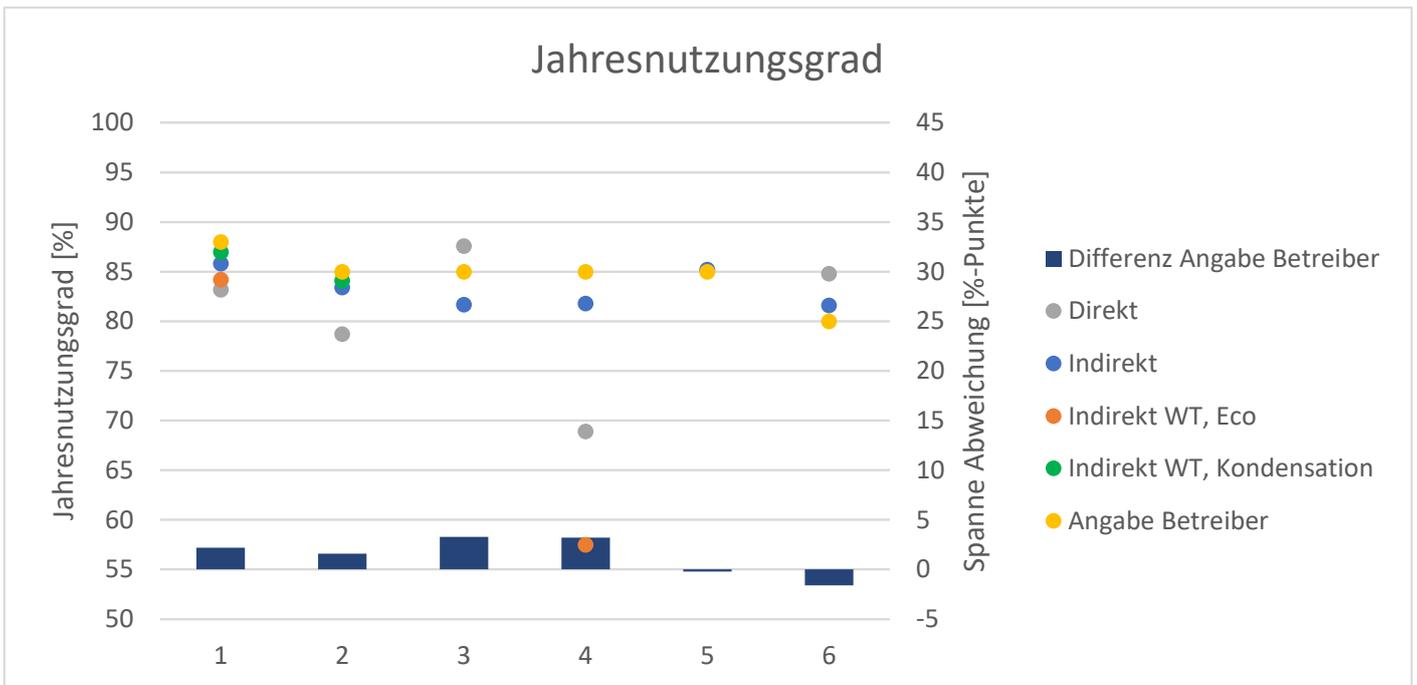


Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades und des Brennstoffenergieinhalts bei Holzheizwerken, 30.11.22

Jahresnutzungsgradberechnung bei Holzheizwerken



Auftraggeber IG Holzenergie Nordwestschweiz
Im Vrenelisgärtli 2
4102 Binningen
und
Bundesamt für Energie (BFE)
vertreten durch Daniel Binggeli

Auftragnehmer Holz & Forst Consulting GmbH
Im Vrenelisgärtli 2
4102 Binningen
+41 79 823 77 14

vertreten durch Michael Tobler

Rytec AG
Alte Bahnhofstrasse 5
3110 Münsingen

vertreten durch Martin Kiener

Diese Studie wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Version	Datum	Kontrolle (☑☐)	Freigabe
6.0	30.11.22	☑ MK, MT	☑ MK, MT

Zusammenfassung

Der Jahresnutzungsgrad ist eine zentrale Grösse beim Betrieb von Holzfeuerungsanlagen. Einerseits kann damit eine Aussage über die Effizienz des Anlagenbetriebs gemacht werden, andererseits wird der Wert häufig auch für die Abrechnung mit dem Holzlieferanten verwendet.

Ziel der Untersuchung war verschiedene Methoden zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades zu untersuchen und die Resultate miteinander zu vergleichen. Es wurden Berechnungen mittels Betriebsdaten durchgeführt wie auch der Energieinput brennstoffseitig bestimmt. Insbesondere sollte auch eine neu entwickelte Berechnungsmethode mit höherer Genauigkeit in der Praxis validiert werden. Zudem soll das vorhandene und gewonnene Wissen in die Branche gebracht werden, um so das Bewusstsein für die Wichtigkeit eines korrekt bestimmten Jahresnutzungsgrades zu stärken.

Die Resultate zeigten beim Methodenvergleich zum Teil grosse Unterschiede der berechneten Jahresnutzungsgrade. Es konnte aufgezeigt werden, dass diese Unterschiede grösstenteils auf der Messunsicherheit und damit der Berechnungsgenauigkeit der einzelnen Methoden beruhen. Verglichen mit der Standardberechnungsmethode weist die neu entwickelte Methode mit Berechnung mittels Energiebilanz eines Economizers die kleinste Ungenauigkeit auf. Die Berechnung mittels Energiebilanz über den Kessel weist auf Grund der grossen Messunsicherheit für die Gastemperatur vor dem Kessel eine hohe Berechnungsunsicherheit auf. Kann die Messunsicherheit der Gastemperatur vor dem Kessel auf 50°C eingeschränkt werden nimmt die Berechnungsunsicherheit auf rund 4% ab und liegt in derselben Grössenordnung wie bei einer Berechnung über einen Economizer.

Bei der brennstoffseitigen Berechnung ist es deutlich vorteilhafter, wenn die Berechnung über die gewogene Brennstoffmenge gemacht werden kann. Die Ungenauigkeit dieser Methode liegt im Bereich der Standardmethode und ist mit 8.7% gut doppelt so hoch wie für die genaueste Methode.

Für eine erste Abschätzung über den zu erwarteten Jahresnutzungsgrad kann zukünftig online, ein vom Projektteam erarbeiteter Jahresnutzungsgrad-Check ausgefüllt werden.

Generell ist eine periodische Berechnung des Jahresnutzungsgrades für die Parteien empfehlenswert. Läuft eine Anlage über mehrere Jahre stabil und ohne wesentliche Parameteränderungen, kann der Rhythmus einer Berechnung auch vergrössert werden. Wesentlich ist eine Berechnung nach der Inbetriebnahme einer Anlage über die ersten Jahre.

Verzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ausgangslage.....	5
1.2	Ziele der Untersuchung.....	5
2	Kurzbeschreibung des Vorgehens	6
2.1	Messungen und Berechnung brennstoffseitig.....	6
2.2	Messungen und Berechnung anlagenseitig	6
3	Untersuchte Anlagen	7
3.1	Anlage 1.....	7
3.2	Anlage 2.....	7
3.3	Anlage 3.....	8
3.4	Anlage 4.....	8
3.5	Anlage 5.....	9
3.6	Anlage 6.....	9
4	Methoden zur JNG-Berechnung	10
4.1	Berechnung über Brennstoff	10
4.2	Berechnung über anlagenseitige Betriebsdaten	15
4.3	Berechnung/Annahme Strahlungsverlust	19
4.4	Berechnung Ascheverluste	19
5	Berechnungsunsicherheit	19
6	Resultate	21
6.1	Resultate brennstoffseitig.....	21
6.2	Resultate anlagenseitig.....	22
6.3	Vergleich der Resultate für drei Berechnungsmethoden	23
6.4	Jahresnutzungsgrad-Check.....	25
7	Schlussfolgerungen und Fazit	25
8	Literatur und Quellenverzeichnis	27
9	Anhang: Erläuterungen zur Berechnung	28
9.1	Anhang 1: Berechnung des Kesselwirkungsgrades mittels Energiebilanz eines Wärmetauschers, Methode «Indirekt-WT».....	28
9.2	Anhang 2: Berechnung der Ascheverluste	29

Glossar

Abkürzungen

Eco	Economizer
JNG	Jahresnutzungsgrad
TOC	Total Organic Carbon, Gesamter organischer Kohlenstoff
WG	Wirkungsgrad

Römische Zeichen

c	Masseanteil	[-]
cp	Spezifische Wärmekapazität	[kJ/kgK]
H _u	Heizwert	[kJ/kg]
m	Masse	[kg]
Q	Energie	[kJ]
T	Temperatur	[K], [°C]
u	Brennstofffeuchte (bez. Trockenmasse)	[%]
V	Verluste	[-]
M	Wassergehalt (bez. Gesamtmasse)	[-]

Griechische Zeichen

Δ	Differenz	
η	Wirkungsgrad/Nutzungsgrad	[-]

Indizes

A	Asche
a	Jahres-
AG	Abgas
atro	Absolut trocken
Brst	Brennstoff
Eco	Economizer
f	feucht
Ka	Kamin
Ke	Kessel
Kond	Kondensation
n	nach
RG	Rauchgas
Str	Strahlungs-
SW	Speisewasser
th	thermisch
tr	trocken
Umg	Umgebungs-
v	vor
W	wasserseitig
WT	Wärmetauscher
zu	zugeführt

Definitionen

Jahresnutzungsgrad Verhältnis von nutzbarer zu aufgewendeter Energie innerhalb eines Betrachtungszeitraums. Betrachtung sowohl der verschiedenen Betriebszustände und Betriebsverluste auf einer Anlage.

Nutzungsgrad und Wirkungsgrad Verhältnis von nutzbarer zu aufgewendeter Energie zu einem bestimmten Zeitpunkt.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Für die Abrechnung der gelieferten Brennstoffmenge wird häufig die produzierte Wärmeenergie mit einem angenommenen Jahresnutzungsgrad der Feuerung verrechnet und so der Brennstofflieferant vergütet.

Der Jahresnutzungsgrad ist daher eine zentrale Grösse bei Holzfeuerungsanlagen. Zum einen ist er für den Betreiber wichtig, um einschätzen zu können, ob die Anlage gut läuft oder ob noch Optimierungspotenzial besteht. Zum anderen ist der Jahresnutzungsgrad entscheidend für den Holzlieferanten, da dieser meistens für die im Wärmezähler nach dem Kessel gemessene Wärme vergütet wird. Ist der Jahresnutzungsgrad einer Anlage jedoch tief, geht dieser Verlust zu Lasten des Holzlieferanten. Dabei ist oft unklar, ob der angenommene Nutzungsgrad im Betrieb erreicht wurde. In der Praxis ist es jedoch schwierig und aufwändig, den genauen Energieinput zu bestimmen.

Das Hauptproblem ist die geringe Aufmerksamkeit von Energieunternehmungen, Kontraktoren und Holzlieferanten für das wichtige Thema des Jahresnutzungsgrades. Grund dafür dürfte in der komplexen Berechnung des Jahresnutzungsgrades liegen. Holzlieferanten ihrerseits kennen bisher keine einfachen Methoden um den Heizwert, respektive den gesamten Energieinput in der Heizung abzuschätzen.

1.2 Ziele der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung des Energieinputs respektive des Jahresnutzungsgrades bei mehreren Anlagen in der Praxis. Zudem soll eine alternative Methode zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades, welche ohne Kenntnis des Wassergehalts auskommt, mit bisher bekannten Berechnungsmethoden verglichen und validiert werden. Bisher wurde diese Methode nur bei zwei Holzkraftwerken von > 10 MW Leistung validiert. Das Ziel der vorliegenden Untersuchung ist der Vergleich verschiedener Methoden zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades und des Brennstoffenergieinhalts bei Holzheizungen in der Grössenordnung von 800 kW bis 5000 kW Leistung.

Die Methoden werden miteinander verglichen und in Bezug zur Genauigkeit analysiert. Weiter soll das durch dieses Projekt erworbene Wissen zum Energieinhalt von Energieholz sowie zum Jahresnutzungsgrad von Holzfeuerungsanlagen mit dem heutigen Wissen verglichen und verbreitet werden, um damit für alle Beteiligten eine Basis für eine gute Zusammenarbeit zu schaffen. Dazu wird ein Jahresnutzungsgrad-Check erarbeitet.

2 Kurzbeschreibung des Vorgehens

2.1 Messungen und Berechnung brennstoffseitig

Die Quantifizierung des Energieinputs in eine Heizung mittels Stichproben der verschiedenen Brennstoffsortimente erfordert die Aufnahme von gewissen Parametern. Die Probeserie wurde mit dem Beginn der Heizsaison 2021/22 bei allen beteiligten Projektpartnern begonnen. Ab diesem Zeitpunkt wurde die Energie, resp. der Holzinput sowie heizungsbezogenen Parameter aufgenommen, um den Jahresnutzungsgrad der Heizzentrale zu ermitteln.

Der Wassergehalt der Stichproben wurde bei der Prüfstelle ermittelt. Um die Energiemenge, welche aus der Stichprobe ermittelt wird für die gesamte Lieferung zu berechnen, wurde die vollständige Lieferung, respektive der ganze LKW auf dem Weg zur Heizung einmal gewogen. Das Gewicht des LKWs wurde nach dem Abladen nochmals gewogen und dadurch das Gewicht der Holzlieferung ermittelt.

Mit dem ermittelten Wassergehalt der Stichproben, der gelieferten Holzmenge und des Holzgewichts wurde die Energiemenge der Lieferung berechnet. Die Einteilung des Brennstoffs in verschiedene Qualitätssortimente ermöglichte, eine differenzierte Energiemenge pro Sortiment und Schüttraummeter auszuweisen.

Per Messebeginn und am Ende der Messperiode wurde zusätzlich der Silostand ermittelt um die effektive Menge, welche thermisch genutzt wurde abzubilden. Je nach Heizanlage wurden diese Mengen sogar monatlich ermittelt.

Mit diesem Vorgehen konnte die gelieferte Energiemenge an die Heizung berechnet werden.

2.2 Messungen und Berechnung anlagenseitig

Die anlagenseitige Ermittlung des Jahresnutzungsgrades erfolgt über die Auswertung von Anlagendaten. Dabei werden wichtige Betriebsparameter kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet. Die Daten werden anschliessend für die gewünschte Betriebsperiode (Heizsaison, Betriebsjahr) gemittelt. Anschliessend kann damit der Jahresnutzungsgrad berechnet werden.

Da zum Teil nicht alle benötigten Betriebsparameter aufgezeichnet wurden, musste auf einigen Anlagen noch zusätzliche Sensoren und Messungen installiert werden, damit alle benötigten Messdaten aufgezeichnet werden konnten.

3 Untersuchte Anlagen

3.1 Anlage 1

Anlagen-Typ	Dampfkessel
Kessel-Nennleistung	3300 kW, Agroforst
Zusatzkomponenten	Economizer, Abgaskondensation Abgasrezirkulation
Inbetriebnahme	2019
Energieproduktion	Ca. 25 GWh/a
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 73 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 27 % Hu: 989 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Nach Angabe Ofenhersteller, gestützt auf Theorie und Literatur Annahme JNG = 88 %

3.2 Anlage 2

Anlagen-Typ	Warmwasserkessel
Kessel-Nennleistung	3200 kW, Agroforst 1600 kW, Agroforst
Zusatzkomponenten	Abgaskondensation
Inbetriebnahme	2016
Energieproduktion	17 GWh
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 74 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 26 % Hu: 890 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Keine laufende Ermittlung, Annahme Ofenhersteller Annahme JNG = 85 %

Besonderheiten: Die Abgase werden von beiden Kesseln zusammen über die Abgaskondensationsanlage geführt. Deshalb ist diese erst in Betrieb, sobald der grosse Kessel in Betrieb geht.

3.3 Anlage 3

Anlagen-Typ	Warmwasserkessel
Kessel-Nennleistung	1200 kW, Schmid 550 kW, Schmid
Zusatzkomponenten	-
Inbetriebnahme	2016
Energieproduktion	7.5 GWh
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 85 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 15 % Hu: 982 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Keine laufende Ermittlung, Annahme Ofenhersteller Annahme JNG = 85 %

3.4 Anlage 4

Anlagen-Typ	Warmwasserkessel
Kessel-Nennleistung	850 kW, Mawera
Zusatzkomponenten	Economizer Abgaskondensation Abgasrezirkulation
Inbetriebnahme	2014
Energieproduktion	18 GWh
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 60 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 38 % Astmaterial: 2 % Heizwert: 921 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Keine laufende Ermittlung, Annahme Ofenhersteller Annahme JNG = 85 %

3.5 Anlage 5

Anlagen-Typ	Warmwasserkessel
Kessel-Nennleistung	1200 kW, Schmid
Zusatzkomponenten	-
Inbetriebnahme	2020
Energieproduktion	3 GWh
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 46 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 54 % Hu: 907 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Keine laufende Ermittlung, Annahme Ofenhersteller Annahme JNG = 85 %

3.6 Anlage 6

Anlagen-Typ	Warmwasserkessel
Kessel-Nennleistung	1600 kW, Schmid 900 kW, Schmid
Zusatzkomponenten	Abgasrezirkulation
Inbetriebnahme	2014
Energieproduktion	5.5 Gwh
Brennstoffmix	Waldhackschnitzel Laubholz: 100 % Waldhackschnitzel Nadelholz: 0 % Hu: 954 kWh/SRm
Angewendete Methode der bisherigen Ermittlung des JNG	Ausgelegt nach einer Machbarkeitsstudie Annahme JNG = 80 %

Bei drei Anlagen mussten zusätzliche Messungen installiert werden. Einmal eine Temperaturmessung im Abgas vor der Kondensation und bei zwei Anlagen eine Volumenstrommessung der Abgasrezirkulation. Die Daten wurden dabei in Echtzeit aufgezeichnet und konnten online kontrolliert werden¹. Dies war insbesondere

¹ Online Datenlogging in eine Grafana-Cloud erfolgte durch A. Lauber, Verenum AG

für die Messung des Volumenstroms der Abgasrezirkulation relevant, da die eingesetzten Prandtlrohre durch die Staubbelastung verstopfen konnten.



Abbildung 1: Temperaturmessung vor Kondensation (links), zusätzlich eingerichtete Messstelle für die Volumenstrommessung der Abgasrezirkulation (mitte), spezielles gerades Prandtl-Rohr für kleine Messöffnungen (rechts)

4 Methoden zur JNG-Berechnung

4.1 Berechnung über Brennstoff

Bei dieser Methode wird periodisch eine Brennstoffprobe genommen und deren Wassergehalt bestimmt, um den Energieinhalt zu bestimmen. Wichtig ist die Einteilung des Brennstoffs in verschiedene Qualitätssortimente mit der Abstufung eines unterschiedlichen Brennwertes.

Zu Dokumentationszwecken wurde die gesamte gelieferte Holzmenge in diesem Zeitraum aufgenommen und in diesen nachfolgenden Sortimentsklassen aufgeführt:

- 100 % Hartlaubholz
- 75 % Hartlaubholz
- 50 % Hartlaubholz
- 25 % Hartlaubholz (75 % Nadel- und Weichholz)
- 100 % Nadel- und Weichlaubholz
- Astmaterial

Diese Sortimentseinteilung dient dazu, eine Gruppierung der Energieinhalte pro Schüttraummeter festzustellen. Daher war es wichtig, eine Probenahme der verschiedenen und tatsächlich eingebrachten Sortimente zu erhalten.

Die Eingaben sind auf dem zur Verfügung gestellten Excel-Formular nachzutragen. Ein Beispiel ist beigelegt. Lieferungen können pro Liefertag und pro Sortiment in einer Summe eingegeben werden.

Zur vollständigen Dokumentation muss ebenfalls ein monatlicher Silo-Füllstand zum Zeitpunkt der Zählerablesung angegeben werden. Dafür ist eine Schätzung des Silostandes genügend.

4.1.1 Probennahme

Eine repräsentative Holzbeprobung ist zwingend und stellt bei unsachgemässer Ausführung eine erhebliche Fehlerquelle dar.

Eine Probenahme hat das Ziel, Material zu entnehmen, welches den Probekörper repräsentativ widerspiegelt. Bei der Entnahme einer Probe sind daher einige Punkte und die Systematik von grosser Wichtigkeit. Nicht nur bei Proben von Holzschnitzeln, sondern auch bei allen anderen Gütern liegt in der Probenahme die grösste Fehlerquelle. Daher ist die richtige Vorgehensweise sehr wichtig. Sollte sich eine fehlerhafte Probenahme im Nachgang herausstellen, werden die ganzen Resultate infrage gestellt.

Um eine Gesamtheit einer repräsentativen Probe zu erhalten, wurden mehrere Einzelproben zu einer Mischprobe vereinigt. Dabei wurde angenommen, dass der Gehalt des Messparameters in der Mischprobe etwa dem Mittelwert des Gehalts der beprobten Gesamtheit entspricht. Somit kann die Heterogenität der Gesamtheit bei der Probenahme weitgehend ausgeglichen werden.

Damit für die Laborprobe genügend Material vorhanden ist, muss für die Mischprobe die achtfache Menge entnommen werden. Für das Herstellen einer Mischprobe wurden folgende vier Schritte angewendet:

Schritt 1:

Die Sammelprobe wird gut gemischt und dabei in gleich grosse Teilmengen aufgeteilt.

Schritt 2:

Von der zu teilenden Probe wird abwechselnd eine Schaufel der einen, dann der anderen Teilmenge zugeordnet. Alle Schaufelportionen sind etwa gleich gross.

Schritt 3 und 4:

Die Teilmenge, die für den nächsten Arbeitsschritt oder am Schluss als Laborprobe weiterverwendet wird, muss nach dem Mischen zufällig ausgewählt werden. Abgeschiedene Probemengen werden nicht mehr benötigt und können entsorgt werden.

Ob Rückstellproben benötigt werden, ist dem Probenehmer überlassen.

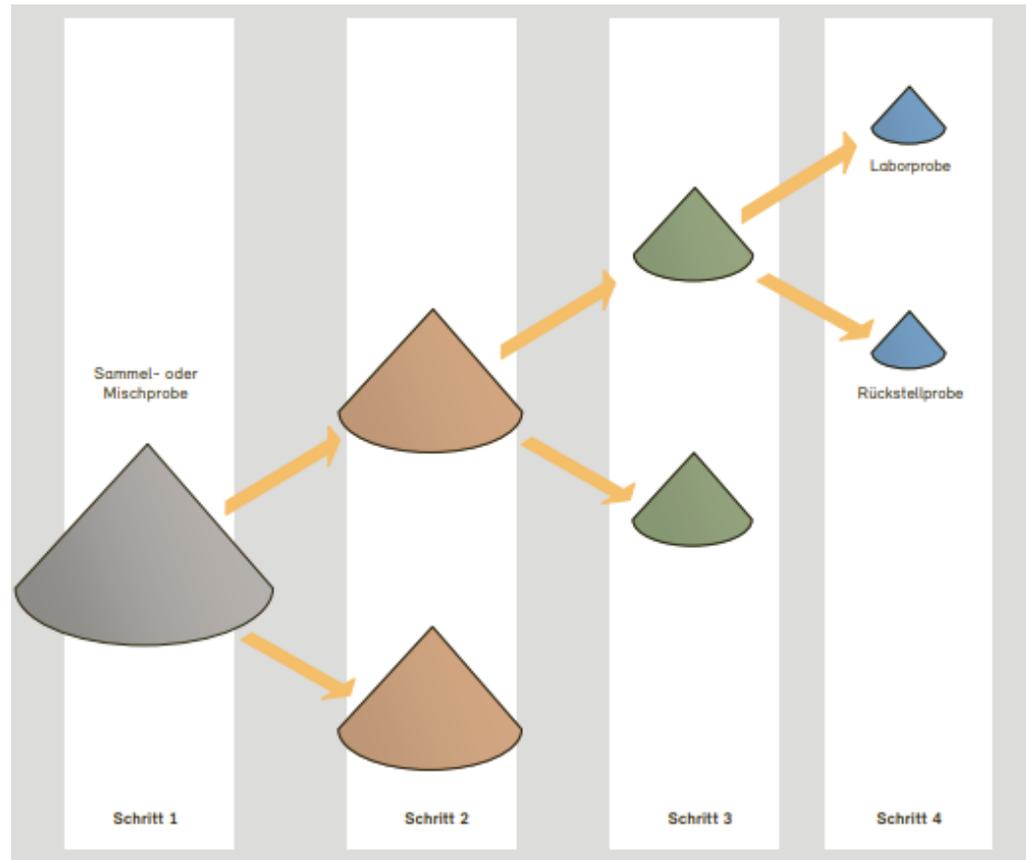


Abbildung 2: Vorgehen zur Probenahme fester Abfälle [1].

Die entnommenen Proben müssen in verschliessbare Probebeutel verpackt und gut verschlossen werden. Die Luft muss aus dem Probebeutel gepresst und mit der Schiessvorrichtung luftdicht verschlossen werden und an die Prüfstelle gesendet werden.

4.1.2 LKW – Wägung

Um die Energiemenge, welche aus der Stichprobe ermittelt wurde, auf die gesamte Lieferung zu rechnen, muss die ganze Lieferung, respektive der ganze LKW mit der vollen Lieferung auf dem Weg zur Heizung einmal gewogen werden. Das Gewicht des LKWs wird danach wieder rückgewogen, damit das Gewicht der Holzlieferung ermittelt werden kann. Sollte immer das gleiche Fahrzeug verwendet werden, genügt eine einzige Rückwägung. Bei wechselnden Fahrzeugen muss jede Lieferung rückgewogen werden. Das Gewicht musste für dieses Projekt mittels Wägeschein oder Foto der Waageanzeige dokumentiert werden.

4.1.3 Bestimmung Wassergehalt

Um die absolut trockene Masse der Holzlieferungen zu bestimmen, wurde der Trockengehalt, respektive der Wassergehalt ermittelt. Die Holzproben werden nach dem Eintreffen bei der Prüfstelle in feuchtem Zustand unter Berücksichtigung der Wasseranhaftungen am Probebeutel gewogen. Die Proben wurden anschliessend

mit dem Darrverfahren bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und erneut mittels Präzisionswaage (Genauigkeit mind. 0,1 g) gewogen. Aus der Differenz zwischen dem Gewicht der feuchten Probe und der Trockenmasse wurde der Trockengehalt/Wassergehalt des Probeguts ermittelt. Die Probemenge pro feuchte Probe betrug zwischen 400 – 600 g und bis 1.5 kg mit dem Probebehälter.



Von der Anlage Nr. 1 wurde für 4 Proben und von den Anlagen Nr. 2, 4, 5 wurde für alle Proben der Wassergehalt im Prüflabor vom Projektteam aufbereitet. Die restlichen Proben der Anlage Nr. 1 und der Anlagen Nr. 3 und 6 wurden durch die Lieferanten selbst, jedoch nach den Vorgaben

gemessen.

Folgende Anzahl Stichproben wurden pro Anlage entnommen:

Anlage 1	66 Proben
Anlage 2	16 Proben
Anlage 3	106 Proben
Anlage 4	16 Proben
Anlage 5	14 Proben
Anlage 6	190 Proben

Das Trocknungsverfahren im Probelabor wurde mit einer Mikrowellentrocknung bis zu der Gewichtskonstanz getrocknet. Eine zusätzliche Messung 10 Minuten nach der zweiten Messung hat das Resultat jeweils bestätigt.

Der im Mikrowellenbereich arbeitende Trockner, verwendet Frequenzen von 1 bis 6 GHz. Die Elektroden befinden sich nicht in unmittelbarer Nähe des Trocknungsgutes, sondern es wird die im Generator erzeugte HF-Energie durch Hohlleiter dem Trocknungsgut zugeführt. Das Holz wird direkt durch den Hohlleiter geführt, wobei dieser selbst den "Trocknungsraum" bildet. Charakteristisch für einen Mikrowellengenerator ist der Dauerbetrieb mit Höchstleistung und die Vernichtung der

überschüssigen bzw. nicht zur Trocknung genutzten Energie in einem angeschlossenen Absorptionswiderstand.

Der Trocknungsvorgang gleicht einer HF-Trocknung. Die zugeführte Energie wird mittels Wechselfeld übertragen und lässt die Feuchte im Inneren des Holzes verdampfen. Es muss keine Wärme von außen durch ein entsprechendes Temperaturgefälle zugeführt werden.

Im Probematerial entsteht ein Temperaturgefälle von innen nach außen, so dass das verdampfende Wasser zur Oberfläche strömt und von dort konvektiv abgeführt werden muss.

Mit folgender Berechnungsformel ist der Wassergehalt ermittelt worden:

$$M_{Brst} = \frac{m_{Wasser}}{m_{Holz,f}} 100, [\%]$$

4.1.4 Berechnung

Die Bestimmung vom Energieinhalt der gesamten Holzlieferung wurde nachfolgender Berechnung ermittelt:

1. Berechnung:

Energieinhalt des Brennstoffs [2]

$$H_u = H_{u,atro} m_{Holz,atro} - M_{Holz} 0.68 \left[\frac{kWh}{kg} \right]$$

2. Berechnung:

Energieinhalt der Lieferung:

$$Q_{Lieferung} = \frac{m_{Lieferung} H_{u,Lieferung}}{1000} [MWh]$$

Heizwerte wurden für alle Proben nachfolgenden Heizwerten pro Sortimente gerechnet:

Sortimentseinteilung	Heizwert $H_{u,atro}$:
Hartlaubholz 100 % (Q 1)	5.00 kWh/kg
Hartlaubholz < 75 %	5.05 kWh/kg
Hartlaubholz < 50 % (Q 2)	5.10 kWh/kg
Weich-, und Nadelholz > 25 %	5.15 kWh/kg
Nadelholz, Weichholz (Q 3)	5.20 kWh/kg
Astmateriale 100 % (Q 4)	5.00 kWh/kg

4.2 Berechnung über anlagenseitige Betriebsdaten

4.2.1 Jahresnutzungsgrad

Der Jahresnutzungsgrad kann aus dem momentanen Kesselwirkungsgrad berechnet werden. Dabei werden die Momentanwerte (Tagesmittelwerte) des Kesselwirkungsgrades über das Jahr gemittelt, oder Jahresmittelwerte der für die Berechnung benötigten Parameter verwendet [3]:

$$\eta_a = \bar{\eta}_{Ke} \quad \text{oder} \quad \eta_a = \eta_{Ke}(\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_n)$$

\bar{P}_{1-n} : benötigte Berechnungsparameter

4.2.2 Berechnung nach indirekter Standardmethode

Die Standardmethode zur Berechnung des Kesselwirkungsgrades ist die indirekte Wirkungsgradberechnung. Dabei wird der prozentuale Abgasverlust in Abhängigkeit des Wassergehalts, der Restsauerstoffkonzentration im Abgas sowie der Abgastemperatur berechnet:

$$V_{th} = (T_{AG} - T_{Ref}) \frac{\left\{ 139 + \frac{12200}{0.98(21 - \sigma_{O_2})} + 2u \right\}}{(H_{u,atro} - 25u)} [-]$$

Bei dieser Methode muss eine Annahme zum Heizwert von trockenem Holz getroffen werden:

Heizwert $H_{u,atro}$: 18'300 kJ/kg (entspricht 5.1 kWh/kg)

Sofern der Wassergehalt nicht bekannt ist, muss dazu auch eine Annahme getroffen werden. Für die aktuelle Berechnung wurde jeweils mit dem Wassergehalt gerechnet, welcher aus den Brennstoffproben ermittelt wurde.

4.2.3 Berechnung über Energiebilanz eines Wärmetauschers

Als Alternative zu bestehenden Methoden für die Berechnung des Jahresnutzungsgrades wurde eine neue Methode «Indirekt WT» entwickelt [4]. Dabei werden die thermischen Verluste (Rauchgasverluste) über die Energiebilanz eines Economizers berechnet und so indirekt auf den Kesselwirkungsgrad geschlossen. Der Economizer wird dabei als riesiger Massenstromsensor verwendet.

Die Methode ist insbesondere interessant, weil keine Annahmen zum Energieinput getroffen werden müssen (z.B. zum Brennstoffheizwert). Alle benötigten Berechnungsgrößen können gemessen werden. Dadurch wird auch die Berechnungsunsicherheit kleiner. Die Methode funktioniert verallgemeinert für jeden Wärmetauscher im Rauchgasweg bei welchem die übertragene Energiemenge/Leistung auf der Sekundärseite (nicht rauchgasseitig) bekannt ist.

Für die Berechnung werden die folgenden Messgrößen verwendet:

- Rauchgastemperatur vor Wärmetauscher
- Rauchgastemperatur nach Wärmetauscher
- Leistung Wärmetauscher (oder Berechnung über Wassertemperatur vor und nach Wärmetauscher und Wassermassenstrom)

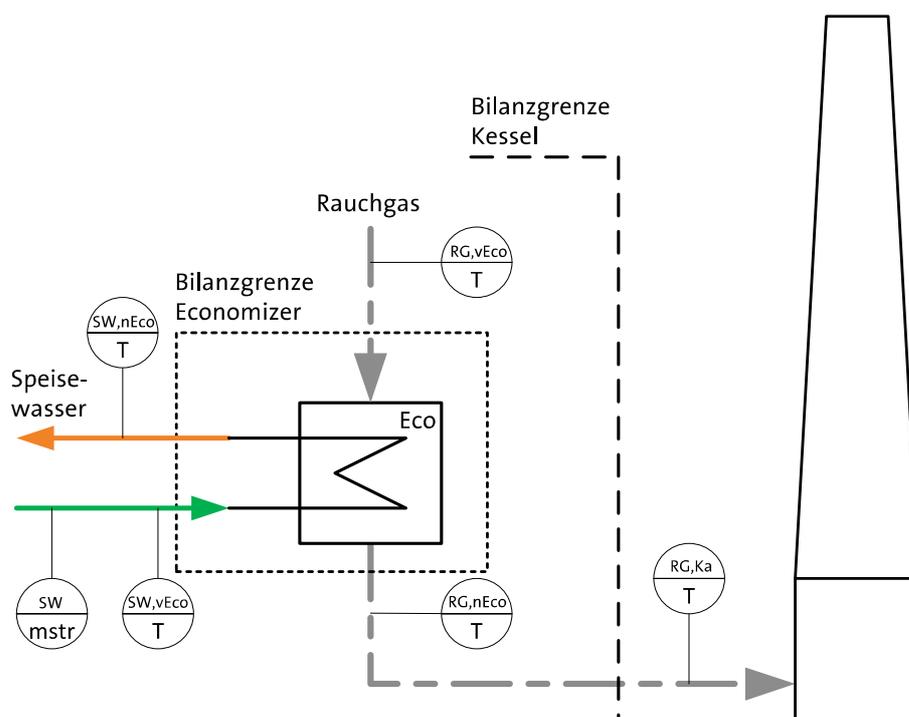


Abbildung 3: Bilanzgrenze und benötigte Messgrößen für die Berechnung mittel Energiebilanz eines Economizers [4]

Für die Berechnung werden also nur Temperaturmessungen und ein Wärmehähler oder eine Wasserdurchflussmessung benötigt. Die Berechnung ist unabhängig vom Luftüberschuss und deshalb nicht sensitiv gegenüber Falschluff im Rauchgasweg, sofern die Falschluff nicht zwischen den beiden Rauchgastemperaturmessstellen vor und nach dem Wärmetauscher eintritt. Strahlungsverluste werden vernachlässigt, da die Oberflächentemperatur bei einem Wärmetauscher (z.B. Economizer, Rauchgas-Kondensation) nicht sehr hoch ist und sich diese Ungenauigkeit nur marginal auf die Berechnung des Kesselwirkungsgrades auswirkt.

Ist die Leistung des Wärmetauschers wasserseitig bekannt, kann der Rauchgasmassenstrom berechnet werden:

$$\dot{m}_{RG} = \frac{\dot{Q}_{WT,W}}{c_{pRG,WT} \Delta T_{RG,WT}} \quad (1)$$

Die absolute Rauchgasverlustleistung ist abhängig von der Rauchgastemperaturdifferenz des Abgases gegenüber der Umgebung, resp. der Referenztemperatur:

$$\dot{Q}_{RG} = \dot{m}_{RG} \overline{c p}_{RG, Ka} (T_{RG, Ka} - T_{Ref}) \quad (2)$$

Wird nun Gleichung (3) in (4) eingesetzt, können die Rauchgasverluste unabhängig vom Rauchgasmassenstrom berechnet werden.

$$\dot{Q}_{RG} = \dot{Q}_{WT} \frac{\overline{c p}_{RG, Ka} \Delta T_{RG, Ka}}{\overline{c p}_{RG, WT} \Delta T_{RG, WT}} \quad (3)$$

Einzig die Leistung des Wärmetauschers sowie die Rauchgastemperaturen vor und nach Wärmetauscher und am Kamin sowie die mittlere spezifische Wärmekapazität müssen bekannt sein. Die Wärmekapazität ist jedoch nicht bekannt, da diese neben der Rauchgastemperatur vor allem von der Rauchgasfeuchte und damit vom Brennstoffwassergehalt abhängig ist. Interessanterweise bleibt das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten bei zwei unterschiedlichen Rauchgastemperaturen unabhängig vom Wassergehalt näherungsweise konstant (vgl. Abbildung 4). Das Verhältnis zwischen z.B. Punkt 2 im Bereich von 125°C (orange Linie) und Punkt 1 im Bereich von 250° (rote Linie) resp. zwischen Punkt 4 und Punkt 3 ist in etwa konstant:

$$\frac{\overline{c p}_{RG, Ka}}{\overline{c p}_{RG, WT}} = \frac{\overline{c p}_2}{\overline{c p}_1} \approx \frac{\overline{c p}_4}{\overline{c p}_3} \quad (4)$$

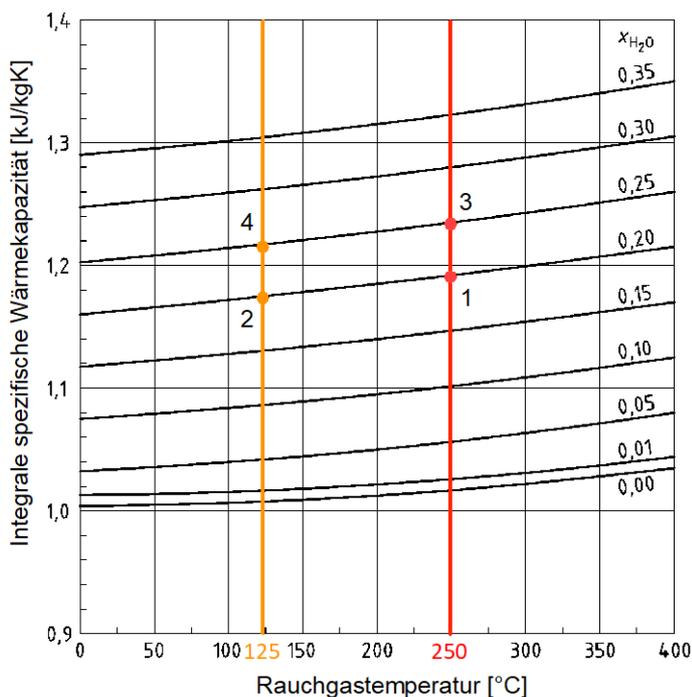


Abbildung 4: Mittlere spezifische Wärmekapazität $c p_{RG}$ für Rauchgas (a) in Abhängigkeit von der Rauchgasfeuchte (x_{H_2O}) und der Rauchgastemperatur T_{RG} (angepasst aus [5])

D.h. der Wassergehalt kann vernachlässigt werden, respektive es kann modellhaft mit einer Rauchgasfeuchte von ca. 20 % gerechnet werden ($x_{H_2O}=0.124$). Die spezifische Wärmekapazität im Rauchgas kann mittels Polynomfunktion ermittelt werden [5].

Die prozentualen thermischen Verluste (Rauchgasverlust) lassen sich wie folgt berechnen (Herleitung ist im Anhang beschrieben):

$$V_{th} = \frac{\dot{Q}_{RG}(1-V_{Str}-V_A)}{\dot{Q}_{Ke}+\dot{Q}_{RG}} [-] \quad (5)$$

Unter Berücksichtigung der Strahlungs- und Ascheverluste (Berechnung im Anhang) berechnet sich der aus dem Verhältnis der Rauchgasverluste und dem Energieinput, ausgedrückt als Summe der gewonnenen Kesselenergie und dem Rauchgasverlust, berechnete Kesselwirkungsgrad wie folgt (genaue Herleitung ist in Anhang 9.1 beschrieben):

$$\eta_{Ke} = 1 - V_{Str} - V_A - V_{th} = (1 - V_{Str} - V_A) \left(1 - \frac{\dot{Q}_{RG}}{\dot{Q}_{Ke}+\dot{Q}_{RG}}\right) \quad (6)$$

Hinweis: Zur Berechnung kann anstelle der Leistung auch die Energiemenge verwendet werden.

4.2.4 Energiebilanz über Kessel

Eine analoge Berechnung kann auch mittels einer Energiebilanz über dem Kessel gemacht werden. Dazu werden Messungen der Abgastemperatur vor (Abgastemperatur in Nachbrennkammer) und nach dem Kessel benötigt. Der Nachteil bei dieser Berechnungsvariante ist, dass es sehr schwierig ist, die Gastemperatur vor dem Kessel korrekt zu bestimmen. Je nachdem können Abweichungen von bis zu über 150°C von der effektiven Gastemperatur auftreten [6]. Eventuell kann durch mehrmaliges Verschieben der Position und anschließender Kontrolle des Temperaturfühlers die Messgenauigkeit erhöht werden. Dies konnte jedoch im Rahmen dieses Projektes nicht überprüft werden.

4.2.5 Energiebilanz über Abgaskondensation

Als Alternative bietet sich eine Berechnung über eine Rauchgaskondensation an. Dabei wird analog der oben beschriebenen Methode eine Energiebilanz über die Kondensation gemacht und indirekt auf den Kesselwirkungsgrad geschlossen. Da bei einer Abgaskondensationsanlage ein Teil der Energie aus der Kondensation des im Abgas vorhandenen Wasserdampfs gewonnen wird, muss für die Berechnung eine Korrektur eingeführt werden, so dass für die Berechnung nur die Energiemenge berücksichtigt wird, welche durch reine Abkühlung des Rauchgases entsteht, ohne Anteil Kondensationsenergie [7].

$$\dot{Q}_{WT,W} = 5.583 \frac{21}{21-O_2} (1 - M) \bar{c}_{p,KG,Kond} \Delta T_{RG,Kond}$$

Wie in der Formel ersichtlich, muss dazu der Wassergehalt im Brennstoff bekannt sein oder es muss eine Annahme dazu getroffen werden. Dies wirkt sich dementsprechend auf die Berechnungsunsicherheit aus (vgl. Kap. 5). Sofern die Abgastemperatur nach der Kondensation der Taupunkttemperatur (d.h. das Abgas wird nicht weiter unterkühlt) entspricht, kann der Wassergehalt damit berechnet werden [8].

4.3 Berechnung/Annahme Strahlungsverlust

Für die Strahlungsverluste wird entweder der Wert einer Abnahmemessung oder eine Angabe des Kesselerstellers berücksichtigt. Für die untersuchten Anlagen liegt der Strahlungsverlust im Bereich von 1.5 %.

4.4 Berechnung Ascheverluste

Für die Berechnung der Ascheverluste wurde ein Anteil an TOC in der Asche von 1.5 % angenommen. Anschliessend wurde über die effektive Aschemenge der Wert für den Ascheverlust berechnet (vgl. Anhang). Für die untersuchten Anlagen ergibt sich damit ein Ascheverlust von rund 0.1 %.

5 Berechnungsunsicherheit

Die Berechnungsunsicherheit wird nach dem Standardverfahren für Messunsicherheit berechnet [9]. Dabei wird jeweils pro Messgrösse eine Messunsicherheit angenommen und anschliessend die kombinierte Unsicherheit für den berechneten Jahresnutzungsgrad ermittelt. Es wurden folgende Messunsicherheiten angenommen:

Mess-/Berechnungsgrösse	Unsicherheit	Quelle
Gastemperatur Nachbrennkammer	150°C	[6]
Abgastemperaturen >200°C	10°C	[10]
Abgastemperaturen <200°C	5°C	[10]
O ₂ -Konzentration im Abgas	5 %	[11]
Wärmezähler	2 %	[12]
Heizwert von trockenem Holz	450 kJ/kg	[13]
Brennstoffwassergehalt	5 Gew-%	[12]
Rauchgasmassenstrom Rezi	10 %	[10]
Brennstoffmenge	5 %	Eigene Abschätzung
Brennstoffvolumen	10 %	Eigene Abschätzung
Schüttdichte	5 %	Eigene Abschätzung

In Abbildung 5 ist die kombinierte Messunsicherheit für die Berechnung des Jahresnutzungsgrades dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die alternative Methode mit der Berechnung mittels Energiebilanz eines Economizers mit rund 3.5 % die tiefste Unsicherheit aufweist. Muss die Berechnung für eine Anlage mit einer Abgasrezirkulation durchgeführt werden, wird die Unsicherheit fast verdoppelt, jedoch immer noch tiefer als für die anderen Berechnungsmethoden. Annähernd gleich genau sind die direkte Berechnung mittels Holzmasse und die indirekte Standardberechnung. Leicht höher ist die Berechnungsunsicherheit für die indirekte Berechnung über eine Abgaskondensation. Die höchste Unsicherheit weist die indirekte Berechnung über den Kessel sowie die direkte Berechnung mittels Holzvolumen auf.

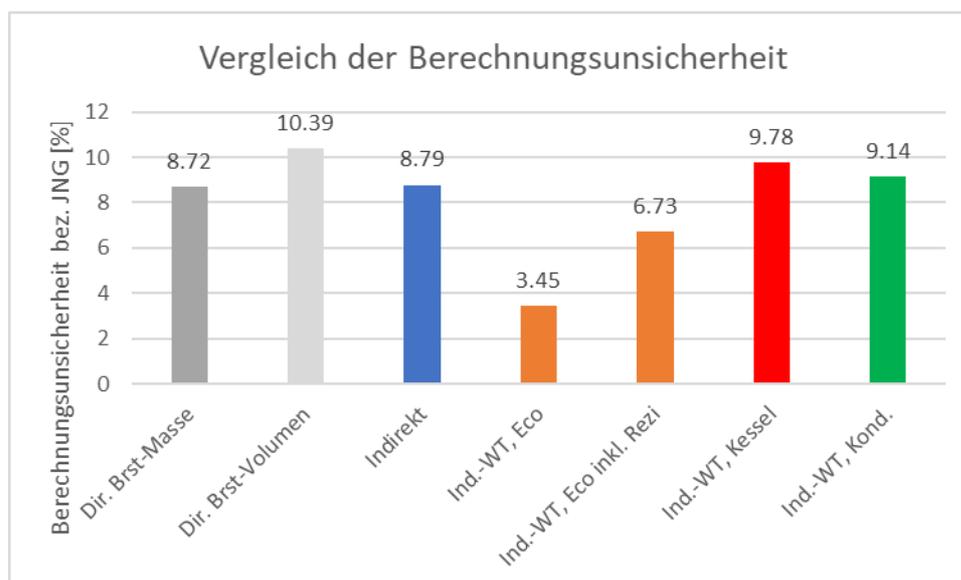


Abbildung 5: Relative Unsicherheit des berechneten Jahresnutzungsgrads für die einzelnen Berechnungsmethoden (grau: Direkte Berechnung, blau: Indirekte Standardberechnung, orange: Indirekte Berechnung mittels Energiebilanz über Eco, rot: Indirekte Berechnung mittels Energiebilanz über Kessel, grün: Indirekte Berechnung mittels Energiebilanz über Kondensation)

Bei der indirekten Berechnung über den Kessel ist die Genauigkeit der Messung der Gastemperatur vor dem Kessel entscheidend für die Berechnungsunsicherheit. Ist es möglich, die Messunsicherheit dieser Temperaturmessung auf maximal 50°C zu beschränken (z.B. durch mehrmaliges Verschieben des Fühlers und Kontrollieren der Temperaturmessung), würde die Berechnungsunsicherheit um mehr als die Hälfte, auf rund 4.2 %, abnehmen!

6 Resultate

6.1 Resultate brennstoffseitig

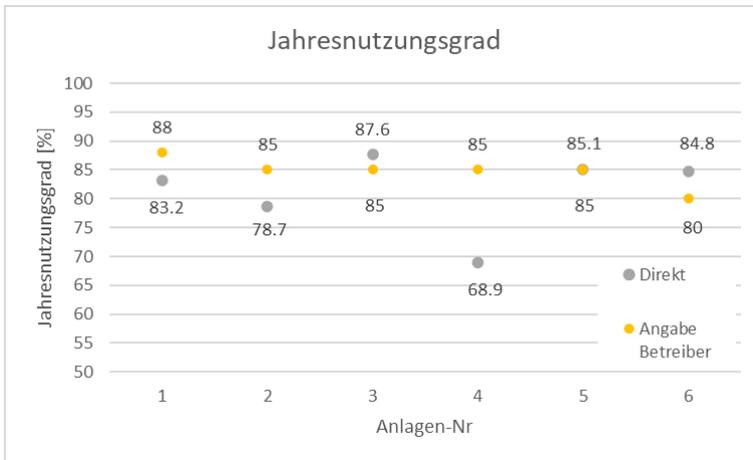


Abbildung 6: Vergleich Jahresnutzungsgrad Berechnung über Energieinput (Holz) und Angaben Anlagenbetreiber zum Jahresnutzungsgrad

Die Berechnungen zeigen bei zwei Anlagen eine zu optimistische Annahme des Jahresnutzungsgrades (JNG) im Gegensatz der Berechnung über die gelieferte Energiemenge im Holz. Bei zwei Anlagen übertrifft der Energieinput den angenommenen JNG – Wert um max. 4.8 %-Punkte. Insgesamt gibt diese Abweichung jedoch keinen Anhaltspunkt zur Genauigkeit dieser Methode. Massgebend ist die Abweichung zur Methode mit den geringsten Messunsicherheiten, der Methode «Indirekt-WT, Eco» oder «Indirekt»

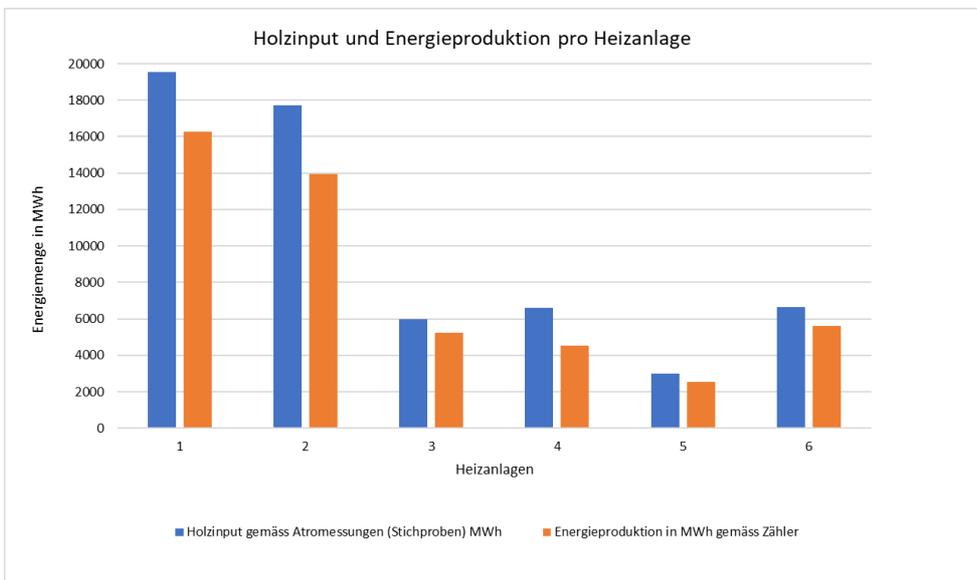


Abbildung 7: Vergleich Energieinput (Holz) und produzierte Energiemenge ab Kessel

6.2 Resultate anlagenseitig

Die berechneten Werte des Jahresnutzungsgrades für die unterschiedlichen Berechnungsmethoden werden jeweils mit der Standard-Methode «Indirekt» verglichen. Dabei zeigt sich das folgende Bild:

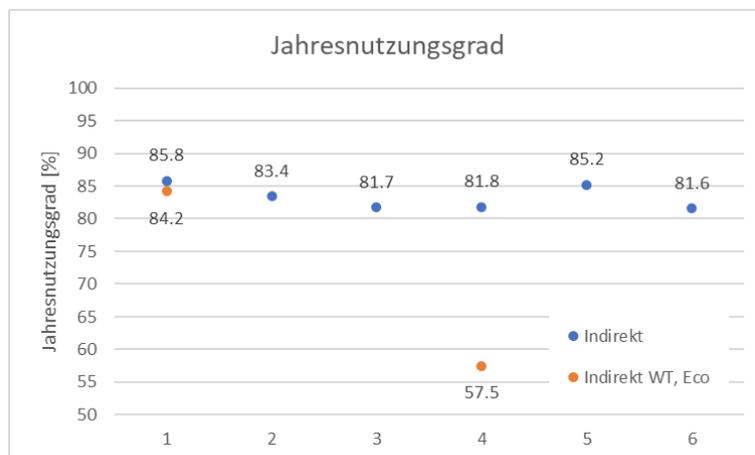


Abbildung 8: Vergleich der mit der Methode «Indirekt WT» über die Energiebilanz des Economizers berechneten Jahresnutzungsgrade mit der Standardmethode

Die Berechnung über einen Economizer konnte auf zwei Anlagen durchgeführt werden. Auf einer Anlage zeigte die Berechnung eine sehr gute Übereinstimmung mit der Standardmethode mit einer Differenz von rund 1.5 %-Punkten. Auf der zweiten Anlage gab es leider ein Problem mit der Messung der Abgastemperaturen des Economizers, so dass keine sinnvolle Berechnung gemacht werden konnte.

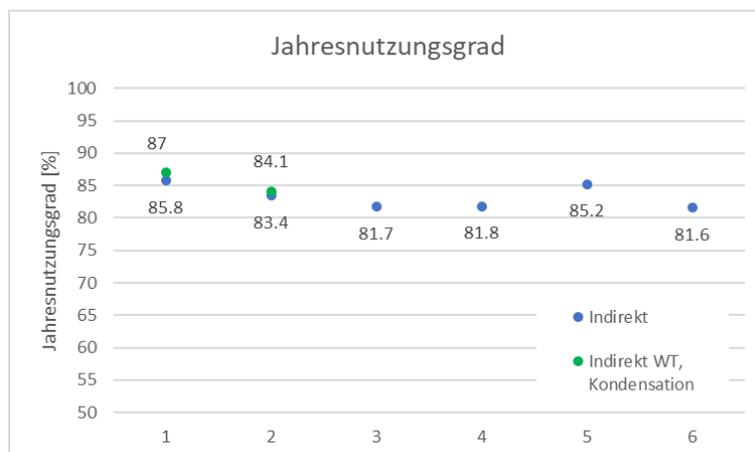


Abbildung 9: Vergleich der mit der Methode «Indirekt WT» über die Energiebilanz der Abgaskondensation berechneten Jahresnutzungsgrade mit der Standardmethode

Die Berechnung über die Abgaskondensation konnte ebenso bei zwei Anlagen durchgeführt werden. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung mit der Standardmethode mit einer Differenz der beiden Werte von rund 1 %-Punkt.

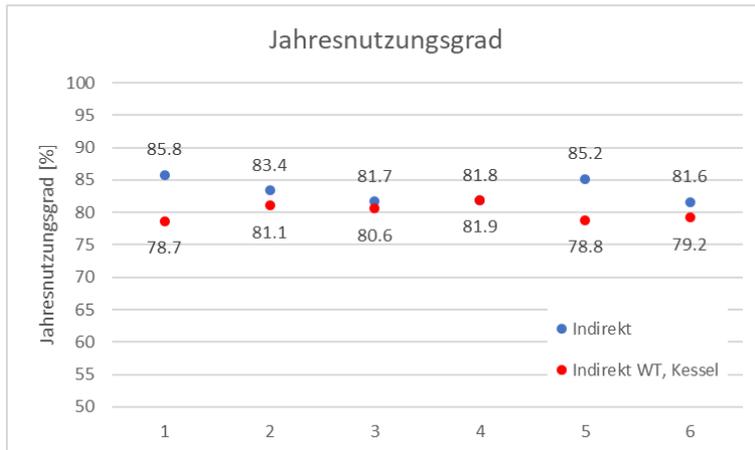


Abbildung 10: Vergleich der mit der Methode «Indirekt WT» über die Energiebilanz des Kessels berechneten Jahresnutzungsgrade mit der Standardmethode

Die Berechnung über den Kessel zeigt unterschiedliche Resultate. Bei zwei Anlagen ist die Übereinstimmung sehr gut. Bei zwei Anlagen wurde eine gute Übereinstimmung erreicht mit einer Differenz von gut 2 %-Punkten. Bei zwei Anlagen ist die Übereinstimmung schlecht und die Differenz beträgt über 5 %-Punkte. Wie erwähnt, liegt der Grund in der grossen Messunsicherheit der Gastemperatur vor dem Kessel. Bei den beiden Anlagen müsste die gemessene Gastemperatur rund 200°C höher liegen, damit der damit berechnete Jahresnutzungsgrad gut mit der Standardmethode übereinstimmt.

6.3 Vergleich der Resultate für drei Berechnungsmethoden

Wie oben gesehen zeigt der Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden zum Teil grosse Unterschiede. Ein Vergleich mit der direkten Berechnung (graue Punkte) zeigt für zwei Anlagen eine gute Übereinstimmung mit der indirekten Standardberechnung. Bei einer Anlage war die Datenlage ungenügend, so dass keine sinnvolle Berechnung gemacht werden konnte. Bei den restlichen drei Anlagen beträgt die Differenz zur Standardmethode zwischen 3 und 6 %-Punkte.

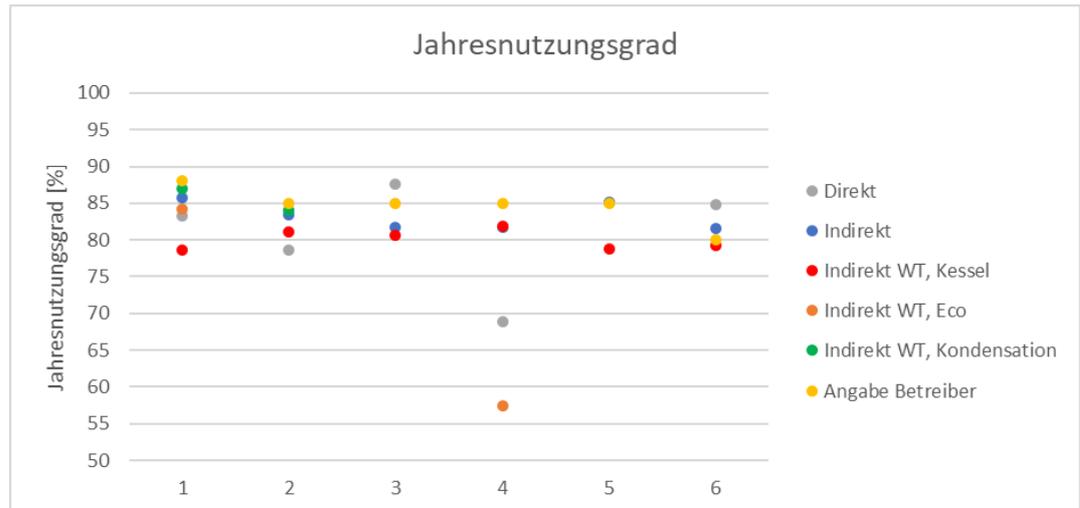
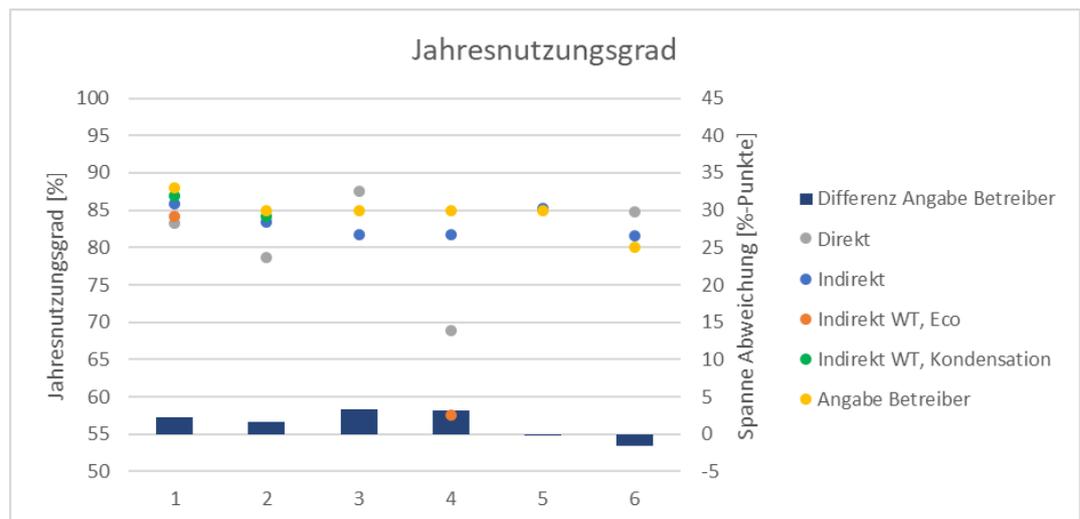


Abbildung 11: Vergleich der berechneten Werte mit denen der Anlagenbetreiber geschätzten Werte

Ein Vergleich mit den von den Betreibern angenommenen Werten für den Jahresnutzungsgrad mit den Werten der indirekten Standardmethode zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Differenz beträgt zwischen -1.6 und 3.2 %-Punkte.



6.4 Jahresnutzungsgrad-Check

Holzlieferanten und Anlagenbetreiber können selbst, mittels einer Abschätzung mit wenigen Parametern, eruieren, ob ein Bedarf einer Berechnung nötig ist.

Einfache Berechnung über die Holzlieferungen benötigt folgende Parameter:

- Eingrenzung des Betrachtungszeitraums
- Silostand in SRm bei Messbeginn und am Ende der Zeitperiode
- Gelieferte Holzmenge in SRm innerhalb des Betrachtungszeitraums
- Abschätzung über den Energieinhalt des Brennstoffs in kWh/SRm
- Produzierte Energie in kWh oder MWh

Eine Berechnung anlagenseitig benötigt folgende eine Angabe zu folgenden Parametern:

- Abgastemperatur
- Restsauerstoffgehalt im Abgas
- Wassergehalt des Brennstoffs (Messung oder Annahme)

7 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Analyse der unterschiedlichen Berechnungsmethoden hat gezeigt, dass die Berechnung je nach Methode unterschiedlich genau ist. Die genaueste Methode («Indirekt-WT, Eco») weist dabei eine deutlich tiefere Berechnungsunsicherheit auf als die restlichen Berechnungsmethoden. Es wird deshalb empfohlen, den Jahresnutzungsgrad mit dieser Methode zu berechnen, sofern die benötigten Messdaten vorhanden sind.

Sind die benötigten Messdaten nicht vorhanden, respektive hat die Anlage keinen Eco, kann die indirekte Standardmethode oder die direkte Berechnung mittels Brennstoffmasse über Stichproben und Feuchtemessung angewendet werden. Eine Berechnung über das Brennstoffvolumen wird nicht empfohlen, da diese Methode eindeutig die höchste Unsicherheit aufweist.

Für kleinere Anlagen wäre insbesondere auch die indirekte Berechnung mittels Energiebilanz des Kessels interessant, da diese Anlagen oftmals nicht über einen Economizer verfügen. Sofern sichergestellt werden kann, dass die Messung der Gastemperatur vor dem Kessel mit einer Genauigkeit von $\pm 50^{\circ}\text{C}$ gemessen werden kann, kann diese Methode angewendet werden. Die Berechnungsunsicherheit liegt bei gut 4 % und ist damit deutlich tiefer als die indirekte Standardmethode.

Der Vergleich der von den Anlagenbetreibern angenommenen Werte für den Jahresnutzungsgrad zeigt, dass diese ziemlich gut dem effektiven Wert entsprechen. Die Differenz lag bei maximal 3 %-Punkten.

Für eine erste Abschätzung über den zu erwarteten Jahresnutzungsgrad kann zukünftig online ein vom Projektteam erarbeiteter Jahresnutzungsgrad-Check ausgefüllt werden. Um eine grobe Abschätzung zu erlangen, werden nur wenige Parameter benötigt, welche online eingegeben werden können. Der damit

abgeschätzte Jahresnutzungsgrad wird online berechnet und kann sowohl vom Betreiber wie auch vom Holzlieferanten als erste Einschätzung des Anlagenbetriebs verwendet werden.

Generell ist eine periodische Berechnung des Jahresnutzungsgrades für die Parteien empfehlenswert. Für Anlagenbetreiber gibt der ermittelte Wert Auskunft über die Effizienz, respektive der Wärmeverluste auf der Anlage. Zu überlegen ist die Aufnahme des Jahresnutzungsgrades einer Anlage in das Controlling, nebst der Verfügbarkeiten und monetären Punkten. Läuft eine Anlage über mehrere Jahre stabil und ohne wesentliche Parameteränderungen, kann der Rhythmus einer Berechnung auch vergrößert werden. Wesentlich ist eine Berechnung nach der Inbetriebnahme einer Anlage über die ersten Jahre.

Für Holzlieferanten, welche nach dem Wärmezähler vergütet werden, ist eine Kalkulation oder eine Abschätzung des vom Anlagenbetreiber angegebenen Jahresnutzungsgrades von Wichtigkeit.

Im Sinne einer partnerschaftlichen Beziehung von Anlagenbetreiber und Holzlieferanten in der Prozesskette für die Bereitstellung von Wärme an die Endkunden, bietet eine offene Diskussion und allenfalls eine gemeinsame Berechnung des Jahresnutzungsgrades eine optimale Basis für eine gute Zusammenarbeit.

8 Literatur und Quellenverzeichnis

- [1] Probenahme fester Abfälle. Ein Modul der Vollzugshilfe VVEA, BAFU 2019
- [2] QM Holzheizwerke, Planungshandbuch, 3. Auflage, Straubing, 2022
- [3] Kiener, M., Frei, U.: Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlen Berechnung für Holzkraftwerke, BFE, 2015
- [4] Kiener, M, Frei, U.: Wirkungsgradbestimmung bei Holzheizkraftwerken in der Praxis, 16. Holzenergiesymposium, 2020
- [5] Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten – Teil 15: Abnahmeversuche, SN EN 12952-15, Swissmem, 2003
- [6] Bauer R, Gölles M, Brunner T, Dourdoumas N, Obernberger I.; Was messen Temperatursensoren in einer Biomasse-Feuerung wirklich?, Automatisierungstechnik 55, 2007
- [7] Neuenschwander, P., Good, J., Nussbaumer, T.: Grundlagen der abgaskondensation bei Holzfeuern, Bundesamt für Energie BFE, 1998
- [8] Humidity Calculation Formulas, Vaisala 2013
- [9] Ellison S.L.R., Rosslein M., Williams A.; Ermittlung der Messunsicherheit bei analytischen Messungen, EURACHEM CITAC, 2003
- [10] Emissionsmessung bei stationären Anlagen, Emissionsmessempfehlungen, BAFU, 2013
- [11] Rumsunkar, C., van Tonder, C., Schmitz, W.: Errors associated with excess air multipoint measurement systems, Chemical and Process Engineering 36, 2015
- [12] Good, J., Nussbaumer, T., Jenni A., Bühler, R.: Systemoptimierung automatischer Holzheizungen, Bundesamt für Energie BFE, 2005
- [13] Good J., Nussbaumer T., Delcarte J., Schenkel Y.: Determination of the Efficiencies of Automatic Biomass Combustion Plants, IEA Bioenergy Task 32, 2006
- [14] Hausmann, B.; FDBR Richtlinie RL7, Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen, Fachverband Anlagenbau, 2013

9 Anhang: Erläuterungen zur Berechnung

9.1 Anhang 1: Berechnung des Kesselwirkungsgrades mittels Energiebilanz eines Wärmetauschers, Methode «Indirekt-WT»

Die übertragene Energiemenge des Wärmetauschers sieht wie folgt aus:

$$Q_{WT,W} = Q_{WT,RG} = Q_{WT} \quad (7)$$

also

$$m_W \bar{c}_{pW,WT} (T_{W,nWT} - T_{W,vWT}) = m_{RG} \bar{c}_{pRG,WT} (T_{RG,vWT} - T_{RG,nWT}) \quad (8)$$

Ist die Leistung des Economizers wasserseitig bekannt, kann der Rauchgasmassenstrom berechnet werden:

$$m_{RG} = \frac{Q_{WT,W}}{\bar{c}_{pRG,WT} \Delta T_{RG,WT}} \quad (9)$$

Der absolute Rauchgasverlust ist abhängig von der Rauchgastemperaturdifferenz des Abgases gegenüber der Umgebung, resp. der Referenztemperatur:

$$Q_{RG} = m_{RG} \bar{c}_{pRG,Ka} (T_{RG,Ka} - T_{Ref}) \quad (10)$$

Wird nun Gleichung (3) in (4) eingesetzt, können die Rauchgasverluste unabhängig vom Rauchgasmassenstrom berechnet werden.

$$Q_{RG} = Q_{WT} \frac{\bar{c}_{pRG,Ka} \Delta T_{RG,Ka}}{\bar{c}_{pRG,WT} \Delta T_{RG,WT}}$$

Die prozentualen thermischen Verluste (Rauchgasverlust) lassen sich wie folgt berechnen:

$$Q_{Zu} = \frac{Q_{Ke} + Q_{RG}}{1 - V_{Str} - V_A} \quad (11)$$

$$V_{th} = \frac{Q_{RG}}{Q_{Zu}} = \frac{Q_{RG}(1 - V_{Str} - V_A)}{Q_{Ke} + Q_{RG}} [-] \quad (12)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (10) in die Gleichung für die indirekte Berechnung des Kesselwirkungsgrades kann dieser wie folgt berechnet werden:

$$\eta_{Ke} = 1 - V_{Str} - V_A - V_{th} = 1 - V_{Str} - V_A - \frac{Q_{RG}(1 - V_{Str} - V_A)}{Q_{Ke} + Q_{RG}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \eta_{Ke} &= (1 - V_{Str} - V_A) \left(1 - \frac{Q_{RG}}{Q_{Ke} + Q_{RG}} \right) \\ &= (1 - V_{Str} - V_A) \left(1 - \frac{Q_{Eco} \frac{\bar{c}_{pRG,Ka} \Delta T_{RG,Ka}}{\bar{c}_{pRG,Eco} \Delta T_{RG,Eco}}}{Q_{Ke} + Q_{Eco} \frac{\bar{c}_{pRG,Ka} \Delta T_{RG,Ka}}{\bar{c}_{pRG,Eco} \Delta T_{RG,Eco}}} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

9.2 Anhang 2: Berechnung der Ascheverluste

Für die Berechnung der Rost- und Ascheverluste wird ein Anteil Unverbranntes in der Asche sowie die fühlbare Wärme der Asche berücksichtigt. Die Berechnung sieht wie folgt aus:

$$V_A = \frac{A[c_A H_{u,C} + c_{p,A} \Delta T_A]}{H_{u,Brst}}$$

A : Aschegehalt Brennstoff

C_A : Anteil Unverbranntes in der Asche, Analysewert
oder Annahme: $C_A=1.5\%$

$c_{p,A}$: Spezifische Wärmekapazität der Asche, $c_{p,A} = 0.84 \text{ kJ/kgK}$ [14]

$H_{u,Brst}$: Heizwert Brennstoff (Annahme treffen)

$H_{u,C}$: Heizwert Unverbranntes in der Asche, $H_{u,C} = 33000 \text{ kJ/kg}$ [14]

ΔT_A : Temperaturdifferenz zwischen Asche und Bezugstemperatur (25°C)

9.3 Anhang 3: Projektpartner

Das Projekt wurde durch die folgenden Projektpartner aus der Holzenergiebranche unterstützt:

- ADEV Ökowärme AG
- AEW Energie AG
- BGL Wärmeverbund AG
- BKW AEK Contracting AG
- Bürgergemeinde Lengnau
- Bürgergemeinde Muttenz
- EBL (Genossenschaft Elektra Baselland)
- EnergieSchweiz
- ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich)
- F. Hoffmann-La Roche AG
- Forstbetrieb Studenland
- H. Baumgartner & Sohn AG
- Holzenergie Freiamt
- Holzenergie Werdenberg Rheintal
- Kym Holzenergie - Grünrecycling Bennwil
- Lignocalor AG
- Raurica Holzvermarktung AG
- Regi Holz GmbH
- Thurwerke AG
- Wärme Lengnau
- ZürichHolz AG