

# Einheitliche Heizwert und Energiekennzahlenberechnung für Holzheizkraftwerke

## Berechnung der Energiekennzahlen von Holzfeuerungsanlagen mit Dampf- oder ORC-Kreislauf in der Schweiz



Mit Unterstützung von



**Autoren:**

Martin Kiener, Ryttec AG

Richard Chrenko, Ryttec AG

Urban Frei, Ryttec AG

**Diese Studie wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt.**

**Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.**

**Adresse**

EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen. Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern

Infoline 0848 444 444, [www.infoline.energieschweiz.ch](http://www.infoline.energieschweiz.ch)

[energieschweiz@bfe.admin.ch](mailto:energieschweiz@bfe.admin.ch), [www.energieschweiz.ch](http://www.energieschweiz.ch), [twitter.com/energieschweiz](https://twitter.com/energieschweiz)

## Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie war die Ermittlung der wichtigsten Energiekennzahlen und Nutzungsgrade von weiteren Holzkraftwerken. In früheren Arbeiten ([1],[2]) konnten bereits 10 Holzkraftwerke untersucht werden. Dabei zeigte sich, dass die Betreiber oftmals den Energieinput nicht kennen und damit keine Grundlage haben, einen Energienutzungsgrad herzuleiten. Oder es ist nur eine grobe Schätzung möglich, da keine Angabe zum Wassergehalt im Holz und somit zum Heizwert vorhanden ist. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der Energiekennzahlen und die Beurteilung, ob Förderbedingungen eingehalten werden (z.B. Nutzungsgradanforderungen der KEV). Es wurde deshalb eine alternative Berechnungsmethode entwickelt, mit welcher es möglich ist, ohne Angabe des Wassergehaltes auf den Kesselnutzungsgrad und damit auch auf den Energieinput zu schliessen. Die Methode basiert auf einer Energiebilanz eines Economizers. Die dazu benötigten Messgrößen werden meist schon gemessen. Wo dies nicht der Fall ist, können die notwendigen Sensoren (Temperaturfühler) nachträglich mit vertretbarem Aufwand eingebaut werden. Die hier vorgeschlagene Berechnungsmethode konnte anhand von zwei Holzkraftwerken validiert werden. Sie zeigt nur sehr geringe Abweichungen gegenüber den bisher verwendeten Berechnungsmethoden und erscheint daher zur Berechnung des Kesselnutzungsgrades und des Energieinputs geeignet.

Bei der Betrachtung der einzelnen Holzkraftwerke zeigt sich, dass alle Anlagen die geforderte KEV-Bedingung erfüllen. Als weitere Kenngrösse für die Beurteilung der Effizienz einer Anlage bietet sich der exergetische Nutzungsgrad an. Eine exergetische Betrachtung berücksichtigt die Wertigkeit der abgegebenen Energie für die Energienutzung und erlaubt einen faireren Vergleich unter den einzelnen Anlagen bezüglich der erreichten Effizienz.

Denjenigen Betreibern, welche den Energieinput in ihre Anlage auf Grund fehlender Angaben zum Brennstoffwassergehalt nicht kennen, wird empfohlen, die Berechnung mittels der neu entwickelten Methode «Indirekt Eco» zu machen, da so die Berechnungsunsicherheit verkleinert wird.

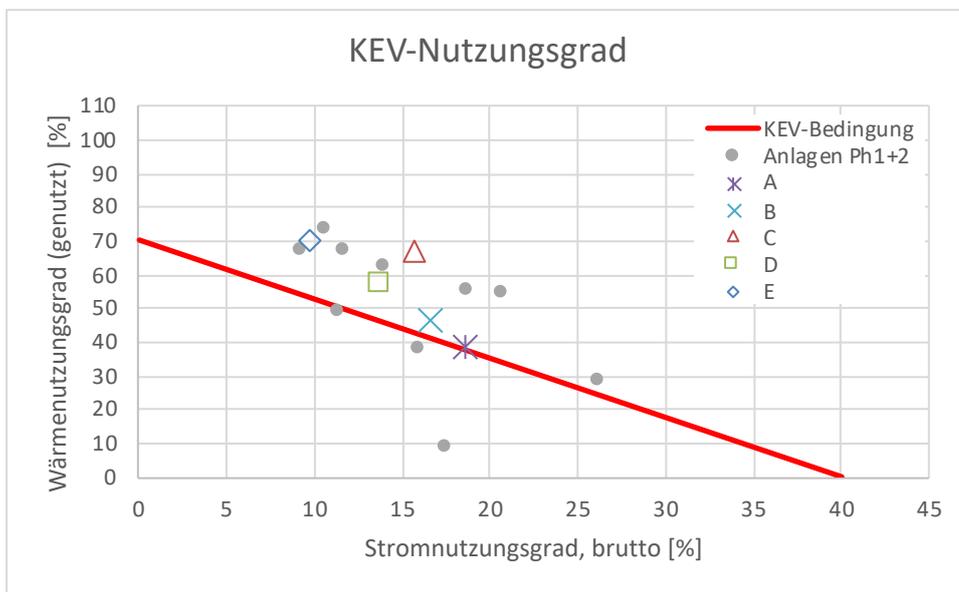


Abbildung 1: Strom- und Wärmenutzungsgrad für die untersuchten Anlagen (graue Punkte: Anlagen welche in Projektphase 1 und 2 untersucht wurden).

## Verzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1	Ausgangslage .....	5
1.2	Vorarbeiten .....	5
1.3	Zielsetzung.....	6
1.4	Aufgabenstellung.....	6
<b>2</b>	<b>Berechnung von Kesselwirkungsgrad und Energieinput</b>	<b>7</b>
2.1	Bisher verwendete Berechnungsmethoden.....	7
2.2	Alternative Kesselwirkungsgradberechnung «Indirekt Eco» .....	8
<b>3</b>	<b>Validierung der neu entwickelten Methode «Indirekt Eco»</b>	<b>11</b>
3.1	Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden .....	11
<b>4</b>	<b>Untersuchte Anlagen</b>	<b>13</b>
4.1	Holzskraftwerk Hofen, Wittenbach.....	13
4.2	Holzskraftwerk Wies, Speicher-Trogen .....	14
4.3	Holzskraftwerk Wintersried.....	15
4.4	Holzheizkraftwerk Axpo Tegra, Domat/Ems.....	16
4.5	Holzheizkraftwerk Bern.....	17
<b>5</b>	<b>Resultate</b>	<b>18</b>
5.1	Resultate der berechneten Anlagen .....	18
5.2	Exergie als Effizienz-Kenngrösse .....	20
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Fazit</b>	<b>21</b>
6.1	Berechnung des Kesselwirkungsgrades und Energieinputs.....	21
6.2	Energieeffizienz der Anlagen.....	21
6.3	Empfehlung für Betreiber.....	21
<b>7</b>	<b>Literatur und Quellenverzeichnis</b>	<b>22</b>
	<b>Anhang A: Erläuterung zur Berechnung</b>	<b>23</b>
	A1: Berechnung der thermischen Verluste und des Kesselwirkungsgrades .....	23
	A2: Berechnung der Ascheverluste.....	24
	<b>Anhang B: Anlagen-Schemata</b>	<b>25</b>
	<b>Anhang C: Sankey-Diagramme</b>	<b>30</b>

## Glossar

### Abkürzungen

BMHKW	Biomasseheizkraftwerk
EnG	Energiegesetz
EnV	Energieverordnung
FD	Frischdampf
GuD	Gas-und Dampfkraftwerk
HHKW	Holzheizkraftwerk
HKW	Holzskraftwerk
JNG	Jahresnutzungsgrad
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
ORC	Organic Rankine Cycle
SRm	Schüttraummeter
WG	Wirkungsgrad

### Römische Zeichen

cp	Spezifische Wärmekapazität	[kJ/kgK]
Hu	Heizwert (früher: unterer Heizwert)	[kJ/kg]
m	Masse	[kg]
mstr	Massenstrom	[kg/s]
Q	Energie	[kJ]
T	Temperatur	[K], [°C]
V	Verluste	[-]
w	Wassergehalt (bez. Gesamtmasse)	[-]

### Griechische Zeichen

$\Delta$	Differenz	
$\eta$	Wirkungsgrad/Nutzungsgrad	[-]

### Indizes

A	Asche
atro	Absolut trocken
Eco	Economizer
In	Input
Ke	Kessel
Ka	Kamin
RG	Rauchgas
Str	Strahlungs-
SW	Speisewasser
th	thermisch
Umg	Umgebungs-
zu	zugeführt

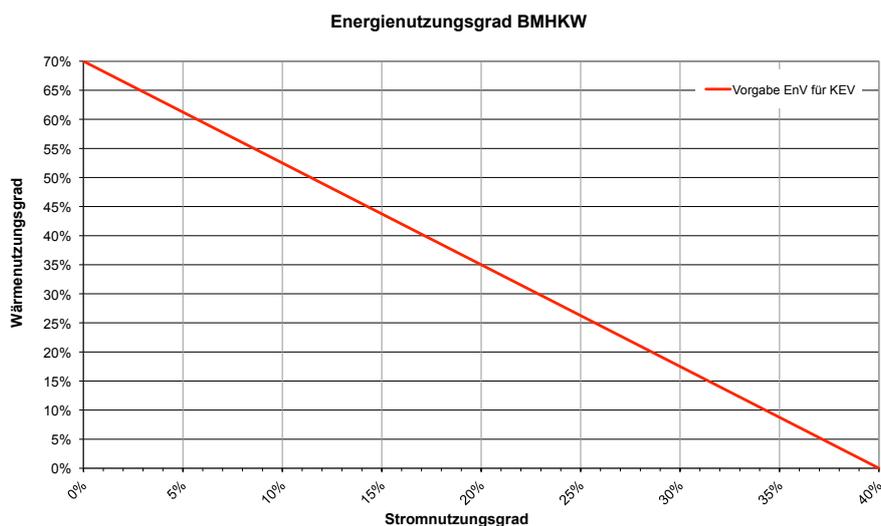
# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Bund und Kantone setzen sich im Rahmen ihrer Zuständigkeiten für eine ausreichende, breit gefächerte, sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung sowie für einen effizienten Energieverbrauch ein. Der Bund legt Grundsätze über die Nutzung einheimischer und erneuerbarer Energien und über deren effizienten Verbrauch fest.

Das Energiegesetz (EnG) gibt für die Schweiz einerseits den Mindestanteil an erneuerbaren Energien an der Gesamtenergieerzeugung sowie auch den Grundsatz der sparsamen und rationellen Verwendung vor. Für Anlagen mit Holz-Wärme-Kraft-Kopplung sind energetische Anforderungen im Anhang 1.5 der Energieförderungsverordnung (EnFV) beschrieben.

Unter anderem auch aufgrund des begrenzten Biomassepotentials ist eine möglichst effiziente Brennstoffnutzung anzustreben. Laut Energieverordnung müssen Biomasseheizkraftwerke (BMHKW) in Bezug auf Wärme und Stromerzeugung die folgende Kurve (Abbildung 2) überschreiten, um Anspruch auf KEV zu erhalten:



**Abbildung 2: Vorgabe EnV an Biomasseheizkraftwerken für die KEV.**

Bei reiner Stromproduktion muss ein Stromnutzungsgrad von über 40 %, bei reiner Wärmeproduktion ein Wärmennutzungsgrad von über 70%, erreicht werden.

## 1.2 Vorarbeiten

In der ersten Projektphase [1] wurden die Berechnungsmethoden zur Bestimmung des Jahresnutzungsgrades sowie des Brennstoffheizwerts erarbeitet. Zur Überprüfung wurden von zwei Anlagen Betriebsdaten aufgenommen und die Berechnungen durchgeführt. Die Resultate waren plausibel, jedoch zeigten sich noch deutliche Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Berechnungsmethoden.

In der zweiten Projektphase [2] wurde eine vereinfachte Berechnungsmethode entwickelt, um den Jahresnutzungsgrad trotz oftmals fehlender Kenntnis zum Wassergehalt des Brennstoffs und damit zum Heizwert mit möglichst kleiner Unsicherheit bestimmen zu können. Anschliessend wurden in dieser Untersuchung acht weitere Heizkraftwerke untersucht und ausgewertet. Bei einigen Heizkraftwerken war eine genaue Berechnung unmöglich da zentrale Parameter wie z.B. die verbrannte Holzmenge in Tonnen unbekannt waren.

### **1.3 Zielsetzung**

Das Bundesamt für Energie hat die Berechnung weiterer Anlagen ermöglicht, um die Methoden besser zu validieren und einen ersten Überblick über die Gesamteffizienz der Anlagen zu gewinnen. Ziel des Projekts ist die Beurteilung der Anlagen anhand von standardisierten Energiekennzahlen (Jahresnutzungsgrad und KEV-Nutzungsgrad). Dadurch sollen die Betreiber motiviert werden, sich untereinander auszutauschen und ihren Wirkungsgrad zu verbessern.

### **1.4 Aufgabenstellung**

Der Auftragnehmer untersucht die grössten Holzheizkraftwerke der Schweiz bezüglich Energieeffizienz mit den erarbeiteten Berechnungsmethoden. Die erhobenen und plausibilisierten Daten werden ausgewertet, den Betreibern zur Verfügung gestellt und in einem Bericht festgehalten.

## 2 Berechnung von Kesselwirkungsgrad und Energieinput

### 2.1 Bisher verwendete Berechnungsmethoden

In der vorangehenden Projektphase [2] wurden die folgenden Berechnungsmethoden verwendet und validiert (die Methode nach Reimann wird hier nicht weiter berücksichtigt da sie explizit für KVA entwickelt wurde und je nach Anlagenlayout und Betriebsweise grosse Unsicherheiten aufweist [3], [4]):

Methoden- Bezeichnung	Benötigte Messgrößen und <i>Annahmen (kursiv)</i>		Vorteile	Nachteile
	Kessel-WG	Energieinput		
Indirekt w	$T_{RG}$ $O_{2,RG}$ $w_{BR}$ $H_{u,atro}$	$Q_{Ke}$	Geringe Sensitivität bezüglich Messunsicherheit	Annahme von $H_{u,atro}$ notwendig
Indirekt H <sub>2</sub> O	$T_{RG}$ $O_{2,RG}$ $H_2O_{,RG}$ $H_{u,atro}$	$Q_{Ke}$	Geringe Sensitivität bezüglich Messunsicherheit	Annahme von $H_{u,atro}$ notwendig
Indirekt vereinfacht	$T_{RG}$ $O_{2,RG}$ $w_{BR}$ $H_{u,atro}$	$Q_{Ke}$	Geringe Sensitivität bezüglich Messunsicherheit	Annahme von $H_{u,atro}$ und Wassergehalt notwendig
Direkt w	$m_{str_{BR}}$ $w_{BR}$ $Q_{Ke}$	$m_{str_{BR}}$ $w_{BR}$	Keine Annahmen	Grössere Berechnungsunsicherheit

Bezüglich der Berechnung der Rauchgasverluste mit den «indirekten» Methoden macht die Annahme zum Heizwert von absolut trockenem Holz etwa 75% der Unsicherheit aus [6]. Da bei vielen Anlagen der Wassergehalt im Brennstoff nicht gemessen wird und daher unbekannt ist, kann für die Berechnung nur die Methode «Indirekt vereinfacht» verwendet werden. Bei dieser Methode wird mit einem fixen Wassergehalt von  $w=35\%$  gerechnet. Dies führt zu einer zusätzlichen Berechnungsunsicherheit bezüglich des Jahresnutzungsgrades von bis zu ca. +/- 1.2 %-Punkten [2]. Um diese Berechnungsunsicherheit weiter zu verkleinern wurde in der aktuellen Projektphase eine alternative Methode entwickelt, mit welcher der Rauchgasverlust unabhängig von Brennstoffwassergehalt und vom angenommenen Heizwert von absolut trockenem Holz berechnet werden kann.

## 2.2 Alternative Kesselwirkungsgradberechnung «Indirekt Eco»

Als Alternative zu den oben aufgeführten Methoden wurde in der aktuellen Projektphase eine neue Berechnungsmethode «Indirekt Eco» entwickelt. Dabei werden die thermischen Verluste (Rauchgasverluste) über die Energiebilanz eines Economizers berechnet und so indirekt auf den Kesselwirkungsgrad geschlossen.

$$\eta_{Ke} = 1 - V_{Str} - V_A - V_{th} \quad (1)$$

Die Methode ist insbesondere interessant, weil keine Annahmen zum Energieinput getroffen werden müssen (z.B. zum Heizwert von absolut trockenem Holz  $H_{u,atro}$ ). Alle benötigten Berechnungsgrößen können gemessen werden. Dadurch wird auch die Berechnungsunsicherheit kleiner.

Für die Berechnung werden die folgenden Messgrößen verwendet:

- Speisewassermenge über Economizer
- Speisewassertemperatur vor Economizer
- Speisewassertemperatur nach Economizer
- Rauchgastemperatur vor Economizer
- Rauchgastemperatur nach Economizer
- Rauchgastemperatur vor Kamin

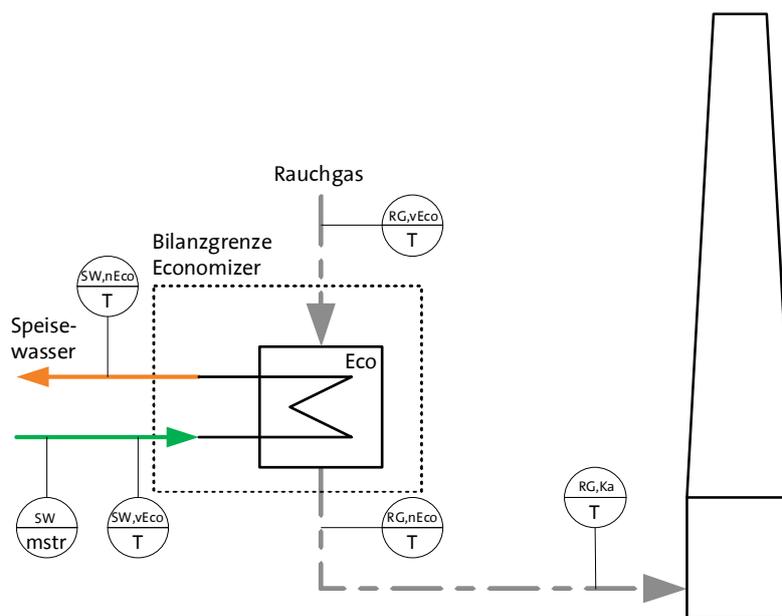


Abbildung 3: Bilanzgrenze und benötigte Messgrößen für die Berechnung

Für die Berechnung werden also nur Temperaturmessungen und eine Speisewasserdurchflussmessung 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 dem Economizer eintritt. Strahlungsverluste werden vernachlässigt da die Oberflächentemperatur bei einem Economizer nicht sehr hoch ist und sich diese Ungenauigkeit nur marginal auf die Berechnung des Kesselwirkungsgrades auswirkt.

Die übertragene Energiemenge des Economizers sieht wie folgt aus:

$$Q_{Eco,SW} = Q_{Eco,RG} = Q_{Eco} \quad (2)$$

also

$$m_{SW} \overline{c_{p,SW,Eco}} (T_{SW,nEco} - T_{SW,vEco}) = m_{RG} \overline{c_{p,RG,Eco}} (T_{RG,vEco} - T_{RG,nEco}) \quad (3)$$

D.h. ist die Leistung des Economizers wasserseitig bekannt kann somit der Rauchgasmassenstrom berechnet werden.

$$m_{RG} = \frac{Q_{Eco,SW}}{\overline{c_{p,RG,Eco}} \Delta T_{RG,Eco}} \quad (4)$$

Der absolute Rauchgasverlust ist abhängig von der Rauchgastemperaturdifferenz zwischen Kamin und Umgebung, resp. der Referenztemperatur:

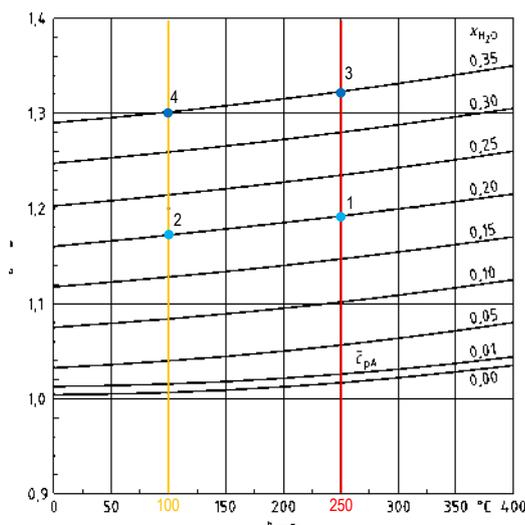
$$Q_{RG} = m_{RG} \overline{c_{p,RG,Ka}} (T_{RG,Ka} - T_{Umg}) \quad (5)$$

Wird nun Gleichung (4) in (5) eingesetzt können die Rauchgasverluste unabhängig vom Rauchgasmassenstrom berechnet werden.

$$Q_{RG} = Q_{Eco} \frac{\overline{c_{p,RG,Ka}} \Delta T_{RG,Ka}}{\overline{c_{p,RG,Eco}} \Delta T_{RG,Eco}} \quad (6)$$

Einzig die Leistung des Economizers sowie die Rauchgastemperaturen vor und nach Economizer sowie vor dem Kamin müssen bekannt sein. Unbekannt ist hingegen auch die mittlere spezifische Wärmekapazität, 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 konstant (vgl. Abbildung 4). Das Verhältnis zwischen z.B. Punkt 2 resp. 4 im Bereich von 100°C (orange Linie) und Punkt 1 resp. 3 im Bereich von 250° (rote Linie) ist in etwa konstant:

$$\frac{\overline{c_{p,RG,Ka}}}{\overline{c_{p,RG,Eco}}} = \frac{\overline{c_{p,2}}}{\overline{c_{p,1}}} \approx \frac{\overline{c_{p,4}}}{\overline{c_{p,3}}} \quad (7)$$



**Abbildung 4: Mittlere spezifische Wärmekapazität  $c_{p,RG}$  für Rauchgas (a) in Abhängigkeit von der Rauchgasfeuchte ( $x_{H_2O}$ ) und der Rauchgastemperatur  $T_{RG}$  (b) (angepasst aus [7])**

D.h. der Wassergehalt kann vernachlässigt werden, respektive es kann modellhaft mit einem Wassergehalt von  $w=35\%$  gerechnet werden, was einer Rauchgasfeuchte von ca. 20% entspricht ( $x_{H_2O}=0.2$ ). Die spezifische Wärmekapazität im Rauchgas kann mittels Polynomfunktion ermittelt werden [7].

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

$$V_{th} = \frac{Q_{RG}(1-V_{Str}-V_A)}{Q_{Ke}+Q_{RG}} \quad [-] \quad (8)$$

Unter Berücksichtigung der Strahlungs- und Ascheverluste (Berechnung in Anhang A) berechnet sich der aus dem Verhältnis der Rauchgasverluste und dem Energieinput, ausgedrückt als Summe der gewonnenen Dampfergie und dem Rauchgasverlust, berechnete Kesselwirkungsgrad wie folgt (Gl. (8) in Gl. (1) eingesetzt, genaue Herleitung ist in Anhang A beschrieben):

$$\eta_{Ke} = 1 - V_{Str} - V_A - V_{th} = (1 - V_{Str} - V_A) \left(1 - \frac{Q_{RG}}{Q_{Ke}+Q_{RG}}\right) \quad (9)$$

Beispielrechnung:

Kesselleistung:	10'000 kW
$V_{str}$ :	2 %
$V_A$ :	0.5 %
$T_{RG,vEco}$	250 °C
$T_{RG,nEco}$	100 °C
$T_{RG,Ka}$	100 °C
$\Delta T_{RG,Eco}$	150 °C
$\Delta T_{RG,Ka}$	100 °C
$\overline{c}_{p,RG,Ka}$	1.17 kJ/kgK
$\overline{c}_{p,RG,Eco}$	1.19 kJ/kgK
$Q_{Eco}$	1000 kW

$$Q_{RG} = 1000 \frac{1.17 \cdot 100}{1.19 \cdot 150} = 655 \text{ kW}$$

$$V_{th} = \frac{655(1-0.02-0.005)}{10000+655} = 6\%$$

$$\eta_{Ke} = 1 - V_{Str} - V_A - V_{th} = 1 - 0.02 - 0.005 - 0.06 = 91.5\%$$

### 3 Validierung der neu entwickelten Methode «Indirekt Eco»

#### 3.1 Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden

Dank guter Datenverfügbarkeit der Anlagen in Bern und in Domat/Ems kann die neue alternative Methode zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades über die Energiebilanz eines Economizers, «Indirekt Eco», validiert werden. Für die Anlage in Domat/Ems konnten Messdaten von Block II verwendet werden. Der Methodenvergleich (Abbildung 5 und Abbildung 6) zeigt eine gute Übereinstimmung.

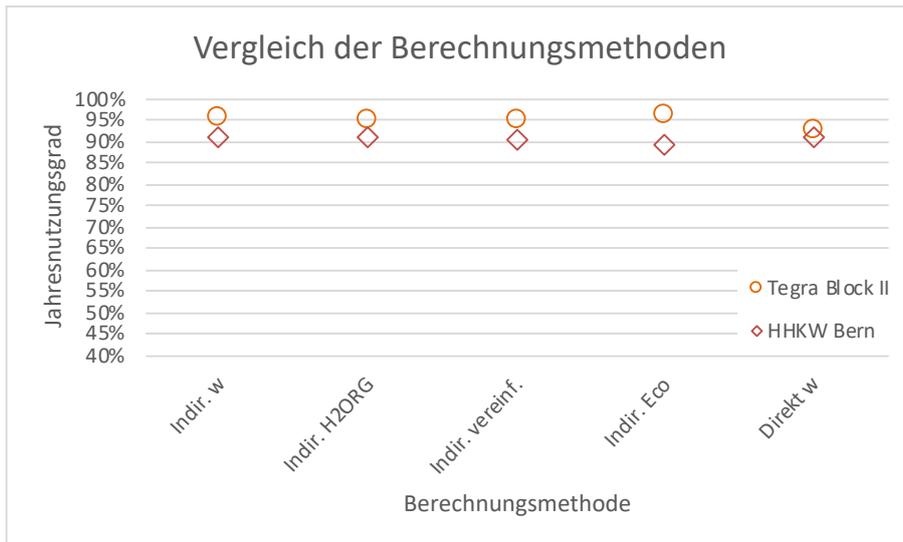


Abbildung 5: Jahresnutzungsgrad des HHKW Bern und des BMHKW Domat/Ems (Block II) für die verschiedenen Berechnungsmethoden.

Der berechnete Kesselwirkungsgrad für das HHKW Bern liegt zwischen 89% und 91%, für den Block II des BMHKW Domat/Ems zwischen 95.1% und 96.5%. Die Abweichung beträgt gut 1%-Punkt (abgesehen von der Methode «Direkt w», welche mit 92.9% leicht tiefer liegt).

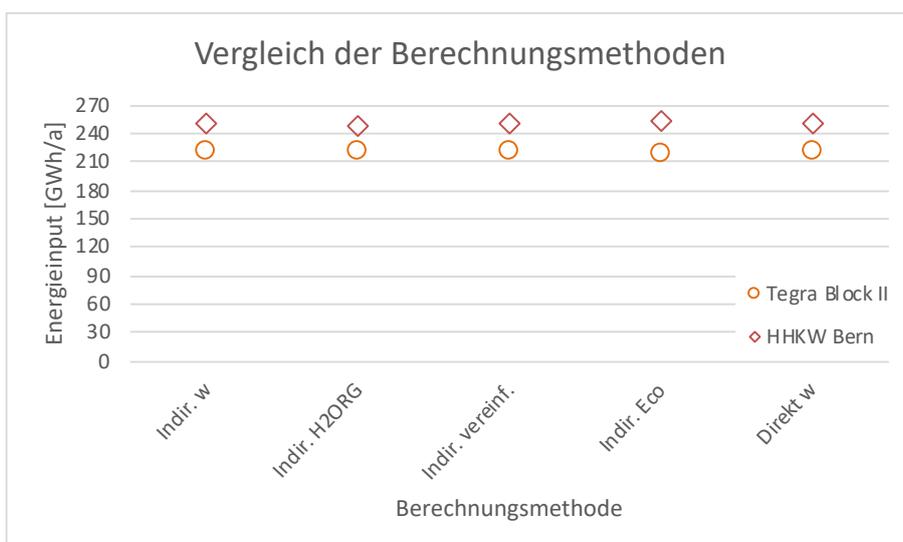


Abbildung 6: Berechneter Energieinput des HHKW Bern und des BMHKW Domat/Ems (Block II) für die verschiedenen Berechnungsmethoden.

Der berechnete Energieinput liegt beim HHKW Bern zwischen 250 GWh/a und 256 GWh/a. Die maximale Abweichung für die Berechnung des Energieinputs mit unterschiedlichen Methoden beträgt damit rund 2.5%.

Für den Block II der Anlage in Domat/Ems beträgt der berechnete Energieinput zwischen 219 und 223 GWh/a (Für die Plausibilisierung konnten nur Daten für den Zeitraum Januar bis August verwendet werden). Die Abweichung beträgt somit knapp 2%.

## 4 Untersuchte Anlagen

### 4.1 Holzkraftwerk Hofen, Wittenbach

#### 4.1.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Hofen wurde 2015 in Betrieb genommen. Es versorgt den Wärmeverbund der Gemeinde Wittenbach (SG) mit Energie.

**Tabelle 1: Kenndaten der ORC-Anlage Hofen**

Brennstoffmix:	Waldhackschnitzel (100%), Wassergehalt: 35% (Schätzung)
Anlage	Rostfeuerung 4.5 MW <sub>th</sub> , Elektrofilter Thermo-Öl-Kessel, 3.9 MW <sub>th</sub> , 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 0.63 MW <sub>el</sub>
Energieproduktion	Wärmeabgabe: 8.8 GWh/a Stromeinspeisung: 1.2 GWh/a

#### 4.1.2 Datenverfügbarkeit

Von der verbrannten Holzmenge ist nur eine Angabe in Kubikmeter verfügbar. Eine direkte Berechnung des Energieinputs ist damit nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Eine Energiebilanz eines Economizers ist mangels Messdaten nicht möglich.

**Tabelle 2: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter**

Verbrannte Menge	• Angabe in m <sup>3</sup> , keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Schätzung des Betreibers
Economizer	• Angaben nicht vorhanden, Berechnung nicht möglich

## 4.2 Holzkraftwerk Wies, Speicher-Trogen

### 4.2.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Wies wurde 2015 in Betrieb genommen. Es versorgt den Wärmeverbund der Gemeinden Speicher und Trogen (AR) mit Energie.

**Tabelle 3: Kenndaten der Anlage Wies 2019**

Brennstoffmix:	Waldhackschnitzel (100%) Wassergehalt: 35% (Schätzung)
Anlage	Rostfeuerung 4.2 MW <sub>th</sub> , Elektrofilter Thermo-Öl-Kessel, 3.6 MW <sub>th</sub> , 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 0.63 MW <sub>el</sub>
Energieproduktion	Wärmeabgabe: 9.5 GWh/a Stromeinspeisung: 1.6 GWh/a

### 4.2.2 Datenverfügbarkeit

Von der verbrannten Holzmenge ist nur eine Angabe in Kubikmeter verfügbar. Eine direkte Berechnung des Energieinputs ist damit nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Eine Energiebilanz eines Economizers ist mangels Messdaten nicht möglich.

**Tabelle 4: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter**

Verbrannte Menge	• Angabe in m <sup>3</sup> , keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Schätzung des Betreibers
Economizer	• Angaben nicht vorhanden, Berechnung nicht möglich

## 4.3 Holzkraftwerk Wintersried

### 4.3.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk im Energiezentrum Wintersried (SZ) wurde 2014 in Betrieb genommen. Die Energie wird für das Fernwärmenetz der Gemeinden Schwyz und Brunnen sowie für den Swiss Holiday Park in Morschach verwendet.

**Tabelle 5: Kenndaten der Anlage Wintersried 2018**

Brennstoffmix:	Altholz (100%) Wassergehalt: 28% (geschätzt)
Anlage	Rostfeuerung 9.9MW <sub>th</sub> , SNCR, Elektrofilter Thermo-Öl-Kessel, 8.5 MW <sub>th</sub> , 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 1.5 MW <sub>el</sub>
Energieproduktion	Wärmeabgabe: 50.3 GWh/a Stromeinspeisung: 9.5 GWh/a

### 4.3.2 Datenverfügbarkeit

Die angelieferte Holzmenge wird gewogen, jedoch wird der Wassergehalt nicht gemessen. Eine direkte Berechnung des Energieinputs ist damit nur mit grösserer Unsicherheit möglich. Eine Energiebilanz eines Economizers ist mangels Messdaten nicht möglich.

**Tabelle 6: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter**

Verbrannte Menge	• Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Schätzung des Betreibers
Economizer	• Angaben nicht vorhanden, Berechnung nicht möglich

## 4.4 Holzheizkraftwerk Axpo Tegra, Domat/Ems

### 4.4.1 Anlageninfos

Die Anlage in Domat/Ems wurde 2006 (Block I), 2007 (Block II) und 2008 (Block III) in Betrieb genommen. Sie versorgt die EMS-Chemie mit Prozessdampf. Zudem besteht vor Ort seit 2016 ein Bandtrockner zur Hackschnitzeltrocknung. Daneben betreibt die Anlage auch eine kleinere Holz Trocknung in Trocknungscontainern.

**Tabelle 7: Kenndaten der Anlage in Domat/Ems 2019**

Brennstoffmix:	Frischholz und Sägereirestholz (ca. 80%), Altholz (ca. 20%) Wassergehalt: $\varnothing$ 19.7% (gemessen)
Anlage	Rostfeuerungen 2*38.5 MW <sub>th</sub> und 5.5 MW <sub>th</sub> , SNCR, Gewebefilter Dampfkessel 65 bara, 485°C Dampfturbine 12.2 MW <sub>el</sub> und 10.5 MW <sub>el</sub>
Energieproduktion	Wärmeabgabe: 191.7 GWh/a Stromeinspeisung: 82.2 GWh/a

### Besonderheiten:

Mit einer Gesamtleistung von 82.5 MW<sub>th</sub> ist die Anlage in Domat/Ems das grösste Holzkraftwerk in der Schweiz. Durch die Abdampfkondensation mit Flusswasser kann der Dampf auf einen sehr tiefen Abdampfdruck verstromt werden.

### 4.4.2 Datenverfügbarkeit

Das BMHKW Domat/Ems weist eine sehr gute Datenverfügbarkeit auf. Die angelieferte Holzmenge wird gewogen. Der Wassergehalt von jeder Lieferung wird mit einer Referenzprobe im Trocknungsschrank gemessen. Zudem wird auch die Wasserdampfkonzentration im Abgas gemessen. Bei Block II wird die Leistung des Economizers sowie die Rauchgastemperatur vor und nach Economizer gemessen. Die Berechnung des Jahresnutzungsgrades ist daher mit verschiedenen Methoden möglich, was eine Plausibilisierung der einzelnen Berechnungswege erlaubt.

**Tabelle 8: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter**

Verbrannte Menge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemessen: Waage bei Anlieferung</li> </ul>
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemessen: Trockenschrankmessung pro Lieferung</li> <li>Berechnung über H<sub>2</sub>O-Konzentration Abgas möglich</li> </ul>
Economizer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistung und RG-Temperaturen vor/nach Eco sind bekannt</li> </ul>

## 4.5 Holzheizkraftwerk Bern

### 4.5.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Bern wurde 2013 in Betrieb genommen. Es steht im Gebäude der Energiezentrale Forsthaus, welche 2012 in Betrieb genommen wurde. Die Energie wird für das Fernwärmenetz der Stadt Bern sowie als Prozessdampf für die ARA Region Bern und die InoTex Bern AG verwendet.

**Tabelle 9: Kenndaten der Anlage Bern 2019**

Brennstoffmix:	Frischholz und Sägereirestholz (ca. 50%), Altholz (ca. 50%) Wassergehalt: $\varnothing$ 30.2% (gemessen)
Anlage	Wirbelschichtfeuerung 33 MW <sub>th</sub> , SNCR, Gewebefilter  Dampfkessel 60 bara, 485°C Dampfturbine (GuD + HHKW): 27 MW <sub>el</sub>
Energieproduktion	Wärmeabgabe (Anteil HHKW): 107.5 GWh/a Stromeinspeisung (Anteil HHKW): 35.2 GWh/a

**Besonderheiten:** Die Dampfturbine ist mit dem Gaskraftwerk gekoppelt. 2015 wurde ein HHD-MD-Bypass installiert, so dass das HHKW auch in Betrieb gehen kann, wenn die Gasturbine und damit das GuD nicht in Betrieb sind. Dadurch ist es auch möglich, den Dampf des HHKW über die Turbine der KVA zu verstromen. Seit 2018 ist anstelle des reinen Bypasses eine neu installierte Gegendruckturbine in Betrieb.

### 4.5.2 Datenverfügbarkeit

Die Datenlage im HHKW Bern ist sehr gut. Nach der Wägung einer Holzlieferung wird der Wassergehalt im Trocknungsschrank bestimmt. Die Wasserdampfkonzentration im Abgas ist ebenfalls bekannt. Die thermische Leistung des Economizers ist bekannt und auch die Rauchgastemperaturen vor und nach diesem Economizer werden gemessen. So liegen für verschiedene Methoden ausreichende Messwerte vor, was eine Plausibilisierung erlaubt.

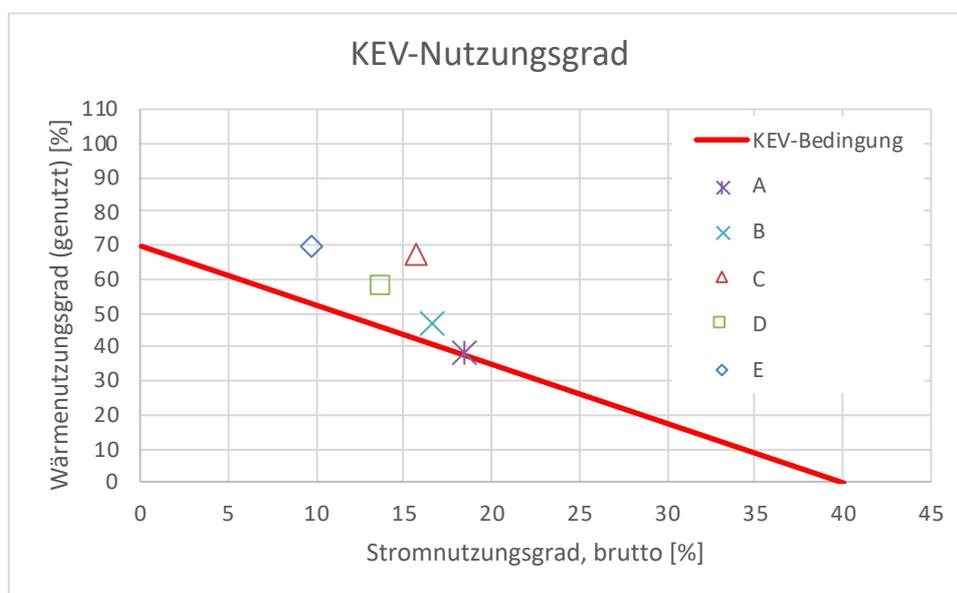
**Tabelle 10: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter**

Verbrannte Menge	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemessen: Waage bei Anlieferung</li> </ul>
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gemessen: Trockenschrankmessung pro Lieferung</li> <li>Berechnung über H<sub>2</sub>O-Konzentration Abgas möglich</li> </ul>
Economizer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leistung und RG-Temperaturen vor/nach Eco sind bekannt</li> </ul>

## 5 Resultate

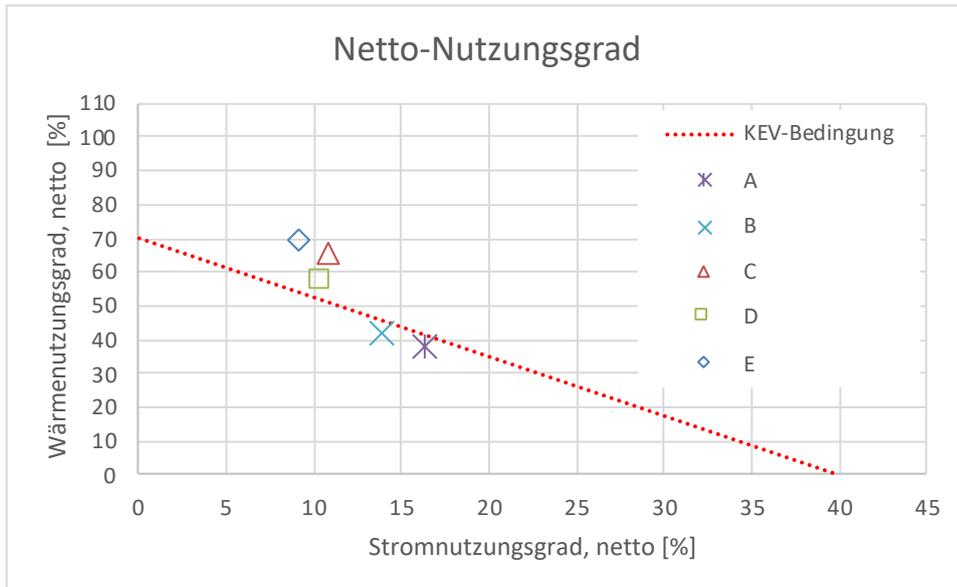
### 5.1 Resultate der berechneten Anlagen

Die Berechnung der folgenden Wirkungs- und Nutzungsgrade basiert für die drei ORC-Anlagen auf der vereinfachten Methode zur indirekten Berechnung des Kesselwirkungsgrades, «Indirekt vereinfacht», mit der Annahme eines Wassergehaltes von 35% [2], da dieser durch die Betreiber nur geschätzt wurde und keine Messdaten vorliegen. Eine Berechnung über die alternative Methode «Indirekt Eco» ist bei diesen Anlagen nicht möglich, da nicht alle benötigten Messgrößen vorhanden sind. Bei der Anlage in Domat/Ems wurde auf Grund der Anlagenkonstellation (3 Kessel, 2 Turbinen, Betrachtung als Gesamtanlage) die Methode «Direkt w» angewendet. Bei der Anlage in Bern konnte die Methode «Indirekt Eco» verwendet werden, um so ein Ergebnis mit kleinst-möglicher Unsicherheit zu erhalten.



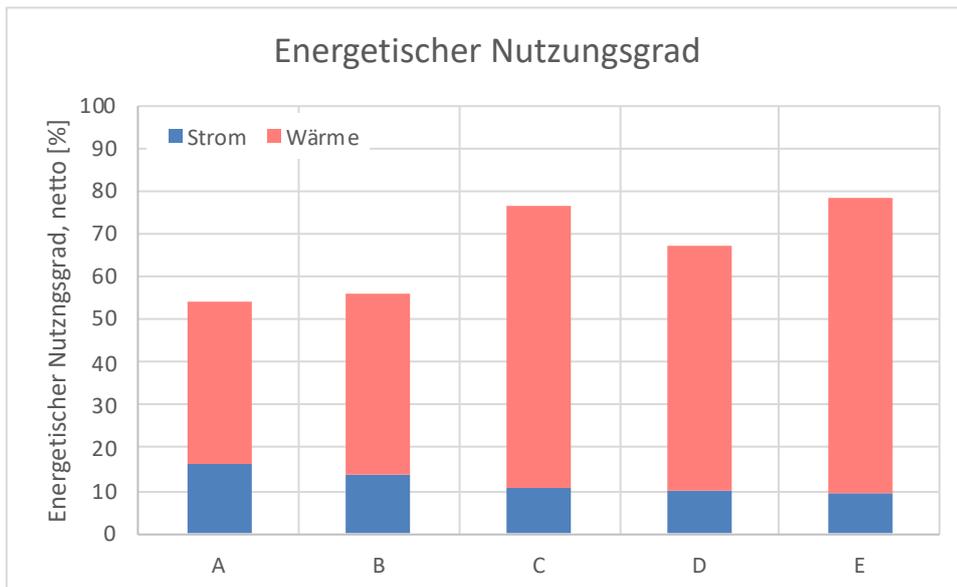
**Abbildung 7: Wärme- (genutzte Wärmemenge) und Stromnutzungsgrad (brutto) im Vergleich zum KEV-Minimalnutzungsgrad für die untersuchten Anlagen.**

Werden die Nettonutzungsgrade (d.h. Nutzungsgrad nach Abzug des Eigenbedarfs) der Anlagen betrachtet, ist ersichtlich, dass die Anlagen unterschiedlich ausgelegt worden sind. Der Stromeigenbedarf beträgt je nach Anlage bis zu rund 30% der Bruttoproduktion. Wärmegeführte Anlagen haben im Verhältnis zur Kesselleistung tendenziell eine kleinere Turbine und daher einen höheren relativen Stromeigenbedarf.



**Abbildung 8: Netto Wärme- und -Stromnutzungsgrad der untersuchten Anlagen. (Die KEV-Kurve dient nur der Orientierung im Diagramm und hat keine Relevanz)**

Der energetische Gesamtnutzungsgrad der Anlagen beträgt zwischen rund 55% und gut 75%.



**Abbildung 9: Energetischer Gesamtnutzungsgrad (netto), sowie der Anteil Strom-(blau) und Wärmeeinsatz (rot), für die untersuchten Anlagen**

Anlagen mit tieferem Stromnutzungsgrad weisen dabei einen höheren Gesamtnutzungsgrad auf. Der Grund liegt darin, dass bei tieferem Stromnutzungsgrad weniger Verluste durch den Dampfprozess auftreten.

## 5.2 Exergie als Effizienz-Kenngrösse

Die oben verwendete Darstellung der Energieeffizienz berücksichtigt nicht die unterschiedliche Wertigkeit der verschiedenen Endenergieformen. Zu diesem Zweck kann eine exergetische Betrachtung gemacht werden. Die Abgabe von Prozessdampf ist exergetisch hochwertiger als die Abgabe von Fernwärme bei rund 90°C. Dabei wird das Temperaturniveau der abgegebenen Wärmeströme über den Carnotwirkungsgrad berücksichtigt.

Eine Anlage mit höherem Stromnutzungsgrad ist mit dieser Betrachtung ebenso effizient wie eine Anlage, welche weniger Strom produziert jedoch mehr Wärme abgibt. Der Grund liegt darin, dass exportierter Strom exergetisch gesehen hochwertiger ist als Fernwärme, die auf einem tiefen exergetischen Niveau abgegeben wird.

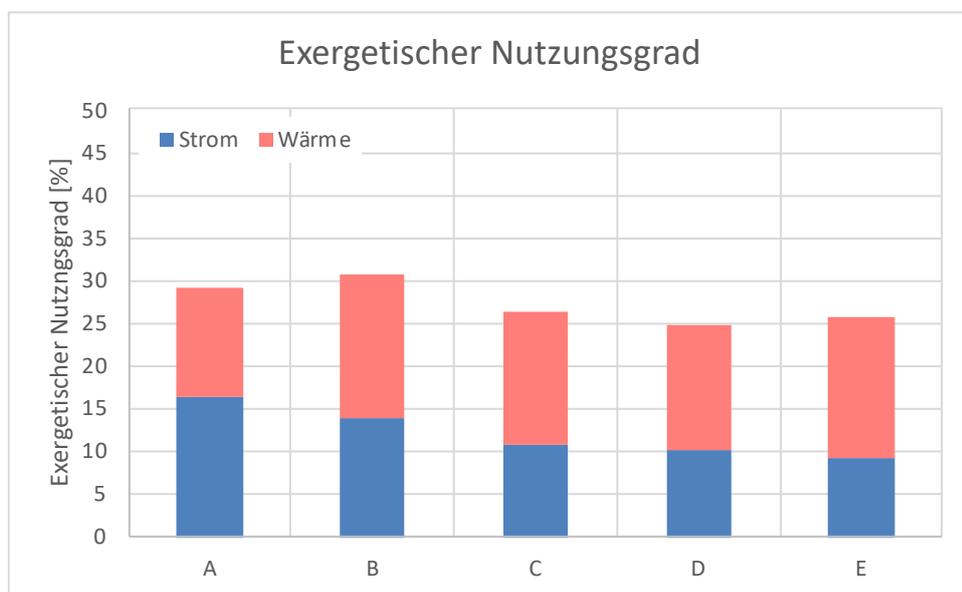


Abbildung 10: Exergetischer Nutzungsgrad (netto) der verschiedenen Anlagen mit Strom-(blau) und Wärmeanteil (rot).

## 6 Schlussfolgerungen und Fazit

### 6.1 Berechnung des Kesselwirkungsgrades und Energieinputs

Von den betrachteten 5 Anlagen wird nur bei zwei Anlagen der Wassergehalt des angelieferten Holzes gemessen. Ebenso wird nur bei zwei Anlagen die Wasserdampfkonzentration im Abgas gemessen. Auf der Basis der vorhandenen Messdaten ist es deshalb oftmals nicht möglich, mit bestehenden Berechnungsmethoden Angaben zu den energetischen Kennzahlen der Anlagen ohne grosse Unsicherheit anzustellen. Mit der in dieser Studie präsentierten Methode «Indirekt Eco» zur Berechnung des Kesselwirkungsgrades über die Energiebilanz eines Economizers ist es möglich, den Kesselnutzungsgrad ohne Kenntnis des Wassergehalts im Brennstoff zu berechnen. Zudem muss keine Annahme zur Holzzusammensetzung und damit zum Heizwert von trockenem Holz gemacht werden. Gemäss Vergleichsrechnungen an zwei bestehenden Anlagen kann mit hoher Genauigkeit eine Aussage zu energetischen Kenngrössen wie z.B. Kesselwirkungsgrad und Wärme- und Stromnutzungsgrad gemacht werden.

### 6.2 Energieeffizienz der Anlagen

Bei den untersuchten Anlagen beträgt der Gesamtnutzungsgrad (kumulierter Wärme- und Stromnutzungsgrad) zwischen rund 55% bis 75%. Dabei weisen Anlagen mit einem tieferen Stromnutzungsgrad einen höheren Gesamtnutzungsgrad auf. Jedoch wird in dieser Betrachtung die Wertigkeit der Energieform nicht berücksichtigt. Wird diese, mittels exergetischer Betrachtung, mitberücksichtigt schneiden die Anlagen mit höherem Stromnutzungsgrad und Export von Prozessdampf auf höherem Temperaturniveau gleich gut oder sogar leicht besser ab.

### 6.3 Empfehlung für Betreiber

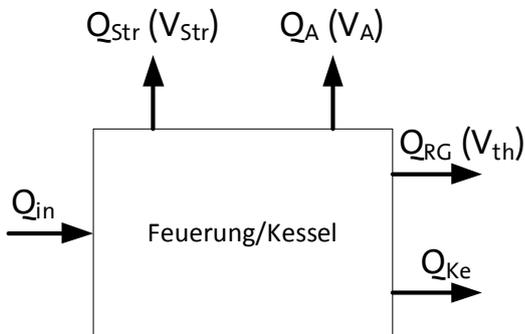
Betreibern, welche keine Kenntnis zum Wassergehalt haben wird empfohlen, die Berechnung des Kesselwirkungsgrades resp. des Energieinputs mittels der hier vorgestellten Methode «Indirekt Eco» vorzunehmen. Die benötigten Messpunkte sind meist vorhanden oder lassen sich auf einfache und kostengünstige Weise nachrüsten, da nur Temperatursensoren sowie ein Durchflusssensor im Speisewasser benötigt werden.

## 7 Literatur und Quellenverzeichnis

- [1] Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung für Holzkraftwerke, BFE, 2015
- [2] Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung für Holzkraftwerke, BFE, 2017
- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.: Ermittlung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung – Zur Problematik von Äquivalenzwerten und der Berechnung des Heizwertes. Energie aus Abfall – Band 2, 2007
- [4] Beckmann, M.; Scholz, R., Pohl, M.: Bilanzierung und energetische Bewertung von Verfahren zur Abfallbehandlung
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.; Pohl, M.: Bilanzierung und energetische Bewertung von Verfahren zur Abfallbehandlung. Energie aus Abfall - Band 9, 2012
- [6] Good J., Nussbaumer T., Delcarte J., Schenkel Y.: Determination of the Efficiencies of Automatic Biomass Combustion Plants, IEA Bioenergy Task 32, 2006
- [7] SN EN 12952-15, Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten – Teil 15: Abnahmeversuche, Swissmem, 2003
- [8] Hausmann, B.; FDBR Richtlinie RL7, Abnahmeversuche an Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerungen, Fachverband Anlagenbau, 2013

## Anhang A: Erläuterung zur Berechnung

### A1: Berechnung der thermischen Verluste und des Kesselwirkungsgrades



**Abbildung 11: Bilanzgrenze Feuerung/Kessel mit Energieinput ( $Q_{zu}$ ), produzierter Nutzenergie ( $Q_{Ke}$ ) und Verlusten ( $Q_{Str}$ ,  $Q_R$ ,  $Q_{RG}$  bzw. als relative Angabe  $V_{Str}$ ,  $V_R$  und  $V_{th}$ )**

Die Verluste können entweder absolut oder relativ bezüglich der zugeführten Brennstoffenergie angegeben werden, z.B.

$$V_{Str} = \frac{Q_{Str}}{Q_{In}}$$

Dabei wird der Strahlungsverlustenergie entweder in der Abnahmemessung bestimmt oder es wird eine Annahme getroffen [2].

Die Berechnung der prozentualen thermischen Verluste  $V_{th}$  ist wie folgt:

$$Q_{In} = \frac{Q_{Ke} + Q_{RG}}{1 - V_{Str} - V_A} \quad (10)$$

$$V_{th} = \frac{Q_{RG}}{Q_{In}} = \frac{Q_{RG}(1 - V_{Str} - V_A)}{Q_{Ke} + Q_{RG}} \quad [-] \quad (11)$$

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

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

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

## A2: Berechnung der Ascheverluste

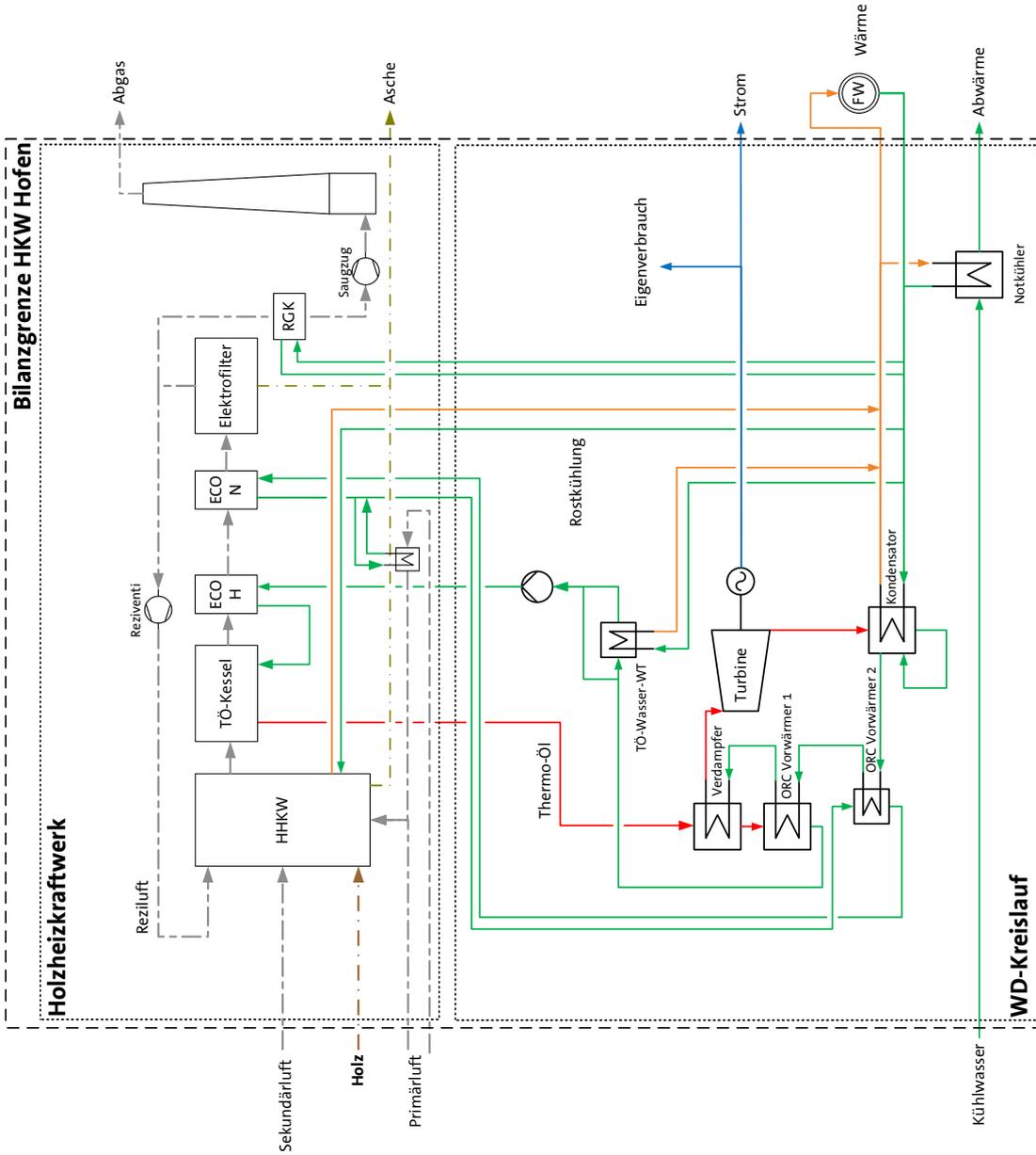
Für die Berechnung der Rost- und Ascheverluste wird ein Anteil Unverbranntes in der Asche sowie die fühlbare Wärme der Asche berücksichtigt. Die Berechnung sieht wie folgt aus:

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

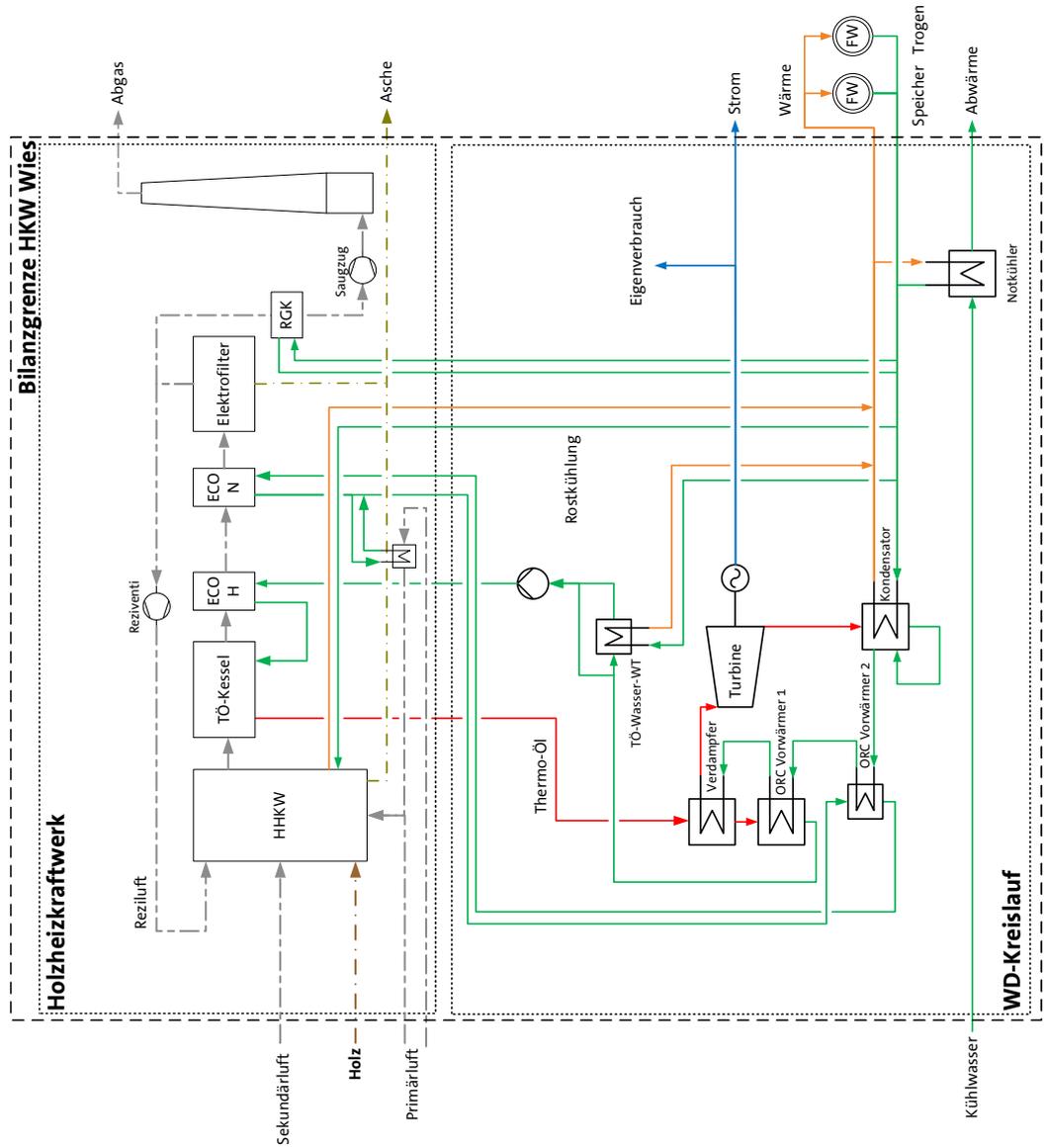
- $A$ : Aschegehalt Brennstoff:
- $C_A$ : Anteil Unverbranntes in der Asche, Analysewert  
oder Annahme:  $C_A=1\%$
- $c_{p,A}$ : Spezifische Wärmekapazität der Asche,  $c_{p,A} = 0.84 \text{ kJ/kgK}$  [8]
- $H_{u,Br}$ : Heizwert Brennstoff
- $H_{u,C}$ : Heizwert Unverbranntes in der Asche,  $H_{u,C} = 33000 \text{ kJ/kg}$  [8]
- $\Delta T_A$ : Temperaturdifferenz zwischen Asche und Bezugstemperatur von 25°C.

# Anhang B: Anlagen-Schemata

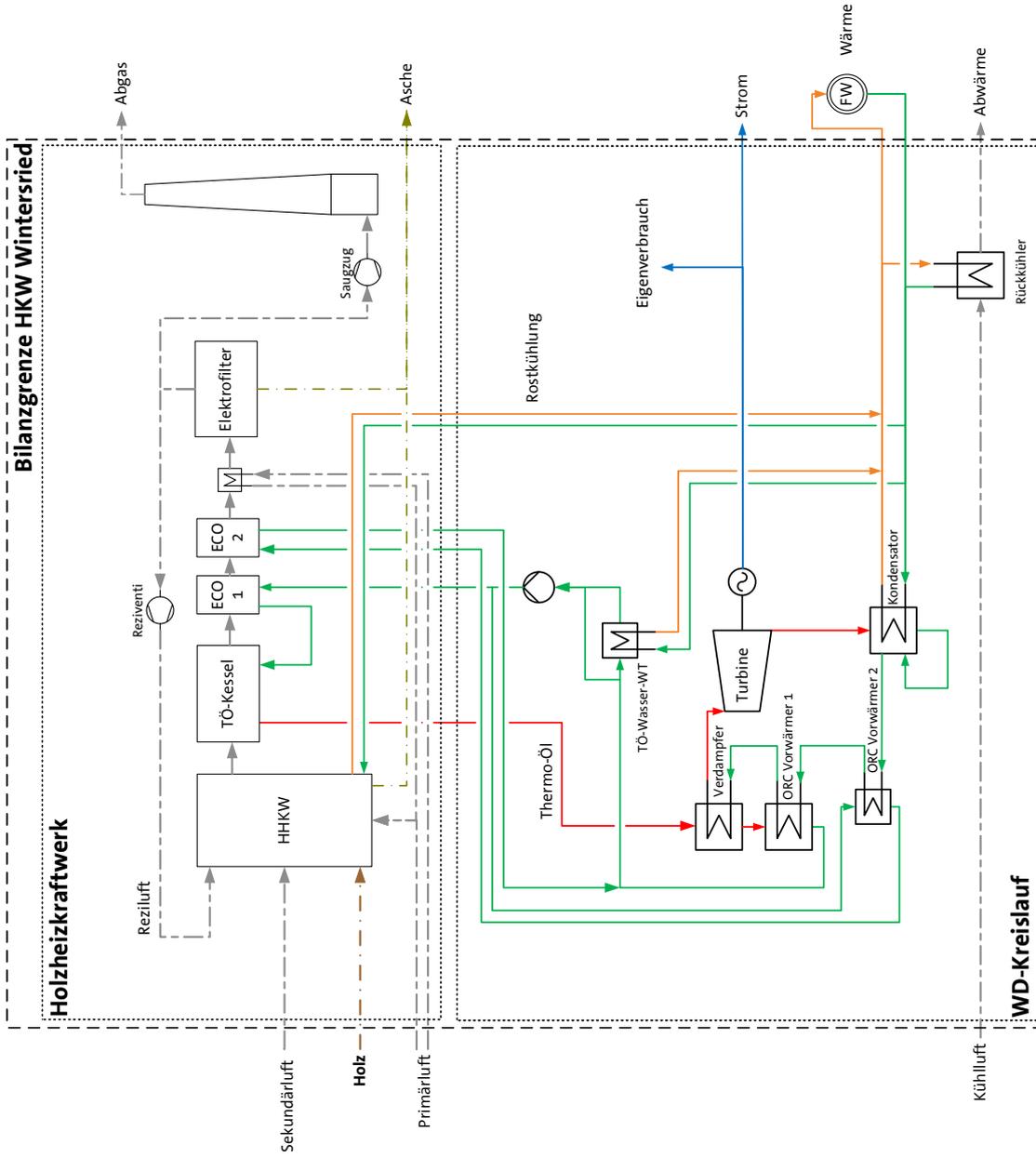
## HKW Hofen



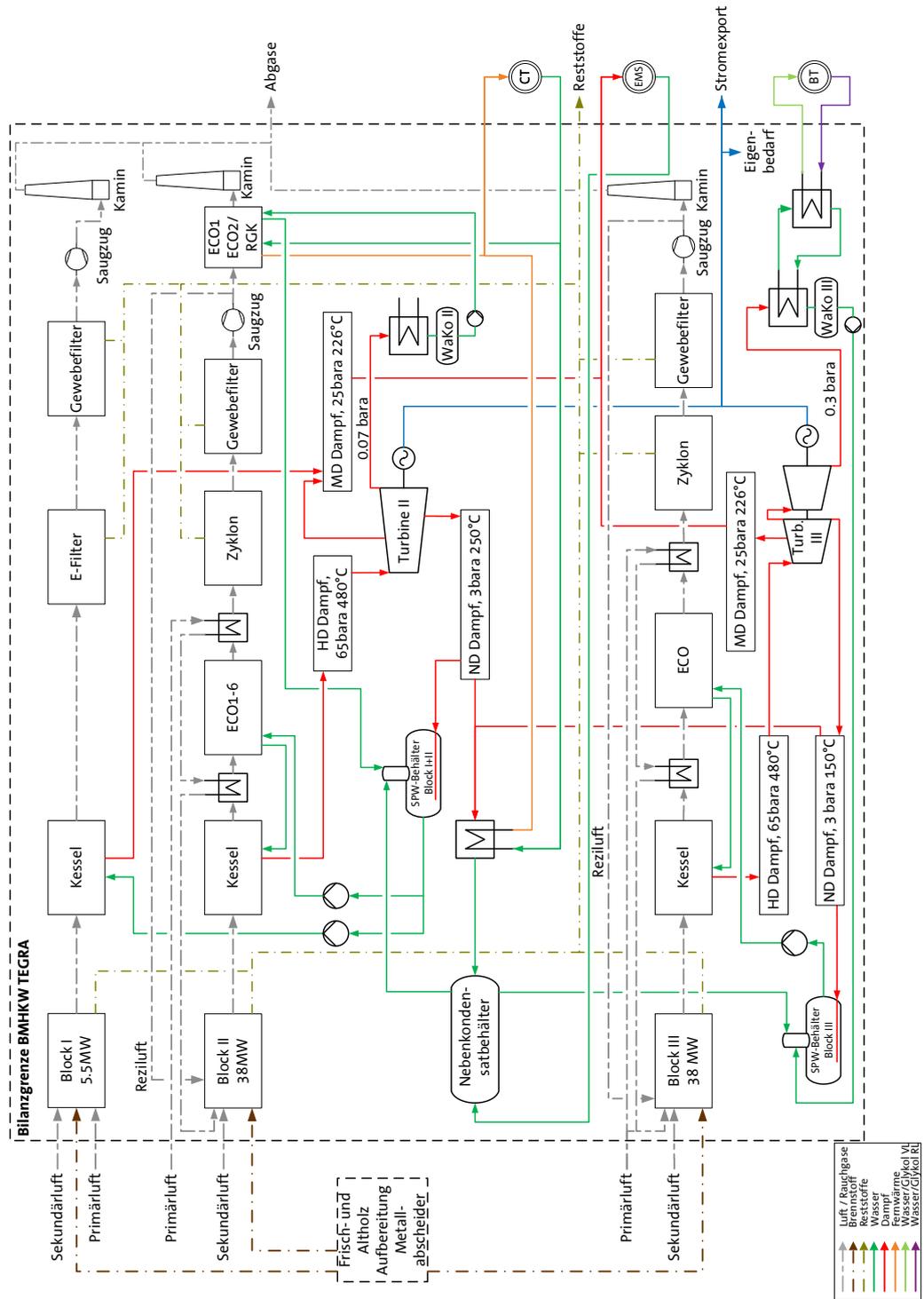
### HKW Wies



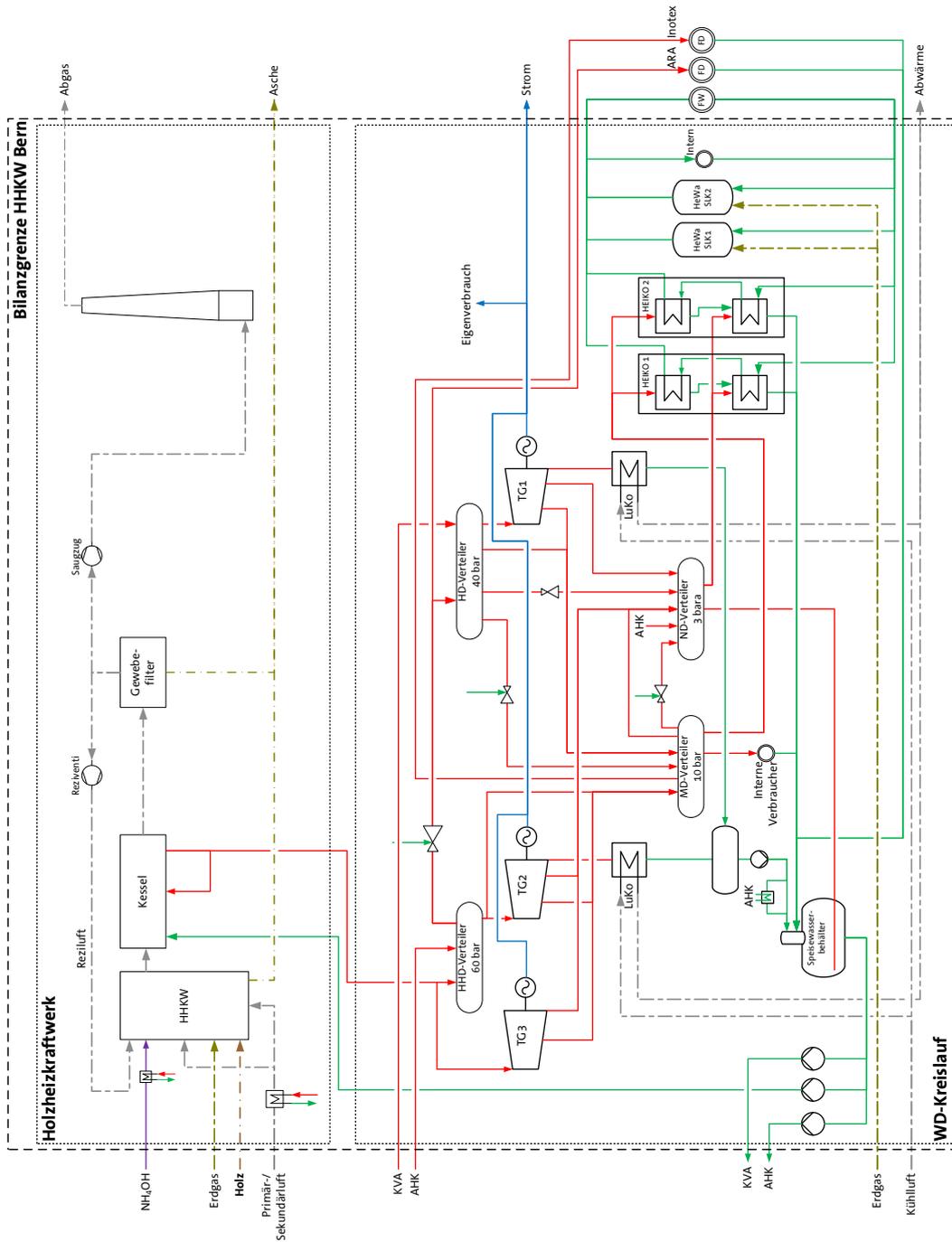
# HKW Wintersried



**BMHKW Domat/Ems**



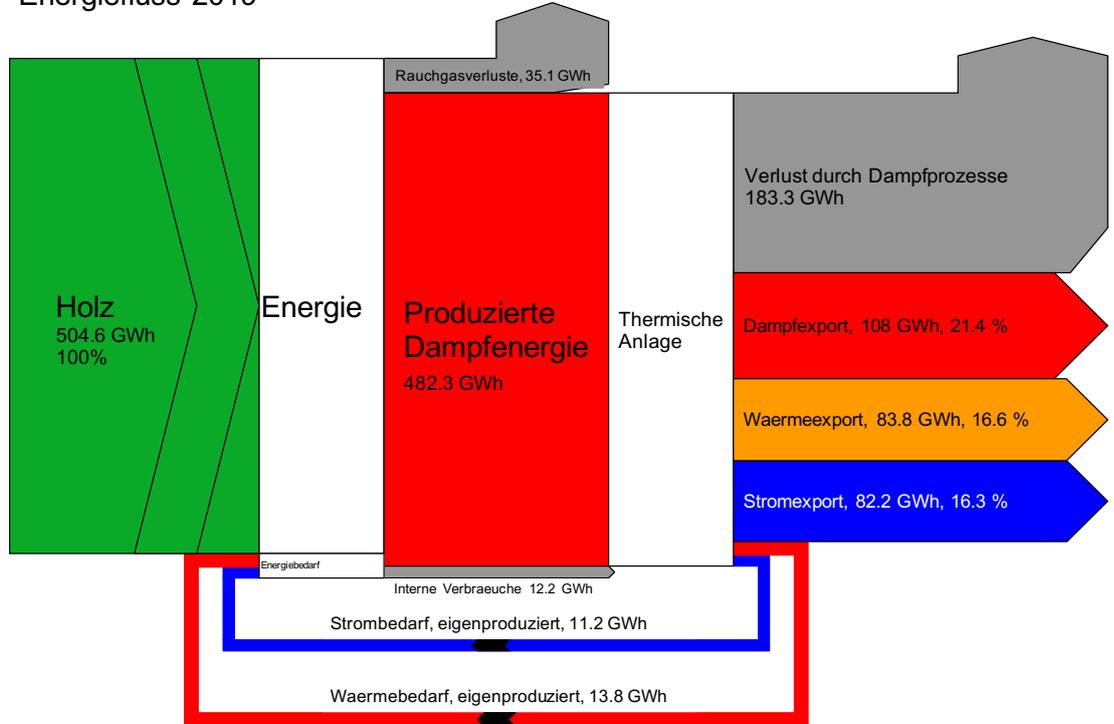
### HHKW Bern



## Anhang C: Sankey-Diagramme

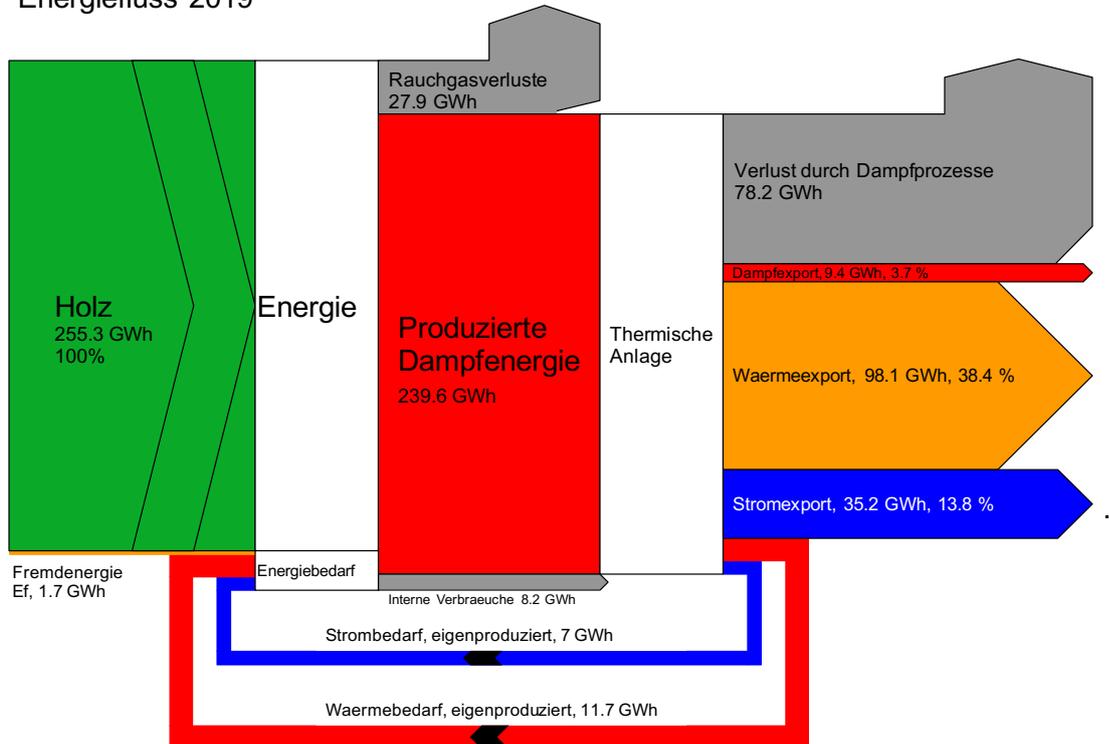
### Anlage A

Energiefluss 2019



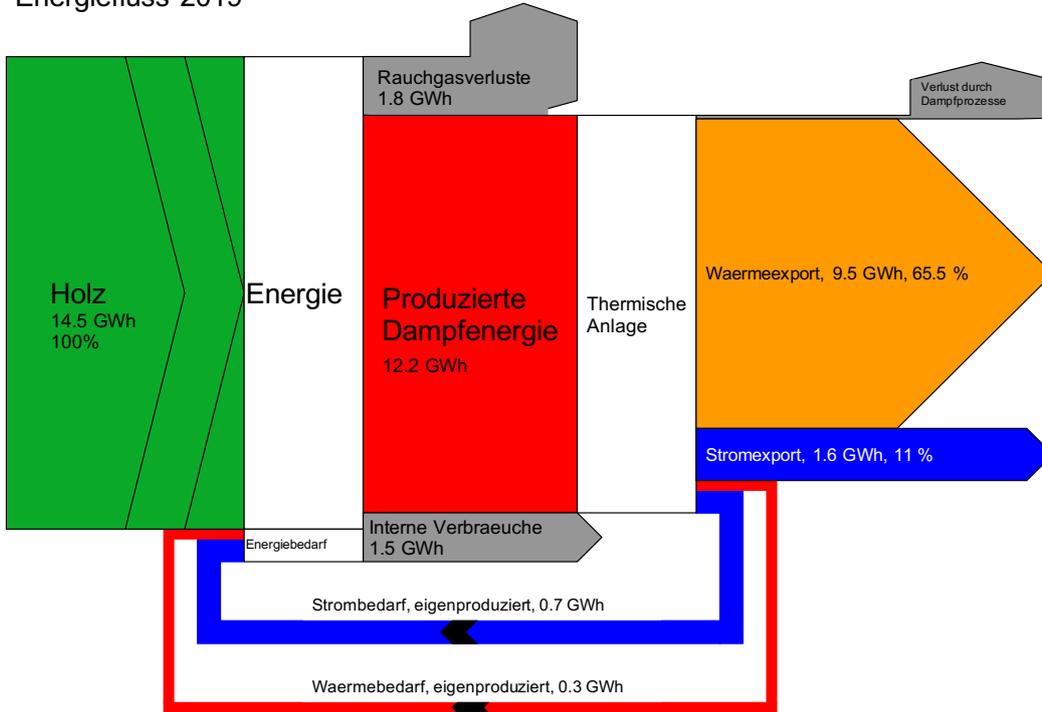
### Anlage B

Energiefluss 2019



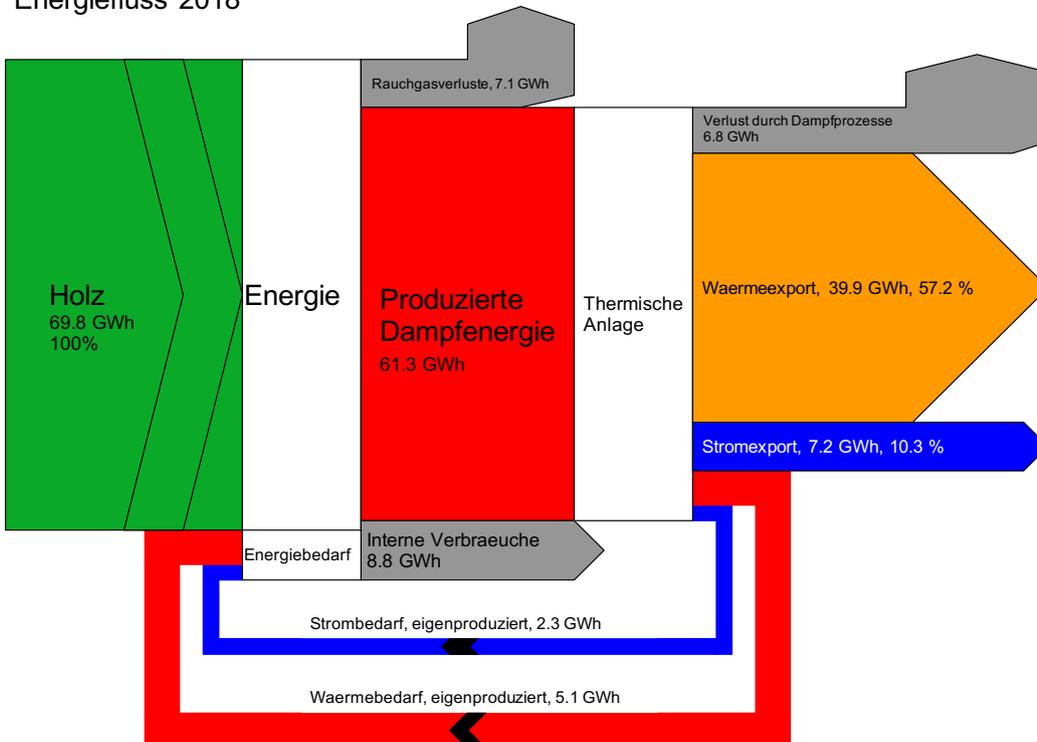
### Anlage C

Energiefluss 2019



### Anlage D

Energiefluss 2018



## Anlage E

### Energiefluss 2019

