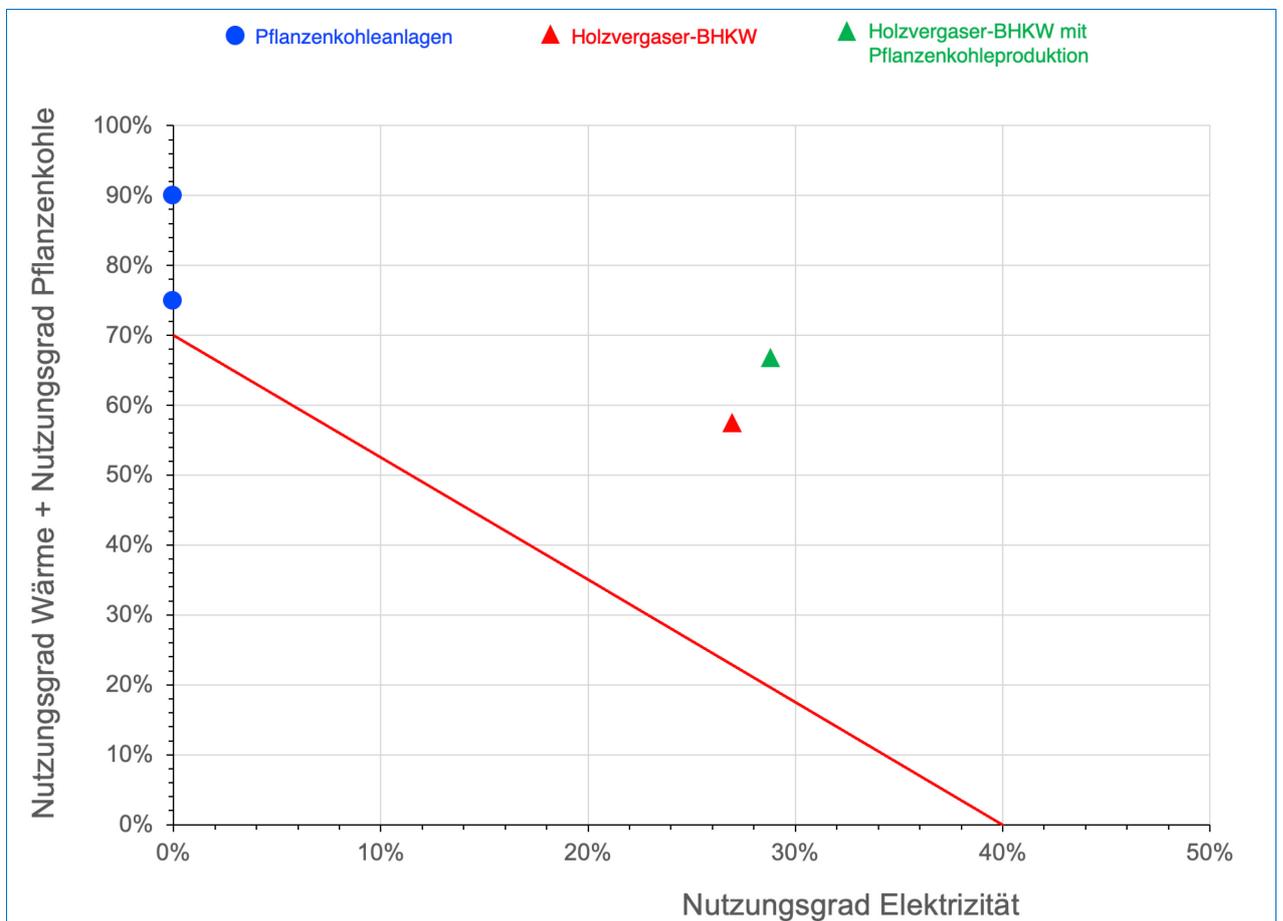




Bericht vom 28. Februar 2024
(V2 mit formalen Korrekturen vom 21. März 2024)

QM für Holzvergaser-BHKW und Pflanzkohleanlagen Teil 1 - Grundlagen

Thomas Nussbaumer





Datum: 28. Februar 2024

Ort: Zürich

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Verenum AG
CH-8006 Zürich
www.verenum.ch

Autor:

Thomas Nussbaumer, Verenum AG

Begleitung Daniel Binggeli (BfE)
Rainer Kegel (BAFU)
Andreas Keel (Holzenergie Schweiz)
Dominik Noger (Kanton St. Gallen und Cercl'Air)

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

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Zweck und Inhalt	4
2	Begriffe	5
3	Qualitätsforderungen (Q-Forderungen)	6
4	Anhang	12
4.1	Ausgangslage und Zielsetzung.....	12
4.2	Förderinstrumente für Energieholz in der Schweiz.....	14
4.3	Begriffe zu thermochemischen Verfahren und Produkten.....	15
4.4	Auswertung für vier Anlagenbeispiele	17
5	Literatur	21

1 Zweck und Inhalt

Die Wärmeversorgung der Gebäude verursacht in der Schweiz rund 36 % des Endenergieverbrauchs und wird zum überwiegenden Teil durch fossile Brennstoffe gedeckt [1]. Um die Ziele der Klimapolitik und der Energiestrategie 2050 zu erreichen, müssen die fossilen Brennstoffe durch erneuerbare ersetzt werden ([2], [3]). Als Massnahme dazu fördern der Bund und die Kantone unter anderem den Einsatz von Holzheizungen, die Realisierung von Fernwärmenetzen und den Bau von Anlagen zur Stromproduktion aus Biomasse in Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK). Um das Fachwissen und die zur Umsetzung notwendigen Fachleute zur Realisierung von mit Energieholz betriebenen Wärmezentralen bereit zu stellen, wurden vom Bund in den letzten dreissig Jahren die Aus- und Weiterbildung von Fachleuten sowie die Entwicklung eines Systems zum Qualitätsmanagement (QM) bei automatischen Holzheizungen unterstützt. Das System zur Qualitätssicherung ist unter dem Namen QM Holzheizwerke® [4] in der Schweiz etabliert und kommt daneben in Deutschland, Österreich und Italien zur Anwendung. QM Holzheizwerke® deckt das Vorgehen zur Planung und Realisierung von Heizzentralen mit automatischen Holzheizungen mit Leistungen über 70 kW ab und ist in einem Planungshandbuch beschrieben [5], das durch weitere Hilfsmittel ergänzt wird.

Nebst Holzheizwerken wurden in den letzten Jahren auch eine begrenzte Anzahl mit Holzvergasung und Gasnutzung zur Wärme-Kraft-Kopplung in Blockheizkraftwerken (Holzvergaser-BHKW) realisiert. Daneben führte das zunehmende Interesse an Pflanzenkohle auch zur Realisierung einiger Anlagen zur Produktion von Pflanzenkohle. Da auch Holzvergaser-BHKW und Pflanzenkohleanlagen zum Teil Anspruch auf die im Anhang 4.2 beschriebenen Fördermöglichkeiten haben und gleichzeitig erst wenig Erfahrungen zu deren Einsatz besteht, wird in der vorliegenden Arbeit ein Vorschlag zum Qualitätsmanagement für diese Anlagenkategorien erarbeitet.

Das vorliegende Dokument beschreibt die Grundlagen für das Qualitätsmanagement und dient als Basis für die im Teil 2 dokumentierte Umsetzung eines Qualitätsmanagements für Holzvergaser-BHKW und für Pflanzenkohleanlagen.

2 Begriffe

Zur Unterscheidung der Technologien werden folgende Begriffe definiert:

Holzvergaser: Bei Anlagen zur Holzvergasung steht die Herstellung eines Produktgases bzw. Holzgases und dessen Nutzung in einem Verbrennungsmotor zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) im Vordergrund. Erwünschte Produkte sind Strom und Nutzwärme, während flüssige und feste Produkte in der Regel unerwünscht sind oder als Nebenprodukt mit untergeordnetem Beitrag zur Wertschöpfung anfallen. Solche Anlagen werden als **Holzvergaser-Blockheizkraftwerke** (Holzvergaser-BHKW) bezeichnet.

Pflanzenkohleanlagen: Bei **Pflanzenkohleanlagen** steht die Herstellung von biogener Kohle (kurz Biokohle oder Englisch Biochar) im Vordergrund, die dank Einhaltung spezifischer Anforderungen wie dem European Biochar Certificate (EBC) [6] nicht nur für Grillzwecke, sondern zum Beispiel auch in der Landwirtschaft genutzt werden kann. Bei aus Holz hergestellter Biokohle handelt es sich somit um Holzkohle. Um diese von in der Schweiz überwiegend importierter Grillkohle zu unterscheiden, wird sie auch als Pflanzenkohle bezeichnet. Obwohl das Herstellungsverfahren auf einer Verkohlungs basiert, während bei einer Pyrolyse auch oder hauptsächlich ein flüssiges Produkt erzeugt wird, wird der Herstellungsprozess für Pflanzenkohle von der Branche auch als Pyrolyse bezeichnet. Das erwünschte Produkt ist jedoch Pflanzenkohle, während flüssige Produkte unerwünscht sind. Daneben fällt ein energiereiches Produktgas an, das in der Regel zur Reaktorbeheizung und zur Brennstofftrocknung sowie als Nutzwärme für weitere Verbraucher eingesetzt wird. Wenn das bei der Pflanzenkohleproduktion anfallende Produktgas in einem BHKW genutzt wird, fallen Pflanzenkohle, Elektrizität und potenziell auch Nutzwärme als Produkte an. Solche Anlagen werden im vorliegenden Dokument auch als **Pflanzenkohleanlage mit Stromproduktion** oder als **Pflanzenkohle-BHKW** oder als **Holzvergaser-BHKW mit Pflanzenkohleproduktion** bezeichnet. In solchen Anlagen kann der Energieinhalt der Pflanzenkohle denjenigen der Elektrizität übersteigen oder umgekehrt.

Die behandelten Verfahren wandeln somit Holz oder andere Biomasse in zwei oder drei Produktströme an Nutzwärme, Elektrizität und Pflanzenkohle um. Die Unterscheidung zwischen den Verfahren der Verkohlungs, Pyrolyse und Vergasung ist fließend und die Produktverteilung der entsprechenden Anlagen kann durch Veränderung der Betriebsparameter (insbesondere des Luftüberschusses und der Reaktortemperatur) variieren.

Da zum Einsatz der beschriebenen Anlagen sowie dem Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) und der Verwendung von Pflanzenkohle erst wenig Erfahrungen vorliegen, wurden im Jahr 2021 die rechtlichen Fragen zum Umgang mit Pflanzenkohle in einem Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) zusammengestellt (Maurer, [7]) und im Jahr 2022 die Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der LRV im Auftrag von drei Kantonen erarbeitet (Nussbaumer et al, [8] und Lauber et al, [9]). Im Anschluss daran wurde im Jahr 2023 vom Bundesamt für Umwelt zudem ein Faktenblatt zur Verwendung von Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft herausgegeben (Schwilch et al, [10]). Die in [7] bis [10] beschriebenen Grundlagen dienen als Basis zur Bewertung von Anlagen zur Holzvergasung und zur Pflanzenkohleproduktion. Die vorgeschlagenen Qualitätsforderungen stützen

sich zudem auf die Anforderungen des Bundes für Investitionsbeiträge für Biomasseanlagen [11] sowie die Effizienzkriterien des Energiegesetzes (EnG, [12]) und der Energieförderungsverordnung (EnFV, [13]). Für den Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) wird zudem auf die im Jahr 2024 erschienene Empfehlung Nr. 31r des Cercl'Air verwiesen [14].

Auf dieser Basis wird für Holzvergaser-BHKW mit und ohne Pflanzenkohleproduktion und für Pflanzenkohleanlagen mit und ohne Elektrizitätsproduktion die Einhaltung der nachfolgend beschriebenen Anforderungen als Basis zur Qualitätskontrolle vorgeschlagen.

3 Qualitätsforderungen (Q-Forderungen)

Q-Forderung 1: Energetische Anforderungen

In der Energieförderungsverordnung (EnFV, [13]) für Dampfkraftanlagen (EnFV 2.2.3) wird eine Anforderung an den Nutzungsgrad zur Produktion von Wärme und Elektrizität nach Bild 1 verlangt.

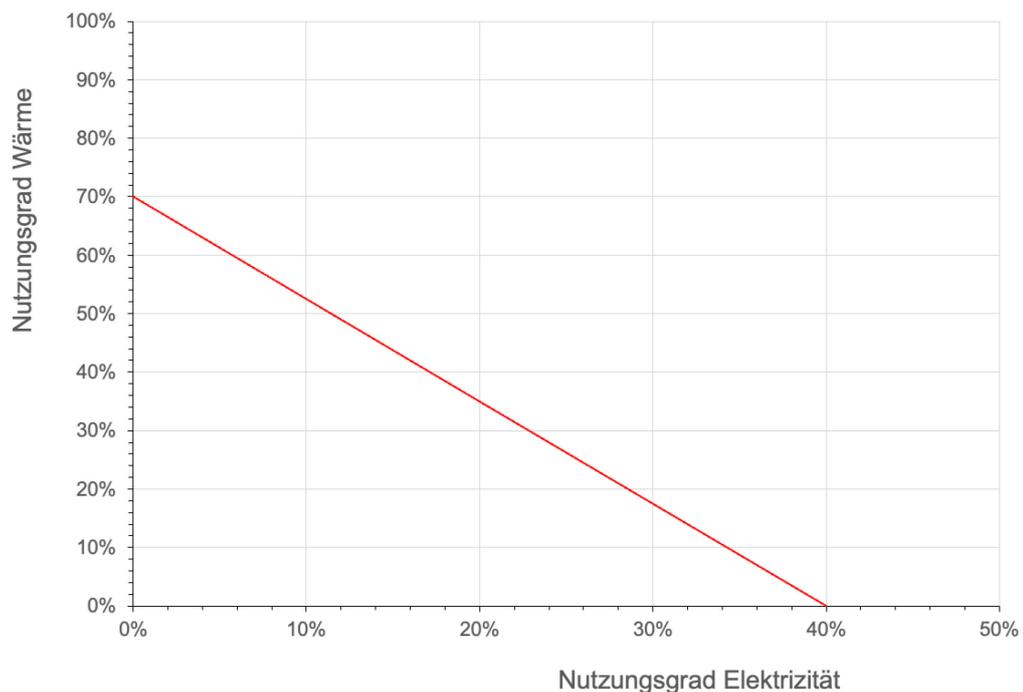


Bild 1 Mindestanforderung an den Nutzungsgrad an Wärme und Elektrizität nach Energieförderungsverordnung für Dampfkraftanlagen (EnFV 2.2.3, [13]).

Die Anforderung bezieht sich auf die **Brutto-Nutzungsgrade** ohne Berücksichtigung des Eigenverbrauchs an Wärme und Strom.

Als Beurteilungsperiode dient **ein Kalenderjahr**. Die hier definierten Nutzungsgrade können somit auch als Jahresnutzungsgrade bezeichnet werden.

Bild 1 entspricht damit folgender Forderung, die auch für **Holzvergaser-BHKW** vorgeschlagen wird:

Brutto-Nutzungsgrad Wärme + 1.75 Brutto-Nutzungsgrad Elektrizität \geq 70 %

Die Bestimmung der Brutto-Nutzungsgrade ohne Berücksichtigung des Eigenverbrauchs an Wärme und Elektrizität entspricht einer Bilanzierung anhand der Bilanzgrenze 1 in Bild 3. Dabei gilt:

Brutto-Nutzungsgrad Wärme = Brutto-Nutzwärme dividiert durch zugeführte Energie

Brutto-Nutzungsgrad Elektrizität = Brutto-Stromproduktion dividiert durch zugeführte Energie

Zugeführte Energie = dem thermischen Konversionsreaktor zugeführter Heizwert des Brennstoffs nach einer allfälligen Trocknung

Für Pflanzkohleanlagen wird vorgeschlagen, die Q-Forderung um den Energieinhalt der Pflanzkohle zu ergänzen und diesen wie Nutzwärme zu bewerten. Für Pflanzkohleanlagen ohne Stromproduktion ergibt sich damit folgende Forderung:

Brutto-Nutzungsgrad Wärme + Nutzungsgrad Pflanzkohle \geq 70 %

Nutzungsgrad Pflanzkohle = Heizwert der Pflanzkohle dividiert durch zugeführte Energie.

Für die Produktion von Pflanzkohle, Elektrizität und Wärme, also für **Pflanzkohle-BHKW** oder **Holzvergaser-BHKW mit Pflanzkohleproduktion**, gilt nach Bild 2 folgende Q-Forderung:

Brutto-Nutzungsgrad Wärme + Nutzungsgrad Pflanzkohle
+ 1.75 Brutto-Nutzungsgrad Elektrizität \geq 70 %

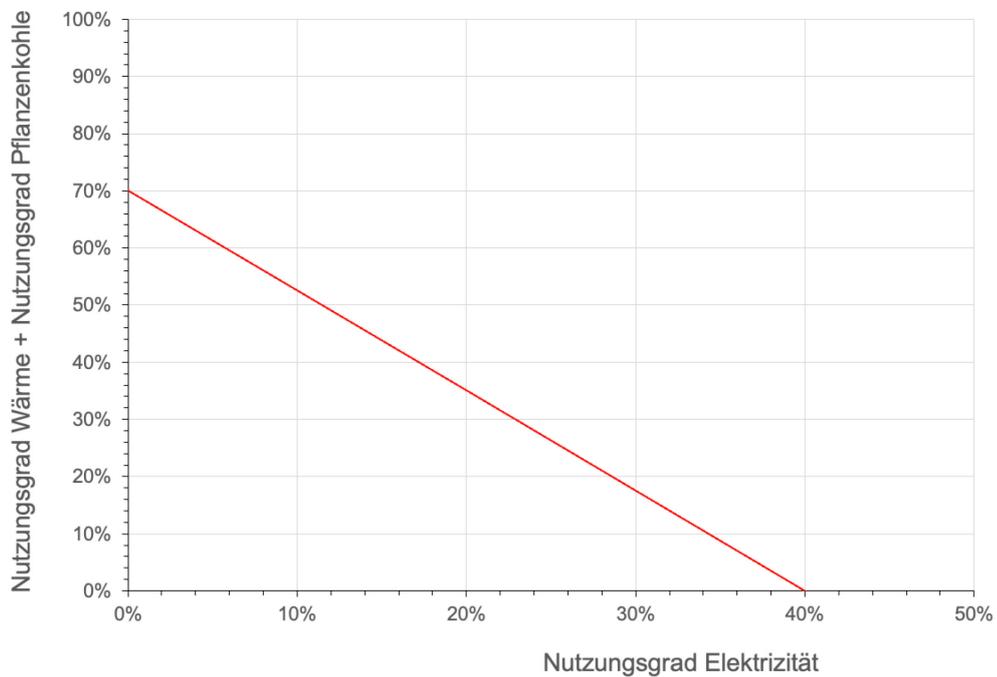


Bild 2 Vorschlag für Mindestanforderung an den Nutzungsgrad zur Produktion von Wärme und Pflanzenkohle in Pflanzenkohleanlagen oder von Wärme und Elektrizität in Holzvergaser-BHKW oder von Wärme, Pflanzenkohle und Elektrizität in Pflanzenkohle-BHKW bzw. Holzvergaser-BHKW mit Pflanzenkohleproduktion.

Im Anhang ist die Kontrolle der Q-Forderung für vier typische Anlagen beschrieben. Diese zeigt, dass im Falle einer vollständigen Nutzung der Wärme deutlich höhere Gesamtwerte als 70 % erzielt werden können. Zur Interpretation der nach Q-Forderung ermittelten Gesamtwerte ist zu beachten, dass es sich im Fall einer Elektrizitätsproduktion nicht um einen Gesamtnutzungsgrad handelt, weil die Elektrizität mit dem Faktor 1.75 gewichtet wird und der Gesamtwert somit Werte zwischen 0 und 175 % aufweisen kann. Wenn keine Elektrizität produziert wird, kann der Wert dagegen als Gesamtnutzungsgrad interpretiert und quantitativ mit dem Jahresnutzungsgrad einer Heizanlage verglichen werden. QM Holzheizwerke® empfiehlt für Wärme erzeugungsanlagen mit Holz einen Jahresnutzungsgrad von mindestens 85 %. Dies zeigt, dass die Q-Forderung nach einem Nutzungsgrad von mindestens 70 % für Pflanzenkohleanlagen einen Zusatzaufwand für die Pflanzenkohleherstellung berücksichtigt.

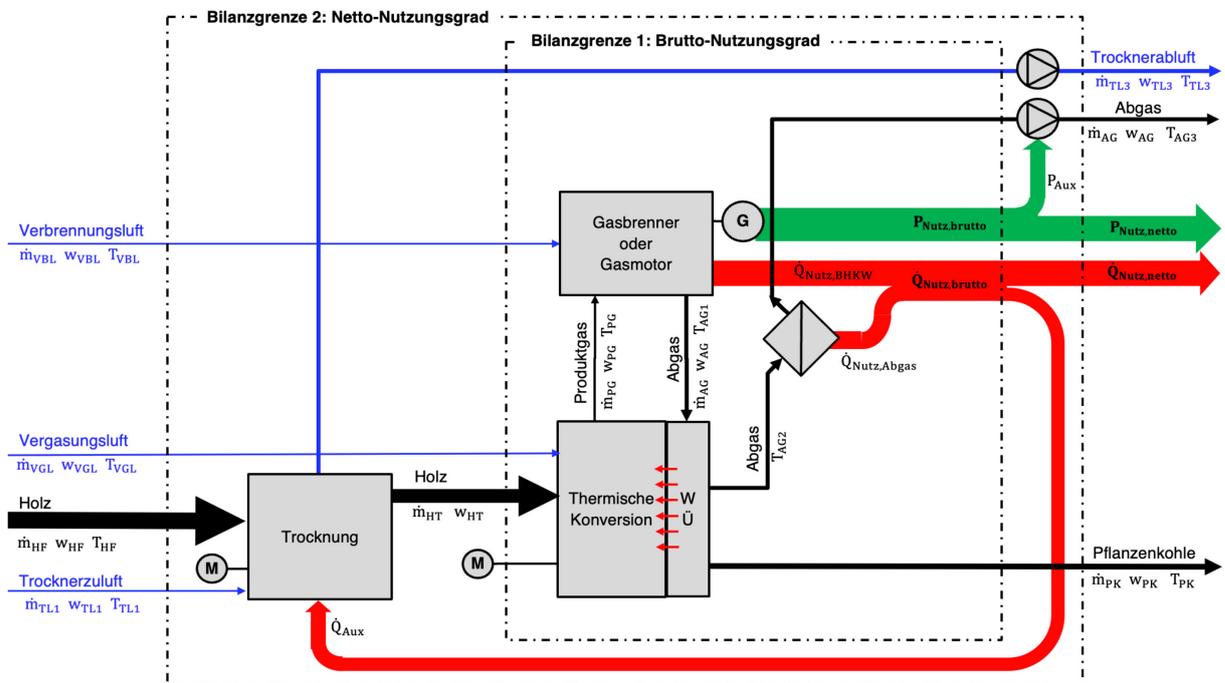


Bild 3 Verfahrensfliessbild zur Beschreibung von Pflanzkohleanlagen, Holzvergaser-BHKW oder Pflanzkohle-BHKW bzw. Holzvergaser-BHKW mit Pflanzkohleproduktion. WÜ = Wärmeübertragung.
 Anmerkungen:
 - Für ein reines Holzvergaser-BHKW wird der Produktstrom an Pflanzkohle gleich null.
 - Für eine Pflanzkohleanlage ohne BHKW wird die Produktion an Elektrizität gleich null.
 - Die Komponente "Gasbrenner" umfasst eine Brennkammer zur Verbrennung des Produktgases mit Verbrennungsluft. Dies entspricht in der Regel nicht einem Gasbrenner nach LRV, Anhang 3.

Als Zusatzinformation können die Daten zum Eigenverbrauch an Wärme und Strom ausgewiesen und daraus **Netto-Nutzungsgrade** entsprechend der Bilanzgrenze 2 in Bild 3 wie folgt bestimmt werden:

Netto-Nutzungsgrad Wärme + Nutzungsgrad Pflanzkohle
 + 1.75 Netto-Nutzungsgrad Elektrizität $\geq 70 \%$

Angaben zum Netto-Gesamtnutzungsgrad sind optional und dienen zur Weiterentwicklung der Verfahren und der Qualitätssicherung und sind zu dokumentieren, sofern sie mit verhältnismässigem Aufwand erhoben werden können.

Nebst energetischen Anforderungen werden zur Qualitätssicherung folgende Empfehlungen zu Luftreinhaltung, Anlagenbetrieb, hydraulischer Einbindung und Kosten sowie bei Pflanzkohleanlagen zur Qualität der Pflanzkohle vorgeschlagen:

Q-Forderung 2: Luftreinhaltung

Für den Anlagenbetrieb wird die Einhaltung der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vorausgesetzt. Grundlage für die Beurteilung bildet die oben erwähnte CercI'Air-Empfehlung Nr. 31r [14]. Zur Kontrolle der Einhaltung der LRV wird als Teil der Qualitätsbegleitung eine Bestätigung der Abnahme der Anlage durch die Behörde mit dem Protokoll der Abnahmemessung verlangt.

Q-Forderung 3: Anlagenbetrieb, hydraulische Einbindung und Kosten

Qualitätsanforderungen zu diesen Eigenschaften erfolgen in Anlehnung an die Empfehlungen nach QM Holzheizwerke [4]. Diese sind falls notwendig durch zusätzliche Punkte zu ergänzen bzw. nach Vorliegen erster Erfahrungen sofern möglich zu vereinfachen. Voraussichtlich anwendbare Vereinfachungen umfassen insbesondere folgende Anforderungen:

1. Auf eine Erfassung der Anzahl Anfahrvorgänge, wie sie zur Kontrolle der von CercI'Air [17], Kantonen und Bundesamt für Umwelt (BAFU) [18] für automatische Holzheizungen vorgeschlagenen Begrenzung der Anzahl Starts vorgeschlagen wird, wird verzichtet, wenn die Einhaltung durch Beschreibung des Betriebsregimes plausibel nachgewiesen werden kann.
2. Wenn nachgewiesen wird, dass auch bei variablem Wärmebedarf externer Verbraucher ein weitgehend kontinuierlicher Anlagenbetrieb sichergestellt werden kann, kann die minimale Wärmespeicherkapazität entsprechend angepasst werden.

Q-Forderung 4 im Fall von Pflanzenkohle: Pflanzenkohlequalität

Für den Betrieb von Pflanzenkohleanlagen wird ein Nachweis zum eingesetzten Rohstoff, der geplanten Nutzung der Pflanzenkohle und den dazu einzuhaltenden Anforderungen verlangt. Zusammen mit dem Nachweis zur Einhaltung der energetischen Anforderungen wird ein Nachweis zur Verwendung der Pflanzenkohle und Kontrolle der Pflanzenkohlequalität verlangt.

Im Falle einer Verwendung der Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft ist die Einhaltung der Richtlinien des BAFU-Faktenblatts zur Verwendung von Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft nachzuweisen [10].

Daneben sind die Empfehlungen von Maurer (2021) [7] zum rechtlichen Umgang mit Pflanzenkohle in der Schweiz zu berücksichtigen. Dies umfasst unter anderem die Einhaltung eines PAK-Gehalts von maximal 4 mg/kg nach Richtlinien der European Biochar Foundation [6] (Absatz 9 in [7]).¹ In Ergänzung dazu ist die Reaktortemperatur zu dokumentieren, sofern diese gemessen wird.²

¹ Nebst Absatz 9 sind mindestens folgende weiteren Einschränkungen nach Maurer (2021) zu berücksichtigen:

Absatz 82:

1. Verwendung von Pflanzenkohle als Bodenverbesserungsmittel; nur aus unbehandeltem Pflanzenmaterial oder solchem, das mit für die biologische Landwirtschaft zugelassenen Hilfsmitteln behandelt wurde.
→ Umsetzen im Düngerrecht (Düngerbuch-Verordnung (DüBV))
2. Qualitätsvorschrift mindestens 50% C-Gehalt; keine weiteren Vorschriften wie etwa zum H/C-Verhältnis, da abgedeckt durch PAK-Grenzwert.
→ 1 und 2: Umsetzen im Düngerrecht (DüBV)
3. Begrenzung des Schadstoffgehalts von Pflanzenkohle auf die geltenden Werte der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) für organische Dünger und Recyclingdünger (Werte nach Tabelle 3 in Maurer (2021)).
→ Umsetzen in ChemRRV und mit Punkt 1 hievor
4. Beschränkung der Anwendung von Pflanzenkohle auf den biologischen Landbau.
→ Umsetzen in ChemRRV und mit Punkt 1 hievor.

Absatz 95: Die maximal zulässige Menge an Pflanzenkohle, die über eine Dauer von 10 Jahren in den Boden ausgebracht werden darf, beträgt total 10 Tonnen pro Hektare.

Nach Absatz 96: Die Bewilligung der Zulassungsbehörde (BLW) für die Anmeldung von Pflanzenkohle zu treffende periodische Prüfpflicht zum PAK-Gehalt an repräsentativen Proben ist festzulegen (z.B. in den ersten zwei Jahren jede 10. Charge mit Lockerung des Kontrollregimes ab dem dritten Jahr, wenn die PAK-Grenzwert eingehalten werden) und ebenso das Reporting.

Nach Absatz 97: Das BLW sollte bei der erstmaligen Anmeldung und bei jeder Erneuerung (alle 10 Jahre) eine umfassende Analyse zu allen möglichen Schadstoffen sowie zum Gehalt an elementarem Kohlenstoff einfordern.

² Die Reaktortemperatur kann den PAK-Gehalt in Pflanzenkohle beeinflussen. Temperaturen von 500 °C und 600 °C führten zu niedrigeren PAK-Gehalten als Reaktortemperaturen um 300 °C (Maurer (2021)).

4 Anhang

4.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Die im Auftrag des Bundes erstellten Prognosen zur Umsetzung der Energiestrategie zeigen, dass das Ziel von Netto-Null CO₂-Emissionen selbst bei einer 100 %-igen Dekarbonisierung der Energieerzeugung nicht erreicht wird (z.B. [2]-[3]). Grund dafür sind anthropogene Quellen von Treibhausgasen aus anderen Bereichen, namentlich die Landwirtschaft, die Kehrlichtverbrennung und die Zementproduktion. Zur Erreichung des Netto-Null-Ziels sind deshalb zusätzlich Negativemissionstechnologien (NET) notwendig. Infrage kommen die Abscheidung und Endlagerung von CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS) aus dem Abgas von mit Biomasse betriebenen Anlagen (z.B. Holzkraftwerke oder Biogasanlagen), CCS aus der Umgebungsluft (Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS) sowie die Endlagerung von Pflanzenkohle aus dem nachhaltigen Anbau von Biomasse.

Als «Pflanzenkohle» (Englisch: Biochar) wird dabei aus Holz oder anderer Biomasse durch Verkohlung produzierter Kohlenstoff bezeichnet, der nicht als Grillkohle oder als Reduktionsmittel in der Eisenproduktion genutzt, sondern für andere Anwendungen hergestellt wird. Im Vordergrund stehen dabei unter anderem die Verwertung als Aktivkohle (was eine hohe Wertschöpfung ermöglicht), die Nutzung in der Landwirtschaft mit einer Endlagerung im Boden oder die Verwertung in der Zementindustrie. Bei all diesen Anwendungen wird ein höherer Preis als für Grillkohle angestrebt, der zum Teil auch eine Entschädigung als Kohlenstoffsénke umfassen kann. Als Ausgangsmaterial zur Produktion von Pflanzenkohle ist in der Schweiz bis anhin ausschliesslich unbehandeltes (naturbelassenes) Holz zugelassen.

CCS aus dem Abgas ist mit einem Energieaufwand verbunden, welcher den Netto-Anlagenwirkungsgrad reduziert, während CCS aus Umgebungsluft einen hohen Zusatzaufwand verursacht. Bei beiden Verfahren ist zudem der Transport zu den infrage kommenden Endlagerstätten (zum Beispiel in Island) mit zusätzlichem Energieaufwand verbunden. Im Vergleich dazu könnte eine Endlagerung von Pflanzenkohle in der Schweiz einen geringeren Aufwand und eine potenzielle Einsparung fossil produzierter Hilfsstoffe (zum Beispiel Dünger in der Landwirtschaft) ermöglichen [19]. Aus diesem Grund ist vor einigen Jahren ein Interesse an Anlagen zur Produktion von Pflanzenkohle entstanden und es wurden verschiedene Pilotanlagen realisiert (z.B. [20]-[22]). In der Zwischenzeit wird eine Verwendung von Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft allerdings durch die im BAFU-Faktenblatt zur Verwendung von Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft definierten Richtlinien stark eingeschränkt [10].

Daneben besteht in der Schweiz auch ein zunehmendes Interesse an WKK-Anlagen im Leistungsbe-
reich von Holzvergaser-BHKW (z.B. [23]-[24]). Grund dafür ist, dass diese Technologie einen ganz-
jährigen Einsatz mit einem hohen Anteil an Winterstrom ermöglicht und in einem Leistungsbereich zur
Verfügung steht, der für Industriebetriebe und Fernwärmenetze interessant ist, wo Dampfkraftanlagen
aus Kosten- und Leistungsgründen meist nicht infrage kommen.

Bei der bisherigen Realisierung von Holzvergaser-BHKW und Pflanzkohleanlagen in der Schweiz hat sich jedoch gezeigt, dass unter anderem folgende offenen Fragen bestehen:

1. Die Einteilung der Anlagen nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) war für Holzvergaser-BHKW und Pflanzkohleanlagen bis anhin nicht eindeutig klar. Im Jahr 2022 wurden deshalb erste Grundlagen zum Vollzug erarbeitet [8]. Einzelne Messungen zeigten gleichzeitig, dass die Beurteilung von Anlagen aufwändig ist und dass nicht alle Anlagen die Anforderungen in der Praxis einhalten [9]. Seit 2024 liegen nun mit der Cerc'l'Air-Empfehlung Nr. 31r Richtlinien für den Vollzug der Luftreinhaltevorschriften entsprechender Anlagen vor [14].
2. Folgende Dokumente beschreiben die Anforderungen zur Energieeffizienz von Energieanlagen und zur Ausrichtung von Investitionsbeiträgen für Biomasse- und Infrastrukturanlagen:
 - a) Das Energiegesetz (EnG) [12], darin unter anderem die Einspeisevergütung in Kapitel 4.
 - b) Die Energieförderungsverordnung (EnFV), [13] darin unter anderem die Bestimmungen zu Biomasse, Wärmenutzung, Eigenverbrauch und WKK).
 - c) Das Faktenblatt "Investitionsbeiträge für Biomasse- und Infrastrukturanlagen" des Bundesamts für Energie [11].In diesen Dokumenten werden die Anforderungen betreffend Wärmenutzung und Elektrizitätsproduktion geregelt. Der Begriff der Pflanzkohle und damit verbundene Anforderungen sind in diesen Dokumenten jedoch nicht oder noch nicht erfasst, weshalb zur Realisierung entsprechender Anlagen noch Klärungsbedarf zur Beurteilung der Energieeffizienz besteht.
3. Sofern Pflanzkohleanlagen trotz der durch das BAFU-Faktenblatt [10] bewirkten Einschränkungen zur landwirtschaftlichen Nutzung von Pflanzkohle als Energieerzeugungsanlagen gefördert werden und somit potenziell in den Gültigkeitsbereich des EnG fallen, ist eine Effizienzbetrachtung im Sinne des EnG zu verlangen. Da Anlagen zur Produktion von Pflanzkohle im EnG nicht explizit erwähnt sind, ist für den Vollzug ein Vorgehen zur Bilanzierung und Bewertung von Pflanzkohleanlagen festzulegen.

Ziel des Projekts ist die Erarbeitung von Empfehlungen zu Qualitätsanforderungen für Holzvergaser-BHKW und Pflanzkohleanlagen und deren Umsetzung in Anlehnung an das im Rahmen von QM Holzheizwerke etablierten Vorgehen. Im Vordergrund stehen dabei Mindestanforderungen in Bezug auf die Energieeffizienz im Sinne des Energiegesetzes (EnG, [12]), der Energieförderungsverordnung (EnFV, [13]) und von Investitionsbeiträgen [11].

4.2 Förderinstrumente für Energieholz in der Schweiz

Aktuell kommen zur Förderung von Anlagen zur Energiegewinnung aus Holz unter anderem folgende Förderinstrumente zum Einsatz:

1. Massnahmen im Bereich Elektrizitätsproduktion

Diese werden durch einen Netzzuschlag finanziert, der im Auftrag des Bundesamts für Energie durch die Firma Pronovo AG erhoben und für folgende Instrumente eingesetzt wird:

1.1 Einmalvergütung für Anlagen zur Produktion von erneuerbarer Elektrizität

1.2 Investitionsbeiträge an Anlagen zur Produktion von erneuerbarer Elektrizität.

2. Massnahmen in den Bereichen Wärme, Gebäude und Verkehr

Diese Massnahmen werden durch eine CO₂-Abgabe auf Brennstoffe und Treibstoffe finanziert und über folgende zwei unabhängige Instrumente verteilt:

2.1 CO₂-Abgaben auf Brennstoffe: Diese werden über Globalbeiträge den Kantonen zugewiesen und von diesen für kantonale Förderprogramme eingesetzt.

2.2 CO₂-Abgaben auf Treibstoffe: Diese werden im Auftrag des Bundesamts für Umwelt durch die Stiftung für Klimaschutz und CO₂-Kompensation (KliK) erhoben und für Massnahmen in vier Kompensationsbereichen genutzt. Die Stiftung KliK wiederum ist Auftraggeberin der Firma Energie Zukunft Schweiz AG (EVS AG), welche im Auftrag der Stiftung KliK und unter Regulierung durch das Bundesamt für Umwelt die Gelder im Förderprogramm Klimaprämie verteilt.

Bei Verwendung der Klimaprämie für automatische Holzheizungen wird eine Begleitung mit QM Holzheizwerke® verlangt, um eine geeignete Verwendung der Mittel zu gewährleisten und die Erreichung der mit den Fördergeldern prognostizierten CO₂-Minderung sicher zu stellen. Das Vorgehen dazu ist für Anlagen zur Wärmeerzeugung ab 70 kW mit dem System QM Holzheizwerke® abgedeckt.

4.3 Begriffe zu thermochemischen Verfahren und Produkten

Durch Erwärmung von Biomasse unter Luftmangel können eine feste, eine gasförmige und eine flüssige Produktfraktion gebildet werden, die als Koks (oder Kohle, zur Unterscheidung von fossiler Kohle auch Biokohle genannt), Synthesegas und Pyrolyseöl bezeichnet werden und folgende Eigenschaften aufweisen:

- Koks oder Biokohle besteht aus Kohlenstoff mit allfälligen Anteilen von Mineralstoffen und enthält im Idealfall keine organische Substanz. Es ist daher weitgehend inert und langzeitstabil.
- Das Produktgas oder Synthesegas ist ein brennbares Gas und enthält nebst N_2 vor allem CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , höherwertige Kohlenwasserstoffe, NH_3 , H_2S und weitere flüchtige Verbindungen. Bei der Freisetzung des Synthesegases im Pyrolyseprozess enthält es zudem bei Raumtemperatur kondensierende Verbindungen, die bei Abkühlung als Flüssigkeit anfallen.
- Pyrolyseöl besteht aus kondensierten organischen Verbindungen, Wasser und anderen anorganischen Verbindungen.

Die Aufteilung in die drei Fraktionen ist abhängig vom Ausgangsmaterial (unter anderem dem Wasser- und Aschegehalt) und von den Betriebsbedingungen (insbesondere der Temperatur, der Zufuhr an Oxidationsmittel und der Verweilzeit in den unterschiedlichen Zonen des Reaktors). Entsprechend werden die Prozesse wie folgt bezeichnet:

- Wenn Koks das Hauptprodukt darstellt, wird der Prozess als **Verkohlung** bezeichnet. Je nach Einsatzzweck wird Koks aus Holz auch als Holzkohle oder als Pflanzenkohle bezeichnet. Wenn Koks das Hauptprodukt ist, ist Synthesegas ein Nebenprodukt, das zur Wärmeerzeugung genutzt werden kann. Da im Synthesegas enthaltene, kondensierbare Verbindungen verbrannt werden, fällt im Idealfall kein Pyrolyseöl an. Die Verbrennung des Gases kann zur Wärmeversorgung des Prozesses genutzt werden, einerseits zur Beheizung des Reaktors und optional zur Brennstofftrocknung. Im Weiteren ist die Erzeugung von Nutzwärme möglich. Wenn die Verbrennung in einem Motor erfolgt, ist eine Wärme-Kraft-Kopplung mit Stromerzeugung möglich.
- Wenn das Synthesegas das Hauptprodukt ist, das erst in einem nachfolgenden Prozess verbrannt wird, wird der Prozess als **Vergasung** bezeichnet. Das Synthesegas, das dann auch als Produktgas oder Holzgas bezeichnet wird, wird meist in einem Verbrennungsmotor zur Wärme-Kraft-Kopplung genutzt. Wie bei der Verkohlung fällt im Idealfall kein Pyrolyseöl an, im Gegensatz zur Verkohlung fällt aber im Idealfall auch kein Koks an. Als Kombination zwischen reiner Vergasung und Verkohlung ist es auch möglich, den Prozess so zu führen, dass nebst dem nutzbaren Holzgas gewollt auch Koks produziert wird, das als Pflanzenkohle verwertet werden kann. Der Übergang zwischen Verkohlung und Vergasung ist deshalb fließend und die Namensgebung erfolgt in der

Regel anhand des Hauptproduktes, wobei diese Zuordnung aufgrund der Wertschöpfung, der Masse oder des Energieinhaltes erfolgen kann.

- Wenn das Pyrolyseöl das Hauptprodukt darstellt, wird der Prozess als **Pyrolyse** bezeichnet. In dem Fall sind Koks und Synthesegas Nebenprodukte. Diese können prozessintern genutzt werden und im Fall des Kokses ist auch eine Zumischung zum Pyrolyseöl möglich, wobei ein energiereicher Schlamm entsteht, der für die weitere Verarbeitung fossiles Schweröl ersetzen kann.

Wenn im Anschluss an die genannten Prozesse in der gleichen Anlagenkomponente eine überstöchiometrische Luftzufuhr zur Oxidation aller Fraktionen stattfindet, handelt es sich um eine Verbrennung. Das Hauptprodukt ist dann ein Abgas, das keine chemisch gebundene Energie enthält und den Großteil der zugeführten Energie des Brennstoffs als Wärme enthält.

Obwohl alle der genannten Prozesse eine pyrolytische Zersetzung umfassen, wird in der Fachliteratur nur bei der Erzeugung eines Pyrolyseöls als Hauptprodukt von einer Pyrolyse gesprochen. In neueren Dokumenten zu Pflanzenkohle wird auch die Pflanzenkohleherstellung als Pyrolyse bezeichnet, womit aber die Unterscheidung zwischen Verkohlung und Pyrolyse im eigentlichen Sinn erschwert oder verunmöglicht wird.

Für die Verfahren der Verkohlung, Vergasung und Pyrolyse ist in vielen Fällen der Einsatz von trockenem Brennstoff (meist unter 10 Gew.-%) erforderlich, weshalb entsprechende Anlagen oft über eine Trocknungseinheit verfügen, die mit Wärme aus der Synthesegasverbrennung versorgt wird.

4.4 Auswertung für vier Anlagenbeispiele

Bis anhin liegen nur wenig dokumentierte Angaben zum Energiefluss von Holzvergaser-BHKW, Pflanzkohleanlagen und Anlagen zur Produktion von Wärme, Elektrizität und Pflanzkohle vor. Tabelle 1 zeigt Beispiele zur Auswertung der Nutzungsgrade der drei Anlagentypen wie folgt:

Die Zahlenwerte der Anlage mit Produktion von Wärme, Elektrizität und Pflanzkohle entsprechen den in Bild 4 im Energiefluss-Diagramm dokumentierten Werten einer Anlage von Syncraft in Österreich [20]. Weil der Energieertrag an Elektrizität dieser Anlage den Pflanzkohleertrag deutlich übersteigt, wird die Anlage als Holzvergaser-BHKW mit Pflanzkohleproduktion bezeichnet.

Zu Pflanzkohleanlagen ohne Stromerzeugung liegen zum Beispiel Angaben von Anlagen von Biomaccon (Kaskad-E) und Pyreg in der Schweiz nach [21] und [22] vor. Dabei sind nicht alle Kenngrößen detailliert verfügbar, weshalb die Werte in Tabelle 1 zum Teil durch Abschätzungen ergänzt wurden, wobei für Pflanzkohle ein Heizwert von Holzkohle nach [16] angenommen wurde.

Das Zahlenbeispiel für ein Holzvergaser-BHKW orientiert sich an den von Spanner Re in [24] dokumentierten Werten. Dabei handelt es sich um Wirkungsgrade und nicht um Jahresnutzungsgrade, weshalb die effektiven Werte etwas niedriger sein können.

Unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten zeigt die in Bild 5 eingetragene Bewertung, dass alle Anlagen die Q-Forderung erfüllen können, sofern die Wärme ganz oder teilweise genutzt wird. Im ersten Beispiel einer Pflanzkohleanlage wird die Q-Forderung um den Faktor 1.07 und im zweiten um den Faktor 1.29 übertroffen. Das Holzvergaser-BHKW und das Holzvergaser-BHKW mit Pflanzkohleproduktion übertreffen die Q-Forderung um rund einen Faktor 1.5 bzw. 1.6. Diese Beispiele zeigen, dass Anlagen mit Stromerzeugung die vorgeschlagene Forderung selbst dann erreichen können, wenn nur rund die Hälfte der theoretisch nutzbaren Wärme genutzt wird.

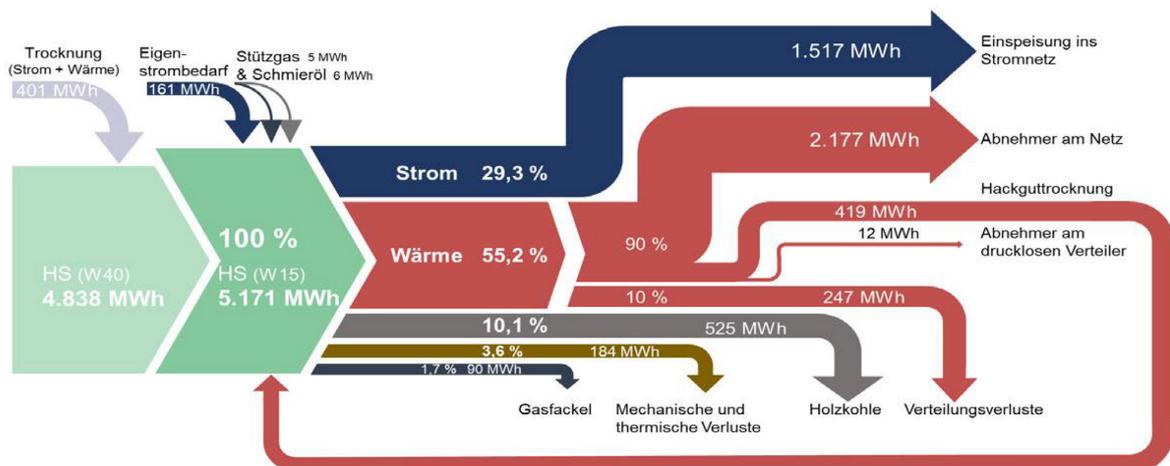


Bild 4 Sankey-Diagramm einer Anlage zur Produktion von Wärme, Elektrizität und Pflanzkohle von Syncraft [20]. Die Angaben in MWh entsprechen über ein Jahr aufsummierten Werten in MWh/a.

Tabelle 1 Vergleich von typischen Werten heutiger Anlagen mit der vorgeschlagenen Q-Forderung für einen gewichteten Brutto-Nutzungsgrad. Von oben nach unten:
 Beispiel Pflanzkohleanlage 1,
 Beispiel Pflanzkohleanlage 2,
 Beispiel Holzvergaser-BHKW,
 Beispiel Holzvergaser-BHKW mit Pflanzkohleproduktion.
Rote Zahlen sind Eingabedaten anhand von Schätzungen nach [20] bis [24] und dem vorliegenden Vorschlag zur Bewertung einer Q-Forderung. **Blaue** Zahlen sind berechnete Werte.

Pflanzkohleanlage 1	Wärme	Pflanzkohle	Wärme + Pflanzkohle	Elektrizität	Total
Brutto-Nutzungsgrad	15%	60%	75%	0%	75%
Gewichtungsfaktor			1	1.75	
Gewichteter Brutto-Nutzungsgrad			75%	0%	75%
Q-Forderung					70%
Ist / Q-Forderung					1.07

Pflanzkohleanlage 2	Wärme	Pflanzkohle	Wärme + Pflanzkohle	Elektrizität	Total
Brutto-Nutzungsgrad	45%	45%	90%	0%	90%
Gewichtungsfaktor			1	1.75	
Gewichteter Brutto-Nutzungsgrad			90%	0%	90%
Q-Forderung					70%
Ist / Q-Forderung					1.29

Holzvergaser-BHKW	Wärme	Pflanzenkohle	Wärme + Pflanzenkohle	Elektrizität	Total
Brutto-Nutzungsgrad	57%	0%	57%	27%	84%
Gewichtungsfaktor			1	1.75	
Gewichteter Brutto-Nutzungsgrad			57%	47%	104%
Q-Forderung					70%
Ist / Q-Forderung					1.49

Holzvergaser-BHKW mit Pflanzenkohleproduktion	Wärme	Pflanzenkohle	Wärme + Pflanzenkohle	Elektrizität	Total
Brutto-Nutzungsgrad	55%	10%	65%	29%	94%
Gewichtungsfaktor			1	1.75	
Gewichteter Brutto-Nutzungsgrad			65%	51%	116%
Q-Forderung					70%
Ist / Q-Forderung					1.65

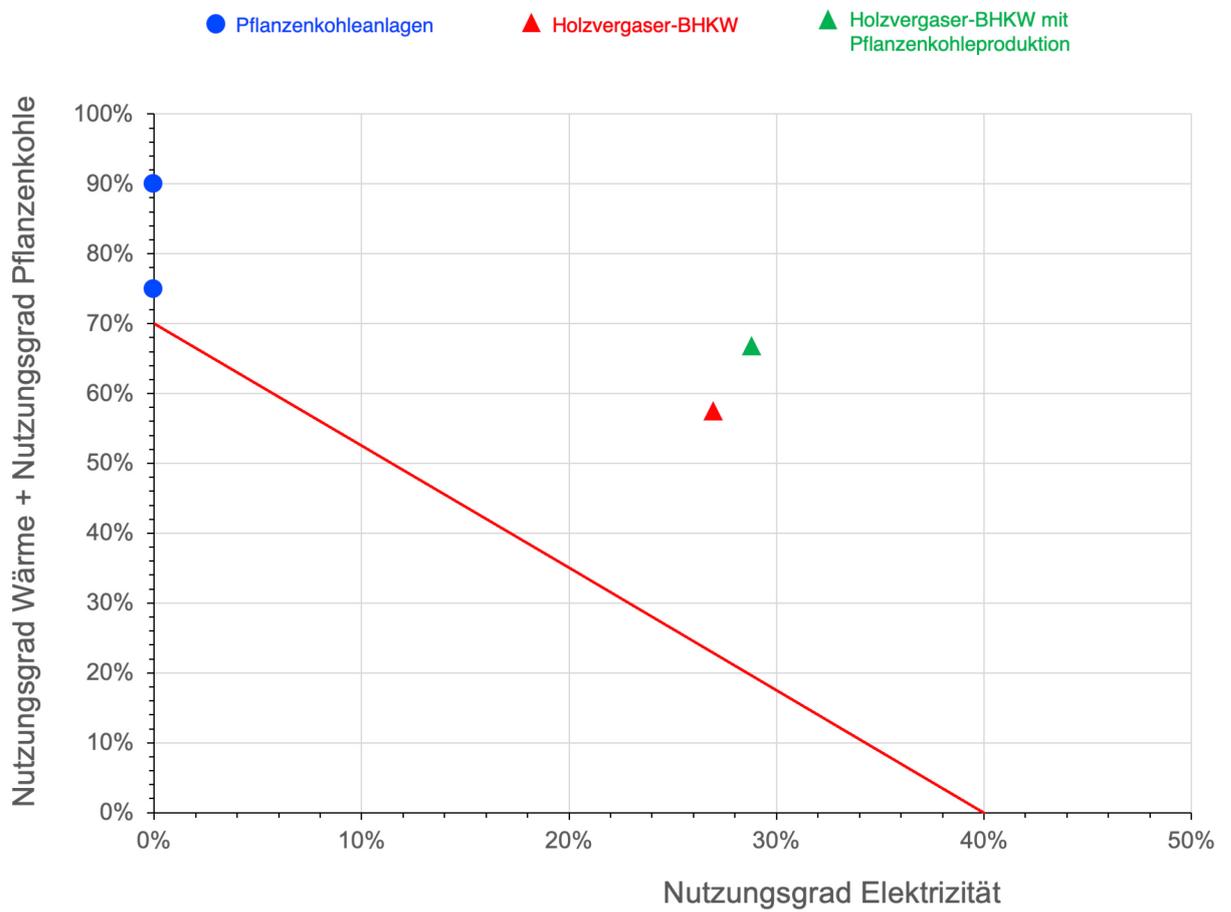


Bild 5 Auswertung der vier Anlagenbeispiele nach Tabelle 1 im Diagramm mit der als rote Linie eingezeichneten Mindestanforderung.

5 Literatur

- Kemmler, A. et al.: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2019, Infrac, TEP & Prognos im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern 2020
- Steffen, P.: Holzenergie und Klima. 16. Holzenergie-Symposium, 11.09.2020, 13-24
- Lechthaler, G.: Energieperspektiven 2050+. 17. Holzenergie-Symposium, 16.09.2022, 7-16
- QM Holzheizwerke: <https://www.qmholzheizwerke.ch>, 27.11.2023
- Arbeitsgemeinschaft QM Holzheizwerke: Planungshandbuch. C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2022, 3. Auflage, ISBN 978-3-937441-96-2. <https://www.qmholzheizwerke.ch>
- Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat: <https://www.european-biochar.org/de>, 16.08.2023
- Maurer, H.: Rechtlicher Umgang mit Pflanzenkohle, Gutachten im Auftrag des BAFU, 15. Februar 2021, Advokaturbüro Maurer & Stäger, Zürich 2021, [Maurer 2021](#)
- Nussbaumer, T.; Lauber, A.; Zotter, P.: Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse. Teil 1 – Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung. Im Auftrag der Kantone Aargau, Graubünden und Bern, 14.03.2022, 26 Seiten, [Nussbaumer et al. 2022](#)
- Lauber, A.; Zotter, P.; Nussbaumer, T.: Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse. Teil 2 – Praxisuntersuchung zum Betrieb und Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung. Im Auftrag der Kantone Aargau, Graubünden und Bern, 14.03.2022, 34 Seiten, [Lauber et al. 2022](#)
- Schwilch, G.; Röthlisberger, R.; Zimmermann, M.; Keusch, R.: Faktenblatt Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft, Bundesamt für Umwelt, Bern 2023, [BAFU Faktenblatt Pflanzenkohle](#)
- Bundesamt für Energie: Investitionsbeiträge für Biomasse- und Infrastrukturanlagen, Faktenblatt, Version vom 23. November 2022, Bern 2022
- Energiegesetz (EnG) vom 30. September 2016 (Stand am 1. Januar 2023). 730.0. Bern 2023
- Energieförderungsverordnung (EnFV) vom 1. November 2017 (Stand am 1. Januar 2023). 730.03. Bern 2023
- Cercl'Air: Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31r - Anlagen zur Verkohlung und Vergasung von Holz und anderer fester Biomasse. Stand Februar 2024.
- Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat: <https://www.european-biochar.org/de>, 16.08.2023
- Wikipedia: Holzkohle. <https://de.wikipedia.org/wiki/Holzkohle>, 16.08.2023
- Cercl'Air: Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p, Vollzugsblätter Emissionsüberwachung, Holzfeuerungen über 70 kWFWL, Kapitel 2.9 und 4.3, Stand Januar 2022
- Zotter, P.; Good, J.; Nussbaumer, T.: Langzeitmessung bei Kaskadenanlagen mit Holzkesseln. Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Holzfeuerungen Schweiz und der Kantone AG, BE, FR, GR, LU, SG und ZH. Entwurf, Zürich 02.11.2023.
- Hagemann, N.: Nutzung von Pflanzenkohle, 16. Holzenergie-Symposium, 11.09.2020, 107-112
- Huber, M.: Syncraft. 16. Holzenergie-Symposium, Zürich, 11.09.2020, 121-130
- Gutzwiller.: Biomacon/Kaskade-E, 16. Holzenergie-Symposium, 11.09.2020, 131-146
- Abächerli, F.: Betrieb einer Pyreganlage, 16. Holzenergie-Symposium, 11.09.2020, 147–154
- Bucher, H.: Holzvergasungs-BHKW Wegscheid, 16. Holzenergie-Symp., 11.09.2020, 107–112
- von Senfft, M.: Holzvergaser zur Wärme-Kraft-Kopplung, 17. Holzenergie-Symposium, Zürich, 16.09.2022, 183-190