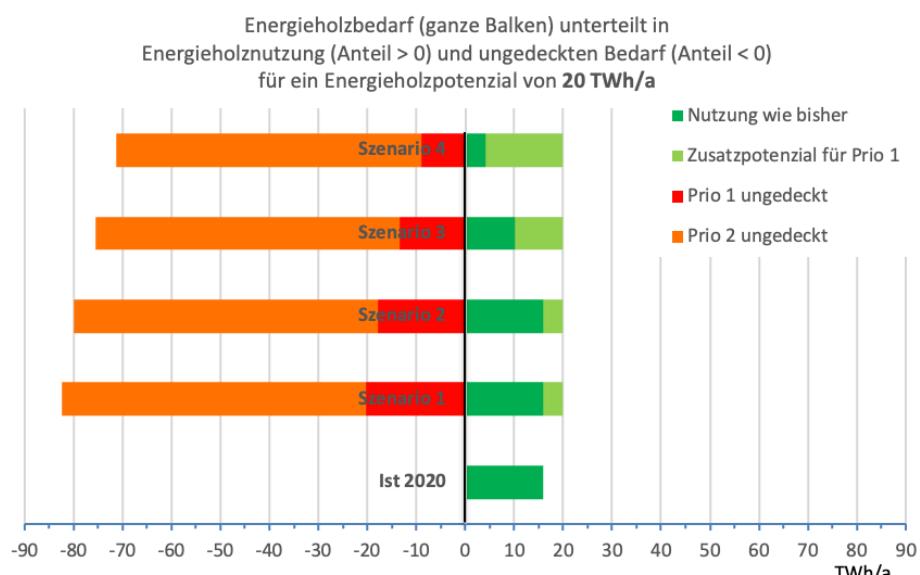




Thomas Nussbaumer

Verwertungspfade Holzenergie

Ressourceneffizienz verschiedener Verwertungspfade zur Nutzung von Energieholz



Zürich, 23. Oktober 2023

Im Auftrag des **Bundesamtes für Umwelt (BAFU)**

Thomas Nussbaumer

Verwertungspfade Holzenergie

Ressourceneffizienz verschiedener Verwertungspfade zur Nutzung von Energieholz

Zürich, 23. Oktober 2023

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Wald, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Verenum AG, CH-8006 Zürich

Autor: Thomas Nussbaumer

Begleitung: Claire-Lise Suter (BAFU), Daniel Binggeli (BfE), Andreas Keel (Holzenergie Schweiz)

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhalt

Kurzfassung	3
1 Ausgangslage und Zielsetzung	6
1.1 Ausgangslage.....	6
1.2 Zielsetzung	6
2 Grundlagen	7
2.1 Energiebedarf der Schweiz	7
2.2 Nutzung von Energieholz und Energieholzpotenzial.....	10
2.2.1 Energieholznutzung und -potenzial bis 2019	10
2.2.2 Aktuelle Daten zu Energieholzverbrauch und -potenzial	14
2.2.3 Annahmen zum Potenzial	16
2.2.4 Luftreinhaltung	17
2.3 Begriffe zur Energienutzung.....	18
2.4 Begriffe zu Verfahren und Produkten: Verkohlung, Vergasung, Pyrolyse und Verbrennung.....	20
3 Verwertungspfade	22
3.1 Gebäudewärme und Einfluss der Transportdistanz	22
3.2 Prozesswärme.....	28
3.3 Mobilität mit Holz durch Biotreibstoffe und Elektrizität	30
3.4 Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz	35
3.5 Holzkohle und Pflanzenkohle	40
3.5.1 Pflanzenkohle in der Landwirtschaft und als C-Senke.....	40
3.5.2 Holzkohle und Pflanzenkohle für Grillzwecke	41
3.6 Stoff- und Energiebilanz thermischer Anlagen zur Energieholznutzung	42
3.7 Varianten zur Nutzung von Energieholz.....	43
3.8 Einfluss der Energieholzsortimente	47
4 Bewertung der Verwertungspfade.....	48
4.1 Bewertungskriterien und Definition der Prioritäten	48
4.2 Bewertung und Priorisierung der Verwertungspfade.....	50
5 Szenarien zur Nutzung des Energieholzpotenzials	55
5.1 Annahmen	55
5.2 Resultate	56
6 Schlussfolgerungen.....	65
7 Literatur.....	69

Kurzfassung

Die Studie beschreibt den Bedarf an Energieholz in der Schweiz im Jahr 2050 unter der Annahme, dass fossile Energieträger substituiert oder durch Kohlenstoffsenken kompensiert werden müssen und Holz für dazu geeignete Anwendungen eingesetzt wird. Dazu werden die Energieeffizienz der wichtigsten Verwertungspfade für Energieholz beschrieben und Prioritäten zur Nutzung von Energieholz anhand des Substitutionsbedarfs für fossile Energien und dem Substitutionseffekt von Energieholz abgeleitet. Im Anschluss werden vier Szenarien zur Ausschöpfung des nachhaltigen Energieholzpotenzials definiert und ihre Wirkung auf den Endenergieverbrauch der Schweiz berechnet. Als Basis dienen der heutige Energieholzverbrauch von 16 TWh/a (5.8 Mio. m³/a) sowie ein Energieholzpotenzial von 20 TWh/a (7.3 Mio. m³/a), das einer mittleren Erwartung entspricht¹. Zusätzlich wird der Effekt bei einem auf 25 TWh/a (9.1 Mio. m³/a) erhöhten Potenzial beschrieben. Da bereits die zwei Anwendungen mit höchster Priorität einen Bedarf von 29 TWh/a (10.6 Mio. m³/a) aufweisen, wird zur Beschreibung der Wirkung auch eine Modellierung mit diesem Wert durchgeführt.

Die Studie kommt zu folgenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen:

Der Bedarf an Energieholz zur Substitution fossiler Energien in den für Energieholz geeigneten Anwendungen übersteigt das heute identifizierte Potenzial um mehr als einen Faktor 5. Aus diesem Grund ist eine Priorisierung der Verwertung von Energieholz wichtig, wobei Anwendungen zu favorisieren sind, die nicht oder nur mit hohem Aufwand durch andere erneuerbare Energieträger erbracht werden können und bei denen Energieholz die höchste Substitutionswirkung erzielt. Soweit einzelne Verwertungspfade diese zwei Kriterien gleichermassen erfüllen, sind diejenigen vorzuziehen, die aufgrund ihrer technologischen Reife bereits vor 2050 sicher umgesetzt und bis 2035 einen Beitrag zur Energieversorgung leisten können. Aufgrund dieser Kriterien sind folgende Verwertungspfade zu favorisieren:

- Höchste Priorität zur Verwertung von Energieholz haben die Erzeugung von Prozesswärme sowie von Spitzenlast-Gebäudewärme mit einem Deckungsgrad von rund 25 %. Diese Verwertungspfade können als Prio 1-Anwendungen wie folgt umgesetzt werden:

Prozesswärme: Energieholz soll für Prozesswärme bei hohen Temperaturen genutzt werden, die heute fossil produziert wird und die nur mit grossem Aufwand durch andere nachhaltige Alternativen ersetzt werden kann. Da eine direkte Verbrennung einen höheren Substitutionseffekt als die vorgängige Umwandlung zu Holzgas erzielt, sind vorab direkte Anwendungen von Energieholz zu favorisieren.

Spitzenlast-Gebäudewärme: Parallel dazu ist die Versorgung des Gebäudeparks mit Wärme auf eine Kombination von Wärmepumpen und Energieholz zu transformieren. Dazu sind bestehende Hauptwärmeerzeuger mit Holz so umzurüsten, dass zusätzliche erneuerbare Elektrizität für den Betrieb von Wärmepumpen als Hauptheizung dient, die einen hohen Deckungsgrad mit einem Zielwert von 75 % erreichen und Energieholz nur für die restliche Spitzenlastwärme im Winter nutzen, wenn Knappheit an erneuerbarem Strom besteht. Diese Art der Wärmeversorgung kann durch Abwärmenutzung ergänzt und auch bei Neuanlagen umgesetzt werden. Die Ausführung kann

¹ Zum Energieholzverbrauch liegen Daten in Kubikmeter Holz und Angaben in Energieeinheiten bezogen auf den Heizwert vor. Im vorliegenden Bericht werden alle Daten in Energieeinheiten ausgewiesen. Zur Umrechnung dient ein Heizwert von 2.74 MWh/m³ (9.864 PJ/m³) oder 2.74 TWh/Mio. m³, was Waldholz mit 35% Wassergehalt mit gleichen Anteilen Laub- und Nadelholz entspricht.

zentral oder dezentral erfolgen und den Ausbau thermischer Netze unterstützen. Da Energieholz damit nur rund einen Viertel des Gebäudewärmebedarfs decken muss, wird das restliche Holz für die bezüglich Temperatur anspruchsvollere Prozesswärme frei. Im Gebäudebereich übernimmt das Energieholz dagegen die Aufgabe der Saisonspeicherung und kann damit den Bedarf an teureren und ineffizienteren Ansätzen wie zum Beispiel Power-to-Gas reduzieren. Um dies zu ermöglichen, ist der Einsatz von Energieholz für ganzjährige Gebäudewärme auf null zu reduzieren oder zumindest auf schwierig substituierbare Anwendungen zu beschränken.

- Daneben erzielt Energieholz zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) in wärmegeführten Anlagen einen hohen Nutzen im Energiesystem, da der produzierte Strom einen Beitrag zum Winterstrom und zur Versorgungssicherheit liefert. Aufgrund des begrenzten Holzpotenzials und der geringen elektrischen Wirkungsgrade von WKK-Anlagen im für die Schweiz typischen Leistungsbereich wird der Beitrag von Energieholz zur Stromversorgung zwar gering bleiben, er kann aber den Ausbau von Solarstrom ideal ergänzen.
- Die Nutzung von Energieholz zur Treibstoffherstellung ist mit einem initialen Umwandlungswirkungsgrad in der Größenordnung von rund 50 % verbunden. Die Substitutionswirkung ist deshalb geringer als bei Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme, weshalb Treibstoffe aus Holz erst dann in Betracht zu ziehen sind, wenn sämtliche Anwendungen für Prozess- und Gebäudewärme dekarbonisiert sind. Da Energieholz nur einen Bruchteil des Treibstoffbedarfs decken kann, ist für Anwendungen in der Mobilität eine weitere Priorisierung sinnvoll. Da aus Effizienzgründen vorausgesetzt wird, dass der Bodenverkehr bis 2050 elektrisch erfolgen wird, verbleibt der Bedarf an Flugtreibstoffen. Obwohl die Herstellung von Flugtreibstoffen aus Energieholz technisch möglich ist, zeigt die Erhebung, dass bereits die Prio 1-Anwendungen, welche eine höhere Substitutionswirkung als die Treibstoffherstellung aus Holz erzielen, das Energieholzpotenzial übersteigen. Aus diesem Grund steht zur Erzielung eines maximalen Nutzens von Energieholz kein Holz mehr zur Treibstoffe zur Verfügung. Für den Luftverkehr ist deshalb die Entwicklung anderer erneuerbarer Lösungen zu verfolgen. Im Gegensatz zu stationären Anwendungen bieten sich dazu auch aufwändige Technologien wie E-Fuels (Power-to-Fuels, also Power-to-Gas oder für Flugtreibstoffe insbesondere Power-to-Liquids) unter Nutzung von CO₂-neutraler Elektrizität an.
- Obwohl Pflanzenkohle nicht prioritär als Sekundärenergieträger dient, besteht in der Schweiz ein Interesse an Pflanzenkohle, die den Bedarf an Holz zusätzlich erhöht. Um einen Vergleich mit Energieträgern zu ermöglichen, wird für Pflanzenkohle eine Nutzung mit Sequestrierung des Kohlenstoffs im Boden angenommen. Eine Abschätzung zeigt, dass die Sequestrierung einer Energieeinheit in Pflanzenkohle zu einer Kohlenstoffsenke führt, welche für Netto-Null-Treibhausgasmissionen den Einsatz der annähernd identischen Energiemenge an fossilem Kerosin erlaubt und der energetische Nutzen von Pflanzenkohle so mit der Produktion von Treibstoff aus Holz verglichen werden kann. Die Herstellung von Pflanzenkohle aus Energieholz ist aus energetischer Sicht deshalb ebenfalls nicht vorteilhaft. Daneben ist zu beachten, dass vor einer Verwendung von Pflanzenkohle als Kohlenstoffsenke die Substitution importierter Holzkohle zu favorisieren ist, da damit der Transportaufwand und Schäden durch Waldrodungen in anderen Weltregionen reduziert werden können. Während vorliegend nur die Nutzung von Energieholz bewertet wird, kann die Herstellung von Pflanzenkohle aus Reststoffen aus der Landwirtschaft oder von Vergärungsanlagen, die für eine energetische Verwendung nicht oder nur bedingt geeignet sind, sinnvoll sein. Für den Einsatz von Pflanzenkohle ist aber unabhängig vom Rohstoff zusätzlich zu beachten, dass das Bundesamt für Umwelt, das Bundesamt für Landwirtschaft und die kantonalen Bodenschutzfachstellen einem grossflächigen Eintrag von Pflanzenkohle in Schweizer Böden ablehnend gegenüberstehen.

Zusammenfassend ist das Energieholz prioritär für Prozesswärme und für Spitzenlast-Gebäudewärme zu nutzen, da damit eine maximale Substitutionswirkung für fossile Energieträger erzielt wird. Da das Energieholzpotenzial ausgeschöpft wird, ohne diese zwei Anwendungen vollständig zu decken, sollte Energieholz in Zukunft nicht mehr als Hauptenergieträger für ganzjährige Gebäudewärme genutzt werden. Daneben wird der Anteil von Energieholz an der Energieversorgung der Schweiz durch die Herstellung von Treibstoff oder Pflanzenkohle aus Holz wegen der initialen Umwandlungsverluste verringert, weshalb auch diese Anwendungen nicht zu unterstützen sind. Demgegenüber weist der Einsatz von Holz in WKK-Anlagen zwar eine etwas niedrigere Substitutionswirkung als Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme auf, kann aber dank der Produktion von Winterstrom den Zubau der Solarstromproduktion unterstützen.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Da die Menge an nachhaltig verfügbarem Holz begrenzt ist und nur einen geringen Teil des Bedarfs an Rohstoffen und Energie der Schweiz decken kann, besteht ein Interesse an der Kenntnis des potenziellen Beitrags der verschiedenen Nutzungsarten von Holz für eine nachhaltige Versorgung der Schweiz mit Energie und Gütern. Dabei wird eine Kaskadennutzung von Holz mit einer vorab stofflichen Verwertung hochwertiger Anteile vorausgesetzt und die Nutzung von Holz als Rohstoff nicht untersucht. Für das Potenzial wird von allen Formen von Energieholz ausgegangen, die als Nebenprodukt der Forst- und Holzwirtschaft sowie der zivilisatorischen Nutzung anfallen. Dazu zählen Stückholz, Hackschnitzel aus naturbelassenem Holz, Holzpellets, Restholz, Altholz, Altpapier und Holzstaub. Für Stückholz wird von einer weiter sinkenden Bedeutung ausgegangen.

Die Schweiz hat sich verpflichtet, das langfristige Klimaziel von Netto-Null-Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 zu erreichen. Mit der Energiestrategie 2050 sollen der Energieverbrauch gesenkt, die Energieeffizienz erhöht und erneuerbare Energien gefördert werden. Sowohl die Biomassestrategie des Bundes von 2009 als auch die Ressourcenpolitik Holz 2030 empfehlen das Kaskadenprinzip für eine optimale Verwertung von Biomasse und darunter insbesondere von Holz.

Als Basis zur Abschätzung des nachhaltig nutzbaren Potenzials an Energieholz dienen folgende Erhebungen, die vom Bund oder im Auftrag des Bundes durchgeführt wurden:

- Kemmler et al. (2020), im Auftrag des Bundesamts für Energie [1]
- Schweizerische Holzenergiestatistik (2020), im Auftrag des Bundesamts für Energie [2]
- Thees et al. (2017), Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL [3]
- Hammer et al., im Auftrag des Bundesamts für Energie (2021) [4]
- Bundesamt für Energie (2021): Schweizerische Gesamtenergiestatistik [5].

Zusätzlich werden aktuelle Daten von Holzenergie Schweiz berücksichtigt.

1.2 Zielsetzung

In der Studie sollen verschiedene Nutzungsmöglichkeiten zur Verwertung von Holz zur Energieerzeugung und zurendlagerung von Kohlenstoff beschrieben und in Bezug auf die erzielbare Einsparung an nichterneuerbaren Ressourcen und fossilen CO₂-Emissionen bewertet werden.

Im Sinne des Kaskadenansatzes soll die Frage beantwortet werden, welche Verwertungspfade oder Prozesse für Holz als Ausgangsmaterial heute, 2035 und 2050 die höchste Effizienz erzielen und im Hinblick auf die Energieversorgung optimal sind. Als Orientierung dienen die "Energieperspektiven 2050+".

2 Grundlagen

2.1 Energiebedarf der Schweiz

Der Endenergieverbrauch der Schweiz 2022 betrug gemäss Gesamtenergiestatistik [5] rund 210 TWh/a. Die in Bild 1 dargestellten Anteile der wichtigsten Energieträger zeigen, dass Erdölbrennstoffe, Treibstoffe und Erdgas zusammen 58.7 % oder 123 TWh/a ausmachen.

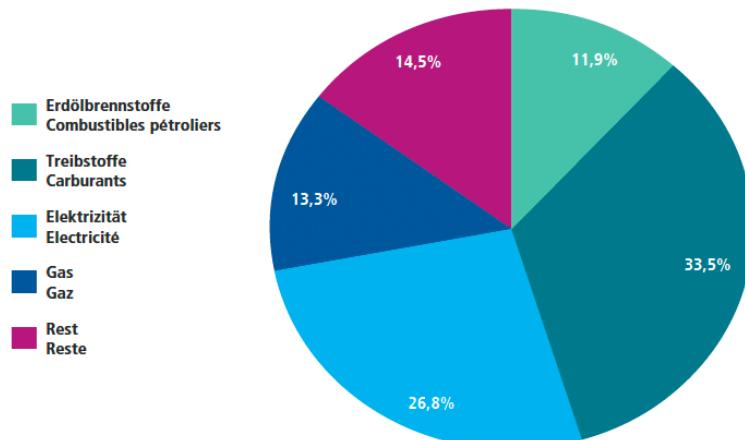


Bild 1 Endenergieverbrauch der Schweiz nach Energieträgern im Jahr 2022 [5].

Da Erdölbrennstoffe und Gas vorwiegend zur Wärmeerzeugung genutzt werden, können aus Bild 1 und weiteren Daten der Gesamtenergiestatistik [5] eine Unterteilung des Verbrauchs fossiler Energien nach Mobilität und Wärmeerzeugung abgeschätzt und diese Bereiche weiter unterteilt werden. Der Verbrauch fossiler Energieträger wird nachfolgend so unterteilt, dass eine Unterscheidung in folgende zwei Hauptgruppen der Anwendungen möglich ist:

1. Anwendungen, für die eine Substitution mit Elektrizität aus Solar-, Wind- und Wasserkraft nach heutigem Stand der Technik und mit wirtschaftlich tragbaren Konsequenzen möglich ist. Es wird davon ausgegangen, dass dies für einen Grossteil der Gebäudewärme (mittels Wärmepumpen), des Bodenverkehrs und des Verkehrs auf Binnengewässern (durch Elektromobilität) gilt und als Vereinfachung für diese Anwendungen eine Substitution durch Zubau an Solar- und Windkraft gedeckt werden kann. Ein künftiges Energiesystem setzt dazu zusätzliche Massnahmen zur Angleichung zwischen zeitlichem Bedarf und Anfall an Energie wie zum Beispiel durch Energiespeicherung voraus. Dies kann auch durch eine auf die Deckung von Winterspitzen ausgelegte Nutzung von Energieholz erfolgen.

2. Anwendungen, welche nicht oder nur mit hohem Aufwand durch Solar- und Windstrom substituiert werden können und für welche gleichzeitig ein direkter oder indirekter Ersatz durch Energieholz möglich ist. Dies gilt für **Prozesswärme über 100 °C**, für den **Flugverkehr** und für **Gebäudewärme während winterlichen Strom-Mangellagen**. Die entsprechenden Ausführungen werden im Kapitel 3 vertieft. An dieser Stelle werden die Anwendungen vorab beschrieben, um die für Energieholz besonders wichtigen Anwendungen zu begründen:

- Prozesswärme über 100 °C kann zum Teil mit geringem Aufwand durch direkte Nutzung von Energieholz substituiert werden. Dazu gehören alle Anwendungen von Prozesswärme mit indirekter Wärmeübertragung über ein Wärmeträgermedium wie Dampf oder Wärmeträgeröl. Einzelne Anwendungen können mit aus Energieholz hergestellten Sekundärenergieträgern ersetzt werden (zum Beispiel Produktgas aus der Holzvergasung zum Ersatz von Erdgas in Industrieöfen), wäh-

rend für einen weiteren Teil der Anwendungen allenfalls eine Umrüstung auf erneuerbare Elektrizität oder auf andere Herstellungsprozesse erfolgen wird.

- Für den Flugverkehr kommt in Zukunft der Einsatz von Biotreibstoffen infrage. Dafür kommt auch Energieholz infrage, für das ein entsprechendes Szenario beschrieben wird. Daneben stehen aber biogene Rohstoffe im Vordergrund, die höhere Anbauraten pro Hektar und/oder höhere Umwandlungseffizienz zu Treibstoffen erzielen können. Zusätzlich soll im vorliegenden Bericht auch die Umwandlung von Holz zu Pflanzenkohle oder Biochar (Biokohle) bewertet werden. Als Pflanzenkohle wird aus einem biogenen Rohstoff hergestellte Kohle bezeichnet, die nicht oder nicht ausschliesslich mit dem Ziel der Nutzung als Grillkohle oder Reduktionsmittel zur Herstellung von Eisen [7]² produziert wurde, sondern zum Beispiel für eine landwirtschaftliche Nutzung mitendlagerung des Kohlenstoffs im Boden eingesetzt werden soll und die dazu notwendigen Qualitätskriterien [8]³ erfüllt. Wenn für Pflanzenkohle die Anrechnung als Kohlenstoffsenke vorausgesetzt wird, kann als mögliches Szenario zur Erreichung des Netto-Null-Ziels zum Beispiel die Nutzung von fossilem Flugtreibstoff für die durch Pflanzenkohle sequestrierte Menge Kohlenstoff ermöglicht werden. Diese Alternative zu Biotreibstoffen erlaubt eine vergleichende Bewertung eines Szenarios für Pflanzenkohle auf Basis von Energieeinheiten.

Mit diesem Hintergrund wird der Verbrauch an fossilen Energieträgern wie folgt unterteilt und die für Energieholz zu priorisierenden Anwendungen rot verdeutlicht:

Mobilität:

Die Mobilität verbraucht 57 % der fossilen Energieträger oder 120 TWh/a fossile Energie.

Für Benzin und Diesel sind 77 %: 92 TWh/a.

Flugtreibstoffe sind 23 %: **28 TWh/a.**

Diese Angaben umfassen nur die zur Mobilität eingesetzten fossilen Energieträger. Die Mobilität verbraucht daneben bis anhin in geringerer Menge Elektrizität für Schienentransporte und zunehmend auch für Strassentransport sowie in geringer Menge auch biogene Treibstoffe wie Biogas. Da für diese Anteile kein Substitutionsbedarf besteht, werden sie im vorliegenden Bericht nicht bewertet.

Wärme:

Die Wärmeerzeugung verbraucht 43 % der fossilen Energieträger oder 90 TWh/a fossile Energie [5]. Der gesamte Wärmeverbrauch inklusive nicht-fossiler Energieträger macht rund 50 % des Endenergieverbrauchs oder 105 TWh/a aus. Gebäude und Prozesse tragen wie folgt zum Wärmeverbrauch bei: Prozesswärme verursacht nach Kemmler et al. 2020 rund 13 % [1] bzw. nach Bauer et al. (2019) [6] rund 12 % des Endenergieverbrauchs. Gebäudewärme verursacht rund 36 % [1] bzw. 39 % (33 %

² Holzkohle kann zum Beispiel zur Herstellung von Eisen aus Eisenoxid im Hochofenprozess genutzt werden. Eisenoxid wird dabei mit Kohlenstoff und aus dem Kohlenstoff erzeugtem Kohlenmonoxid reduziert. Quelle des Kohlenstoffs ist heute vorwiegend aus Steinkohle hergestelltes Koks. In einer fossilfreien Gesellschaft könnte Koks wie vor der industriellen Revolution, welche unter anderem durch Einsatz von Koks für Hochöfen ermöglicht wurde, wieder durch Holzkohle ersetzt werden [7].

³ Zum Beispiel das European Biochar Certificate EBC [8]. Dies ist ein freiwilliger Industriestandard in Europa. Die Zertifizierung nach EBC-AgroBio gilt in der Schweiz als Voraussetzung für den Einsatz von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer.

Raumwärme und 6 % Warmwasser) des Endenergieverbrauchs [6]. Vorliegend wird von folgenden Werten ausgegangen:

Prozesswärme	12.5 % des Endenergieverbrauchs: 26 TWh/a davon 58 % fossile Prozesswärme : 15 TWh/a (vorwiegend über 100 °C, Kapitel 3)
Gebäudewärme	37.5 % des Endenergieverbrauchs: 79 TWh/a
Gesamtwärmeverbrauch	50 % des Endenergieverbrauchs: 105 TWh/a.

Für den Bedarf an Gebäudewärme im Jahr 2050 wird ein Wert von **39 TWh/a** angenommen, der auf folgenden Werten nach Nussbaumer (2023) [9] basiert, für die eine Zunahme der Gebäudeflächen bei gleichzeitiger Verbesserung der Effizienz angenommen wird und die mit Annahmen zu Szenarien für den Ausbau thermischer Netze des Bundes übereinstimmen:

Tabelle 1 Annahmen zum Wärmebedarf der Gebäude in der Schweiz im Jahr 2050 nach [9].

Kenngröße	Symbol	Wert	Dimension
Nettowohnfläche pro Person	a_1	45	m^2 / P
Infrastruktur-Gebäudefläche pro Person	a_2	20	
Total Gebäudefläche pro Person (a_1+a_2)	a	65	
Spezifischer Heizwärmeverbrauch Gebäude	w_1	40	$\text{kWh} / \text{m}^2 \text{a}$
Spezifischer Heizwärmeverbrauch Warmwasser	w_2	20	
Total spezifischer Heizwärmeverbrauch (w_1+w_2)	w	60	
Total Wärmebedarf pro Person	$a \cdot w$	3900	kWh / Pa
Einwohnerzahl	e	10	Mio. P
Total Wärmebedarf Gebäude	e · a · w	39	TWh / a

Wie in [9] anhand einer Jahresbetrachtung beschrieben, kann für heutige und künftig erstellte Gebäude davon ausgegangen werden, dass bei Zubau von Solarstromanlagen auf knapp 50 % der geeigneten Dachflächen rund drei Viertel (etwa 74 %) des Jahreswärmeverbrauchs mit PV-Strom und effizient betriebenen Wärmepumpen gedeckt werden kann, wenn während einer rund 10 Wochen dauernden Winterperiode die Wärmeabdeckung mit Energieholz erfolgt. Das angenommene Szenario umfasst optimistische und pessimistische Vereinfachungen. So werden einerseits Gebäude und Standorte vernachlässigt, die für Wärmepumpen ungeeignet sind (z.B. wegen Denkmalschutz oder der Höhe über Meer) und die in Zukunft monovalent mit Energieholz versorgt werden. Gleichzeitig ist das Szenario in Bezug auf die Stromversorgung pessimistisch, da Windstrom sowie Solarstrom von alpinen Solaranlagen einen erhöhten Beitrag zum Winterstrom liefern als gebäudeintegrierte PV-Anlagen. Unter der Annahme, dass sich optimistische und pessimistische Annahmen kompensieren, folgt für eine erneuerbare Wärmeversorgung der Gebäude im Jahr 2050 ein mit **Energieholz** zu deckender Bedarf von rund 26 % von total 39 TWh/a oder rund **10 TWh/a**.

2.2 Nutzung von Energieholz und Energieholopotenzial

2.2.1 Energieholznutzung und -potenzial bis 2019

2.2.1.1 Entwicklung bis 2019

Die Holzenergiestatistik weist die Nutzung von Energieholz in 20 verschiedenen Anlagenkategorien aus, von denen fünf in Unterkategorien unterteilt sind (Tabelle 2). Bild 2 zeigt die Entwicklung der Holznutzung bis zum Jahr 2019 nach Hammer et al. (2021), in der einige Anlagenkategorien zusammengefasst sind [4]. Für diese Kategorien ist eine Zuordnung eines oder mehrerer Holzsortimente möglich, die zum Teil auch einzelnen Brennstoffkategorien nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) entsprechen. Tabelle 2 zeigt dazu die Zuordnung zwischen Anlagenkategorien und Energieholzsortimenten.

Tabelle 2 Unterteilung der Energieholznutzung nach Anlagenkategorien der Holzenergiestatistik [2].

Kat. Anlagenkategorien	
A	1 Offene Chemineés
	2 Geschlossene Chemineés
	3 Chemineőfen
	4a Zimmeröfen (Wohnbereich)
	4b Pelletsöfen
	5 Kachelöfen
	6 Holzkochherde
B	7 Zentralheizungsherde
	8 Stückholzkessel < 50 kW
	9 Stückholzkessel > 50 kW
	10 Doppel-/Wechselbrand
	11a Automatische Feuerungen < 50 kW
	11b Pelletsfeuerungen < 50 kW
C	12a Automatische Feuerungen 50-300 kW, a. HVB
	12b Pelletsfeuerungen 50-300 kW
	13 Automatische Feuerungen 50-300 kW, i. HVB
	14a Automatische Feuerungen 300-500 kW, a. HVB
	14b Pelletsfeuerungen 300-500 kW
	15 Automatische Feuerungen 300-500 kW, i. HVB
	16a Automatische Feuerungen > 500 kW, a. HVB
	16b Pelletsfeuerungen > 500 kW
	17 Automatische Feuerungen > 500 kW, i. HVB
	18 Wärmekraftkopplungsanlagen
D	19 Anlagen für erneuerbare Abfälle
	20 Kehrichtverwertungsanlagen

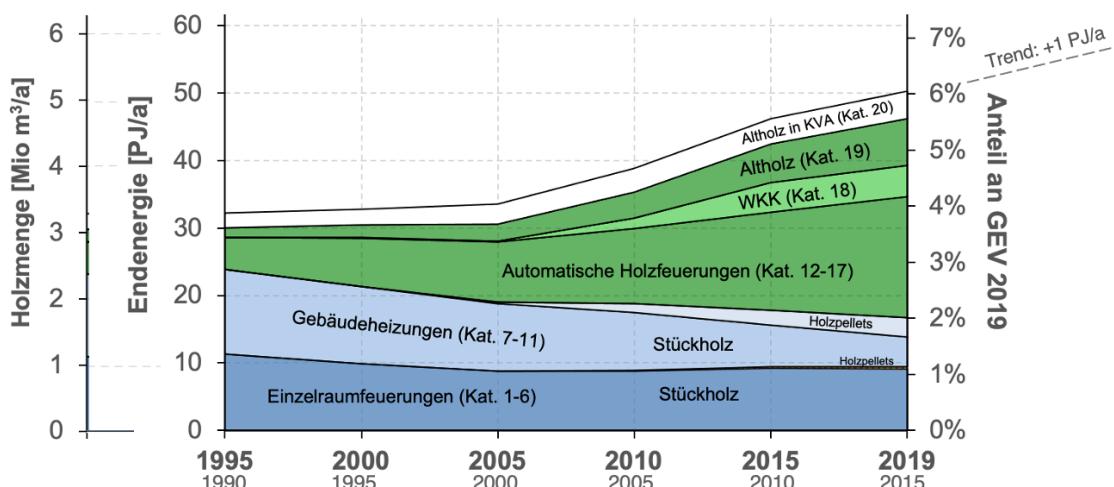


Bild 2 Entwicklung der Holzenergie (inkl. Altholz in KVA) in der Schweiz von 1990 bis 2019. Grafik nach Verenum in [4] mit Daten nach Holzenergiestatistik 2019 [2] und Mittelung über fünf Jahre zum Ausgleich der Jahresschwankungen (erste Werte beschreiben das Mittel der Jahre von 1990 bis 1995). Umrechnungen zwischen Holzmenge und Heizwert gelten für Waldholz mit 35% Wassergehalt mit gleichen Anteilen Laub- und Nadelholz und Heizwert 2.74 MWh/m³ oder 9.864 PJ/Mio. m³.

2.2.1.2. Anlagenkategorien und Energieholzsortimente

Zur Interpretation der Holzenergiestatistik zeigt Tabelle 3 eine Zuordnung zwischen Anlagenkategorien und Energieholzsortimenten. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- 1) In der Holzenergiestatistik sind unter Einzelraumfeuerungen und Gebäudeheizungen Stückholzheizungen gemeint, also ohne Pelletsheizungen und automatische Holzfeuerungen.
- 2) Mit Holzpellets sind Pellets gemeint, welche die international gültige Norm SN EN ISO 17225-2 erfüllen, die nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) für Pelletheizungen verlangt wird. Die meisten Holzpellets weisen zudem die freiwillige Zertifizierung nach ENplus® auf.
- 3) Naturbelassenes Holz in nicht-stückiger Form umfasst zum Beispiel Waldhackschnitzel sowie naturbelassenes Restholz aus der 1. Verarbeitungsstufe (Sägereien). Letzteres umfasst einerseits stückiges Restholz, das meist in automatischen Feuerungen zur Wärme- und teilweise zur Stromerzeugung genutzt wird. Daneben fällt in Sägereien auch Sägemehl an, das wegen des hohen Wassergehalts und der geringen Korngrösse für Rost- und Unterschubfeuerungen nicht oder nur bedingt geeignet ist. Sägemehl wird deshalb meist getrocknet und zu Holzpellets verarbeitet und danach in Pelletsfeuerungen (Kategorien 11b, 12b, 14b und 16b) genutzt. Da Sägemehl praktisch keine Rinde und Fremdanteile enthält, weisen die daraus produzierten Holzpellets geringe Gehalte an Asche, Stickstoff und weiteren anorganischen Inhaltsstoffen auf, was im Vergleich zu Waldhackschnitzel entsprechend niedrigere Rohgasemissionen an Feinstaub und Stickoxiden zur Folge hat.
- 4) Nicht naturbelassenes Restholz aus der 2. Verarbeitungsstufe wie Schreinereien und Zimmereien fällt in stückiger und nicht-stückiger Form unterschiedlicher Grösse an, darunter auch als Holzstaub.
- 5) Ein kleiner Anteil des nicht naturbelassenen Restholzes wird auch in Stückholzkesseln in holzverarbeitenden Betrieben genutzt.
- 6) In automatischen Feuerungen werden hauptsächlich Waldhackschnitzel, naturbelassenes Restholz in nicht-stückiger Form (z.B. Rinde) sowie nicht naturbelassenes Restholz genutzt. Die Nutzung von zu Presslingen in Form von Holzpellets und Holzbriketts ist ebenfalls möglich und darunter insbesondere auch die Nutzung von für Pelletheizungen nicht zugelassenen Pellets, die auch als "Industriepellets" bezeichnet werden.
- 7) Bei den Kategorien 18 und 19 ist die Zuordnung in zwei Punkten nicht eindeutig:
 - a) "Erneuerbare Abfälle" umfassen Altholz und andere biogene Abfallstoffe. Während in einigen Statistiken auch Altpapier als erneuerbarer Abfall in trockener Form dem Energieholz zugeordnet wird, wird Altpapier in der Holzenergiestatistik nicht aufgeführt und somit nicht als Energieholz bewertet. Daneben fallen in der Gesellschaft auch erneuerbare Abfälle wie Klärschlamm und Nahrungsmittelabfälle an, die aufgrund des geringen Gehalts an Trockensubstanz nicht ohne Vorbehandlung thermisch verwertet, jedoch durch anaerobe Vergärung umgewandelt werden können. Da es sich dabei nicht um holzartige Stoffe handelt, sind diese in der Holzenergiestatistik nicht erfasst, obwohl es sich um erneuerbare Abfälle handelt. Die Kategorie 19 umfasst somit Anlagen zur Verwertung von Altholz und wird deshalb vereinfachend mit dem Begriff "Altholzfeuerungen" bezeichnet.
 - b) Die Definition von Kategorie 18 erfolgt anhand eines technischen Merkmals (WKK), während die Kategorie 19 anhand des Brennstoffs (Altholz) definiert wird. Altholz wird aber sowohl in Anlagen ohne als auch in Anlagen mit WKK genutzt und es existieren WKK-Anlagen, die ohne Altholz, mit Altholz sowie mit Mischungen von Altholz und anderen Holzbrennstoffen betrieben werden. Anhand der

Kategorien 18 und 19 ist deshalb keine eindeutige Zuordnung der Mengen an Altholz und der Mengen an in WKK-Anlagen genutztem Holz möglich.

Mit den oben zur Erläuterung eingeführten Begriffen zeigt Bild 2, dass die Nutzung von Energieholz bis 1990 hauptsächlich auf Stückholz basierte, das 1990 noch rund drei Viertel ausmachte und in Zentralheizungen und Einzelraumfeuerungen genutzt wurde. Seither sank der Stückholzverbrauch auf rund die Hälfte, während die Nutzung von Energieholz in automatischen Anlagen um über 300 Prozent zunahm und heute mehr als das Doppelte von Stückholz ausmacht. Ab 2000 erfolgte damit ein Ausbau der **Energieholznutzung ohne KVA** von rund 3 Mio. m³/a oder 30 PJ/a bzw. 8.3 TWh im Jahr 1990 auf mehr als 4.8 Mio. m³/a oder 48 PJ/a bzw. **13.3 TWh im Jahr 2019**. Dies entspricht gut 5.8 Prozent des schweizerischen Gesamtenergieverbrauchs (GEV). Wenn in KVA verwertetes Altholz ebenfalls als Energieholz bewertet wird, beträgt der Anteil rund 6.2 Prozent.

Während bis im letzten Jahrhundert Energieholz fast ausschliesslich zur Wärmeerzeugung genutzt wurde, erfolgte etwa ab dem Jahr 2000 ein signifikanter Zubau an Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (Kategorie 18). Dennoch zeigt die Holzenergie-Statistik, dass der Anteil an in WKK-Anlagen genutztem Holz lediglich rund 0.5 % des Gesamtenergieverbrauchs (angegeben als Endenergie) oder rund 10 % des Energieholzes entspricht. Da zudem die Jahresnutzungsgrade zur Wärmeerzeugung in Feuerungen mit einem Wert in der Grössenordnung von 80 % drei bis viermal so hoch sind wie diejenigen zur Stromproduktion in WKK-Anlagen und da auch WKK-Anlagen mehr Nutzwärme als Strom erzeugen, beträgt der Stromerzeugungsanteil aus Energieholz nur rund 3 %⁴.

Die heutige Energieholznutzung dient somit zu **über 97 % zur Wärmeerzeugung**. Der Hauptanteil davon dient zur Versorgung von Gebäuden mit Heizwärme und Warmwasser, wozu sowohl dezentrale Heizungen als auch zunehmend über mit automatischen Holzheizwerken versorgte thermische Netze zum Einsatz kommen. Ein Teil der Wärmeproduktion dient auch zur Erzeugung von Prozesswärme. Entsprechende Anlagen kommen seit Jahrzehnten in der holzverarbeitenden Industrie zum Beispiel zur Holztrocknung zum Einsatz. Daneben besteht ein zunehmendes Interesse an erneuerbar erzeugter Prozesswärme zum Beispiel in der lebensmittelverarbeitenden Industrie, wie das Beispiel der grössten vorwiegend mit Holzwärme betriebenen Bäckerei der Schweiz zeigt [10]. Wenn fossile Brennstoffe, darunter insbesondere Erdgas, auch für die Produktion von Zement, Glas und Keramikerzeugnissen nur noch beschränkt oder zu viel höheren Preisen als heute zur Verfügung steht, ist damit zu rechnen, dass einerseits die Preise für Energieholz deutlich steigen werden und andererseits eine Verschiebung der Nutzung zu Anwendungen für Hochtemperatur-Prozesswärme, wo eine Substitution durch Wärmepumpen nicht möglich ist, stattfinden wird. Da aus der Holzenergiestatistik weder der Anteil für Prozesswärme noch eine Information über das Temperaturniveau der Nutzwärme hervorgeht, wird der Beitrag von Energieholz zur ProzesswärmeverSORGUNG im Kapitel zu Prozesswärme ausgewiesen.

⁴ 10 % Anteil am Energieholz x z.B. 27 % Jahresnutzungsgrad) im Vergleich zu (Anteil Wärme von 90 % x 80 % + 10 % aus WKK x z.B. ebenfalls 27 %) = (2.7% / 75%) ergibt ein Verhältnis von Stromproduktion zu Wärmeproduktion von rund 3 %. Bei einer Wärmeproduktion von ca. 16 TWh/a x 80% = rund 13 TWh/a folgt eine Stromproduktion in der Grössenordnung von 3 % x 13 TWh/a oder rund 0.4 TWh/a

Tabelle 3 Zuordnung zwischen Anlagenkategorien und Energieholzsortimenten.

Die Begriffe in Klammern und die Einteilung der Energieholzsortimente werden in der vorliegenden Arbeit zur Vereinfachung eingeführt und dienen als Basis zur Beschreibung der Verwertungspfade.

Die Kommentare zu den Anmerkungen 1) bis 7) werden im nachfolgenden Text ausgeführt.

Anlagen-kategorie	Zusammenfassung von Kategorien	Energieholzsortiment				
		I Stückholz	II Holzpellets 2)	III naturbelas-senes Holz in nicht-stückiger Form 3)	IV nicht natur-belassenes Restholz inkl. Holzstaub 4)	V Altholz
1 bis 6	Einzelraum-feuerungen					
7 bis 11a	Gebäudeheizungen 1)		1)	1)	5)	
11b, 12b 14b, 16b	Feuerungen für Holzpellets (Pelletsfeuerungen)					
12 bis 17	Automatische Holzfeuerungen (inkl. Pelletsfeuerungen > 50 kW)		6)	6)	6)	
18	WKK			7)	7)	7)
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (Altholzfeuerungen)			7)	7)	7)
20	Altholz in KVA					

2.2.1.3. Potenzial an Energieholz nach Erhebungen bis 2019

Aufgrund der Daten von Kemmler et al. [1], Stettler [2] und Thees et al. [3] kommen Hammer et al. [4] im Jahr 2021 auf eine Schätzung des zusätzlichen Energieholzpotenzials von mindestens 40 Prozent der Nutzung (ca. 2.0 Mio. m³/a bzw. 20 PJ/a oder 5.6 TWh/a), wobei sie darauf hinweisen, dass die Grundlagendaten eine grosse Bandbreite aufweisen. Das mit Abstand grösste Zusatzpotenzial liegt bei Waldholz (inklusive Flurholz). Zudem ist zu berücksichtigen, dass jährlich rund 280'000 Tonnen Altholz (bzw. rund 5.0 PJ/a oder 1.4 TWh/a) ins Ausland exportiert werden. Eine vermehrte Verwertung dieses Altholzes in der Schweiz wäre aus energetischen und ökologischen Gründen sinnvoll. Vorliegend wird unter Annahme der Verwertung von Altholz in der Schweiz von einem **Energieholzpotenzial 2050** von 13.3 TWh/a (2019) plus 5.6 TWh/a (Mindest-Zusatzpotenzial ohne Altholz) plus 1.4 TWh/a (Altholz-Export) oder total **20.3 TWh/a** oder gerundet **20 TWh/a** ausgegangen.

2.2.2 Aktuelle Daten zu Energieholzverbrauch und -potenzial

Seit der Potenzialerhebung von Thees et al. im Jahr 2017 [3] sind zahlreiche zusätzliche Anlagen zur Nutzung von Energieholz realisiert worden. Nachfolgende Tabellen (Tabelle 4 und Tabelle 5) zeigen aktualisierte Daten zur Energieholznutzung von Holzenergie Schweiz nach Keel (2023) [11].

Keel geht davon aus, dass das Potenzial zu 80 % ausgeschöpft ist, sodass das Potenzial 125 % der heutigen Nutzung entspricht. Er schätzt den Verbrauch 2021 auf 5.845 Mio. m³/a und das Potenzial auf 6.945 Mio. m³/a, was ein verbleibendes Potenzial von 1.11 Mio. m³/a bzw. 11 PJ/a oder 3.0 TWh/a ergibt. Gleichzeitig weist er anhand von Statistiken der Kantone auf, dass in der Realisierung befindliche Projekte einen Zusatzverbrauch von 0.43 Mio. m³/a verursachen und dass für Projektideen weitere 0.47 Mio. m³/a voraussichtlich beansprucht werden, sodass insgesamt weitere 0.9 Mio. m³/a bereits sicher oder voraussichtlich verplant sind. Nach Realisierung dieser Projekte beträgt der Verbrauch 6.75 Mio. m³/a, womit das nachhaltig geschätzte Energieholzpotenzial praktisch ausgeschöpft ist bzw. bis zu 97 % ausgeschöpft ist, da damit noch ein marginaler Restbetrag von 0.2 Mio. m³/a verbleibt.

Dieser Betrachtung wird von Keel gegenübergestellt, dass das theoretische Potenzial an Waldholz in der Schweiz auf 10.7 Mio. m³/a geschätzt wird, während die Holzernte 2021 rund 5.0 Mio. m³/a betrug. Bei Anrechnung der 0.9 Mio. m³/a aus den Projekten und der Annahme, dass dafür einheimisches Waldholz genutzt wird, beträgt die Holzernte unterdessen rund 5.9 Mio. m³/a. Die Differenz zwischen dem theoretischen Potenzial des Schweizer Waldes und der heutigen Holzernte beträgt somit noch 4.8 Mio. m³/a oder 70 % der heutigen Nutzung.

Tabelle 4 Energieholzverbrauch im Jahr 2021 nach Feuerungskategorien [11]. Angaben in Kubikmeter umgerechnet auf Endenergie mit Annahme eines Heizwerts von 2.74 MWh/m³.

Energieholzverbrauch 2021 Feuerungskategorie	Menge	Endenergie	Anteil
	[m ³ /a]	[TWh/a]	[%]
Stückholzheizungen	1'103'237	3.0	20%
Holzschnitzelheizungen	1'947'646	5.3	36%
Pelletheizungen	656'430	1.8	12%
Altholzfeuerungen und WKK	1'701'944	4.7	31%
Total ohne KVA	5'409'257	14.8	100%

Tabelle 5 Energieholzverbrauch im Jahr 2021 und Energieholzpotenzial nach Holzkategorien [11]. Angaben in Kubikmeter umgerechnet auf Endenergie mit Annahme eines Heizwerts von 2.74 MWh/m³.

Holzkategorie	Verbrauch 2021	Potenzial	verbleibend
	[m ³ /a]	[m ³ /a]	[m ³ /a]
Waldholz	2'522'000	3'381'000	859'000
Landschaftspflegeholz	466'000	700'000	234'000
Restholz	1'317'000	1'317'000	0
Altholz	1'540'000	1'556'000	16'000
Total	5'845'000	6'954'000	1'109'000

Holzkategorie	Verbrauch 2021	Potenzial	verbleibend
	[TWh/a]	[TWh/a]	[TWh/a]
Waldholz	6.9	9.3	2.4
Landschaftspflegeholz	1.3	1.9	0.6
Restholz	3.6	3.6	0.0
Altholz	4.2	4.3	0.0
Total	16.0	19.1	3.0

2.2.3 Annahmen zum Potenzial

Im vorliegenden Bericht wird Prozesswärme separat bewertet. In den Daten nach Tabelle 4 zur Energieholznutzung dient ein Teil der Anlagenkategorien "Holzschnitzelheizungen" sowie "Altholzfeuerungen und WKK" auch für Prozesswärmе. Unter den Holzkategorien wird Prozesswärme vorwiegend dem "Restholz" und teilweise dem "Altholz" zugeordnet. Da in den Statistiken eine Zuordnung fehlt, wird vorliegend von folgenden Werten ausgegangen:

Energieholzverbrauch 2020: 16 TWh/a bezogen auf Endenergie

davon

Prozesswärme 2.6 TWh/a (siehe Kapitel Prozesswärmе), wovon 100% direkt

WKK 1.6 TWh/a (je zu 50% der Strom- und Wärmeproduktion zugeordnet)

Gebäudewärme ohne WKK = Rest = 11.8 TWh/a (wovon 0% für Spitzenlast)

Gebäudewärme aus WKK = + 0.8 TWh/a

Treibstoff und Pflanzenkohle: 0 TWh/a (die marginale Nutzung im Jahr 2020 wird vernachlässigt)

Energieholzpotenzial 2050: 20 TWh/a entsprechend einer Zunahme um 25%.

2.2.4 Luftreinhaltung

Die Energieholznutzung erfolgt über thermische Verfahren und dabei überwiegend über eine direkte Verbrennung. Eine beschränkte Anzahl von Anlagen verfügt über eine Vergasung, eine Verkohlung oder eine Pyrolyse mit anschliessender Verbrennung der freigesetzten Gase in einer Brennkammer oder einem Verbrennungsmotor. Alle thermischen Verfahren führen zur Freisetzung eines Abgasstroms, der mit Luftschatstoffen belastet ist, weshalb die stationären Anlagen zur thermischen Umwandlung von Energieholz der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) unterstehen. Wichtig für die nationalen Emissionen und für lokale Auswirkungen sind vor allem die Feinstaubemissionen. Dank Verbesserung der Anlagen, Verschärfung der LRV und Sensibilisierung der Betreiberinnen und Betreiber betreffend Brennstoffeinsatz und Anlagenbetrieb konnten die Feinstaubemissionen der Holzfeuerungen allerdings von über 6'000 Tonnen im Jahr 1990 auf rund einen Dritteln im Jahr 2019 reduziert werden (Bild 3 , [4]). Dennoch bestehen weiterhin Herausforderungen zur Einhaltung der LRV. Je nach Anlagentyp, Brennstoffart und Anlagengrösse betrifft dies weiterhin Feinstaub, wobei in Kleinfeuerungen vor allem Feinstaub aus unvollständiger Verbrennung (Russ und Teer) luftthygienisch kritisch ist, während automatische Holzfeuerungen bei sachgerechtem Betrieb nur geringe Emissionen an Russ und Teer verursachen und hauptsächlich salzartige Partikel aus Aschebestandteilen zu hohen Staubemissionen führen, welche in heutigen Anlagen zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte in der Regel durch Elektroabscheider oder Gewebefilter abgeschieden werden. Weitere Schadstoffe, die bei einzelnen Anlagen zu einer Überschreitung der Emissionsgrenzwerte führen können, sind Kohlenmonoxid (CO) und (seltener) auch flüchtige organische Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOC). In grösseren Anlagen kommt ab einem Massenstrom von 2500 Gramm pro Stunde auch ein Emissionsgrenzwert für Stickoxide (NO_x) zur Wirkung, der vor allem bei Energieholz mit erhöhtem Stickstoffgehalt kritisch sein kann oder den Einsatz von Sekundärmaßnahmen erfordern kann.

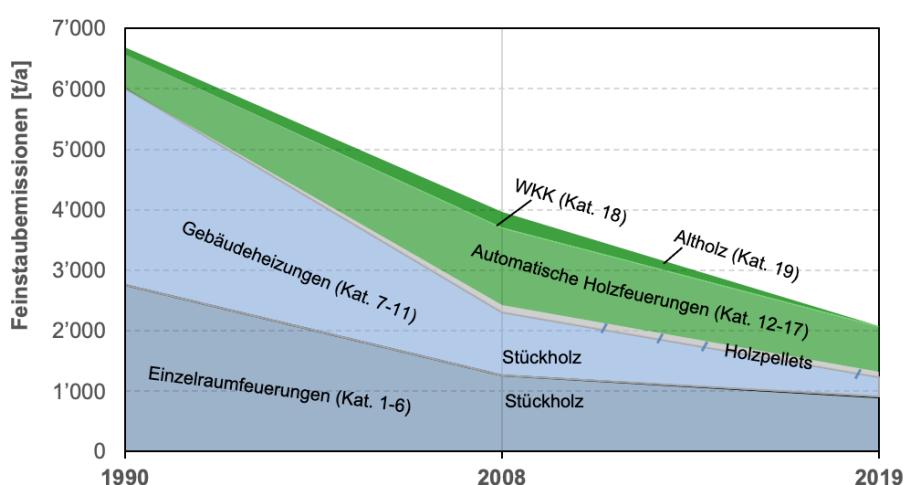


Bild 3 Feinstaubemissionen aus Holz- und Altholzfeuerungen (ohne Altholz in KVA) in der Schweiz in den Jahren 1990, 2008 und 2019. Grafik nach Verenum in [4] mit Holzverbrauch nach Holzenergiestatistik und Feinstaubemissionen nach BAFU-Emissionsfaktoren (Quellen in [4]).

2.3 Begriffe zur Energienutzung

In der vorliegenden Arbeit wird die Nutzung von Holz unter Einhaltung des Kaskadenprinzips vorausgesetzt und eine Bewertung der Verwertungspfade zur Nutzung von Energieholz beschrieben. Energieholz umfasst damit ausschliesslich solche Holzsortimente, die für eine hochwertige stoffliche Anwendung ungeeignet oder nur mit hohem Aufwand einsetzbar sind. Als Beurteilungskriterium für die Verwertungspfade von Energieholz dient die Ressourceneffizienz zur Umwandlung von Primärenergie über mehrere Prozessschritte bis zu Endenergie (z.B. Elektrizität oder Fernwärme) oder Nutzenergie (z.B. Antriebsenergie am Rad eines Fahrzeugs oder Heizwärme in einem Gebäude).

Die Begriffe Ressource und Primärenergie werden synonym verwendet. Somit sind auch die Begriffe Ressourceneffizienz und Primärenergieeffizienz Synonyme.

Die Ressourcen- oder Primärenergieeffizienz wird mit dem spezifischen **Primärenergieaufwand PE** beschrieben, der auch als **kumulierter Energieaufwand KEA** oder kurz **KE** und Englisch als Cumulative Energy Demand CED bezeichnet wird.

Der spezifische Primärenergieaufwand beschreibt das Verhältnis zwischen dem Primärenergieaufwand in MJ (oder einer anderen Energieeinheit) und einem daraus erzielten Nutzen, der eine funktionale Einheit umfasst. Wenn die funktionale Einheit Endenergie oder Nutzenergie ist, entspricht der spezifische Primärenergieaufwand einer dimensionslosen Grösse, für welche die Beziehung **PE \geq 1** gilt. In dem Fall handelt es sich um eine dimensionslose Grösse, deren Bedeutung aber oft durch Angabe einer Einheit z.B. in MJ/MJ beschrieben wird. Um Energieformen entlang der Nutzungskette zu unterscheiden, werden die Einheiten zum Teil auch mit einem Index zum Beispiel in Form von MJ_{prim}/MJ_{nutz} ergänzt⁵.

Wenn der Primärenergieaufwand in MJ/MJ angegeben wird, kann daraus auch der Kehrwert bestimmt werden, der als **Energie-Erntefaktor** oder kurz **Erntefaktor EF** bezeichnet wird. Für den Erntefaktor gilt die Bedingung **EF $\leq \eta_i$** , wenn η_i den Wirkungsgrad des Prozessschrittes i einer Prozesskette mit einer oder mehreren Umwandlungsschritten beschreibt. Für eine Holzheizung gilt zum Beispiel, dass der Erntefaktor für Wärme aus Holz kleiner ist als der Wirkungsgrad der Holzheizung, da im Erntefaktor zusätzliche Verluste der vor- und nachgelagerten Prozesse berücksichtigt werden.

Für den Wirkungsgrad des Prozessschrittes i gilt die Beziehung $\eta_i = \text{Nutzenergie} / \text{zugeführte Energie}$. Im Falle der chemischen Umwandlung von Holz und anderen Brennstoffen, die Wasserstoff und/oder Wasser enthalten, ist zu beachten, dass für eine exakte Bewertung von Prozessketten als zugeführte Energie der Brennwert und nicht der Heizwert einzusetzen ist, sodass für jeden Prozessschritt die Bedingung $\eta_i \leq 1$ gilt. Bei Verwendung des Heizwerts als Bezugsgrösse ist diese Bedingung nicht erfüllt. Im deutschsprachigen Raum wird für Wirkungsgradangaben aber der Heizwert als Bezugsgrösse verwendet. Um die Vergleichbarkeit mit Praxiswerten zu gewährleisten, gilt dies auch im vorliegenden Bericht. Die ausgewiesenen Wirkungsgradangaben sind damit systematisch höher als bei Verwendung des Brennwerts als Bezugsgrösse. Da jedoch im Bericht nur thermische Verfahren zur Verwertung von Energieholz miteinander verglichen werden, ist der Effekt für den Vergleich der Verwertungspfade von untergeordneter Bedeutung.

⁵ Indizes bei Einheiten sind nach dem Internationalen Einheitensystem (SI) unzulässig, in der Fachliteratur zu Lebenszyklusanalysen aber dennoch üblich.

Der Primärenergieaufwand kann wie zusätzlich folgt unterteilt werden:

Nichterneuerbarer Primärenergieaufwand	PE_{NE}
Erneuerbarer Primärenergieaufwand	PE_E

Damit gilt:

$$\text{Gesamter Primärenergieaufwand} \quad PE = PE_{NE} + PE_E \geq 1$$

$$\text{Gesamter Erntefaktor } EF = 1/PE \quad 0 \leq EF \leq 1$$

$$\text{Erntefaktor nichterneuerbarer Energieträger} \quad 0 \leq EF_{NE} \leq 1$$

Beispiel: Der Erntefaktor für Heizwärme aus Heizöl beträgt rund 0.7 bei einem Heizungswirkungsgrad von rund 0.85.
Der Unterschied ist eine Folge des Aufwands für die vorgelagerten Prozessschritte.

$$\begin{aligned} \text{Erntefaktor erneuerbarer Energieträger} & \quad EF_{NE} > 1 \text{ möglich} \\ \text{mit Zielwerten von} & \quad EF_{NE} \text{ sicher } > 2 \text{ und nach Möglichkeit } > 10 \end{aligned}$$

Beispiel: Der Erntefaktor EF für Heizwärme aus Holz beträgt rund 0.7 bei einem Heizungswirkungsgrad von rund 0.8.
Der Wirkungsgrad ist niedriger als bei einer Ölheizung, der vorgelagerte Aufwand dagegen kleiner.
Der nichterneuerbare Erntefaktor EF_{NE} für Heizwärme aus Holz beträgt oft mehr als 10, da der nichterneuerbare Primärenergieaufwand weniger als 0.1 MJ/MJ beträgt und der Energieinhalt von Holz nicht bewertet wird. Da Holz nur in begrenzter Menge verfügbar ist, sind Erntefaktoren an nichterneuerbarer Energie > 10 anzustreben. Bei Solarenergie können dagegen auch Systeme mit geringeren Erntefaktoren sinnvoll sein, da das Potenzial an Solarenergie den Energiebedarf bei Weitem übersteigt.

2.4 Begriffe zu Verfahren und Produkten: Verkohlung, Vergasung, Pyrolyse und Verbrennung

Durch Erwärmung von Biomasse unter Luftmangel können eine feste, eine gasförmige und eine flüssige Produktfraktion gebildet werden, die als Koks, Synthesegas und Pyrolyseöl bezeichnet werden und folgende Eigenschaften aufweisen:

- Das **Koks** besteht aus Kohlenstoff mit allfälligen Anteilen von Mineralstoffen und enthält im Idealfall keinerlei organische Substanz. Es ist daher weitgehend inert und langzeitstabil.
- Das **Synthesegas** ist ein brennbares Gas und enthält nebst N₂ vor allem CO₂, CO, H₂, CH₄, höherwertige Kohlenwasserstoffe, NH₃, H₂S und weitere flüchtige Verbindungen. Bei der Freisetzung des Synthesegases im Pyrolyseprozess enthält es auch bei Raumtemperatur kondensierende Verbindungen, die bei Abkühlung als Flüssigkeit anfallen.
- Das **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, wie in Kapitel 3.5 ausgeführt wird. 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 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 Koks 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 Anlage eine überstöchiometrische Luftzufuhr zur Oxidation aller Fraktionen stattfindet, handelt es sich um eine **Verbrennung**. Das Hauptprodukt ist dann ein **Abgas**, das keine chemisch gebunden Energie enthält, aber dafür den Grossteil der zugeführten Energie des Brennstoffs in Form 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 verunmöglicht wird.

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

3 Verwertungspfade

3.1 Gebäudewärme und Einfluss der Transportdistanz

Gebäudewärme umfasst die Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Fernwärme beschreibt die Wärmeverteilung von einer oder mehreren Heizzentralen über Grundstücksgrenzen hinweg. Viele Fernwärmennetze dienen hauptsächlich der Versorgung von Gebäuden auf einem Temperaturniveau der Netz-Vorlauftemperatur zwischen 70° C und 90°C. In wenigen Fällen kommen auch höhere Vorlauftemperaturen zum Einsatz, wobei für die in der Schweiz verbreiteten Kunststoffmantelrohre die Dauerbetriebstemperatur auf 120 °C bis 140 °C begrenzt ist [12]. Einige Netze dienen auch zur Verteilung für Prozesswärme auf diesem Temperaturniveau, während Hochtemperatur-Prozesswärme bei noch höheren Temperaturen in der Regel durch lokale Verbrennung von fossilen Brennstoffen und im Falle der Zementwerke zum Teil von brennbaren Abfällen und von Altholz bereitgestellt wird.

Alle Verwertungspfade verursachen einen vorgelagerten Energieverbrauch für die Bereitstellung und den Transport von Energieholz. Eine Untersuchung von Zimmer (2010) zeigt eine ökologische Bewertung zur Bereitstellung von Waldhackschnitzeln für die Substitution von Heizöl [13]. Die Resultate in Bild 4 oben zeigen, dass der Primärenergieverbrauch für die Bereitstellung von Waldhackschnitzeln im Fall von professionell bewirtschafteten Wäldern mit einer Transportdistanz von 30 Kilometern rund 1.5 % bis 1.9 % des im Holz enthaltenen Heizwerts ausmachen, wovon 0.25 % bis 0.5 % für den Transport anfallen.

Die Grafik in Bild 4 unten zeigt die Resultate zum Treibhauspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren (Global Warming Potential, GWP₁₀₀). Die Grafik zeigt allerdings die Resultate für den Kleinprivatwald, der nach der oberen Grafik rund dreimal so hohe energetische Vorleistungen verursacht wie der professionell bewirtschaftete Wald. In diesem Fall verursachen die vorgelagerten Prozesse zur Holznutzung etwa 20 kg CO₂-Äquivalente pro MWh Brennstoff oder rund 5 % der 420 kg CO₂-Äquivalente aus der Holzverbrennung. Für die Netto-Bewertung des GWP wird beim Holz vorab die C-Speicherung als Senke bewertet und im Anschluss die Holzverbrennung mit dem gleichen Wert als CO₂-Quelle bewertet, wodurch eine neutrale Bilanz resultiert. Wenn das Holz dagegen zur Substitution von Heizöl dient, resultiert eine GWP₁₀₀-Gutschrift von etwa 270 kg CO₂-Äquivalenten pro MWh.

Im Vergleich dazu geht das BAFU im Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen [14] von folgenden Werten aus, die sich ebenfalls auf Inputenergie beziehen, aber keine Vorleistungen enthalten:

Emissionsfaktor für Holz: 92 g/MJ oder 331 kg/MWh

Emissionsfaktor für Heizöl: 73.7 g/MJ oder 265 kg/MWh.

Die Bewertung zeigt, dass die Substitution von Heizöl durch Energieholz aus der Region eine hohe Effizienz in Bezug auf Primärenergie und Treibhausbelastung erzielen kann, da die mit fossiler Energie erbrachten Vorleistungen für die Holzernte und den Transport bei Transportdistanzen bis 30 km zu einer Zusatzbelastung in der Größenordnung von **1.5 %** für professionell bewirtschaftete Wälder und von **5 %** für Klein-Privatwälder führen. Im Beispiel wird die Energiebilanz ab 600 bis 1200 Kilometern negativ. Dies zeigt, dass lange Transportdistanzen zu vermeiden oder durch ökologischere Varianten als mit Diesel-LKW auszuführen sind.

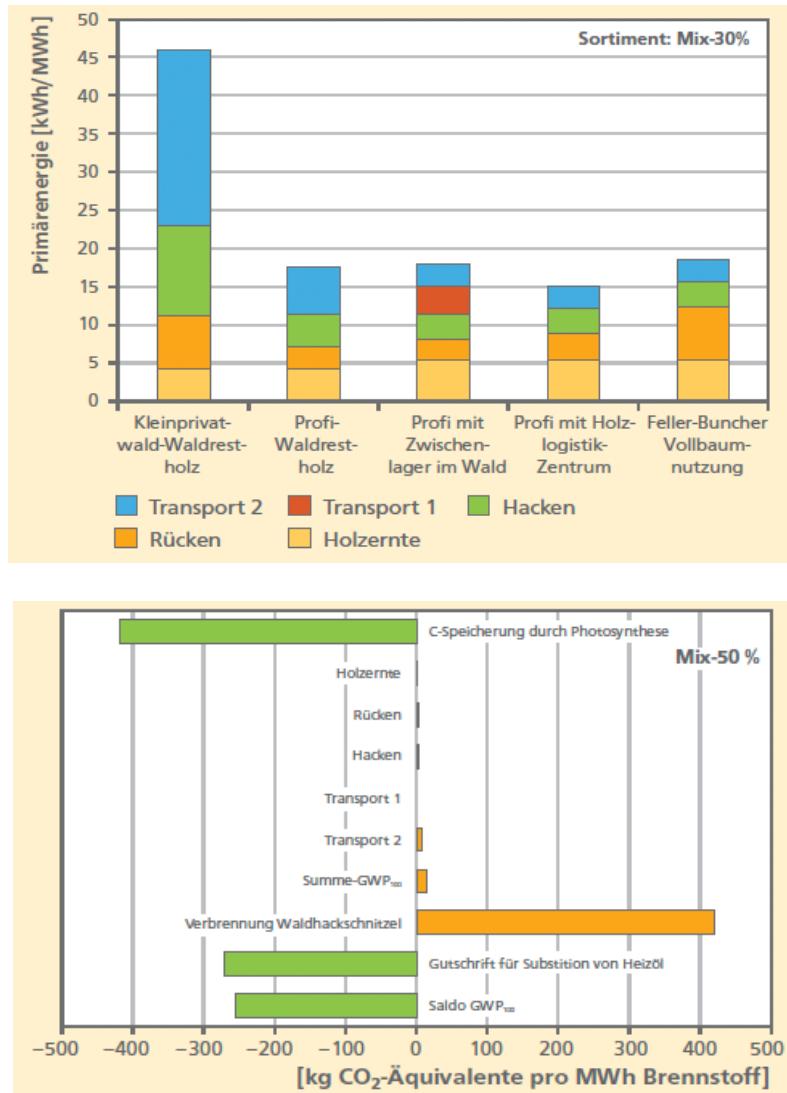


Bild 4 Oben: Primärenergieaufwand für Waldhackschnitzel. Für die professionell bewirtschafteten Wälder wird dabei von einer Transportdistanz von 30 Kilometern ausgegangen.
Unten: Treibhausgaspotenzial (GWP₁₀₀) am Beispiel des Kleinprivatwaldes [13].

Da Holzpellets eine deutlich höhere Energiedichte in MWh pro Kubikmeter aufweisen als Waldhackschnitzel, bietet sich für lange Transportdistanzen die Verwendung von Holzpellets an. Eine Bewertung nach Bild 5 zeigt den nichterneuerbaren Primärenergieaufwand in Abhängigkeit der Transportdistanz für verschiedene Anwendungen (Nussbaumer (2004) [15]). Für Holzpellets wird dabei eine Herstellung aus mit fossiler Energie getrocknetem Sägemehl angenommen, weshalb der Initialaufwand deutlich höher ist als für Waldhackschnitzel. Da die Energiedichte für den Transport rund dreimal höher ist, ist die Zunahme des Primärenergieaufwands für Holzpellets entsprechend geringer als für Waldhackschnitzel. Beim Einsatz zur Wärmeerzeugung ohne Fernwärmeverteilung wird ab 821 km Distanz eine geringerer Energieaufwand für Holzpellets als für Waldhackschnitzel erzielt. Mit über 40 % ist die nichterneuerbare Primärenergie für die Versorgungskette allerdings für beide Versorgungswege bereits weit über einem akzeptablen Wert, was zeigt, dass deutlich kürzere Transportdistanzen anzustreben sind, wobei die oben angenommenen 30 km als unkritisch beurteilt werden.

Für Holzpellets ist zudem vorab eine Trocknung mit erneuerbarer Energie vorauszusetzen (wodurch der Initialaufwand auf weniger als einen Fünftel absinkt), während zwar auch kurze Transportdistanzen anzustreben sind, diese aber im Vergleich zu Waldhackschnitzeln rund dreimal so lang sein können. Für Überseetransporte kommen zwar wesentlich effizientere Schiffstransporte zum Einsatz, in einer Publikation von Schlesinger (2018) [16] wird aber ausgeführt, dass die Herstellung von Holzpellets aus Wäldern in den USA und deren Transport zu Kraftwerken in Europa zur Folge hat, dass 25 % der gesamten CO₂-Emissionen aus Vorleistungen stammen, was bezogen auf den Energieinhalt einem Drittel entspricht. Aus diesem Grund und weil der Überseetransport fragwürdig ist, da die USA selbst Kohlekraftwerke betreiben, wird diese Nutzungsart infrage gestellt. Obwohl die Holzpellets im Beispiel [16] zur Versorgung von Kraftwerken dienen, gilt dies auch für andere Nutzungsarten von Holzpellets und noch verstärkt für alle nicht kompaktierten Energieholzsortimente.

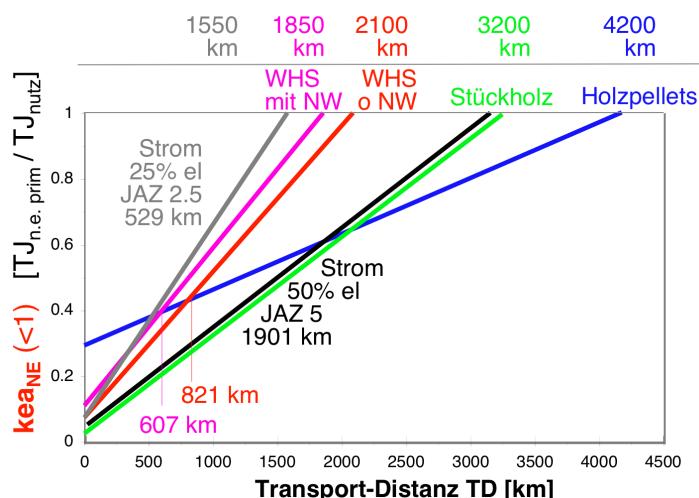


Bild 5 Nichterneuerbarer Primärenergieaufwand bzw. kumulierter Energieaufwand ke_{NE} als Funktion der Transportdistanz. Fahrtdistanz = 2 TD (leere Rückfahrt) mit Diesel-LKW. Elektrizität ist mit einem Faktor 2.5 des Energieinhalts von Holz bewertet. Für Holz wird eine fossile Trocknung angenommen. WHS: Waldhackschnitzel. NW: Nahwärme bzw. Fernwärme [15].

Der Einfluss der Transportdistanz wird von Hennenberg et al. (2022) [17] für Deutschland bzw. die EU im Zusammenhang mit der Erneuerbare Energien Richtlinie (RED II, European Commission 2018) beschrieben. In Art. 29.10 werden Minderungsziele für die Treibhausgasemissionen für Biomassetypen aufgeführt. Für feste Biomasse zur Nutzung in den Sektoren Strom und Wärme/Kälte gilt für ab dem 1.1.2021 in Betrieb gesetzte Anlagen ein Grenzwert von 70 % THG-Minderung. Für ab dem 1.1.2026 in Betrieb gehende Neuanlagen wird der Grenzwert auf **80 % THG-Minderung** angehoben. Tabelle 6 zeigt einen Auszug der als Standardwerte angenommenen Treibhausgasminderungen für die wichtigsten Anwendungstypen. Die vollständige Liste umfasst zusätzliche Sortimente zu Holz aus Kurzumtrieb mit und ohne Düngung, die im vorliegenden Bericht nicht betrachtet werden.

Tabelle 6 Standardwerte zur Treibhausgasminderungen im Rahmen der RED II [17].

Produktionspfad	Fall	Holztyp	Bioenergietypr	THG-Minderung (Standardwert für Wärme)			
				1 bis 500 km	500 bis 2.500 km	2.500 bis 10.000 km	über 10.000 km
Transportdistanz							
Holzschnitzel aus Stammholz	--	WDH	HS	92%	88%	79%	61%
Holzbriketts oder -pellets aus Stammholz	Fall 1	WDH	HP	49%	49%	47%	40%
	Fall 2	WDH	HP	73%	73%	70%	64%
	Fall 3	WDH	HP	91%	91%	88%	82%
Holzschnitzel aus forstwirtschaftlichen Reststoffen	--	WRH	HS	91%	87%	78%	60%
Holzbriketts oder -pellets aus forstwirtschaftlichen Reststoffen	Fall 1	WRH	HP	49%	49%	47%	40%
	Fall 2a	WRH	HP	72%	72%	70%	63%
	Fall 3a	WRH	HP	90%	90%	88%	81%
Holzschnitzel aus Industriereststoffen	--	IRH	HS	93%	90%	80%	63%
Holzbriketts oder -pellets aus Reststoffen der Holzindustrie	Fall 1	IRH	HP	69%	70%	67%	61%
	Fall 2a	IRH	HP	84%	84%	82%	75%
	Fall 3a	IRH	HP	94%	94%	92%	85%

Quelle: RED II (EC 2018). Rot = Standardwert erfüllt die Anforderung nur bis 31.12.2025 (70% <= Standardwerte < 80%); rot und fett = erfüllt die Anforderung auch ab 1.1.2026 (Standardwert >= 80%).

Fall 1 bezieht sich auf Verfahren, in denen ein Erdgaskessel genutzt wird, um der Pelletpresse Prozesswärme zu liefern. Die Elektrizität für die Pelletpresse stammt aus dem Stromnetz.

Fall 2a bezieht sich auf Verfahren, in denen ein mit vorgetrockneten Schnitzeln betriebener Holzschnitzelkessel genutzt wird, um Prozesswärme zu liefern. Die Elektrizität für die Pelletpresse stammt aus dem Stromnetz.

Fall 3a bezieht sich auf Verfahren, in denen ein mit vorgetrockneten Holzschnitzeln betriebener KWK-Kessel genutzt wird, um der Pelletpresse Elektrizität und Wärme zu liefern.

WDH = Waldderholz, WRH = Waldrestholz, IRH = Industrierestholz, KUP = Holz aus Kurzumtriebsplantagen, HS = Holzschnitzel, HP = Holzpellets/-briketts

Markierung: rot + fett: >= 80%; rot + nicht fett: < 80% und >= 70%; schwarz +nicht fett: < 70%

Hennenberg et al. leiten aus den Standardwerten folgende Tendenzen ab:

- "Die Transportdistanz verschlechtert die THG-Minderung deutlich.
- Der Einsatz von erneuerbarer Energie verbessert die THG-Minderung deutlich.
- Wird erneuerbare Energie im Prozess für Strom und Wärme eingesetzt und beträgt die Transportdistanz bis zu 2'500 km, liegen alle Standardwerte über dem Grenzwert von 80 %. Das Kriterium zur THG-Minderung ist bis 2030 erfüllt.
- Wird erneuerbare Energie im Prozess für Strom und Wärme eingesetzt und beträgt die Transportdistanz 2'500 bis 10'000 km, liegen alle Standardwerte über 70 % (Grenzwert bis 31.12.2025) und z.T. auch über 80 % (Grenzwert ab 1.1.2026).
- Holzpellets aus Stammholz und Waldrestholz liegen auch bei einer Transportdistanz von mehr als 10'000 km über 80 % (Grenzwert ab 1.1.2026), wenn erneuerbare Energie im Prozess für Wärme und Strom eingesetzt wird."

Wenn nach Hennenberg et al. 79 % THG-Minderung mit Holzschnitzeln bei einer Transportdistanz von 2500 bis 10'000 km erreicht werden, müsste eine ungefähr 5-fache Transportdistanz von 12'500 km bis 50'000 km dem Energieinhalt der Holzschnitzel entsprechen. Im Beispiel von Zimmer (2010) [13] für eine regionale Versorgung wäre dies theoretisch jedoch bereits nach ungefähr 600 km bis 1200 km erreicht, während dies nach Nussbaumer (2004) [12] für den Transport von Waldhackschnitzeln mit Diesel-LKW nach rund 1550 km bis 2100 km eintritt. Die nach Hennenberg et al. ausgewiesenen Transportdistanzen sind im Vergleich zu den anderen Quellen deshalb deutlich länger und werden im Sinne einer vorsichtigen Beurteilung der Transporte im vorliegenden Bericht nicht als Entscheidungsbasis verwendet.

Im Jahr 2000 wurde von Kessler et al. [18] im Auftrag des damaligen Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (heute BAFU) eine Ökobilanz zum Vergleich der Umwelteinwirkungen von Heizungen mit Heizöl, Erdgas und Holz erstellt. Bild 6 oben zeigt die Original-Grafik der Resultate mit drei Varianten zur Gewichtung des Treibhauseffekts. Bild 6 unten zeigt eine von Nussbaumer (2004) [15] daraus abgeleitete Grafik mit einer zusätzlichen Variante für Holzpellets. Zudem sind in den Balken des Szenarios "tief" die Hauptquellen des jeweiligen Umweltschadens eingetragen, nämlich NO_x und SO₂ für Heizöl sowie NO_x (knapp 40 %) und PM (Particulate Matter, Feinstaub, knapp 60 %) für Holz. Bei Heizöl ist für das Szenario "hoch" CO₂ als Hauptquelle aufgeführt. Mit der in der Zwischenzeit erhöhten Priorität des Klimaschutzes wird für die Interpretation davon ausgegangen, dass heute das Szenario "hoch" als relevanter Fall zu bewerten ist. Für dieses Szenario zeigt der Vergleich, dass die Substitution von fossilem CO₂ die Ökobilanz dominiert und Energieholz rund einen Drittels der Umweltbelastung von Heizöl verursacht. Zudem wird die ökologische Belastung der Holzheizungen Stand 2020 durch NO_x und Feinstaub dominiert, während fossiles CO₂ zur Bereitstellung des Holzes und der Infrastruktur für Stückholz und Waldhackschnitzel einen geringen Anteil ausmacht. Für den Stand 2023 liegt keine aktualisierte Ökobilanz vor, aber aufgrund der in Bild 3 gezeigten Situation, dass die Feinstaubemissionen aus Holzheizungen seit 2000 deutlich reduziert wurden und Feinstaub im Jahr 2000 mehr als die Hälfte der ökologischen Belastung ausmachte, kann abgeschätzt werden, dass die Umweltbelastung der Varianten Stückholz und Waldhackschnitzel in der Zwischenzeit um mehr als 40 % gesunken sind und der Vorteil der Holzheizungen gegenüber einer Ölheizung damit auf mehr als einen Faktor 5 gestiegen ist.

Für die Holzpellets ist zu beachten, dass es sich um eine Abschätzung anhand der im Vergleich zu den anderen Kategorien damals rund 50 % niedrigeren Emissionen an NO_x und Feinstaub handelt. Gleichzeitig wurde von einer fossil betriebenen Trocknung von Sägemehl ausgegangen, was damals üblich war, aber heute unüblich und künftig ausgeschlossen ist, weshalb der CO₂-Beitrag von Holzpellets aus der Schweiz auf weniger als die Hälfte des damals ausgewiesenen Wertes gesunken ist.

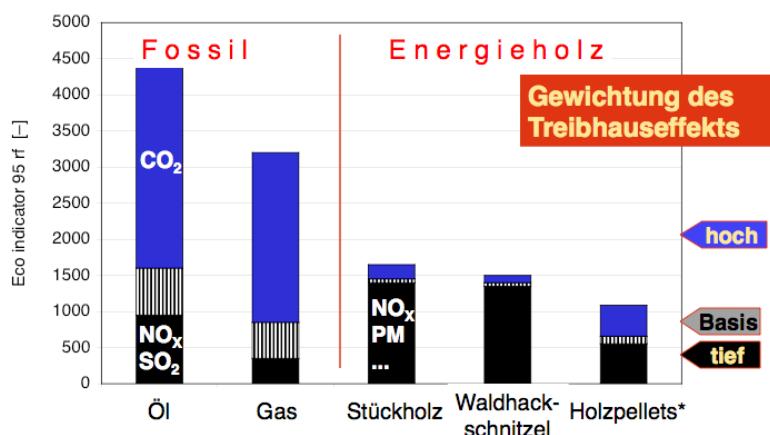
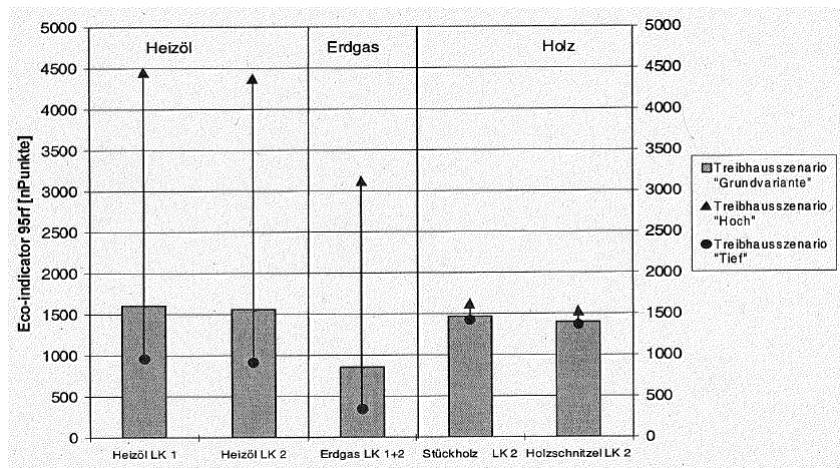


Bild 6 Umweltbelastung als Eco Indicator-Punkte pro TJ Nutzenergie für Heizungen mit Heizöl, Erdgas, Holz und Holzpellets für drei Gewichtungsvarianten des Treibhauseffekts „hoch“, „mittel“ und „tief“.

Oben: Original-Grafik nach Kessler et al. (2000) [18].

Unten: Grafik nach Daten von [18] ergänzt mit Werten für Holzpellets nach Nussbaumer (2004) [15] mit Daten zur Herstellung von Holzpellets mit Trocknung mit Heizöl nach Hasler & Nussbaumer (2001) [19] und Annahme der Emissionswerte von 50 % NO_x und PM₁₀ von Waldhackschnitzeln plus 20 % Heizöl für Trocknung und Pelletierung.

3.2 Prozesswärme

Wie in der Einleitung ausgeführt, verursacht die Prozesswärme rund 12.5 % des Endenergieverbrauchs der Schweiz oder 26 TWh/a. Für das Potenzial zur Substitution durch Holz ist eine Unterscheidung nach Anwendungszweck und Temperaturniveau entscheidend. Da zum Temperaturniveau keine Informationen vorliegen, wird von folgender Einteilung ausgegangen: Bis etwa 75° ist der Einsatz von Wärmepumpen mit hoher Effizienz zur Nutzung erneuerbarer Elektrizität möglich und es wird vorausgesetzt, dass (entsprechend einer Jahresarbeitszahl von mehr als 3.0) weniger als ein Drittel der Nutzwärme aus Elektrizität und mehr als zwei Drittel aus Umgebungswärme oder Abwärme stammen. Für deutlich höhere Temperaturen ab 90°C bis 100°C wird der Einsatz von Wärmepumpen mit Umgebungswärme als Quelle ausgeschlossen. Für solche Anwendungen kommt die direkte Umwandlung von Elektrizität in Wärme mit einem Wirkungsgrad oder die Nutzung eines Brennstoffs infrage. Mögliche Brennstoffe sind:

- biogene Energieträger und Abfälle in direkter Form wie zum Beispiel Energieholz
- aus Biomasse produzierte Sekundärenergieträger wie Biogas aus der Vergärung von Biomasse mit geringem Ligningehalt oder Holzgas aus einer Holzvergasungsanlage.

Die Nutzung von nicht biogenen Abfällen und daraus produzierten Sekundärenergieträgern wird zur Beurteilung der Verwertungspfade von Holz nicht betrachtet.

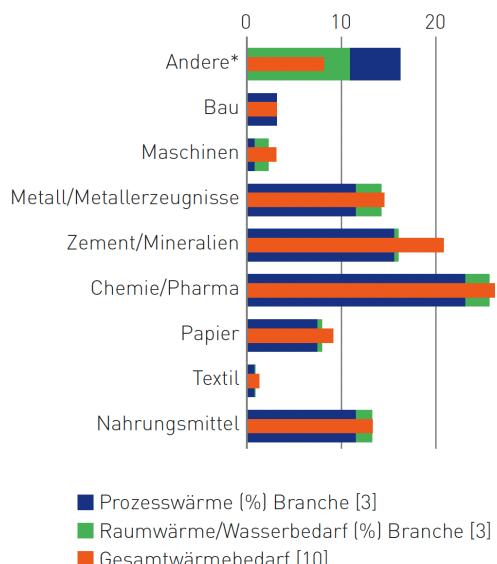


Bild 7 Prozentualer Anteil an totalem Energiebedarf für Raumwärme/Warmwasser bzw. Prozesswärme in der Industrie [6]. Andere: u.a. Bergbau, Medien (Druck), Holz und Kunststoffverarbeitung, Fahrzeugbau.

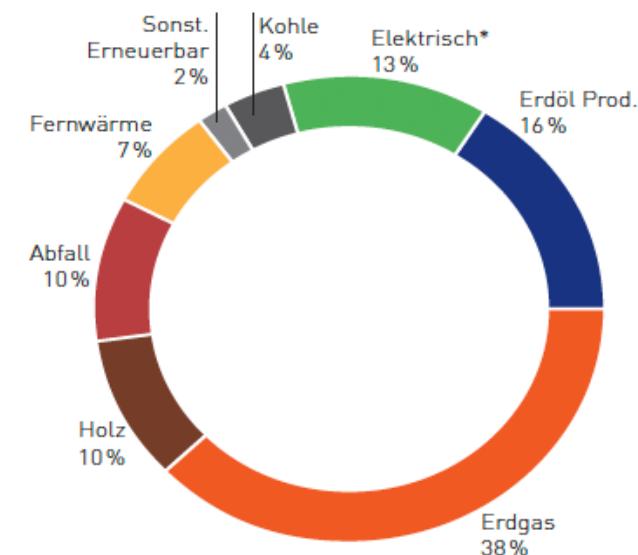


Bild 8

Aufteilung der Energieträger für thermische Energie in der Industrie [6].

Die Prozesswärme verteilt sich nach Bauer et al. (2019) [6] wie in Bild 7 gezeigt auf folgende Branchen⁶:

1. Chemie und Pharma: 25 %
2. Zement und Mineralien: 16 % bis 20 %
3. Metalle: 14 %
4. Nahrung: 13 %
5. Papier: 8 %
6. Holzindustrie, Kunststoff, andere: 6 %
7. Bau, Maschinen, Textil: 6 %.

Es ist davon auszugehen, dass bei Metallen ein relevanter Anteil elektrisch erzeugt wird, während in der Holzindustrie, in der Papierindustrie und in Zementwerken ein relevanter Teil der Prozesswärme durch Holz, Altholz und Abfälle (zum Beispiel Altreifen) erzeugt wird. In allen anderen Branchen ist davon auszugehen, dass die Versorgung zum überwiegenden Teil durch fossile Energieträger erfolgt. Da Angaben zum Temperaturniveau der Prozesswärme fehlen, wird das Substitutionspotenzial anhand der bisher genutzten Energieträger nach Bild 8 wie folgt abgeschätzt:

Gruppe 1: Wie Bild 8 zeigt, werden **10 %** der industriellen **Prozesswärme mit Holz**, gedeckt, was bei einem Prozesswärmeverbrauch von 26 TWh/a rund **2.6 TWh/a** entspricht.

Daneben werden **58 %** der industriellen **Prozesswärme fossil** (d.h. mit Erdöl, Erdgas und Kohle in dieser Reihenfolge) bereitgestellt, was dem in Kapitel 2 eingeführten Wert von **15 TWh/a** entspricht.

Dieser Anteil kann potenziell zu 100 % und in der praktischen Anwendung zumindest zum überwiegenden Teil mit Energieholz substituiert werden. Für zahlreiche Anwendungen ist der Ersatz durch direkte Nutzung von Energieholz möglich. Dies gilt für alle Prozesswärme in Form von Dampf oder Wärmeträgeröl (z.B. in der Chemie) und in vielen Fällen auch für im Prozess durch Verbrennung erzeugte Hochtemperaturwärme (z.B. in Zementwerken). Für einzelne Anwendungen ist voraussichtlich die Umwandlung zu einem Sekundärenergieträger erforderlich (z.B. Holzgas zum Ersatz von Erdgas in der Glasherstellung). Für einzelne Prozesse sind bei Verknappung der Energie eine Umstellung auf andere Produkte oder Herstellungsverfahren oder in einzelnen Fällen eine Umstellung auf eine elektrische Versorgung zu erwarten. Wenn gleichzeitig davon ausgegangen wird, dass der überwiegende Teil der fossil erzeugten Prozesswärme Temperaturen über 90 ° bis 100 °C benötigt, entsprechen die 15 TWh/a der maximal durch Energieholz zu substituierende Prozesswärme. Es wird angenommen, dass die Hälfte oder **7.5 TWh/a** durch direkte Verbrennung von Energieholz zur Dampferzeugung oder zur Verbrennung in industriellen Öfen (z.B. in Zementöfen) genutzt werden kann, während für die andere Hälfte von **7.5 TWh/a** eine Holzvergasung zur Substitution von Erdgas erforderlich ist (z.B. für die Glasherstellung).

Gruppe 2: Elektrizität trägt derzeit zu 13 % bei. Bei diesen Prozessen ist davon auszugehen, dass die Versorgung auch in Zukunft mit Elektrizität erfolgen wird.

Gruppe 3: Die restlichen 29 % der Prozesswärme stammt aus Holz, Abfall, Fernwärme und sonstigen Erneuerbaren. Bei diesen Anwendungen wird ebenfalls keine Umstellung erwartet.

⁶ Die Summe der in Bild 8 und im Text von Bauer et al. ausführten Werte ergibt rund 90 % statt 100 %, was möglicherweise auf eine unpräzise Abgrenzung der Gebäudewärme in der Industrie zurückzuführen ist.

3.3 Mobilität mit Holz durch Biotreibstoffe und Elektrizität

Zur Nutzung von Holz zur Mobilität kommen zahlreiche Konzepte infrage. Die wichtigsten Varianten können in folgende Kategorien unterteilt werden:

1. Produktion von Biotreibstoff aus Holz

- Flüssige Treibstoffe zum Ersatz fossiler Treibstoffe wie Benzin, Diesel und Kerosin für Fahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge, also "Biomass-to-Liquids" (BtL) über eine Vergasung von Holz mit anschliessender Synthese zum Beispiel wie in Bild 9 zu Fischer-Tropsch (FT)-Diesel.
- Methansynthese als gasförmiger Treibstoff zum Ersatz von fossilem Erdgas in Fahrzeugen.
- Synthese von Wasserstoff
 - als Treibstoff für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und Flugzeuge mit Gasturbinen
 - als Treibstoff für Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge, also Fahrzeuge mit On-board Stromerzeugung in Brennstoffzellen zum Antrieb von Elektromotoren.

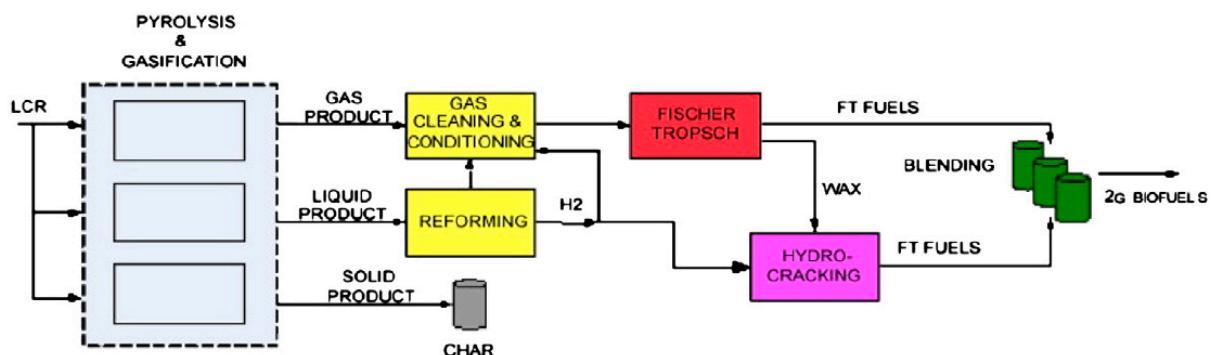


Bild 9 Verfahrensfließbild der Herstellung von Flüssigtreibstoff aus Biomasse (Biomass-to-Liquids, BtL) durch Vergasung und Fischer-Tropsch-Synthese zu FT-Diesel nach Sunde et al. 2011 [20].

2. Produktion von Strom aus Holz (auch mit Wärme-Kraft-Kopplung) und Nutzung des Stroms für Batterie-Elektrofahrzeuge

Im Alltag wird oft zwischen Elektrofahrzeugen und "Verbrennern" unterschieden. Eine Unterteilung in diese zwei Kategorien ist aber ungeeignet zur Beschreibung von Brennstoffzellenfahrzeugen, da diese mit einem Treibstoff betankt, aber elektrisch angetrieben werden, wobei die Stromproduktion im Fahrzeug ("On-board") erfolgt. Im vorliegenden Bericht werden folgende Begriffe verwendet:

- Brennstoffzellenfahrzeuge werden der Gruppe "Biotreibstoffe" zugeordnet, obwohl sie aufgrund des Antriebskonzepts Elektrofahrzeuge sind.
- Der Begriff "Elektrofahrzeug" wird für mit Batterien betriebene Elektrofahrzeuge oder kurz Batteriefahrzeuge verwendet. Daneben sind auch mittels Stromübertragung betriebene Elektrofahrzeuge im öffentlichen Verkehr auf Schienen und Strassen etabliert und im Privatverkehr möglich. Die Unterscheidung zwischen Batterie und Stromübertragung ist für die vorliegende Betrachtung jedoch unbedeutend und wird deshalb nicht weiter beachtet.

Die Kategorie "Strom aus Holz" bezieht sich unabhängig vom Umwandlungsverfahren auf Konzepte zur Elektrizitätsproduktion in stationären Anlagen und umfasst potenziell auch den Einsatz von (stationären) Brennstoffzellen.

Beispiel 1: Elektromobilität mit Holz

An der ETH Zürich wurden von Yazdanie et al. (2013) [21] der Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen verschiedener Konzepte zum Antrieb von Fahrzeugen untersucht. Als Referenz dient ein mit Benzin betriebener Personenwagen mit 1350 kg Leergewicht und 70 kW Leistung und einer Fahrleistung über die gesamte Lebensdauer von 150 000 Kilometer. Für Batteriefahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge wird eine Reichweite von 180 km und für Plug-in-Hybridfahrzeuge eine rein elektrische von 60 km angenommen. Für die Interpretation ist deshalb zu beachten, dass Elektrofahrzeuge mit gleicher Reichweite wie das Benzinfahrzeug eine schlechtere Bilanz als die in der Studie angenommenen Elektrofahrzeuge aufweisen. Andererseits wurden seit der 2014 publizierten Studie bei der Batterietechnologie grössere Fortschritte erzielt als bei Verbrennungsmotoren, was diesen Unterschied zu einem gewissen Teil kompensieren kann.

Bild 10 zeigt diejenigen Resultate der Studie, welche ein Konzept zur Nutzung von **Energieholz** für Fahrzeug-Mobilität umfasst. Dabei werden die Nutzung von Stückholz, Holzschnitzeln und Holzpellets unterschieden. Das Energieholz wird in allen drei Fällen durch Vergasung zu Synthesegas umgewandelt und im Anschluss unter Verwendung von Elektrizität aus einer mit Holz betriebenen WKK-Anlage zu **Wasserstoff** veredelt, der zum Antrieb eines Brennstoffzellenfahrzeugs dient. Dies entspricht der Variante 1c2 in Bild 10 zeigt. Der Vergleich zeigt, dass das Benzinfahrzeug einen Primärenergieverbrauch von rund 2.2 MJ mit 155 g CO₂-Äquivalenten pro Kilometer verursacht, während das Konzept mit Holzschnitzel rund 2.5 MJ Primärenergie und 10 g CO₂-Äquivalente pro Kilometer verursacht. Stückholz schneidet mit 2.3 MJ und 5 g CO₂ etwas besser ab, Holzpellets weisen mit rund 2.8 MJ und 15 g CO₂-Äquivalente einen etwas höheren Aufwand auf. Das optimistische Konzept mit Stückholz wird für die vorliegende Untersuchung nicht weiterverfolgt, da Vergasungsanlagen im für BtL relevanten Leistungsbereich mit Schüttgütern betrieben werden. Der pessimistische Fall von Holzpellets wird ebenfalls nicht weiter betrachtet, da eine Pelletierung für den Betrieb von Vergasungsanlagen in diesem Leistungsbereich in der Regel nicht erforderlich ist. Somit dienen folgende Werte als Basis zum Vergleich der Mobilität:

Das Benzinfahrzeug verursacht 2.2 MJ Primärenergieaufwand und 155 g CO₂-Äquivalente pro Kilometer. Holzschnitzel verursachen 2.5 MJ Primärenergieaufwand und 10 g CO₂-Äquivalente und somit rund 1.15-fach höheren Primärenergieverbrauch bei über 90 % geringeren CO₂-Emissionen. Die Unterscheidung zwischen erneuerbarer und nichterneuerbarer Primärenergie ist im Primärenergieaufwand nicht erkennbar, zeigt sich jedoch in der unterschiedlichen CO₂-Intensität. Allerdings ist zu beachten, dass die Studie nicht die heutige Fahrzeugflotte repräsentiert, da heutige Fahrzeuge in der Schweiz mit Verbrennungsmotoren und noch ausgeprägter mit Elektromotoren deutlich höheres Gewicht, deutlich höhere Leistung und um mehr als einen Faktor 5 grössere Reichweiten als in der Studie angenommen aufweisen. Für den Vergleich ist zudem zu beachten, dass die Daten des Benzinfahrzeugs eine etablierte Technologie beschreiben und deshalb ausgeschlossen werden kann, dass der Primärenergieaufwand und die CO₂-Emissionen deutlich unterschätzt werden. Demgegenüber werden für die Variante mit Energieholz für die Holzvergasung, für die Wasserstoffproduktion und auch für die Brennstoffzellen Technologien vorausgesetzt, die nicht im kommerziellen Einsatz stehen, weshalb die Umwandlungswirkungsgrade dieser Teilschritte unklar sind und die erzielbaren Verbrauchswerte deshalb auch deutlich höher sein können.

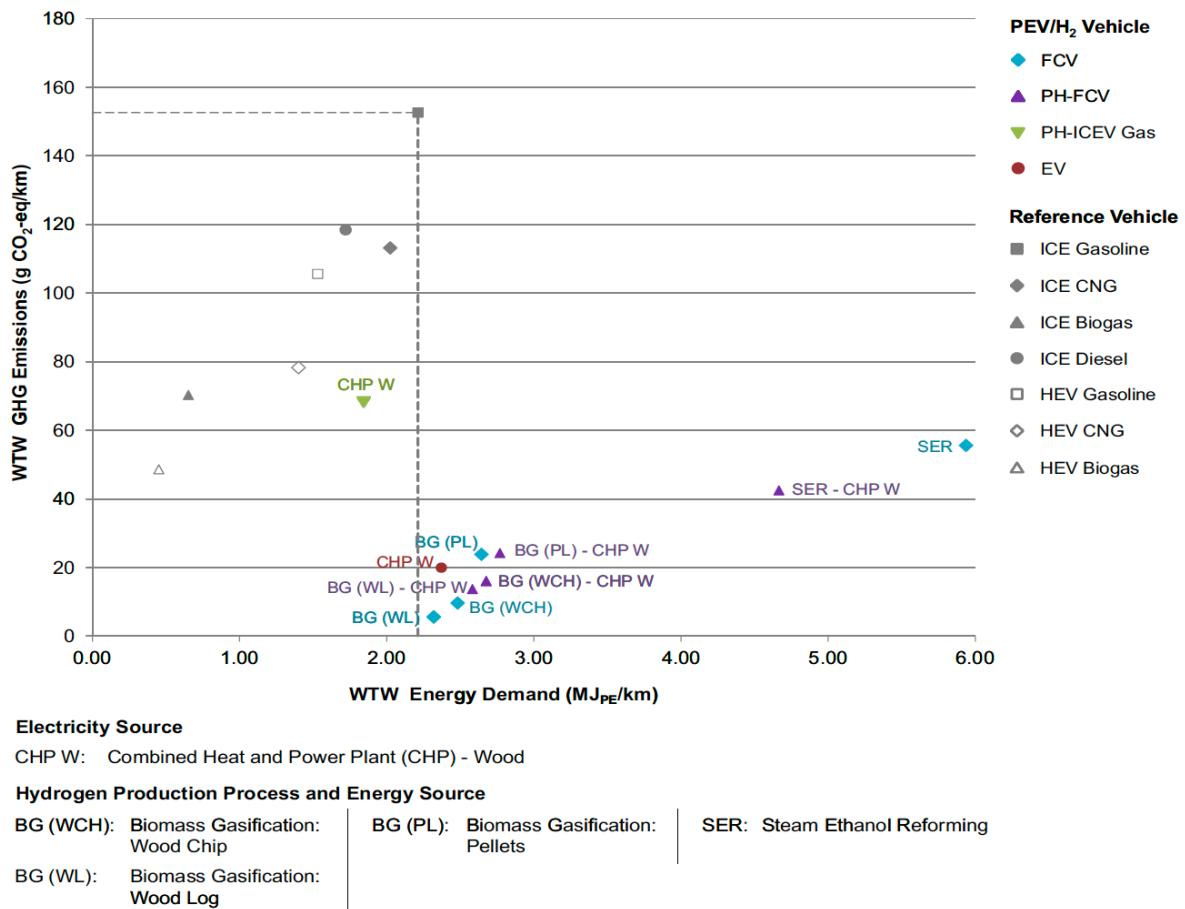


Bild 10 Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen zum Antrieb von Fahrzeugen (WTW energy demand und WTW THG-Emissionen) durch direkte Energieumwandlungspfade aus Biomasse (Holz) für Antriebsstränge auf der Grundlage von Referenz-Fahrzeugeigenschaften nach [21].

Beispiel 2: Biomass-to-Liquids (BtL)

Die Untersuchung der ETH [21] weist für die Mobilität mit Holz lediglich einen rund 1.15-fachen Primärenergieaufwand im Vergleich zu Benzin aus, während zahlreiche in der Review-Studie von Sunde et al. (2011) [20] beschriebenen Studien für BtL-Fahrzeuge einen rund doppelt so hohen Primärenergieaufwand wie für Diesel-Fahrzeuge ausweisen. So wird in [20] zum Beispiel von Fleming et al. (2006) ein Faktor 1.9 bis 2.1 zitiert und von Choudhury et al. (2002) von ungefähr 2. Für die in [20] zitierte Untersuchung zu Waldholz aus der Schweiz von Jungbluth et al. (2008) wird eine Einsparung an fossiler Energie zwischen 37 % und 61 % beschrieben, während die THG-Emissionen mit 60 g CO₂-Äquivalente pro Kilometer ein Mehrfaches der von Yazdanie et al. (2012) ausgewiesenen rund 10 g beträgt, was auch eine viel geringere relative Einsparung zur Folge hat. Da der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen von zahlreichen Faktoren abhängig sind und die Studien unterschiedliche Szenarien beschreiben, sind diese Werte nicht direkt mit der ETH-Studie vergleichbar, sie weisen aber insgesamt auf deutlich geringere Einsparungen als von der ETH in [21] abgeschätzt hin.

Um trotz der eingeschränkten Vergleichbarkeit eine Einschätzung des potenziellen Nutzens von BtL zu ermöglichen, können folgende Kenngrössen abgeleitet werden:

Kenngrösse 1: Umwandlungswirkungsgrad

In der Review-Studie von Sunde et al. (2011) [20] werden von fünf Studien ein BtL-Wirkungsgrad ausgewiesen. Die Bandbreite beträgt zwischen 26 % und 53 %, wobei der niedrigste und der höchste Wert von Jungbluth et al. (2008) (in [20]) stammen.

Da die Umwandlung mehrere nicht kommerziell etablierte Teilschritte umfasst, ist somit davon auszugehen, dass der effektiv erzielbare Wert möglicherweise deutlich niedriger als der höchste angenommene sein kann. So wird auch in einer neueren Review-Studie von Ail & Dasappa (2016) [22] ein Konversionswirkungsgrad von Biomasse zu Flüssigtreibstoff von lediglich 35 % bis 40 % erwartet, wobei dieser Wert einen nicht quantifizierten Anteil an Elektrizitätsproduktion aus Rückständen enthält [22]⁷. Dies weist darauf hin, dass die in den früheren Studien angenommenen Wirkungsgrade für BtL möglicherweise deutlich zu hoch waren. Eine Untersuchung von Dimitriou et al. (2018) [23] kommt für BtL-Technologien mit einer zugeführten Leistung von 460 MW auf Konversionswirkungsgrade im Bereich von 39.9 % bis 47.6 %. Der höchste Wirkungsgrad entspricht einer Wirbelschichtvergasung mit anschliessender Fischer-Tropsch-Synthese. Die im Szenario angenommene Anlagenleistung entspricht nach [23] einem Holzdurchsatz von rund 1 Mio. Tonnen pro Jahr feuchtem Holz oder 740'000 Tonnen trockenem Holz pro Jahr. Für das in Bild 2 eingeführte typische Waldholz mit 35 % Wassergehalt und einem Heizwert von 2.74 MWh/m³ entspricht der Verbrauch für 460 MW zugeführte Leistung während 8760 Vollbetriebsstunden rund 1.5 Mio. Kubikmeter Holz pro Jahr. Mit der in der Schweiz im Jahr 2021 genutzten Energieholzmenge von 5.845 Mio. m³/a (Kapitel 2.1, [11]) könnten somit knapp vier solche BtL-Anlagen betrieben werden. Betreffend Umwandlungswirkungsgrad ist somit zu beachten, dass der auf 47.6 % geschätzte, höchste Wert einer Technologie entspricht, die bis anhin noch nie kommerziell umgesetzt wurde und dass die dazu vorausgesetzte Anlagengrösse die in der Schweiz bis anhin etablierte Logistik zur Holzversorgung deutlich übersteigt. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass deutlich kleineren Anlagen niedrigere Wirkungsgrade erzielen würden.

⁷ "Recent developments (...) have improved the syngas to liquid conversion efficiencies in the range of 35–40%. With the inclusion of exported electricity from the BTL plant, the overall biomass to liquid fuel efficiency using FT process can be expected to be in the range of 35%-40%."

Die Firma Choren Industries GmbH (Deutschland) war weltweit die erste Firma, die eine BtL-Anlage technischer Grösse betrieb [24]. Diese Anlage wird auch von Ail & Dasappa im Jahr 2016 immer noch als einzige kommerzielle BtL-Anlage beschrieben, obwohl die Firma zu diesem Zeitpunkt bereits liquidiert worden war. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass die BtL-Anlagen im Vergleich zu den Anlagen zur Synthese von Flüssigtreibstoffen aus Kohle von Sasol in Südafrika (Inbetriebnahme zwischen 1955 und 1982) und aus Erdgas von Shell in Malaysia, Katar und anderen Standorten (Inbetriebnahme zwischen 1993 und 2009) um Größenordnungen kleiner sind.

Die Technologie von Choren beruhte auf einer Vergasung von Waldrestholz oder Altholz nach dem Carbo-V-Verfahren und einer Fischer-Tropsch-Synthese aus dem Synthesegas (Bild 11, [25]). Basis der Synthese bilden Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H₂), die unter Abgabe von Wasser zu Kohlenwasserstoffen synthetisiert werden. Die Entwicklung erfolgte in einer Zusammenarbeit mit Volkswagen, der Mercedes-Benz Group und Shell. Über Choren Industries GmbH wurde jedoch im Juli 2011 die Insolvenz angeordnet und das Unternehmen liquidiert. Nach Angaben des Mitteldeutschen Rundfunks waren Pannen und geschönte Zahlen die Ursachen für den Konkurs, was ebenfalls darauf hinweist, dass die früher angenommenen Wirkungsgrade für BtL-Treibstoffe überschätzt worden waren, da das Carbo-V-Verfahren während mehr als zehn Jahren die BtL-Technik in der Wissenschaft (insbesondere an Konferenzen) und in den Medien prägte.

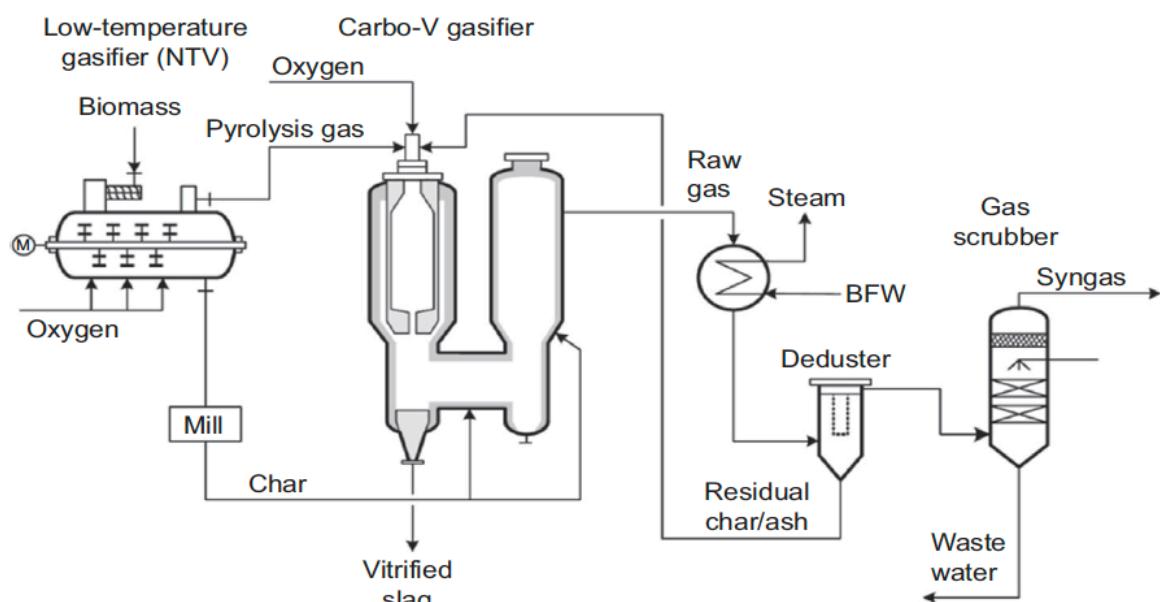


Bild 11 Choren Carbo-V-Verfahren [25]

Kenngrösse 2: Verbrauchswert als Primärenergie

Trotz der optimistischen Einschätzung der BtL-Technologie bis im Jahr 2011 wird in der Review-Studie von Sunde et al. (2011) [20] für Mobilität aus Holz ein Verbrauch zwischen 0.24 und 0.36 Kilogramm trockenem Holz pro Fahrkilometer ausgewiesen. Bei einem Heizwert von rund 18.5 MJ/kg entspricht dies zwischen 4.4 und 6.7 MJ/km, was zeigt, dass der Wert von 2.5 MJ/km von Yazdanie et al. (in [20]) deutlich optimistischer ist, obwohl ein Fahrzeug vorausgesetzt wurde, das in Bezug auf Gewicht, Leistung und Reichweite weit unter dem heutigen Standard liegt. Wenn der Primärenergieverbrauch von Sunde et al. (2011) [20] auf Benzinäquivalente von 32 MJ pro Liter umgerechnet wird, entspricht der Holzverbrauch einem Primärenergieaufwand von rund 14 bis 21 Liter Benzin pro 100 Kilometer.

3.4 Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz

Die Nutzung von Energieholz ermöglicht die Erzeugung von Wärme für Heizung und Warmwasser für dezentrale Einzelverbraucher sowie von Prozesswärme in der Industrie und von Fernwärme zur Versorgung ganzer Verbrauchergruppen. Daneben wird Holz zur Wärme-Kraft-Kopplung genutzt. Dazu kommen Dampfkraftanlagen zum Einsatz, die Leistungen zwischen rund 1 MW_e und in der Schweiz bis 20 MW_e, in anderen Ländern bis über 50 MW_e aufweisen. Bis zu 5 MW_e kommen auch Anlagen mit Organic Rankine Cycle (ORC) zum Einsatz. Für die vom Bund angestrebte Energieausnutzung ist für heutige WKK-Anlagen ein weitgehend wärmegeführter Betrieb erforderlich. So verlangt die kostendeckende Einspeisevergütung (BfE 2011), dass die Energieausnutzung, dargestellt als Wärmennutzung in Funktion der Stromnutzung, über der Verbindungsleitung von 70 % Wärme- und 40 % Stromnutzung liegt. Dies entspricht einem Wert von 70 % berechnet aus 1-facher Wärme- plus 1.75-facher Stromnutzung. Zur reinen Stromerzeugung wäre ein elektrischer Wirkungsgrad von 40 % erforderlich, während heutige Dampfkraftanlagen je nach Leistung knapp 15 % bis gegen 25 % erreichen.

Wärmeerzeugung und auch wärmegeführte Wärme-Kraft-Kopplung mit Holz erzielen jedoch eine hohe Effektivität zur Substitution fossiler Energieträger. Heizen mit Holzpellets aus ohne fossiler Energie getrocknetem Holz sowie Fernwärme aus Holz ermöglichen gegenüber Heizöl eine Einsparung um rund 92 % (Tabelle 7). Diese Substitutionswirkung ergibt sich aus den Energie-Erntefaktoren der über den ganzen Lebenszyklus verbrauchten nichterneuerbaren Energie. Wenn die Vorleistungen (ausser der Holztrocknung) mit fossiler Energie erfolgen, ergeben sich für Holz Erntefaktoren zwischen 8.3 und 14. So erzielt zum Beispiel Fernwärme aus Holz einen Erntefaktor von 9.0 im Vergleich zu 0.70 für Wärme aus Heizöl. Für 1 MJ Wärme aus Heizöl werden somit $1 / 0.70 = 1.43$ MJ fossile Primärenergie benötigt im Vergleich zu $1 / 9.0 = 0.111$ MJ für die Versorgungskette mit Energieholz, was der erwähnten Einsparung von 92 % nach Tabelle 7 entspricht. Für Wärme aus Stückholz oder aus automatischen Feuerungen wird ein Substitutionseffekt von 95 % erzielt, für wärmegeführte Wärme-Kraft-Kopplung von 93 %. Im Vergleich dazu wird durch Treibstoff aus Holz ein deutlich niedriger Substitutionseffekt erzielt, da die initiale Umwandlung von Holz zu Treibstoff einen Wirkungsgrad in der Grössenordnung von 50 % (oder nach obigen Ausführungen eher weniger) aufweist und im Endverbrauch ebenfalls Erdöl oder Erdgas ersetzt wird, das an anderer Stelle weiterhin zur Wärme- und Stromproduktion verbrannt wird. In Ländern mit Kohlekraftwerken oder in mit Kohle befeuerten Zementwerken bietet sich auch der Einsatz von Holz als Ersatzbrennstoff in diesen Anlagen an.

Tabelle 7 Energie-Erntefaktoren (Kehrwert des Primärenergiefaktors) EF und EF_{NE} nach Nussbaumer (2013) [26]. EF bewertet alle Ressourcen, EF_{NE} nur die nichterneuerbaren. Für Wärme und Strom sind zudem der relative Verbrauch an nichterneuerbarer Primärenergie PE_{NE} im Vergleich zu einer Ölheizung sowie die Einsparung ΔPE_{NE} angegeben. Eta_e = elektrischer Wirkungsgrad.

Szenario	EF [–]	EF_{NE} [–]	PE_{NE} [–]	PE_{NE} [%]	ΔPE_{NE} [%]
Stückholzheizung	0.76	14	0.07	5%	95%
Automatische Holzheizung	0.73	13	0.08	5%	95%
Automatische Holzheizung mit Fernwärme	0.66	9.0	0.11	8%	92%
Holzpellets mit Trocknung ohne fossile Energie	0.65	8.3	0.12	8%	92%
Holzpellets mit Holztrocknung mit Heizöl	0.64	3.3	0.30	21%	79%
Ölheizung mit Brennwertkessel	0.70	0.70	1.43	100%	0%
WKK mit Eta_e = 25% und Strom = 2.5 Wärme	0.55 – 1.0	10	0.10	5%	93%
WKK mit Eta_e = 45% und Strom = 2.5 Wärme	1.0	15	0.07	7%	95%
Treibstoff aus Holz	0.36 – 0.52				
Heizen mit Gas- od. Flüssig-Brennstoff aus Holz	0.29 – 0.42				

In einer Untersuchung von Winhammer et al. (2015) [27] wurden unterschiedliche Anwendungen zur Energieerzeugung aus Holz für Bedingungen in Bayern bewertet und zusätzlich mit einer stofflichen Verwertung verglichen, wie Tabelle 8 zeigt. Trotz des Versuchs einer umfassenden Beurteilung wird darauf hingewiesen, dass ein direkter Vergleich zwischen stofflicher und energetischer Nutzung aus folgenden Gründen nicht oder nur eingeschränkt möglich ist:

- Die Verwertungspfade gelten für unterschiedliche funktionale Einheiten wie z.B. MJ, m³, m² und Tonne und bei der Energieerzeugung zusätzlich für Elektrizität und Wärme.
- Indirekte Wirkungen durch Ausweicheffekte können die Resultate stark beeinflussen und müssten somit berücksichtigt werden.
- Betreffend Feinstaub wird darauf hingewiesen, dass zwar zur energetischen Nutzung Daten vorliegen (wobei unter anderem die Emissionsfaktoren von Nussbaumer und Boogen (2010) [28] zitiert werden), aber Daten zur stofflichen Nutzung fehlen, weshalb die Studie keine Aussage zur Luftreinhaltung ermöglicht.

Mit dieser Einschränkung führen Winhammer et al. (2015) [27] aus, dass fünf zitierte Studien zu einem Vergleich von stofflicher und energetischer Nutzung vorliegen und diese zeigen, dass eine Kaskadenutzung von Biomasse vorteilhaft ist und eine direkte Verbrennung höheres globales Erwärmungspotenzial verursacht. Da ein quantitativer Vergleich nur eingeschränkt möglich ist, zeigt Tabelle 9 Berechnungen von Nussbaumer (2013) [26] zur relativen Wirkung der verschiedenen Verwertungspfade für Energieholz im Vergleich zu konventionellen Energieträgern. Die Resultate von Winhammer et al. (2015) [27] bestätigen die früheren Daten zur Primärenergieeffizienz von Nussbaumer für Stückholzheizungen, Pelletheizungen und für Wärme-Kraft-Kopplung mit Holz. Daneben unterstützen sie die Erkenntnis, dass das angenommene Beispiel von importierten Holzpellets nur noch eine geringfügige Verbesserung gegenüber fossilen Energieträgern erzielt.

Tabelle 8 Substitutionsfaktoren für den nichterneuerbaren Primärenergiebedarf, das globale Erwärmungspotenzial (angegeben als CO₂-Äquivalent) und die Feinstaubemissionen von Holzprodukten und fossilen Alternativen nach Winhamer et al. (2015) [27].

Sector	Product substitution [functional unit]	End use	Substitution factor	Primary energy demand [GJ/functional unit]	GWP 100 [t/functional unit]	PM _{2.5} [g/functional unit]
Material	Non-wood construction instead of wood construction [building type]	Construction	Worst case	+1050.0	+69.9	n.a.
			Ø	+639.7	+59.4	n.a.
	Imported wood-based panels instead of domestic wood-based panels [m ³]	Furniture	Best case	+227.7	+5.1	n.a.
			Worst case	n.a.	n.a.	n.a.
	Electronic media instead of graphical paper [t]	Media	Ø	+0.7	+0.01	n.a.
			Best case	n.a.	n.a.	n.a.
	Heat from split logs instead of natural gas [MWh]	Heat	Worst case	+223.1	+15	n.a.
			Ø	0	0	n.a.
	Heat from pellets instead of natural gas [MWh]		Best case	-58.4	-1.9	n.a.
			Worst case	-3.8	-0.21	+1600
Energy	Imported pellets instead of natural gas [MWh]		Ø	-4.1	-0.25	+548
			Best case	-4.1	-0.27	+436
	Heat from wood chip-mix instead of natural gas [MWh]		Worst case	-3.5	-0.22	+123
			Ø	-3.6	-0.23	+114
	Electricity and heat from wood chip mix instead of electricity mix [MWh]	Heat and electricity	Best case	-3.7	-0.23	+111
			Worst case	-1.2	-0.19	+306
	Electricity and heat from wood chip mix instead of electricity mix [MWh]		Ø	-1.4	-0.20	+279
			Best case	-1.5	-0.21	+270
	Electricity and heat from wood chip mix instead of electricity mix [MWh]		Worst case	-3.6	-0.24	+271
			Ø	-3.7	-0.25	+253
			Best case	-7.9	-0.57	+528
			Ø	-8.1	-0.58	+390
			Best case	-8.2	-0.59	+307

Note: The products are not yet comparable due to different functional units and end uses.

Tabelle 9 Oben: Nichterneuerbarer Primärenergiebedarf PE_{NE} und Erntefaktor EF_{NE} (= Kehrwert von PE_{NE}) für Energieholz und konventionelle Energieträger nach Daten von Winhamer et al. (2015) [27]. Unten: Globales Erwärmungspotenzial (als CO₂-Äquivalent) nach Daten von [27].

		PE _{NE}		EF _{NE}	PE _{NE} / PE _{NE,Gas}		ΔPE _{NE}
		MJ/MWh	MJ/MJ	MJ/MJ	–	%	%
Wärme	Stückholzheizung	143	0.040	25.17	0.034	3%	97%
	Holzpellets aus Inland	607	0.169	5.93	0.143	14%	86%
	Holzpellets aus Import	2830	0.786	1.27	0.667	67%	33%
	Erdgas	4240	1.178	0.85	1.000	100%	0%
Elektrizität	WKK mit Holzschnitzel	503	0.140	7.16	0.059	6%	94%
	Konventionell	8560	2.378	0.42	1.000	100%	0%

		CO ₂ -Eq.			CO ₂ / CO _{2,Gas}		ΔCO ₂
		kg/MWh			–	%	%
Wärme	Stückholzheizung	23		0.005	1%	99%	
	Holzpellets aus Inland	51		0.012	1%	99%	
	Holzpellets aus Import	74		0.017	2%	98%	
	Erdgas	280		0.066	7%	93%	
Elektrizität	WKK mit Holzschnitzel	24		0.040	4%	96%	
	Konventionell	603		1.000	100%	0%	

Vadenbo et al. (2018) [29] haben in einer von SNF, SCCER, WSL und weiteren Quellen finanzierten Forschung eine in Bezug auf die Umwelt optimierte energetische Nutzung von Biomasse untersucht (Tabelle 10). Darin werden ebenfalls Daten zum Primärenergieaufwand bzw. dem kumulierten Energieaufwand angegeben. Da als Bezugsgröße jedoch keine Energieeinheit, sondern eine Tonne nasses Holz verwendet wird, ist für eine Beurteilung der Energieeffizienz eine Umrechnung über den Energieinhalt erforderlich. Tabelle 10 zeigt entsprechende Werte unter Annahme typischer Heizwerte für Waldholz und Holzpellets.

Auch diese neuere Studie bestätigt die bisherigen Resultate und zeigt, dass die Nutzung von Holzschnitzel als Brennstoff einen nichtneuerbaren Erntefaktor EF_{NE} von rund 10 erzielt und das globale Erwärmungspotenzial weniger als 5 % dessen fossiler Energieträger ausmacht. Ebenso wird bestätigt, dass die Bilanz importierter Holzpellets in Bezug auf Energieeffizienz und Erwärmungspotenzial nur halb so gut ist wie dasjenige von regional genutztem Energieholz.

Tabelle 10 Primärenergieaufwand und globales Erwärmungspotenzial und nach Valenbo et al. (2028) [29]. Für die Ernte wurde aus mehreren Varianten ein mittlerer Wert angenommen. Um eine energetische Beurteilung zu ermöglichen, erfolgte eine Umrechnung mit einem für das jeweilige Holzsortiment typischen Wassergehalt w und dem daraus folgenden Heizwert H_i , wobei für trockenes Holz ein Heizwert von 18.5 MJ/kg und für die Verdampfungsenthalpie der bei 25°C gültige Wert von 2.44 MJ/kg eingesetzt wurde.

	Ernte	Nutzung	Total				
	PE_{NE}	PE_{NE}	PE_{NE}	w	H_i	PE_{NE}	EF_{NE}
	MJ/t	MJ/t	MJ/t	%	MJ/kg	MJ/MJ	MJ/MJ
Holzschnitzel, Hartholz	750	320	1070	35%	11.2	0.096	10.4
Holzschnitzel, Weichholz	800	308	1108	35%	11.2	0.099	10.1
Importierte Holzpellets			3200	10%	16.4	0.195	5.1

	CO_{2-Eq.}	CO_{2-Eq.}	CO_{2-Eq.}	w	H_i	CO_{2-Eq.}
	kg/t	kg/t	kg/t	%	MWh/t	kg/MWh
Holzschnitzel, Hartholz	60	64	124	35%	3.1	40
Holzschnitzel, Weichholz	65	57	122	35%	3.1	39
Importierte Holzpellets			374	10%	4.6	82

Als Alternative zu flüssigen Biotreibstoffen kommt auch die Herstellung von Methan aus Holz infrage, das als Synthetic Natural Gas (SNG) bezeichnet wird und zum Ersatz von Erdgas dient. Die Umwandlung von Holz erfolgt dabei durch Vergasung und katalytische Methanisierung. Für dieses Verfahren wurde von Steubing et al. (2011) [30] gezeigt, dass SNG aus Holz eine Reduktion der globalen Erwärmung ermöglicht, wenn damit fossile Treibstoffe substituiert werden. Der Wirkungsgrad zur Herstellung von **Methan** wurde dabei mit **38.7 %** bezogen auf die zugeführte Energie ausgewiesen, was bei Berücksichtigung von 2.6 % Energiezufuhr durch Elektrizität, Erdgas und Rapsmethylester (RME) einem Netto-Wirkungsgrad von Holz zu Methan von 36.1 % entspricht. Zusätzlich werden 18.8 % Abwärme frei. Ein Teil davon wird bei Verwertung von Waldholz voraussichtlich zur Holztrocknung benötigt, während der Überschuss potenziell genutzt werden kann. Der Primärenergieaufwand des Verfahrens wird nach Bild 12 für SNG für Heizzwecke mit rund 3.8 MJ/MJ ausgewiesen oder bei Gutschrift der Abwärme mit rund 3.3 MJ/MJ. Im Vergleich dazu wird für eine Holzheizung mit Fernwärmennetz ein Primärenergieaufwand von 1.6 MJ/MJ ausgewiesen. Dieser Vergleich zeigt, dass SNG für Wärme selbst bei Nutzung der Abwärme weniger als 50 % der Substitutionswirkung einer Holzheizung mit Wärmeverteilung mittels Fernwärme erzielt.

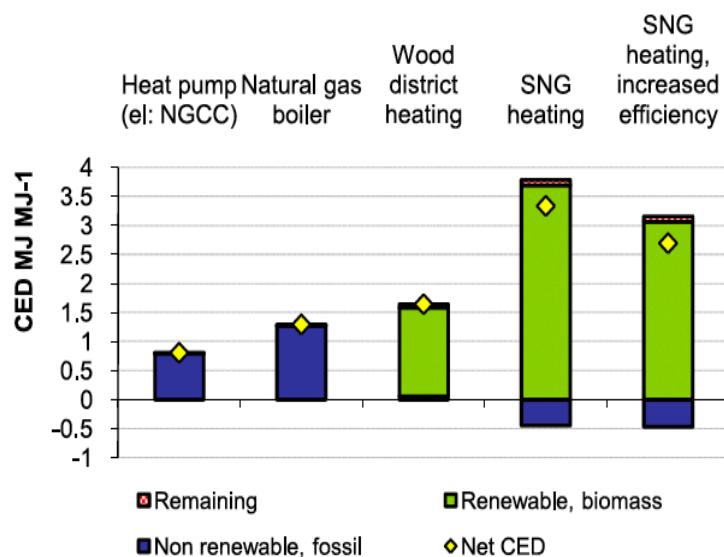


Bild 12 Kumulierter Energieaufwand (Cumulative energy demand (CED) oder Primärenergieaufwand) für verschiedene Szenarien nach [30].

3.5 Holzkohle und Pflanzenkohle

3.5.1 Pflanzenkohle in der Landwirtschaft und als C-Senke

Eine seit Jahrhunderten bekannte Form von Pflanzenkohle ist die Holzkohle. Zu Beginn der Eisenzeit wurde Pflanzenkohle in chargenweise betriebenen Kohlemeilern hergestellt und als Reduktionsmittel zur Herstellung von Eisen aus Eisenoxiden genutzt. Da meist Holz als Ausgangsmaterial verwendet wurde, wird in diesem Zusammenhang meistens von Holzkohle gesprochen [7]. Holzkohle und Pflanzenkohle (PK) entsprechen der Fraktion "Koks" aus einer Verkohlung. Der **Kohlenstoffgehalt** von Holzkohle beträgt typischerweise 81 % bis 90 % [7], sodass vorliegend von **85 %** ausgegangen wird.

Während Holzkohle zur Eisenherstellung während der industriellen Revolution durch fossiles Koks ersetzt wurde, wird Holzkohle heute in der Schweiz hauptsächlich zum Grillieren eingesetzt. Der Begriff Pflanzenkohle wird dann verwendet, wenn ein anderer Einsatzzweck verfolgt wird, welcher zusätzliche Anforderungen an das Koks verlangt und im Gegenzug eine höhere monetäre und/oder ökologische Wertschöpfung verspricht. In zahlreichen europäischen Ländern und auch in der Schweiz ist die Verwendung von so definierter und in Europa zum Beispiel nach EBC zertifizierter Pflanzenkohle [8] in der Landwirtschaft erlaubt. Bei Einhaltung bestimmter Bedingungen kann sie unter anderem als Träger für Nährstoffe dienen, wozu vor Einbringung in den Boden eine Beladung mit Nährstoffen aus Kompost, Gülle oder anderen Stoffen erfolgt. Pflanzenkohle kann auch als Futtermittelzusatz und für zahlreiche Anwendungen ausserhalb der Landwirtschaft verwendet werden. Da durch die Verkohlung rasch abbaubare organische Materie in langzeitstabilen Kohlenstoff umgewandelt wird, kann Pflanzenkohle zum Beispiel bei der Einbringung in Böden, der Zugabe zu Beton oder der Verwendung im Strassenbau auch als Kohlenstoffsenke wirksam werden.

In Europa und in anderen Weltregionen wurden bereits viele Untersuchungen mit Pflanzenkohle durchgeführt und es gibt zahlreiche Akteure und Branchenverbände, die sich für die Herstellung und Nutzung von Pflanzenkohle einsetzen, in der Schweiz zum Beispiel der Verband "Charnet" [31]. Nach Charnet [31] weisen zahlreiche Untersuchungen auf eine positive Wirkung des Einsatzes von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft hin und die Akteure vertreten die Meinung, dass die Risiken allfälliger negativer Auswirkungen auf die Bodenqualität bei Einhaltung der Qualitätsstandards gering und kontrollierbar sind. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU), das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und die kantonalen Bodenschutzfachstellen (Cercle Sol) lehnen dagegen den Einsatz von Pflanzenkohle in landwirtschaftlichen Böden in der Schweiz im Sinne der Vorsorge vorläufig ab [32]⁸.

Da betreffend ökologischer Nutzen und Schaden von Pflanzenkohle für Schweizer Böden bis anhin kein Konsens zwischen Branche und Behörden besteht und ein breiter Einsatz in der Landwirtschaft somit unsicher ist, wird in der vorliegenden Bewertung für Pflanzenkohle aus Holz ausschliesslich deren Wirkung auf Treibhausgasemissionen und Ressourceneffizienz bewertet. Weil kein direkter Vergleich mit einer energetischen Nutzung möglich ist, wird dazu folgendes Szenario bewertet:

Für Pflanzenkohle wird die aus Untersuchungen nachgewiesene Langzeitstabilität vorausgesetzt und damit angenommen, dass bei Einbringung in Böden oder dauerhaften Werkstoffen (Beton, Strassen) eine langfristige Speicherung des Kohlenstoffs erfolgt.

⁸ Zitat von G. Schwilch, Sektionschefin Boden, Bundesamt für Umwelt in [32]: "Solange schädliche Auswirkungen, beispielsweise auf Bodenlebewesen, nicht ausgeschlossen werden können, wird im Sinne der Vorsorge vom weitflächigen Einsatz von PK auf landwirtschaftliche Böden vorläufig abgeraten. Kantonale Bodenschutzfachstellen (Cercle Sol), BAFU, BLW: «**Schweizer Böden brauchen keine Pflanzenkohle**»"

3.5.2 Holzkohle und Pflanzenkohle für Grillzwecke

Die Gesamtenergiestatistik weist für die Schweiz für das Jahr 2022 einen Import an Holzkohle mit einem Energieinhalt von 360 TJ/a oder 100 GWh/a aus. Der Export beträgt 10 TJ/a oder 2.8 GWh/a, sodass ein Netto-Import von 350 TJ/a oder 97 GWh/a bzw. rund 0.1 TWh/a resultiert [5]. Dies entspricht rund 0.6 % des Endenergieanteils der heutigen Energieholznutzung⁹.

Bei einem **Heizwert** von **30 bis 32 MJ/kg** bei einer Bandbreite von 28 – 35 MJ/kg [7] sind dies 11 000 bis 12 000 Tonnen pro Jahr. Für weitere Berechnungen wird ein Heizwert von **31 MJ/kg PK** eingesetzt und für Holzkohle nach [7] von einem Wassergehalt von 6 % ausgegangen.

Bei einem C-Gehalt der PK von 85 % (vorne) folgt ein Heizwert von $31 \text{ MJ/kg PK} / 0.85 = 36.5 \text{ MJ/kg C}$. Dies ergibt folgenden **CO₂-Emissionsfaktor** für Pflanzenkohle, sofern nicht der Wert null wegen der CO₂-Neutralität von Holz angenommen wird:

$$\begin{aligned}\text{EF}_{\text{CO}_2} &= (44 \text{ g/mol} / 12 \text{ g/mol}) / 36.5 \text{ MJ/kg C} \\ &= 0.100 \text{ kg CO}_2/\text{MJ} = 0.100 \text{ t CO}_2/\text{GJ} = \textcolor{red}{100 \text{ t CO}_2 / \text{TJ}} \\ &= 0.360 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} = 0.360 \text{ t CO}_2/\text{MWh} = \textcolor{red}{360 \text{ t CO}_2 / \text{GWh}}\end{aligned}$$

Zum Vergleich: Für Braunkohle gilt nach BAFU ein Emissionsfaktor von 96.1 t CO₂ / TJ aus [14].

Der WWF Schweiz weist in einer Marktanalyse für das Jahr 2017 einen Verbrauch an Holzkohle von 13 000 Tonnen oder rund 3.5 kg pro Haushalt aus, der aus folgenden Ländern stammt [33]:

26 % aus Polen, das 84 % des Holzes aus Ukraine und Nigeria und weiteres aus Paraguay importiert
21 % aus Deutschland, das seinerseits 72 % aus Polen, Paraguay, der Ukraine und Nigeria importiert
17 % aus Bosnien und Herzegowina, für die illegale Rodung von Urwäldern als Problem gilt
12 % aus der Ukraine
24 % aus restlichen Ländern.

Nigeria gilt als zweitgrösster Holzkohleproduzent der Welt, leidet aber unter einer hohen Entwaldungsrate, illegalem Holzschlag und Raubbau an den Wäldern. Für Paraguay wird die Situation als mit Nigeria vergleichbar beschrieben. Die Analyse des WWF Schweiz zeigt auf, dass in über 40 Prozent der in der Schweiz getesteten Produkte tropische Holzarten und in zwei Dritteln der 21 in der Schweiz von 11 Detailhändlern untersuchten Proben falsch deklarierte Holzarten gefunden wurden [33]. Die Untersuchung weist zudem darauf hin, dass zahlreiche als FSC zertifizierte Holzkohle in Wahrheit nicht über eine FSC-Zertifizierung verfügte. Aufgrund dieser Situation bewertet der WWF Schweiz das Grillieren mit Strom oder Gas als ökologisch weniger schädlich als die Verwendung von Grillkohle, die aus Raubbau stammt oder für die Raubbau selbst bei FSC zertifizierten Produkten nicht ausgeschlossen ist.

Die aktuelle Produktion von Pflanzenkohle in der Schweiz erfolgt für Anwendungen, welche im Vergleich zu Grillkohle zusätzliche Qualitätsansprüche verlangen. Wenn davon ausgegangen wird, dass Grillieren mit Holzkohle weiterhin erlaubt und auf aktuellem Niveau konstant bleibt, kommt zur Nutzung von in der Schweiz produzierter Pflanzenkohle bis zu einer Menge von etwa 12 000 Tonnen pro Jahr infrage, damit den Import von Holzkohle zu substituieren. Nebst der Vermeidung von Raubbau würde damit zusätzlich der Verbrauch an fossiler Energie für Transporte reduziert. Eine breite Anwendung mit Ausbringung von Pflanzenkohle auf landwirtschaftlichen Böden bietet sich dann an, wenn die Ablehnung von Bund und Kantonen dank neuer Erkenntnisse in eine unterstützende Haltung ändert und keine Holzkohle mehr importiert wird.

⁹ Unter Annahme eines Konversionswirkungsgrades von 50 % von Holz zu Holzkohle könnte der schweizerische Holzkohleverbrauch somit mit **1.2 % des heutigen Energieholzes** gedeckt werden.

3.6 Stoff- und Energiebilanz thermischer Anlagen zur Energieholznutzung

Anlagen zur Verkohlung, Vergasung, Pyrolyse oder Verbrennung von Holz und anderer Biomasse können nach Tabelle 11 anhand ihres Einsatzzwecks unterschieden werden. Bei Anlagen zur Herstellung von Pflanzenkohle ist zudem zwischen Anlagen mit Feuerung und solchen mit Gasmotor zu unterscheiden. Die prozentuale Aufteilung der Produkte aus dem Brennstoff ist abhängig von der Art und der Betriebsweise des Reaktors.

Tabelle 11 Energieanteil der Produkte in Anlagen zur Herstellung von Pflanzenkohle, von Holzvergasungsanlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung, von Pyrolyseanlagen und von Holzfeuerungen bezogen auf den Heizwert des Inputs. Bei den ersten drei Anlagetypen gelten die Daten bei Verwendung von trockenem Holz. Sofern eine Vortrocknung notwendig ist, wird dazu in der Regel ein Teil der als "Nutzwärme" ausgewiesenen Wärme eingesetzt und die effektiv von der Anlage abgegebene Nutzwärme entsprechend reduziert. Die Zahlen beschreiben somit Zielwerte. In der Praxis werden oft niedrigere Werte erreicht und oft ein wesentlicher Anteil der ausgewiesenen "Nutzwärme" im Prozess selbst verbraucht.

		Energieanteil der Produkte (Zielwerte)			
Anlagentyp	Gasnutzung	Nutzwärme	Pflanzenkohle	Pyrolyseöl	Strom
Verkohlung zur Herstellung von Pflanzenkohle	Feuerung	50 %	35 %	0	0
	Gasmotor	25 %	30 %	< 1 %	30 %
Vergasung für WKK	Gasmotor	45 %	2 – 10 %	< 1 %	35 %
Pyrolyse für Pyrolyseöl	Feuerung	20 %	10 %	55 %	0
Holzfeuerung zur Wärmeerzeugung	Feuerung	85 %	0	0	0

3.7 Varianten zur Nutzung von Energieholz

Aufgrund der aktuellen Energieversorgung der Schweiz und der Eigenschaften von Energieholz und von Pflanzenkohle werden folgende Varianten zur Nutzung von Energieholz und deren Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung definiert:

Nutzung von Energieholz	Zweck
Prozesswärme a) indirekt durch Holzvergasung b) direkte Verbrennung von Holz	Substitution fossiler Brennstoffe für Prozesswärme ab 100 °C a) z.B. Ersatz von Erdgas durch Holzgas in der Glasproduktion b) z.B. Dampferzeugung oder Ersatz von Kohle in Zementöfen.
Gebäudewärme mit Holz als Hauptenergie	Substitution fossiler Brennstoffe.
Spitzenlast-Gebäudewärme in Kombination mit Wärmepumpen, die mit Solarstrom betrieben werden	<ul style="list-style-type: none"> Substitution fossiler Brennstoffe. Substitution anderem erneuerbarem Winterstrom. Saisonspeicherung von Wärme oder Elektrizität (z.B. anstelle von Power-to-Gas).
Wärme und Strom (WKK)	
Treibstoff aus Holz	Substitution fossiler Treibstoffe z.B. durch Biomass-to-Liquids. Da fossile Treibstoffe für den Bodenverkehr durch Elektromobilität substituiert werden können, was für den Langstrecken-Flugverkehr nicht absehbar ist, wird die Substitution fossiler Flugtreibstoffe bewertet.
Pflanzenkohle (PK) aus Holz a) für Grillkohle b) zur Sequestrierung	<p>a) Grillkohle: PK dient als Substitut für importierte Grillkohle. Diese wird mit fossiler Energie gleichgestellt und gleich bewertet wie in nachfolgender Variante 5b beschrieben, da importierte Grillkohle aufgrund der in [33] beschriebenen Umweltschäden als ökologisch schädlicher als das Grillieren mit fossiler Energie (in der Praxis mit Gas) angenommen wird.</p> <p>b) Sequestrierung: PK dient als C-Senke. Für Netto-Null-Treibhausgasemissionen wird für den sequestrierten Kohlenstoff einr äquivalente Menge fossiler Energie genutzt, die schwer substituierbar und sequestrierbar ist. Dies gilt für Flugtreibstoffe und fossile Ausgangsstoffe zur Produktion von Kunststoffen und Pharmazeutika. Zur Bewertung der energetischen Nutzungspfade dient Flugtreibstoff (Kerosin) als Substitutionsprodukt</p>

Als Basis für eine quantitative Bewertung dienen Energieeinheiten. Zur Berücksichtigung der exergetischen Wertigkeit verschiedener Energieformen wird für Elektrizität ein höherer Gewichtungsfaktor als für Gebäudewärme angenommen. In der Energieförderungsverordnung EnFV [34] wird als Bedingung zur Förderung von Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung mit Dampfprozessen die Nutzwärme mit dem Faktor 1 und die Elektrizität mit dem Faktor 1.75 gewichtet, wie aus Bild 13 aus dem Verhältnis von 70 % zu 40 % hervorgeht.

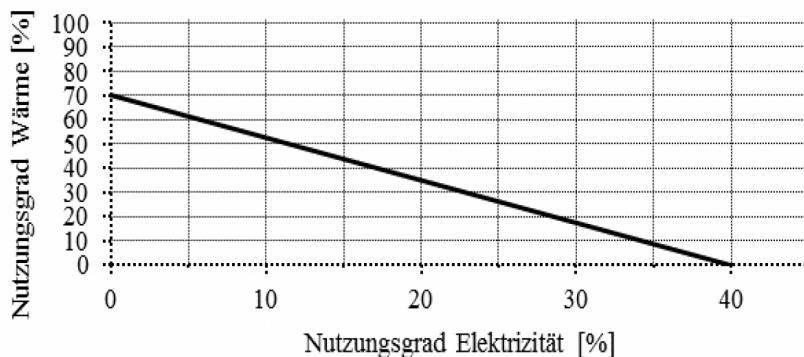


Bild 13 Mindestanforderungen an den Nutzungsgrad von Wärme und Elektrizität für WKK-Anlagen mit Dampfprozessen wie Dampfturbinen, Dampfmotoren und Organic Ranine Cycles nach der Energieförderungsverordnung EnFV [34].

Die höhere Gewichtung von Elektrizität im Vergleich zu Wärme kann thermodynamisch durch den Exergiegehalt begründet werden. Für das Beispiel der Wärme-Kraft-Kopplung kann es auch mit dem praktischen Anwendungsbeispiel gerechtfertigt werden, dass die WKK-Abwärme bei Temperaturen unter 100°C anfällt und damit nur für Gebäudewärme und andere Niedertemperaturanwendungen nutzbar ist. Gebäudewärme kann aber auch mit Wärmepumpen erzeugt werden, welche für Raumwärme Jahresarbeitszahlen als Verhältnis von Nutzwärme zu Stromverbrauch von über 4.0 und für Warmwasser oder Fernwärme von über 2.5 erzielen. Sowohl der Exergiegehalt als auch das Praxisbeispiel rechtfertigen damit für Elektrizität auch eine deutlich höhere Gewichtung als 1.75. Im vorliegenden Bericht wird für **Elektrizität** deshalb ein bei Berücksichtigung der physikalischen Wertigkeit immer noch konservativer **Gewichtungsfaktor von 2** angenommen.

Wie für Elektrizität ist auch für Treibstoffe und Prozesswärme eine Bewertung anhand der Exergie oder anhand von in der Praxis möglichen Ersatzprozessen sinnvoll. Für Nutzwärme ist theoretisch eine Gewichtung anhand des Exergiegehalts und somit der Temperatur möglich. Da **Prozesswärme** über 100 °C jedoch nahezu vollständig durch Elektrizität oder chemische Energie eines Brennstoffs zur Verfügung gestellt werden muss¹⁰, wird für Prozesswärme der identische Gewichtungsfaktor wie für Elektrizität **von 2** angenommen¹¹.

Weil mit Treibstoffen (oder chemisch identischen Brennstoffen) auch Prozesswärme mit hoher Effizienz zur Verfügung gestellt werden kann und sie daneben in Konkurrenz zu Elektrizität für Prozesswärme und Antriebe stehen, wird auch für **Treibstoffe** ein Gewichtungsfaktor **von 2** angenommen¹².

¹⁰ Theoretisch kommt auch konzentrierende Solarthermie infrage. Diese ist in der Schweiz wegen der geringen Anzahl Vollbetriebsstunden mit Direktstrahlung (weniger als 500 h/a oder weniger als 6 % Vollastbetrieb) aber uninteressant.

¹¹ Obwohl zum Beispiel für Backprozesse eine Temperatur von 250°C ausreicht, während für Brennprozesse Temperaturen bis über 1000°C erforderlich sind, wird die Wärme in beiden Fällen durch Elektrizität oder durch Verbrennung eines Brennstoffs und somit aus nahezu 100 % Exergie bereitgestellt, weshalb eine Unterscheidung der zwei Fälle für die vorliegende Beurteilung weder notwendig noch sinnvoll ist.

¹² Damit wird nicht berücksichtigt, dass elektrische Antriebe – sofern sie eingesetzt werden können – höhere Wirkungsgrade als Verbrennungskraftmaschinen erzielen. Vorliegend wird aber ausschliesslich die Substitution von Flugtreibstoffen, für welche ein Ersatz durch Elektroantriebe kaum infrage kommt, bewertet, während für die künftige Mobilität auf dem Boden von einer Transformation zu Elektromobilität ausgegangen wird.

Da Pflanzenkohle nicht als Energieträger genutzt, sondern zum Beispiel in der Landwirtschaft verwertet wird, erfolgt für einen Vergleich mit Energieträgern die oben als Szenario b) beschriebene Sequestrierung der Pflanzenkohle mit einer für Netto-Null im Gegenzug möglichen Nutzung fossiler Flugtreibstoffe, für die weder ein Ersatz durch Elektrizität noch eine CO₂-Abscheidung aus den Abgasen infrage kommt. Ohne Betrachtung der Prozesskette könnte damit für ein sequestriertes C-Atom ein fossiles C-Atom energetisch genutzt werden. Bei Betrachtung der Klimabilanz über die gesamte Prozesskette sind jedoch noch zusätzliche THG-Emissionen der Pflanzenkohleverwertung sowie ein langsamer Abbau der Pflanzenkohle zu berücksichtigen.

Nach Berechnungen des EBC resultiert bei einer Abbaurate der Pflanzenkohle von 0.3 % pro Jahr und Annahme des GWP 20 für Methan (was pessimistischer ist als das GWP 100) für Pflanzenkohle ein Senken-Potenzial von rund 75 %. Wenn zudem die Emissionen der Pflanzenkohleherstellung berücksichtigt werden, beträgt das Potenzial noch rund 70 % ([8] Beispiel Seite 13). Insgesamt kann somit nach dieser Abschätzung für die Sequestrierung von Pflanzenkohle von einer Substitution von 0.7 bis 0.75 fossilem C pro C in Pflanzenkohle ausgegangen werden.

In einem anderen Beispiel wird die Senkenleistung mit Gewichtseinheiten quantifiziert und mit 705 kg CO₂ pro Bigbag mit 381 kg Pflanzenkohle und Wassergehalt 25 % ausgewiesen ([8], Beispiel Seite 22). Dies entspricht rund 286 kg Trockensubstanz an Pflanzenkohle oder **2.47 kg CO₂ pro kg absolut trockene Pflanzenkohle**. Wenn wie für Holzkohle ein Heizwert von 31 MJ/kg bei einem Wassergehalt von 6 % angenommen wird, entspricht dies einer Senkenleistung von rund **2.3 kg CO₂ pro kg feuchte Pflanzenkohle mit 31 MJ/kg Heizwert**. Dies entspricht folgendem (negativen) Emissionsfaktor für Pflanzenkohle:

$$EF_{CO_2} = -0.074 \text{ kg CO}_2/\text{MJ} = -0.074 \text{ t CO}_2/\text{GJ} = \textcolor{red}{-74 \text{ t CO}_2 / \text{TJ}}$$

Die so abgeschätzte Senkenleistung entspricht 74 % des (positiven) Emissionsfaktors von 100 t CO₂/TJ im Falle der Verbrennung der Pflanzenkohle.

Für Kerosin oder Flugpetrol gilt nach BAFU [14] ein Emissionsfaktor von EF_{CO₂} = **72.8 t CO₂ / TJ**.

Die auf den Heizwert bezogene Senkenleistung von Pflanzenkohle entspricht somit bis auf eine vernachlässigbare Abweichung dem auf den Heizwert bezogenen Emissionsfaktor von Kerosin. Aus diesem Grund wird für das Pflanzenkohlen-Szenario angenommen, dass die **Sequestrierung von 1 MJ Pflanzenkohle** die **Nutzung von 1 MJ Kerosin** mit Netto-Null-Treibhausgasemissionen erlaubt.

Unter der Annahme, dass der Umwandlungswirkungsgrad von Holz zu Treibstoff und von Holz zu Pflanzenkohle identisch oder ähnlich ist, kann für Pflanzenkohle aus Holz damit auch der gleiche Gewichtungsfaktor wie für Treibstoff aus Holz gerechtfertigt werden. In den nachfolgenden Berechnungen wird für Pflanzenkohle zwar aufgrund der oben beschriebenen Verfahren ein etwas niedrigerer Umwandlungswirkungsgrad als für Treibstoff angenommen (nämlich 25 % bis 45 % gegenüber 40 % bis 50 %, Kapitel 4). Nebst der Pflanzenkohle fällt aber bei der Herstellung noch ein geringfügiger Ertrag an Nutzwärme an, weshalb für **Pflanzenkohle** das Szenario der Sequestrierung vorausgesetzt und dafür wie für Treibstoff aus Holz ein Gewichtungsfaktor von **2** angenommen wird.

Für das Szenario a) der Verwendung von Pflanzenkohle aus Holz als Grillkohle ergibt die Verwertung keinen Zusatznutzen in Bezug auf Klima und Ressourcenschonung, sofern sowohl das Schweizer Holz als Rohstoff für einheimische Pflanzenkohle als auch der Rohstoff für importierte Holzkohle als klimaneutral angenommen werden. Nach Erhebung des WWF ist diese Voraussetzung aber für die heute in

die Schweiz importierte Holzkohle nicht gewährleistet. Vielmehr muss für einen relevanten Anteil der importierten Holzkohle davon ausgegangen werden, dass sie nicht aus nachhaltiger Waldbewirtschaftung stammt, sondern Schäden durch Abholzung und damit THG-Emissionen und weitere Schäden verursacht. Daneben führt der Transport des Holzes aus anderen Kontinenten zu zusätzlichen fossilen Emissionen. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass das Szenario zur Substitution importierter Holzkohle einen vergleichbaren oder höheren Substitutionswert in Bezug auf Klima aufweist als eine Sequestrierung von Pflanzenkohle. Die Gewichtung der Verwertung von Energieholz als Pflanzenkohle erfolgt deshalb unter der Annahme des für die Sequestrierung beschriebenen Gewichtungsfaktors.

Damit werden im vorliegenden Bericht folgende Gewichtungsfaktoren angenommen:

Gewichtungsfaktor für Gebäudewärme:	1.0
-------------------------------------	------------

Gewichtungsfaktor für Elektrizität, Prozesswärme, Treibstoff und Pflanzenkohle (PK):	2.0
--	------------

3.8 Einfluss der Energieholzsortimente

Die Ausführungen in Kapitel 3 zeigen, dass die verschiedenen Energieholzsortimente zum Teil unterschiedliche Umweltauswirkungen verursachen. Zudem ist der Einfluss der grauen Energie bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus nicht bei allen Energieholzsortimenten gleich. Dabei sind folgende Tendenzen erkennbar:

- Der Einfluss des Transports und der Aufbereitung auf die Gesamteffizienz ist bei heute üblichen Anwendungen von Energieholz in der Schweiz nur von untergeordneter Bedeutung. Dies wäre auch dann noch gültig, wenn das Energieholz in einigen wenigen Grossanlagen [35]¹³ anstelle von aktuell über 500 000 Anlagen genutzt würde. Demgegenüber wird der Import von Energieholz aus Übersee oder mit Strassentransport von ausserhalb der Nachbarländer vorliegend ausgeschlossen und der somit nicht prioritäre Transportaufwand in der Bewertung der verschiedenen Szenarien nicht berücksichtigt.
- Die Umweltbelastung von Energieholz fällt bei heutigen Anwendungen in der Schweiz zum überwiegenden Teil direkt bei der thermischen Nutzung an und wird durch die Schadstoffemissionen dominiert. Einzelne Energieholzsortimente sind zwar in Bezug auf Emissionen unterschiedlich. So beinhaltet Altholz schädliche Inhaltsstoffe und Rinde verursacht wegen hoher Asche- und Mineralstoffgehalte erhöhte Rohgasemissionen, während Holzpellets wenig kritische Inhaltsstoffe enthält. Diese Eigenschaften werden aber dadurch ausgeglichen oder teilweise sogar überkompensiert, dass für die anspruchsvolleren Brennstoffe und/oder die dazu notwendigen grösseren Anlagen deutlich strengere Emissionsgrenzwerte gelten, weshalb sich die vorliegende Bewertung auf den energetischen Nutzen beschränkt.
- Einzelne Sortimente sind für ausgewählte Anwendungen geeignet und werden prioritär für diese eingesetzt. So wird etwa Rinde in Sägereien direkt in grösseren Feuerungen verwertet, welche für diesen für Kleinanlagen ungeeigneten Brennstoff ausgelegt und betrieben werden. Die Wärme dient meist als Prozesswärme im Betrieb und wird oft auch zur Trocknung des Sägemehls genutzt, das anschliessend zu Holzpellets verarbeitet wird. Aus Sägemehl hergestellte Holzpellets verursachen geringe Rohgasemissionen und werden bevorzugt in dezentralen Anlagen kleiner und mittlerer Grösse eingesetzt. Die Nutzung von Rinde und Holzpellets ergänzen sich deshalb.

Da die Unterschiede zwischen den einzelnen Energieholzsortimenten für die Gesamteffizienz der zu bewertenden Verwertungspfade von untergeordneter Bedeutung sind und zwischen den Sortimenten zum Teil Synergieeffekte bestehen, erfolgt die Bewertung im vorliegenden Bericht anhand des Energieinhalts des Energieholzes ohne Differenzierung nach Energieholzsortimenten.

¹³ Zum Vergleich: In der Schweiz werden aktuell rund 5.8 Mio m³/a Holz entsprechend 16 TWh/a Endenergie in rund 550 000 Anlagen verbrannt. Das Heizkraftwerk HOFOR Amagerværket Unit 4 als Teil eines grösseren Kraftwerkareals in Kopenhagen ist auf einen Durchsatz von rund 185 Tonnen Holz pro Stunde und einen Verbrauch von 1.2 Mio. Tonnen Holz pro Jahr ausgelegt bei rund 6500 Vollbetriebsstunden ausgelegt. Die Anlage produziert 400 MW Wärme und 150 MW Strom oder in Winterspitzen bis zu 585 MW Wärme ohne Strom. Bei einem Wirkungsgrad von < 90 % entspricht dies einer Brennstoffzufuhr von mehr als 650 MW, was bei 6500 Vollbetriebsstunden einer zugeführten Leistung von 4.2 TWh/a entspricht. Die gesamte in der Schweiz aktuell genutzte Energieholzmenge würde somit für knapp vier solche Anlagen reichen.

4 Bewertung der Verwertungspfade

4.1 Bewertungskriterien und Definition der Prioritäten

In diesem Kapitel erfolgt eine Bewertung der Nutzung von Energieholz nach Bild 14 wie folgt:

Kriterium 1: Energie

Vorab erfolgt eine quantitative Bewertung der aus Energieholz produzierten Nutzenergie, welche durch die Summe aller Nutzenergien beschrieben wird. Das Total entspricht einem Gesamtwirkungsgrad, der als E^* (mit E für Energie) bezeichnet wird. Daraus wird ein relativer Wert $E = E^*/E_{\max}^*$ abgeleitet, wobei E_{\max}^* dem höchsten erzielten Gesamtwirkungsgrad entspricht, der als Referenzwert als 1 ausgewiesen wird. Für alle anderen Pfade resultieren Werte von $0 \leq E \leq 1$.

Im Anschluss erfolgt eine Priorisierung mit $E > 0.9$ für Prio 1, $0.9 > E > 0.8$ für Prio 2 usw..

Kriterium 2: Gewichtete Energie

Die unterschiedlichen Energieformen werden wie folgt mit einem Gewichtungsfaktor G^* gewichtet:

- Für Gebäudewärme gilt $G^* = 1$.
- Für Spitzenlast-Gebäudewärme, Elektrizität, Treibstoff und Pflanzenkohle gilt $G^* = 2$.

Aus dem Energieanteil E^* und dem Gewichtungsfaktor G^* wird das Produkt $G^* E^*$ gebildet. Daraus wird wiederum ein relativer Wert GE mit $0 \leq GE \leq 1$ bestimmt, wobei für den höchsten Wert $GE = 1$ gilt.

Im Anschluss erfolgt eine Rangfolge der Prioritäten mit $GE > 0.9$ für Prio 1 usw..

Kriterium 3: Substitutionsnotwendigkeit

Um die unterschiedlichen Schwierigkeitsgrade zur Substitution der verschiedenen Energieformen zu berücksichtigen, wird eine Gewichtung des Substitutionsaufwands bzw. der Substitutionsnotwendigkeit S^* eingeführt, für welche folgende Werte angenommen werden:

- Prozesswärme: $S^* = 100\%$. Grund: Für Hochtemperaturwärme stehen nur bedingt Alternativen zu Energieholz zur Verfügung. Soweit Elektrizität als Alternative dient, muss dazu knapp verfügbare Bandenergie eingesetzt werden, während die bedarfsgerechte Bereitstellung aus Holz durch die Speicherfähigkeit des Holzes jederzeit sichergestellt werden kann.
- Gebäudewärme: $S^* = 20\%$. Grund: Gebäudewärme kann effizient mit einem Anteil von weniger als 25 % Elektrizität und mehr als 75 % unbegrenzt verfügbarer Umweltwärme erzeugt werden, weshalb die Substitutionsnotwendigkeit durch Holz gering ist.
- Elektrizität: $S^* = 80\%$. Grund: Es besteht ein viel grösseres Potenzial zur Stromproduktion aus Solar- und Windenergie als aus Holz. Gleichzeitig wird bei Stromerzeugung aus Holz in der Schweiz von einer Abwärmenutzung ausgegangen, was für WKK-Anwendungen zusätzlich wie im nächsten Punkt beschrieben berücksichtigt wird.
- WKK-Abwärme wird zusätzlich mit $S^* = 20\%$ bewertet.
- Für Treibstoff und Pflanzenkohle gilt $S^* = 100\%$. Wie im Bericht ausgeführt, wird für Treibstoff aus Holz sowie für Pflanzenkohle ein Ersatz von Flugtreibstoff im Verhältnis 1 zu 1 angenommen, im Falle von Pflanzenkohle durch die Verwendung von fossilem Treibstoff, der durch die Sequestrierung von Kohlenstoff in der Pflanzenkohle zu Netto-Null-Emissionen führt. Da Alternativen zu Treibstoff als Antrieb für den Langstrecken-Flugverkehr nicht absehbar sind, wird die Substitutionsnotwendigkeit als ebenso hoch wie für Prozesswärme eingestuft.

Aus den einzelnen Werten von S^* wird durch Multiplikation mit dem Energieanteil E^* ein Total von S^* gebildet und daraus wieder ein relativer Wert mit $0 \leq S \leq 1$ bestimmt und nach Prioritäten bewertet.

Kriterium 4: Gewichtete Energie und Substitutionsnotwendigkeit

Aus den Werten GE und S wird das Produkt (GES)* gebildet und daraus der relative Wert GES bestimmt und nach Prioritäten bewertet.

Kriterium 5: Technologie-Sicherheit

Mit dem Gewichtungsfaktor T wird die technologische Reife wie folgt berücksichtigt:

- Direkte Prozesswärme, Gebäudewärme und Spitzenlast-Gebäudewärme werden als Stand der Technik vorausgesetzt. Da weder Unsicherheiten bezüglich der erzielbaren Wirkungsgrade noch bezüglich unerwarteter Nebeneffekte bestehen, wird $T = 1$ angenommen.
- Für Prozesswärme zum Ersatz von Erdgas mit Holzgas wird die technologische Machbarkeit als gegeben bewertet, da Holzvergasung im industriellen Massstab technisch verfügbar ist. Da jedoch bis anhin keine entsprechenden Anwendungen bekannt sind, ist dennoch mit Unsicherheiten in Bezug auf Wirkungsgrad und Nebenwirkungen (etwa Einschränkungen wegen potenzieller Kontamination der zu behandelnden Güter bei Kontakt mit Holzgas) zu rechnen. Aus diesem Grund wird $T = 0.75$ angenommen.
- Die Produktion von Treibstoff aus Holz und von Pflanzenkohle ist mit noch höheren Unsicherheiten verbunden, weshalb diese Anwendungen mit $T = 0.5$ bewertet werden.

Kriterium 6: Gesamtbewertung

Mit dem Produkt (GEST)* werden alle Kriterien abgedeckt und daraus der relative Wert GEST abgeleitet. Für den Gesamtwert GEST wird die Abstufung der Prioritätenliste ab Prio 3 mit der Anforderung $GEST > 0.40$ angepasst.

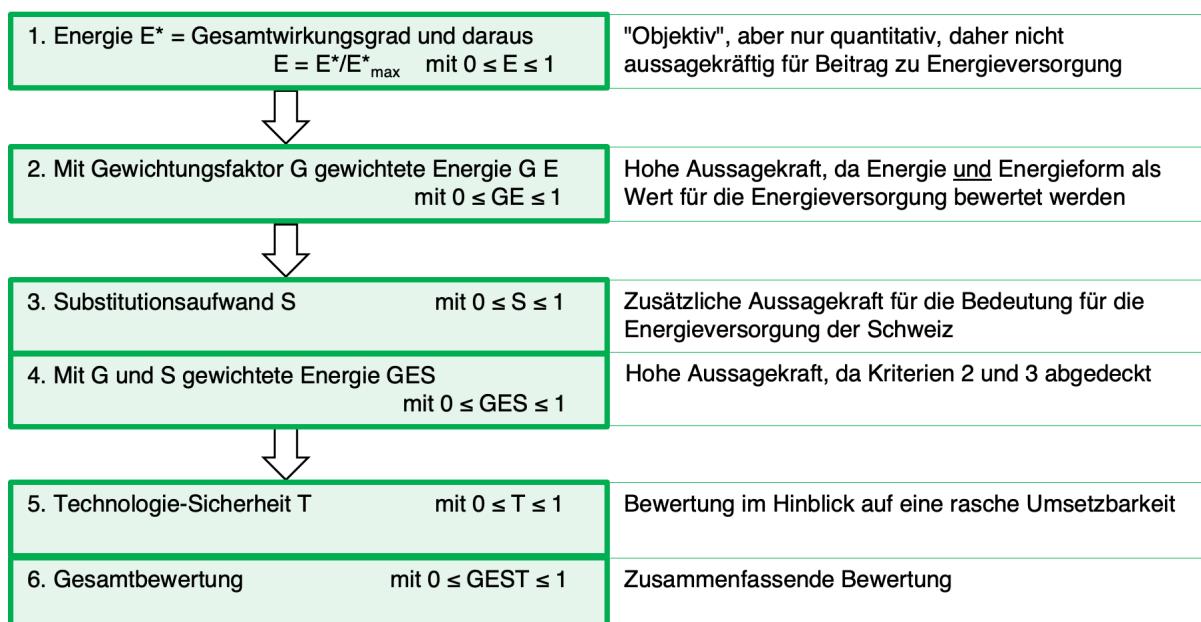


Bild 14 Vorgehen zur Bewertung der Verwertungspfade.

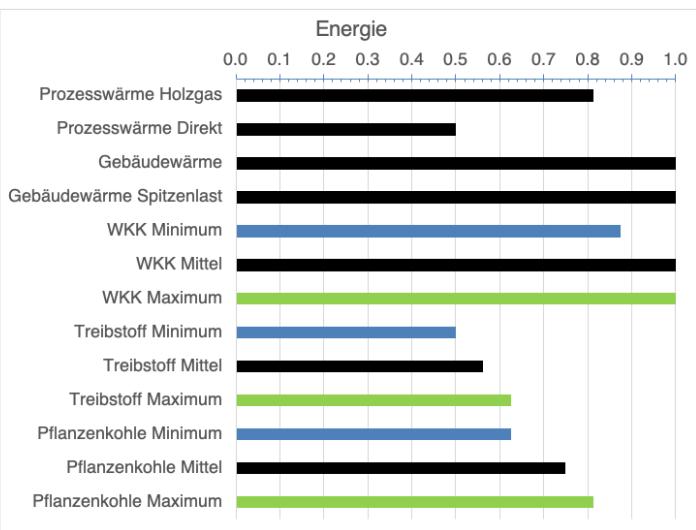
Für die Umwandlungswirkungsgrade werden Erwartungswerte eingesetzt, die im Falle der Prozess- und Gebäudewärme als sicher gelten und die nur bei ungünstig betriebenen Anlagen deutlich unterschritten werden. Für diese Anwendungen wird deshalb nur ein Erwartungswert betrachtet.

Für WKK, Treibstoff und Pflanzenkohle sind jeweils drei Niveaus mit Minimum, Mittel und Maximum ausgewiesen. Das Minimum bezeichnet Werte, die sicher erreicht werden können. Die Werte beruhen auf der Beschreibung der Verfahren in Kapitel 3 und auf eigenen Schätzungen. Im Falle von Treibstoff aus Holz entspricht zum Beispiel der Mindestwert von 40 % ungefähr dem für SNG nach Steubing et al. (2011) ausgewiesenen Wert über die ganze Prozesskette von 39.7 % [30]. Der Maximalwert für Treibstoff aus Holz entspricht dagegen einer optimistischen Annahme zur Produktion von BtL mit einem Vergasungswirkungsgrad von 75 % und einem Synthesewirkungsgrad von 70 %, deren Erreichung zum heutigen Zeitpunkt als unter guten Bedingungen möglich, aber aktuell dennoch unsicher bewertet wird.

4.2 Bewertung und Priorisierung der Verwertungspfade

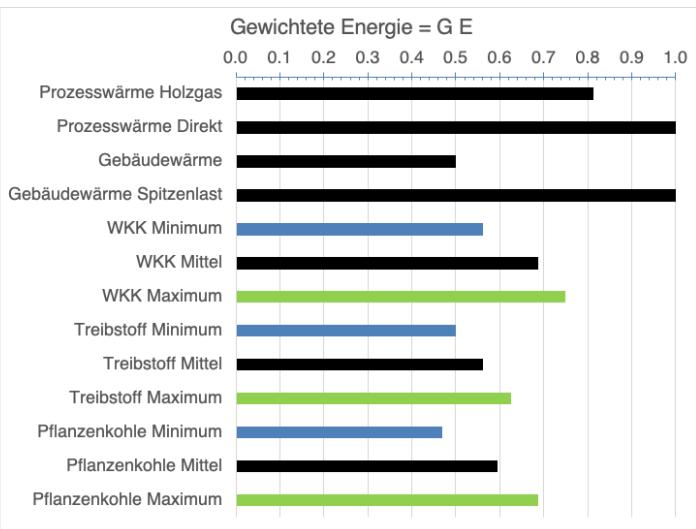
Die Bewertung der Verwertungspfade ist nachfolgend in Bild 15 bis Bild 17 dargestellt.

Verwertungspfad	Energieanteil der Produkte E*					Relativer Wert E
	Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle	Total E*	
Prozesswärme Holzgas	65%				65%	0.81
Prozesswärme Direkt	80%				80%	1
Gebäudewärme	80%				80%	1.00
Gebäudewärme Spitzenlast	80%				80%	1.00
WKK Minimum	50%	20%			70%	0.88
WKK Mittel	50%	30%			80%	1.00
WKK Maximum	40%	40%			80%	1.00
Treibstoff Minimum			40%		40%	0.50
Treibstoff Mittel			45%		45%	0.56
Treibstoff Maximum			50%		50%	0.63
Pflanzenkohle Minimum	25%			25%	50%	0.63
Pflanzenkohle Mittel	25%			35%	60%	0.75
Pflanzenkohle Maximum	20%			45%	65%	0.81



Prio 1 E > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.70	Prio 4 > 0.60	Prio 5 > 0.50	Prio 6 > 0.40	Prio 7 > 0.30	Prio 8 > 0.20	Prio 9 > 0.10	Pri 10 > 0.00
X									
			X						
X									
X									
X									
	X								
		X							
			X						
				X					
					X				
						X			
							X		
								X	
									X

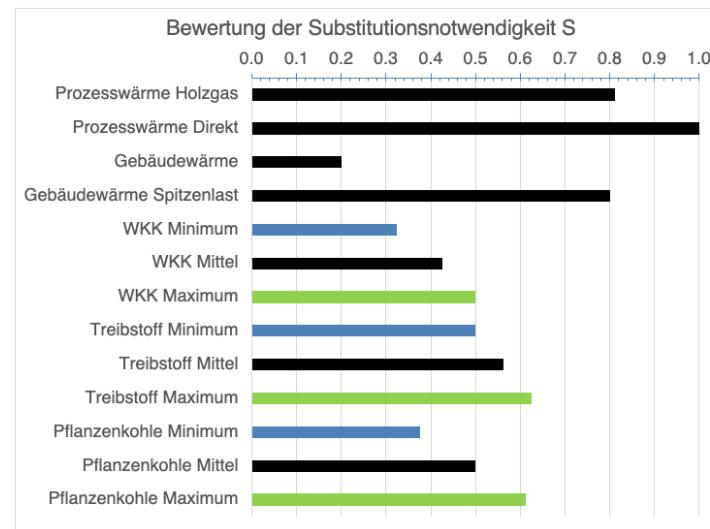
Verwertungspfad	Gewichtungsfaktor G*				Produkt	Relativer Wert G E
	Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle		
Prozesswärme Holzgas	2				1.30	0.81
Prozesswärme Direkt	2				1.60	1
Gebäudewärme	1				0.80	0.50
Gebäudewärme Spitzenlast	2				1.60	1.00
WKK Minimum	1	2			0.90	0.56
WKK Mittel	1	2			1.10	0.69
WKK Maximum	1	2			1.20	0.75
Treibstoff Minimum			2		0.80	0.50
Treibstoff Mittel			2		0.90	0.56
Treibstoff Maximum			2		1.00	0.63
Pflanzenkohle Minimum	1			2	0.75	0.47
Pflanzenkohle Mittel	1			2	0.95	0.59
Pflanzenkohle Maximum	1			2	1.10	0.69



Prio 1 E > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.70	Prio 4 > 0.60	Prio 5 > 0.50	Prio 6 > 0.40	Prio 7 > 0.30	Prio 8 > 0.20	Prio 9 > 0.10	Pri 10 > 0.00
X									
X									
X									
X									
	X								
		X							
			X						
				X					
					X				
						X			
							X		
								X	
									X

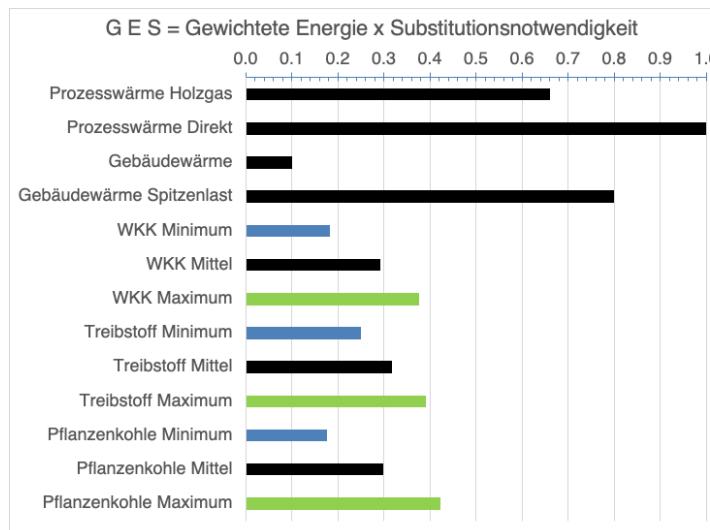
Bild 15 Bewertung der Verwertungspfade (Seite 1 von 3): Bewertung 1: Energie E, Bewertung 2: Gewichtete Energie GE.

Verwertungspfad	Substitutions-Gewichtung S*					Relativer Wert S
	Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle	Total S*	
Prozesswärme Holzgas	100%				0.65	0.81
Prozesswärme Direkt	100%				0.80	1
Gebäudewärme	20%				0.16	0.20
Gebäudewärme Spitzenlast	80%				0.64	0.80
WKK Minimum	20%	80%			0.26	0.33
WKK Mittel	20%	80%			0.34	0.43
WKK Maximum	20%	80%			0.40	0.50
Treibstoff Minimum			100%		0.40	0.50
Treibstoff Mittel			100%		0.45	0.56
Treibstoff Maximum			100%		0.50	0.63
Pflanzenkohle Minimum	20%			100%	0.30	0.38
Pflanzenkohle Mittel	20%			100%	0.40	0.50
Pflanzenkohle Maximum	20%			100%	0.49	0.61



Prio 1 S > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.70	Prio 4 > 0.60	Prio 5 > 0.50	Prio 6 > 0.40	Prio 7 > 0.30	Prio 8 > 0.20	Prio 9 > 0.10	Pri 10 > 0.00
X									
X									
							X		
								X	
									X

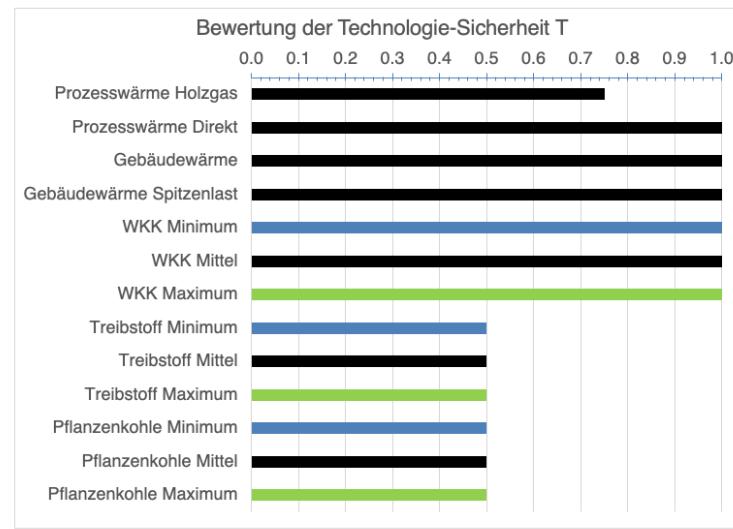
Verwertungspfad	G E	S	Produkt (G E S)*		Relativer Wert G E S
Prozesswärme Holzgas	0.81	0.81	0.66		0.66
Prozesswärme Direkt	1.00	1.00	1.00		1
Gebäudewärme	0.50	0.20	0.10		0.10
Gebäudewärme Spitzenlast	1.00	0.80	0.80		0.80
WKK Minimum	0.56	0.33	0.18		0.18
WKK Mittel	0.69	0.43	0.29		0.29
WKK Maximum	0.75	0.50	0.38		0.38
Treibstoff Minimum	0.50	0.50	0.25		0.25
Treibstoff Mittel	0.56	0.56	0.32		0.32
Treibstoff Maximum	0.63	0.63	0.39		0.39
Pflanzenkohle Minimum	0.47	0.38	0.18		0.18
Pflanzenkohle Mittel	0.59	0.50	0.30		0.30
Pflanzenkohle Maximum	0.69	0.61	0.42		0.42



Prio 1 E S > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.70	Prio 4 > 0.60	Prio 5 > 0.50	Prio 6 > 0.40	Prio 7 > 0.30	Prio 8 > 0.20	Prio 9 > 0.10	Pri 10 > 0.00
X									
X									
							X		
								X	
									X

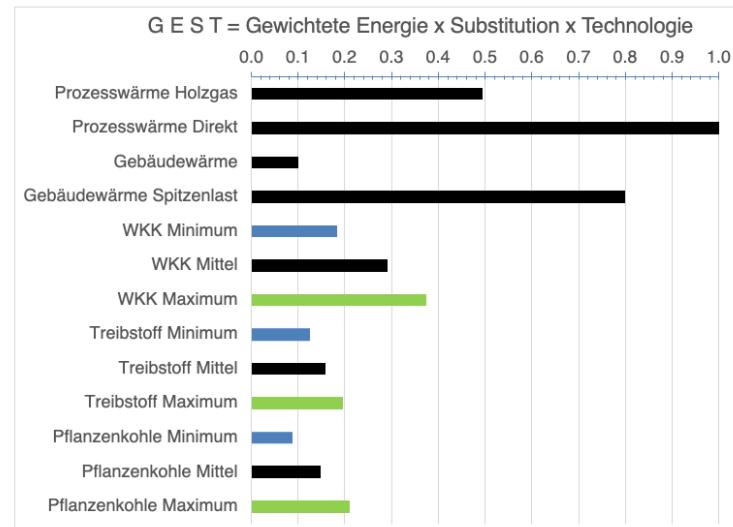
Bild 16 Bewertung der Verwertungspfade (Seite 2 von 3): Bewertung 3: Substitutionsnotwendigkeit S, Bewertung 4: Gewichtete Energie x Substitutionsnotwendigkeit GES.

Verwertungspfad		Technik T
Prozesswärme Holzgas		0.75
Prozesswärme Direkt		1
Gebäudewärme		1.00
Gebäudewärme Spitzenlast		1.00
WKK Minimum		1.00
WKK Mittel		1.00
WKK Maximum		1.00
Treibstoff Minimum		0.50
Treibstoff Mittel		0.50
Treibstoff Maximum		0.50
Pflanzenkohle Minimum		0.50
Pflanzenkohle Mittel		0.50
Pflanzenkohle Maximum		0.50



Prio 1 T > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.70	Prio 4 > 0.60	Prio 5 > 0.50	Prio 6 > 0.40	Prio 7 > 0.30	Prio 8 > 0.20	Prio 9 > 0.10	Prio 10 > 0.00
	X								
X									
X									
X									
X									

Verwertungspfad	G E S	T	Produkt (G E S T)*	Relativer Wert G E S T
Prozesswärme Holzgas	0.66	0.75	0.50	0.50
Prozesswärme Direkt	1.00	1.00	1.00	1
Gebäudewärme	0.10	1.00	0.10	0.10
Gebäudewärme Spitzenlast	0.80	1.00	0.80	0.80
WKK Minimum	0.18	1.00	0.18	0.18
WKK Mittel	0.29	1.00	0.29	0.29
WKK Maximum	0.38	1.00	0.38	0.38
Treibstoff Minimum	0.25	0.50	0.13	0.13
Treibstoff Mittel	0.32	0.50	0.16	0.16
Treibstoff Maximum	0.39	0.50	0.20	0.20
Pflanzenkohle Minimum	0.18	0.50	0.09	0.09
Pflanzenkohle Mittel	0.30	0.50	0.15	0.15
Pflanzenkohle Maximum	0.42	0.50	0.21	0.21



Prio 1 EST > 0.90	Prio 2 > 0.80	Prio 3 > 0.40	Prio 4 > 0.30	Prio 5 > 0.25	Prio 6 > 0.20	Prio 7 > 0.18	Prio 8 > 0.14	Prio 9 > 0.12	Prio 10 > 0.06
	X								
X									
X									

Bild 17 Bewertung der Verwertungspfade (Seite 3 von 3): Bewertung 5: Technologie-Sicherheit T, Bewertung 6: GEST = G x E x S x T.

Die Bewertung der Prioritäten zeigt folgende Trends:

Bewertung 1: Energie

Bei Bewertung der Energie E werden Gebäudewärme und WKK als Prio 1 ausgewiesen und bei Gebäudewärme kein Unterschied zwischen Nutzung von Holz als Hauptenergie oder für Spitzenlast erkennbar. Diese quantitative Bewertung ist einfach verständlich und nachvollziehbar und mit verantwortlich dafür, dass Energieholz bis heute hauptsächlich für Gebäudewärme genutzt und als Hauptenergiträger und teilweise sogar für Bandlastwärme im Sommer eingesetzt wird. Da Energieholz nicht unbegrenzt verfügbar ist, ist diese Bewertung jedoch ungeeignet, um die Verwertung von Energieholz im Hinblick auf einen maximalen Beitrag zur Energieversorgung zu beurteilen. Aus diesem Grund wird die alleinige Bewertung der Energie zur Ableitung von Konsequenzen nicht verwendet.

Bewertungen 2 bis 4 mit Gewichtung und Substitutionsnotwendigkeit

Wenn wie mit Bewertung 2 und 3 eine Gewichtung anhand der Wertigkeit der Energie und des Substitutionsbedarfs berücksichtigt werden, wird direkte Prozesswärme als wichtigste Anwendung gefolgt von Spitzenlast-Gebäudewärme und indirekter Prozesswärme identifiziert. Die indirekte Prozesswärme via Holzgas hat etwas geringere Priorität, weil bei der Umwandlung von Holz zu Holzgas ein Teil des Energieinhalts verloren geht und deshalb für allfällige Alternativen zu Energieholz ein höherer Aufwand zulässig ist als für direkte Prozesswärme. Daneben kommt für den Einsatz eines Gasbrennstoffs in Brennöfen auch die Nutzung von Biogas oder einem aus Biogas hergestellten Ersatzgas wie zum Beispiel Methan infrage.

Gebäudewärme als Hauptenergie wird mit der Gewichtung $G = 0.2$, welche dem geringen Exergeehalt Rechnung trägt, als unwichtigster Verwertungspfad identifiziert.

Wenn mit Bewertung 3 der Substitutionsnotwendigkeit berücksichtigt wird, wie anspruchsvoll mögliche Alternativen zu Holz für den jeweiligen Verwertungspfad sind, sinkt die Priorität der Gebäude-Spitzenlast auf Prio 2, da Niedertemperaturwärme zum Beispiel auch durch Wärmepumpen und Langzeitspeicherung bereitgestellt werden kann. Da dies bei direkter Prozesswärme nicht möglich ist, verbleibt sie als Anwendung höchster Priorität.

Bewertungen 4 (GES) und zusammenfassende Bewertung 6 (GEST)

Im vorliegenden Bericht dienen die Resultate der umfassenden Bewertungen von GES und GEST als Basis für die Zuteilung der Energieholzpotenziale. Die Bewertungen von GES und GEST zeigen, dass Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme besonders hohe Priorität aufweisen, wobei bei der Prozesswärme die direkte Verbrennung vor der Umwandlung zu Holzgas zu favorisieren ist.

Die Anwendungen für WKK, Treibstoff und Pflanzenkohle erzielen ähnliche Prioritäten, wenn von allen Verwertungspfaden jeweils die Maxima, die Mittel oder die Minima verglichen werden. Wenn mit GEST zusätzlich die Technologie-Sicherheit bewertet wird, erzielt WKK eine höhere Priorität als Treibstoffe und Pflanzenkohle, da letztere mit höheren Unsicherheiten verbunden sind.

Gebäudewärme als Hauptenergie erreicht auch bei einer gesamtheitlichen Bewertung von GES und GEST eine sehr geringe Priorität. Da Gebäudewärme einen hohe Technische Sicherheit aufweist, wird auch für die pessimistischen Fälle von Pflanzenkohle, Treibstoffen und WKK jeweils eine vergleichbar niedrige Priorität erzielt.

5 Szenarien zur Nutzung des Energieholzpotenzials

5.1 Annahmen

In diesem Kapitel erfolgt eine Abschätzung der Auswirkung einer Ausschöpfung des Potenzials an Energieholz für verschiedene Szenarien. Die dabei angenommenen Prioritäten orientieren sich an den Bewertungen für GES und GEST im Kapitel 5 und werden wie folgt definiert:

Priorität 1 oder Prio 1-Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme Bei der Prozesswärme erfolgt zuerst die direkte Prozesswärmeverzeugung aus Holz. Sobald diese gedeckt ist, wird Energieholz zur indirekten Prozesswärmeverzeugung via Holzvergasung eingesetzt.
Priorität 2 oder Prio 2-Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> Treibstoff aus Holz und Pflanzenkohle werden gleichwertig eingesetzt bis zur Substitution von heute 28 TWh/a Flugtreibstoff an Endenergie (also je 14 TWh/a Endenergie). Für die Umwandlung von Holz zu Flugtreibstoff wird ein Wirkungsgrad von 0.5 angenommen, sodass ein Bedarf von $14/0.5 = 28$ TWh/a Holz für Flugtreibstoff resultiert. Für Pflanzenkohle wird eine C-Senke vorausgesetzt, wobei wie vorne ausgeführt die gleiche Effektivität pro Energieeinheit resultiert wie für Treibstoff aus Holz und somit auch für Pflanzenkohle ein Bedarf von 28 TWh/a Holz resultiert. WKK mit Holz erfolgt im gleichen Umfang wie der Ersatz von Endenergie durch Treibstoff aus Holz, d.h. 14 TWh/a entsprechend 50 % von heute 28 TWh/a Endenergie für Flugtreibstoff. WKK-Abwärme wird als Gebäudewärme genutzt.
Priorität 3 oder Prio 3-Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> Gebäudewärme mit Energieholz als Hauptenergieträger.

Für den Einsatz von Elektrizität für Wärmepumpen für Gebäudewärme, die als Grundlast im Fall von Energieholz-Spitzenlast dient, wird eine Jahresarbeitszahl von JAZ = 4.0 angenommen. Da Holz als Spitzenlast 26 % des Gebäudewärmebedarfs deckt, resultiert ein zusätzlicher Bedarf an Elektrizität für mit Wärmepumpen erzeugte Gebäudewärme, der ebenfalls ausgewiesen wird. Die Annahmen sind damit wie folgt:

Annahmen für Elektrizitätsbedarf für Wärmepumpen mit Holz als Spitzenlast		
Jahres-Wärmeversorgung	Anteil Holz	26%
	Anteil Wärmepumpe	74%
	Wärme Total / Wärme Holz	3.85
	Wärme WP / Wärme Holz	2.85
Wärmepumpen-Betrieb	JAZ der Wärmepumpen	4
	MJ Umweltwärme pro MJ Wärme	0.75
	MJ Stromverbrauch pro MJ Wärme	0.25

Für Energieholz wird von einem Verbrauch von 16 TWh/a im Jahr 2020 ausgegangen. Als Potenzial wird von 20 TWh/a als Basiswert ausgegangen. Ergänzend wird die Wirkung beschrieben, wenn das Potenzial 25 TWh/a beträgt. In einem dritten Fall wird ein Potenzial von 29 TWh/a beschrieben. Dies ist ein unrealistisch hohes Potenzial, entspricht aber gerade dem Bedarf für die Prio 1-Anwendungen und dient zur Illustration der Wirkung im Falle der vollständigen Deckung dieser Anwendungen, da das Verhalten ähnlich wäre, falls der Endenergieverbrauch aller Anwendungen bis 2050 proportional sinkt.

Mit diesen Annahmen wird der Effekt einer Potenzialausschöpfung für vier Szenarien berechnet.

Die Szenarien sind in Bild 18 beschrieben. Dabei wird von einem Endenergieverbrauch 2020 von 210 TWh/a ausgegangen, zu dem der Wärmeverbrauch für Gebäude mit 79 TWh/a beiträgt. Für 2050 wird von einem auf 39 TWh/a reduzierten Gebäudebedarf ausgegangen. Der Verbrauch an anderen Endenergien wird als konstant angenommen, womit für 2050 ein Endenergieverbrauch von 170 TWh/a resultiert.

Bild 19, Bild 20 und Bild 21 zeigen die detaillierten Annahmen zu den Szenarien und die Berechnungen zum Energieholzverbrauch im Jahr 2050 bei einem Potenzial von 20 TWh/a, 25 TWh/a und 29 TWh/a.

5.2 Resultate

Die Energieholznutzung von 16 TWh/a entspricht einem Anteil am Endenergieverbrauch von 7.6 %. Infolge des reduzierten Wärmeverbrauchs für Gebäude steigt der Anteil bei gleichbleibender Energieholznutzung bis 2050 auf 9.4 %.

Wenn die Energieholznutzung bis 2050 auf 20 TWh/a gesteigert wird und die Verwendung wie bisher und somit zum grossen Teil für Gebäudewärme erfolgt, kann das Energieholz 17 % des Bedarfs zur Substitution fossiler Energien in den Prio 1- und Prio 2-Anwendungen. Wenn im Jahr 2050 kein Holz für ganzjährige Gebäudewärme genutzt, sondern nur für Spitzenlast eingesetzt wird, kann das Energieholz 21 % des Bedarfs decken. Dies zeigt, dass der Bedarf das Potenzial um ein Mehrfaches übersteigt, weshalb in den weiteren Auswertungen eine Bewertung einer schrittweisen Ausnutzung des Potenzials mit absteigender Priorität erfolgt. Die Resultate dazu sind in je einem Set von Tabellen und Diagrammen dargestellt.

Bild 22, Bild 23 und Bild 24 zeigen den resultierenden Energieholzverbrauch im Jahr 2050 bei einem Potenzial von 20 TWh/a, 25 TWh/a und 29 TWh/a.

Bild 25, Bild 26 und Bild 27 zeigen den Energieholzbedarf und den Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch für ein Potenzial von 20 TWh/a, 25 TWh/a und 29 TWh/a. Für das Potenzial von 20 TWh/a ist in Bild 25 zusätzlich die Einsparung des Endenergieverbrauchs der Szenarien 2 bis 4 im Vergleich zu Szenario 1 dargestellt.

Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
weiter wie bisher	wie bisher aber ohne Zubau an Heizungen	noch 50% monovalente Heizungen	keine monovalenten Heizungen mehr
Bisher für Heizungen genutztes Holz wird zu 100% weiter wie bisher genutzt	wie links	50% vom bisher für Heizungen genutzten Holz werden wie bisher genutzt*, der Rest für Prio 1	Für Gebäude wird kein Holz (0%) mehr als Haupt-Energieträger genutzt*, nur noch als Spitzenlast
Bisher für Prozesswärme und WKK genutztes Holz wird weiter wie bisher genutzt	wie links	wie links	wie links
Das Potenzial wird durch Zubau mit gleichmässigem Ausbau wie bisher ausgeschöpft	Potenzial wird durch gleichmässige Aufteilung auf Prio 1 Anwendungen ausgeschöpft		
Der ungedeckte Bedarf an Prio 1 und Prio 2 Anwendungen wird ausgewiesen	wie links		
Der Endenergieverbrauch nach Umstellung auf Holz und WP wird ausgewiesen			
Prio 1: Prozesswärme und Gebäudewärme Spitzenlast			
Prio 2: WKK, Treibstoff, Pflanzenkohle			

Bild 18 Szenarien 1 bis 4 zur Ausschöpfung des Energieholzpotenzials.

Bild 19 Berechnungen zum Energieholzverbrauch bei Ausschöpfung des Potenzials von 20 TWh/a.

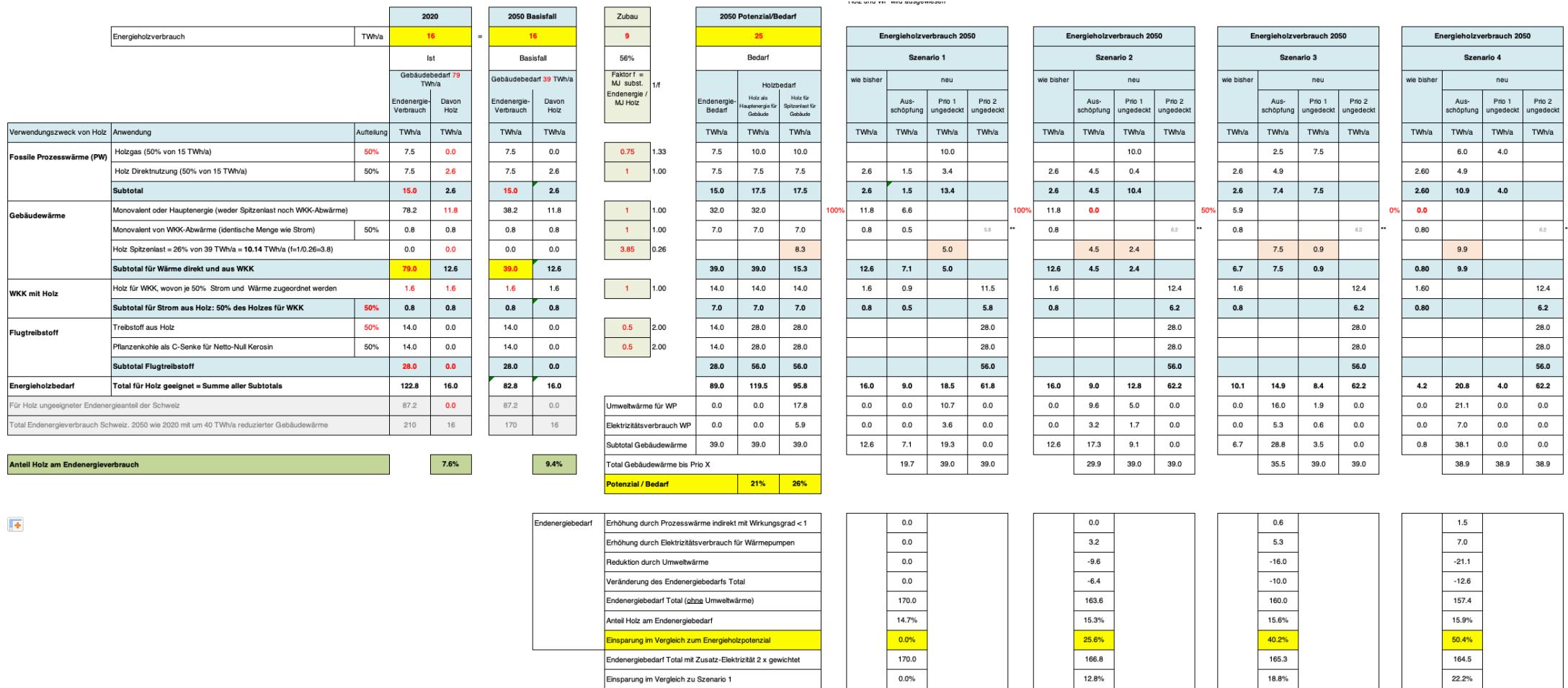


Bild 20 Berechnungen zum Energieholzverbrauch bei Ausschöpfung des Potenzials von 25 TWh/a.

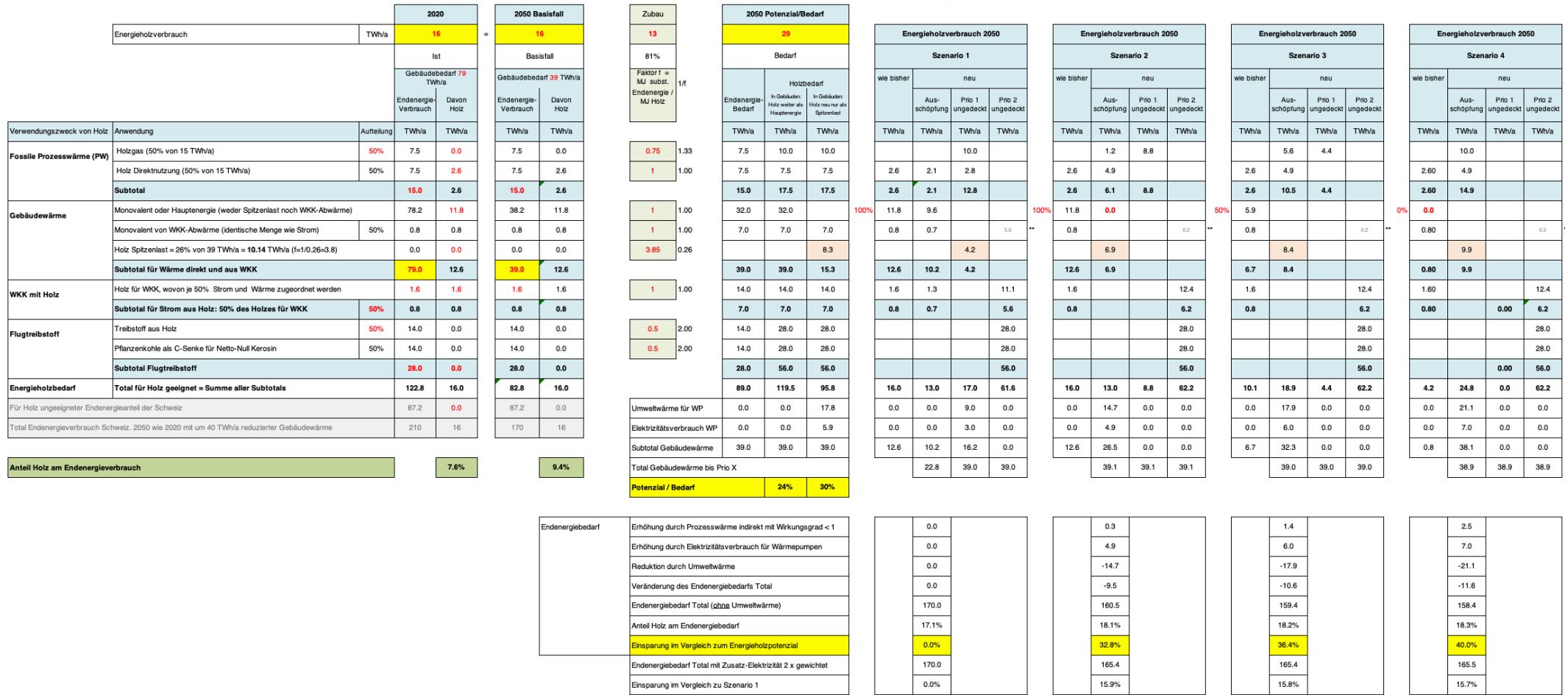


Bild 21 Berechnungen zum Energieholzverbrauch bei Ausschöpfung des Potenzials von 29 TWh/a.

Energieholzverbrauch 2050				
Energieholzbedarf 2050				
TOTAL Energieholzbedarf 2050 bis und mit Prio X				
Verbleibendes Potenzial nach Nutzung bis und mit Prio X				
Bedarf / Potenzial				
Fehlbedarf				
Einsparung an Holzbedarf im Vergleich zu Szenario 1				
Einsparung im Vergleich zum Energieholzpotenzial				
Szenario 1				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	4.0	20.3	62.0	
16.0	20.0	40.3	102.3	
4.0	0.0	-20.3	-82.3	
0.80	1.00	2.01	5.11	
20%	0%	-101%	-411%	
		0.0		
		0%		
Szenario 2				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	4.0	17.8	62.2	
16.0	20.0	37.8	100.0	
4.0	0.0	-17.8	-80.0	
0.80	1.00	1.89	5.00	
20%	0%	-89%	-400%	
		2.3		
		12%		
Szenario 3				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
10.1	9.9	13.4	62.2	
10.1	20.0	33.4	95.6	
9.9	0.0	-13.4	-75.6	
0.51	1.00	1.67	4.78	
50%	0%	-67%	-378%	
		6.7		
		33%		
Szenario 4				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
4.2	15.8	9.0	62.2	
4.2	20.0	29.0	91.2	
15.8	0.0	-9.0	-71.2	
0.21	1.00	1.45	4.56	
79%	0%	-45%	-356%	
		11.1		
		55%		

Bild 22 Energieholzverbrauch 2050 bei Ausschöpfung des Potenzials von 20 TWh/a.

Energieholzverbrauch 2050				
Energieholzbedarf 2050				
TOTAL Energieholzbedarf 2050 bis und mit Prio X				
Verbleibendes Potenzial nach Nutzung bis und mit Prio X				
Bedarf / Potenzial				
Fehlbedarf				
Einsparung an Holzbedarf im Vergleich zu Szenario 1				
Einsparung im Vergleich zum Energieholzpotenzial				
Szenario 1				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	9.0	18.5	61.8	
16.0	25.0	43.5	105.2	
9.0	0.0	-18.5	-80.2	
0.64	1.00	1.74	4.21	
36%	0%	-74%	-321%	
		0.0		
		0%		
Szenario 2				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	9.0	12.8	62.2	
16.0	25.0	37.8	100.0	
9.0	0.0	-12.8	-75.0	
0.64	1.00	1.51	4.00	
36%	0%	-51%	-300%	
		5.2		
		21%		
Szenario 3				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
10.1	14.9	8.4	62.2	
10.1	25.0	33.4	95.6	
14.9	0.0	-8.4	-70.6	
0.40	1.00	1.34	3.82	
60%	0%	-34%	-282%	
		9.6		
		38%		
Szenario 4				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
4.2	20.8	4.0	62.2	
4.2	25.0	29.0	91.2	
20.8	0.0	-4.0	-66.2	
0.17	1.00	1.16	3.65	
83%	0%	-16%	-265%	
		14.0		
		56%		

Bild 23 Energieholzverbrauch 2050 bei Ausschöpfung des Potenzials von 25 TWh/a.

Energieholzverbrauch 2050				
Energieholzbedarf 2050				
TOTAL Energieholzbedarf 2050 bis und mit Prio X				
Verbleibendes Potenzial nach Nutzung bis und mit Prio X				
Bedarf / Potenzial				
Fehlbedarf				
Einsparung an Holzbedarf im Vergleich zu Szenario 1				
Einsparung im Vergleich zum Energieholzpotenzial				
Szenario 1				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	13.0	17.0	61.6	
16.0	29.0	46.0	107.5	
13.0	0.0	-17.0	-78.5	
0.55	1.00	1.59	3.71	
45%	0%	-59%	-271%	
		0.0		
		0%		
Szenario 2				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
16.0	13.0	8.8	62.2	
16.0	29.0	37.8	100.0	
13.0	0.0	-8.8	-71.0	
0.55	1.00	1.30	3.45	
45%	0%	-30%	-245%	
		7.5		
		26%		
Szenario 3				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
10.1	18.9	4.4	62.2	
10.1	29.0	33.4	95.6	
18.9	0.0	-4.4	-66.6	
0.35	1.00	1.15	3.30	
65%	0%	-15%	-230%	
		11.9		
		41%		
Szenario 4				
wie bisher	Aus-schöpfung	Prio 1 ungedeckt	Prio 2 ungedeckt	
TWh/a	TWh/a	TWh/a	TWh/a	
4.2	24.8	0.0	62.2	
4.2	29.0	29.0	91.2	
24.8	0.0	0.0	-62.2	
0.14	1.00	1.00	3.14	
86%	0%	0%	-214%	
		16.3		
		56%		

Bild 24 Energieholzverbrauch 2050 bei Ausschöpfung des Potenzials von 29 TWh/a (was zur Deckung aller Prio 1-Anwendungen notwendig wäre).

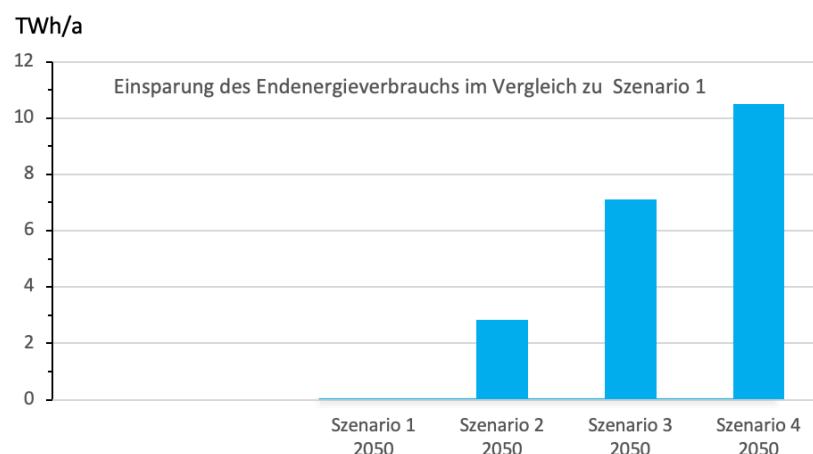
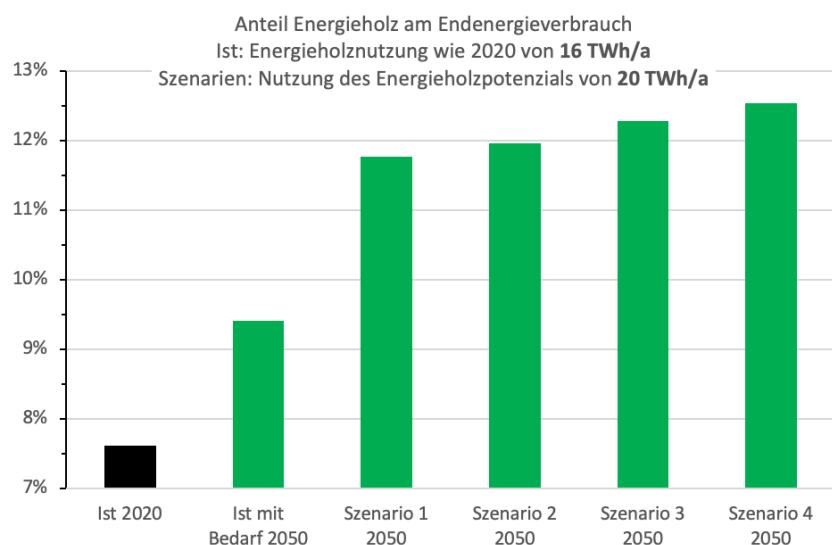
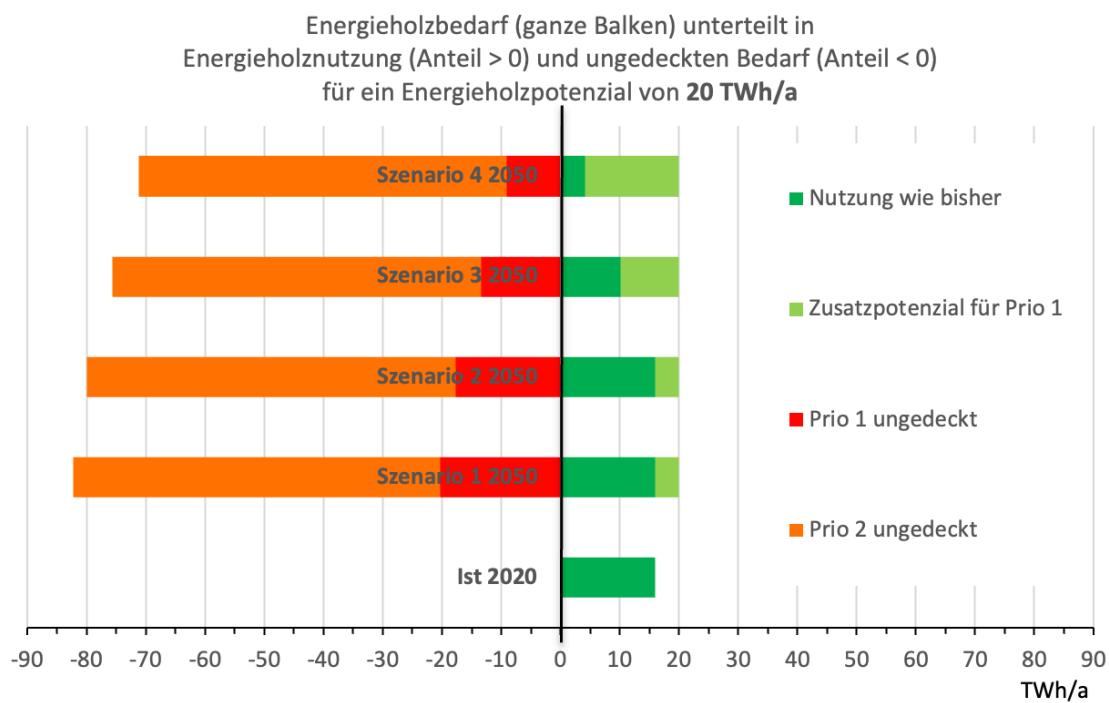


Bild 25 Resultate für ein Energieholzpotenzial von **20 TWh/a**. Oben: Energieholzbedarf unterteilt in Energieholznutzung und ungedeckten Bedarf. Mitte: Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch. Unten: Einsparung an Endenergieverbrauch der Szenarien 2 bis 4 im Vergleich zu Szenario 1.

Energieholzbedarf (ganze Balken) unterteilt in
Energieholznutzung (Anteil > 0) und ungedeckten Bedarf (Anteil < 0)
für ein Energieholzpotenzial von **25 TWh/a**

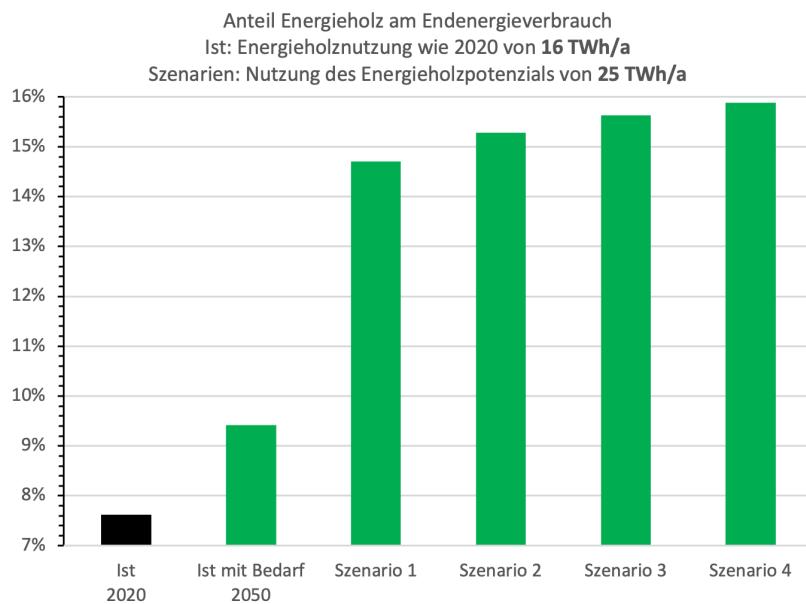
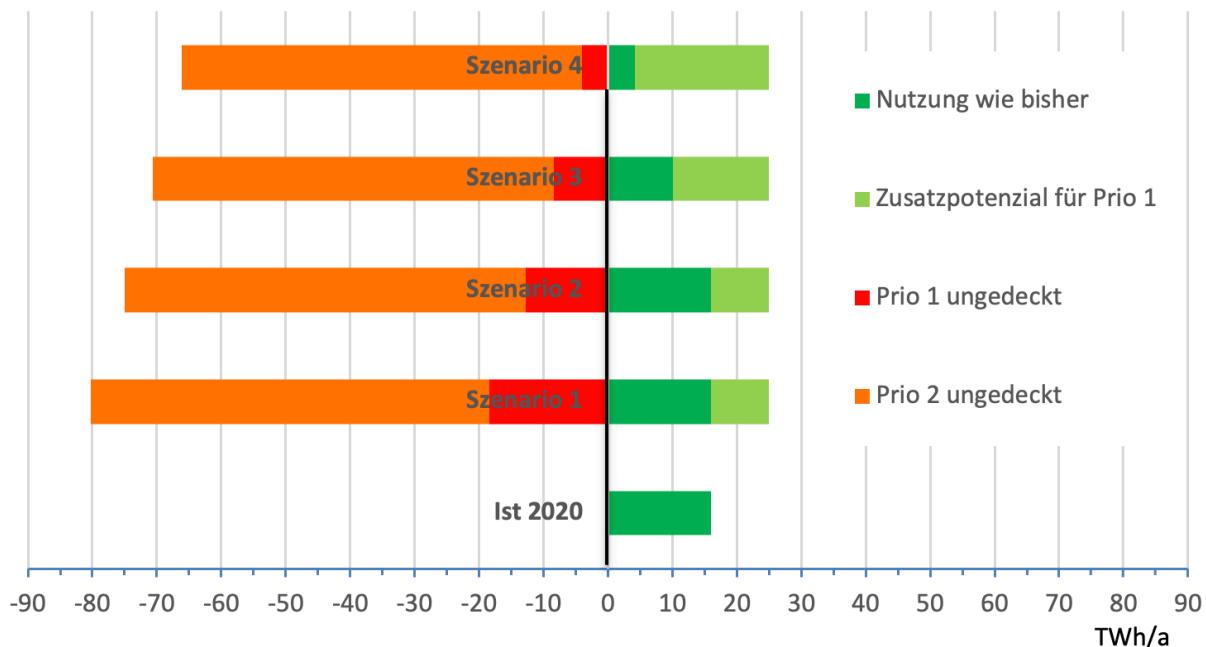
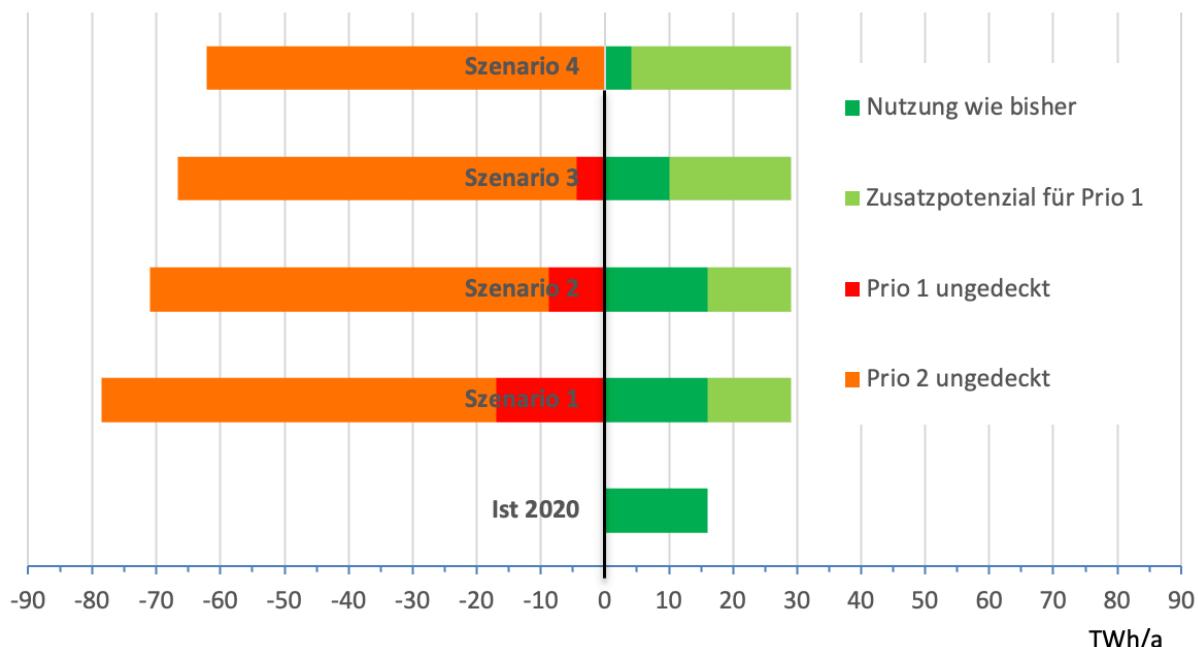


Bild 26 Resultate für ein Energieholzpotenzial von **25 TWh/a**.
Oben: Energieholzbedarf unterteilt in Energieholznutzung und ungedeckten Bedarf.
Unten: Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch.

Energieholzbedarf (ganze Balken) unterteilt in
Energieholznutzung (Anteil > 0) und ungedeckten Bedarf (Anteil < 0)
für ein Energieholzpotenzial von **29 TWh/a**



Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch
Ist: Energieholznutzung wie 2020 von **16 TWh/a**
Szenarien: Nutzung des Energieholzpotenzials von **29 TWh/a**

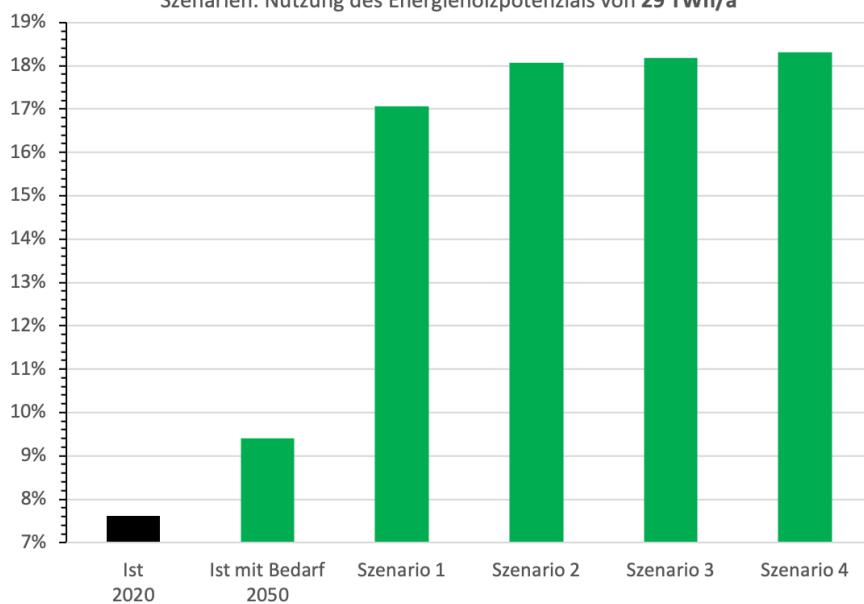


Bild 27 Resultate für ein Energieholzpotenzial von **29 TWh/a**.
Oben: Energieholzbedarf unterteilt in Energieholznutzung und ungedeckten Bedarf.
Unten: Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch.

6 Schlussfolgerungen

Die Energieholznutzung von rund 16 TWh/a im Jahr 2020 kann voraussichtlich noch um mindestens 25 % erhöht werden. Vorliegend wird deshalb von 20 TWh/a als wahrscheinlich erreichbarer Energieholznutzung ausgegangen.

Zur Substitution der Flugtreibstoffe kommt die Synthese von Treibstoffen aus Holz oder die Produktion von Pflanzenkohle und deren Sequestrierung im Boden infrage, wobei für Pflanzenkohle eine der Kohlenstoffsenke äquivalente Menge an fossilem Kerosin für Netto-Null-Treibhausgasemissionen genutzt werden kann. Die Aufteilung auf Treibstoff aus Holz und Pflanzenkohle ist unerheblich, da mit beiden Varianten eine ähnliche Menge Flugtreibstoff pro Tonne Holz zur Verfügung gestellt werden kann. Aus diesem Grund wird der Bedarf an Flugtreibstoff beispielhaft je hälftig auf Treibstoff aus Holz und auf Pflanzenkohle aus Holz verteilt. Da der maximal mögliche Bedarf an Wärme-Kraft-Kopplung den Bedarf an Flugtreibstoff übersteigt, Elektrizität jedoch auch mit anderen erneuerbaren Energien produziert werden kann, wird für Wärme-Kraft-Kopplung die gleiche Menge an zu ersetzender Endenergie wie für Treibstoff aus Holz angenommen.

Unter diesen Bedingungen wird für die verschiedenen Verwertungspfade eine Priorisierung vorgenommen. Diese berücksichtigt die produzierten Nutzenergien, welche aufgrund ihrer technischen bzw. exergetischen Wertigkeit gewichtet werden. Für Gebäudewärme wird ein Gewichtungsfaktor von 1 angenommen, während Prozesswärme, Elektrizität, Spitzenlast-Gebäudewärme und Pflanzenkohle mit einem Faktor 2 gewichtet werden. Mit dieser Gewichtung und einer zusätzlichen Beurteilung der Schwierigkeit zum Ersatz heutiger Anwendungen mit fossilen Energieträgern wird folgende Priorisierung der Verwertungspfade abgeleitet:

Priorität 1: Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme, wobei bei der Prozesswärme eine direkte Verwertung von Holz einer indirekten mit Holzgas vorgezogen wird.

Priorität 2: WKK mit Holz sowie zum Ersatz von Flugtreibstoffen zu gleichen Teilen einerseits Treibstoff aus Holz (BtL) und andererseits Pflanzenkohle zur Sequestrierung mit Nutzung von fossilem Flugtreibstoff unter Einhaltung von Netto-Null-Treibhausgasemissionen.

Priorität 3: Gebäudewärme mit Energieholz als Hauptenergieträger. Dieser Bedarf sinkt auf null, wenn die Spitzenlast-Gebäudewärme mit Energieholz zu 100 % gedeckt wird.

Die Resultate der Berechnungen zeigen folgende Trends:

- Die heutige Energieholznutzung von 16 TWh/a entspricht 7.6 % des Endenergieverbrauchs.
- Bei halbiertem Wärmeverbrauch der Gebäude steigt der Anteil der gleichen Energieholzmenge am Endenergieverbrauch auf 9.4 %.
- Das Energieholzpotenzial von 20 TWh/a reicht für 17 % des Bedarfs, der für Energieholz im Jahr 2050 entsteht, wenn damit die heute für Gebäudewärme, Prozesswärme und Flugtreibstoffe genutzten fossilen Energieträger substituiert werden müssen, der Bedarf für alle Anwendungen konstant bleibt und der Zubau wie bisher vorwiegend für ganzjährige Gebäudewärme erfolgt und zusätzlich ein Zubau an Wärme-Kraft-Kopplung erfolgt. Wenn für Gebäudewärme eine Halbierung des Bedarfs angenommen wird, steigt der abgedeckte Anteil zum Ersatz fossiler Energien auf 21 %.

- Wenn das Energieholzpotenzial von 20 TWh/a im **Szenario 1** "Weiter wie bisher" vorwiegend für ganzjährige Gebäudewärme genutzt wird, deckt Energieholz im Jahr 2050 mit halbiertem Verbrauch der Gebäude rund **11.8 %** des gesamten Endenergieverbrauchs. Dabei verbleiben ein ungedeckter Bedarf für die Prio 1-Anwendungen von rund 20 TWh/a. Das Energieholz reicht somit nur für die Hälfte der Prozesswärme und der Spitzenlast-Gebäudewärme. Der ungedeckte Bedarf für die Prio 1- und Prio 2-Anwendungen beträgt 82 TWh/a.
- Wenn Energieholz in den Szenarien 2 bis 4 zunehmend für Spitzenlast-Gebäudewärme eingesetzt wird, steigt der Anteil von Energieholz am Gesamtverbrauch.
 - Wenn im **Szenario 2** das 2020 bereits genutzte Energieholz wie bisher genutzt, aber das zusätzliche Potenzial von 4 TWh/a für Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme reserviert wird, steigt der Anteil von Energieholz am Gesamtverbrauch auf **12.0 %**.
 - Wenn nach **Szenario 4** kein Energieholz mehr für ganzjährige Gebäudewärme genutzt wird, steigt der Anteil von Energieholz am Gesamtverbrauch auf **12.5 %**. Der ungedeckte Prio 1-Bedarf sinkt dabei auf 9 TWh/a und somit auf weniger als die Hälfte wie beim Szenario 1. Der ungedeckte Bedarf für die Prio 1- und Prio 2-Anwendungen sinkt um 11 TWh/a auf 71 TWh/a. Die Differenz zum Szenario "Weiter wie bisher" stammt zu 75 % aus Umweltwärme und zu 25 % aus Elektrizität zum Antrieb von Wärmepumpen. Da die Winterspitzen der Gebäude mit Energieholz gedeckt werden, handelt es sich beim zusätzlichen Stromverbrauch jedoch nicht um Winterstrom, sondern zum Beispiel um Photovoltaikstrom von Gebäuden. Der ungedeckte Bedarf für ganzjährige Gebäudewärme wird dabei null, da sämtliche Gebäude mit Wärmepumpen und Energieholz-Spitzenlast versorgt werden. Der dazu notwendige Strom kann durch Photovoltaikanlagen auf rund 50 % der dafür geeigneten Dachflächen produziert werden [9]. Die saisonale Gegenläufigkeit zwischen Solarstromproduktion und Wärmebedarf wird mit der Kombination von solarbetriebenen Wärmepumpen und Holzheizungen entschärft, da das Energieholz bei geringem Solarertrag zum Einsatz kommt und die Funktion des Saisonspeichers übernimmt. Dies zeigt, dass Energieholz bis im Jahr 2050 nicht mehr für ganzjährige Gebäudewärme genutzt werden sollte und dass die anderen erneuerbaren Energieträger noch stärker als die Energieholznutzung ausgebaut werden müssen. Für den ungedeckten Anteil an Prozesswärme ist vorab das Potenzial von Effizienzsteigerungen auszuschöpfen. Daneben kommt nebst der Nutzung von Energieholz auch der Einsatz von Biogas aus Vergärungsanlagen infrage.
 - Als Mittelweg zwischen Szenario 1 (Nutzung des Potenzials mit Anwendungen "wie bisher") und Szenario 4 (keine ganzjährige Gebäudewärme mehr) wird im **Szenario 3** die Hälfte des bisher für ganzjährige Gebäudewärme genutzten Holzes weiter so genutzt. In diesem Szenario beträgt der Anteil des Energieholzes am Endenergieverbrauch **12.3 %**. Dieses Szenario kann als Ziel für das Jahr 2035 dienen, da ein Ersatz der Hälfte der bisherigen Nutzung in diesem Zeithorizont als herausfordernd, aber realisierbar beurteilt wird.
- In allen Szenarien verbleibt ein ungedeckter Bedarf an Prio 1-Anwendungen, sodass für Treibstoff und Pflanzenkohle kein Energieholz zur Verfügung steht.

Aus diesen Erkenntnissen werden folgende Empfehlungen abgeleitet:

1. Energieholz sollte in den nächsten Jahrzehnten prioritär für Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme genutzt werden. Heutige Anwendungen mit Energieholz als Hauptenergieträger für Gebäude sollten auf mit Wärmepumpen kombinierte Systeme umgerüstet werden, welche mit zusätzlichem erneuerbarem Strom betrieben werden und in denen Energieholz nur für Spitzenlastwärme im Winter eingesetzt wird. In Bezug auf den Ressourcenverbrauch ist unerheblich, ob entsprechende Anlagen dezentral realisiert werden oder zur Versorgung thermischer Netze dienen. Der Zubau von thermischen Netzen ist deshalb nicht im Widerspruch zu einem Verzicht auf Holz als Hauptenergieträger für Gebäude, sondern kann die Umsetzung sogar unterstützen.
2. Selbst bei Umsetzung dieser Massnahmen reicht das heute bekannte Energieholzpotenzial nur für rund zwei Drittel des Bedarfs für Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme. Dabei ist zu beachten, dass der effektive Energieholzbedarf infolge von nicht berücksichtigten Effekten sowohl überschätzt als auch unterschätzt werden kann. So wird ein Teil der Gebäude ganzjährig mit Wärmepumpen versorgt, was bei ausreichenden Kapazitäten an Winterstrom weiterhin der Fall sein wird und zur Folge hat, dass der angenommene Energieholzbedarf überschätzt wird. Andererseits wird es auch in Zukunft noch einzelne ganzjährig mit Holz versorgte Gebäude geben, womit das Potenzial für die Prio 1-Anwendungen überschätzt wird. Nebst einem sinnvollen Ausbau der Energieholznutzung sind deshalb weitere Massnahmen zur Energieversorgung von Gebäuden, Industrie und Luftverkehr notwendig. Dazu zählen saisonale Energiespeicher und die Herstellung von Flugtreibstoffen aus anderen erneuerbaren Quellen wie die Produktion von E-Fuels. Es ist aber davon auszugehen, dass diese Massnahmen deutlich höhere Kosten als die optimale Nutzung von Energieholz verursachen, weshalb eine ressourcenoptimierte Energieholznutzung höchste Priorität hat.
3. Wärme-Kraft-Kopplung kann als Ergänzung zu Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme dienen, da sie eine ähnlich hohe Ressourceneffizienz erzielt und zur Sicherung der Energieversorgung im Winter beiträgt.
4. Treibstoff aus Holz und Pflanzenkohle mit Sequestrierung des Kohlenstoffs ermöglichen eine in Bezug auf Ressourcen und CO₂-Emissionen ungefähr gleichwertige Nutzung von Energieholz. Da jedoch Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme aus Holz einen grösseren Beitrag zur Energieversorgung der Schweiz leisten, steht bis 2050 kein Holz für Treibstoffe und Pflanzenkohle zur Verfügung. Beide Anwendungen unterliegen zudem noch Unsicherheiten. Im Fall der Treibstoffherstellung betrifft dies die Erzielung des mit 50 % optimistisch angenommenen Wirkungsgrades. Im Fall der Pflanzenkohle ist eine Klärung zur Nutzung in der Landwirtschaft notwendig, da die verantwortlichen Stellen von Bund und Kantonen einer Einbringung in Böden in der Schweiz ablehnend gegenüberstehen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass in Bezug auf Ressourceneffizienz und Umweltschäden vorteilhaft ist, wenn Pflanzenkohle aus schweizerischer Produktion vorab zur Substitution von importierter Grillkohle genutzt wird, da damit verbundener Raubbau an Wäldern in anderen Weltregionen und Langstreckentransporte von Holz verhindert werden. Für in der Schweiz produzierte Pflanzenkohle besteht somit kein Potenzial an Energieholz und auch kein Bedarf als Beitrag zur Energieversorgung. Demgegenüber kann die Herstellung von Pflanzenkohle oder von

torrefizierter Biomasse¹⁴ [36] als Zwischenstufe zwischen Biomasse und Pflanzenkohle sinnvolle Anwendungen insbesondere von biogenen Reststoffen ermöglichen, die nicht als Energieholz klassifiziert und für konventionelle Energieholzanlagen ungeeignet sind. Dies betrifft zum Beispiel Reststoffe aus der Landwirtschaft sowie aus Gartenabbaum, Vergärungsanlagen und von Strassenböschungen. Dabei handelt es sich um Sortimente, die wegen geringer Schüttdichte und Mineralstoffgehalte schlecht geeignet sind für eine direkte Verwertung in Energieholzanlagen, jedoch nach einer thermischen Behandlung durch Verkohlung oder Torrefizierung energetisch oder stofflich genutzt werden können.

¹⁴ Torrefizierung ist ein „mildes“ thermisches Verfahren, in dem Biomasse bei moderaten Temperaturen unter Luftabschluss umgewandelt wird [36]. Der Kohlenstoffgehalt wird dabei erhöht, erreicht aber tiefere Werte als von Holzkohle oder Pflanzenkohle. Torrefizierung kann für Biomasse mit geringer Schüttdichte eingesetzt werden, die nach der Torrefizierung zu Pellets verpresst und als Ersatz fossiler Kohle genutzt werden kann. Die Torrefizierung wird deshalb insbesondere in Ländern mit Kohlekraftwerken eingesetzt und kommt als Alternative zur Herstellung von Pflanzenkohle infrage, wenn eine energetische Verwertung angestrebt wird, da der Energieinhalt torrefizierter Biomasse höher ist als derjenige von Pflanzenkohle.

7 Literatur

- [1] Kemmler, A. et al.: Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2019, Infras, TEP & Prognos im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern 2020
- [2] Stettler, Y.: Schweizerische Holzenergiestatistik. Erhebung für das Jahr 2019. Basler & Hofmann im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern 2020.
- [3] Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R.: Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. WSL, Birmensdorf, Berichte Heft 57, 2017.
- [4] Hammer, S.; Soini, M.; Iten, R.; Nussbaumer, T.; Zotter, P.: Analyse von Hemmnissen und Massnahmen zur Ausschöpfung des Holzenergiopotenzials, Infras und Verenum, Bundesamt für Energie, Bern 2021.
- [5] Bundesamt für Energie: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2022, Bern 2023.
- [6] Bauer, C. et al.: Faktensammlung Wärme, Forum Energiespeicher Schweiz und Wärme Initiative Schweiz, AEE SUISSE, Bern 2019
- [7] Wikipedia: Holzkohle. <https://de.wikipedia.org/wiki/Holzkohle>, 16.08.2023
- [8] Das Europäische Pflanzenkohle Zertifikat: <https://www.european-biochar.org/de>, 16.08.2023
- [9] Nussbaumer, T.: PV-Wärmepumpen und Holz für Gebäudewärme, HK Gebäudetechnik 1-23, 48-53
- [10] Weinhofer, G.; Hennemann, P.; Nussbaumer, T.: Grossbäckerei Schafisheim, 14. Holzenergie-Symposium. ETH Zürich 16.9.16, Verenum, ISBN 3-908705-31-2, 173–192
- [11] Keel, A.: Energieholzpotenzial Schweiz: Reicht es noch für Pflanzenkohle? Pflanzenkohle-Fachtagung 2023, Brugg-Windisch 16. Juni 2023, www.charnet.ch
- [12] Nussbaumer, T.; Thalmann, S; Jenni, A.; Ködel, J.: Planungshandbuch Fernwärme. Bundesamt für Energie, Bern 2018, Version 1.2, ISBN 3-908705-30-4, 223 Seiten, www.qmfernwaerme.ch
- [13] Zimmer, B.: Ökobilanz Waldhackschnitzel. LWF aktuell 74 (2010), 22–25
- [14] BAFU: Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern 2015.
- [15] Nussbaumer, T.: Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung, 8. Holzenergie-Symposium, Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3-908705-10-X, 7–27 (auch: Nussbaumer, T.: Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz, BWK 57 (2005) 12 59–61)
- [16] Schlesinger, H.: Are wood pellets a green fuel? Science, Vol 359 Issue 6382, 1328–1329
- [17] Hennenberg, K. et al.: Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2022.
- [18] Kessler, F., Knechtle, N., Frischknecht, R.: Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bern 2000
- [19] Hasler, P.; Nussbaumer, T.: Herstellung von Holzpellets – Einfluss von Presshilfsmitteln auf Produktion, Qualität, Lagerung, Verbrennung sowie Energie- und Ökobilanz von Holzpellets. Bundesamt für Energie, Bern 2001
- [20] Sunde, K.; Brekke, A.; Solberg, B.: Environmental impacts and costs of woody Biomass-to-Liquid (BTL) production and use — A review, Forest Policy and Economics 13 (2011) 591–602
- [21] Yazdanie, M.; Noembrini, F.; Dossetto, L.; Boulouchos, K.: A comparative analysis of well-to-wheel primary energy demand and greenhouse gas emissions for the operation of alternative and conventional vehicles in Switzerland, considering various energy carrier production pathways, Journal of Power Sources, Volume 249, 2014, Pages 333-348, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.043>.
- [22] Ail, S.; Dasappa, S.: Biomass to liquid transportation fuel via Fischer Tropsch synthesis - Technology review and current scenario. Renewable and Sustainable Energy Reviews 58 (2016) 267–286

- [23] Dimitriou, I.; Goldingay, H.; Bridgwater, A.: Techno-economic and uncertainty analysis of Biomass to Liquid (BTL) systems for transport fuel production, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 88 (2018) 160–175
- [24] Wikipedia: Choren Industries. https://de.wikipedia.org/wiki/Choren_Industries. 07.07.2023.
- [25] Lappas, A.; Heracleous, E.: Production of biofuels via Fischer-Tropsch synthesis: biomass-to-liquids. Chapter 18, *Handbook of Biofuels Production*, 2e. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00018-7>.
- [26] Nussbaumer, T.: Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050. *Schweiz Z Forstwes*, 12 2013, 389–397
- [27] Wilnhammer, M.; Lubenau, C.; Wittkopf, S.; Richter, K.; Weber-Blaschke, G.: Effects of increased wood energy consumption on global warming potential, primary energy demand and particulate matter emissions on regional level based on the case study area Bavaria (Southeast Germany), *Biomass and Bioenergy* 81 (2015) 190–201
- [28] Nussbaumer, T.; Boogen, N.: Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen – Aktualisierung des Arbeitsblatts Emissionsfaktoren Feuerungen und Vorabklärungen zur Bestimmung des Kondensatanteils, Bundesamt für Umwelt, Bern 2010, 48 Seiten
- [29] Vadenbo, C.; Tonini, D.; Burg, V.; Thomas Astrup, F.; Thees, O.; Hellweg, S.: Environmental optimization of biomass use for energy under alternative future energy scenarios for Switzerland, *Biomass and Bioenergy* 119 (2018) 462–472
- [30] Steubing, B.; Zah, R.; Ludwig, C.: Life cycle assessment of SNG from wood fro heating, electricity, and transportation, *Biomass and Bioenergy* 35 (2011) 2950–2960
- [31] Charnet: Schweizer Fachverband für Pflanzenkohle. <https://charnet.ch/>, 16.08.2023
- [32] Schwilch, G.: Eintrag von Pflanzenkohle in Schweizer Böden – Chancen und potentielle Gefahren. Fachtagung Pflanzenkohle, CHARNET, Brugg-Windisch, 16.06.2023. <https://charnet.ch/> 16.08.2023
- [33] WWF Schweiz: Marktanalyse Holzkohle 2018 - Wir grillieren den Tropenwald. WWF Schweiz, Zürich 2018
- [34] Energieförderungsverordnung (EnFV) vom 1. November 2017 (Stand am 1. Januar 2023). 730.03. Bern 2023
- [35] Nussbaumer, T.: International Energy Agency IEA Bioenergy Task 32 Biomass Combustion, Jahresbericht 2022, Bundesamt für Energie, Bern 2022
- [36] Kiel, J.: Torrefaction: Fundamentals, Processes and Potential. In: T. Nussbaumer (Hrsg.), 12. Holzenergie-Symposium, Zürich, 14.09.2012, <http://www.holzenergie-symposium.ch/>