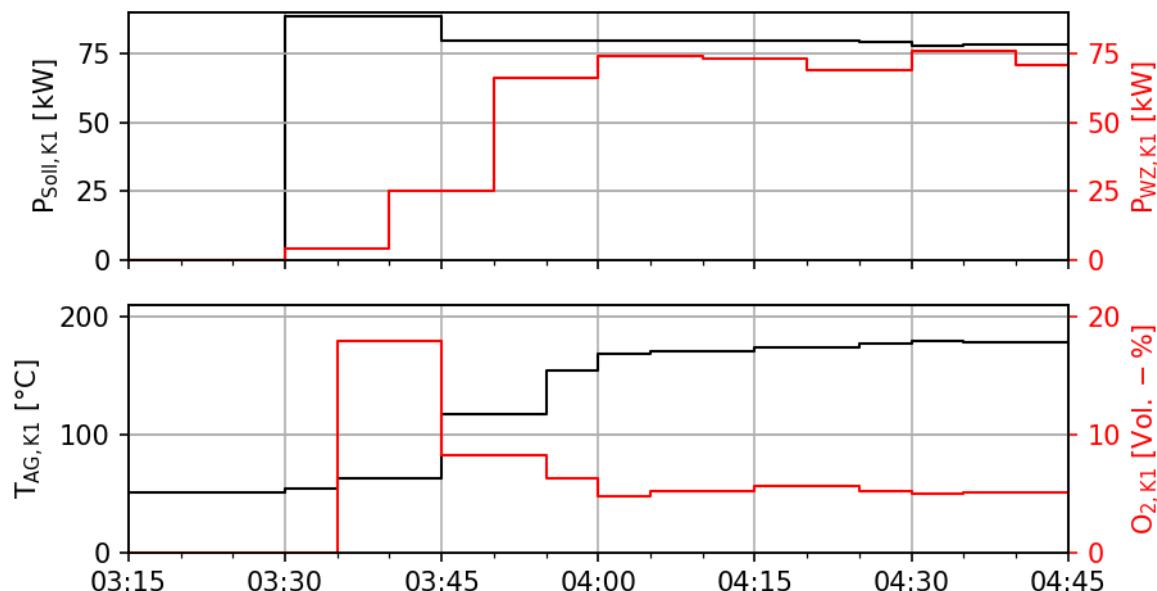


Bild 30 Beispiel einer Sprungantwort vom Master 1 der WUEB Schlieren.
Dargestellt sind die Sollleistung ($P_{Soll,K1}$), das Signal des Wärmezählers ($P_{WZ,K1}$), die Abgastemperatur ($T_{AG,K1}$) und die Sauerstoffkonzentration ($O_2,K1$) aus der Steuerung des Kessels. Das Statussignal des Kessels ist nicht bekannt.

5.1.2.3. Variation der Nennleistungen der Holzkessel

Die Holzkessel im WV Schachen verfügen über drei getrennte Brennstoffbunker, die den jeweiligen Kesseln fix zugeordnet sind. Jeder Bunker wird von einem anderen Brennstofflieferanten mit Holzhackschnitzeln gefüllt, sodass die Kessel mit unterschiedlichen Holzschnitzelqualitäten betrieben werden. Die Leistungsabgabe der Kessel bei einer Leistungsvorgabe von 100 % kann aus diesem Grund sowie als Folge von unterschiedlichen Verbrennungseinstellungen und Verschmutzungsgraden der Kessel deutlich variieren. Bild 31 (oben) zeigt die Auswertung einer Versuchsphase mit unterschiedlichen Verbrennungseinstellungen, Brennstoffqualitäten und Verschmutzungsgraden der Holzkessel. Es wurden dabei sämtliche Betriebsphasen innerhalb eines Tages bei einer Sollwertvorgabe von 100 % gemittelt. Es wurden Leistungsabgaben der Holzkessel im Tagesmittel zwischen 230 kW und 310 kW aufgezeichnet. Die Holzkessel erreichen im Tagesmittel somit effektive Leistungen im Bereich zwischen rund 70 % und 94 % der Nennleistung von 330 kW.

Bild 31 (unten) zeigt dieselbe Auswertung für die WUEB Schliern. Die beiden Pelletkessel erreichen im Tagesmittel Leistungen im Bereich zwischen rund 91 % und 95 % der Nennleistung von 80 kW.

Wenn die einzelnen Kessel die Nennleistung nicht erbringen, kann das Wärmenetz bei Auslegungsbedingungen nicht ausreichend versorgt werden. Daneben führt ein Nicht-Erreichen der Nennleistung der Kessel im Fall von Kaskadenanlagen bei einem geringeren Bedarf zu zusätzlichen Starts.

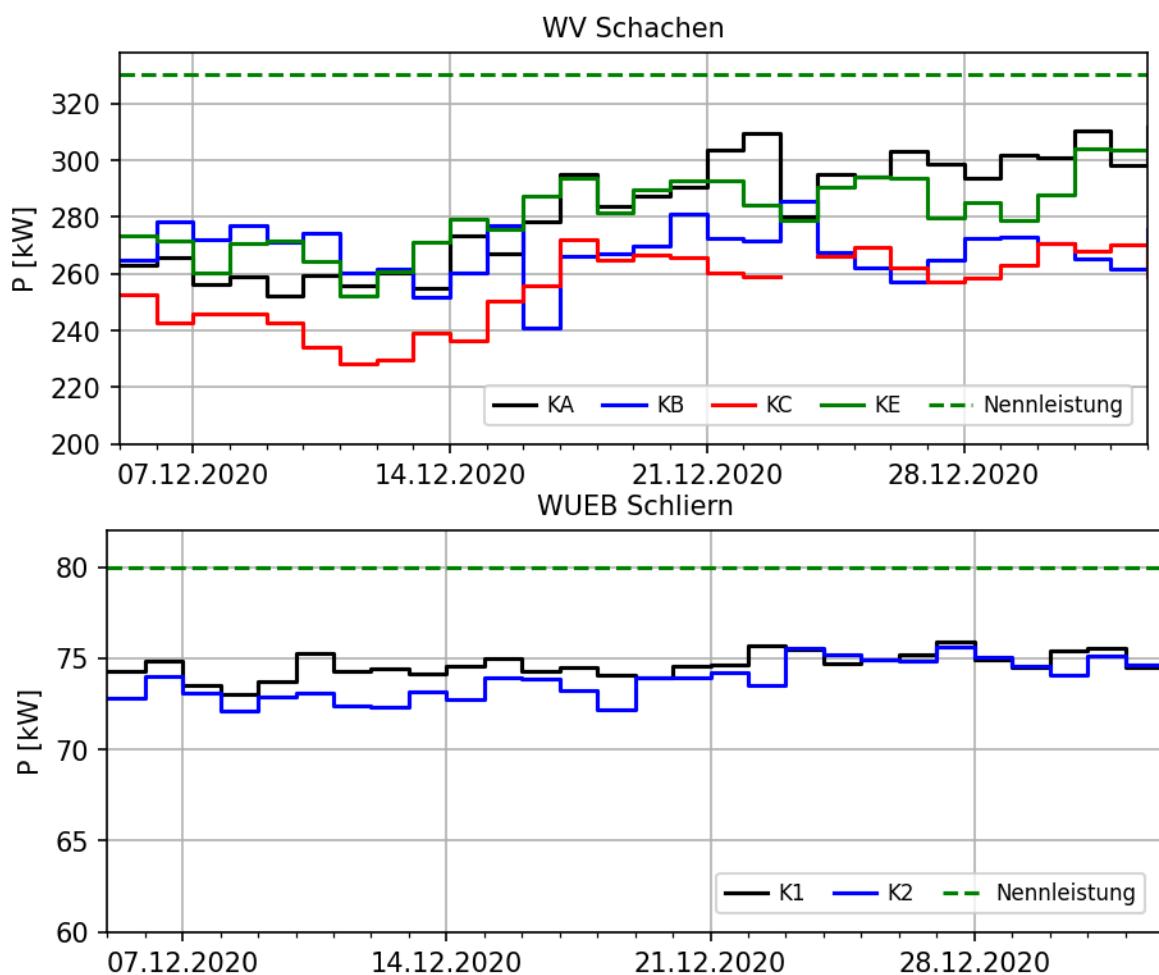


Bild 31 Effektive Leistung bei einer Sollwertvorgabe von 100% im Vergleich zur theoretischen Nennleistung der Kessel.

Oben: WV Schachen: Von den Wärmezählern erfasste Kesselleistung der vier Kessel mit unterschiedlichen Verbrennungseinstellungen, Brennstoffqualitäten und Kesselreinigungsgraden. Dargestellt sind Tagesmittelwerte des Regelungsbetriebs bei einer Sollwertvorgabe von 100 % und, zum Vergleich, die Nennleistung der Kessel (gestrichelt). Unten: WUEB Schliern: dito.

5.1.2.4. Unerwünschte Lücken in der Wärmeproduktion durch die periodische Entaschung

Seriengeräten im Leistungsbereich kleiner 500 kW verfügen oft über eine periodische Entaschung des Rostes, wobei der Reinigungszyklus nach einer Laufzeit von rund 6 bis 12 Stunden aktiviert wird. Bild 32 zeigt, dass die Vorgabe der Sollleistung des Kessels zwar nur kurzzeitig abfällt, dass aber die Leistungsabgabe des Kessels durch eine Entaschung während bis zu 45 Minuten unterbrochen werden kann.

Im WV Schachen werden aus diesem Grund über den Tag verteilt drei Zeitfenster vorgegeben, während denen die grosse Entaschung in der Regel durchgeführt werden. Bei Beginn einer Entaschung wird ein zusätzlicher Kessel gestartet, sofern der Speicherladezustand zu diesem Zeitpunkt tief ist. Im Beispiel in Bild 32 erfolgt die Entaschung jedoch zeitgleich mit dem Beginn des Boilerladefensters am Morgen, sodass die Reduktion der Leistungsabgabe des Holzkessels und die sprunghafte Bedarfszunahme aufgrund der Boilerladungen gleichzeitig auftreten.

Bild 33 zeigt, dass die grossen Entaschungen in weniger als 45 % der Fälle innerhalb den drei vorgegebenen Zeitfenstern stattfanden, mehr als die Hälfte der Entaschungen fanden dennoch zufällig über den Tag verteilt statt.

Solche unkontrollierten Unterbrüche der Leistungsabgabe wirken sich negativ aus auf die Zuschaltbedingungen der Kaskade.

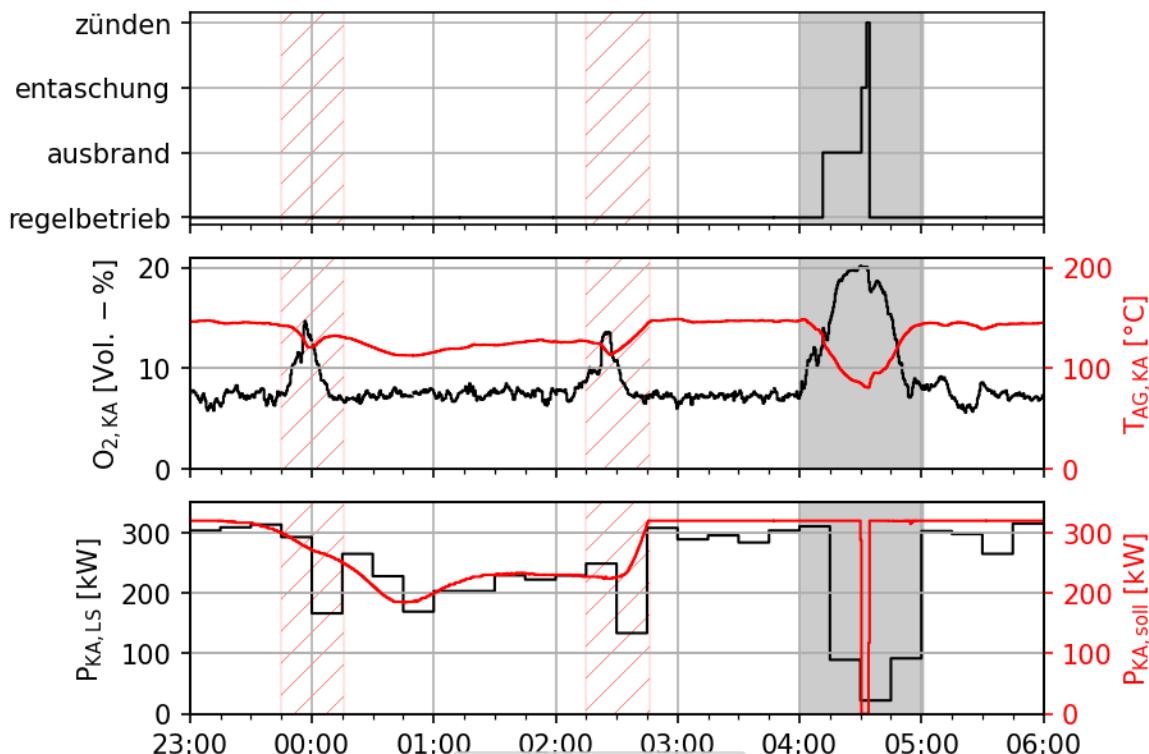


Bild 32 Beispiel einer grossen Entaschung im WV Schachen. Dargestellt sind Mittelwerte über fünf Minuten von Betriebsdaten des Kessels. Rot schraffiert: kleine Entaschungen, Grau: grosse Entaschung.

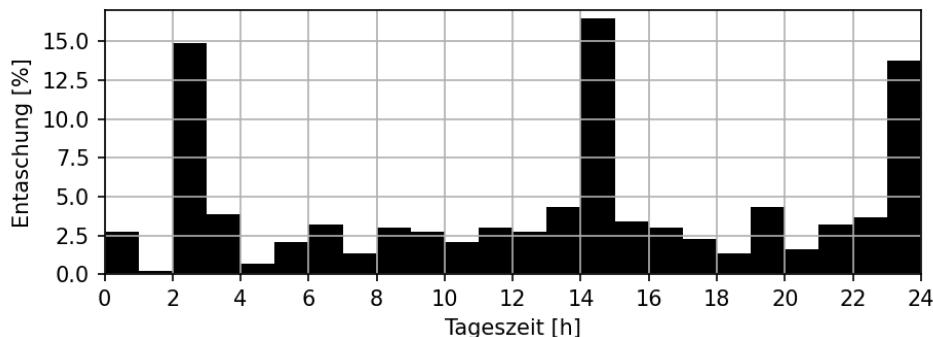


Bild 33 Tageszeitliche Häufigkeitsverteilung der Entaschungen im WV Schachen.

5.1.2.5. Leistungsmodulation der Seriengeräte

Die Kessel in der WUEB Roggwil werden während 50 % ihrer Betriebszeit bei einer Solleistung von über 95 % betrieben. Während 50 % ihrer Betriebszeit werden die Kessel im Leistungsbereich zwischen 95 % und 30 % moduliert, wobei die Solleistung nur während 20 % der Betriebszeit geringer als 85 % ist.

Die Kessel im WV Schachen werden ebenfalls während 50 % ihrer Betriebszeit bei einer Solleistung von über 95 % betrieben. Während rund 20 % ihrer Betriebszeit werden sie bei Minimalleistung betrieben. Da die Minimalleistung während der Untersuchungen von 60 % auf 50 % angepasst wurde, sind entsprechend zwei Plateaus bei einer Kesselleistung von 50 % auf 60 % erkennbar. Die Kessel werden somit nur während 30 % ihrer Betriebszeit im Leistungsbereich zwischen 95 % und 50 % moduliert.

In der WUEB Schliern werden die Kessel nur während 25 % ihrer Betriebszeit bei einer Sollleistung von mehr als 95 % betrieben. Während 45 % ihrer Betriebszeit werden die Kessel im Leistungsbereich zwischen 95 % und 30 % modulierend betrieben und während 35 % laufen sie bei ihrer Minimalleistung von 35 %.

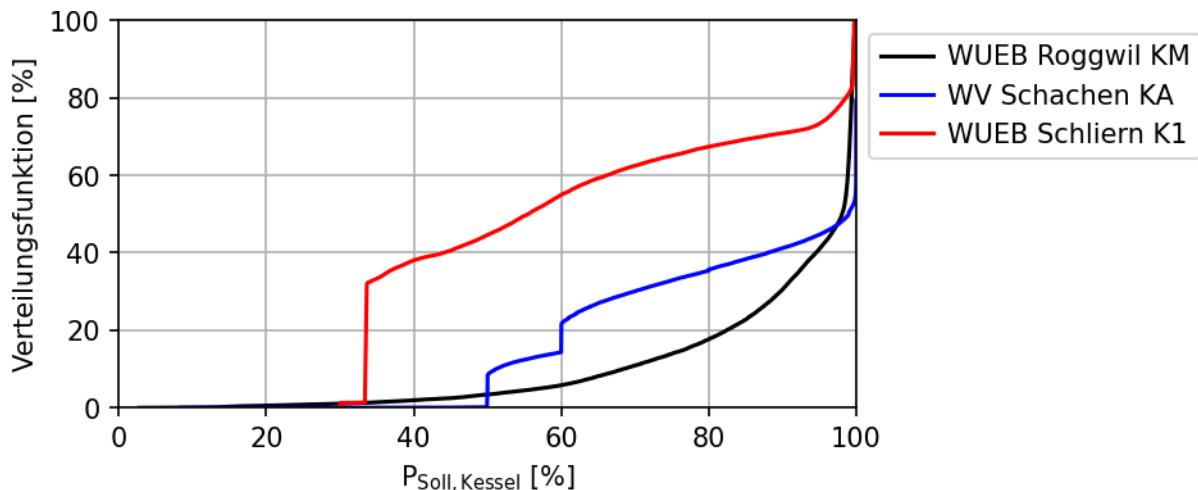


Bild 34 Verteilungsfunktion der Solleistung der Kessel in den drei untersuchten Praxisanlagen während der gesamten Untersuchungsdauer.

5.1.2.6. Leistungseinbrüche aufgrund von unerkannten Störungen

Bild 35 zeigt eine Betriebsphase von vier Stunden eines Kessels des WV Schachen, in der die Leistungsvorgabe des Kessels bei 100 % lag, der Kessel aber nur eine Leistung von rund 25 % seiner Nennleistung abgeben konnte. Eine solche Situation kann zum Beispiel durch Brennstoffmangel im Silo oder durch Probleme im Brennstofftransportsystem verursacht werden.

Die Auswertung der Regelkonzepte der untersuchten Anlagen zeigt, dass diese nicht in der Lage sind zu erkennen, ob sie jederzeit ausreichend Leistung produzieren, also ob ihre Sollwertvorgabe und ihre Leistungsabgabe nicht mehr übereinstimmen. Dies wirkt sich negativ auf die Regelung der Kaskade aus.

Mit einer Überwachung der Vorlauftemperatur des Kessels oder der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf des Kessels könnte mit wenig Aufwand eine Rückmeldung an die Regelung der Kaskade erfolgen, um frühzeitig einen Ersatzkessel zu starten (siehe auch Kapitel 5.1.4).

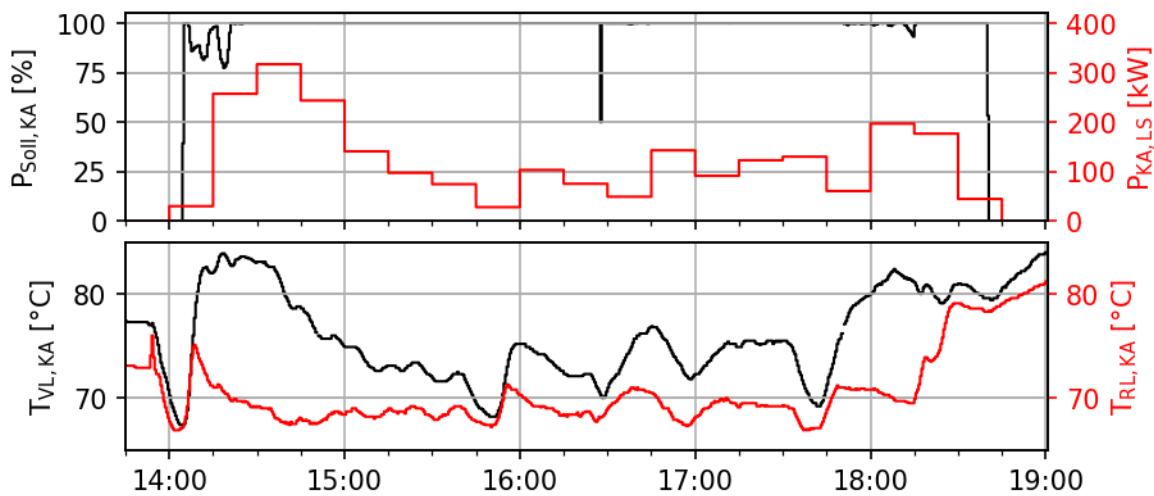


Bild 35 Beispiel einer Betriebsphase von vier Stunden, während der der Kessel nicht erkannt hatte, dass keine Leistung abgegeben wird. Dargestellt sind die Sollleistung, die Leistung des Wärmezählers, die Vor- und die Rücklauftemperaturen von Kessel A des WV Schachen am 5.7.2021.

5.1.2.7. Erkenntnisse zum Betrieb von Holzkesseln in Kaskaden

Seriengeräte ohne Primärluft-Ventilator können nach einer Stillstandsphase ihre Leistung nicht rascher hochfahren bzw. abgeben als industrielle Holzfeuerungen.

Zur Regelung der Kaskade ist eine Totzeit von 15 bis 30 Minuten ab dem Zuschalten eines Kessels bis zur Leistungsabgabe zu berücksichtigen. Der Einfluss eines zugeschalteten Kessels ist somit frühestens nach Ablauf dieser Totzeit im Signalverlauf des Speicherladezustands erkennbar, sodass die Regelung der Kaskade erst danach entscheiden sollte, ob noch ein weiterer Kessel zugeschaltet werden muss.

Holzfeuerungen industrieller Bauweise haben eine grosse thermische Trägheit und benötigen bei einer plötzlichen Lastabsenkung genügend Zeit, um die Leistung zu reduzieren oder bei einer Abschaltung die überschüssige Energie aus der Speichermasse abzugeben. Aus diesem Grund sollte der Sollwert des Speicherladezustands rund 50 % betragen.

Seriengeräte mit geringer thermischer Trägheit können schnell abgeschaltet werden und geben anschliessend nur wenig Energie ab. Es werden deshalb nur geringe Reserven zur Wärmeaufnahme im Wärmespeicher benötigt, sodass ein Sollwert für die Leistungsmodulation zwischen 50 % und 100 % gewählt werden kann und die Abschaltbedingung für den letzten Kessel bei einem Speicherladezustand von 100 % gewählt werden soll. Der Wärmespeicher soll hauptsächlich sprunghafte Lastzunahmen sowie Unterbrüche der Leistungsabgabe bei den Entaschungen der Kessel abfangen können.

Die Kaskadenregelung muss wissen, ob die Kessel ihre Leistung entsprechend der Leistungsvorgabe abgeben können. Mit einer Überwachung der Vorlauftemperatur oder der Temperaturdifferenz über dem Kessel könnte die Kaskade frühzeitig erkennen, ob ein Kessel zu wenig oder keine Leistung abgeben kann.

Eine Entaschung darf nicht ungeplant erfolgen, sondern muss von der Regelung der Kaskade geplant werden:

- Die Entaschung sollte nicht gleichzeitig mit den geplanten Bedarfssprüngen durch die Ladung der Boiler erfolgen.
- Bei einem hohen Wärmeleistungsbedarf oder einem niedrigen Speicherladezustand sollte vor einer Entaschung ein neuer Kessel starten, also z.B. 30 Minuten bevor ein in Betrieb stehender Kessel das Reinigungsintervall erreicht hat und für die Entaschung ausgeschaltet wird.
- Dies gilt auch für Alternierung der Kessel, also wenn ein Kessel seine maximale Laufzeit erreicht hat.

5.1.3. Wärmebezüger

5.1.3.1. Einfluss auf die Kaskade

Grosse plötzliche Sprünge des Leistungsbedarfs der Wärmebezüger sind für Holzheizanlagen eine grosse Herausforderung. Die thermische Trägheit der Kessel und die Anfahr- und Entaschungsvorgänge verunmöglichen es, dem Leistungsbedarf direkt nachzufahren. Grosse sprunghafte Änderungen im Wärmeleistungsbedarf können deshalb auch zu grossen Sprüngen beim Speicherladezustand führen. Die zu erwartenden Sprünge des Leistungsbedarfs der Wärmebezüger sollten deshalb bei der Definition von Zu- und Abschaltkriterien für die Kessel einer Kaskade berücksichtigt werden.

5.1.3.2. Wärmebezüger in den untersuchten Praxisanlagen

Im WV Schachen und in der WUEB Schlieren werden die Boilerladungen der Wärmebezüger gezielt innerhalb von engen Zeitfenstern vorgenommen. Diese Zeitfenster sollen, insbesondere im Sommerbetrieb, die Verluste des Wärmenetzes minimieren. Nur in der WUEB Roggwil erfolgen die Boilerladungen unkoordiniert entsprechend dem momentanen Bedarf der einzelnen Boiler.

Im WV Schachen gibt es mit einer Mehrzwekhalle (MZH) und einem Schul- und Wohnzentrum (SWZ) zwei dominierende Wärmebezüger. Das SWZ und weitere Bezüger wurden im Oktober 2020 im Zuge einer Erweiterung ans Wärmenetz angeschlossen. Für die Ladung der Boiler sind zwei mal zwei Starzeitpunkte definiert: 03:00 und 04:00 Uhr sowie 15:00 und 16:00 Uhr.

In Bild 36 ist die Aufteilung der Boilerladungen auf die zwei Startzeitpunkte um 03:00 Uhr und um 15:00 Uhr für die Mehrheit der Wärmebezüger gut erkennbar. Mit dem Anschluss des SWZ wurden die sprunghaften Bedarfszunahmen im Wärmenetz grösser, weil die Boilerladung des SWZ zeitgleich mit der MZH und weiteren Bezügern erfolgten. Bild 38 zeigt, dass die Anzahl Kesselstarts durch den Anschluss des SWZ im Oktober 2020 deutlich angestiegen ist, obwohl die mittlere Wärmeproduktion der Kessel in der Periode von Oktober bis November 2020 nach dem Anschluss vergleichbar war mit der Periode Januar bis März 2020.

Das Zeitfenster für die Boilerladung des SWZ wurde später um 30 Minuten verschoben, um die Bedarfssprünge zu dämpfen. Mit dieser Verschiebung konnte trotz einer weiteren Bedarfszunahme im Dezember 2020 ein weiterer Anstieg der Anzahl Kesselstart vermieden werden.

In der WUEB Schlieren gibt es vier Zeitfenster für die Boilerladung und alle vier Bezüger laden gleichzeitig. Zudem gibt es bei dieser Anlage eine Nachabsenkung am Abend und deren Aufhebung am folgenden Morgen (Bild 37).

In der WUEB Roggwil werden die Wärmezählerdaten nur mit einer Zeitauflösung von einem Datenpunkt pro Tag erfasst. Für diese Anlage kann deshalb keine vergleichbare Aussage gemacht werden.

Im WV Schachen wurden jeweils morgens um 3 Uhr sprunghafte Leistungszunahmen um 200 kW bis 700 kW beobachtet. Bei einer Nennleistung von 330 kW eines einzelnen Kessels entsprechen diese Sprünge dem Äquivalent von teilweise mehr als zwei zusätzlichen Kesseln.

Bild 39 zeigt eine Analyse der Häufigkeit von sprunghaften Leistungszunahmen und Leistungsabnahmen der Wärmebezüger von allen drei untersuchten Anlagen über den gesamten Untersuchungszeitraum. Bild 39 zeigt, dass im WV Schachen an 20 % aller untersuchten Tage der Wärmeleistungsbedarf innerhalb von 30 Minuten um mehr als die Nennleistung von einem Kessel zunimmt. In der WUEB Schlieren nimmt der Wärmeleistungsbedarf an 10 % aller Tage innerhalb von einer Stunde um mehr als die Nennleistung von einem Kessel zu.

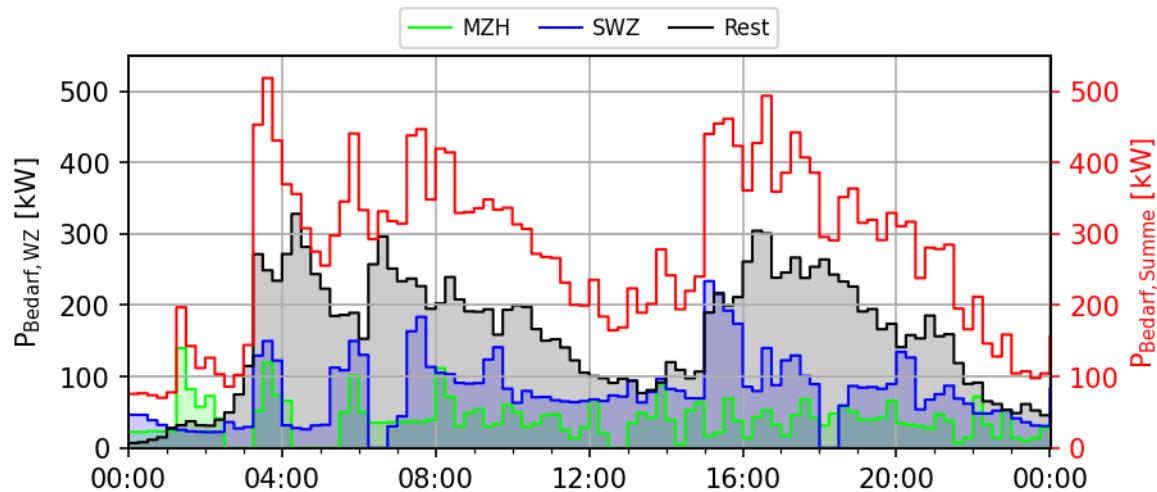


Bild 36 Zeitverlauf der Bezüger des VW Schachen am 16.11.2020. Dargestellt sind die zwei grössten Wärmebezüger und die Summe der restlichen Bezüger als Flächen (hintereinander, nicht-gestapelt) und die Summe aller Bezüger als rote Linie. Die Zeitauflösung der Daten beträgt 15 Minuten.

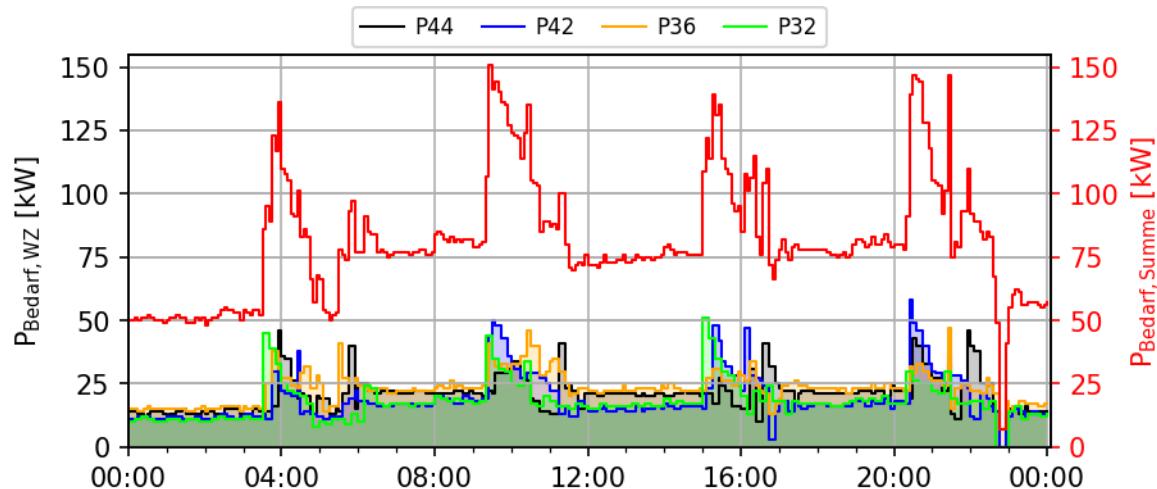


Bild 37 Zeitverlauf der vier Bezüger der WUEB Schlieren am 29.1.2021. Dargestellt sind die Wärmebezüger als Flächen (hintereinander, nicht-gestapelt) und die Summe aller Bezüger als rote Linie. Die Zeitauflösung der Daten beträgt 15 Minuten.

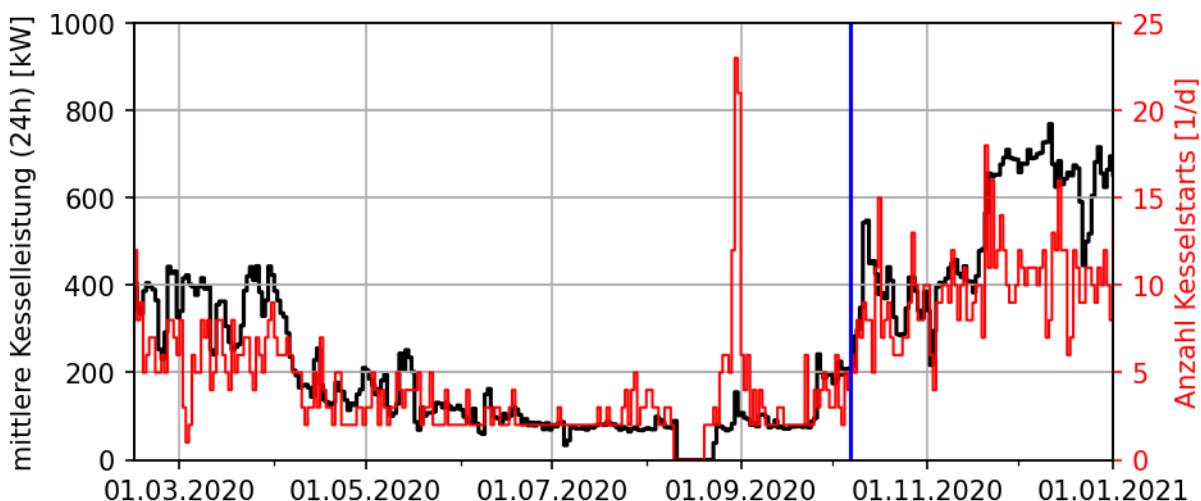


Bild 38 Zeitverlauf der summierten mittleren Kesselleistung und der Anzahl Kesselstarts pro Tag im WV Schachen. Linie: Zeitpunkt des Anschlusses des SWZ und weiterer Bezüger Anfang Oktober 2020.

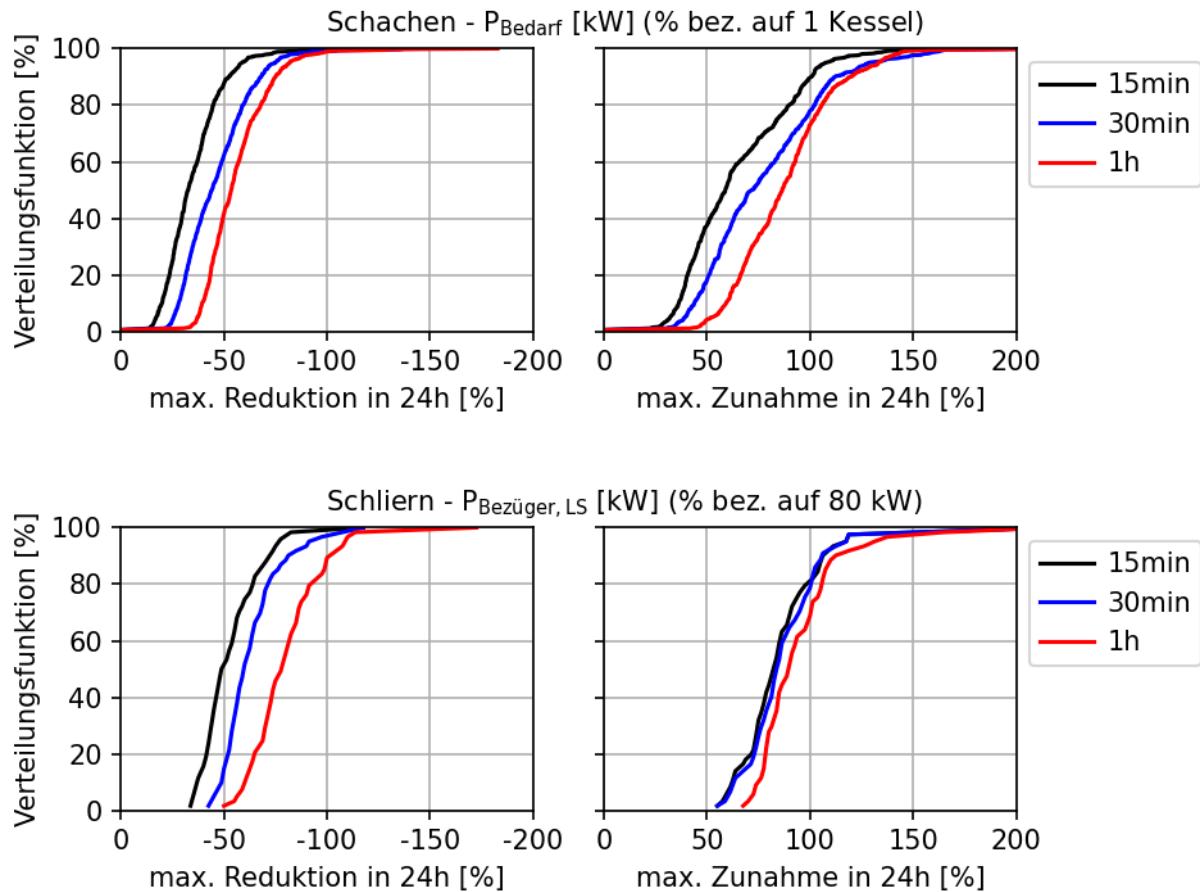


Bild 39 Verteilungsfunktionen der positiven und negativen Änderung des Wärmebedarfs innerhalb von 24h in Abhängigkeit des betrachteten Zeitintervalls.
Oben: WV Schachen
Unten: WUEB Schliern.

5.1.3.3. Erkenntnisse zum Einfluss der Wärmebezüger

Bei hohen Spitzen des Wärmeleistungsbedarfs sind die Verluste durch die Pumpen des Wärmenetzes und die Aufheizverluste der Kessel möglicherweise höher als die thermischen Verluste des Wärmenetzes bei einem längeren Betrieb. Zudem ist auch ein erhöhter Verschleiss durch ein häufigeres Zu- und Abschalten für kurze Betriebsphasen möglich.

Durch die Vermeidung oder Verminderung von grossen sprunghaften Änderungen des Wärmeleistungsbedarfs kann die Anzahl Zu- und Abschaltungen von Kesseln in einer Kaskade reduziert werden. Da Boiler in der Regel innerhalb von weniger als 60 Minuten vollständig geladen werden und der Wärmeleistungsbedarf bereits nach weniger als 30 Minuten deutlich abnimmt, kann ein Versatz der Startzeitpunkte für die Boilerladungen um 30 bis 60 Minuten die Sprünge im Wärmeleistungsbedarf deutlich reduzieren. Die Länge der Zeitfenster hat somit im Vergleich zum Startzeitpunkt der Zeitfenster nur einen untergeordneten Einfluss. Dies gilt insbesondere für die grössten Wärmebezüger. Diese sollten gesondert betrachtet und bei Bedarf während eigenen, separaten Zeitfenstern bedient werden.

5.1.4. Regelungskonzepte für Kaskaden

5.1.4.1. Die Änderung des Speicherladezustands als Indikator für den Wärmeleistungsbedarf

Obwohl immer mehr Wärmeverbünde mit Wärmezählern ausgestattet sind und deren Daten mit einer Zeitauflösung von z.B. 15 Minuten an das Leitsystem übermittelt werden, wird der effektive Wärmeleistungsbedarf heute oft nicht ausgewertet. Ein wichtiger Grund dafür sind Hürden bei den Schnittstellen zwischen verschiedenen Lieferanten und Produkten. So wurde im Leitsystem des WV Schachen der momentane Wärmeleistungsbedarf der einzelnen Bezüger fälschlicherweise als extrem hoch angezeigt, sobald die Rücklauftemperatur des Wärmezählers über seiner Vorlauftemperatur lag.

Die Umgebungstemperatur bei der Heizzentrale könnte ein Indikator für den Wärmeleistungsbedarf sein. Aber auch sie wird oft nicht ausgewertet, weil die Temperaturfühler nicht immer korrekt installiert werden und die Umgebungstemperatur nur dann aussagekräftig ist, wenn die Gebäudestandards (Heizgrenze) bekannt sind. Für den Warmwasserbedarf und den Prozesswärmeverbrauch ist die Umgebungstemperatur dagegen nur ein untergeordneter Faktor.

Zur Bestimmung der Zu- und Abschaltbedingungen von Kesseln in einer Kaskade wird bei den drei untersuchten Praxisanlagen deshalb hauptsächlich der Speicherladezustand verwendet. Nur in der WUEB Schliern wird zusätzlich eine von der Umgebungstemperatur abhängige Grundlast berücksichtigt.

Wie in Bild 39 in Kapitel 5.1.3.2 gezeigt, ändert der Wärmeleistungsbedarf im WV Schachen und in der WUEB Roggwil an rund 80 % der Tage um weniger als 100 % bezogen auf die Nennleistung eines Kessels. Im WV Schachen wurden aber auch sprunghafte Bedarfszunahmen von bis zu 200 % innerhalb von 30 Minuten beobachtet. Bild 40 zeigt die daraus resultierenden Änderungen im Speicherladezustand und somit der einzigen Information, welche die Regelung der Kaskade berücksichtigen kann. Die in Bild 40 dargestellten Speicherladezustände wurden nach der in Tabelle 1 beschriebenen Methode berechnet, sodass die Änderungen im Speicherladezustand erheblich grösser sind als es eine Auswertung der von den Herstellern ausgewiesenen Werten des Speicherladezustands ergäbe. Im WV Schachen und in der WUEB Roggwil nimmt der Speicherladezustand an 50 % der Tage innerhalb von 30 Minuten um mehr als 20 % ab. In der WUEB Schliern nimmt der Speicherladezustand an 50 % der Tage innerhalb von 30 Minuten sogar mehr als 40 % ab. Insbesondere in der WUEB Schliern werden diese Sprünge bewusst herbeigeführt, wie das in Kapitel 5.1.3 beschrieben ist.

Die in Bild 40 dargestellten Änderungen im Speicherladezustand werden nicht nur durch den Wärmeleistungsbedarf, sondern in erheblichem Mass auch durch die Wärmeproduktion und deren Änderung beeinflusst, was im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

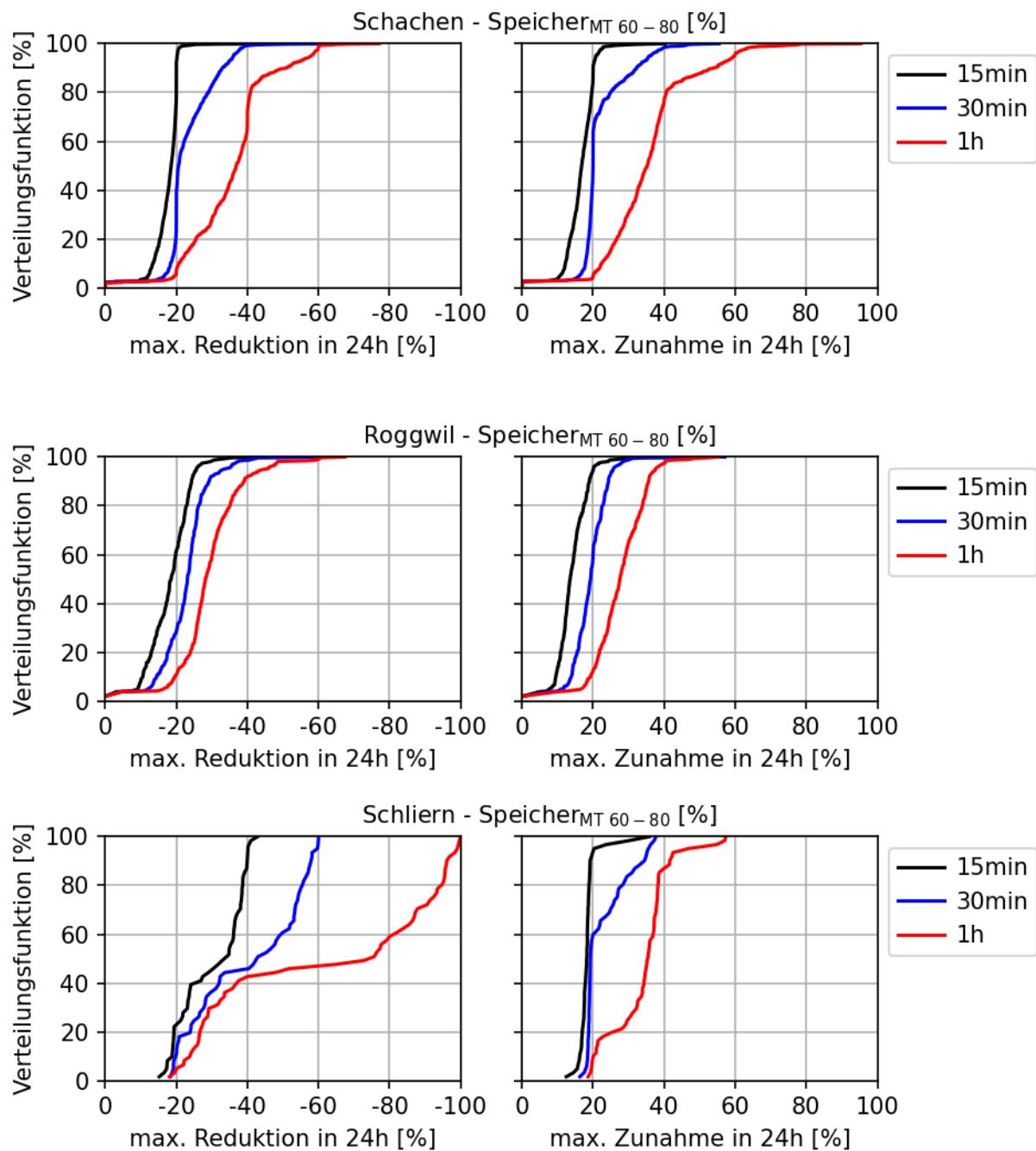


Bild 40 Verteilungsfunktionen der positiven und negativen Änderung des Speicherladezustands innerhalb von 24h nach der Speichermitteltemperatur mit Referenztemperaturen 60 – 80 °C (MT 60-80) in Abhängigkeit des betrachteten Zeitintervalls.
Oben: WV Schachen
Mitte: WUEB Roggwil
Unten: WUEB Schliern

5.1.4.2. Häufigkeit von Mehrfachschaltungen der Kessel

Bild 41 zeigt, dass im WV Schachen an rund 22 % der untersuchten Tage zwei von vier Kesseln innerhalb von 30 Minuten zugeschaltet wurden. An rund 10 % der Tage wurde das Zuschalten von drei Kesseln innerhalb von 90 Minuten beobachtet und an mehr als 15 % der Tage wurden drei von vier Kesseln innerhalb von 15 Minuten abgeschaltet.

In der WUEB Roggwil wurden an rund 50 % der Tage zwei von drei Kesseln innerhalb von 30 Minuten zugeschaltet. Es wurden an rund 7 % der Tage sogar Dreifachzuschaltungen beobachtet. Auch beim Ausschalten der Kessel gab es an rund 25 % der Tage Doppelausschaltungen innerhalb von 30 Minuten und in der WUEB Schliern wurde an mehr als 50 % der Tage doppelte Zu- und Abschaltungen innerhalb von 30 Minuten beobachtet.

Dieses nicht-optimale Verhalten liegt daran, dass die Zu- und Abschaltung von Kesseln in einer Kaskade zu einem wesentlichen Teil vom Speicherladestand abhängig ist. Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, gibt es bei den untersuchten Kesseln eine Totzeit und eine Leistung von 100 % wird erst ungefähr 30 Minuten nach dem Startbefehl erreicht. Zudem wird im WV Schachen und WUEB Roggwil die Wärmeleistung bei einer Entaschung unterbrochen. Infolgedessen wurden regelmäßig eine Überreaktionen der Kaskadenregelung beobachtet, also eine Mehrfachzuschaltung von Kesseln gefolgt von einer anschliessenden Mehrfachabschaltung. Neben den in Kapitel 5.1.3 beschriebenen sprunghaften Leistungsbedarfsänderungen erschweren auch die sprunghaften Änderungen der Wärmeleistungsproduktion die Regelbarkeit von Kaskaden.

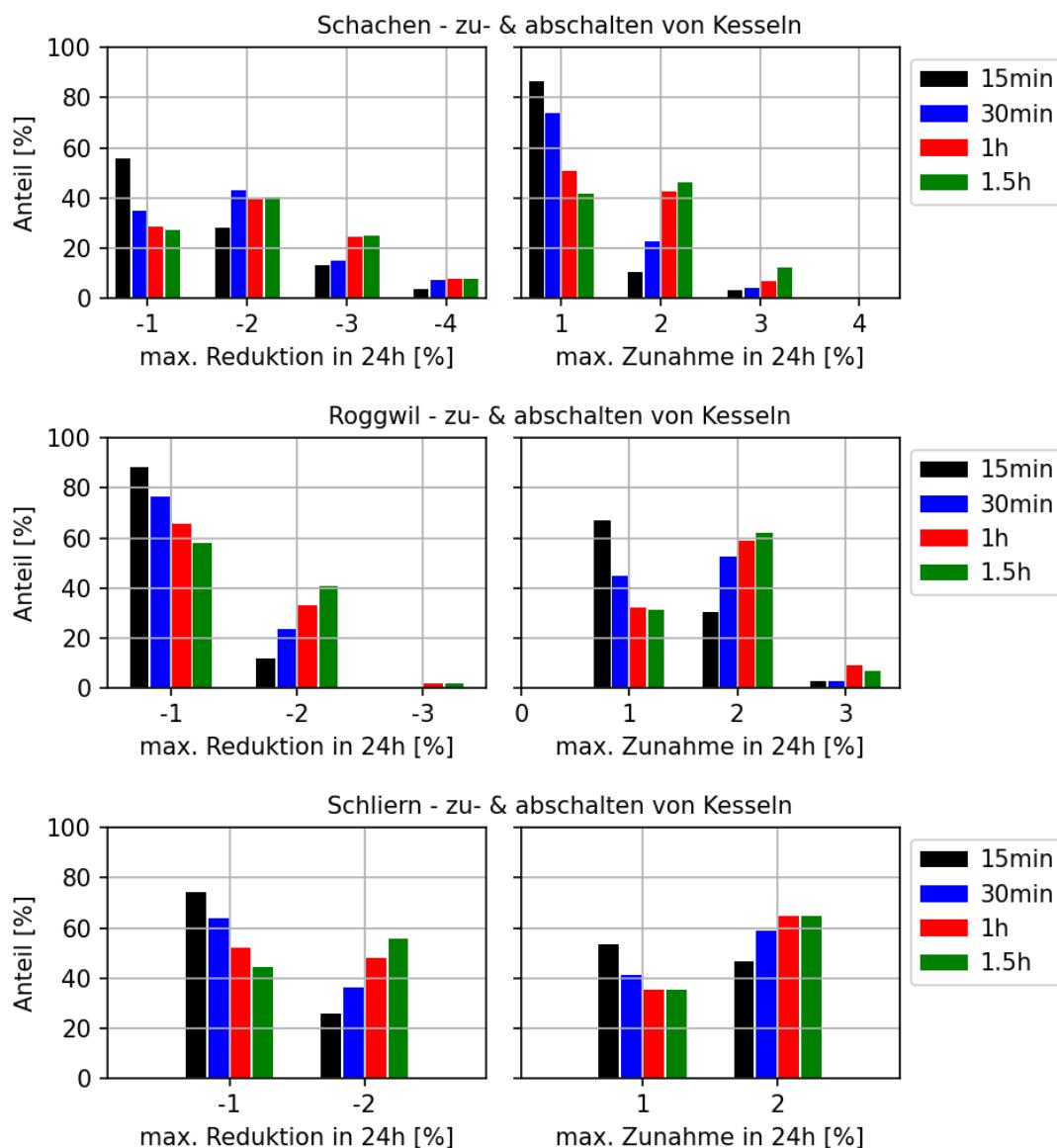


Bild 41 Anteil der positiven und negativen Änderung der produzierten Wärmeleistung innert 24h in Abhängigkeit des betrachteten Zeitintervalls.
Oben: WV Schachen / Mitte: WUEB Roggwil / Unten: WUEB Schliern

5.1.4.3. Abhängigkeit der Zuschaltschwellen von Kesselkenngrössen und der Kesselzahl in der Kaskade

Im WV Schachen und in der WUEB Roggwil wurde mehrfach versucht die Anzahl Kesselstarts zu reduzieren, indem die allgemeinen Schwellenwerte für das Zuschalten von Kesseln justiert wurden. Eine relevante Reduktion der Anzahl Kesselstarts wurde dabei nicht erreicht. Insbesondere in der WUEB Roggwil mit den individuellen Zuschaltbedingungen hatte sich gezeigt, dass keine optimalen Einstellungen gefunden werden konnten, welche für den Sommer- und für den Winterbetrieb unverändert funktionieren (siehe Kapitel 5.1.4.5).

Um unnötige Zuschaltungen von Kesseln zu vermeiden, sollte ein Folgekessel erst zugeschaltet werden, wenn der zuvor zugeschaltete Kessel den Startvorgang abgeschlossen hat und zum Regelbetrieb übergegangen ist. Wie in Kapitel 5.1.2.2 beschrieben benötigt ein Startvorgang rund 30 Minuten, wobei die ersten 15 Minuten einer Totzeit entsprechen. Bild 42 zeigt die sich daraus ergebende Sprungantwort einer Kaskade. Daraus kann abgeleitet werden, wieviel Energie aus dem Speicher bezogen wird, um eine sprunghafte Bedarfszunahme auszugleichen. Dies zeigt, dass sowohl die Totzeit als auch die Steigung der Leistungszunahme bis zum Erreichen der Nennleistung relevante Einflussfaktoren einer Kaskade sind.

Aus Bild 43 kann abgeschätzt werden, welchen Einfluss eine sprunghafte Leistungsbedarfszunahme auf den Speicherladezustand einer Kaskade mit vier Kesseln hat, wenn die Kenngrössen der Kessel verändert werden. Bei einer sprunghaften Zunahme von 50 % des maximalen Wärmeleistungsbedarfs des Wärmenetzes nimmt der Speicherladezustand (mit Referenztemperaturen von 60 °C und 80 °C für 0 % und 100 % gemäss QMH) im Standardfall um 30 % ab. Mit einer von 15 auf 5 Minuten reduzierten Totzeit könnte die Abnahme des Speicherladezustands auf 18 % begrenzt werden. Steigt die produzierte Leistung während der Aufheizphase nicht linear, sondern verzögert an, wird während der Aufheizphase im Durchschnitt z.B. nur 25 % und nicht 50 % der Wärme bei Nennleistungsbetrieb produziert, nimmt der Speicherladezustand um 37 % ab. Wenn die Nennleistung der Kessel nicht erreicht wird, sondern z.B. wegen der Qualität der Waldhackschnitzel nur 85 % erreicht, nimmt der Speicherladezustand bei einer sprunghafte Bedarfszunahme von 50 % gar um 45 % ab. In einer Anlage mit einem Wärmespeicher, dessen Speicherkapazität anstelle von 60 Minuten nur 40 Minuten der installierten Nennleistung entspricht, würde der Speicherladezustand noch viel stärker abnehmen. Dies zeigt, dass die Randbedingungen beim Betrieb der verwendeten Holzkessel das Verhalten der Kaskade erheblich beeinflussen. Bei der Bestimmung der Zuschaltkriterien sind diese Einflüsse zu berücksichtigen.

Je mehr Kessel in einer Kaskade eingesetzt werden, umso grösser sind diese Einflussfaktoren und umso schwieriger wird es, Schwellenwerte als Zuschaltkriterien festzulegen, ohne dass Kessel unnötig zu- oder abgeschaltet werden (Bild 44).

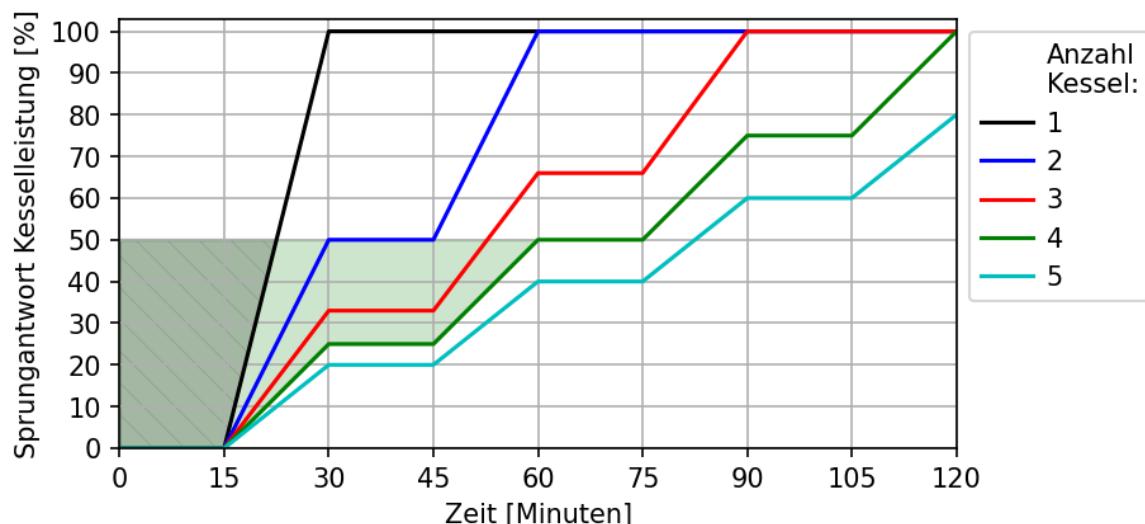


Bild 42 Sprungantwort der Kaskade bei einer seriellen Zuschaltung der Kessel in Abhängigkeit der Anzahl Kessel und wenn der Folgekessel erst zugeschaltet wird, wenn der zuvor zugeschaltete Kessel seine Nennleistung erreicht hat. Als schraffierte Flächen ist die Energie eingezeichnet, welche bei einer sprunghafte Leistungsbedarfszunahme von 50 % durch den Wärmespeicher gedeckt werden muss: Grau rückwärts schraffiert: Bedarfssprung von 50 % bei einer Anlage mit einem Kessel. Grün: Bedarfssprung von 50 % bei einer Kaskade mit vier Kesseln.

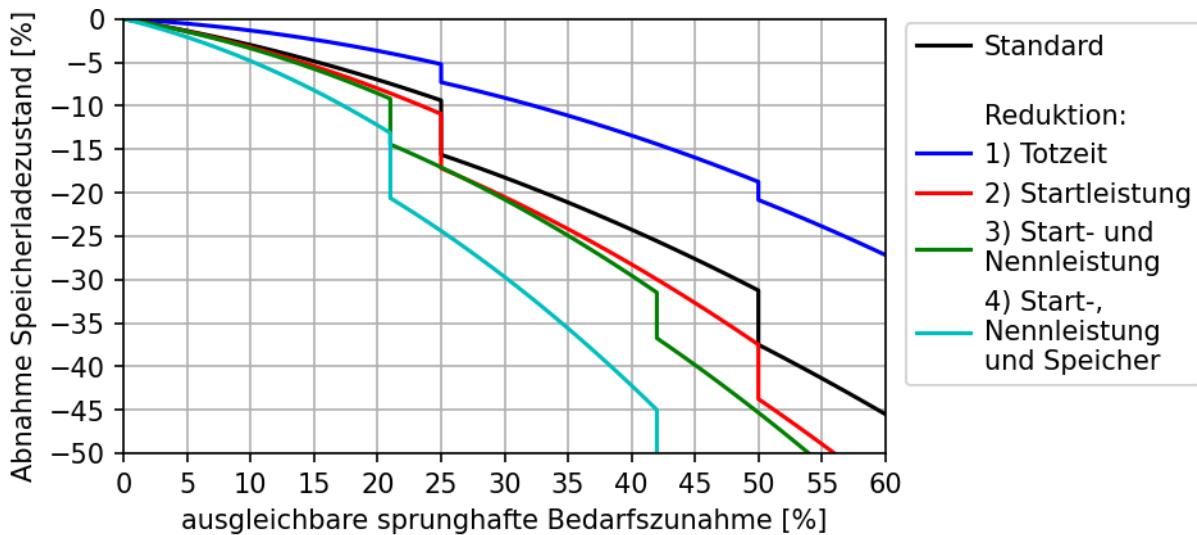


Bild 43 Abnahme des Speicherladezustands (Referenztemperatur für 0 % mit 60 °C) bei einer Kaskade mit vier Kesseln in Funktion einer sprunghaften Bedarfszunahme und abhängig von den Annahmen für den Kesselstart:
 Schwarz: Standardfall mit Totzeit von 15 Minuten und kontinuierlicher Leistungszunahme ab Start.
 Blau: Verkürzung der Totzeit von 15 Minuten auf 5 Minuten.
 Rot: Totzeit von 15 Minuten, Aufheizrate halbiert (25 %).
 Grün: Totzeit von 15 Minuten, Aufheizrate halbiert (25 %) und die Kesselleistung erreicht nur 85 % der erwarteten Nennleistung.
 Lila: Totzeit von 15 Minuten, Aufheizrate halbiert (25 %), die Kesselleistung erreicht nur 85 % der erwarteten Nennleistung und das Volumen des Wärmespeichers beträgt 40 Minuten anstelle von 60 Minuten.

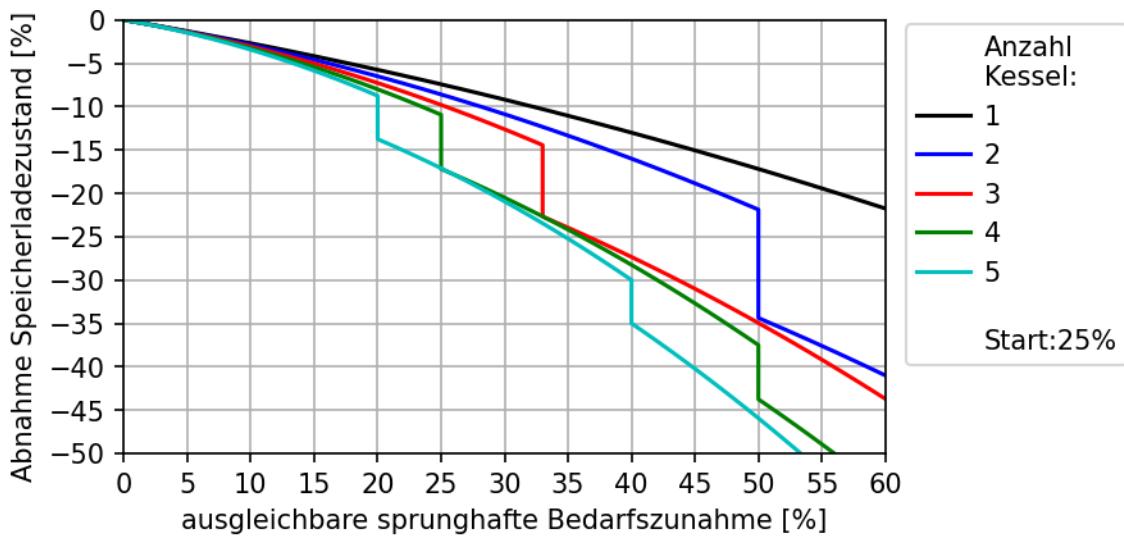


Bild 44 Abnahme des Speicherladezustands (Referenztemperatur für 0 % mit 60 °C) in Funktion einer sprunghaften Bedarfszunahme und abhängig von der Anzahl Kessel in der Kaskade. Annahmen: Totzeit von 15 Minuten und Aufheizrate halbiert (25 %).

5.1.4.4. Anzahl Kesselstarts bei den untersuchten Anlagen

Eines von mehreren Kriterien zur Beurteilung des Betriebs einer Kaskadenanlage ist die Anzahl Kesselstarts pro Jahr und Anlage oder die Anzahl Kesselstarts pro Jahr und Kessel. Dies insbesondere, seit mit dem Vollzugsblatt Emissionsüberwachung 31p des Cerc'Air [10] entsprechende Anforderungen publiziert wurden.

Bild 45 zeigt die Anzahl Kesselstarts der untersuchten Anlagen in Funktion der summierten Kesselbetriebszeiten, die in etwa proportional zum Wärmeleistungsbedarf sind. Aufgrund der periodischen Entaschungen nach sechs bis 12 Betriebsstunden im WV Schachen bzw. acht Betriebsstunden in der WUEB Roggwil ergibt sich eine minimale Anzahl Kesselstarts, die nicht unterschritten werden kann. Die Differenz zwischen der dargestellten Median-Linie und der durch die Entaschung bedingten Minimum-Linie entspricht dem theoretischen Reduktionspotenzial für die Anlage. Bei zwei von drei Anlagen liegt die reale Anzahl Kesselstarts fast doppelt so hoch wie das theoretische Minimum.

In der WUEB Roggwil zeigt sich ein weitgehend linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl Kesselstarts und deren Kessellaufzeiten. Beim WV Schachen und bei der WUEB Schliern zeigen die Kurven in Bild 45 keine lineare Zunahme zu den Kessellaufzeiten. Gründe dafür können unter anderem sein, dass die Lastsprünge bereits durch die Leistungsmodulation der in Betrieb stehenden Kessel ausgeglichen werden können.

Im WV Schachen sind vier Kessel installiert, aber bis ca. Mitte 2020 waren jeweils maximal drei Kessel gleichzeitig in Betrieb. Erst seit dem Anschließen weiterer Bezüger im Herbst 2020 waren zeitweise alle vier Kessel gleichzeitig in Betrieb. Im Juni 2021 wurde die Regelung des WV Schachen von allgemeinen Zuschaltschwellen auf individuelle Zuschaltbedingungen umgestellt, um den Unterschied zwischen den beiden Regelungskonzepten aufzuzeigen. Da für das neue Regelungskonzept Daten des Winterbetriebs fehlen, ist eine abschliessende Beurteilung nicht möglich. Aus dem Vergleich von Bild 46 und Bild 45 kann aber erwartet werden, dass die individuellen Zuschaltbedingungen gegenüber den allgemeinen Einschaltschwellen eine Reduktion der Anzahl Kesselstarts bewirken. Der Hauptgrund ist, dass unnötige Einschaltungen aufgrund des Pendelns des Speicherladezustands um die allgemeinen Zuschaltschwellen vermieden werden (siehe Kapitel 5.1.4.5).

In der WUEB Roggwil sind drei Kessel installiert und oft gleichzeitig in Betrieb. Bei dieser Anlage sind die Abschaltbedingungen in Abhängigkeit von den Zuschaltbedingungen gesetzt und liegen damit für die drei Kessel z.B. bei 55 %, 70 % und 95 % des Speicherladezustands. Liegt der Wärmeleistungsbedarf knapp über der Nennleistung von einem oder zwei Kesseln, überschreitet der Speicherladezustand kaum den Wert von 70 % bzw. 55 %. Folglich sinkt der durchschnittliche Speicherladezustand mit zunehmendem Wärmeleistungsbedarf. Ein Speicherladezustand, der zwischen 40 % und 80 % pendelt, macht das regelmässige Zuschalten von Kesseln erforderlich (siehe Kapitel 5.1.4.5). Bild 47 zeigt, dass auch bezogen auf ein Jahr die meisten Kesselstarts in der WUEB Roggwil bei einem hohen Wärmeleistungsbedarf auftraten.

In der WUEB Schliern wird das Zuschalten des zweiten Kessels regelmässig erforderlich, weil durch das zeitgleiche Laden aller Boiler im Übergangs- und Sommerbetrieb hohe Bedarfsspitzen auftreten. Auch in Bild 47 kann gesehen werden, dass die meisten Kesselstarts bei einem mittleren Wärmeleistungsbedarf auftraten.

Tabelle 19 zeigt, dass bei den drei untersuchten Anlagen rund 1'300 bis 2'500 Starts pro Jahr auftraten. Die fehlende Abhängigkeit von der Anzahl installierter Kessel ist durch die oben genannten Gründe zu erklären.

Tabelle 19 Summe aller Kesselstarts bei den untersuchten Anlagen und daraus berechnete Anzahl Starts pro Jahr (bei der Anlage Schachen ab 28.6.2021 sind die Werte pro Jahr aufgrund der Hochrechnung unsicher). Beim WV Schachen und WUEB Roggwil wird anhand der Zustandssignale der Kessel jeder Übergang zum Regelungsbetrieb gezählt. In der WUEB Schliern werden die Anforderungen von Sollleistung gezählt. *Hochrechnung auf ein Betriebsjahr.

Anlage	Kessel	Tag	Starts gezählt	Starts pro Anlage und Jahr	Starts pro Kessel und Jahr
WV Schachen bis 28.6.2021	4	511	3'457	2'469	617
WV Schachen nach 28.6.2021	4	136	513	(1'377)	(344)
WUEB Roggwil	3	317	1'594	1'835	611
WUEB Schliern	2	487	2'749	2'060	1'030

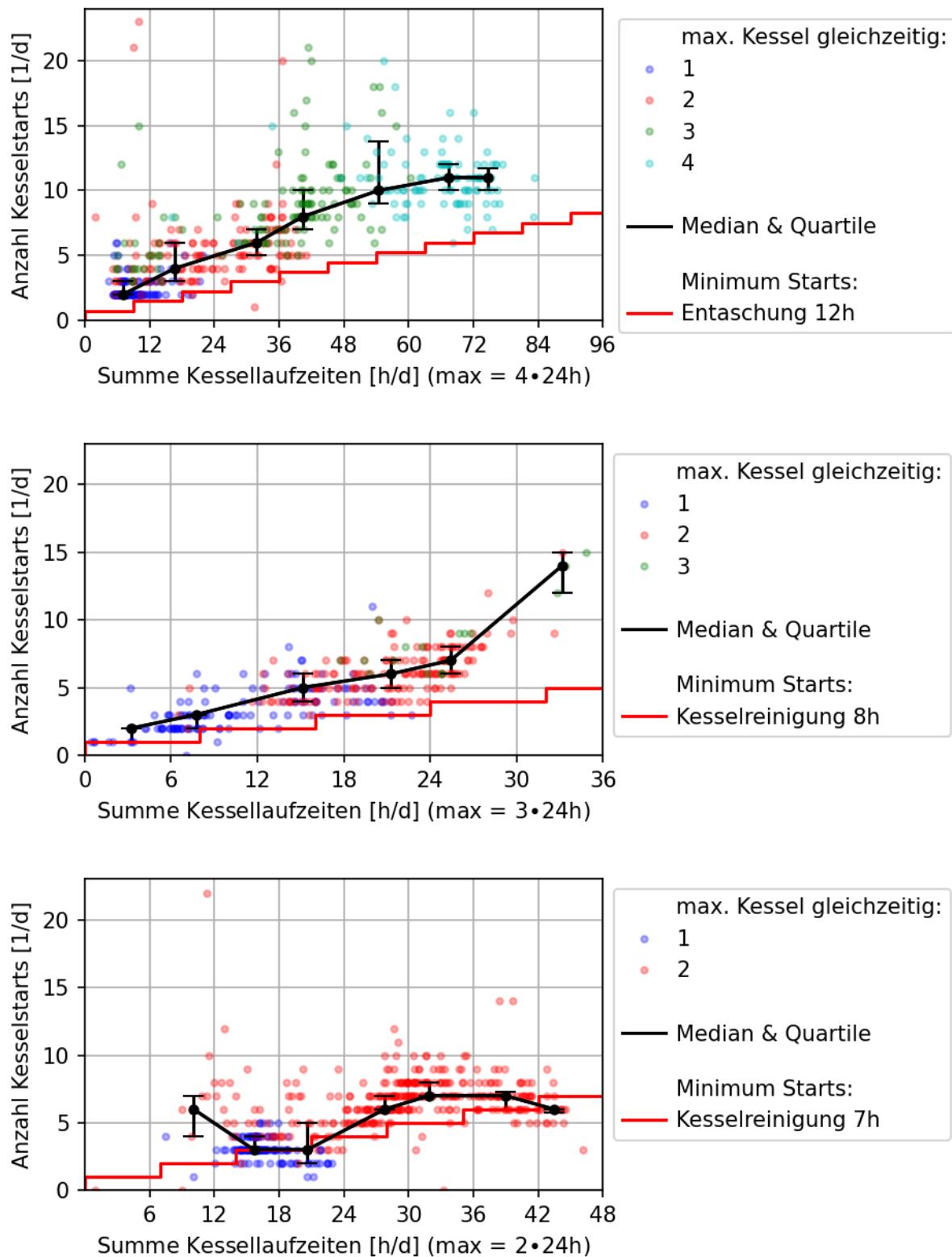


Bild 45 Anzahl Kesselstarts in Funktion der summierten Betriebsstunden aller Kessel der drei untersuchten Anlagen.
 Punkte: Tageswerte mit der maximalen Anzahl gleichzeitig laufender Kessel als Farbe.
 Schwarze Linie: Median und Quartile der Tageswerte innerhalb des Zeitintervalls (6 oder 12 h).
 Rote Linie: Mindest-Anzahl Kesselstart definiert durch das Intervall der Rostentaschung.
 Oben: WV Schachen bis 28.6.2021 (vor Optimierung).
 Mitte: WUEB Roggwil
 Unten: WUEB Schlieren (ohne periodische Entaschung).

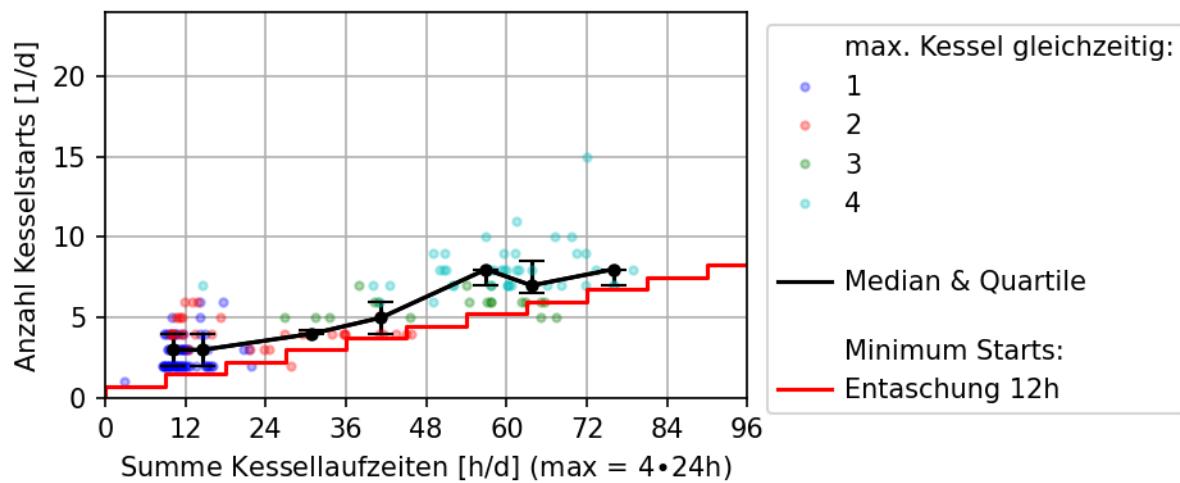


Bild 46 Anzahl Kesselstarts in Funktion der summierten Betriebsstunden aller Kessel des WV Schachen mit individuellen Zuschaltbedingungen ab 28.6.2021 (nach Optimierung).
Punkte: Tageswerte mit der maximalen Anzahl gleichzeitig laufender Kessel als Farbe.
Schwarze Linie: Median und Quartile der Tageswerte innerhalb des Zeitintervalls (12 h).
Rote Linie: Mindest-Anzahl Kesselstart definiert durch das Intervall der Rostentaschung.

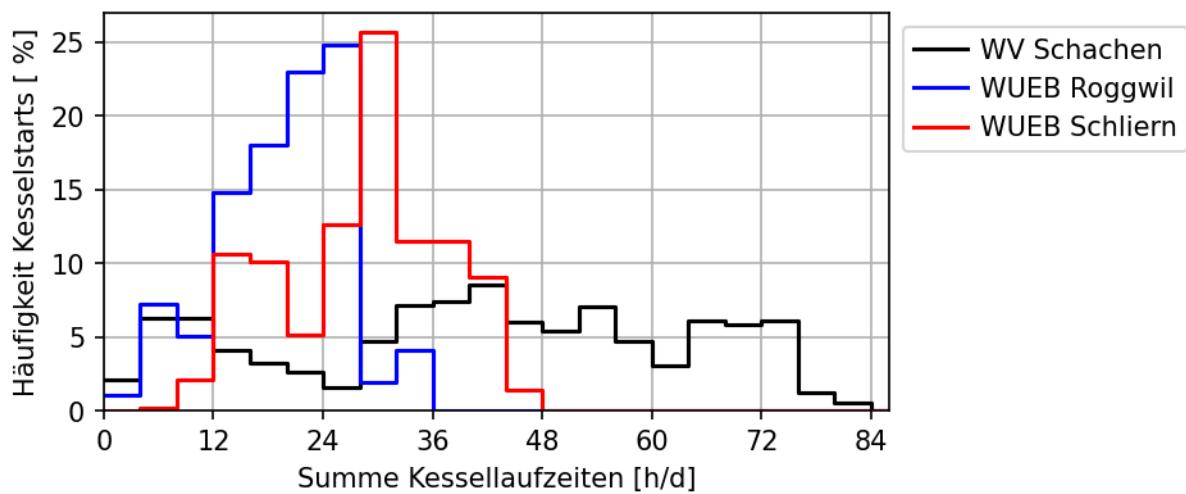


Bild 47 Häufigkeit der Kesselstart in Funktion von Klassen der summierten Betriebsstunden aller Kessel der drei untersuchten Anlagen.

5.1.4.5. Optimierungspotenzial bei der Regelung von Kaskaden

Bild 48 zeigt, dass bei allen drei untersuchten Anlagen im Sommerbetrieb Mehrfachzuschaltungen auftraten, auch wenn der Wärmeleistungsbedarf im Tagesdurchschnitt deutlich unter der Nennleistung eines einzelnen Kessels lag. Im WV Schachen und in der WUEB Schlieren sind dafür die in Kapitel 5.1.3.2 beschriebenen, bewusst zeitgleich zusammengefassten Boilerladungen verantwortlich. Zusätzlich zeigte sich bei der in Kapitel 4.1 beschriebenen Variation von diversen Regelungsparametern, dass es mit bis zu vier notwendigen individuellen Zuschaltbedingungen schwierig ist, ein Optimum zwischen zu frühen und zu späten Zuschaltbedingungen einzustellen. Die Änderungen des Speicherladezustands sind aufgrund der sprunghaften Bedarfsänderungen teilweise zu gross, wie das in Kapitel 5.1.4.3 beschrieben wurde.

Um die Mehrfachzuschaltungen zu vermindern, wurde deshalb in der WUEB Roggwil die individuellen Zuschaltbedingung des zweiten und dritten Kessels insbesondere für den Sommerbetrieb deutlich reduziert. Die Zuschaltbedingung für den ersten Kessel blieb für den Sommerbetrieb unverändert hoch. Mit der grösseren Differenz zwischen den Zuschaltbedingungen für den ersten und den zweiten Kessel ergaben sich trotz grossen sprunghaften Bedarfsänderungen weniger Mehrfachzuschaltungen. Wegen der späten Zuschaltung des zweiten Kessels, also erst bei tiefem Speicherladezustand, brach die Vorlauftemperatur der Wärmeabnahme von 80 °C auf 60 °C ein. Dies war ein Indiz dafür, dass der Wärmeleistungsbedarf für die Boilerladungen zeitweise nicht gedeckt werden konnte.

Bild 48 zeigt auch, dass in der WUEB Roggwil der Speicherladezustand regelmässig im Bereich zwischen 40 % und 80 % pendelt. Eine Verknüpfung der Ausschaltbedingungen mit den Einschaltbedingungen ist daher nicht sinnvoll, weil dies zu vermehrten Kesselstarts führt.

Bild 49 zeigt für den WV Schachen, dass eine ungünstige Abstimmung der Schwellenwerte für das Zu- und Abschalten der Kessel zusammen mit dem Regelkreis für die Solleistung der einzelnen Kessel zu einem Schwingen des Speicherladezustands führen kann, welches unerwünschtes Zu- und Abschalten von Kesseln verursacht. Wenn Zuschaltbedingungen und allfällige Wartezeiten zu nahe beieinander liegen, kann ein unerwünschter Betrieb mit zu schnellem Zu- und Abschalten von Kesseln auftreten. In diesem Beispiel wird um 03:15 Uhr ein zweiter Kessel innerhalb von weniger als 30 Minuten zugeschaltet, bevor der Effekt des Zuschaltens des ersten Kessels sichtbar wird. Bei Abschalten um 05:00 Uhr wird wiederum der zweite Kessel innerhalb von 15 Minuten abgeschaltet, bevor der Effekt des Abschaltens des ersten Kessels sichtbar wird. Deshalb muss bereits um 06:30, also nach weniger als 90 Minuten, erneut ein Kessel gestartet werden.

Bild 50 zeigt um 03:15 Uhr im WV Schachen ein Zuschalten eines zusätzlichen Kessels, während drei Kessel bei reduzierter Sollleistung betrieben werden und gerade am Hochfahren ihrer Kesselleistung sind. Dadurch werden bereits um 06:00 Uhr, also rund drei Stunden später, zwei Kessel ausgeschaltet und kurz darauf um 07:00 Uhr wieder ein Kessel zugeschaltet. Um diese Schaltvorgänge zu minimieren, sollte die Zu- und Abschaltbedingungen der Kaskade und die Leistungsregelung der Kessel besser aufeinander abgestimmt werden. Wenn Kessel mit reduzierter Leistung betrieben werden, sollte zuerst die Leistung der in Betrieb stehenden Kessel hochgefahren werden, bevor ein weiterer Kessel zugeschaltet wird.

Bild 51 (oben) zeigt das Zuschalten von zwei Kesseln im WV Schachen nach einer Entaschung von Kessel A um 04:15 Uhr. Ungefähr zeitgleich erhält Kessel B eine Betriebsanforderung, da der Speicherladezustand den Zuschaltpunkt von 50 % unterschreitet. Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, erreicht ein Kessel jedoch erst rund 30 Minuten nach dem Startbefehl seine Nennleistung. Zusätzlich entsteht durch die Entaschung bei Kessel A ein Unterbruch in der Leistungsabgabe. Daraus resultiert in Bild 51 (unten) eine Lücke in der Wärmeabnahme von rund 45 Minuten (04:15 bis 05:00 Uhr). Da die Entaschung ausserhalb der dafür vorgesehenen Zeitfenster, zeitgleich mit morgendlichen Boilerladungen, ausgeführt wurde, konnte der Wärmeleistungsbedarf in dieser Zeit nicht gedeckt werden. Trotz den zwei zusätzlich gestarteten Kesseln brach die Vorlauftemperatur des Wärmenetzes kurzzeitig ein. Ein vergleichbares Verhalten wurde regelmässig beobachtet. Deshalb ist darauf zu achten, dass ein allfälliger Zusatzkessel mindestens 30 Minuten vor einer Entaschung gestartet wird, um Lücken in der Wärmeabnahme zu vermeiden. Dies gilt insbesondere während der Zeitfenster für die Boilerladung und bei tiefem oder sinkendem Speicherladezustand.

Bild 52 zeigt das Zuschalten von drei Kesseln im WV Schachen nach einer zweistündigen Phase, in der Kessel A trotz einer Leistungsvorgabe von 100 % nur begrenzt Leistung produziert. Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, erkennt weder die Regelung der Kaskade noch der Kessel die ungenügende Wärmeabnahme. Deshalb nimmt das für den Vorlauf nutzbare Speichervolumen so weit ab, dass ein zusätzlicher Kessel nicht mehr aufgrund des Speicherladezustands, sondern aufgrund der zu tiefen Temperaturen im obersten Bereich Speichers zugeschaltet wird. Der Grund für dieses Betriebsverhalten ist die tiefe Referenztemperatur für 0 % von z.B. 40 °C zur Bestimmung des Speicherladezustands. Trotz eines

ausgewiesenen Speicherladezustands von 30 % ist im Speicher dennoch kein nutzbares Speicher-
volumen mehr vorhanden mit einer für den Netzvorlauf ausreichenden Temperatur von über 70 °C.

Im WV Schachen wurde an 37 von 629 Tagen eine Unterdeckung mit Einbruch der Temperatur des obersten Speicherfühlers beobachtet. Dies ist für den Praxisbetrieb inakzeptabel und könnte unter Berücksichtigung der oben genannten Zusammenhänge weitgehend vermieden werden.

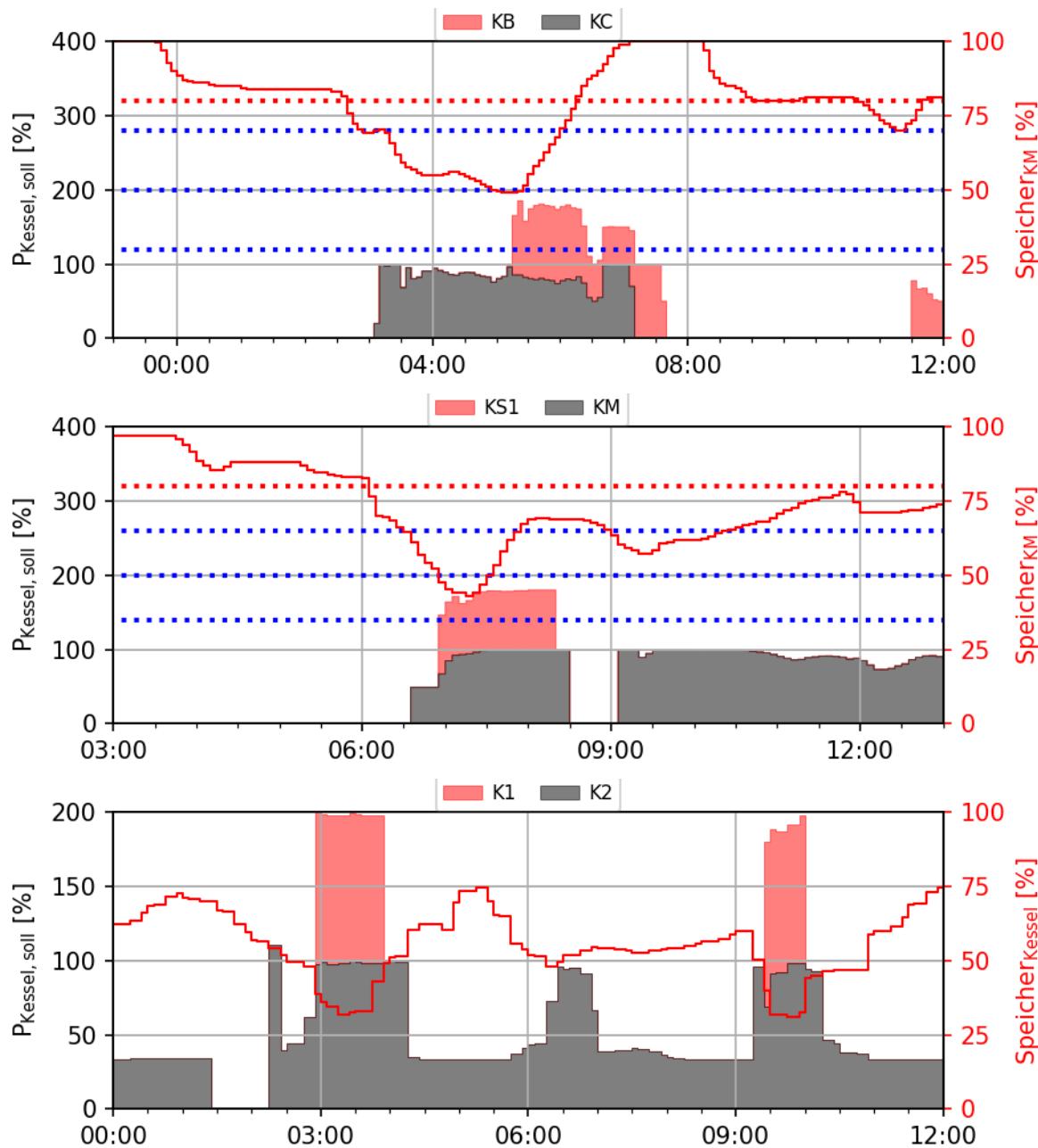


Bild 48 Mehrfachzuschaltungen im Sommerbetrieb der untersuchten Anlagen. Dargestellt sind die Sollleistungen der Kessel und der von der Regelung ermittelte und für die Zuschaltung der Kessel relevante Speicherladezustand.
Oben: WV Schachen am 30.8.2021 mit individuellen Zuschaltbedingungen bei 30, 50 und 70 % (blau gepunktete Linien).
Mitte: WUEB Roggwil am 6.10.2020 mit individuellen Zuschaltbedingungen bei 35, 50 und 65 % (blau gepunktete Linien).
Unten: WUEB Schliern am 1.6.2021 mit unbekannten Zuschaltbedingungen.

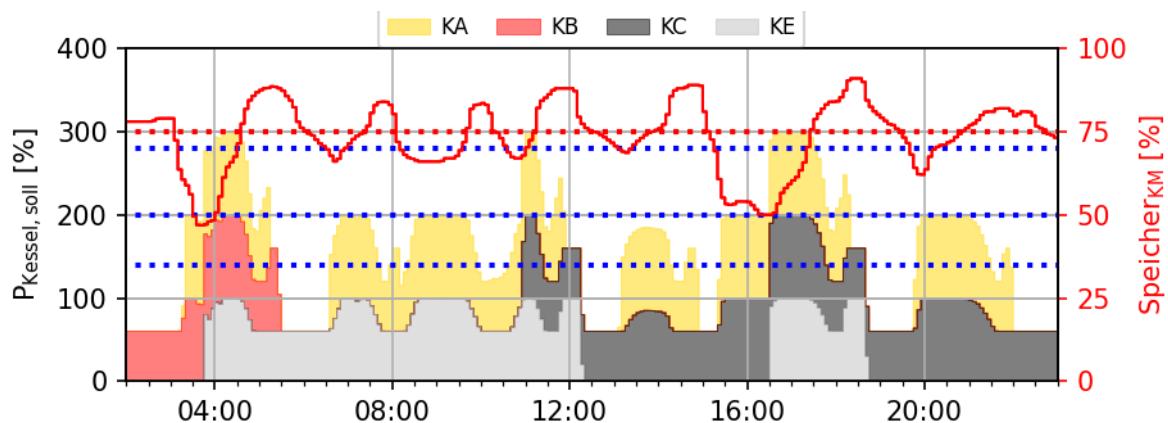


Bild 49 Schwingen des Speicherladezustands aufgrund von ungünstigen Schwellenwerten für das Zu- und Abschalten der Kessel. Dargestellt sind die Sollleistungen der Kessel und der von der Regelung ermittelte und für die Zuschaltung der Kessel relevante Speicherladezustand.
WV Schachen am 7.11.2020 mit allgemeinen Schwellenwerten bei 35, 50 und 70 % (blau gepunktete Linien).

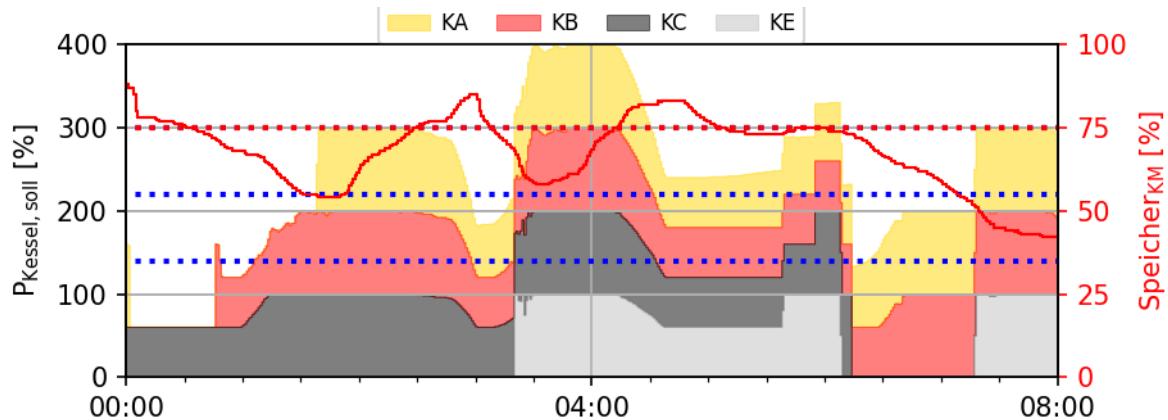


Bild 50 Zuschalten eines zusätzlichen Kessels während drei Kessel mit reduzierter Solleistung betrieben werden. Dargestellt sind die Sollleistungen der Kessel und der von der Regelung ermittelte und für die Zuschaltung der Kessel relevante Speicherladezustand.
WV Schachen am 14.12.2020 mit allgemeinen Schwellenwerten bei 35, 55 und 75 % (blau gepunktete Linien).

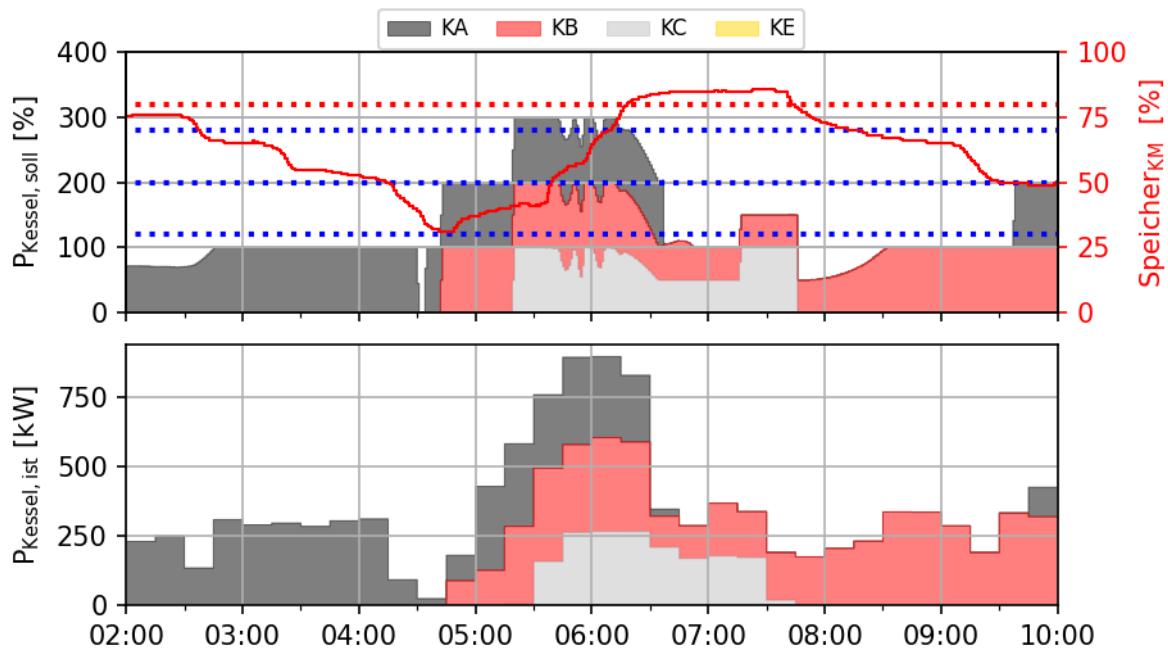


Bild 51 Zuschalten von zwei zusätzlichen Kesseln nach einer Entaschung von Kessel A. Dargestellt sind die Sollleistungen der Kessel und der von der Regelung ermittelte und für die Zuschaltung der Kessel relevante Speicherladezustand.
WV Schachen am 13.10.2021 mit allgemeinen Schwellenwerten bei 30, 50 und 70 % des Speicherladezustands (blau gepunktete Linien).

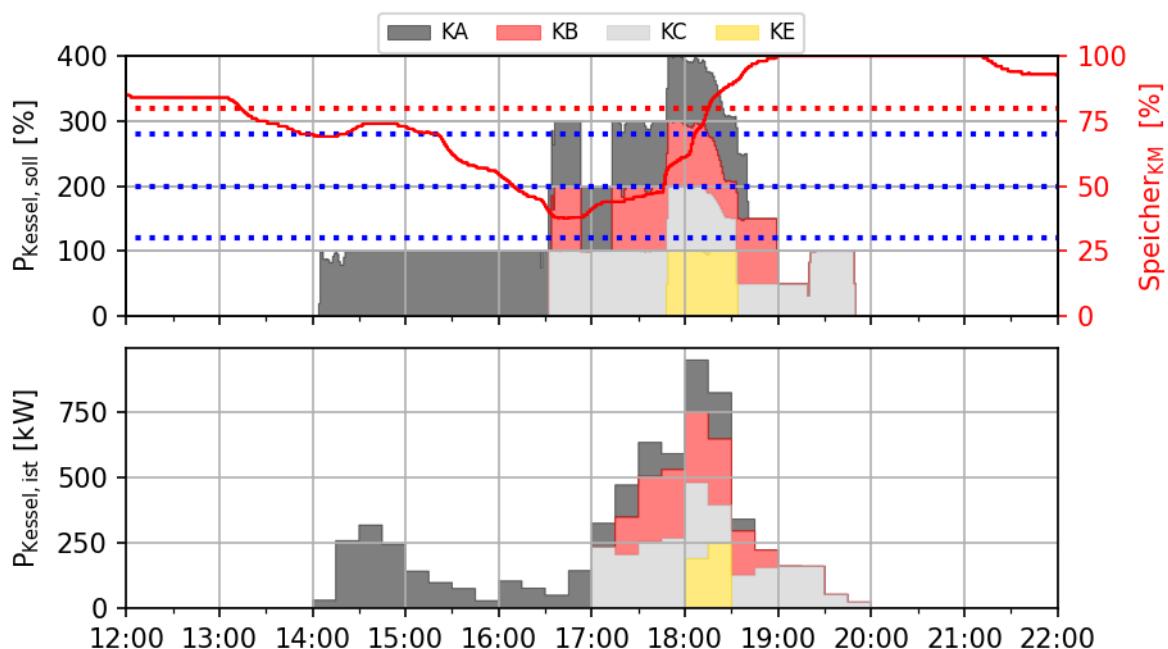


Bild 52 Zuschalten von drei zusätzlichen Kesseln, weil Kessel A unerkannt nicht genügend Wärmeleistung abgab. Dargestellt sind die Sollleistungen der Kessel und der von der Regelung ermittelte und für die Zuschaltung der Kessel relevante Speicherladezustand.
WV Schachen am 5.7.2021 mit allgemeinen Schwellenwerten bei 30, 50 und 70 % (blau gepunktete Linien).

5.1.4.6. Empfehlungen für Kaskaden mit Seriengeräten

Das Zuschalten von Kesseln über allgemeine Schwellenwerte für den Speicherladezustand funktioniert zuverlässig. Allgemeine Zuschaltschwellen für die Holzkessel erlauben die Erweiterung der Kaskade um weitere Holzkessel ohne Veränderungen im Regelkonzept der Kaskade. Sie führen jedoch zu einem Pendeln des Speicherladezustands und lösen damit unnötige Kesselzuschaltungen aus.

Mit individuellen Zuschaltbedingungen für jeden Kessel kann ein unnötiges Zuschalten von Kesseln reduziert werden. Kaskaden mit individuellen Zuschaltbedingungen sind dagegen nicht beliebig erweiterbar und es besteht die Gefahr, dass die einzelnen Zuschaltbedingungen zu nahe beieinander liegen, was ebenfalls vermehrt unnötige Mehrfachzu- und -abschaltungen auslöst.

Zu tief gesetzte Zuschaltschwellen können bei grossen sprunghaften Leistungsbedarfzunahmen zu einer Unterdeckung der Wärmebezüger führen. Eine zu hoch gewählte Zuschaltschwelle für den ersten Kessel kann zu einem periodischen Zu- und Abschalten des Kessels führen. Vom Speicherladezustand abhängige Zuschaltbedingungen sollten somit im Bereich zwischen höchstens 75 % für den ersten Kessel und mindestens 15 % für den letzten Kessel liegen.

Die Regelung der Kaskade sollte das Zuschalten von mehreren Kesseln innerhalb von 30 Minuten in der Regel verhindern, um unnötige Zu- und Abschaltungen zu vermeiden. Mehr als zwei allgemeine Zuschaltschwellenwerte sind deshalb nicht empfehlenswert. Bei Kaskaden mit mehr als zwei Kesseln können mehr als zwei individuelle Zuschaltbedingungen dieses Ziel kaum erfüllen, da der Speicherladezustand bei den untersuchten Anlagen durch die sprunghafte Zunahme des Leistungsbedarfs innerhalb von 30 Minuten regelmässig um mehr als 25 % abnimmt. In der WUEB Roggwil musste deshalb im Übergangs- und Sommerbetrieb für den zweiten und dritten Kessel ein Absenken der Zuschaltbedingungen auf ein tieferes Niveau des Speicherladezustands vorgenommen werden, um die Anzahl Kesselstarts zu begrenzen. Insbesondere auch im Hinblick auf die klimatischen Veränderungen, welche vermehrt zu längeren Warmperioden im Winter führen, müssen solche Anpassungen automatisch erfolgen. Klassischerweise wird für das Umstellen von Regelparametern der Kaskade für kalte oder warme Witterung ein Temperaturfühler für die Umgebungstemperatur gewählt. Es könnte aber z.B. auch die summierte Laufzeit aller installierter Kessel innert der letzten 24 Stunden als Kriterium für das witterungsbedingte Umstellen verwendet werden. Dieser Wert korreliert im WV Schachen gut mit der Umgebungstemperatur (Bild 53). Bei kurzzeitigen extremen Wetterwechseln ist das Kriterium der summierten Laufzeit jedoch ungeeignet. Da immer mehr Gebäude einen niedrigen Heizbedarf aufweisen, ist es schwierig, einen allgemein gültigen Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und Wärmeleistungsbedarf zu definieren.

Das Regelkonzept der Kaskade in der WUEB Schliern basiert auf dem Zuschalten der Kessel nach einem errechneten Wärmeleistungsbedarf. Die bewusst vorgegebenen Zeitfenster für Boilerladungen und Nachtabsenkungen führen bei dieser Anlage aber zu sehr grossen sprunghaften Änderungen des Leistungsbedarfs und damit zu vielen Zuschaltungen. Ob bei diesem Regelkonzept für die Kaskade weniger Starts möglich wären, kann deshalb nicht beurteilt werden.

Im Gegensatz zu Feuerungen mit einer grossen thermischen Trägheit müssen Wärmespeicher bei den in Kaskaden verwendeten Seriengeräten mit geringer Speichermasse keine Speicherreserve für die Aufnahme von Restwärme aufweisen, da diese Kessel bereits kurz nach dem Abschaltbefehl kaum mehr Restwärme abgeben. Die Abschaltbedingungen der Kessel sollten deshalb so gesetzt werden, dass die Kessel so spät wie möglich abschalten, erst wenn der Wärmespeicher voll durchgeladen ist. Ähnlich wie beim Zuschalten sollten die Kessel gestaffelt ausgeschaltet werden, in der Regel mit einer Zeitverzögerung von 30 Minuten vor der nächstfolgenden Abschaltung. Ohne diese Zeitverzögerung würden z.B. die Kessel des WV Schachen alle gleichzeitig abschalten, da sie die Leistung synchron modulieren und infolgedessen nach einer bestimmten Betriebszeit bei Minimalleistung gleichzeitig abschalten.

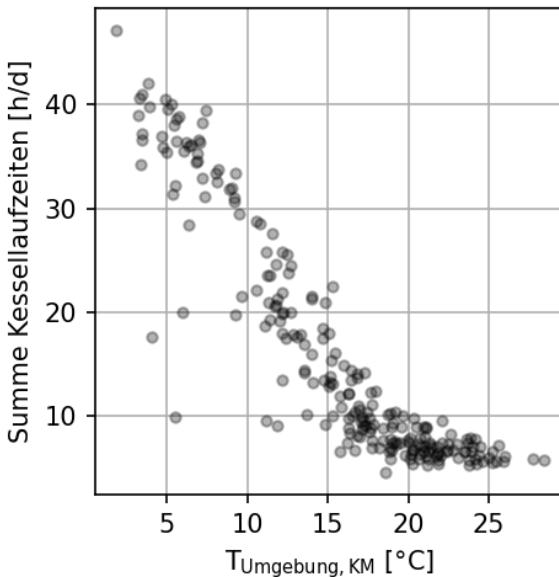


Bild 53 Summierte Laufzeit aller installierter Kessel innert 24 Stunden des WV Schachen in Funktion der Umgebungstemperatur im Tagesmittel.

Zur Optimierung des Betriebs bestehender Anlagen können die Regelparameter nach Analyse des spezifischen Betriebsverhaltens geeignet angepasst werden. Je nach Regelkonzept sind die Einflussmöglichkeiten dabei allerdings begrenzt oder erfordern eine Unterscheidung zwischen Sommer- und Winterbetrieb. Daneben wird folgendes Vorgehen empfohlen, um die Anzahl Kesselstarts zu minimieren:

- Vorlauftemperatur der einzelnen Kessel überprüfen, um Leistungsdefizite zu erkennen.
- Entaschungen kontrolliert planen:
 - Gleichzeitige Entaschung von Kesseln verhindern
 - Bei kalter Witterung oder bei niedrigem Speicherladezustand Zusatzkessel 30 Minuten vor einer Entaschung zuschalten.
- Leistungsmodulation der Kessel ausnutzen:
 - Vor dem Zuschalten von Kesseln soll die Leistung der in Betrieb stehenden Kessel von Teilleistung auf Nennleistung hochgeregelt werden
 - Vor dem Abschalten von Kesseln soll die Leistung der in Betrieb stehenden Kessel von Nennleistung auf Minimalleistung runtergeregelt werden.
- Sprunghafte Änderungen des Leistungsbedarfs der Wärmeabnehmer begrenzen:
 - Boilerladungen auf mehrere Gruppen aufteilen
 - Mehrere Ladefenster für Boilerladungen festlegen
 - Startzeitpunkte der Boilerladegruppen innerhalb des Ladefensters zeitlich staffeln mit Abständen zwischen 30 und 60 Minuten
 - Nachtabsenkungen am Abend und deren Aufhebung am Morgen zeitlich staffeln und nicht zeitgleich mit Startzeitpunkten der Boilerladegruppen legen.

Regelkonzepte für Kaskaden sollten möglichst einfach aufgebaut sein. Unter der Annahme, dass sprunghafte Leistungsbedarfsänderungen in der Regel maximal 25 % bis 50 % der installierten Kesselleistung betragen, sollten in einer Kaskade mit vier Kesseln innerhalb von einer Stunde nie mehr als ein bis zwei Kessel zuschalten. Damit sollte ein einfaches Konzept mit wenigen Zu- und Abschaltbedingungen möglich sein. In unerwarteten Situationen kann das Zuschalten von mehr als zwei Kesseln innerhalb von einer Stunde trotzdem notwendig sein. Um ein Leistungsmanko bei den Wärmeabnehmern in jedem Fall zu vermeiden, wurden die untersuchten Regelkonzepte für Kaskaden, die auf einem einfachen Basiskonzept beruhen, teilweise um mehrere miteinander verknüpfte Zusatzbedingungen erweitert. Damit wird es schwierig, das Zusammenspiel aller Bedingungen zu überblicken und Veränderungen von Regelparametern können unerwartete Folgen haben.

5.1.4.7. Regelung der Kaskade unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Kessellaufzeit

Weitere Indikatoren für den Wärmeleistungsbedarf als Ergänzung zum Speicherladezustand können helfen, ein einfaches und universell einsetzbares Konzept mit wenig Zu- und Abschaltbedingungen zu realisieren, welches auch auf unerwartete Situationen ausreichend schnell reagieren kann. Ein zuverlässiger Indikator kann z.B. die Abweichung zwischen der innerhalb der letzten 12 Stunden durchschnittlichen Anzahl in Betrieb stehender Holzkessel und der momentanen Anzahl in Betrieb stehender Holzkessel sein. In Kombination mit allgemeinen Zuschaltschwellen könnten die oben beschriebenen Nachteile der allgemeinen Zuschaltschwellen behoben werden. Auch der Nachteil von nahe beieinander liegenden individuellen Zuschaltbedingungen wären behoben. Die in Tabelle 20 beschriebenen Zu- und Abschaltschwellen könnten für beliebig erweiterbare Kaskaden verwendet werden, ohne dass weitere Zusatzbedingungen, wie z.B. Regelparameter für kalte oder warme Witterung, notwendig sind. Zudem wäre mit der Information zu den durchschnittlich in Betrieb stehenden Holzkesseln auch ein Konzept mit dem bewusst gleichzeitigen Starten mehrerer Kessel möglich, um den zeitlichen Anteil mit hohen Emissionen zu begrenzen².

Tabelle 20 Konzept für die Regelung einer Kaskade mit allgemeinen Zu- und Abschaltschwellen kombiniert mit der während den letzten 12 Stunden durchschnittlich betriebenen Anzahl Holzkessel und der momentanen Abweichung zur momentanen Anzahl in Betrieb stehender Holzkessel.

Abweichung über 12h	Zuschaltschwellen	
	über Speicherladezustand oder über Speicherfühler	Speicherfühler
Anzahl der in den letzten 12 Stunden durchschnittlich betriebenen Holzkessel minus momentane Anzahl in Betrieb stehender Holzkessel	Unterschreiten der Zuschaltschwelle bei Speicherladezustand	Speicherfühler
zu wenige Holzkessel in Betrieb	70%	$T_{Sp\ 4} < 75\ ^\circ C$
ausgeglichen	30%	$T_{Sp\ 2} < 75\ ^\circ C$
zu viele Holzkessel in Betrieb	–	–
unabhängig von Anzahl Holzkessel in Betrieb	15%	$T_{Sp\ 1} = 79\ ^\circ C$
Anzahl Holzkessel momentan in Betrieb	Abschaltschwellen	
	über Speicherladezustand oder über Speicherfühler	Speicherfühler
	Überschreiten der Abschaltschwelle bei Speicherladezustand	Speicherfühler
1	100%	$T_{Sp\ 5} > 78\ ^\circ C$
≥ 2	90%	$T_{Sp\ 5} > 75\ ^\circ C$
≥ 3	75%	$T_{Sp\ 4} > 75\ ^\circ C$

² Wenn die Anzahl Starts pro Anlage beschränkt wird, müsste an sich auch ein synchroner Start mehrerer Kessel als ein Start bewertet werden, was in der bisherigen Praxis und auch im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt ist.

5.1.5. Erkenntnisse aus den Praxisuntersuchungen

- Die Praxisuntersuchungen zeigen, dass Kaskadenanlagen mit Holzkesseln und Wärmespeichern eine monovalente Wärmeerzeugung mit Energieholz zur Versorgung typischer Fernwärmennetze ohne fossile Zusatzheizung ermöglichen können. Der Einsatz einer geeigneten Regelung kann dabei einen stabilen Betrieb der Holzkessel gewährleisten.
- Die untersuchten Anlagen weisen deutlich mehr als 1000 und bis rund 2500 Starts aller Kessel pro Jahr auf. Bei allen Anlagen sind Massnahmen zur Optimierung der Regelparameter erkennbar, die nachfolgend beschrieben werden. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass die Anzahl Starts damit auf unter 1000 oder gar unter 500 der Gesamtanlage reduziert werden kann.
- Die untersuchten Regelansätze können einen stabilen Betrieb einer Kaskadenanlage ermöglichen, wenn die Regelparameter geeignet eingestellt werden. Nicht ideale Einstellungen können zu einem ungünstigen Betrieb führen. Das ausgeführte Regelkonzept sollte gut nachvollziehbar und die Regeleingriffe sollten einer logischen Priorität bzw. Hierarchie folgen. Eine hohe Komplexität kann die Nachvollziehbarkeit und Einstellung geeigneter Parameter erschweren und ist deshalb zu vermeiden. Die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit sollten als Basis dienen, dass die Regelparameter auf eine geänderte Situation (zum Beispiel durch Ausbau des Fernwärmennetzes oder Ergänzung der Wärmeproduktionsanlage) angepasst werden können und dass dies auch erfolgt. Zur Erweiterung einer Anlage um einen oder mehrere Kessel ist bei der Regelung mit individuellen Zu- und Abschaltbedingungen (Variante 1) eine Anpassung der Regelung erforderlich, während eine nach allgemeinen Zu- und Abschaltschwellen geregelte Anlage (zum Beispiel nach den im Modell untersuchten Varianten 2 und 3) ohne Anpassung der Regelung erweitert werden kann. Daneben zeigen die Konzepte eine unterschiedliche Eignung für einen saisonunabhängigen Betrieb. Bei den untersuchten Anlagen ist der Ansatz mit allgemeinen Zu- und Abschaltschwellen besser geeignet für Einstellungen, die ohne Unterscheidung für Sommer und Winter auskommen, ergeben aber mehr Kesselstarts.
- Aus den Untersuchungen können folgende Ansätze zur Erzielung eines stabilen Betriebs mit Sicherstellung der Wärmeversorgung und Minimierung der Anzahl Starts abgeleitet werden:
 - 1) Die Position der Temperaturfühler im Speicher soll gleichmäßig verteilt sein. Nichterfasste Speichervolumina oberhalb des obersten Temperaturfühlers und unterhalb des untersten Temperaturfühlers sind klein zu halten.
 - 2) Für die Berechnung des Speicherladezustands ist eine Referenztemperatur für den Zustand 100 % («Fühler warm») und eine Referenztemperatur für den Zustand 0 % («Fühler kalt») zu definieren. Die Referenztemperatur 100 % kann geringfügig unter der Kesselvorlauftemperatur gewählt werden, die Referenztemperatur 0 % sollte höchstens 10 K unter dem Sollwert für den Vorlauf des Wärmennetzes gewählt werden, zum Beispiel 60 °C wie von QMH empfohlen. Mit einer tieferen Referenztemperatur für 0 % wird das für die Wärmebezüger nutzbare Speichervolume ungenügend abgebildet, was die bedarfsgerechte Zuschaltung von Kesseln in einer Kaskade erschwert.
 - 3) Das Zu- und Abschalten von mehreren Kesseln sollte wenn möglich nacheinander und nicht gleichzeitig erfolgen, damit die Auswirkung eines einzelnen Kessels von der Regelung beurteilt werden kann, um zu entscheiden, ob ein weiterer Kessel zu- oder abgeschaltet werden soll. Die Modulationsfähigkeit der Kessel sollte ausgenutzt werden.
 - 4) Die periodischen Entaschungen können zu starken Änderungen des Speicherladezustands führen und als Folge davon teilweise den Start von einem oder mehreren Kesseln auslösen, die nur für kurze Betriebsphasen laufen und teilweise vermeidbar wären. Die Anzahl Startvorgänge kann somit durch Optimierung der Regelung reduziert werden. Der Zeitpunkt der Rostentaschung ist so zu steuern, dass kurze Betriebsphasen nach einem Start vor der nächsten Rostentaschung vermieden werden. Dazu kann zum Beispiel als Vorgabe für die Reinigung anstelle einer fixen Betriebsdauer eine Mindest- und eine Maximaldauer gewählt werden (nach Erreichen der Mindestbetriebsdauer erfolgt eine Rostentaschung erst nach Abschaltung des Kessels, nach Erreichen der Maximalbetriebsdauer erfolgt eine Abschaltung des Kessels zur

Rostentaschung). Daneben wird die Anzahl Startvorgänge durch die maximal mögliche Betriebsdauer zwischen den Entaschungen beeinflusst.

- 5) Unerwünschte Lücken in der Wärmeproduktion sollten vermieden werden. Dazu sollte die Regelung der Kaskade rasch erkennen, wenn die Wärmeproduktion von Kesseln ungenügend ist. Zudem sollten die zur periodischen Entaschungsvorgänge nie für mehrere Kessel gleichzeitig erfolgen. Dazu kann in der Regelung vorausschauend berücksichtigt werden, dass zum Beispiel 30 Minuten vor Erreichen der Maximallaufzeit eines Kessels ein weiterer Kessel zugeschaltet wird, falls der Wärmeleistungsbedarf einen weiteren Betrieb des in Kürze abzuschaltenden Kessels erforderlich macht.
- 6) Durch Leistungsmodulation der Kessel kann die Anzahl Starts deutlich reduziert werden. Ideal ist dabei, wenn alle einmal gestarteten Kessel modulierend betrieben werden und die Leistungsmodulation zeitlich unbegrenzt möglich ist. Die Zu- oder Abschaltung eines Kessels soll erst erfolgen, wenn das Potenzial zur Leistungsveränderung durch die Modulation ausgeschöpft ist.
- 7) Boilerladungen sollten nicht zeitgleich, sondern gestaffelt ausgeführt werden, um sprunghafte Bedarfssunahmen zu begrenzen. Bedarfssprünge sollten wenn möglich auf die Nennleistung eines einzelnen Kessels begrenzt werden. Deshalb sollte insbesondere die Boilerladung der grössten Bezüger zeitversetzt mit einem Abstand von 30 bis 60 Minuten starten.
- 8) Zuschaltbedingungen für Kessel sollten auf dem für die Wärmebezüger nutzbaren Speicher-volumen basieren. Die bei den untersuchten Anlagen verwendete Speichermitteltemperatur mit tiefen Referenztemperaturen für 0 % («Fühler kalt») ist deutlich weniger aussagekräftig.
- 9) Die Zuschaltbedingung für den ersten Kessel sollte hoch gewählt werden (z.B. 75 % bezogen auf einen Speicherladezustand nach QMH). Die Zuschaltbedingung für den letzten Kessel sollte nicht tiefer als 15 % des Speicherladezustands betragen, damit Unterdeckung zuverlässig vermieden werden kann.
- 10) Die Abschaltbedingung für den letzten Kessel sollte bei vollständig geladenem Speicher erfolgen, also bei einem Speicherladezustand von 100 %.
- 11) Bei Pelletkesseln mit Pellet-Zwischenbehälter beim Kessel muss der Zwischenbehälter periodisch nachgefüllt werden. Die Befüllung des Zwischenbehälters sollte so erfolgen, dass der Kessel während der Befüllung nicht ausgeschaltet werden muss. Ist dies nicht möglich, sollte der Zwischenbehälter möglichst gross sein.
- 12) Das grösste Potenzial zur Reduktion der Anzahl Starts könnte durch eine Verlängerung der Betriebszeit zwischen Abreinigungen oder durch Kessel ohne periodische Entaschung erreicht werden.

5.2. Teil 2 – Prozessmodellierung

5.2.1. Modellparameter

Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf Kaskadenanlagen, also auf Anlagen mit drei oder mehr Holzkesseln. Da das Modell auch auf Anlagen mit einem oder mit zwei Holzkesseln angewendet werden kann, werden als Vergleichsbasis auch Resultate für Anlagen mit einem und mit zwei Holzkesseln gezeigt. Dabei ist zu beachten, dass die Zu- und Abschaltbedingungen für diese Anlagen nicht optimiert worden sind.

Folgende Modellparameter wurden ausgewählt und in folgenden Bereichen variiert:

- Anzahl der Kessel einer Anlage: 1 bis 4 Kessel
- Periodische Entaschung des Kesselrostes:
 - Ohne periodische Entaschung
 - Mit periodischer Entaschung alle 12 Betriebsstunden
- Speicherkapazität: 30, 45, 60 und 120 Minuten bezogen auf die gesamte installierte Leistung
- Leistungsregelung gemäss Kapitel 4.2.5
- Minimale Kesselleistung bzw. Modulationsbereich der Leistungsregelung: 15 %, 30 %, 50 % und 100 % (100 % minimale Kesselleistung bedeutet, dass keine Leistungsmodulation erfolgt).
- Kaskadenregelung (Kapitel 4.2.4):
 - Der Einfluss von Entaschung, Leistungsmodulation und Speicherkapazität wurde mit der Kaskadenregelung nach Variante 1 und mit Leistungsregelung untersucht.
 - Der Einfluss der Kaskadenregelung (Variante 1, 2 und 3) wurde separat untersucht (Kapitel 5.2.4).
- Wärmeleistungsbedarf
 - Der Einfluss von Entaschung, Leistungsmodulation und Speicherkapazität sowie der Einfluss der drei Varianten der Kaskadenregelung wurde mit dem Wärmeleistungsbedarf gemäss Kapitel 4.2.7 untersucht.
 - Der Einfluss der Glättung des Wärmeleistungsbedarfs wurde separat untersucht (0).
- Eine allfällige Alternierung der Startreihenfolge der Kessel wurde nicht berücksichtigt.

5.2.2. Resultate der Modellberechnungen

Tabelle 21 zeigt die Anzahl jährlicher Starts für Anlagen mit 1 bis 4 Kessel. Die Spalten im linken Bereich der Tabelle zeigen die Resultate für Kessel, bei denen keine periodische Entaschung des Verbrennungsrostes notwendig wäre. Die Spalten im rechten Bereich zeigen die Resultate für Kessel bei denen nach 12 Betriebsstunden eine Entaschung erfolgt.

Im oberen Teil der Tabelle ist die jährliche Anzahl Starts pro Kessel dargestellt, im unteren die Anzahl Starts der Gesamtanlage, also der Summe aller Kesselstarts. Die jährliche Anzahl Starts pro Kessel entspricht einem Mittelwert unter der Annahme, dass alle Kessel die gleiche Anzahl Starts pro Jahr aufweisen.

Die Modellrechnungen wurden mit dem in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Wärmeleistungsbedarf durchgeführt, dessen gemessene Tageslastprofile ausgeprägte Leistungsspitzen aufweisen. Dieses Bedarfsprofil ist somit für die Regelung der Kaskade sehr anspruchsvoll gewählt.

Im Anschluss an Tabelle 21 sind die Resultate zusätzlich in zwei Sets von Grafiken wie folgt visualisiert:

- Bild 54 zeigt die jährliche Anzahl Starts in Funktion der Speicherkapazität mit der minimalen Kesselleistung als Scharparameter. Die y-Achse links zeigt die jährliche Anzahl Starts der Gesamtanlage, die y-Achse rechts die jährliche Anzahl Starts pro Kessel.
- Bild 55 und Bild 56 zeigen die jährliche Anzahl Starts als Balkendiagramme in Funktion der minimalen Kesselleistung, wobei die jährliche Anzahl Starts für Kessel ohne Entaschung (blau) und für Kessel mit Entaschung (blau plus rot) unterschieden werden. Die rot dargestellte Differenz entspricht somit der jährlichen Anzahl Starts, die zusätzlich wegen der für die Entaschung notwendigen Unterbrüche auftreten.

Starts pro Kessel		Kessel ohne Entaschung				Kessel mit Entaschung			
Anzahl Kessel	Q _{min} /Q _{nenn}	Speicherkapazität				Speicherkapazität			
		30 Min	45 Min	60 Min	120 Min	30 Min	45 Min	60 Min	120 Min
1	15%	1127	595	356	207	1854	1281	960	699
	30%	1589	1019	710	363	1986	1445	1119	752
	50%	2385	1728	1314	721	2567	1921	1520	937
	100%	3435	2757	2261	1391	3493	2797	2335	1461
2	15%	195	101	59	3	694	543	476	401
	30%	357	227	179	105	761	601	525	419
	50%	689	498	414	195	949	739	638	451
	100%	1595	1198	934	513	1755	1332	1103	661
3	15%	212	103	69	16	621	487	440	391
	30%	330	189	119	52	660	522	459	397
	50%	457	306	231	127	722	559	503	393
	100%	1313	832	592	358	1382	933	737	480
4	15%	207	146	71	2	631	529	474	388
	30%	364	247	181	58	700	580	515	390
	50%	533	402	312	143	779	638	565	421
	100%	1167	806	623	381	1282	932	771	519

Starts der Gesamtanlage		Kessel ohne Entaschung				Kessel mit Entaschung			
Anzahl Kessel	Q _{min} /Q _{nenn}	Speicherkapazität				Speicherkapazität			
		30 Min	45 Min	60 Min	120 Min	30 Min	45 Min	60 Min	120 Min
1	15%	1127	595	356	207	1854	1281	960	699
	30%	1589	1019	710	363	1986	1445	1119	752
	50%	2385	1728	1314	721	2567	1921	1520	937
	100%	3435	2757	2261	1391	3493	2797	2335	1461
2	15%	390	202	118	6	1388	1086	952	802
	30%	714	454	358	210	1522	1202	1050	838
	50%	1378	996	828	390	1898	1478	1276	902
	100%	3190	2396	1868	1026	3510	2664	2206	1322
3	15%	636	309	207	48	1863	1461	1320	1173
	30%	990	567	357	156	1980	1566	1377	1191
	50%	1371	918	693	381	2166	1677	1509	1179
	100%	3939	2496	1776	1074	4146	2799	2211	1440
4	15%	828	584	284	8	2524	2116	1896	1552
	30%	1456	988	724	232	2800	2320	2060	1560
	50%	2132	1608	1248	572	3116	2552	2260	1684
	100%	4668	3224	2492	1524	5128	3728	3084	2076

Tabelle 21 Anzahl jährlicher Starts pro Kessel (oben) und der Gesamtanlage (unten).

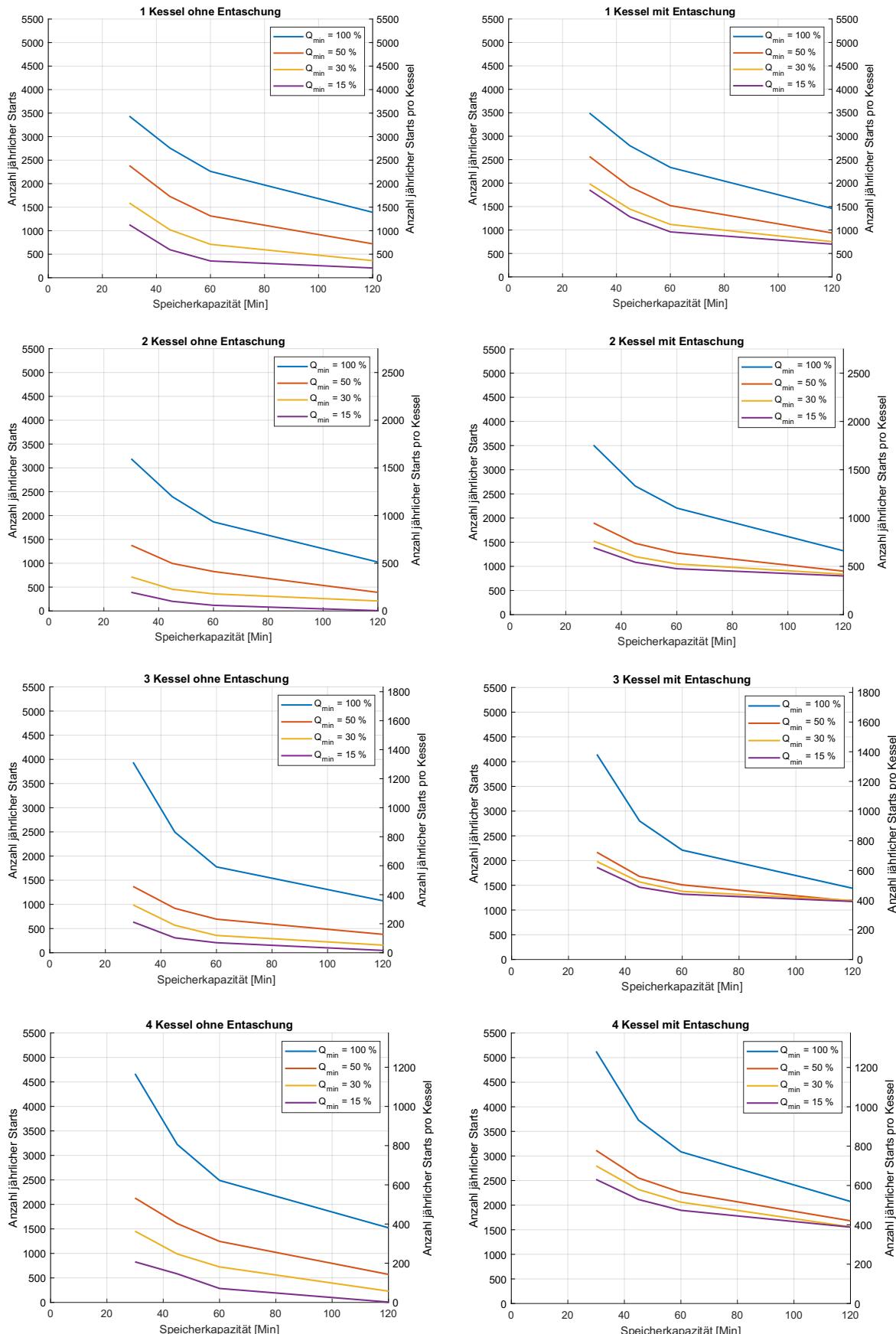


Bild 54 Anzahl jährlicher Starts in Funktion der Speicherkapazität und der minimalen Kesselleistung für 1 bis 4 Kessel (v.o.n.u.).
Links: Kessel ohne periodische Entaschung, rechts: mit periodischer Entaschung alle 12 h.

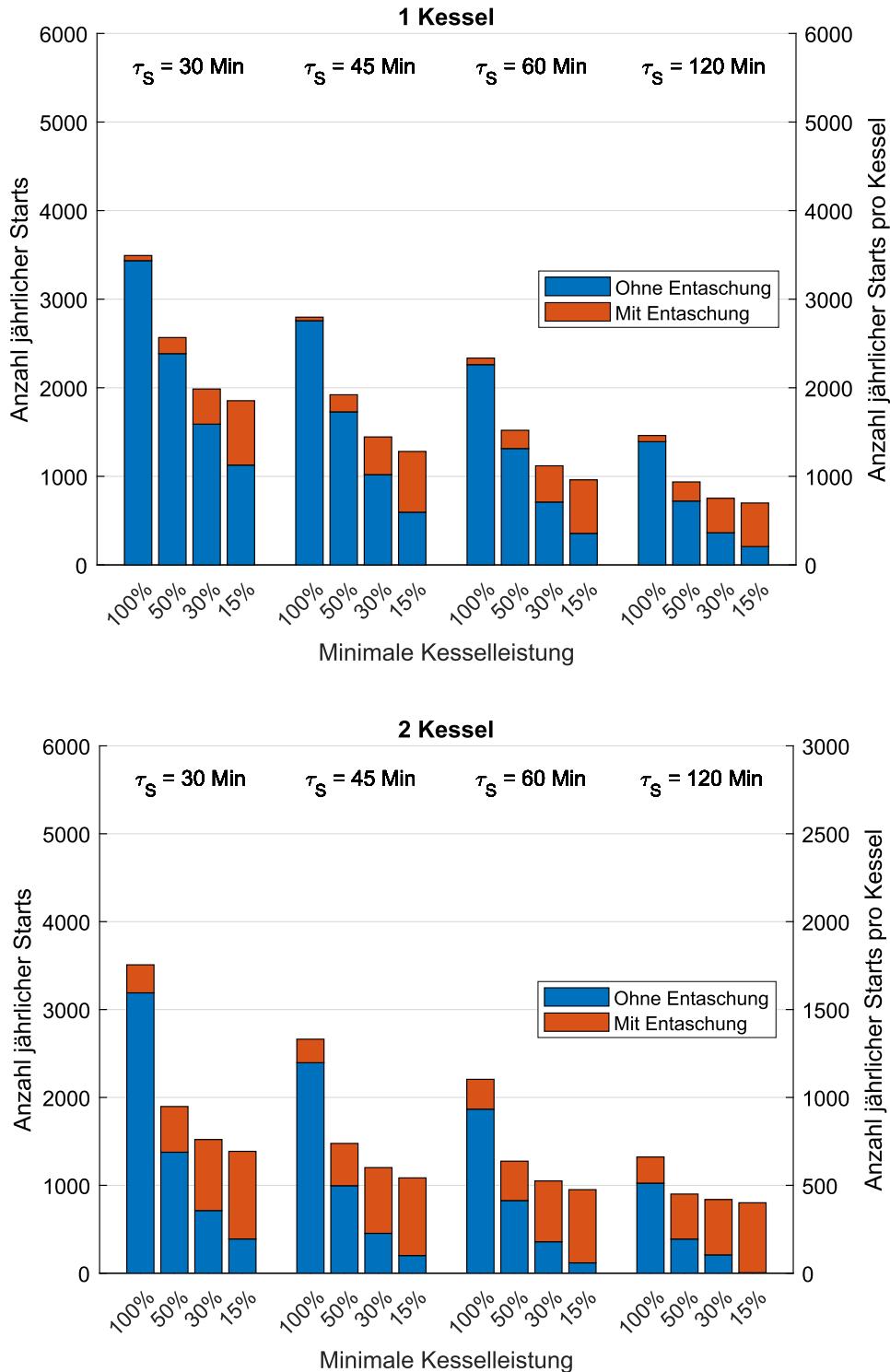


Bild 55 Anzahl jährlicher Starts in Funktion der minimalen Kesselleistung und der Speicherkapazität für Anlagen mit 1 Kessel (oben) und 2 Kessel (unten).

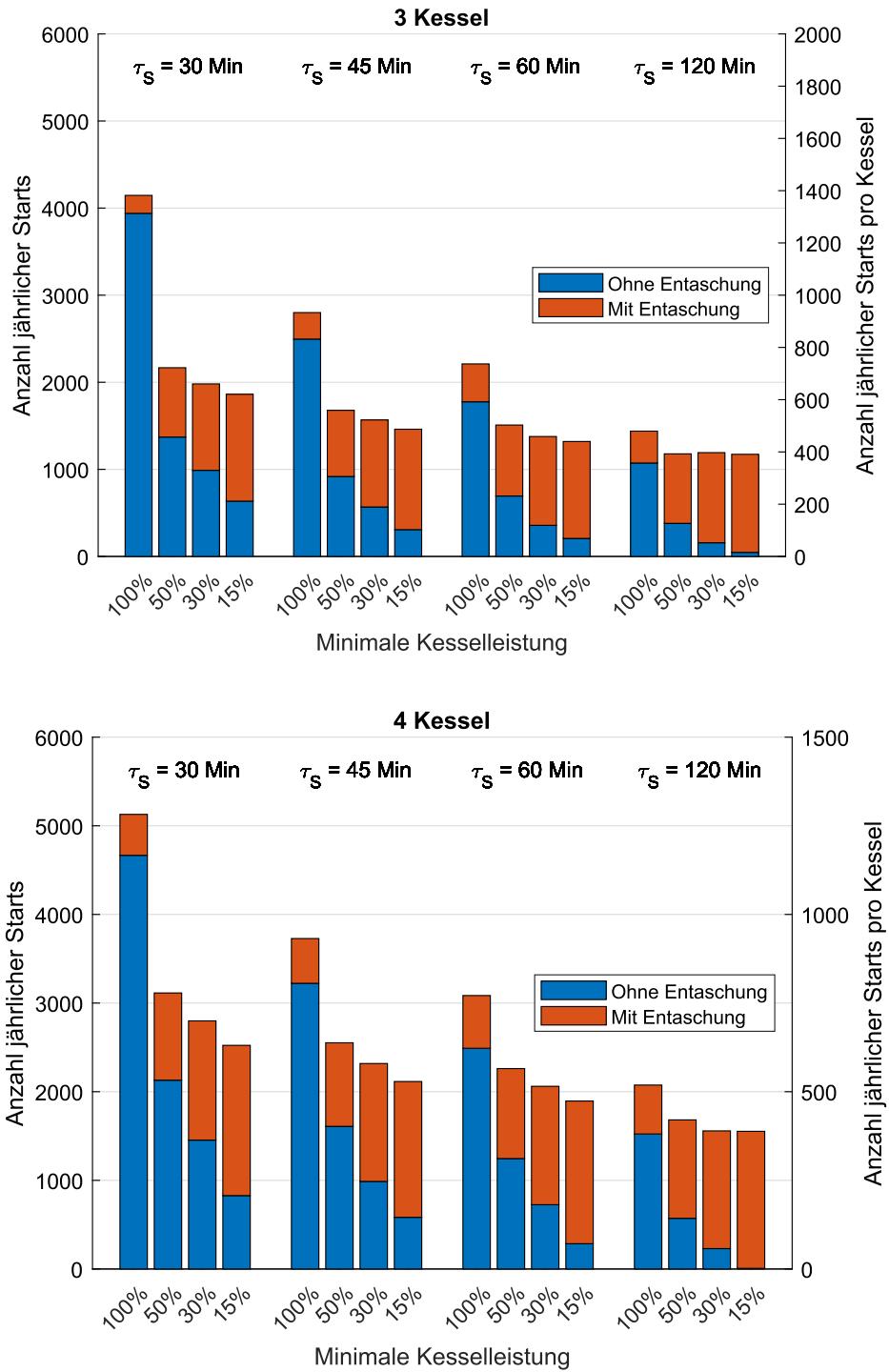


Bild 56 Anzahl jährlicher Starts in Funktion der minimalen Kesselleistung und der Speicherkapazität für Kaskadenanlagen mit 3 Kessel (oben) und 4 Kessel (unten).

5.2.3. Einfluss von Entaschung, Leistungsmodulation und Speicherkapazität

In diesem Kapitel wird die Kaskadenregelung nach Variante 1 für Kaskaden mit drei und vier Kesseln vorausgesetzt und damit der Einfluss folgender Parameter untersucht:

- Periodische Entaschung alle 12 Stunden (mit/ohne)
- Leistungsmodulation zwischen 50 % und 100 % der Kesselnenneleistung (mit/ohne)
- Speicherkapazität 60 Minuten (Varianten 120, 30, 40 Minuten)

Einfluss der periodischen Entaschung:

- Ohne periodische Entaschung würden Kaskadenanlagen mit drei Kesseln und Leistungsmodulation bis 50 % rund 700 jährliche Starts der Gesamtanlage und 230 Starts pro Kessel aufweisen. Mit periodischer Entaschung steigt die Anzahl auf total 1500 Starts oder 500 Starts pro Kessel.
- Eine Kaskade mit vier Kesseln verursacht ohne periodische Entaschung total rund 1250 Starts oder 310 Starts pro Kessel. Mit periodischer Entaschung steigt die Anzahl auf 2260 Starts oder 565 Starts pro Kessel.
- Die Entaschung verursacht somit bei drei Kesseln etwas mehr als die Hälfte (54 %) und bei vier Kesseln etwas weniger als die Hälfte (45 %) der Starts. Dies bedeutet gleichzeitig, dass die periodische Entaschung die Anzahl Starts bei drei Kesseln um rund 120 % und bei vier Kesseln um rund 80% erhöht.
- Wenn die Kessel keine Leistungsmodulation aufweisen, wird die Anzahl Starts deutlich erhöht, wie im nächsten Punkt ausgeführt wird. Wegen der häufigeren Abschaltungen von Kesseln, nimmt der Einfluss der zusätzlichen Starts zur periodischen Entaschung ab, sodass die Entaschungen für Anlagen mit drei und vier Kesseln noch rund 20% der jährlichen Starts verursachen.
- Eine Erhöhung der Anzahl Kessel von drei auf vier führt zu einer Zunahme der totalen Anzahl Starts von rund 80 % und der Anzahl Starts pro Kessel um rund 35 %.

Einfluss der Leistungsmodulation:

- Ohne Leistungsmodulation steigt die Anzahl Starts um rund 40 %, nämlich bei drei Kesseln von 1500 auf 2200 sowie bei vier Kesseln von 2260 auf 3100. Mit einer Leistungsmodulation bis 50 % kann die Anzahl Starts somit um rund 30 % reduziert werden.
- Mit einer Erweiterung der Leistungsmodulation bis 30 % oder bis 15 % kann die jährliche Anzahl Starts pro Erweiterungsstufe um weniger als 10 % reduziert werden.
- Bei Anlagen ohne periodische Entaschung ist die Reduktion der Anzahl Starts durch Leistungsmodulation deutlicher ausgeprägter und beträgt durch Leistungsmodulation bis 30 % oder bis 15 % rund 50 % pro Erweiterungsstufe.

Einfluss der Speicherkapazität:

- Eine Verdoppelung der Speicherkapazität von 60 Minuten auf 120 Minuten vermindert die jährliche Anzahl Starts der Gesamtanlage mit drei Kesseln mit periodischer Entaschung und mit Leistungsmodulation bis 50 % von rund 1500 auf 1180 und mit vier Kesseln von rund 2260 auf 1680 und somit um rund 25 %.
- Im Gegensatz führt eine Halbierung der Speicherkapazität von 60 Minuten auf 30 Minuten zu einer Erhöhung der Anzahl Starts um rund 40 %.
- Eine Verminderung der Speicherkapazität von 60 Minuten auf 40 Minuten, was der aktuellen Empfehlung von QMH entspricht, erhöht die jährliche Anzahl Starts um rund 20 %.
- Bei Anlagen ohne Leistungsmodulation ist der Einfluss der Speicherkapazität ausgeprägter: Eine Verdoppelung der Speicherkapazität von 60 Minuten auf 120 Minuten vermindert die Anzahl Starts in dem Fall um rund 35 %, eine Halbierung erhöht die Anzahl um rund 90 % für drei und um rund 65 % für vier Kessel. Eine Speicherkapazität von 40 Minuten, entsprechend der aktuellen Empfehlung von QMH, erhöht die Anzahl Starts bei drei Kesseln um rund 45 % und bei vier Kesseln um 35 %.
- Bei Anlagen ohne Entaschung ist der Einfluss der Speicherkapazität noch etwas grösser.

Fazit:

- Das Modell weist für Kaskadenanlagen mit periodischer Entaschung und 60 Minuten Speicherkapazität sowie einer Leistungsmodulation bis 50 % bei drei Kesseln rund 1500 und bei vier Kesseln rund 2260 jährliche Starts der Gesamtanlage voraus, was rund 500 bzw. 565 Starts pro Kessel entspricht.
- Ohne Leistungsmodulation bis 50 % resultieren rund 40 % höhere Werte, die Anzahl Starts wird durch die Leistungsmodulation also um rund 30 % reduziert.
- Bei Kaskadenanlagen mit drei und vier Kesseln und periodischer Entaschung alle 12 Betriebsstunden verursacht die Entaschung rund die Hälfte der jährlichen Starts, nämlich bei drei Kesseln rund 54 % und bei vier Kesseln rund 45 %.
- Eine Verdoppelung der Speicherkapazität vermindert die jährliche Anzahl Starts einer Anlage mit periodischer Entaschung um rund 25 %. Eine Halbierung der Speicherkapazität erhöht sie um rund 45 %. Eine Verminderung von 60 Minuten auf 40 Minuten, was der aktuellen Empfehlung von QMH entspricht, erhöht die Anzahl Starts um rund 20 %.
- Das Modell beschreibt die Versorgung eines Wärmeverbrauchsprofils mit ausgeprägten Bedarfsspitzen, weshalb die Anzahl Starts bei einem ausgeglicheneren Verbrauchsprofil kleiner ausfallen kann. Demgegenüber setzt das Modell eine ideale Schichtung des Speichers und weitere Vereinfachungen voraus, deren Nichterfüllung die Anzahl Starts in der Praxis erhöhen kann.
- Aus dem Modell können folgende Forderungen zur Verminderung der Anzahl Starts abgeleitet werden, wobei die Reihenfolge der Priorität bzw. der Wirksamkeit der Massnahme entspricht:
 1. Optimierung der Entaschungsvorgänge
 2. Anwendung einer zeitlich unbegrenzten Leistungsmodulation auf alle Kessel der Kaskade
 3. Erhöhung der Speicherkapazität (vor allem bei Anlagen ohne Leistungsmodulation).

5.2.4. Einfluss der Kaskadenregelung

Tabelle 22 zeigt die verwendeten Modellparameter, mit denen der Einfluss der drei in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Varianten der Kaskadenregelung untersucht wurden.

Tabelle 23 zeigt die Resultate zum Variantenvergleich der drei Regelkonzepte.

Ein Teil der Resultate ist zusätzlich in Bild 57 visualisiert.

Tabelle 22 Modellparameter der Simulation der drei Varianten der Kaskadenregelung.

Modellparameter	Werte/Variante
Variante 1	Kaskadenregelung mit individuellen Zu- und Abschaltkriterien
Variante 2	Kaskadenregelung mit Berücksichtigung der Anzahl während den letzten 12 Stunden betriebener Kessel
Variante 3	Kaskadenregelung mit einem Proportional-Differential-Regler
Mit Leistungsmodulation	Kessel mit einer Kesselminimalleistung von $\dot{Q}_{K,min} = 50\%$
Ohne Leistungsmodulation	Kessel mit einer Kesselminimalleistung von $\dot{Q}_{K,min} = 100\%$
Mit Entaschung	Kessel mit einer periodischen Entaschung alle 12 Betriebsstunden
Ohne Entaschung	Kessel ohne periodische Entaschung
Speicherkapazität	60 Minuten
Wärmeleistungsbedarf	Bedarfsprofile gemäss Kapitel 4.2.7

Tabelle 23 Vergleich der Anzahl jährlicher Starts pro Kessel für die drei Varianten der Kaskadenregelung.

Starts pro Kessel		Kessel ohne Entaschung			Kessel mit Entaschung		
Anzahl Kessel	Q_{min}/Q_{nenn}	Regelvariante			Regelvariante		
		1	2	3	1	2	3
1	50%	1314	1439	1557	1520	1516	1643
	100%	2261	1885	3234	2335	1727	2991
2	50%	414	319	337	638	663	583
	100%	934	688	592	1103	811	767
3	50%	231	151	187	503	437	464
	100%	592	411	431	737	586	596
4	50%	312	131	145	565	406	409
	100%	623	262	252	771	479	453

Einfluss der Kaskadenregelung:

- Eine Kaskadenanlage mit periodischer Entaschung und Leistungsmodulation und Regelung nach Variante 1 verursacht wie in 5.2.3 beschrieben mit drei Kesseln rund 500 Starts pro Kessel oder total 1500 Starts und mit vier Kesseln rund 565 Starts pro Kessel oder total 2260 Starts. Eine Kaskadenregelung nach Variante 2 reduziert die Anzahl Starts bei drei Kesseln von 503 auf 437 um 13 % und bei vier Kesseln von 565 auf 406 oder um 28 %. Eine Regelung nach Variante 3 reduziert die Anzahl Starts bei drei Kesseln um 8 % und bei vier Kesseln um rund 28 %.
- Bei Kaskadenanlagen ohne Leistungsmodulation ist der Einfluss der Regelvariante grösser und die Varianten 2 und 3 erzielen eine ausgeprägtere Verbesserung gegenüber der Variante 1 von rund 20 % bei drei und knapp 40 % bei vier Kesseln.
- Bei Kesseln ohne periodische Entaschung ist der prozentuale Einfluss des Regelkonzeptes deutlich grösser. Bei vier Kesseln wird sowohl mit Variante 2 als auch mit Variante 3 mit und ohne Leistungsmodulation eine Reduktion der Anzahl Starts um mehr als 50 % erzielt.

Fazit:

- Die Kaskadenregelungen 2 (Schaltbedingungen aufgrund der letzten 12 Stunden) und 3 (PD-Regler) ermöglichen bei den im Modell untersuchten Bedingungen für Kaskaden mit drei und vier Kesseln eine Reduktion der Anzahl Starts im Vergleich zur Variante 1 mit individuellen Zu- und Abschaltkriterien.
- Die Verbesserung ist bei vier Kesseln mit 28 % ausgeprägter als bei drei Kesseln mit 8 % bis 13 %.
- Die relative Verbesserung ist bei Kesseln ohne Leistungsmodulation ausgeprägter als bei Kesseln mit Leistungsmodulation und erreicht bei vier Kesseln über 50 % Reduktion der Anzahl Starts.

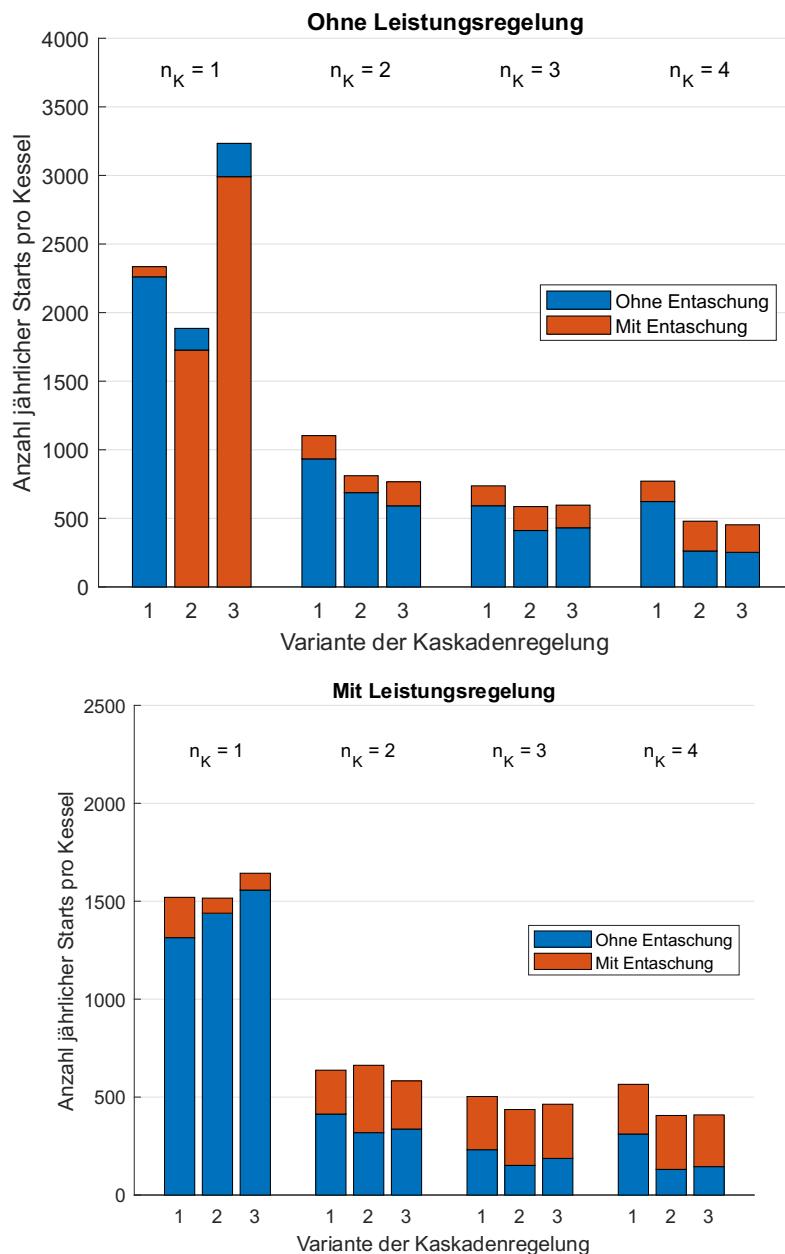


Bild 57 Anzahl jährlicher Starts pro Kessel der drei untersuchten Varianten der Kaskadenregelung für Anlagen ohne Leistungsregelung (oben) und mit Leistungsregelung (unten).

5.2.5. Einfluss von Lastspitzen

Ausgeprägte Lastspitzen im Tageslastprofil stellen hohe Anforderungen an die Kaskadenregelung. Um den Einfluss der Lastspitzen auf das Systemverhalten aufzuzeigen, wird das Profil des in Kapitel 4.2.7 beschriebenen Wärmeleistungsbedarfs mit einer gleitenden Mittelwertbildung unterschiedlich stark geglättet. Zur Anwendung kommen Mittelfenster zwischen 1 h und 8 h. Je länger das Mittelfenster ist, desto schwächer werden die Lastspitzen (Bild 58). Diese Untersuchung beschränkt sich auf Kaskadenanlagen mit mehr als zwei Kesseln.

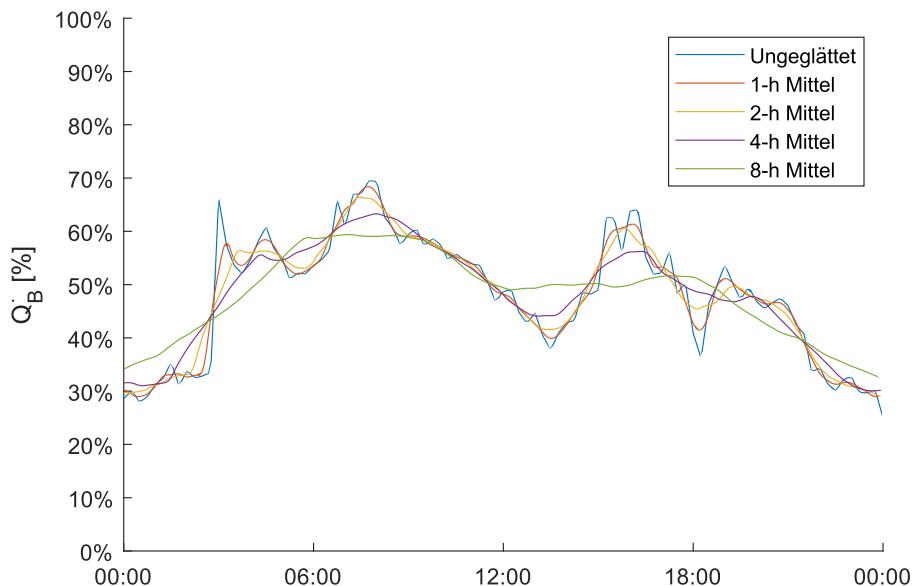


Bild 58 Einfluss der gleitenden Mittelung auf die Lastspitzen im Tageslastprofil des Wärmeleistungsbedarfs.

Bild 59 zeigt die Simulationsresultate der gleitenden Mittelwertbildung für Kaskadenanlagen mit drei bzw. vier Kesseln.

Einfluss der Lastspitzen:

- Bei der Referenzsituation mit einer Speicherkapazität von einer Stunde bringt eine Glättung der Lastspitzen erst ab einer gleitenden Mittelung von 2 Stunden eine Verminderung der jährlichen Anzahl Starts um rund 25 %. Eine gleitende Mittelung von 4 h oder 8 h bringt keine weitere Verminderung.
- Bei einer Speicherkapazität von 120 Minuten ist keine Auswirkung der gleitenden Mittelung erkennbar.
- Bei einer Speicherkapazität von 30 Minuten führt die gleitende Mittelung zu einer leichten Verminderung der jährlichen Anzahl Starts. Bei einer gleitenden Mittelung von 4 h beträgt die Verminderung rund 6 %, bei einer Mittelung von 8 h beträgt die Verminderung rund 27 %.

Fazit:

- Bei Kaskadenanlagen mit einer Speicherkapazität von 60 Minuten oder weniger führt eine Verminderung der Lastspitzen zu einer Reduktion der jährlichen Anzahl Starts. Im untersuchten Beispiel ist für einen relevanten Effekt von rund 25 % eine Glättung von 2 Stunden erforderlich, während eine weitere Glättung kaum noch eine Verbesserung bringt.
- Bei einer Speicherkapazität von 120 Minuten ist kein Einfluss einer Glättung der Lastspitzen erkennbar. Die grosse Speicherkapazität reicht damit aus, die Lastspitzen zu glätten.

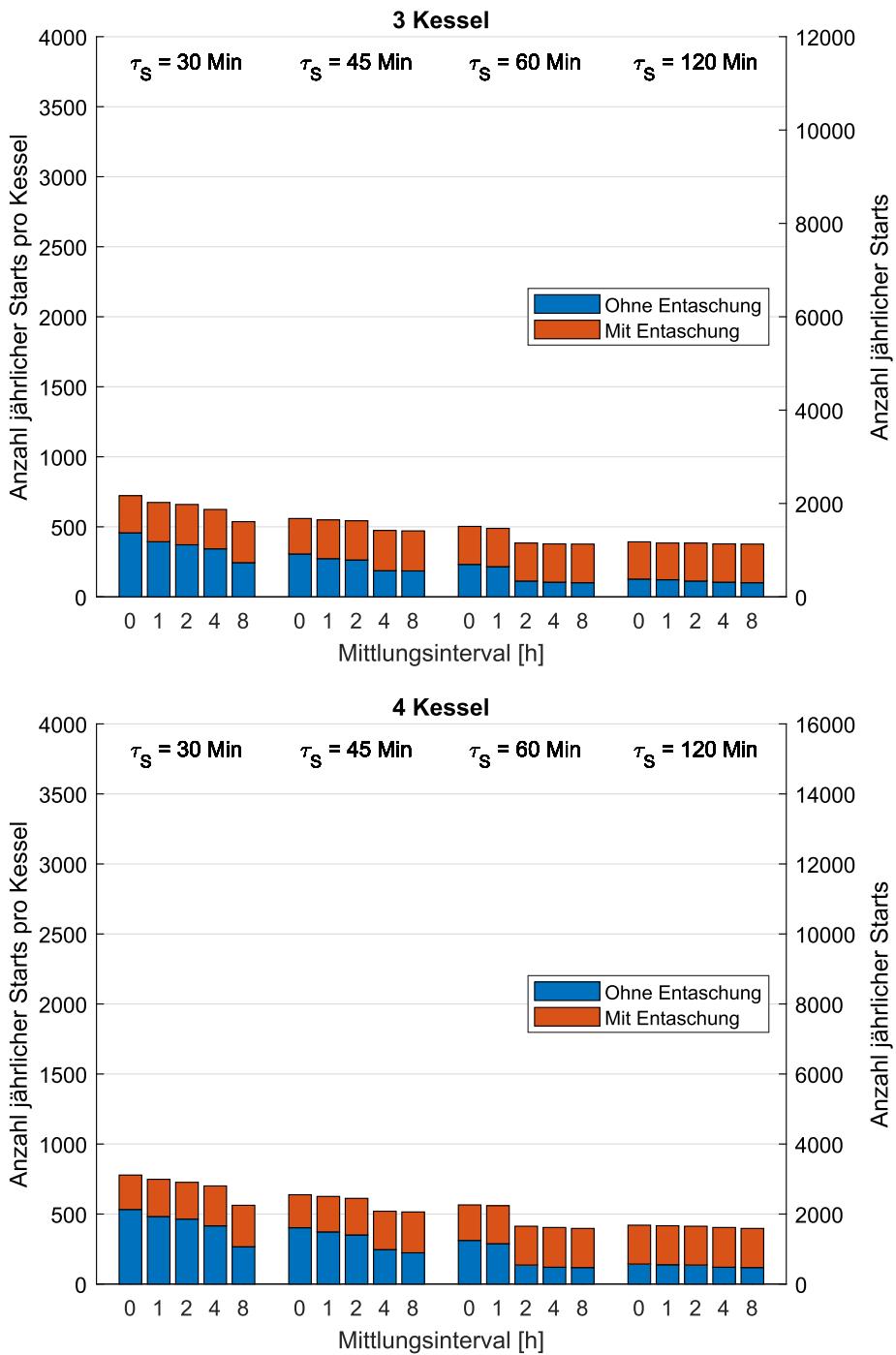


Bild 59 Anzahl jährlicher Starts in Funktion der gleitenden Mittelung der Lastspitzen für Kaskadenanlagen und abhängig von der Speicherkapazität mit drei Kesseln (oben) und mit vier Kesseln (unten). Links: Anzahl jährlicher Starts pro Kessel, rechts: Anzahl jährlicher Starts der Gesamtanlagen.

5.2.6. Vergleich mit Praxisuntersuchung

Tabelle 24 zeigt einen Vergleich zwischen den auf den drei Praxisanlagen erhobenen Betriebsdaten mit den Resultaten der Modellrechnungen. Bei den in diesem Vergleich verwendeten Modellrechnungen wurden individuelle Zu- und Abschaltbedingungen für jeden Kessel verwendet, die nicht mit den Einstellungen auf den Praxisanlagen übereinstimmen. Die Anzahl Kesselstarts kann daher nur qualitativ verglichen werden. Der Vergleich zeigt jedoch, dass die Größenordnung der Resultate des Modells plausibel ist.

Beim WV Schachen zeigt sich die beste Übereinstimmung mit den Betriebsdaten bis zum Sommer 2021, in dieser Zeit wurde der WV Schachen allerdings mit allgemeinen Zu- und Abschaltschwellen für die Kessel betrieben. Nach dem Sommer 2021 wurde die Regelung des WV Schachen auf individuelle Zu- und Abschaltbedingungen umgestellt, wie sie die Modellrechnungen verwendete. Danach wurden auf der Praxisanlage die Anzahl Starts deutlich reduziert, obwohl die Bezugsspitzen des Wärmenetzes mit zeitgleich angeschlossenen neuen Bezügern deutlich angestiegen waren. Diese Beobachtung kann anhand der Modellrechnungen nicht nachvollzogen werden.

Der Vergleich mit der WUEB Roggwil zeigt eine gute Übereinstimmung, das Regelkonzept der Kaskade ist auch am nächsten zu dem der Modellrechnung.

Beim Vergleich mit der WUEB Schliern zeigt sich die grösste Abweichung, da bei dieser Anlage das Regelungskonzept am stärksten vom Modell abweicht und bewusst hohe Lastspitzen verursacht werden. Eine Glättung der Lastspitzen über 60 Minuten ergab bei den Modellrechnungen eine Reduktion der Anzahl Kesselstarts um 25 %. Mit einer entsprechenden Reduktion ergibt sich eine deutliche Annäherung der Resultate im Vergleich zwischen dem Modell und der WUEB Schliern. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus der Praxisuntersuchung in Kapitel 5.1.3, wo eine Staffelung der grössten Bezüger mit einem Versatz von 30 bis 60 Minuten empfohlen wird.

Ein zusätzlicher wesentlicher Unterschied zwischen den Modellrechnungen und den Praxisanlagen ist die Leistungsmodulation der Kessel, welche im Modell als optimal und zeitlich unbegrenzt angenommen wird. Wie in Kapitel 5.1.2.5 gezeigt wurde, werden die Praxisanlagen dagegen nur während einer begrenzten Zeitdauer modulierend betrieben. Gründe dafür sind zu schnell eingestellte Regelkreise, eingestellt Freigabe der Modulation und Zeitbegrenzungen z.B. für den Betrieb bei Minimalleistung.

Tabelle 24 Vergleich zwischen den auf den drei Praxisanlagen erhobenen Betriebsdaten aus Tabelle 19 und den Resultaten der Modellrechnungen aus Tabelle 21 mit individuellen Zuschaltbedingungen für jeden Kessel, automatischer Entaschung, Leistungsmodulation von 50 % bis 100 % und Speicherkapazität:

WV Schachen: Speicherkapazität 45 Minuten

WUEB Roggwil: Speicherkapazität 60 Minuten, effektiv 73 Minuten

WUEB Schliern: Speicherkapazität 60 Minuten, effektiv 68 Minuten.

*Hochrechnung von 136 Tagen auf ein Betriebsjahr. n.m.: nicht modelliert.

Anlage	Anzahl Kessel	Praxisuntersuchung			Modellrechnung	
		Zu- und Abschaltbedingungen	Starts pro Anlage und Jahr	Starts pro Kessel und Jahr	Starts pro Anlage und Jahr	Starts pro Kessel und Jahr
WV Schachen bis 28.6.2021	4	allgemein	2'469	617	2'550	640
WV Schachen ab 28.6.2021	4	individuell	(1'377)*	(344)*	n.m.	n.m.
WUEB Roggwil	3	individuell	1'835	611	1'500	565
WUEB Schliern	2	individuell	2'060	1'030	1'276	638

5.2.7. Erkenntnisse aus der Prozessmodellierung

5.2.7.1. Allgemeine Erkenntnisse

Mit einem geeigneten Regelansatz kann der Anlagenbetrieb in Bezug auf Anzahl Starts dadurch optimiert werden, dass Starts vermieden werden, die durch optimalen Betrieb mit Ausschöpfung der Leistungsmodulation und der Speicherkapazität vermeidbar wären. Ein idealer Betrieb ist in der Praxis nicht möglich und er kann auch durch eine Modellierung nur angenähert werden. Die Modellierung ermöglicht aber die Untersuchung der Wirkung der wichtigsten Einflussfaktoren mit einer Sensitivitätsanalyse. Zusätzlich kann mit der Modellierung der Einfluss des mit der Praxisuntersuchung erkannten Optimierungspotenzials quantifiziert werden.

Die Resultate der Modellierung zeigen, dass folgende Massnahmen zu einem stabilen Betrieb mit minimaler Anzahl Starts beitragen können. Ein Teil der Massnahmen ist bei den untersuchten Anlagen bereits berücksichtigt und es liegen zu einzelnen Massnahmen Erfahrungen aus den Praxiserhebungen vor, die nachfolgend ebenfalls erwähnt sind:

1. Um Kesselstarts mit anschliessend nur kurzer Laufzeit zu vermeiden, sollte in der Regel zuerst die Auswirkung eines zugeschalteten Kessels abgewartet werden, bevor ein weiterer Kessel zugeschaltet wird. Im Modell konnten 60 Minuten Zeitverzögerung zwischen zwei Einschaltbefehlen ohne negative Auswirkung auf die Wärmeerzeugung aber mit deutlicher Reduktion der Anzahl Starts im Vergleich zu 30 Minuten Verzögerung eingesetzt werden. Daneben wird empfohlen, dass die Bewertungsdauer zur Alternierung der Kessel mit dem Ziel ähnlicher Betriebsstunden so lange wie betrieblich möglich gewählt wird, da auch eine Alternierung zu zusätzlichen Kaltstarts führen kann. Im Weiteren besteht die Möglichkeit, dass in einem Betrieb mit Regelung nach einem Sollwert des Speicherladezustands der Speicherladezustand weiter ansteigt, auch wenn ein Kessel bei Teillast betrieben wird. Für diesen Fall kann in der Regelung vorgesehen werden, dass die Betriebsdauer des oder der Kessel verlängert wird, bis der Speicher ganz geladen ist, da damit die Anzahl Startvorgänge weiter reduziert werden kann.
2. Die im Modell untersuchten Regelkonzepte ermöglichen beim Einsatz für typische Fernwärmenetze mit Gebäudewärme und Warmwasser eine nahezu vollständige Ausnutzung der verfügbaren Wärmespeicherkapazitäten. Dies bedeutet, dass die Minimal- und Maximalwerte für den Speicherladezustand nahe bei 0 % und 100 % der Speicherkapazitäten gesetzt werden können. So wird im Modell mit Schwellenwerten von 10 % und 90 % die Anzahl Starts im Vergleich zu konservativeren Schaltwerten von 20 % und 80 % deutlich reduziert, ohne dass für das untersuchte Wärmebedarfsprofil der Speicher vollständig entleert wird. Dies ist allerdings im Widerspruch zu der Analyse der Betriebsdaten an zwei untersuchten Praxisanlagen, wo eine Zuschaltbedingung unter 20 % zu einer Unterdeckung führte. Für die Schwellenwerte ist damit abzuleiten, dass sie grundsätzlich so nah wie möglich an den Extremwerten zu wählen sind, aber einen anlagenspezifischen Sicherheitsabstand zur Vermeidung eines Defizits berücksichtigen müssen.
3. Eine weitere Optimierung des Betriebs ist möglich durch Ausschöpfung des Potenzials zur Leistungsmodulation eines Kessels oder mehrerer Kessel. Zudem sollte das Zuschalten von Kesseln und die Leistungsmodulation aufeinander abgestimmt sein, damit kein Zusatzkessel gestartet wird, solange die zugeschalteten Kessel noch nicht bei 100 % Sollleistung betrieben werden. Dabei ist in der Regelung zu berücksichtigen, dass als Signal zur Entaschung anstelle der Betriebsstunden die Vollbetriebsstunden genutzt werden sollten, da die Leistungsmodulation andernfalls zu einem unnötigen Anstieg der Anzahl Starts führt. Die Berücksichtigung der Vollbetriebsstunden anstelle der Betriebsstunden wird als betrieblich sinnvoll erachtet, da der Anfall an Asche abhängig ist von der verbrannten Brennstoffmenge, die proportional ist zur Vollbetriebsstundenzahl.
4. Als Basis für die Regelung sollte nach Erreichen eines Betriebszustandes innerhalb eines gewünschten Zielbereichs des Speicherladezustands eine Regelung auf einen Sollwert des Speicherladezustands von über 50 % und sicher unter 100 % erfolgen kann. Ein Wert ab 50 % gilt zur Bestimmung der Leistungsvorgabe für die einzelnen Kessel. Die Ausschaltbedingungen für die Kessel der Kaskade sollten sich dagegen immer an einem Speicherladezustand von 100 % orientieren.

5.2.7.2. Wirkung der wichtigsten Einflussfaktoren

Die im Kapitel 5.1.5 beschriebenen Resultate zeigen, dass die Anzahl Starts durch alle untersuchten Parameter stark beeinflusst wird und dass je nach Ausgangslage jeweils einer der Parameter das Gesamtresultat am entscheidendsten bestimmt. Die Resultate zeigen insbesondere folgende Trends:

1. Kessel ohne Leistungsmodulation

Kessel ohne Möglichkeit für einen Betrieb bei reduzierter Heizleistung (in den Diagrammen mit $Q_{\min} = 100\%$ beschrieben) verursachen die höchste Anzahl an Starts. Bei einer Speicherkapazität von 60 Minuten ergeben sich bereits ohne Entaschung mit drei Kesseln knapp 1800 und mit vier Kesseln knapp 2500 jährlicher Starts der Gesamtanlage. Diese Starts ergeben sich zur Deckung des dynamischen Wärmebedarfs. Für Kessel mit periodischer Entaschung kommen zusätzliche Starts dazu, welche die Gesamtzahl auf rund 2200 bzw. 3100 erhöhen. Bei Anlagen mit Entaschung machen die zusätzlichen Starts für die Entaschung somit rund 25 % bzw. 20 % der Gesamtzahl aus.

Die Anzahl Kessel einer Kaskade hat einen zweifachen Effekt auf die Anzahl Starts. Die Erhöhung von drei auf vier Kesseln bewirkt eine Erhöhung der durchschnittlichen Anzahl Starts pro Kessel um gut 10 % (mit Entaschung) und rund 30 % (ohne Entaschung). Die Anzahl Starts der Gesamtanlage steigt entsprechend überproportional. In Bezug auf die Anzahl Starts sind somit drei Kessel vorteilhafter als vier Kessel. Für die im Modell als Vergleich untersuchten Anlagen mit einem und zwei Kesseln zeigen die Resultate, dass die Anzahl Starts für Anlagen mit Entaschung mit einem oder zwei Kesseln praktisch unverändert bleibt, da die Anzahl Starts pro Kessel mit zwei Kesseln rund halbiert wird. Für Kessel ohne Entaschung reduziert sich die Gesamtzahl an Starts mit zwei Kesseln anstelle von einem dagegen auf weniger als die Hälfte.

Die Speicherkapazität hat ebenfalls einen Einfluss auf die Anzahl Starts. Für drei nicht modulierende Kessel mit Entaschung und führt eine Halbierung der Kapazität von 60 Minuten auf 30 Minuten beinahe zu einer Verdopplung der Anzahl Starts von 2211 auf 4146, eine Verdopplung der Kapazität auf 120 Minuten ermöglicht eine Reduktion um rund 35 % auf 1440 Starts. Für Anlagen mit Leistungsmodulation ist der Effekt der Speicherkapazität geringer und beträgt noch eine Zunahme von 1509 auf 2166 oder 43 % bzw. eine Reduktion um 22 % auf 1179.

Fazit:

- Ein Kessel ohne Leistungsmodulation bietet eine ungünstige Ausgangsbasis zur Versorgung von Verbrauchern mit variablem Wärmebedarf. Die Speicherkapazität hat dabei zwar einen grossen Einfluss auf die Anzahl Starts, selbst ein Speicher mit 120 Minuten Kapazität ermöglicht aber keine befriedigende Lösung.
- Zwei oder drei Kessel anstelle von einem reduzieren die Anzahl Starts pro Kessel deutlich, also für Anlagen mit Entaschung um rund einen Faktor zwei und für Anlagen ohne Entaschung noch deutlich ausgeprägter. Eine weitere Erhöhung der Anzahl Kessel auf mehr als drei bringt dagegen keine weitere Verbesserung mehr.
- Ein allfälliger Zielwert von 1000 Starts pro Gesamtanlage oder 500 Starts pro Kessel könnte für modulierende Kessel mit automatischer Entaschung nur dann knapp erreicht, wenn die Anlage mit zwei Kesseln und 120 Minuten Speicherkapazität ausgeführt würde. Kaskadenanlagen mit drei und mehr Kesseln und automatischer Entaschung verursachen selbst mit 120 Minuten Speicher mehr als 1000 Starts.
- Ein Zielwert von 500 Starts pro Kessel könnte auch mit einer Kaskade von drei oder vier Kesseln und einer auf 90 Minuten reduzierten Speicherkapazität erreicht werden. Die Anzahl Starts der Gesamtanlage bleibt dabei jedoch auf einem entsprechend drei- bzw. viermal so hohen Wert.

2. Einfluss der Leistungsmodulation

Kessel mit Leistungsmodulation ($Q_{\min} < 100\%$) ermöglichen eine teilweise Anpassung an den Wärmebedarf mit folgenden Betriebsarten:

Mit einer Minimalleistung von 50 % können die Starts von Anlagen ohne automatische Entaschung für Anlagen mit drei und vier Kesseln als auch für Ein- und Zweikesselanlagen ungefähr halbiert werden. Für eine Einkesselanlage bleibt die Anzahl Starts auch bei Einsatz einer automatischen Entaschung immer noch durch den wärmegeführten Betrieb dominiert, während die Entaschung die Anzahl Starts um weniger als 25 % erhöht. Bei drei Kesseln verursacht die Rostentaschung dagegen bereits mehr Starts als der wärmegeführte Betrieb.

Mit einer Minimalleistung von 30 %, was bei Seriengeräten nicht Standard ist, könnte zwar die Anzahl Starts für Anlagen ohne Entaschung noch einmal fast um die Hälfte reduziert werden, für Anlagen mit Entaschung würde jedoch bei drei und vier Kesseln nur noch eine Verbesserung um rund 7 % bzw. 9 % erzielt. Wenn die Minimalleistung bis auf 15 % ausgedehnt werden könnte, würde die Anzahl Starts bei drei und vier Kesseln nur noch um weniger als 5 % sinken. Für Kessel ohne Entaschung ermöglicht ein Betrieb ab 15 % Leistung dagegen eine weitere Reduktion, wobei in vielen Fällen etwa eine Halbierung erzielt wird. So unterschreitet etwa eine Einkesselanlage mit 15 % Minimalleistung und 60 Minuten Speicher mit 356 Starts den Zielwert von 500 Starts der Gesamtanlage. Mit 45 Minuten Speicher würde der Zielwert knapp überschritten, während ein Speicher von 30 Minuten zu mehr als 1000 Starts führen würde. Sobald eine Minimalleistung von 15 % mit zwei oder mehr Kesseln ausgeführt wird, können mit 60 Minuten Speicherkapazität deutlich weniger als 100 Starts pro Kessel und deutlich weniger als 500 Starts pro Anlage erreicht werden. Für einen Zielwert von 500 Starts pro Kessel würde eine Speicherkapazität von deutlich unter 30 Minuten ausreichen. Eine Zweikesselanlage würde dabei auch den Zielwert von 500 Starts der Anlage unterschreiten, während mit drei und vier Kesseln ein Speicher von knapp 45 Minuten bzw. knapp 60 Minuten erforderlich wäre.

Fazit:

- Eine Leistungsmodulation ab 50 % ermöglicht eine deutliche Verbesserung des Anlagenbetriebs. Damit kann die Anzahl Starts von Seriengeräten mit periodischer Entaschung im Vergleich zu nicht-modulierendem Betrieb deutlich reduziert (bei drei und vier Kesseln um rund 30 %) oder eine vergleichbare Anzahl Starts mit deutlich geringerem Speichervolumen erreicht werden.
- Bereits ab drei Kesseln führt der stationäre Betrieb bei geringer Leistung dazu, dass eine automatische Entaschung den Betrieb so oft unterbricht, dass die Anzahl Starts durch die Rostentaschung dominiert wird, sodass weder eine Vergrößerung der Speicherkapazität noch eine weitere Ausdehnung des Modulationsbereichs die Anzahl Starts massgeblich reduzieren kann.

3. Einfluss des Wärmespeichers

Eine Vergrößerung der Speicherkapazität zwischen 30 Minuten und 120 Minuten (sowohl von 30 auf 45 Minuten, als auch von 45 auf 60 Minuten und von 60 auf 120 Minuten), wirkt sich unabhängig von der Anzahl Kessel positiv auf die Betriebsart aus. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Vergrößerung der Anzahl Kessel den Betrieb im Vergleich zu einem Kessel zwar verbessern, den Bedarf an Speicherkapazität aber nicht ersetzen kann.

4. Einfluss der Kaskadenregelung

Die als Variante 1 untersuchte Kaskadenregelung mit individuellen Zu- und Abschaltkriterien verursacht mit periodischer Entaschung und Leistungsmodulation mit drei Kesseln rund 500 jährliche Starts pro Kessel oder total 1500 Starts und mit vier Kesseln rund 565 Starts pro Kessel oder total 2260 Starts. Eine Kaskadenregelung mit Berücksichtigung der Anzahl während den letzten 12 Stunden betriebener Kessel nach Variante 2 reduziert und auch eine Regelung mit Proportional-Differential-Regler nach Variante 3 ermöglichen bei den im Modell untersuchten Bedingungen Reduktion der Anzahl Starts um 8 % bis 13 % bei drei Kesseln und um 28 % bei vier Kesseln. Die relative Verbesserung ist bei Kesseln ohne Leistungsmodulation noch etwas ausgeprägter und erreicht bei vier Kesseln über 50 % Reduktion der Anzahl Starts.

5. Einfluss von Lastspitzen

Bei Kaskadenanlagen mit einer Speicherkapazität von 60 Minuten oder weniger führt eine Verminderung der Lastspitzen zu einer Reduktion der jährlichen Anzahl Starts. Im untersuchten Beispiel ist für einen relevanten Effekt von rund 25 % eine Glättung von 2 Stunden erforderlich, während eine weitere Glättung kaum noch eine Verbesserung bringt. Bei einer Speicherkapazität von 120 Minuten wird für das untersuchte Wärmebedarfsprofil durch eine Glättung der Lastspitzen keine Verbesserung mehr erzielt. Die grosse Speicherkapazität reicht damit aus, die Lastspitzen zu glätten.

Fazit zu den fünf beschriebenen Einflussfaktoren:

- Eine **Aufteilung des Wärmeleistungsbedarfs** auf mehr als einen Kessel ermöglicht eine deutliche Reduktion der durchschnittlichen Anzahl Starts pro Kessel. Bei Anlagen mit Entaschung wird damit jedoch die Anzahl Starts der Gesamtanlage nicht reduziert, sondern bleibt bei zwei Kesseln vergleichbar und steigt ab drei Kesseln an.
- Eine **Leistungsmodulation** ab 50 % ermöglicht bei Kaskaden mit drei oder vier Kesseln eine deutliche Reduktion der Anzahl Starts (d.h. um etwa 40 % bzw. 30 %) und wird deshalb als sinnvolle Technik betrachtet.
- Mit einer Leistungsmodulation ab 50 % und Kesseln mit automatischer Entaschung werden für Kaskadenanlagen die **Unterbrüche zur Rostentaschung** dominierend für die Anzahl Starts. Zur Reduktion der Anzahl Starts werden dann Massnahmen zur Reduktion der Unterbrüche prioritätär, also die Verlängerung der Betriebszeiten zwischen der Entaschung. Bei Seriengeräten kann eine gewisse Verbesserung zum Beispiel durch Verwendung der Vollbetriebsstunden anstelle der Betriebsstunden als Mass für die Betriebszeit erzielt werden. Infrage käme auch eine Berücksichtigung der effektiv anfallenden Aschemenge. Eine deutliche Reduktion würde daneben mit Feuerungskonzepte ermöglicht, die weitgehend unterbruchlos betrieben werden können.
- Eine regeltechnisch genutzte **Wärmespeicherung** ermöglicht eine deutliche Reduktion der Anzahl Starts. Die Wärmespeicherkapazität zeigt dabei für Anlagen ohne automatische Rostentaschung einen abnehmenden Grenznutzen auf, der aber bei 120 Minuten noch nicht auf null absinkt. Beim Einsatz von Kesseln mit automatischer Rostentaschung wird dagegen für Anlagen mit zwei Kesseln ein Grenznutzen ab etwa 60 Minuten und mit drei Kesseln ab etwa 45 Minuten erreicht. Dass durch eine weitere Vergrößerung des Wärmespeichers für die untersuchte Anwendung kein Zusatznutzen erzielt wird bestätigt, dass die bisherige Empfehlung von QM Holzheiwerke für Kaskadenanlagen von 60 Minuten Speicherkapazität für zwei Drittel der installierten Leistung oder 40 Minuten Speicherkapazität für die Gesamtleistung ausreichend ist.
- Obwohl der Nutzen einer Wärmespeicherung bestätigt wird, zeigen die Resultate auch, dass eine **Leistungsmodulation** im untersuchten Bereich eine noch grösere Wirkung erzielt.
- Daneben zeigen die Resultate, dass bei Einsatz von Leistungsmodulation und Wärmespeicher die Anzahl Starts durch die **periodische Rostentaschung** dominiert wird. Der potenzielle Nutzen der Leistungsmodulation und der Wärmespeicherung kann somit wegen der automatischen Rostentaschung nicht ausgeschöpft werden und eine weitere Vergrößerung der Speicherkapazität und/oder der Modulationsfähigkeit der Kessel ist dabei ohne Nutzen oder nur von beschränkter Wirkung.

6. Schlussfolgerungen

6.1. Fazit aus Praxisuntersuchungen und Prozessmodellierung

1. Kaskadenanlagen mit Holzkesseln und Wärmespeichern können eine monovalente Wärmeerzeugung mit Energieholz zur Versorgung typischer Fernwärmennetze ohne fossile Zusatzheizung ermöglichen.
2. Wenn alle Starts bewertet werden, also sowohl das Anfahren eines Kessels aus kaltem Zustand als auch das Anfahren aus betriebswarmem Zustand nach kurzem Stillstand wie zum Beispiel nach einer periodischen Entaschung, weisen die untersuchten Kaskadenanlagen im Mittel zwischen rund 350 und 1000 Starts pro Jahr und Kessel sowie zwischen rund 1400 und 2600 Starts pro Jahr und Anlage auf.
3. Bei den untersuchten Feuerungen handelt es sich um Seriengeräte mit automatischer Entaschung, die zur Abreinigung des Verbrennungsrostes periodisch abgeschaltet werden. Modellrechnungen zeigen, dass die dazu erforderlichen Abschaltungen für rund 50 % der Starts verantwortlich sind. Bei den eingesetzten technischen Konzepten können diese Starts weder durch eine Vergrösserung der Wärmespeicher noch durch Anpassungen der Regelparameter vermieden werden.
4. Zur Optimierung des Betriebs bestehender Anlagen können die Regelparameter nach Analyse des spezifischen Betriebsverhaltens geeignet angepasst werden. Je nach Regelkonzept sind die Einflussmöglichkeiten dabei allerdings begrenzt oder erfordern eine Unterscheidung zwischen Sommer- und Winterbetrieb.
5. Bei Kaskadenanlagen treten zusätzlich zu sprunghaften Änderungen des Wärmebedarfs auch sprunghafte Änderungen der Wärmeproduktion auf, die durch das Zu- und Abschalten von Kesseln und durch periodische Entaschungsvorgänge verursacht werden. Der Bedarf an Wärmespeicherkapazität wird dadurch grösser als bei Anlagen mit konventionellem Regelungskonzept nach QM Holzheizwerke.

6.2. Optimierungsmassnahmen aus Praxisuntersuchungen

1. Zuschaltbedingungen für Kessel sollten auf einem Speicherladezustand basieren, der auf dem für die Wärmeabnehmer nutzbaren hohen Temperaturniveau basiert, wie es die Empfehlungen von QM Holzheizwerke (QMH) zur Berechnung des Speicherladezustands beschreiben. Die bei den untersuchten Anlagen zur Berechnung des Speicherladezustands verwendete Speichermittemperatur ist deutlich weniger aussagekräftig, da damit auch für Temperaturen weit unter dem Sollwert des Fernwärmeverlaufs ein hoher Speicherladezustand ausgewiesen wird.
2. Unerwünschte Lücken in der Wärmeproduktion sollten vermieden werden. Dazu sollte die Regelung der Kaskade erkennen, wenn die Wärmeproduktion von zugeschalteten Kesseln ungenügend ist. Zudem sollten die zur automatischen Entaschung notwendigen Betriebsunterbrüche vorausschauend berücksichtigt werden, indem zum Beispiel 30 Minuten vor Erreichen der maximalen Laufzeit eines Kessels ein weiterer Kessel zugeschaltet wird, sofern der Wärmeleistungsbedarf dies erforderlich macht.
3. Sprunghafte Änderungen des gesamten zu deckenden Wärmeleistungsbedarfs sollen begrenzt werden. Dazu sollen insbesondere die Boilerladungen der grössten Verbraucher auf mehrere Gruppen aufgeteilt und die Ladegruppen auf mehrere Ladefenster pro Tag verteilt werden. Zusätzlich sollen die Startzeitpunkte für die Boilergruppen innerhalb eines Ladefensters mit zeitlichen Abständen zwischen 30 und 60 Minuten gestaffelt werden. Ebenso sollen Nachtabsenkungen am Abend und deren Aufhebung am Morgen zeitlich gestaffelt und nicht zeitgleich mit den Boilerladungen bzw. deren Startzeitpunkten erfolgen. So können die Bedarfssprünge in der Regel auf die Nennleistung eines einzelnen Holzkessels der Kaskade begrenzt und damit Doppelzuschaltungen vermieden werden.
4. Die Zuschaltbedingung für den ersten Kessel der Kaskade sollte hoch gewählt werden (z.B. 75 % bezogen auf einen Speicherladezustand mit einer Referenztemperatur für ‚Fühler kalt‘ von 60 °C). Die Zuschaltbedingung für den letzten Kessel sollte tief, aber nicht tiefer als 15 % des Speicherladezustands gesetzt werden, damit eine Unterdeckung zuverlässig vermieden werden kann. Für modulierende Kessel sollte zudem die Leistungsmodulation nach einem Start bei Nennleistung frühzeitig freigegeben werden. Bei ansteigendem Speicherladezustand sollten die Kessel erst bei 100 % Speicherladezustand ausgeschaltet werden.
5. Um sicherzustellen, dass die Anlagen in der Praxis gut betrieben werden, ist entscheidend, dass die Kaskadenregelung eine einfache und nachvollziehbare Struktur aufweist und dass zudem die Regelungsparameter geeignet eingestellt werden. Dazu gehört auch, dass die Regelung bei Änderungen der Bedingungen zum Beispiel infolge eines Netzausbau und/oder einer Änderung der Wärmeproduktionseinheiten der neuen Situation angepasst werden können und angepasst werden. Dazu wird auch eine regelmässige Kontrolle der Anlage und der Regeleinstellungen empfohlen.
6. An einer Praxisanlage konnte gezeigt werden, dass durch systematische Analyse des Betriebsverhaltens verschiedene Optimierungsmassnahmen identifiziert und umgesetzt werden konnten. Die Anzahl Starts konnten damit um über 40 % reduziert werden und folgende Massnahmen wurden umgesetzt: Veränderung des Regelungskonzepts der Zu- und Abschaltbedingungen, Aufhebung von Beschränkungen der Leistungsmodulation, Vermeidung von durch die periodische Entaschung entstehenden Lücken in der Wärmeproduktion und Vermindern von Lastsprüngen als Folge gleichzeitiger Boilerladungen.

6.3. Optimierungsmassnahmen aus Prozessmodellierung

Die **Prozessmodellierung** ermöglicht die Beschreibung des Betriebs einer Kaskadenanlage für ein typisches Wärmebedarfsprofil. Die damit ermittelten Daten dienen als Vergleichsbasis für reale Betriebsbedingungen bei ähnlichem Wärmebedarfsprofil und ermöglichen damit die Abschätzung eines allfälligen Optimierungspotenzials. Zusätzlich kann mit der Modellierung der Einfluss der Betriebsparameter in einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden, was im realen Betrieb nicht oder höchstens eingeschränkt möglich ist. Aus der Modellierung werden damit folgende spezifischen **Optimierungsmöglichkeiten** abgeleitet, die von den involvierten Industriepartnern zum Teil bereits umgesetzt und in der Software-Entwicklung berücksichtigt wurden:

1. Rund 50 % der jährlichen Starts werden durch die periodischen Entaschungen verursacht. Eine Optimierung oder Vermeidung der Rostentaschung stellt damit ein Hauptpotenzial zur Reduktion der Anzahl Starts dar.
2. Ein weiteres grosses Potenzial zur Reduktion der Anzahl Starts bietet der Einsatz der Leistungsmodulation. Dabei soll stets der gesamte Modulationsbereich bei allen Kesseln ausgeschöpft werden. Durch eine zeitlich unbegrenzte Leistungsmodulation zwischen 50 % und 100 % kann die Anzahl Starts um rund 30 % reduziert werden.
3. Als Basis für Aussagen zur Speicherkapazität wird eine Wärmespeicherung von 1 Stunde bezogen auf die Gesamtleistung angenommen. Eine Verdopplung der Kapazität auf 2 Stunden reduziert die Anzahl Starts um rund 25 %. Eine Verkleinerung auf zwei Drittel (40 Minuten) erhöht die Anzahl Starts um rund 20 %.
4. Bei Ausschöpfung der Leistungsmodulation und weiterer Massnahmen (Optimierung der Entaschungszyklen und der Boilerladungen) auch mit kleinerer Speicherkapazität von zum Beispiel 40 Minuten die gleiche Anzahl Starts möglich wäre wie bei einer Speicherkapazität von einer Stunde ohne Ausschöpfung dieser Massnahmen.
5. Eine Kaskadenanlage mit vier Kesseln, 60 Minuten Speicherkapazität und Leistungsmodulation ab 50 % weist knapp 50 % mehr Starts wie eine Kaskadenanlage mit drei Kesseln.
6. Der Bedarf an Speicherkapazität von Anlagen mit drei und mehr Kesseln ist nicht kleiner als bei Anlagen mit ein oder zwei Kesseln, weshalb für die Empfehlung von QMH zur minimalen Speicherkapazität keine Unterscheidung zwischen Zweikesselanlagen und Kaskadenanlagen erforderlich ist. Sofern die Empfehlungen an die Speicherkapazität in Bezug auf spezifische Anwendungen unterschieden werden sollten, müsste mindestens die effektiv genutzte Leistungsmodulation als eben-sowichtiges Kriterium wie die Anzahl Kessel berücksichtigt werden.
7. Durch die Vermeidung von ausgeprägten Lastspitzen können die Anzahl Starts um rund 25 % reduziert werden. Je geringer die Speicherkapazität der Anlage ist, desto besser müssen die Lastpitzen geglättet werden, um die Anzahl Starts zu reduzieren.

7. Ausblick und künftige Umsetzung

Die Projektleitung plant folgende Aktivitäten zur Umsetzung der Erkenntnisse:

- QM Holzheizwerke®: Erarbeitung einer FAQ für Kaskadenanlagen
- Kontakt mit Cerc'Air und Kantonen zur Durchführung von Langzeitmessungen und Ableitung von Empfehlungen für Speicherdimensionierung und Kaskaden
- Aufarbeitung der Erkenntnisse für eine Präsentation an einer Aktivität der IEA Bioenergy Task 32
- Aufarbeitung zu einer Präsentation am Holzenergie-Symposium 2022.

Die beteiligten Firmen planen folgende Aktivitäten zur Umsetzung:

- Die Firmen Heitzmann AG, Allotherm AG und Liebi LNC AG haben die Erfahrungen zu Kaskadenanlagen (insbesondere zum Speicherladezustand, zur Kaskadenregelung sowie zum Sommer- und Winterbetrieb) im Verlauf des Projekts umgesetzt und planen zudem die Anwendung der Optimierungsmassnahmen für künftige Kaskadenanlagen.
- Daneben vertieft die Firma Schmid AG energy solutions als alternativen Lösungsansatz die Entwicklung einer Feuerungs- und Regeltechnik, welche den unterbruchfreien Einsatz einer automatischen Holzfeuerung mit industrieller Bauweise ab 500 kW mit einer Bandbreite der Heizleistung zwischen 15 % und 100 % ermöglicht.

Daneben wird die Vertiefung folgender Fragen in anschliessenden Untersuchungen vorgeschlagen:

1. Bis anhin wird zur Kontrolle von Heizzentralen mit Holzheizungen zum Teil eine Beschränkung der Anzahl Starts der Gesamtanlage als Kriterium vorgeschlagen. Da die Wirkung dieses Kriteriums unsicher ist und bis anhin keine dokumentierten Angaben zu der Anzahl Starts von Kaskadenanlagen im Praxisbetrieb vorlagen, wird empfohlen, zur künftigen Überwachung und Kontrolle von Holzheizungen geeignete Varianten zur Beurteilung des Betriebs zu prüfen und dabei die Wirkung von unter anderem folgenden Varianten zu vergleichen:
 - a) Anzahl Starts der Gesamtanlage oder Anzahl Starts pro Kessel sowie weitere Varianten.
 - b) Berücksichtigung zusätzlicher Kriterien, insbesondere durch Unterscheidung von Kaltstarts nach längerem Stillstand und Warmstarts sowie gegebenenfalls weiteren Betriebsarten.
2. Untersuchung zu Schadstoffemissionen sowie Wirkungsgrad bzw. Verlusten der Holzkessel bei den verschiedenen Betriebszuständen, insbesondere dem Start aus kaltem Zustand und aus betriebswarmen Zustand (z.B. nach einer Entaschung), während des stationären Betriebs bei Nennleistung und Teilleistung sowie während dem Abschalten der Anlagen. Dabei sollen zusätzlich der Betrieb und die Wirkung der Feinstaubabscheidung (nach Möglichkeit verschiedener Techniken zu Elektroabscheidern) erfasst werden.
3. Entwicklung einer Methode zur Unterscheidung zwischen dem Start von Kesseln aus dem kalten und aus betriebswarmem Zustand. Berücksichtigung dieses Kennwerts in der Modellierung und Ableitung von Empfehlungen.
4. Auf Basis der Zusatzinformationen aus den obigen zwei Untersuchungen könnten im Anschluss verschiedene Ansätze zur Beurteilung des Betriebs von Heizzentralen mit Holzkesseln erarbeitet werden. Die Methoden könnten dabei im Hinblick auf noch zu definierende Zielgrössen bewertet, die sich zum Beispiel an der Erfassung der Luftbelastung orientieren, wobei die lokale Auswirkung und die regionale Auswirkung unterschieden werden könnten. Zusätzlich könnte die Ressourceneffizienz bewertet werden. Durch Einführung entsprechender Beurteilungsmethoden, die bis anhin fehlen, könnte die Realisierung von Energieholzanlagen zielgerichtet unterstützt werden, die hohe Effizienz erzielen und gleichzeitig minimale Umweltbelastung verursachen.
5. Erweiterung der Modellierung durch die Emissionsfaktoren und Wirkungsgrade und damit Erweiterung der Auswertungen auf Ressourceneffizienz und ökologische Wirkungen.
6. Entwicklung und Optimierung der automatischen Rostentaschung von Kesseln mit dem Ziel, die Anzahl Starts auf das minimal notwendige Mass zu reduzieren. Ansätze dazu können zum Beispiel

folgende Faktoren berücksichtigen: Vollbetriebsstunden, Druckverlust, Ascheanfall oder Brennstoff-eigenschaften.

7. Entwicklung und Praxiseinsatz eines umfassenden Anlagen-Monitorings mit laufender Datenaus-wertung zur Überwachung des Anlagenbetriebs und zur Optimierung der Regelparame-ter.
8. Vertiefung des Einflusses des Wärmebedarfsprofils.
9. Entwicklungen zur Steuerung und Regelung der Wärmeverbraucher in thermischen Netzen zur Ver-meidung von Leistungsspitzen mit Einsatz von Leitsystemen und Verbrauchersteuerungen.
10. Daneben besteht ein Bedarf, die Untersuchungen zum Betrieb von Wärmeerzeuger mit Wärme-speicher und Fernwärmennetz für anderen Anwendungsfälle aufzuarbeiten und bereit zu stellen. Von besonderem Interesse ist dabei die Anwendung bei Holzheizkraftwerken im kleinen und mittleren Leistungsbereich wie:
 - mit Holz betriebene Blockheizkraftwerke, darunter emissionsarme Vergasungstechnologien, die optional auch zur Produktion von Pflanzenkohle eingesetzt werden können
 - mit Holzheizkraftwerken mit Dampfkraftanlagen betriebene Fernwärmennetze.Für beide Anwendungen besteht ein künftiges Interesse an der Einbindung grosser Wärmespei-cherkapazitäten zur Flexibilisierung des Betriebs und insbesondere für einen stromgeführten Be-trieb zu Zeiten mit hohen Stromtarifen.

8. Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit folgender Institutionen und Firmen durchgeführt:

- Verenum AG, 8006 Zürich
- Hochschule Luzern – Technik & Architektur, 6048 Horw
- Heitzmann AG, 6105 Schachen
- Allotherm AG, 3645 Gwatt
- Liebi LNC AG, 3753 Oey-Diemtigen
- Schmid AG energy solutions, 8360 Eschlikon
- Energie Ausserschwyz AG, 8854 Galgenen.

Daneben bestand zwischen den Projektpartnern und Herstellern der untersuchten Produkte eine enge Zusammenarbeit. Diese hat insbesondere bei einem Hersteller zu Verbesserungen der Kaskaden-Regelung geführt, die bei den weltweit eingesetzten Anlagen zur Anwendung kommen.

Bis im Jahr 2020 bestand zudem ein Erfahrungsaustausch im Rahmen des SCCER Biosweet mit:

- FHNW, Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
- HEIG-VD, Institut de Génie Thermique.

Daneben haben folgende Institutionen in der Begleitgruppe am Projekt mitgewirkt:

- Bundesamt für Energie, 3003 Bern
- Holzenergie Schweiz, 8005 Zürich
- Holzfeuerungen Schweiz HFS, 4600 Olten.

Im Rahmen der Vertretung der Schweiz in der IEA Bioenergy Task 32 wurden die Resultate zudem den Mitgliedern der Task 32 vorgestellt und Erfahrungen ausgetauscht.

9. Kommunikation

Das Projekt wurde an folgenden Konferenzen vorgestellt:

- SCCER Biosweet Conference 2019 in der Schweiz
- Central European Biomass Conference 2020 in Graz (Österreich)
- Holzenergie-Symposium 2020 an der ETH Zürich.

Die Beiträge wurden in den Proceedings veröffentlicht und sind im Kapitel 9 aufgeführt.

Daneben wurde die Demonstrationsanlage einer Vorschubrostfeuerung mit Wärmespeicher im Forschungslabor der Hochschule Luzern jedes Jahr im Rahmen einer Laboreinführung rund 50 Studierenden des Moduls "Energie, Fluid & Prozess-Engineering" vorgestellt. Die Versuchsanlage und Erkenntnisse aus dem Projekt wurden daneben jedes Jahr rund 50 Studierenden der Vertiefungsvorlesung "Bioenergie" und "Bioenergy" vorgestellt.

Resultate aus dem Projekt wurden zudem in folgenden Beiträgen zur Biomassestrategie besprochen:

- Nussbaumer, T.: Rolle der Bioenergie im erneuerbaren, dezentralen Energiesystem. Forschungskonferenz Hochschule Luzern, Horw 1.9.2021,
- Nussbaumer, T.: Potenzial der Holzenergie und Biomassevergärung zur dezentralen Energieversorgung ab 2030, Strategietagung BiEAG Biomasse Energie AG, Risch 29.9.2021

Die ersten Erkenntnisse sind zudem in folgenden Arbeiten eingeflossen:

- Good, J. et al., Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Planungshandbuch, Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V., 2022 (Schriftenreihe QM Holzheizwerke, Band 4), ISBN 978-3-937441-96-2
- ARGE QM Holzheizwerke: Arbeitssitzungen 2019, 2020, 2021: J. Good (Leiter), S. Thalmann

Zudem wurden drei Anlagenbeispiele von Holzheizwerken von im Projekt beteiligten Partnerfirmen zur Repräsentation der Schweiz in der Internationalen Energieagentur als "Hot Cases" aufgearbeitet und auf der IEA Homepage als Download zur Verfügung gestellt. Das erste Beispiel entspricht einer Kaskadenanlage, wie sie im Projekt untersucht wurde, die anderen zwei Beispiele zeigen den Einsatz industrieller Anlagen:

- Nussbaumer, T.: A cascade of small wood chip boilers, IEA BIOENERGY TASK 32, <http://task32.ieabioenergy.com/publications/bioenergy-for-heat-the-hot-cases/>
- Nussbaumer, T.: Forestry wood enables renewable district heat, IEA BIOENERGY TASK 32, <http://task32.ieabioenergy.com/publications/bioenergy-for-heat-the-hot-cases/>
- Nussbaumer, T.: Renewable kitchens and coffee systems, IEA BIOENERGY TASK 32, <http://task32.ieabioenergy.com/publications/bioenergy-for-heat-the-hot-cases/>

Das Forschungslabor und Ausführungen zur Vermeidung von Feinstaub wurden daneben in einem Beitrag des Schweizer Fernsehens vorgestellt:

Nussbaumer, T.: SRF 1 «Kassensturz» 26.02.2019, Interview zu Feinstaub aus Holzheizungen. <https://www.srf.ch/news/schweiz/heizen-mit-holz-strittige-holzheizungen-umweltschonend-oder-dreckschleudern>

Zudem wurden von der Italian Agriforestry Energy Association (AIEL) ein Video zu Holzenergie und Feinstaub erstellt und auf Youtube aufgeschaltet, in dem ebenfalls das Forschungslabor und die Anforderungen zur Vermeidung von Feinstaub vorgestellt werden:

<https://www.youtube.com/watch?v=c5y4vsAguqQ>

10. Publikationen

Schumacher, F.; Good, G.; Nussbaumer, T.: Thermal Energy Storage in Biomass Heating Plants, Annual Conference SCCER BIOSWEET, 3 September 2019, Hochschule Luzern, Horw

Schumacher, F.; Nussbaumer, T.; Good, J.: System integration and dimensioning of heat storage tanks in heating plants with automated wood furnaces. 6th Central European Biomass Conference, 22nd to 24th January 2020, Graz, Austria

Schumacher, F.; Good, J.; Nussbaumer, T.: Modellierung von Holzheizung, Wärmespeicher und Fernwärmennetz, in: Nussbaumer T. (Hrsg.): 16. Holzenergie-Symposium. ETH Zürich, 11.09.2020, Verenum AG Zürich 2020, ISBN 3-908705-38-X, 79–98

11. Literaturverzeichnis

- [1] Hammer, S.; Soini, M.; Iten, R.; Nussbaumer, T.; Zotter, P.: Analyse von Hemmnissen und Massnahmen zur Ausschöpfung des Holzenergiopotenzials, Infras Zürich und Verenum Zürich im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern 2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvc3VjaGU=.html?keywords=&q=&from=&to=&nr=>
- [2] Thees, O.; Kaufmann, E.: Energieholzpotenziale im Schweizer Wald, *Schweiz. Z. Forstwes.* 164 (2013), 12: 351-364
- [3] Müller, B.: Luftreinhalte-Verordnung (LRV): Anpassungen an den Stand der Technik, *14. Holzenergie-Symposium*, ETH Zürich, 16.9.2016, www.holzenergie-symposium.ch
- [4] QM Holzheizwerke: *Planungshandbuch*, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4, Holzenergie Schweiz, C.A.R.M.E.N. e.V., Landes-Energie-Verein Steiermark, 2. Auflage, 2008, ISBN 978-3-937441-94-8
- [5] Good, J.; Jenni, A.; Nussbaumer, T.: Sparpotenzial durch Systemoptimierung, *HK Gebäudetechnik*, 12 2005, 19–22
- [6] QM Holzheizwerke: *Standardschaltungen Teil I*, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 2, Holzenergie Schweiz, C.A.R.M.E.N. e.V., Landes-Energie-Verein Steiermark, 2. erweiterte Auflage, 2010, ISBN 978-3-937441-92-1
- [7] Schumacher, F.; Good, J.; Nussbaumer, T.: Modellierung von Holzheizung, Wärmespeicher und Fernwärmennetz, in: Nussbaumer T. (Hrsg.): *16. Holzenergie-Symposium*. ETH Zürich, 11.09.2020, Verenum AG Zürich 2020, ISBN 3-908705-38-X, 79–98
- [8] Meteo-Schweiz. 2020. 'Messwerte an Stationen'.
- [9] Nussbaumer, T.; Lauber, A.; Hennemann, P.; Meierhans, T.; Guthoerl, D.; Jacquet, S.: Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess, Verenum AG Zürich und eicher+pauli Liestal und Coop Genossenschaft im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern 2019, <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=35218>
- [10] Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p, Vollzugsblätter Emissionsüberwachung, Holzfeuerungen über 70 kW_{FWL}, Hilfsmittel zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) bei stationären Anlagen, Stand: Oktober 2020 bzw. März 2021 (Kapitel 4.3), <https://cerclair.ch/assets/pdf/31p-2022-01-D-Holzfeuerungen-über-70kW.pdf>