

Fossilfreie Gebäudewärme mit Holzkessel-Kaskaden und Wärmespeicher



Text Thomas Nussbaumer*
Bilder Heitzmann AG, zVg

Da die Leistung von Holzkesseln nur langsam und begrenzt regelbar ist und Anfahrvorgänge erhöhte Emissionen verursachen, werden Holzheizwerke oft mit fossilen Spitzenlastkesseln ergänzt. Im Beitrag wird der Einsatz von Kaskaden mit Holzkesseln zur monovalenten Wärmeerzeugung beschrieben und der Einfluss von Auslegung und Regelung untersucht.

1 Einleitung

Holzenergie deckt etwa 6 % der schweizerischen Energieversorgung und kann noch um rund 50 % ausgebaut werden [1]. Holzfeuerungen verursachen aber Feinstaub und organische Schadstoffe [2]. Um diese zu reduzieren, sind Anfahrphasen zu vermeiden. QM Holzheizwerke® (QM) empfiehlt dazu Wärmespeicher für eine Stunde Nennleistung bei einem Kessel sowie für zwei Drittel der Leistung bei Zweikesselanlagen [3]. Dennoch werden solche Anlagen oft bivalent mit 15 % bis 30 % fossiler Energie für Spitzen- und Schwachlast betrieben [4]. Als Alternative bieten sich Kaskadenanlagen mit mehr als zwei Holzkesseln an, die einen grossen Leistungsbereich abdecken und dank Seriengeräten

mit 70 kW bis 500 kW Leistung wirtschaftlich sind. Im Beitrag wird mit Praxisuntersuchungen und einer Prozessmodellierung untersucht, wie das Betriebsverhalten solcher Anlagen durch Auslegung und Regelung beeinflusst und ein emissionsarmer Betrieb erzielt werden kann [5].

2 Grundlagen

2.1 Wärmespeicher und Speicherladezustand

In einem Wärmespeicher nach Bild 1 wird eine Schichtung angestrebt, wobei die Temperatur oben dem Kesselvorlauf und unten dem Verbraucherrücklauf angepasst ist. Die Regelung stellt sicher, dass der Wärmebedarf jederzeit gedeckt wird,

Kaskadenanlage mit vier Holzkesseln und Wärmespeicher.

Wärmespeicher 22800 Liter.

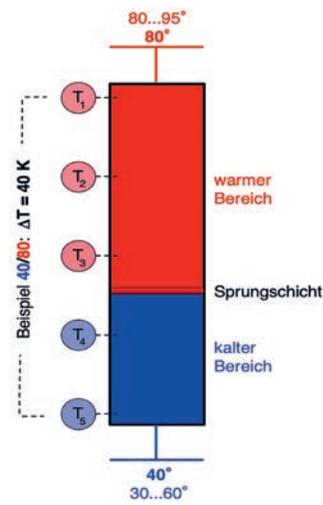


Bild 1: Wärmespeicher mit Schichtung. Der warme Bereich beträgt oft zwischen 80 °C und 95 °C, der kalte zwischen 30 °C und 60 °C. Im Beispiel gilt 80 °C/40 °C mit 40 K Temperaturdifferenz.

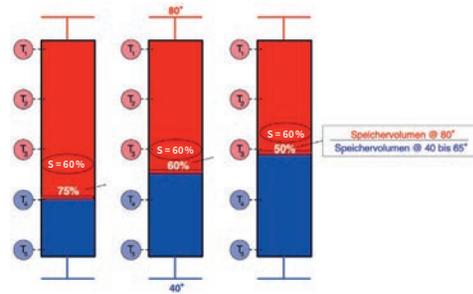


Bild 2: Speicherladezustand nach Variante 1. In allen drei Fällen gilt $S = 60\%$.

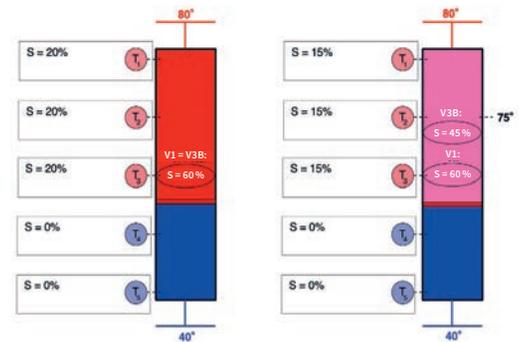


Bild 3: Speicherladezustand nach Variante 5. Links liefern Variante 1 und 5 den Wert $S = 60\%$. Nach Abkühlung des Speichers (rechts) weist Variante 1 immer noch 60 % aus, Variante 5 dagegen einen auf 45 % gesunkenen Wert.

indem die Holzkessel dem mittleren Leistungsbedarf folgen und der Speicher Schwankungen ausgleicht. Als Regelgröße der Speicherladzustand (S), der mit fünf oder mehr Temperaturfühler erfasst und anhand von einer der folgenden Definitionen beschrieben wird:

Bei Variante 1 nach QM [6] wird jeder Fühler als ‚kalt‘ oder ‚warm‘ definiert, sodass fünf Fühler zu je 0% oder 20% beitragen. S kann einen Wert von 0%, 20%, 40%, 60%, 80% oder 100% annehmen und ist ein Maß für die bei nutzbarer Temperatur verfügbare Wärme. Wie Bild 2 zeigt, ist das Signal gestuft, was zur Regelung eines Kessels genügt, aber nicht für mehrere Kessel. Variante 2 verwendet deshalb eine Verzögerung, wird aber hier nicht betrachtet. In Variante 3 wird der Fühler unter der untersten warmen Zone als ‚aktiver Fühler‘ bezeichnet und mit einem gleitenden Wert zwischen 0% und 20% bewertet. Das Signal wird dadurch höher aufgelöst und gedämpft und erlaubt mehr Zu- und Abschaltpunkte für Mehrkesselanlagen, ist

aber ungünstig bei schlechter Schichtung. Bei Variante 4 nach QM wird aus allen Temperaturen die Speichermitteltemperatur T_s und daraus ein Speicherladzustand zwischen einer kalten Temperatur T_k und einer warmen T_w bestimmt. Der Sollwert für T_s muss dabei in Abhängigkeit der Vor- und Rücklauftemperatur gewählt werden und das Signal wird durch Änderungen der Rücklauftemperatur beeinflusst. Zudem wird es bei idealer Schichtung gestuft und ist bei gemischtem Speicher kein Maß für die nutzbare Wärme. Vorliegend wird deshalb Variante 5 nach Bild 3 vorgeschlagen, die in [5] eingeführt wird und bei der jeder Fühler einen gleitenden Wert zwischen 0% und 20% annimmt. Der so bestimmte Speicherladzustand ist identisch, wie wenn jedem Fühler eine zwischen kalt und warm begrenzte Temperatur zugeordnet und daraus ein Mittelwert bestimmt wird. Er wird deshalb als begrenzte Speichermitteltemperatur bezeichnet und ist nach Erfahrungen in [5] vorteilhaft.

2.2 Regelkonzepte für Mehrkesselanlagen

QM beschreibt Regelkonzepte für zwei Holzkessel, die saisonale Umschaltungen voraussetzen. Bei mehr als zwei Kesseln wird die Regelung erweitert und nutzt zusätzliche Informationen wie die Änderungsgeschwindigkeit von S (dS/dt), die Dauer von Betriebsphasen sowie Verzögerungselemente. Für das Zu- und Abschalten werden zwei Ansätze unterschieden: Ansatz A: Individuelle Zu- und Abschaltbedingungen für jeden Kessel. Ansatz B: Allgemeine Zu- und Abschaltbedingungen für den jeweils nächsten Kessel.

Tabelle 1 beschreibt die Wirkung der Regelkonzepte sowie typische Schaltpunkte. Wenn der Speicherladzustand abwechselnd steigt und sinkt, kann ein Schaltpunkt wiederholt durchlaufen werden. Mit allgemeinen Zu- und Abschaltbedingungen können dann mehr Kessel als notwendig gestartet werden, was mit individuellen Bedingungen vermeidbar ist [5].

	Regelansatz A	± Kessel 1	± Kessel 2	± Kessel 3	± Kessel 4
Betrieb mit Speicherladezustand S	Regelansatz B	± ein Kessel	± ein Kessel	± ein Kessel	± ein Kessel
S sinkend	Zuschaltung bei S=	80 %	60 %	40 %	20 %
S steigend	Abschaltung bei S=	100 %	90 %	80 %	70 %

Tabelle 1: Typische Zu- und Abschaltbedingungen für eine Kaskade mit vier Holzkesseln.

	Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3
Brennstoff	Holzhackschnitzel	Holzpellets	Holzpellets
Anzahl Holzkessel	4	3	2
Kesselleistungen	4 x 330 kW	100 kW + 2 x 80 kW	2 x 85 kW
Speicherkapazität für 2/3 der Gesamtleistung mit ΔT 40 K	69 min.	110 min.	102 min.
Regelkonzept	Zuschaltung: Phase 1: Ansatz B Phase 2: Ansatz A	Ansatz A	Zuschaltung: Ansatz A ²⁾
Speicherladezustand S und Referenztemperaturen	Variante 5 20 °C – 80 °C	Variante 4 30 °C – 80 °C	Variante 4 40 °C – 80 °C
Leistungsregelung und Modulationsbereich	alle Kessel 50 % – 100 %	ein Kessel 40 % – 100 %	alle Kessel 35 % – 100 %
Entschungsintervall	12 h	8 h	7 h

Tabelle 2: Untersuchte Anlagen. ²⁾ Für zwei Kessel werden A und B identisch.

3 Praxisuntersuchung

3.1 Anlagen

Im Projekt wurden drei Anlagen untersucht, die in Tabelle 2 beschrieben sind und Kessel mit Leistungsmodulation und automatischer Entschung aufweisen.

3.2 Resultate

Da das Anfahren zu erhöhten Emissionen führen kann, wird die Anzahl Starts nach Cercl'Air als Kriterium bewertet und bei Neuanlagen auf maximal fünf Starts pro Heiztag sowie bis 100 kW auf 1000 und ab 100 kW auf 500 Starts pro Jahr begrenzt [7]. Dabei gelten alle Starts als Einzelereignis und die Anzahl Starts pro Jahr bezieht sich bei Mehrkesselanlagen auf die Summe

der Starts aller Feuerungen. Wenn die Qualität der Kesselstarts unabhängig von der Leistung ist und die Fracht bewertet werden soll, ist die Anzahl Starts pro Kessel relevant [5]. Für die Auswertung wird vorliegend jeder Zündvorgang unabhängig von der Kesseltemperatur als Start gezählt und damit auch das Anfahren nach einer Entschung bewertet.

Tabelle 3 zeigt, dass die Anlagen 611 bis 1030 Starts pro Jahr und Kessel sowie 1835 bis 2469 Starts pro Jahr und Anlage aufweisen. Bei Anlage 1 wurde nach Phase 1 die Regelung auf individuelle Zuschaltbedingungen umgestellt und 136 Tage erfasst. Hochgerechnet resultiert damit eine Reduktion der Anzahl Starts um 44 % auf 344 Starts pro Kessel und Jahr.

	Anzahl Kessel	Phase und Regelansatz	Jährliche Starts der Anlage	Jährliche Starts pro Kessel
Anlage 1	4	Phase 1 mit Ansatz B	2469	617
		Phase 2 mit Ansatz A	1377 ¹⁾	344 ¹⁾
Anlage 2	3	–	1085	611
Anlage 3	2	–	2060	1030

Tabelle 3: Anzahl jährlicher Kesselstarts. ¹⁾Hochrechnung.

Bild 4 zeigt die Anzahl täglicher Kesselstarts von Anlage 1 in Funktion der summierten Laufzeit aller Kessel, die ungefähr proportional zum Tageswärmebedarf ist. Für die Anlage mit vier Kesseln beträgt die Kessellaufzeit maximal 96 Stunden pro Tag, weshalb die x-Achse auf diesen Wert begrenzt ist. Die rote Linie zeigt die für Entschungen notwendigen Starts. Die obere Grafik beschreibt die Starts mit allgemeinen Zu- und Abschaltbedingungen mit rund doppelt so viel Starts wie zur Entschung notwendig. Durch Umstellung auf individuelle Bedingungen in der unteren Grafik wird die Anzahl Starts deutlich reduziert, nämlich nach Tabelle 3 als Jahreswert um 44 %. Die Auswertung zeigt zudem, dass die Anzahl Starts nur noch wenig grösser ist als für die Entschung notwendig.

Die Auswertungen in [5] zeigen folgende weitere Ereignisse:

- Starts von mehr als einem Kessel gefolgt von Abschaltungen nach kurzer Laufzeit wegen gleichzeitiger statt gestaffelter Boilerladungen.
- Kurzfristiges Ein- und Ausschalten (Takten), das vermieden werden kann durch ein geeignetes Regelsignal wie nach Variante 5, ausreichende Differenzen

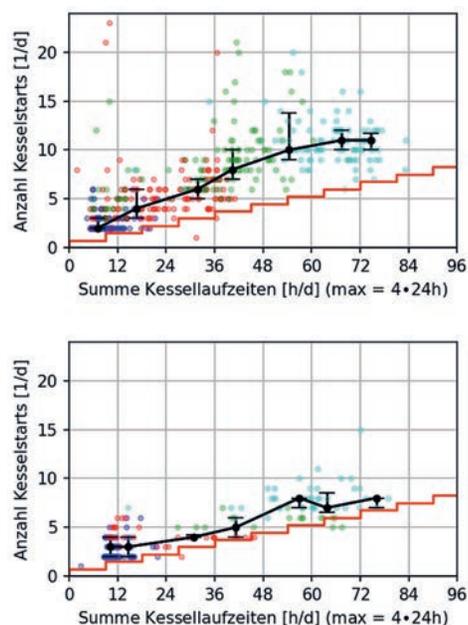


Bild 4: Anzahl täglicher Kesselstarts in Funktion der summierten Betriebsstunden von vier Holzkesseln. Oben: Betrieb mit allgemeinen, unten mit individuellen Zu- und Abschaltbedingungen. Maximale Anzahl Kessel in Betrieb: blau = 1, rot = 2, grün = 3, türkis = 4. Schwarz: Median und Quartile. Rote Linie: Starts durch Entschungen.

zwischen den Schaltpunkten sowie Referenztemperaturen, die nach QM der Kesselvorlauf- bzw. Netzzurücklauf-temperatur angepasst sind.

- Um kurze Laufzeiten zu vermeiden, ist die Leistungsmodulation nach einem Kesselstart bei steigendem Speicherladezustand rasch auszulösen und auf alle Kessel anzuwenden.
- Eine ungeeignete Verknüpfung von Zu- und Abschaltbedingungen kann zu Pendeln durch unnötige Kesselschaltungen führen und durch geeignete Einstellung vermieden werden.
- Vorgegebene Zeitfenster für die Entaschung können zu unnötigen Starts führen.

4 Prozessmodellierung

4.1 Beschreibung

Das Modell beschreibt das thermodynamische und regelungstechnische Verhalten eines Holzheizwerks mit einer beliebigen Anzahl Kessel und einem Wärmespeicher zur Deckung eines dynamischen Wärmebedarfs [5]. Für eine gegebene Konfiguration wird damit das zeitliche Verhalten für unterschiedliche Regelkonzepte simuliert. Basis des Modells bildet die Energiebilanz über den Wärmespeicher. Bei Erreichen eines entsprechend hohen Speicherladezustands werden die Kessel abgeschaltet. Wenn der Speicher vollständig entladen ist und der momentane Wärmeleistungsbedarf die Kesselleistung übersteigt, werden die Vorgaben nicht erfüllt und die Konfiguration nicht berücksichtigt.

Als Basis für den Wärmebedarf dient das Lastprofil der Anlage 1. Dieses dient zur Versorgung eines Fernwärmenetzes, welches im Tagesgang zwei ausgeprägte Lastspitzen für Warmwasser aufweist [5]. Zur Modellierung dienen einzelne Tagesprofile, aus denen anhand von MeteoDaten ein tägliches Bedarfsprofil abgeleitet wird. Für die Simulation wird der Betrieb über ein Jahr in Zeitschritten von einer Minute berechnet.

Das Regelsystem umfasst einen äusseren Kreis der Kaskadenregelung für das Zu- und Abschalten der Kessel nach Variante 5. Die Leistungsregelung der Kessel dient als innerer Regelkreis und basiert auf einem PI-Regler. Die Trägheit der Kessel wird aufgrund einer Messung der Sprungantwort durch eine An- und Abfahrzeit von 15 Minuten plus 15 Minuten Zünden berücksichtigt [5]. Damit werden Anlagen mit ein bis vier Holzkesselel mit

Variation von Speicherkapazität, Modulationsbereich und Leistungsspitzen modelliert.

4.2 Resultate zur Anlagenauslegung

Bild 5 zeigt die aus der Simulation über 365 Tage resultierenden Anzahl Kesselstarts für das Beispiel von zwei und drei Holzkesselel. Die Gesamtwerte sind unterteilt in Starts, die ohne Entaschung auftreten würden und solche, die durch die Entaschungen verursacht werden. Die Resultate in Bild 5 und Berechnungen für ein und vier Kessel in [5] zeigen folgende Trends:

- Für Kaskadenanlagen mit drei Kesseln, periodischer Entaschung, 60 Minuten Speicherkapazität und einer Leistungsmodulation ab 50% ergibt das Modell rund 1500 jährliche Starts der Anlage oder rund 500 Starts pro Kessel.
- Ohne Leistungsmodulation resultieren rund 40% höhere Werte.

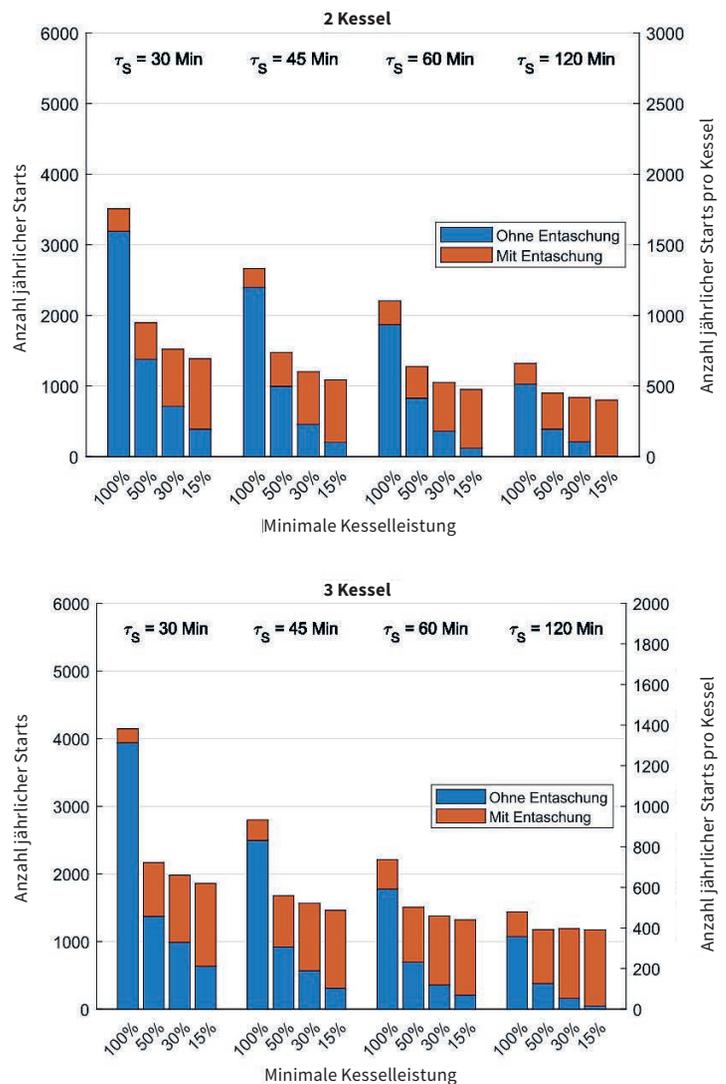


Bild 5: Anzahl jährlicher Starts in Funktion der minimalen Kesselleistung und der Speicherkapazität für Kaskaden mit zwei (oben) und drei (unten) Holzkesselel. Skala links: Anzahl Starts der Anlage, Skala rechts: Anzahl Starts pro Kessel.

- Bei Anlagen mit zwei Kesseln verursacht die Entaschung weniger als einen Drittel der Starts, bei drei oder vier Kesseln rund die Hälfte.
- Drei statt zwei Kessel verursachen weniger Starts pro Kessel und mehr Starts der Gesamtanlage.
- Eine Verdopplung der Speicherkapazität auf 120 Minuten vermindert die Anzahl Starts um rund 25%, eine Verkleinerung auf 40 Minuten erhöht sie um rund 20%.
- Durch Verminderung der Lastspitzen zur Glättung des Bedarfsprofils und maximal 60 Minuten Speicherkapazität können gegen 25% der Starts reduziert werden. Bei 120 Minuten Speicher ist kein Einfluss mehr erkennbar.

4.3 Einfluss des Schwachlastbetriebs

Da Schwachlastbetrieb zu Problemen führen kann, empfiehlt QM für Holzessel eine minimale Auslastung von 12 Stunden

pro Tag bei Minimalleistung. In der folgenden Simulation wird dies vorausgesetzt und die Wärme bei Nicht-Einhaltung fossil erzeugt. Die Resultate in Tabelle 4 zeigen, dass folgende Konfigurationen einen fossilfreien Betrieb ermöglichen: Einkesselanlagen mit Modulation ab 10 %, Zweikesselanlagen ab 30 %, Dreikesselanlagen ab 40 %, Vierkesselanlagen ab 60 %.

5 Schlussfolgerungen

Die untersuchten Kaskadenanlagen ermöglichen eine fossilfreie Wärmeerzeugung mit Energieholz. Die Praxisanlagen wiesen vor Optimierung mehr als 600 jährliche Starts pro Kessel und über 1800 Starts pro Anlage auf. Rund die Hälfte davon sind eine Folge der automatischen Entaschung. Eine Anlage wurde optimiert durch Berücksichtigung der Entaschungen in der Regelung, Verminderung von Lastspitzen, Umstellung des Regelungskonzepts und Erweiterung der Leistungsmodulation. Damit wurde die Anzahl Starts auf 350 pro Jahr und Kessel reduziert.

Die Untersuchung bestätigt den Nutzen eines Wärmespeichers und die Empfehlung von QM von einer Stunde Speicherkapazität für zwei Drittel der bei einer Zweikesselanlage installierten Leistung. Die Analyse zeigt, dass der Speicherbedarf für drei und vier Kessel nicht kleiner wird und die Auslegung deshalb auch dann empfohlen wird. Für die Anlagen werden zudem folgende Optimierungsmassnahmen aufgezeigt:

1. Zuschaltbedingungen sollten auf einem Speicherladezustand entsprechend dem für die Verbraucher nutzbaren, hohen Temperaturniveau basieren.
2. Die Zuschaltbedingung für den ersten Kessel sollte hoch, diejenige für den letzten Kessel sollte tief gewählt werden.

Leistungsmodulation	Anzahl Holzkessel			
	1	2	3	4
100 %	97 %	27 %	17 %	12 %
90 % – 100 %	66 %	24 %	16 %	11 %
80 % – 100 %	53 %	22 %	15 %	11 %
70 % – 100 %	44 %	20 %	13 %	3 %
60 % – 100 %	35 %	18 %	12 %	0 %
50 % – 100 %	26 %	16 %	2 %	0 %
40 % – 100 %	19 %	14 %	0 %	0 %
30 % – 100 %	13 %	3 %	3 %	3 %
20 % – 100 %	10 %	0 %	0 %	0 %
10 % – 100 %	0 %	0 %	0 %	0 %

Tabelle 4: Fossiler Anteil am Jahreswärmebedarf mit Einhaltung der Schwachlastbedingung. Grün: 0 % fossil, blau: < 5 %, orange: < 15 %, rot: ≥ 15 %.

3. Wichtig ist eine frühzeitige Freigabe der Leistungsregelung nach einem Kesselstart und die Ausnutzung der Leistungsmodulation aller Kessel ab 50 % Leistung.
4. Bei einer Stunde Speicherkapazität und weniger kann der Betrieb durch Glättung ausgeprägter Lastspitzen verbessert werden.
5. Lücken der Wärmeproduktion durch vorhersehbare Kesselabschaltungen für

die Entaschung sollten vorausschauend berücksichtigt werden.

6. Die Regelung und die Parametereinstellung sollten nachvollziehbar sein und bei Änderungen der Randbedingungen angepasst werden.
7. Da die Entaschungen bei optimiertem Anlagenbetrieb den Hauptteil der Starts verursachen, würde eine weitere Reduktion der Starts eine Verlängerung der Entaschungsintervalle voraussetzen. ■

Autor

*Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Professor an der Hochschule Luzern und Inhaber der Verenum AG in Zürich.

Verdankung

Die Praxisuntersuchung wurde unterstützt durch das Bundesamt für Energie, Allotherm AG, Heitzmann AG, Liebi LNC AG, Schmid AG, Holzenergie Schweiz, Holzfeuerungen Schweiz und Energie Ausserschwyz AG.

Literatur

- [1] Hammer, S. et al.: Analyse von Hemmnissen und Massnahmen zur Ausschöpfung des Holzenergiepotenzials, BfE, Bern 2021, bfe.admin.ch, pubdb.bfe.admin.ch
- [2] Müller, B.: 15. Holzenergie-Symposium, 14.9.2018, holzenergie-symposium.ch
- [3] QM Holzheizwerke: Planungshandbuch, 2022, ISBN 978-3-937441-96-2
- [4] Good, J. et al.: HK Gebäudetechnik, 12/2005, 19 – 22
- [5] Nussbaumer, T. et al.: 17. Holzenergie-Symposium. 16.09.2022, holzenergie-symposium.ch
- [6] QM Holzheizwerke: Standardschaltungen Teil I, 2010, ISBN 978-3-937441-92-1
- [7] Cercl'Air: Empfehlung Nr. 31p, Januar 2022, cerclair.ch
- [8] QM Holzheizwerke: FAQ 12, 2009, qmholzheizwerke.ch

UMWELTFREUNDLICHE HEIZUNGEN

SCHMID
energy solutions

+41 (0)71 973 73 73

SCHMID-ENERGY.CH