



Schlussbericht

Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlenberechnung für Holzheizkraftwerke

Berechnung der Energiekennzahlen von Holzfeuerungen mit
Dampf- und ORC-Kreislauf in der Schweiz





Datum: 24.05.17

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Vertreten durch Daniel Binggeli

Kofinanzierung:

HHKW Bern

HHKW Basel

HKW Zündholz

Holzenergiezentrum Toggenburg HEZT

HKW Ilanz

Enerbois

BMK Richi

CRICAD

BMK Otelfingen

Auftragnehmer/in:

Rytec AG

Alt Bahnhofstrasse 5, CH-3125 Münsingen

www.rytec.ch

Autoren:

Martin Kiener, Rytec AG, martin.kiener@rytec.ch

Urban Frei, Rytec AG, urban.frei@rytec.ch

Begleitgruppe:

Bücherer Thomas, Leiter Energiezentrale Forsthaus, EWB

Stolz Jörg, Leiter Betrieb Energie, IWB

Wüest Josef, Leiter Prüfstelle für Holzfeuerungen, FHNW

BFE-Projektleiter: Daniel Binggeli, daniel.binggeli@bfe.admin.ch

BFE-Bereichsleiter: Frank Rutschmann

BFE-Programmleitung: Daniela Bomatter

BFE-Vertragsnummer: SI/400962-2

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Verzeichnis

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage.....	5
1.2 Vorarbeiten	5
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufgabenstellung.....	6

2 Bisher verfolgter Ansatz der Projektphase 1

2.1 Berechnung des Jahresnutzungsgrades	7
---	---

3 Anpassung der Berechnungsmethode zur Bestimmung des momentanen Kesselwirkungsgrades

3.1 Vereinfachung der Methode zur indirekten Berechnung des Kesselwirkungsgrades	8
3.2 Berechnung der Unsicherheit auf den Jahresnutzungsgrad	10
3.3 Berücksichtigung von Falschlufte im Abgaskanal.....	11
3.4 Berechnung des Wärme- und Stromnutzungsgrades	11

4 Messkampagne

4.1 Holzheizkraftwerk Bern	12
4.2 Cricad Crissier	13
4.3 Enerbois Rueyres.....	14
4.4 Holzskraftwerk Zündholz.....	15
4.5 Holzenergiezentrum Toggenburg HEZT, Nesslau	16
4.6 Biomassekraftwerk Richi	17
4.7 Holzheizkraftwerk Ilanz.....	18
4.8 Holzheizkraftwerk Aubrugg	19
4.9 Holzheizkraftwerk Basel.....	20
4.10 Biomassekraftwerk Otelfingen.....	21

5 Resultate Nutzungsgrad- und Heizwertbestimmung

5.1 Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden.....	22
5.2 Resultate der berechneten Anlagen.....	22

5.3 Diskussion weiterer Kenngrößen	24
6 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	
6.1 Grenzen der Berechnungsgenauigkeit	26
6.2 Datenverfügbarkeit auf den Anlagen	26
6.3 Empfehlung für Betreiber	27
6.4 Energienettoeffizienz im Vergleich mit KVA.....	27
7 Literaturverzeichnis	
Anhang A: Herleitung diverser Berechnungen	
Berechnung des exergetischen Nutzungsgrades.....	29
Berechnungsbeispiel für die Energienettoeffizienz.....	29
Anhang B: Anlagen-Schemata	
Anhang C: Sankey-Diagramme	

Glossar

Abkürzungen

BK	Biomassekraftwerk
BMHKW	Biomasseheizkraftwerk
ENE	Energienettoeffizienz
EnG	Energiegesetz
EnV	Energieverordnung
FD	Frischdampf
GuD	Gas-und Dampfkraftwerk
HHKW	Holzheizkraftwerk
HKW	Holzskraftwerk
JNG	Jahresnutzungsgrad
KEV	Kostendeckende Einspeisevergütung
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
MW	Mittelwert
ND	Niederdruck
ORC	Organic Rankine Cycle
RGK	Rauchgaskondensation
SNCR	Nicht katalytische Entstickung
SRm	Schüttraummeter
WG	Wirkungsgrad

Römische Zeichen

cv	Spezifische Wärmekapazität	[kJ/m ³ K]
Ep	Produzierte Energie	[kJ]
Hi	Heizwert (früher: unterer Heizwert)	[kJ/kg]
h	Spezifische Enthalpie	[kJ/kg]
m	Masse	[kg]
Q	Energie	[kJ]
q	Spezifische Energie	[kJ/kgK]
T	Temperatur	[K], [°C]
u	Feuchtegehalt (bez. Trockenmasse)	[-]
V	Verluste	[-]
V	Volumen	[m ³]
w	Wassergehalt (bez. Gesamtmasse)	[-]

Griechische Zeichen

η	Wirkungsgrad, Nutzungsgrad	[-]
λ	Luftüberschusszahl	[-]
σ	Volumenkonzentration	[%-Vol]
φ	Anteil	[-]

Indizes

a	Jahres-
abg	abgegeben
AG	Abgas
atro	Absolut trocken
ch	chemisch
CO	Kohlenmonoxid betreffend
D	Dampf
el	elektrisch
F	Feuerungs-
FL	Falschluff
Holz	Holz betreffend
H ₂ O	Wasserdampf betreffend
Ke	Kessel
Ka	Kamin
KT	Kesseltrommel
korr1	Korrekturterm
korr2	Korrekturterm
N	Nutz-
n	normiert
O ₂	Sauerstoff betreffend
R	Rost-
RGK	Rauchgaskondensation
rest	restlich
str	Strahlungs-
th	thermisch
tot	total
Umg	Umgebungs-
V	Verdampfungs-
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 Energieverordnung (EnV) beschrieben.

Unter anderem auch aufgrund des begrenzten Biomassepotentials ist eine hohe Brennstoffausnutzung anzustreben. Laut Energieverordnung müssen Biomasseheizkraftwerke (BMHKW) die folgende Kurve (Abbildung 1) überschreiten um Anspruch auf KEV zu erhalten:

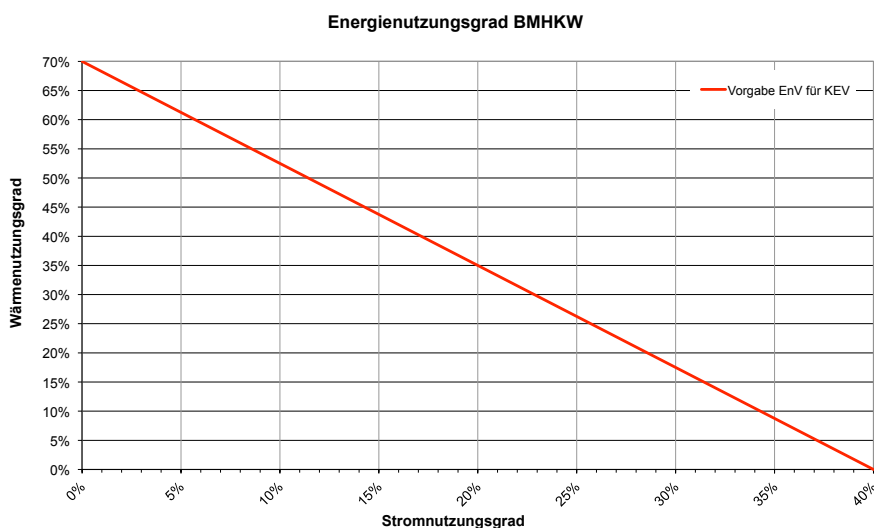


Abbildung 1: Vorgabe EnV an Biomasseanlagen für die KEV

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

1.2 Vorarbeiten

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

1.3 Zielsetzung

Das Bundesamt für Energie hat die Berechnung weiterer Anlagen beauftragt, 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 zu versuchen, ihren Wirkungsgrad zu verbessern.

1.4 Aufgabenstellung

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

2 Bisher verfolgter Ansatz der Projektphase 1

2.1 Berechnung des Jahresnutzungsgrades

In der vorangehenden Arbeit wurde der Jahresnutzungsgrad mit einer der folgenden beiden Methoden berechnet:

A: Iterative Berechnung nach Reimann

Der Jahresnutzungsgrad kann iterativ ermittelt werden, indem Heizwert und Nutzungsgrad mit den gemessenen, über das ganze Jahr aufsummierten Energie- und Massenströmen, berechnet werden:

$$\eta_a = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{\dot{Q}_D}{\dot{Q}_F + \dot{Q}_{korr1}} = \frac{\dot{Q}_D}{H_i \cdot \dot{m}_{Holz,1} + \dot{Q}_{korr1}}$$

mit: $\dot{Q}_D = \dot{Q}_{FD} + \dot{Q}_{KT}$

\dot{Q}_{korr1} Summe weiterer Energieströme (Korrekturterm, positiv oder negativ) [kJ]

$\dot{m}_{Holz,1}$ Holzmassenstrom, gemessen [kg]

Zur Bestimmung des Heizwertes des verbrannten Holzes wird in dieser Methode das Berechnungsmodell nach BREF (Nettoprinzip, Methode Reimann) verwendet. Diese Methode wurde für Abfallanlagen entwickelt. Ihr liegt folgende Formel zugrunde:

$$H_i = \frac{1.133 \frac{Q_D + Q_{korr2} + q_{AG} \Delta T_{AG}}{m_{Holz,1}}}{1.085} \quad \text{mit} \quad Q_D = Q_{FD} + Q_{KT}$$

B: Berechnung über mittleren momentanen Kesselwirkungsgrad

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 [1]:

$$\eta_a = \bar{\eta}_K \quad \text{oder} \quad \eta_a = \eta_K(\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_n)$$

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

wobei der Kesselwirkungsgrad indirekt über die Verluste berechnet wurde:

$$\eta_K = 1 - V_{rest} - V_{th} = 1 - V_{rest} - \frac{V_n(T_{AG} - T_{Umg}) \bar{C}v_{tot}(\lambda, u)}{M_{Holz}(Hu_{atro} - \Delta h_v \cdot u)}$$

wobei

$$V_{rest} = \Delta V_{RGK} - V_{rest1} \quad \text{und}$$

$$V_{rest1} = V_{ch} + V_{str} + V_R$$

3 Anpassung der Berechnungsmethode zur Bestimmung des momentanen Kesselwirkungsgrades

3.1 Vereinfachung der Methode zur indirekten Berechnung des Kesselwirkungsgrades

3.1.1 Begründung für die Vereinfachung

Da aufgrund oftmals fehlender, genauer Angaben zum Holzinput (Menge und Wassergehalt oder H₂O-Konzentration im Abgas) eine Berechnung mit den bisher verwendeten Methoden (Vgl.: [1]) nicht durchführbar ist, wird eine vereinfachte Methode vorgestellt, bei welcher ein Wassergehalt von $w=0.35$ angenommen wird und daher eine Angabe zum Wassergehalt nicht benötigt wird.

3.1.2 Herleitung der vereinfachten Methode

Die indirekte Berechnung des Kesselwirkungsgrades ist wie folgt:

$$\eta_K = 1 - (V_{ch} + V_{str} + V_R + V_{th}) + \Delta V_{RGK}$$

Im Folgenden werden die Verluste einzeln diskutiert:

Kann von einem komplettem Ausbrand ($\sigma_{CO} = 0\%$) ausgegangen werden, können die chemischen Verluste vernachlässigt werden. D.h. $V_{ch} = 0$.

Für die Strahlungs- und Rostverluste werden pro Anlagentyp und Leistungsbereich konstante Annahmen getroffen, sofern keine anderen Angaben dazu bekannt sind:

Feuerungstyp & Leistungsbereich	Strahlungsverlust [3]		Rostverlust [4],[5]	
	Ø	min/max	Ø	min/max
Rostfeuerung, <10 MW	3%	1%/4%	3%	1%/5%
Rostfeuerung, >10 MW	2%	1%/4%	2%	1%/4%
Wirbelschichtfeuerung	3%	1%/4%	1.5%	1%/3%

Den grössten Einfluss auf den berechneten Wirkungsgrad haben die thermischen Verluste. Diese werden auch für die vereinfachte Methode berechnet. In Abhängigkeit der Abgastemperatur, des Sauerstoffgehalts im Abgas und der Holzfeuchte (Wasseranteil bezogen auf die Trockenmasse), sowie unter der Annahme von komplettem Ausbrand ($\sigma_{CO} = 0\%$) und einer Holzzusammensetzung von $CH_{1.44}O_{0.66}$ sieht die Berechnung wie folgt aus ([2]):

$$V_{th} = (T_{AG} - T_{Umg}) \frac{\left\{ 1.39 + \frac{122}{0.98(21 - \sigma_{O_2})} + 2u \right\}}{(H_{i,atro} - 2500u)} [-]$$

3.1.3 Diskussion der Auswirkung der Vereinfachung

Die thermischen Verluste betragen in Abhängigkeit der Abgastemperatur und des Holzwassergehalts bis zu 14% (Annahme: O₂-Gehalt im Abgas von 8 Vol-%, bei tieferem O₂-Gehalt sind die thermischen Verluste kleiner, bei höherem grösser) bei einer Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur von 180°C. Ausser bei einer Anlage lag die Abgastemperatur nicht höher als 180°C. Die Temperaturdifferenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur lag deshalb für die betrachteten Anlagen ca. zwischen 105°C und 160°C (grauer Bereich in Abbildung 2).

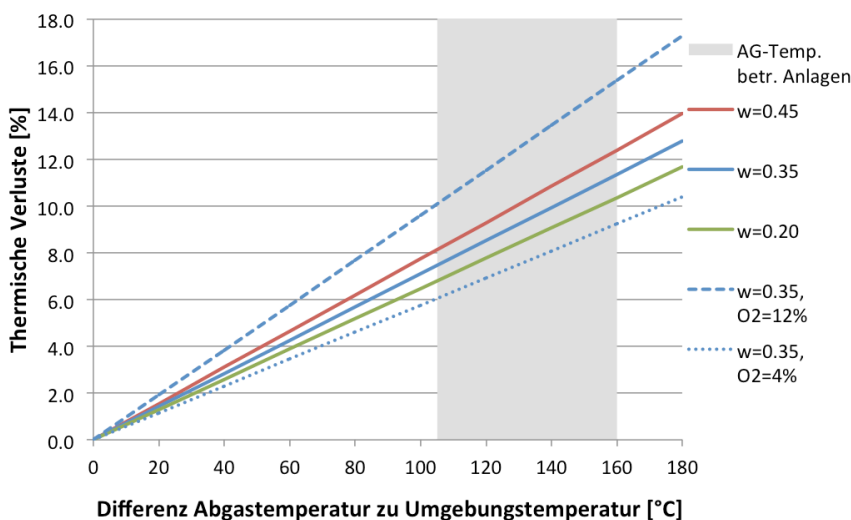


Abbildung 2: Thermische Verluste bei einem O₂-Gehalt von 8 Vol-% im Abgas in Abhängigkeit der Abgastemperatur und des Holzwassergehaltes und Einfluss des O₂-Gehalts (gestrichelt und gepunktet)

Für die vereinfachte Berechnung ohne Angabe zum Wassergehalt wird nun angenommen, dass Holz mit einem Wassergehalt von 35% verbrannt wird. Das Verhältnis der thermischen Verluste bei unterschiedlichem Wassergehalt gegenüber dem Referenzwassergehalt von $w=0.35$ bleibt unabhängig von der Abgastemperatur konstant. D.h. die relative Abweichung vom effektiven Wert ist unabhängig von der Abgastemperatur. Die absolute Abweichung nimmt mit zunehmender Abgastemperatur zu. Für Holz mit einem Wassergehalt zwischen 20% und 45% und bei einer Differenz zwischen Abgas- und Umgebungstemperatur von 160°C liegt der absolute Fehler bei $\pm 1\%$ (für eine O₂-Konzentration im Abgas von 8%, siehe Abbildung 3). Bei tieferen Abgastemperaturen wird der absolute Fehler kleiner. Der Einfluss der O₂-Konzentration auf die Höhe des absoluten Fehlers ist im Verhältnis zum Einfluss der Abgastemperatur eine Grössenordnung kleiner.

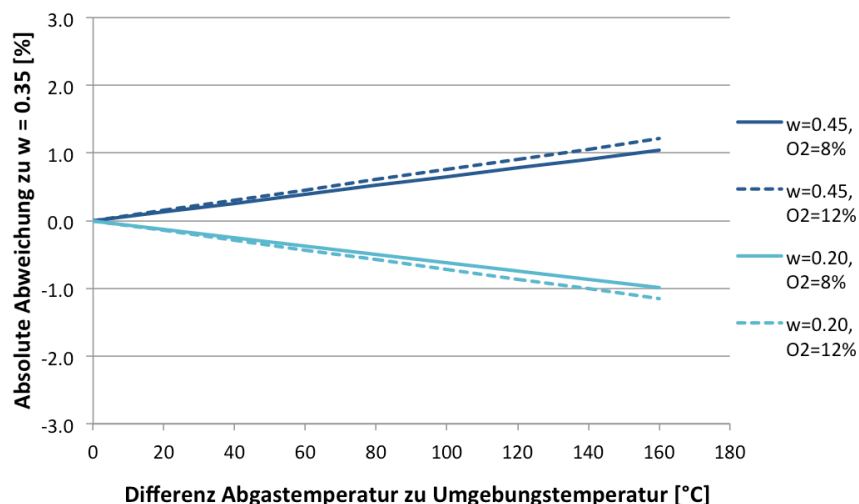


Abbildung 3: Absoluter Fehler für die Berechnung der thermischen Verluste in Abhängigkeit der Abgastemperatur und des effektiven Holzwassergehalts.

In der Praxis wird meistens ein Mix verschiedener Holzarten verbrannt, wodurch ein Holzwassergehalt um 35% realistisch ist. Die Abgastemperatur liegt ausser bei einer Anlage immer unter 180°C und der O₂-Gehalt liegt für alle untersuchten Anlagen zwischen knapp 4 Vol-% und 11 Vol-% (trocken).

Eine Vereinfachung der Berechnung mit konstantem Holzwassergehalt wird daher als akzeptabel erachtet. Ein absoluter Fehler von 1% (1.2% bei 12 Vol-% O₂) liegt in der gleichen Grössenordnung wie der Fehler für die getroffenen Annahmen für die Strahlungs- und Rostverluste.

3.2 Berechnung der Unsicherheit auf den Jahresnutzungsgrad

Für die direkte Berechnungsmethode beträgt die Unsicherheit knapp $\pm 10\%$ absolut. Hauptsächliche Einflussgrössen sind die Messung der verbrannten Menge, die Bestimmung des Wassergehalts sowie die Annahme zum Heizwert von trockenem Holz [6].

Für die indirekte Berechnung der Unsicherheit wird jeweils die Differenz der Angaben zu Strahlungs- und Rostverlust zu den minimalen und maximalen Werten gemäss Kap. 3.1.2 sowie die Unsicherheit der thermischen Verluste (Abbildung 3), sofern mit der vereinfachten Methode ohne Kenntnis des Wassergehalts gerechnet wird, aufsummiert. Ist ein effektiver Messwert zu Strahlungs- und/oder Rostverlusten vorhanden wird die Unsicherheit ohne diesen Anteil berechnet. Dazu kommt noch ein Anteil Unsicherheit für die indirekte Berechnung [6].

Die gesamte Unsicherheit für die vereinfachte indirekte Berechnungsmethode ist damit rund halb so gross wie für die direkte Berechnungsmethode.

3.3 Berücksichtigung von Falschlufft im Abgaskanal

Für die indirekte Berechnung des Kesselwirkungsgrades wird die Luftüberschusszahl im Abgas benötigt. Diese ist aber direkt Abhängig von der O₂- und H₂O-Konzentration im Abgas. Allerdings ist zu beachten, dass diese beiden Grössen durch eventuelle Falschlufftzufuhr in den Abgaskanal verdünnt werden können. Deshalb wird die Berechnung um die Berücksichtigung des Falschlufftanteils erweitert. Wird am Kamin ein höherer O₂-Wert gemessen als nach dem Kessel, ist entsprechend Falschlufft ins System gelangt. Der Falschlufftanteil beträgt dabei:

$$\varphi_{FL} = \frac{\sigma_{O_2, Ka} - \sigma_{O_2, K}}{0.2098 - \sigma_{O_2, Ka}}$$

3.4 Berechnung des Wärme- und Stromnutzungsgrades

Da die verbrannte Holzmenge oftmals nur in m³ und nicht in Tonnen bekannt ist, kann der Heizwert nicht berechnet werden. Deshalb wird auf die Berechnung des Heizwertes verzichtet und über den Jahresnutzungsgrad (berechnet gemäss Kap. 3.1) und die abgegebene Energiemenge direkt der Energieinput berechnet. Daraus kann anschliessend der Wärme- und Stromnutzungsgrad berechnet werden.

Brennstoffenergie: $Q_{zu} = \frac{Q_{abg}}{\eta_a}$

Stromnutzungsgrad für KEV: $\eta_{el} = \frac{Ep_{el}}{Q_{zu}}$

Wärmenutzungsgrad für KEV: $\eta_{th} = \frac{Ep_h}{Q_{zu}}$

Ep_{el}: die am Generator produzierte Strommenge

Ep_h: die gesamte genutzte Wärme, inkl. anrechenbarer Eigenbedarf.

4 Messkampagne

4.1 Holzheizkraftwerk Bern

4.1.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Bern wurde 2013 in Betrieb genommen. Es steht im Gebäude der neuen Energiezentrale Forsthaus, welche 2012 in Betrieb genommen wurde. Die Energie wird für das Fernwärmenetz der Stadt Bern mit einer Länge von rund 40 km sowie als Prozessdampf für die ARA Region Bern und die InoTex Bern AG verwendet.

Tabelle 1: Kenndaten der Anlage Bern 2015

Brennstoffmix:	Frischholz (ca. 50%), Altholz (ca. 40%), Sägereirestholz (ca. 10%) Wassergehalt: 31% (gemessen)
Anlage	Wirbelschichtfeuerung 27 MW _{th} , SNCR, Gewebefilter
Energieproduktion	Dampf 60 bara, 485°C Dampfturbine (GuD + HHKW): 27 MW _{el} Stromeinspeisung (Anteil HHKW): 13.8 GWh/a Wärmeabgabe (Anteil HHKW): 88.6 GWh/a

Besonderheiten: Die Dampfturbine ist mit dem Gaskraftwerk gekoppelt. Seit 2015 ist es auch möglich, den Dampf des HKW über die Turbine der KVA zu verstromen.

4.1.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Das HHKW Bern weist eine sehr gute Datenverfügbarkeit auf. Der Wassergehalt von jeder Lieferung wird mit einer Trocknungsschrankmessung ermittelt. Zudem wird auch die Wasserdampfkonzentration im Abgas gemessen. Die angelieferte Holzmenge wird gewogen. Die Berechnung des Jahresnutzungsgrades ist daher mit verschiedenen Methoden möglich, was eine Plausibilisierung der einzelnen Berechnungswege erlaubt.

Tabelle 2: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	<ul style="list-style-type: none"> Gemessen: Waage bei Anlieferung
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> Gemessen: Trockenschrankmessung pro Lieferung Berechnung über H₂O-Konzentration Abgas möglich

4.2 Cricad Crissier

4.2.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk CRICAD in Crissier wurde 2002 in Betrieb genommen. Als Brennstoff wird Altholz aus dem benachbarten Recyclingunternehmen Retripa verwendet. Mit der gewonnenen Energie wird das rund 3.5 km lange Fernwärmenetz beliefert.

Tabelle 3: Kenndaten der Anlage Cricad 2015

Brennstoffmix:	Altholz Wassergehalt: 20% (Schätzung durch Betreiber)
Anlage	Rostfeuerung 6 MW _{th} , SNCR, Gewebefilter
Energieproduktion	Thermo-Öl, 6.3 bara, 280°C ORC-Turbine: 0.51 MW _{el} Stromeinspeisung: 2.0 GWh/a Wärmeabgabe: 26.1 GWh/a

Besonderheiten: Die Anlage in Crissier verfügt über die älteste noch im Betrieb stehende ORC-Turbine der Schweiz.

4.2.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Eine Messung des Holzwassergehalts oder der H₂O-Konzentration im Abgas ist nicht vorhanden.

Tabelle 4: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Gemessen: Bandwaage
Wassergehalt	• Schätzung des Betreibers

4.3 Enerbois Rueyres

4.3.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Enerbois in Rueyres steht auf dem Areal der Sägerei Zahnd. Die Anlage wurde Ende 2009 in Betrieb genommen und bedient die Pelletproduktion mit Wärme. Zudem wird ein Fernwärmenetz für die Sägerei betrieben.

Tabelle 5: Kenndaten der Anlage Enerbois 2015

Brennstoffmix:	Altholz, Sägereirestholz Wassergehalt: 42% (Labormessung der einzelnen Holzfraktionen)
Anlage	Rostfeuerung 12 MW _{th} , SNCR, Gewebefilter
Energieproduktion	Dampf 65 bara, 485°C Dampfturbine: 4 MW _{el} Stromeinspeisung: 25.5 GWh/a Wärmeabgabe: 29.6 GWh/a

Besonderheiten: Die Anlage verfügt über eine Rauchgaskondensation, welche die austretenden Abgase bis auf 37°C runterkühlt. Damit erhöht sich der Kesselwirkungsgrad um knapp 13 Prozentpunkte. Die dadurch gewonnene Wärmeenergie wird für die erste Stufe der Holztrochnungsanlage verwendet.

4.3.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Zum Holzkraftwerk Enerbois ist keine Angabe zur verbrannten Holzmasse vorhanden. Eine Angabe über die verbrannte Menge in m³ ist zwar vorhanden, jedoch ist eine Berechnung der Masse damit nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Der Wassergehalt der verschiedenen Holzfraktionen wird periodisch mittels Labormessungen festgestellt.

Tabelle 6: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Angabe in m ³ , keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Abschätzung über einzelne Holzfraktionen

4.4 Holzkraftwerk Zündholz

4.4.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Zündholz wurde 2010 in Betrieb genommen. Es steht auf dem Areal einer Sägerei und versorgt diese mit Energie für die Holz Trocknung.

Tabelle 7: Kenndaten der Anlage Zündholz 2015

Brennstoffmix:	Hackschnitzel trocken, (21%), Frischholz (26%), Entrindung (22%), Rinde (30%) Wassergehalt: Keine Angabe
Anlage	Rostfeuerung 5.2 MW _{th} , SNCR, Elektrofilter
Energieproduktion	Thermo-Öl, 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 1 MW _{el} Stromeinspeisung: 5.7 GWh/a Wärmeabgabe: 27.5 GWh/a

4.4.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Zum Holzkraftwerk Zündholz ist keine Angabe zur verbrannten Holzmasse verfügbar. Eine Angabe über die verbrannte Menge in m³ ist zwar vorhanden, jedoch ist eine Berechnung der Masse damit nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich.

Tabelle 8: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Angabe in m ³ , keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Schätzung des Betreibers

4.5 Holzenergiezentrum Toggenburg HEZT, Nesslau

4.5.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk wurde im Jahr 2010 in Betrieb genommen. Es versorgt den Wärmeverbund des Doppeldorfs Nesslau Neu-St. Johann mit rund 100 Wärmebezügern und einer Netzlänge von rund 4.5 km.

Tabelle 9: Kenndaten der Anlage HEZT 2015

Brennstoffmix:	Waldrestholz w35 (66.5 %), Waldrestholz w45 (30.5%), Waldrestholz w50 (0.5%), Sägereirestholz w25 (2.5%) Wassergehalt: 38% (Abschätzung über verbrannte Holzfraktionen)
Anlage	Rostfeuerung 4 MW _{th} , SNCR, Elektrofilter
Energieproduktion	Thermo-Öl, 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 0.6 MW _{el} Stromeinspeisung: 1.5 GWh/a Wärmeabgabe: 10.1 GWh/a

4.5.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Beim Holzkraftwerk HEZT ist keine Angabe zur verbrannten Holzmasse verfügbar. Eine Angabe über die verbrannte Menge in m³ ist zwar vorhanden, jedoch ist eine Berechnung der Masse damit nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Zum Holzwassergehalt wurde vom Forstbetrieb eine Abschätzung über die eingesetzten Holzarten in m³ gemacht.

Tabelle 10: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Angabe in m ³ , keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	• Schätzung über verbrannte Holzfraktionen

4.6 Biomassekraftwerk Richi

4.6.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk ging 2005 in Betrieb. Die Anlage steht auf dem Areal des Entsorgungszentrums Richi in Weiningen. Als Brennstoff wird das anfallende Altholz des Entsorgungszentrums verwendet. Mit der Abwärme werden zwei Gewächshäuser beheizt. In Zukunft soll ein Teil der Wärme ins lokale Fernwärmenetz eingespeist werden.

Tabelle 11: Kenndaten der Anlage Richi 2015

Brennstoffmix:	Altholz (92%) Hackschnitzel (8%) Wassergehalt: Keine Angabe
Anlage	Rostfeuerung 7 MW _{th} , SNCR, Elektrofilter, Wäscher
Energieproduktion	Dampf 29 bara, 365°C Dampfturbine: 3.2 MW _{el} Stromeinspeisung: 12.8 GWh/a Wärmeabgabe: 32.9 GWh/a

Besonderheiten: Die Wärme des Holzkraftwerks wird zum Teil für den Betrieb des Drehrohrofens für die thermische Bodenbehandlung genutzt.

4.6.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Die Berechnung zur Anlage Richi in Weiningen wurde aufgrund der Angaben aus dem für das AWEL erstellten Jahresbericht 2015 durchgeführt. Die Datenverfügbarkeit ist dementsprechend nicht optimal.

Tabelle 12: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Angabe in Tonnen verfügbar
Wassergehalt	• Keine Angabe verfügbar

4.7 Holzheizkraftwerk Ilanz

4.7.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk wurde im Februar 2015 in Betrieb genommen. Es versorgt den Wärmeverbund Ilanz mit gut 60 Wärmebezüglern und einer Netzlänge von rund 3.7 km.

Tabelle 13: Kenndaten der Anlage HKW Ilanz 2015

Brennstoffmix:	Altholz (70%), Waldrestholz <w50 (15 %), Waldrestholz <w30 (15 %), Wassergehalt: 37% (Analyse Altholz und Abschätzung über Holzfraktionen)
Anlage	Rostfeuerung 2.2 MW _{th} , SNCR, Kalkeindüsung, Gewebefilter
Energieproduktion	Thermo-Öl, 12 bara, 310°C ORC-Turbine: 0.35 MW _{el} Stromeinspeisung: 1.4 GWh/a Wärmeabgabe: 7.8 GWh/a

4.7.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Zum Holzkraftwerk Ilanz ist keine Angabe zur verbrannten Holzmasse verfügbar. Eine Angabe über die verbrannte Menge in m³ ist zwar vorhanden, jedoch ist eine Berechnung der Masse damit nicht mit genügender Genauigkeit möglich.

Tabelle 14: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	<ul style="list-style-type: none"> Angabe in m³, keine Angabe in Tonnen
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> Einmalige Laboranalyse und Schätzung über verbrannte Holzfraktionen

4.8 Holzheizkraftwerk Aubrugg

4.8.1 Anlageninfos

Das Holzkraftwerk Aubrugg wurde 2010 in Betrieb genommen. Es steht auf dem Areal des Heizkraftwerks Aubrugg und beliefert das bestehende Fernwärmenetz der ERZ Fernwärme Zürich.

Tabelle 15: Kenndaten der Anlage Aubrugg 2015

Brennstoffmix:	Frischholz (85%), Landschaftspflegeholz (15%) Wassergehalt: 38% (gemessen)
Anlage	Wirbelschichtfeuerung 42 MW _{th} , Gewebefilter, Keine Entstickungsanlage
Energieproduktion	Dampf 80 bara, 500°C Dampfturbine: 11 MW _{el} Stromeinspeisung: 38.3 GWh/a Wärmeabgabe: 102.6 GWh/a

Besonderheiten: Da in der Anlage nur Frischholz verbrannt wird, ist keine Entstickungsanlage nötig.

4.8.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Der Betreiber des HHKW Aubrugg konnte bis jetzt nicht überzeugt werden, Anlagen- und Betriebsdaten zur Verfügung zu stellen. Eine exakte Berechnung ist daher zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Der Betreiber hat in Aussicht gestellt, eventuell im 2017 bei der Erhebung mitzumachen und Daten zur Verfügung zu stellen. Daher wurde eine Abschätzung zum Nutzungsgrad aus öffentlich verfügbaren Quellen (Jahresbericht HHKW-Aubrugg, KliK Verifizierungsbericht, Umweltbericht Zürich Holz, Geschäftsbericht ERZ) gemacht.

Tabelle 16: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Gemessen, Anlieferwaage
Wassergehalt	• Gemessen

4.9 Holzheizkraftwerk Basel

4.9.1 Anlageninfos

Seit 2008 ist das Holzkraftwerk in Basel jeweils während der Heizperiode in Betrieb und bedient das Fernwärmenetz des Stadt Basel. Der Ofen steht im Gebäude der KVA und das Wasser-Dampfsystem ist direkt gekoppelt. Die Verstromung erfolgt in der gleichen Turbine wie für die Kehricht-Ofenlinien, der Anteil des „Holzstroms“ wird bilanziert.

Tabelle 17: Kenndaten der Anlage Basel 2013

Brennstoffmix:	Im Jahr 2013 setzte sich die Holzmenge in SRm folgendermassen zusammen: <ul style="list-style-type: none"> - Waldholz: 51.1% - Altholz: 29.4% - Rinde: 0.5% - Reduzierspäne: 0.4% - Landschaftspflegeholz: 18.1% - Sägereirestholz: 0.5%
Anlage	Wirbelschichtfeuerung 36 MW _{th} , SNCR, Gewebefilter
Energieproduktion	Dampf 40 bara, 400°C Dampfturbine (KVA + HKW): 17 MW _{el} und 2.7 MW _{el} (ND), Stromeinspeisung: 16.7 GWh/a, Wärmeabgabe: 143 GWh/a

Besonderheiten: Für eine belastbarere Abrechnung mit den Holzlieferanten hat die Holzkraftwerk Basel AG ein System zur direkten Feuchtebestimmung der angelieferten Ware eingerichtet. Damit wird die heizwertabhängige Abrechnung mit den Lieferanten stark vereinfacht. Früher wurden pro Lieferung Proben genommen und erst nach der Wassergehaltsbestimmung im Labor konnte eine Verrechnung erfolgen.

4.9.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Die Datenverfügbarkeit beim HHKW Basel ist auf Grund der Eingliederung in den KVA-Prozess ausgezeichnet. Es wird sowohl die Holzmasse als auch der Wassergehalt gemessen.

Tabelle 18: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	<ul style="list-style-type: none"> • Gemessen, Anlieferwaage
Wassergehalt	<ul style="list-style-type: none"> • Gemessen: Online Wassergehaltsmessung • Berechnung über H₂O-Konzentration Abgas möglich

4.10 Biomassekraftwerk Otelfingen

4.10.1 Anlageninfos

Im Sommer 2012 wurde das Biomassekraftwerk Otelfingen (BKO) nach der vollständigen Erneuerung der Anlage in Betrieb genommen. Es wird Wärme an ein Fernwärmenetz (industriell) und Niedertemperatur-Abwärme an eine Gärtnerei abgegeben.

Tabelle 19: Kenndaten der Anlage Otelfingen 2013

Brennstoffmix:	Altholz
Anlage	Rostfeuerung 17 MW _{th} , SNCR, Gewebefilter
Energieproduktion	Dampfparameter: FD 27 bara, 360°C und Sattedampf 28 bara, 230°C Dampfturbine: 2.6 MW _{el} Stromproduktion 9.9 GWh/a Wärmeabgabe: 5 GWh/a

Besonderheiten: Der Wärmenutzungsgrad soll durch den Ausbau des FW-Netzes noch markant gesteigert werden.

4.10.2 Datenverfügbarkeit zum Brennstoff

Die Inputmenge in die Feuerung wird nicht direkt gemessen. Die Mengen stammen einzig von der Waage des Altholz-Aufbereitungsbetriebes, der das Holz nach der Wägung noch zerkleinert, entfrachtet und lagert. So ist bereits die verbrannte Menge in Tonnen pro Jahr schwierig abzuschätzen.

Tabelle 20: Verfügbarkeit wichtiger Berechnungsparameter

Verbrannte Menge	• Gemessen, Anlieferwaage, vor Entfrachtung
Wassergehalt	• Einmalige Handmessung

5 Resultate Nutzungsgrad- und Heizwertbestimmung

5.1 Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden

Dank guter Datenverfügbarkeit der Anlage in Bern können die verschiedenen Methoden zur Berechnung des Jahresnutzungsgrades miteinander verglichen werden. Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Der mit den unterschiedlichen Methoden ermittelte Jahresnutzungsgrad liegt zwischen 86.6% und 88.9%.

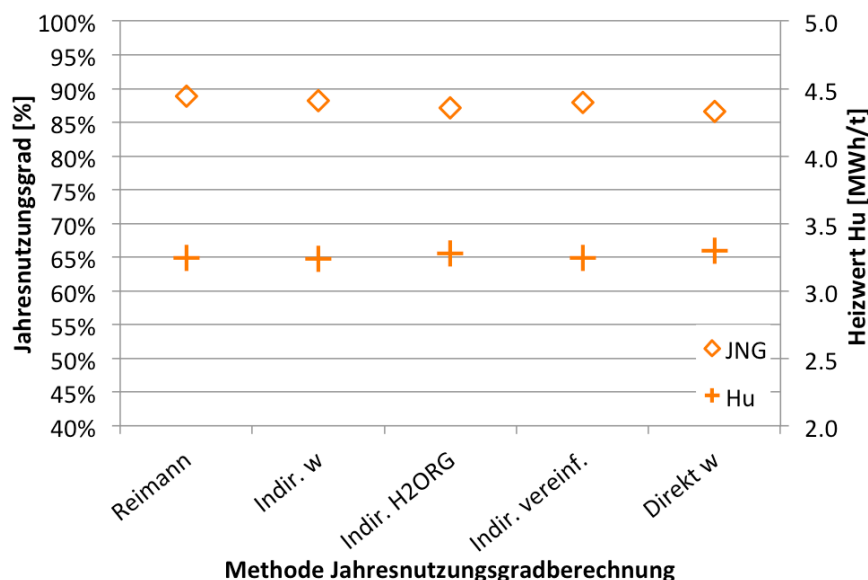


Abbildung 4: Vergleich der verschiedenen Berechnungsmethoden für den Jahresnutzungsgrad (JNG) und den Heizwert (Hu) des HHKW Bern

5.2 Resultate der berechneten Anlagen

Die Berechnung der folgenden Wirkungs- und Nutzungsgrade basiert mit Ausnahme der Anlage in Bern auf der oben vorgestellten, vereinfachten Methode zur indirekten Berechnung des Kesselwirkungsgrades ohne Berücksichtigung des Wassergehaltes, da dieser durch die Betreiber nur abgeschätzt wurde und keine Messdaten vorliegen. Bei der Anlage in Bern ist die Differenz zwischen den beiden Berechnungsarten minimal, da der effektive Wassergehalt mit $w=0.31$ nur minimal tiefer ist als bei der vereinfachten Berechnung verwendete Wert von $w=0.35$.

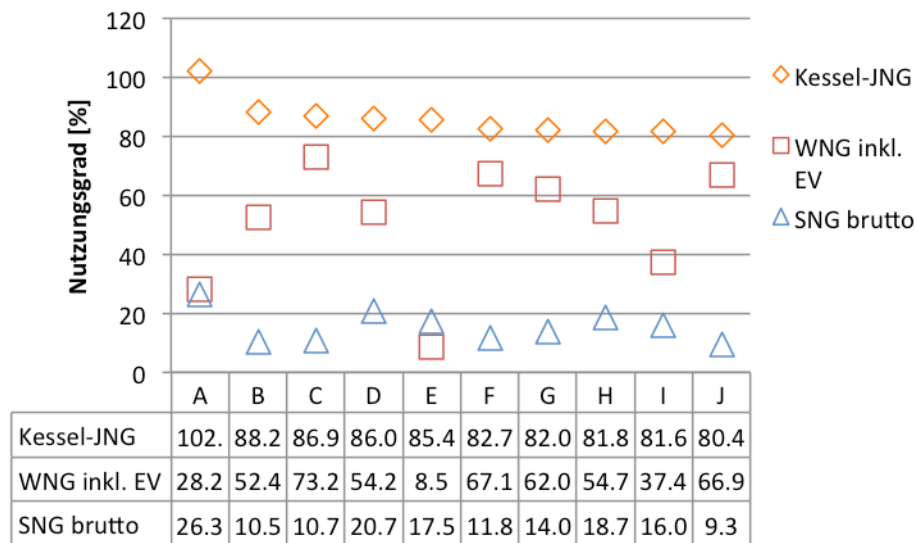


Abbildung 5: Jahresnutzungsgrad (JNG) und Wärme- und Stromnutzungsgrad (WNG, SNG) für die untersuchten Anlagen

Auffallend ist der bei über 100% liegende Kesselwirkungsgrad bei der Anlage A. Der Grund dafür liegt im Heizwert als Bezugsgrösse. Durch die Rauchgaskondensation kann auch die latente Wärme des Wasserdampfs im Abgas genutzt werden, welche im Heizwert nicht berücksichtigt wird. Als Bezugsgrösse könnte deshalb der Brennwert (früher: oberer Heizwert) herbeigezogen werden, damit keine Nutzungsgrade über 100% möglich sind.

Zwei Anlagen erreichen die KEV-Anforderung nicht, sind jedoch auch keine KEV-Bezüger.

Die Unsicherheit bezüglich Wärme- und Stromnutzungsgrad beträgt je nach Anlage max. 4.6% resp. 1.4% absolut.

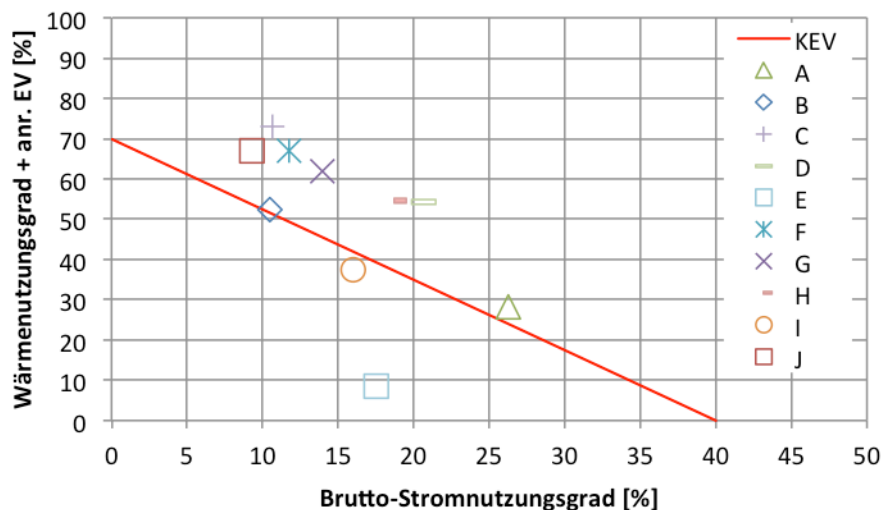


Abbildung 6: Wärme- und Stromnutzungsgrad im Vergleich zur KEV-Anforderung für die untersuchten Anlagen.

Werden die Nettonutzungsgrade der Anlagen betrachtet, ist ersichtlich, dass die Anlagen unterschiedlich effizient sind. Der Stromeigenverbrauch beträgt bis zu knapp 50% der Bruttoproduktion.

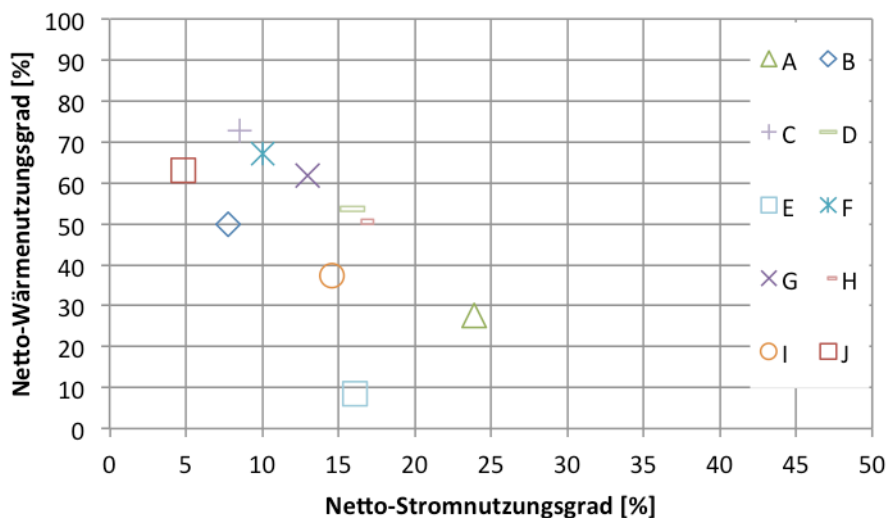


Abbildung 7: Netto-Wärme- und -Stromnutzungsgrad der untersuchten Anlagen.

5.3 Diskussion weiterer Kenngrößen

Als weitere Kenngrösse um die Effizienz einer Anlage zu beurteilen, kann der exergetische Nutzungsgrad verwendet werden. Dabei wird das Temperaturniveau der abgegebenen Wärmeströme berücksichtigt. Eine Anlage mit sehr hohem Stromnutzungsgrad ist mit dieser Betrachtung ebenso effizient wie eine Anlage, welche weniger Strom produziert jedoch mehr Wärme abgibt. Der Grund liegt darin, dass Energie für die Fernwärme auf einem tiefen exergetischen Niveau abgegeben wird.

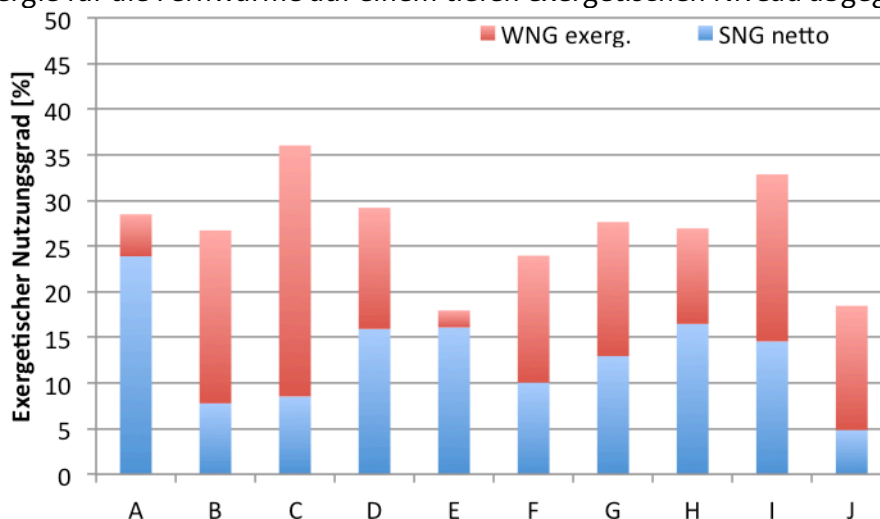


Abbildung 8: Exergetischer Nutzungsgrad der verschiedenen Anlagen mit Strom-(blau) und Wärmeanteil (rot)

Eine weitere Vergleichsgrösse ist die Energienettoeffizienz ENE, welche vor allem für Kehrlichtverbrennungsanlagen verwendet wird. Dabei wird der exportierte Strom- und Wärmeanteil mit Äquivalenzfaktoren gewichtet ($ENE=2.6 \cdot SNG + 1.1 \cdot WNG$). wird deutlich, dass im Vergleich zur exergetischen Betrachtung die abgegebene Wärmemenge zu wenig differenziert betrachtet wird. Anlagen mit grösserer Wärmeabgabe sind in dieser Betrachtung bevorteilt.

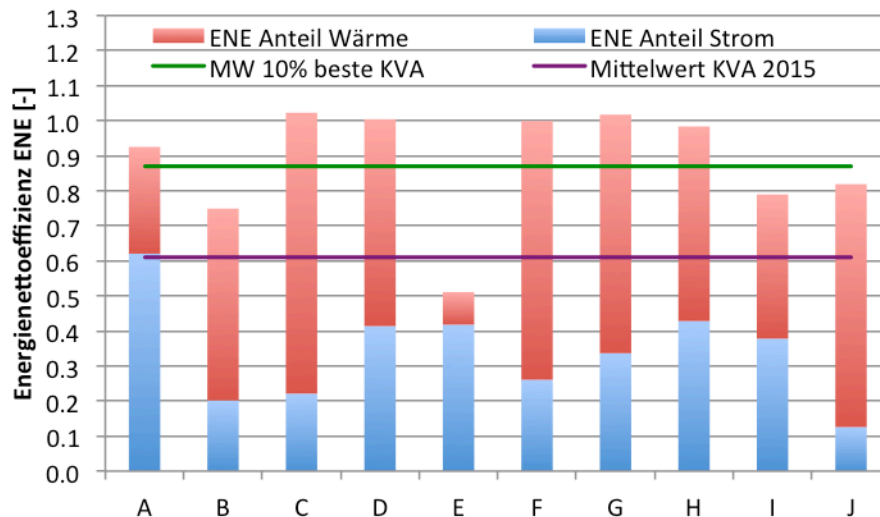


Abbildung 9: Anteil des Stroms und der Wärme an der Energienettoeffizienz und Vergleich mit dem Mittelwert aller (violett) resp. der 10% besten (grün) Schweizer KVA.

Wird die Energienettoeffizienz der untersuchten Anlagen mit den Schweizer KVA verglichen zeigt sich, dass von den untersuchten 10 Anlagen, acht Anlagen besser als der Durchschnitt der Schweizer KVA (violette Linie) abschneiden. Sechs Anlagen sind effizienter als die effizientesten 10% der Schweizer KVA.

6 Schlussfolgerungen und Zusammenfassung

6.1 Grenzen der Berechnungsgenauigkeit

Von den betrachteten 10 Anlagen wird nur bei drei Anlagen der Wassergehalt des verbrannten Holzes gemessen. Ebenso wird nur bei 2 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 präsentierten, vereinfachten Methode zur Berechnung des Kesselwirkungsgrades kann nun mit vertretbarer Genauigkeit eine Aussage zu den energetischen Kenngrössen gemacht werden. Damit können verschiedene Anlagen untereinander verglichen werden. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass die Unsicherheit der Berechnungen auf Grund der zu treffenden Annahmen trotzdem im mittleren einstelligen Prozentbereich liegt, d.h. die Abweichung des berechneten Kesselwirkungsgrades vom effektiven Wert kann je nach Anlage bis zu $\pm 6\%$ absolut betragen (maximal 0.6% Fehler für die Berechnung der thermischen Verluste, ca. 4% für die Annahmen zu Strahlungs- und Rostverlusten sowie maximal 1% Fehler durch die Annahme eines konstanten Wassergehalts von $w=35\%$). Auf den Wärme- und Stromnutzungsgrad wirkt sich dies mit bis zu $\pm 4.5\%$ resp. $\pm 1\%$ aus.

6.2 Datenverfügbarkeit auf den Anlagen

Es wird deshalb empfohlen die Anlagen je nach vorhandenen Messdaten und damit nach Unsicherheit der Berechnung zu unterscheiden:

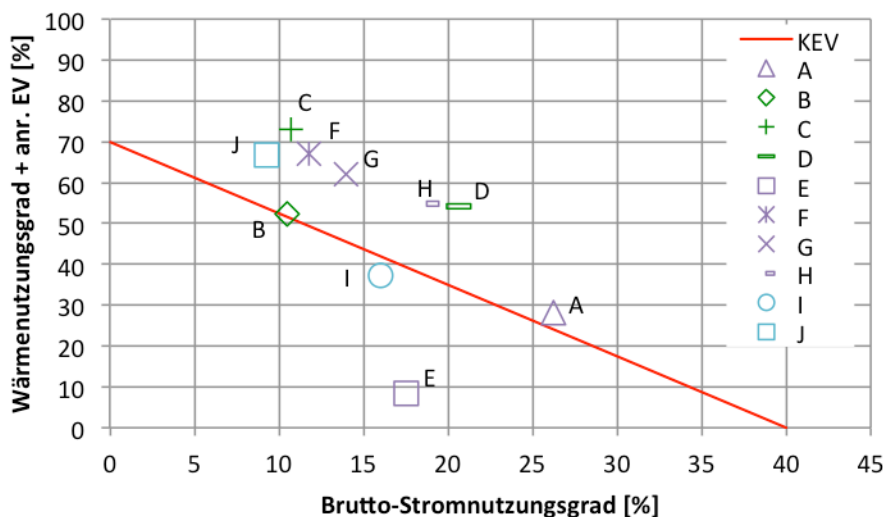


Abbildung 10: Unterscheidung der Datenverfügbarkeit für die verschiedenen Anlagen zwischen guter Datenlage (grün), keine Angabe zu Wassergehalt (blau), und fehlender Angabe zu Wassergehalt und Holzmasse (violett).

„Grüne“ Anlagen können dementsprechend Angaben zur verbrannten Holzmasse sowie zum Wassergehalt machen. „Blaue“ Anlagen kennen die verbrannte Holzmasse, nicht aber den Wassergehalt. „Violette“ Anlagen können keine der beiden Angaben machen, sondern kennen, wenn überhaupt, nur die verbrannte Holzmenge in Kubikmetern.

6.3 Empfehlung für Betreiber

Insbesondere für die Betreiber der Anlagen wäre es interessant zu wissen, welche Holzqualität effektiv angeliefert wird, dies weil beim Betrieb mit niederwertigem Holz der Verschleiss der Anlagen grösser sein kann (z.B. höhere Korrosion) und demnach die Unterhalts- und Revisionskosten höher ausfallen können. Es sollte deshalb auch im Interesse der Betreiber sein, genauere Kenntnis der Holzqualität zu haben. Kenntnis der Holzqualität und somit auch des Energieinputs und der Effizienz der Anlage kann auch als Argument für die Verhandlungen mit dem Holzlieferanten dienen. Es wird daher empfohlen, auf den Anlagen ein Wassergehaltsmessgerät zu installieren, was schlussendlich auch die Genauigkeit der Berechnung der energetischen Kennzahlen verbessert. Auf dem Markt sind Messgeräte mit Anschaffungskosten unter 5'000 CHF vorhanden. Es ist jedoch noch zu prüfen ob diese auch geeignet sind, den Wassergehalt des auf diesen Anlagen verwerteten Brennstoffs mit vernünftiger Genauigkeit zu bestimmen.

6.4 Energienettoeffizienz im Vergleich mit KVA

Im Vergleich mit Schweizer KVA sind Holzheizkraftwerke mindestens gleich effizient. Der Grund dafür liegt darin, dass der Eigenverbrauch von Wärme und Strom bei einem HHKW im Vergleich zu einer KVA kleiner ausfällt. Zudem können KVA im Sommer zum Teil nicht die gesamte Wärme verwenden, sondern müssen einen Teil über einen Rückkühler vernichten, was zu einem tieferen Wärmenutzungsgrad führt.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Einheitliche Heizwert- und Energiekennzahlen Berechnung für Holzkraftwerke, BFE, 2015
- [2] Good J., Nussbaumer T.: Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen, DIANE 7, BEW, 1993
- [3] Wolff D., Jagnov, K.: Auswirkung verschiedener Betriebsbedingungen auf den Kesselnutzungsgrad, Skript Heizungstechnik, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften 2010
- [4] Hellfritsch S.; Koppe K.: Verbrennung und Dampferzeugung. Übungsaufgaben. Studienmaterial für das Universitäre Technische Fernstudium, Studiengang Maschinenbau. Dresden 2007
- [5] Schadstoffströme bei der Entsorgung von Holzasche, Reihe Abfall, Heft 76, Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden Württemberg 2013
- [6] Good J., Nussbaumer T., Delcarte J., Schenkel Y.: Determination of the Efficiencies of Automatic Biomass Combustion Plants, International Energy agency IEA Bioenergy Task 32, 2006

Anhang A: Herleitung diverser Berechnungen

Berechnung des exergetischen Nutzungsgrades

Für die Berechnung des exergetischen Nutzungsgrades werden die Temperaturniveaus des Fernwärme- oder Ferndampfnetzes berücksichtigt.

$$\eta_{th,ex} = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_{FW}} \quad T \text{ in Kelvin}$$

Die einzelnen thermischen exergetischen Nutzungsgrade werden anteilmässig aufsummiert. Um den Gesamt-Exergie-Nutzungsgrad zu berechnen wird noch der Stromnutzungsgrad dazu addiert.

$$\eta_{ex} = \eta_{th,ex} + \eta_{el}$$

Berechnungsbeispiel für die Energienettoeffizienz

Energieinput:	100 GWh/a
Stromproduktion brutto:	15 GWh/a
Eigenverbrauch Strom:	5 GWh/a
Stromproduktion netto:	10 GWh/a
Wärmeproduktion brutto:	70 GWh/a
Eigenverbrauch Wärme:	10 GWh/a
Wärmeproduktion netto:	60 GWh/a

Stromnutzungsgrad netto: 10%

Äquivalenzfaktor Strom: 2.6 (entspricht einem Stromnutzungsgrad von 38%, Mittelwert bei Kohlekraftwerken)

Wärmenutzungsgrad netto: 60%

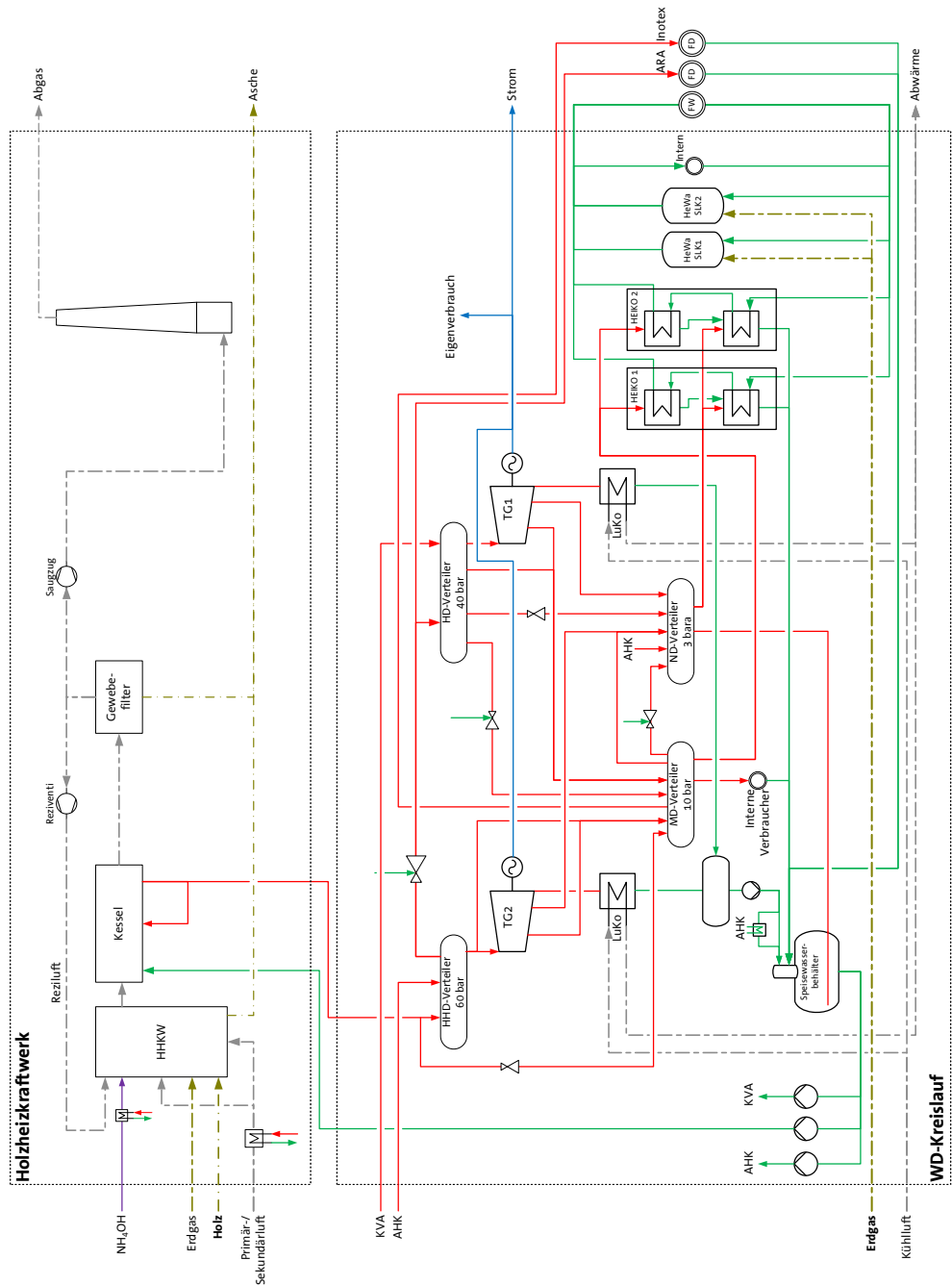
Äquivalenzfaktor Wärme: 1.1 (entspricht einem Wärmenutzungsgrad von 91% für Heizwerke)

Damit lässt sich die Energienettoeffizienz wie folgt berechnen:

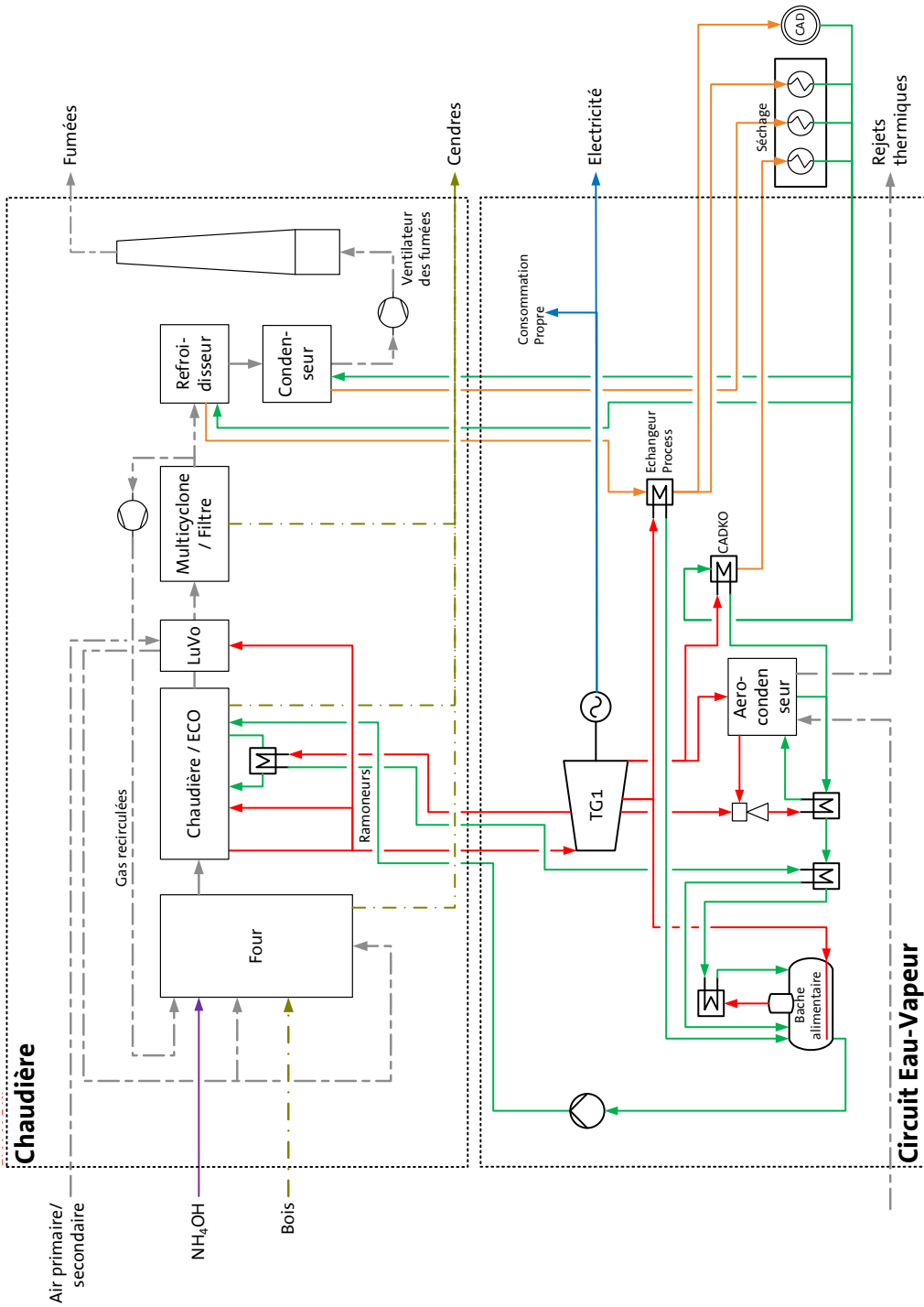
$$\text{Energienettoeffizienz ENE} = 0.1 \cdot 2.6 + 0.6 \cdot 1.1 = 0.92.$$

Anhang B: Anlagen-Schemata

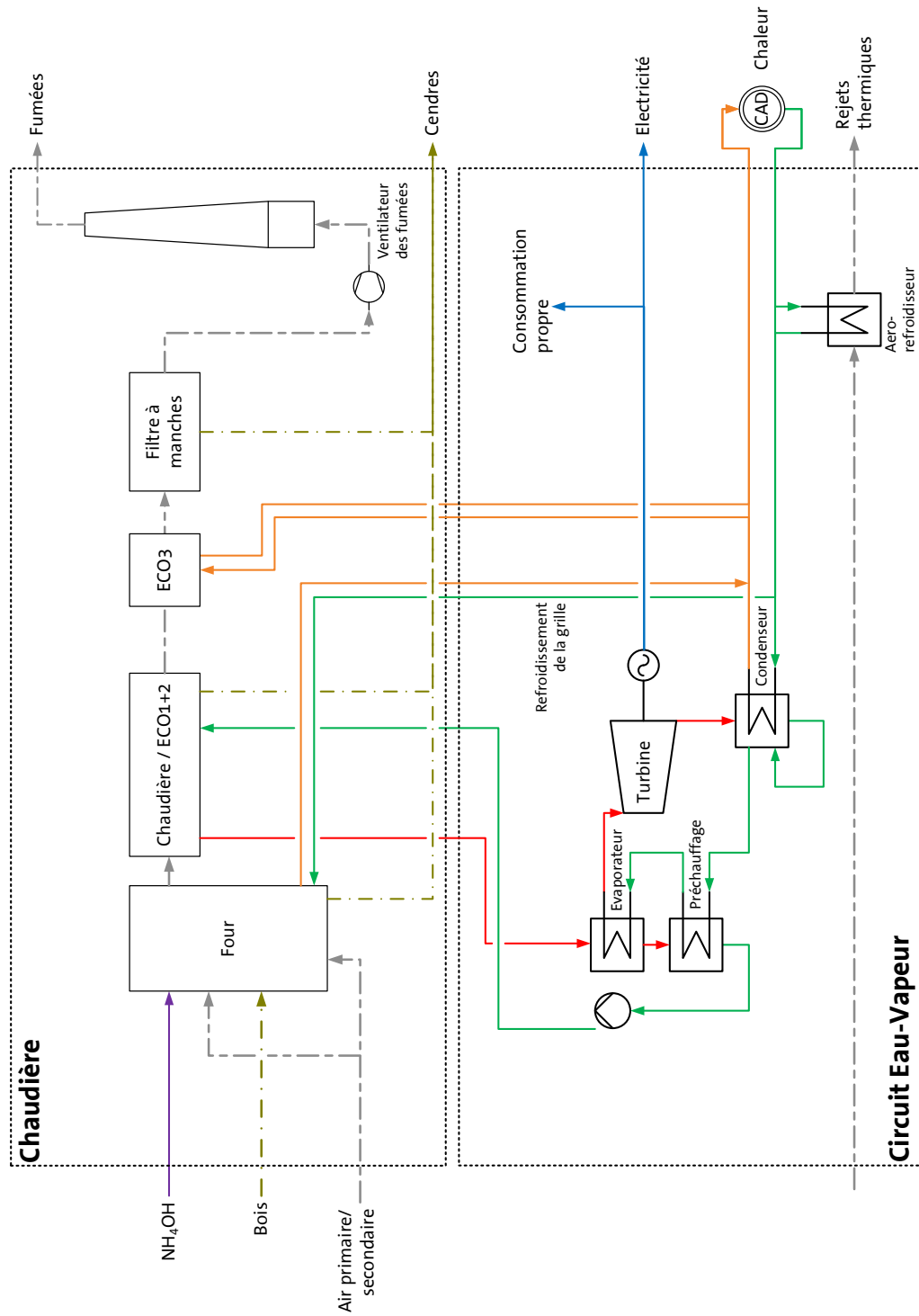
HHKW Bern



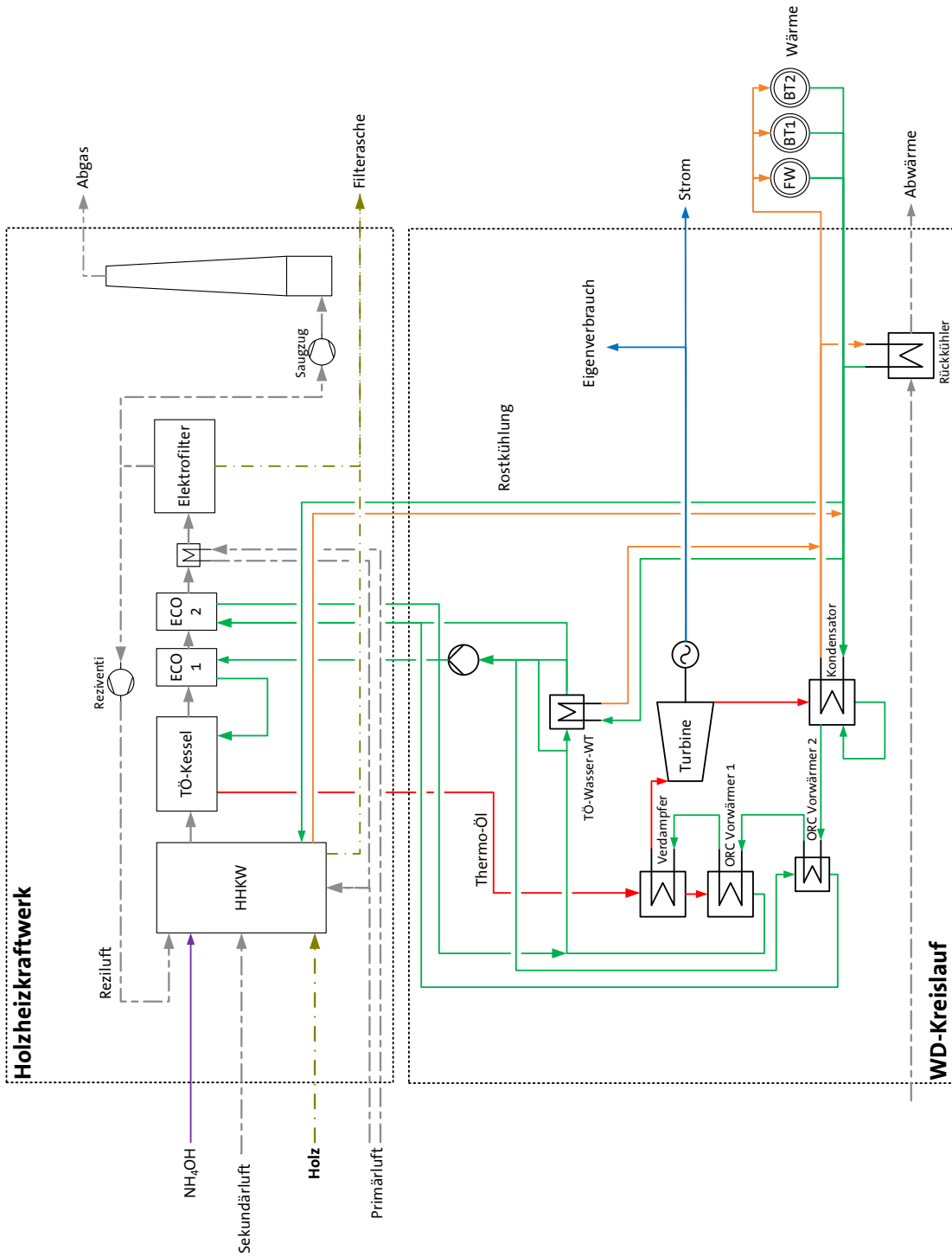
Enerbois



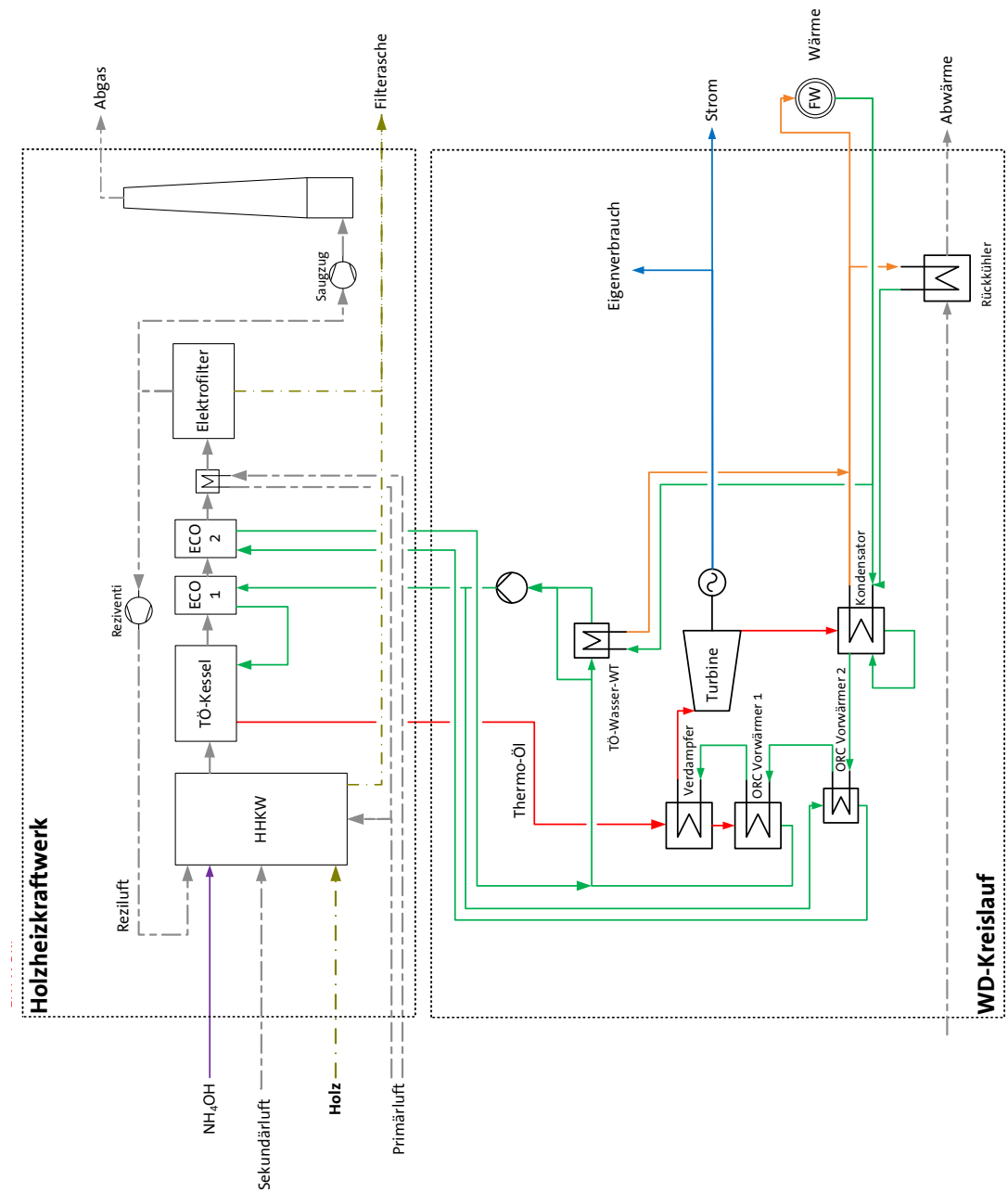
Cricad



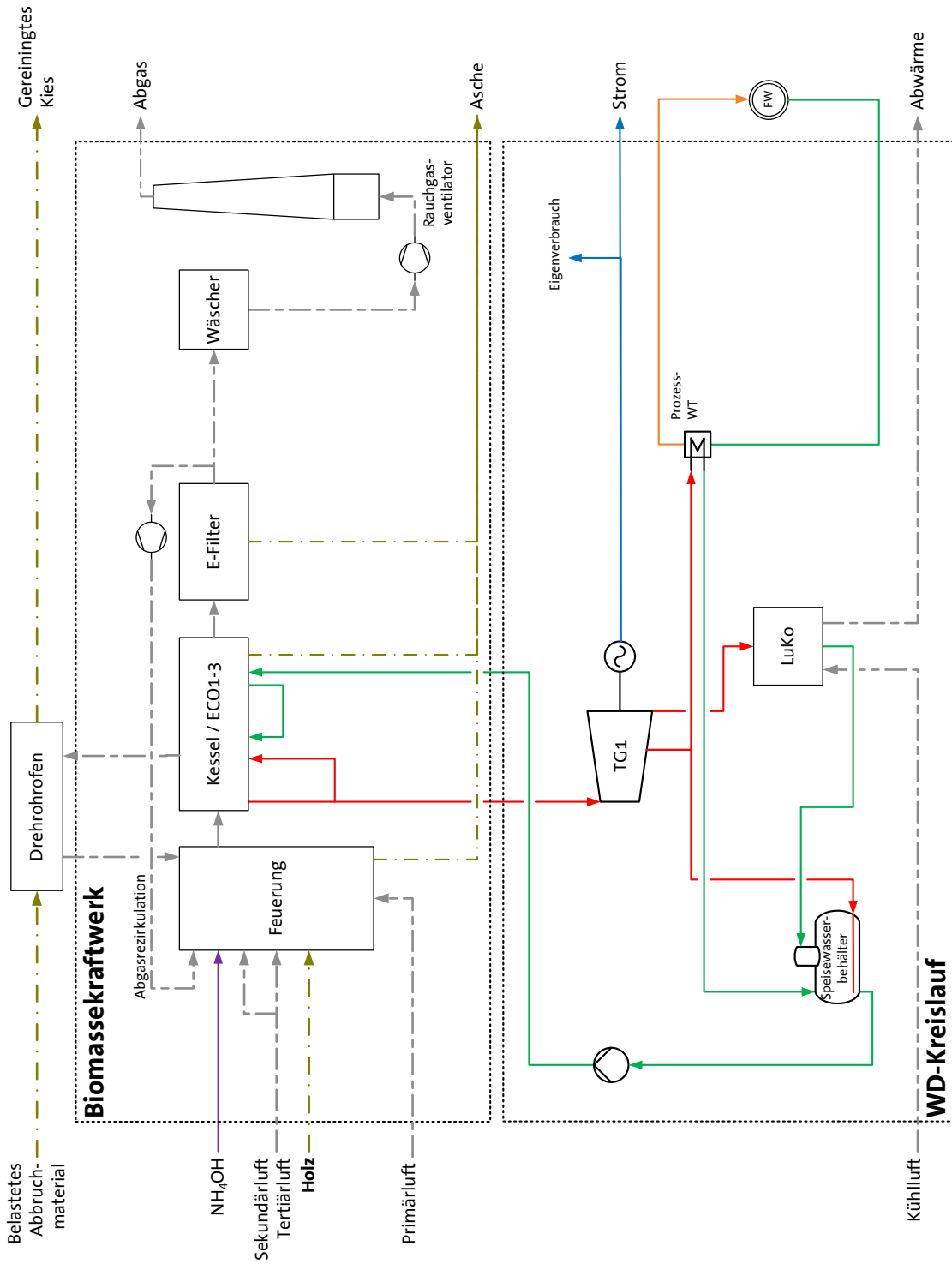
HKW Zündholz



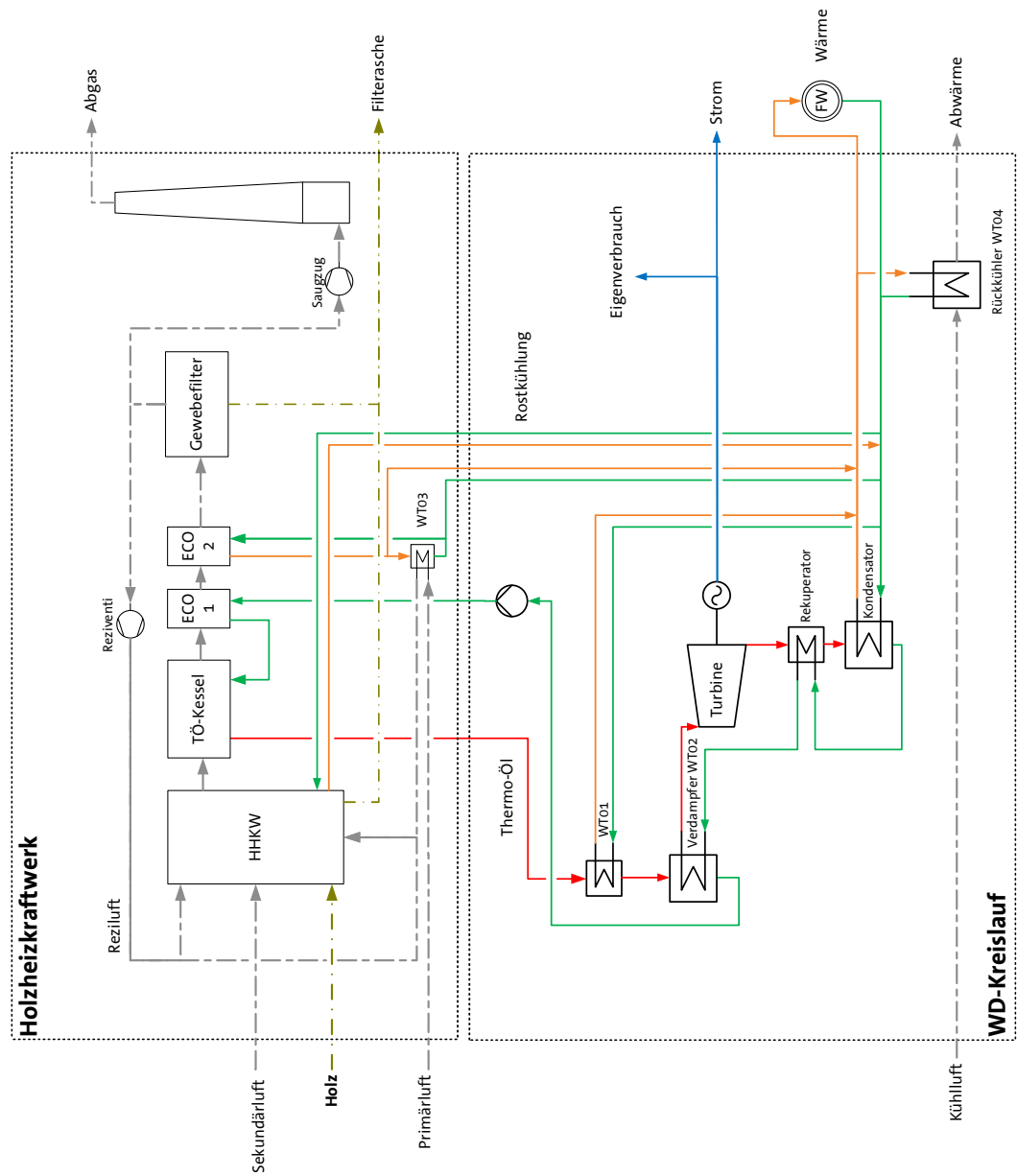
HEZT



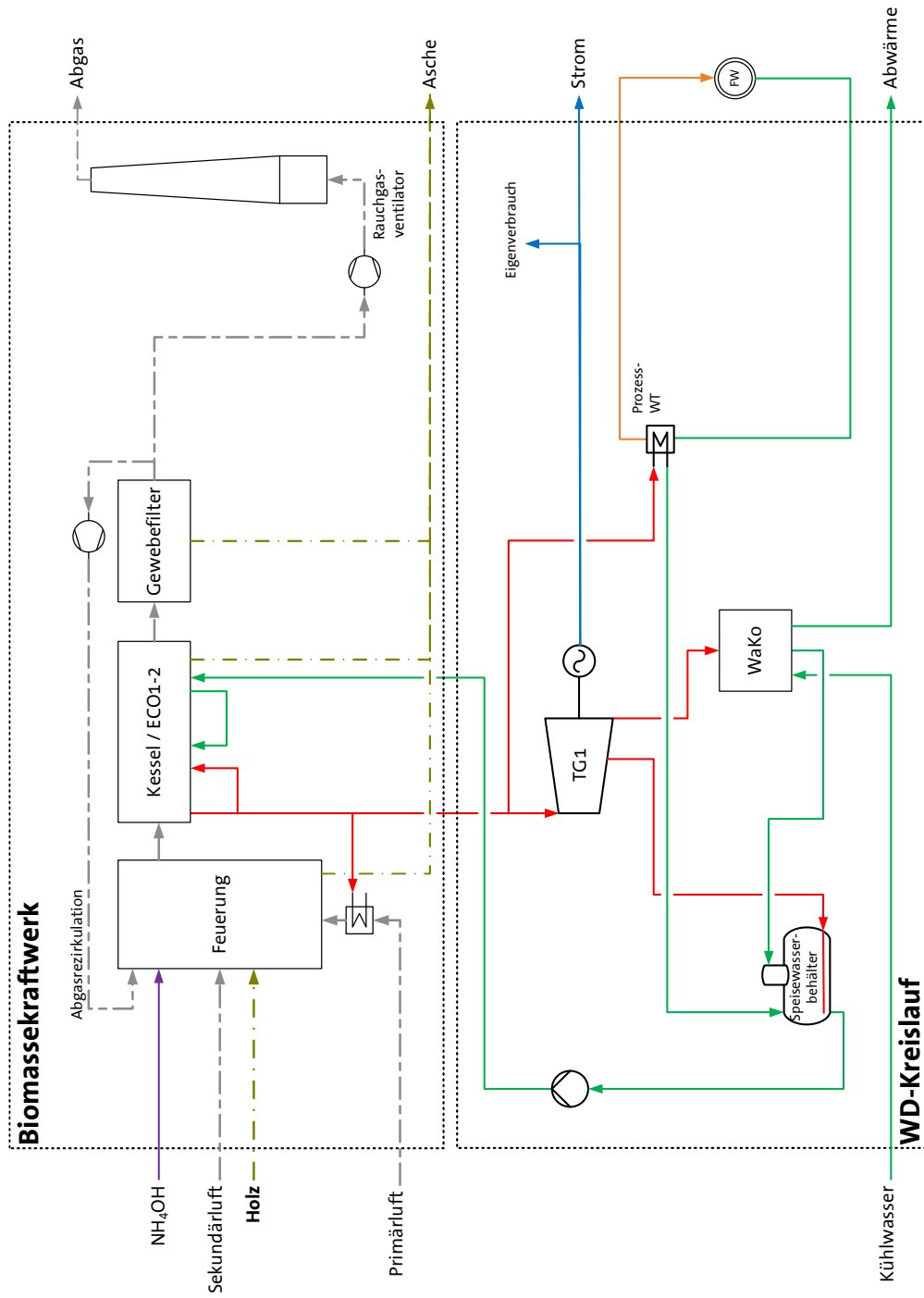
BMK Richi



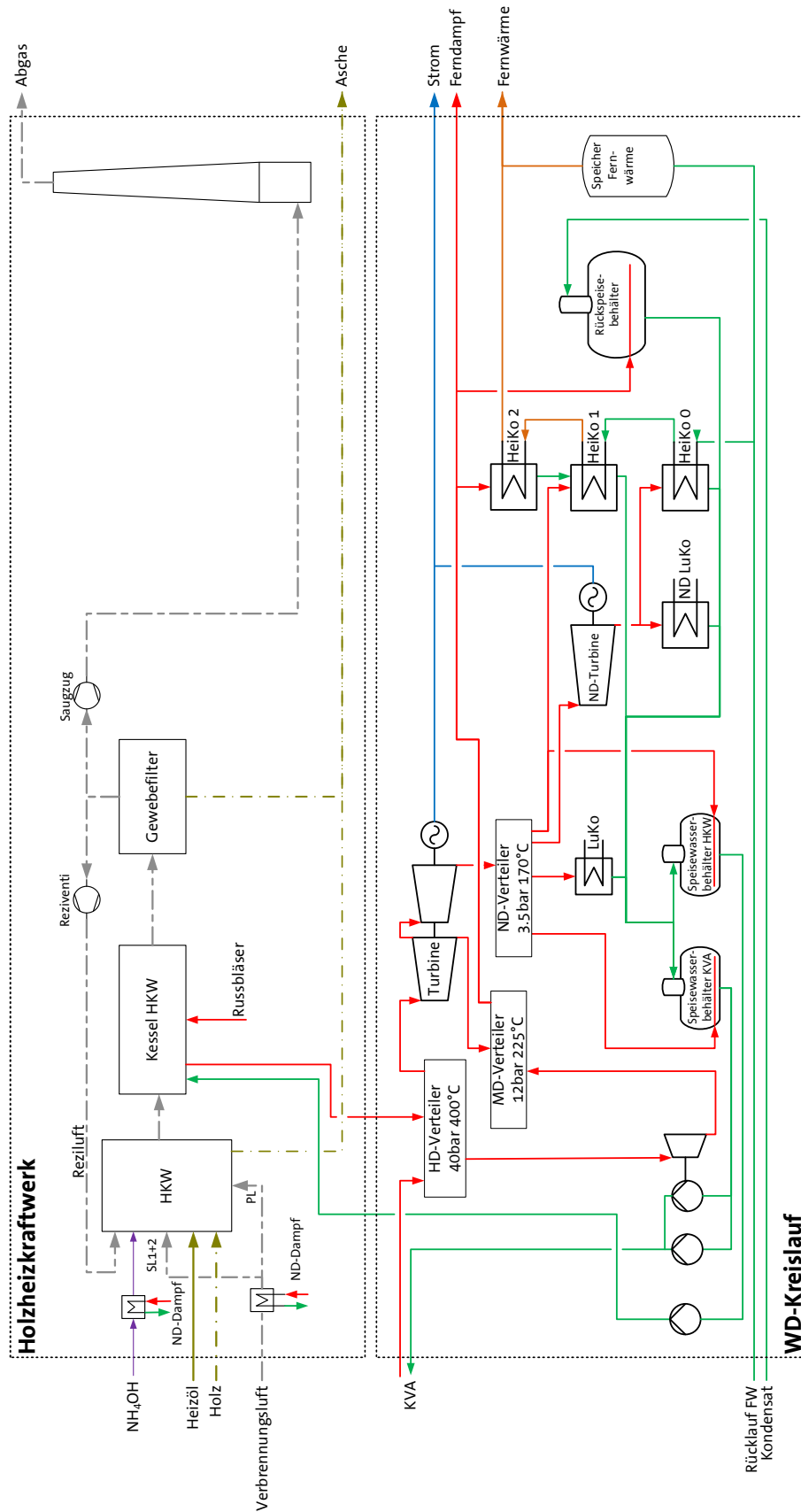
HHKW Ilanz



BMK Otelfingen

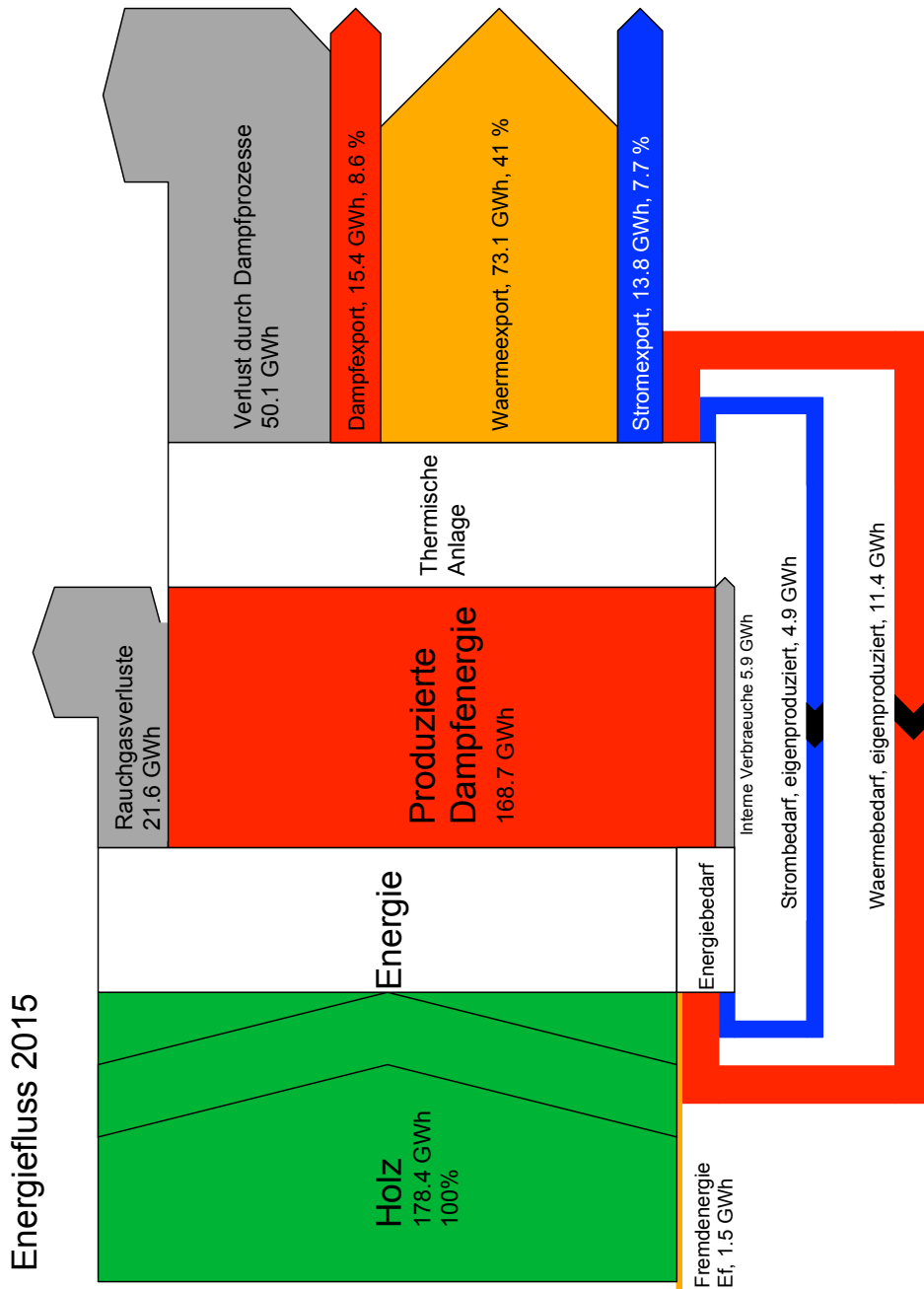


HHKW Basel

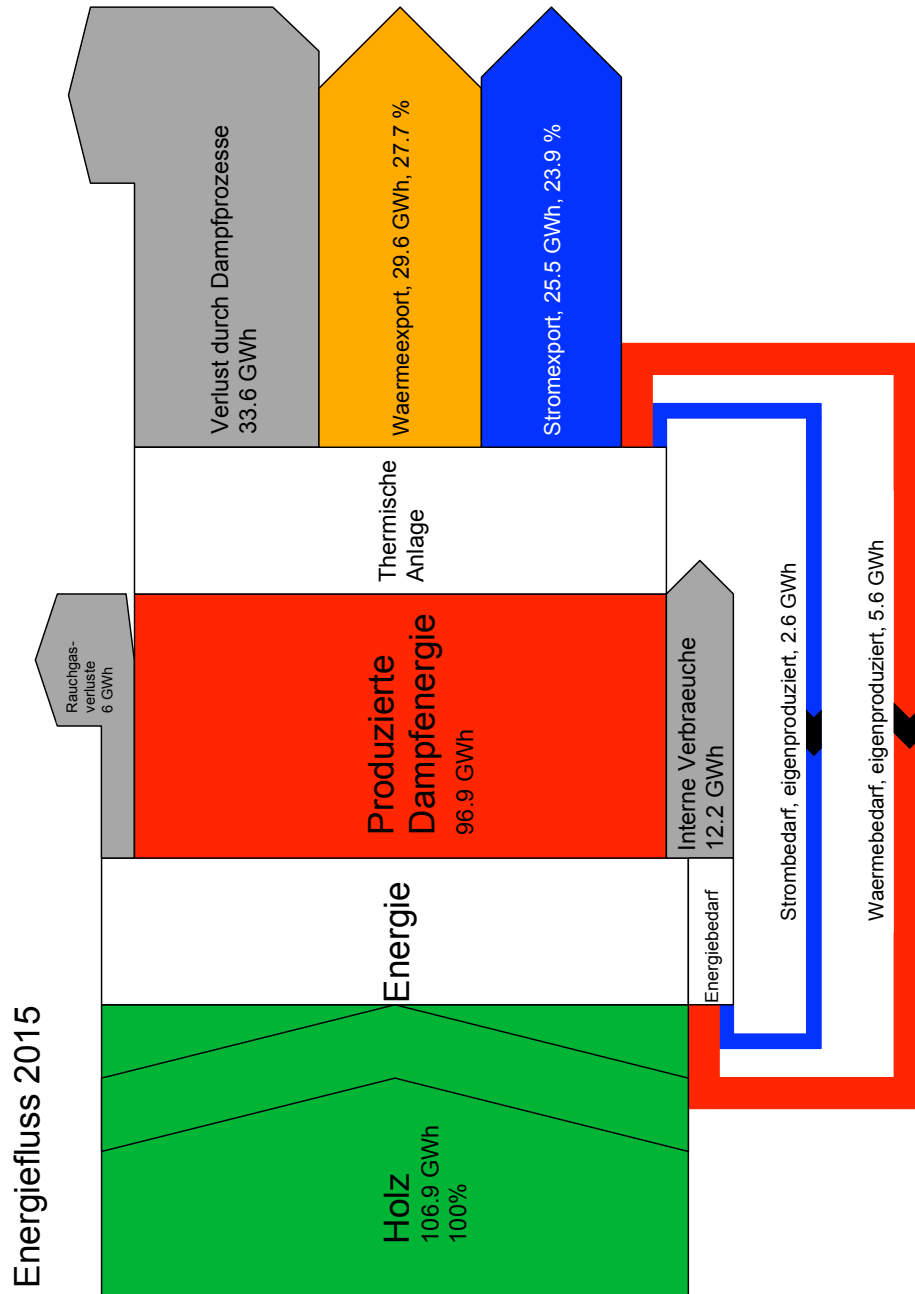


Anhang C: Sankey-Diagramme

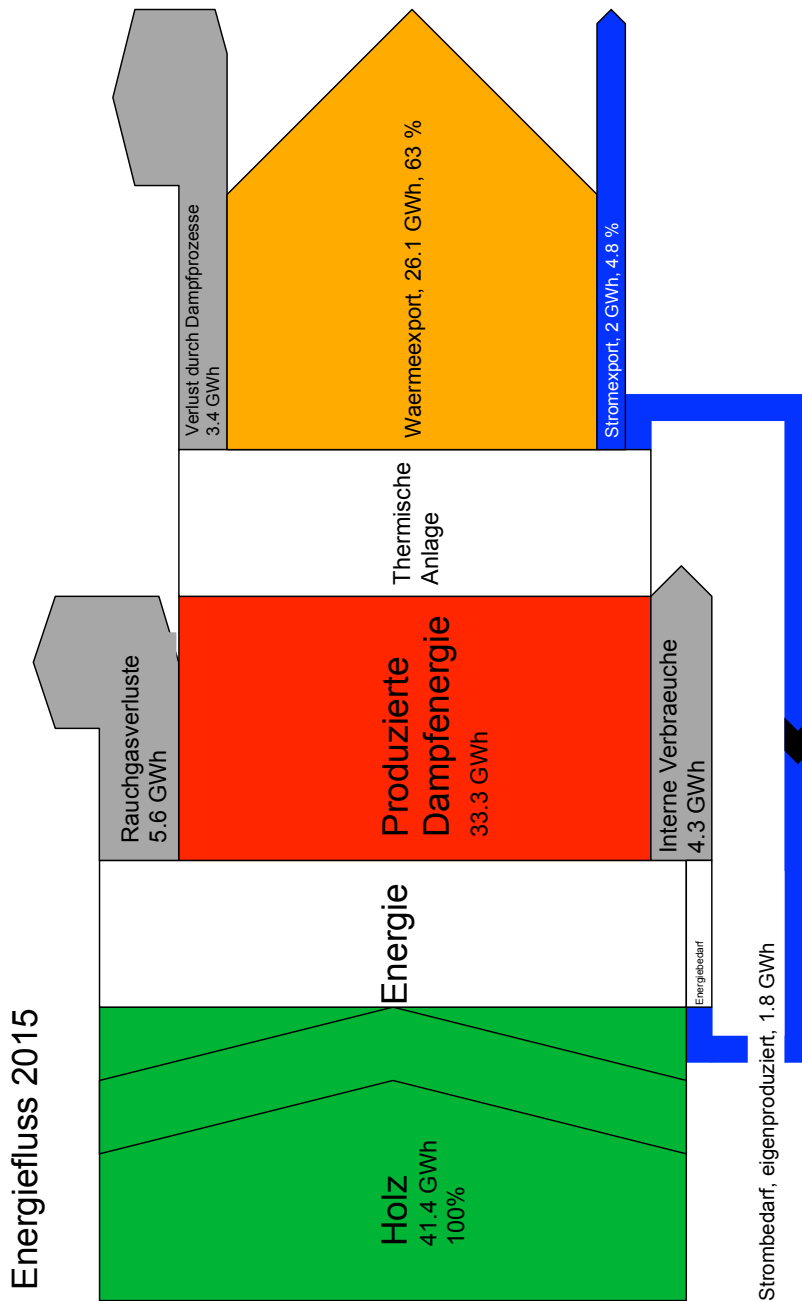
HHKW Bern



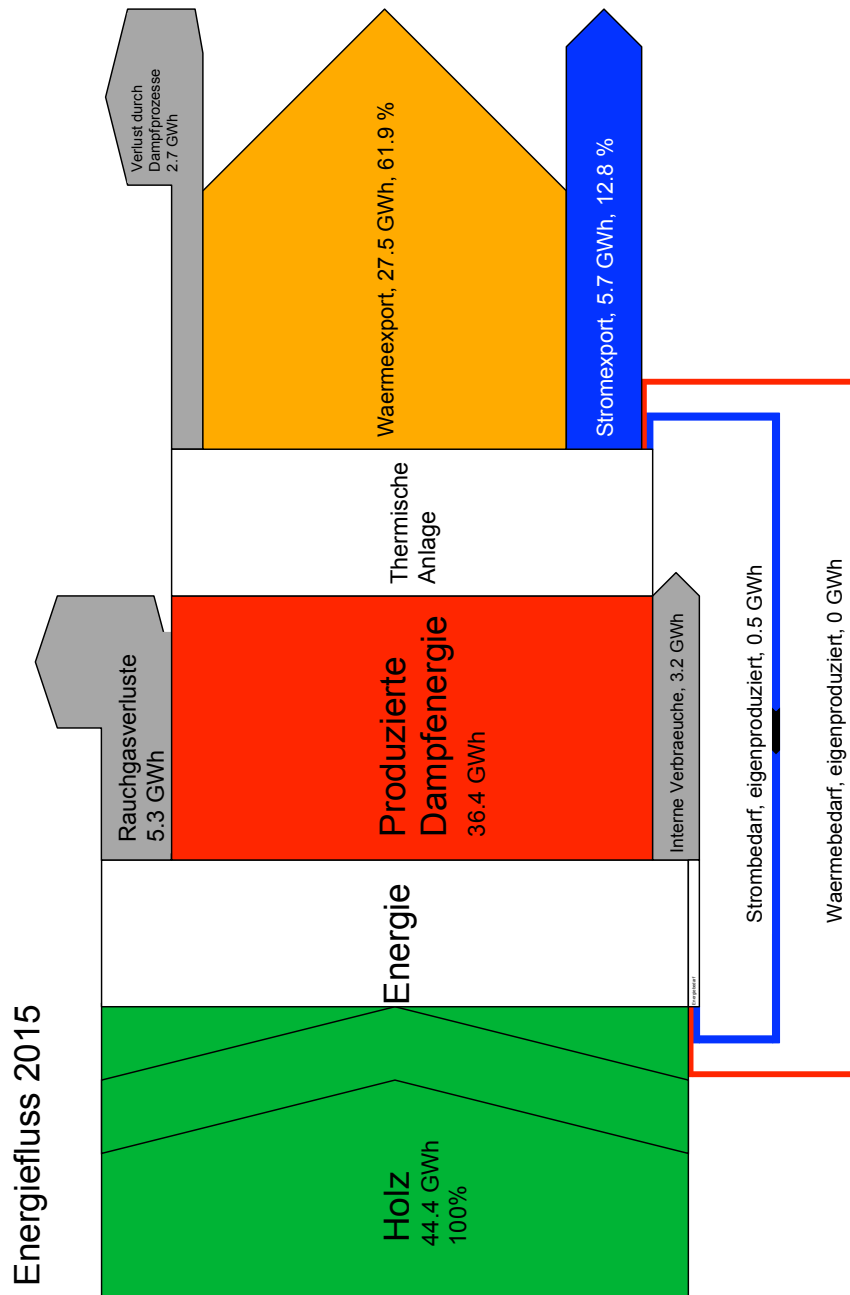
Enerbois



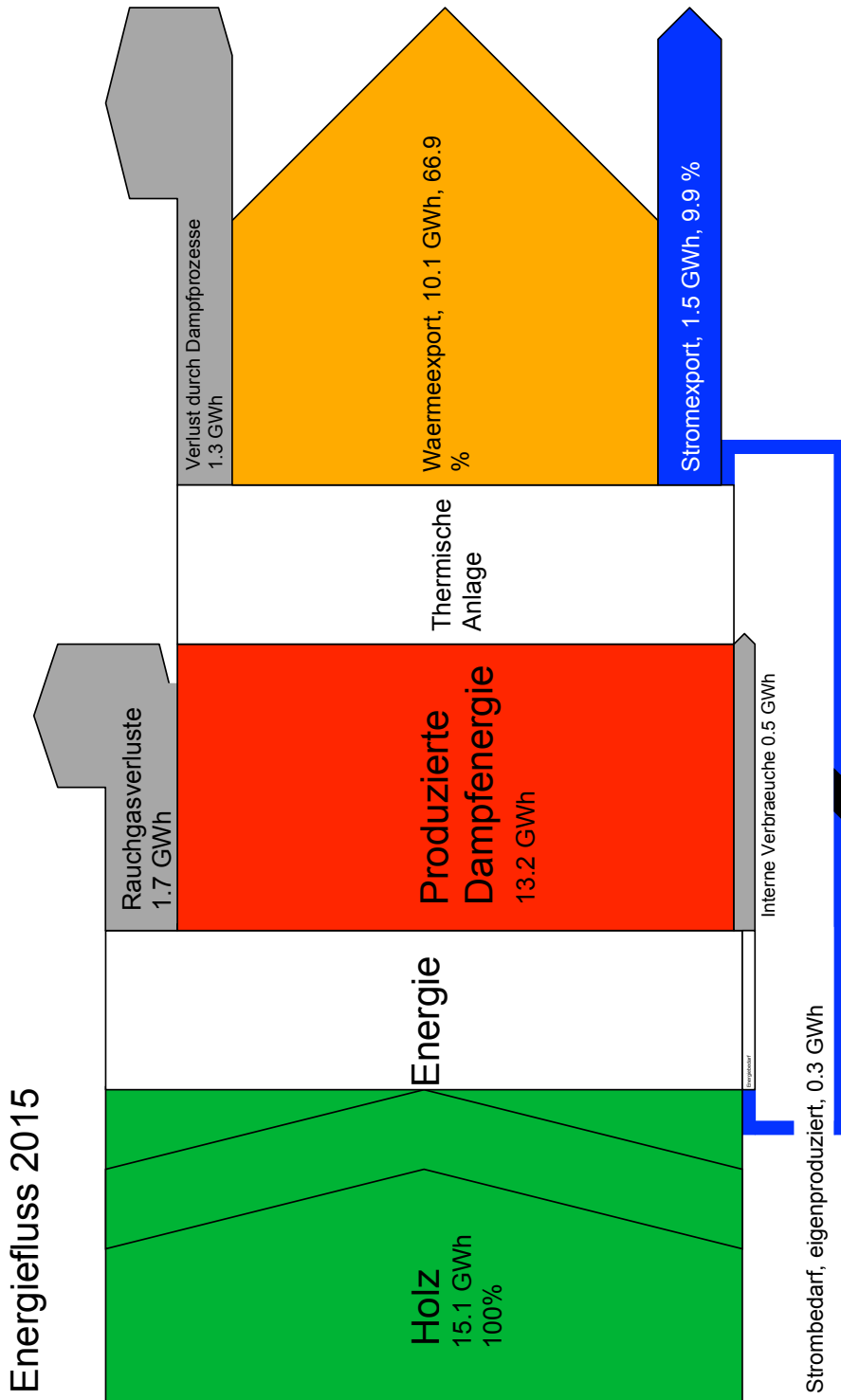
Cricad



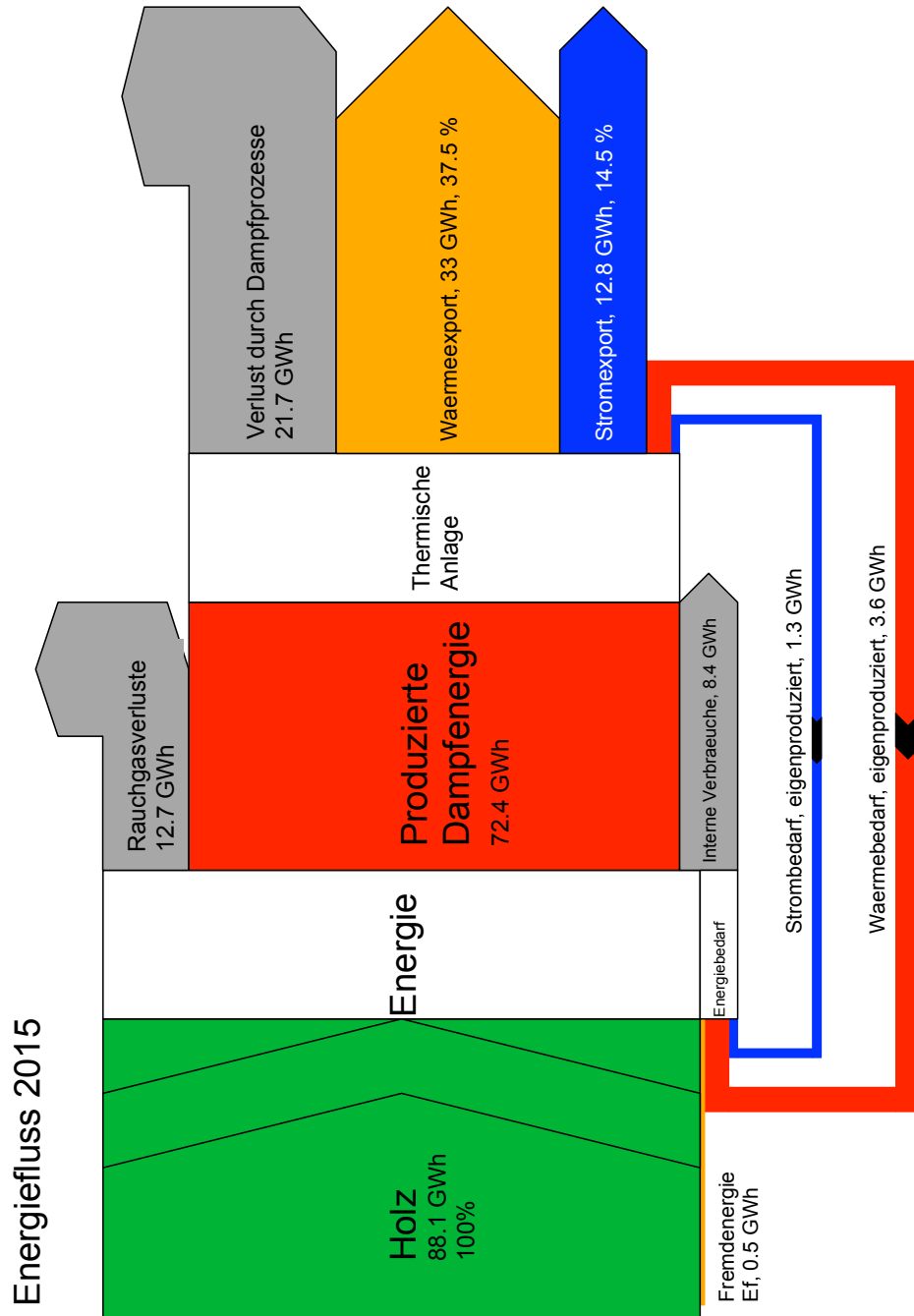
Zündholz



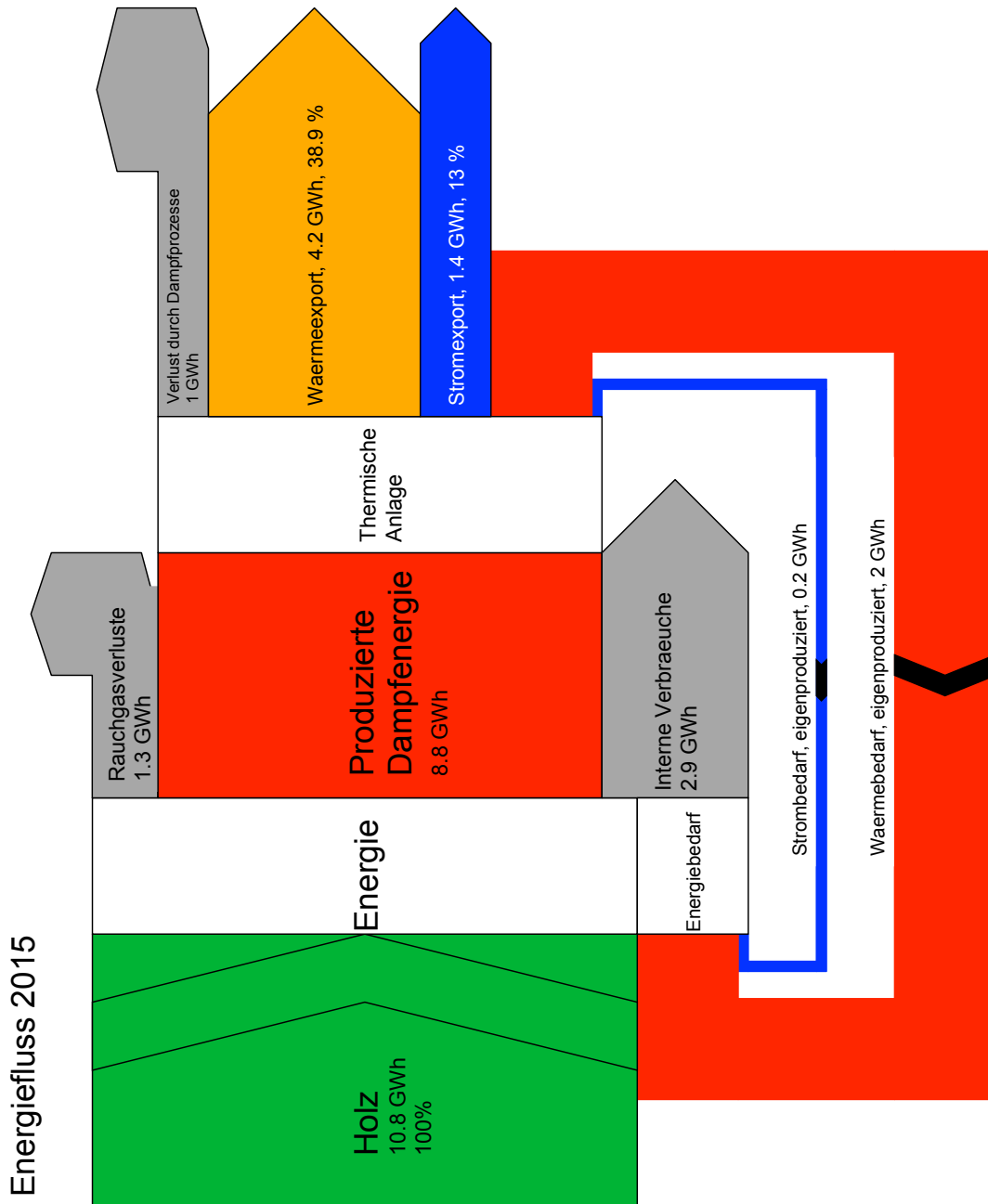
HEZT



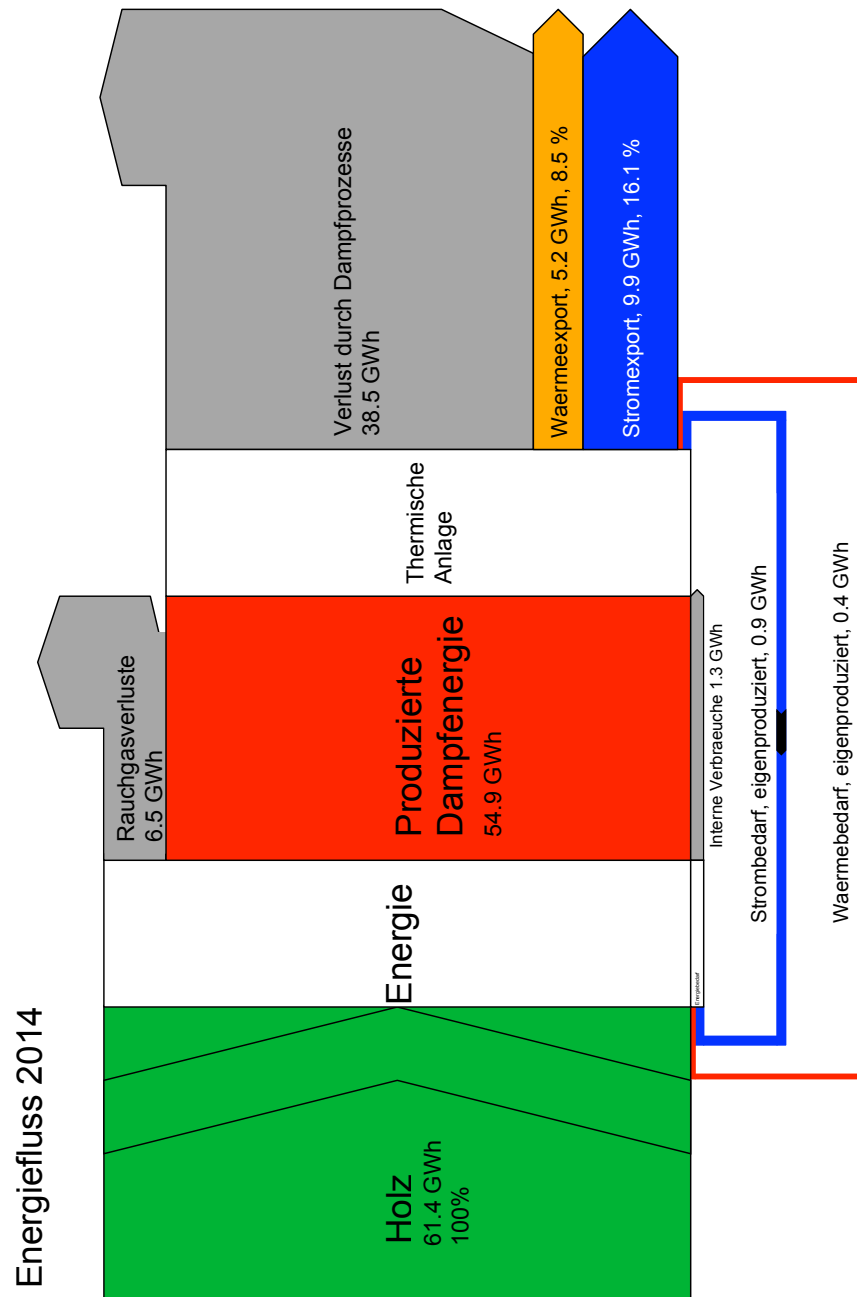
BMK Richi



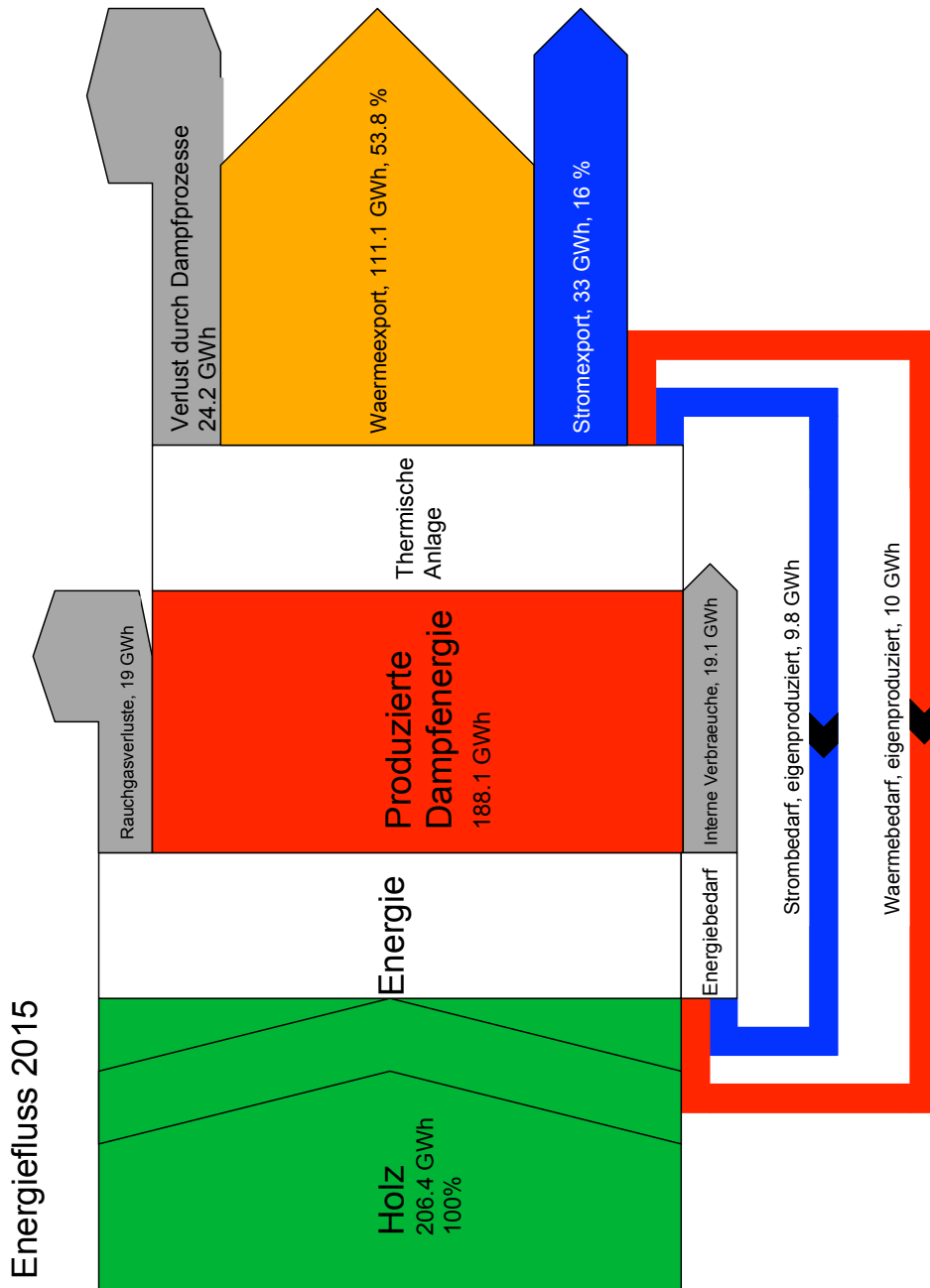
HHKW Ilanz



Otelfingen



HHKW Aubrugg



HHKW Basel

