

Ressourceneffizienz verschiedener Verfahren zur Nutzung von Energieholz

Verwertungspfade Holzenergie

Energieholz kann Prozesswärme erzeugen und für den Spitzenbedarf von Gebäuden im Winter gespeichert werden. In Zukunft muss Holz für diese Anwendungen reserviert werden. Zum Heizen allein ist Holz zu schade und die Treibstoffherstellung aus Holz verursacht Verluste, die den Beitrag dieser begrenzten verfügbaren Ressource vermindern.

Text Thomas Nussbaumer *

Bilder Adobe Stock, Thomas Nussbaumer

Um eine hohe Wertschöpfung und einen hohen Nutzen für die Umwelt zu erzielen, wird Holz entlang einer Kaskade zuerst als Rohstoff genutzt, bei der Energieholz als Nebenprodukt der Wald- und Holzwirtschaft anfällt. Energieholz umfasst Stückholz, Waldhackschnitzel, Restholz aus der Holzverarbeitung, Holzpellets und Altholz nach der Verwendung von Holzprodukten. Die häufigste Anwendung von Energieholz ist der Einsatz für Gebäudewärme. Daneben besteht ein Bedarf für Prozesswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Treibstoffe und Pflanzenkohle. Weil Energieholz aus dem nachhaltig bewirtschafteten Schweizer Wald erneuerbar und CO₂-neutral ist, wird die Holzenergie seit über dreissig Jahren gefördert. Energieholz ist jedoch begrenzt. Da der mögliche Bedarf das Potenzial weit übersteigt, wird Energieholz beim Ausstieg aus den fossilen Energien zu einem raren Gut. Für die Zukunft steht deshalb nicht mehr das Ziel im Vordergrund, dass Energieholz genutzt wird, sondern es geht vielmehr um die Frage, wie Energieholz genutzt werden soll, damit es einen maximalen Beitrag zur Energieversorgung leistet. Im Beitrag werden dazu die Verwertungspfade verglichen und Prioritäten für die Nutzung abgeleitet. Die Arbeit entstand im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und mit Begleitung des Bundesamts für Energie [1].

1 Ausgangslage

1.1 Energieholzpotenzial

Die Schweiz hat sich zu Netto-Null-Treibhausgasemissionen bis im Jahr 2050 verpflichtet. Mit der Energiestrategie soll

deshalb auch das Energieholzpotenzial genutzt werden. Dabei wird eine Kaskadennutzung mit einer vorab stofflichen Verwertung angestrebt. Energieholz umfasst alle Nebenprodukte der Forst- und Holzwirtschaft sowie Altholz nach der Nutzung von Holzprodukten. Aus den Erhebungen [2] bis [5] geht ein aktueller Energieholzverbrauch von rund 5,8 Mio. m³/a oder 16 TWh/a an Heizwert und somit Endenergie hervor. Angaben in Kubikmeter sind dabei mit einem Heizwert von 2,74 MWh/m³ berücksichtigt [1]. Der Verbrauch verteilt sich auf Prozesswärme (2,6 TWh/a), reine Gebäudewärme (11,8 TWh/a) und Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) (2,4 TWh/a), wobei vom WKK-Verbrauch ein Teil für Gebäudewärme angerechnet wird (0,8 TWh/a). Das sicher zu erwartende Energieholzpotenzial wird auf rund 7,3 Mio. m³/a oder 20 TWh/a geschätzt, was einer Zunahme um 25 % entspricht. Das theoretische Potenzial an Waldholz wird auf 10,7 Mio. m³/a geschätzt, was rund dem Doppelten der Holzernte und einer theoretischen Zunahme von Energieholz um 70 % entspricht [6]. Vorliegend wird als Basisfall von einem Potenzial von 20 TWh/a ausgegangen. In [1] sind zusätzlich die Szenarien für 25 TWh/a und 29 TWh/a dargestellt.

1.2 Energiebedarf

Der Endenergieverbrauch der Schweiz beträgt 210 TWh/a, wovon Erdöl und Erdgas rund 123 TWh/a oder 59 % ausmachen [5]. Um die Substitution der fossilen Energieträger zu beurteilen, werden diese wie folgt unterteilt:

1. Anwendungen, für die eine Substitution mit Solar-, Wind- und Wasserkraft technisch und wirtschaftlich möglich ist. Dies

gilt für Gebäudewärme (mittels Wärmepumpen) sowie den Verkehr auf dem Boden und auf Binnengewässern (durch Elektromobilität). Dazu ist ein Zubau an Solar- und Windkraft sowie an Energiespeicherung notwendig. Als Saisonspeicher kann auch Energieholz dienen, wenn es für Winterspitzen von Gebäuden reserviert wird.

2. Anwendungen, die nicht oder nur mit hohem Aufwand durch Solar- und Windstrom erbracht werden können, nämlich:
- a) Prozesswärme über 100 °C. Diese kann zum Teil durch direkte Nutzung von Energieholz substituiert werden, was zum Beispiel für Dampfproduktion und Zementöfen gilt. Wenn ein Brenngas benötigt wird, besteht die Möglichkeit der indirekten Nutzung durch Holzvergasung.
 - b) Spitzenlast-Gebäudewärme im Winter. Zur Saisonspeicherung besteht die Möglichkeit, den Hauptteil der Gebäudewärme mit Wärmepumpen und die Winterspitzen mit Energieholz abzudecken.
 - c) Flugtreibstoffe. Für den Luftverkehr können Biotreibstoffe in Form von Biomass-to-Liquids (BtL) produziert werden, wozu Energieholz infrage kommt. Eine Alternative bietet die Umwandlung von Holz zu Pflanzenkohle. Diese bezeichnet aus Biomasse hergestellte Kohle, die nicht wie für Holzkohle üblich zum Grillieren oder als Reduktionsmittel zur Eisenherstellung dient [7], sondern zum Beispiel unter Einhaltung von Anforderungen wie dem European Biochar Certificate (EBC) als Bodenverbesserer eingesetzt werden kann [8]. Wenn Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke im Boden verbleibt, kann für Netto-Null-Treibhausgasemissionen eine äquivalente Menge fossiler Treibstoffe genutzt werden.

Zur Evaluation dieser Verwertungspfade wird der heutige Energieverbrauch wie folgt unterteilt [1]:

- Die Mobilität nutzt 120 TWh/a fossile Energie, wovon 92 TWh/a durch Elektrizität ersetzbar sind und 28 TWh/a auf Flugtreibstoffe entfallen, die theoretisch

mit Energieholz ersetzt werden könnten.

- Der Wärmeverbrauch macht rund 50% des Endenergieverbrauchs oder 105 TWh/a aus, davon 15 TWh/a für fossile Prozesswärme und 79 TWh/a für Gebäude.
- Bis 2050 wird für Gebäude eine Reduktion auf 39 TWh/a erwartet [9]. Dieser Bedarf kann durch eine Kombination von Holzheizungen und von mit Solarstrom betriebenen Wärmepumpen gedeckt werden. Wenn knapp 50% der geeigneten Dachflächen über PV-Anlagen verfügen, können damit rund 74% des Jahreswärmebedarfs erzeugt werden. Die restlichen 26% können mit rund 10 TWh/a Energieholz gedeckt werden, das während rund 10 Wochen im Winter Spitzenlastwärme liefert, wenn gleichzeitig nur wenig Solarstrom produziert wird [9].)

..... kompakt

Energieholz

umfasst Stückholz, Waldhackschnitzel, Restholz aus der Holzverarbeitung, Holzpellets und Altholz nach der Verwendung von Holzprodukten.

.....

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.
Gebäudewärme Spitzenlast in Kombination mit Wärmepumpen, die mit Solarstrom betrieben werden	<ul style="list-style-type: none"> • Substitution fossiler Brennstoffe. • Substitution anderem erneuerbarem Winterstrom.
Wärme und Strom (WKK)	<ul style="list-style-type: none"> • Saisonspeicherung von Wärme oder Elektrizität (z.B. anstelle von Power-to-Gas).
Treibstoff aus Holz	Substitution fossiler Treibstoffe z.B. durch BtL. 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, die nach [10] wegen dadurch verursachter Umweltzerstörung schädlicher ist als Grillieren mit fossiler Energie und deshalb vorliegend mit fossiler Energie gleichgestellt wird.</p> <p>b) Sequestrierung: PK dient als Kohlenstoffsенke. Für Netto-Null-Treibhausgasemissionen kann eine der Sequestrierung äquivalente Menge fossiler Flugtreibstoffe genutzt werden.</p>

Abb. 1) Verwertungspfade von Energieholz. Informationen zu Holzkohle und Pflanzenkohle aus [7], [8] und [10]. BtL = Biomass-to-Liquids.

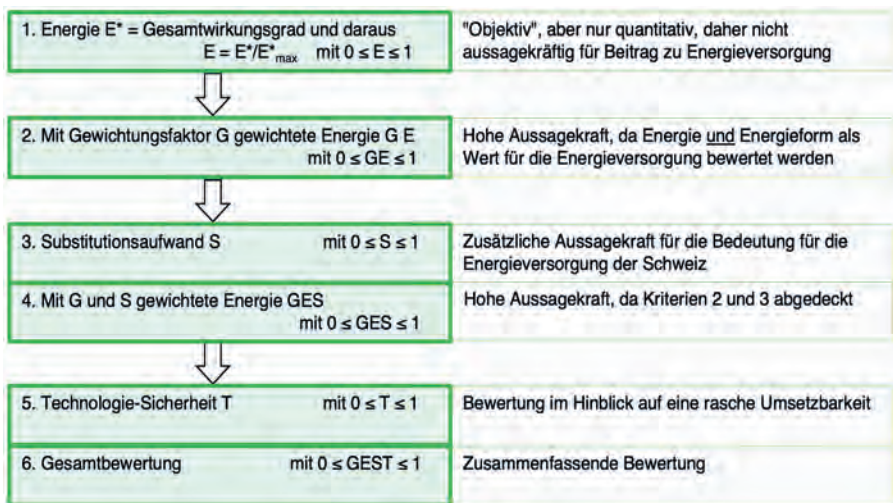


Abb. 2) Vorgehen zur Bewertung der Verwertungspfade nach den Kriterien 1 bis 6.

2 Verwertungspfade

Bild 1 beschreibt die Verwertungspfade für Energieholz. Als Basis für eine Bewertung dienen Energieeinheiten mit einer zusätzlichen Berücksichtigung der Energieform wie in der Energieförderungsverordnung EnFV [11]. Darin wird die Elektrizität von WKK-Anlagen mit dem 1,75-Fachen der Nutzwärme gewichtet, was auch durch den Exergiegehalt begründet werden kann. So kann etwa Gebäudewärme mit Wärmepumpen mit Jahresarbeitszahlen von über 4 für Heizwärme und von über 2,5 für Warmwasser erzeugt werden, was eine noch höhere Gewichtung der Elektrizität rechtfertigen würde. Vorliegend wird für Elektrizität ein Gewichtungsfaktor von 2 angenommen. Dies gilt auch für Treibstoffe und für Prozesswärme, da Treibstoffe Exergie entsprechen und Prozesswärme über 100°C mit Elektrizität oder Brennstoffen erzeugt wird. Weil auch für Spitzenlast-Gebäudewärme ein lagerfähiger Brennstoff oder eine Saisonspeicherung notwendig sind, wird dafür ebenfalls eine Gewichtung von 2 angenommen. Für Pflanzkohle erfolgt ein Vergleich über die Annahme der Sequestrierung mit einer im Gegenzug möglichen Nutzung fossiler Flugtreibstoffe. Für die Klimabilanz resultieren nach EBC eine Abbaurate der Pflanzkohle von 0,3% pro Jahr und ein Senkenpotenzial von rund 75% der in den Boden eingebrachten Pflanzkohle [8]. In Gewichtseinheiten wird die Bilanz in [8] an einem Beispiel beschrieben, das einer Senkenleistung von 2,47 kg CO₂ pro kg absolut trockener Pflanzkohle ent-

spricht [1]. Wenn der Wassergehalt berücksichtigt und für Pflanzkohle ein Heizwert wie von Holzkohle von 31 MJ/kg [7] angenommen wird, ergibt sich eine Senkenleistung von 2,3 kg CO₂ pro kg feuchte Pflanzkohle, was einem CO₂-Emissionsfaktor für sequestrierte Pflanzkohle von -74 t/TJ entspricht [1]. Im Vergleich dazu beträgt der CO₂-Emissionsfaktor für Kerosin 72,8 t/TJ [12]. Die Senkenleistung von Pflanzkohle entspricht somit etwa dem Emissionsfaktor von Kerosin, sodass die Sequestrierung von 1 MJ an Pflanzkohle für Netto-Null-CO₂-Emissionen die Nutzung von 1 MJ an fossilem Kerosin erlaubt. Der Wirkungsgrad von Holz zu Pflanzkohle ist zwar etwas niedriger als zu Treibstoff, da aber bei der Pflanzkohleproduktion noch Wärme und/oder Strom anfallen, wird auch für Pflanzkohle aus Holz ein Gewichtungsfaktor von 2 angenommen.

3 Prioritäten

Die Bewertung zur Priorisierung der Verwertung erfolgt nach Bild 2 anhand folgender Kriterien:

1. Energie E : Vorab wird der Gesamtwirkungsgrad E^* bestimmt und daraus ein relativer Wert $E = E^*/E^*_{max}$ abgeleitet, wobei E^*_{max} dem höchsten Wert von E^* entspricht. Damit resultiert eine Rangfolge $0 \leq E \leq 1$ als Basis für eine Priorisierung z. B. mit $E > 0.9$ für Prio 1.
2. Gewichtete Energie GE : Die Energieformen werden mit einem Gewichtungsfaktor G^* gewichtet mit $G^* = 1$ für Gebäudewärme und $G^* = 2$ für Elektrizität, Treibstoff, Pflanzkohle und Spitzenlast-Gebäudewärme. Mit E^* und G^* wird das Produkt $G^* E^*$ gebildet und daraus der relative Wert $0 \leq GE \leq 1$ bestimmt.
3. Substitutionsaufwand S : Der Substitutionsaufwand wird mit S^* gewichtet. Ein hoher Wert bedeutet, dass eine Substitution mit anderen erneuerbaren Energien als mit Energieholz aufwendig ist. Für Prozesswärme, Treibstoff und Pflanzkohle gilt $S^* = 100\%$. Für Gebäudewärme gilt $S^* = 20\%$, da sie auch mit Wärmepumpen erzeugt werden kann. Für Elektrizität wird $S^* = 80\%$ eingesetzt, da Solar- und Windenergie ein viel grösseres Potenzial zur Stromproduktion als Energieholz aufweisen. Durch Multiplikation von S^* mit E^* wird ein Total gebildet und daraus ein Wert mit $0 \leq S \leq 1$ bestimmt.
4. Gewichtete Energie und Substitutionsaufwand GES : Aus GE und S wird das Produkt $(GES)^*$ und daraus der relative Wert GES bestimmt.
5. Technologie T : Mit T wird die technologische Reife berücksichtigt. Direkte Prozesswärme, Gebäudewärme und Spitzenlast-Gebäudewärme werden als Stand der Technik mit $T = 1$ angenommen. Für indirekte Prozesswärme gilt $T = 0.75$, da die Vergasung verfügbar ist, aber für neue Anwendungen Unsicherheiten bestehen. Treibstoff aus Holz und Pflanzkohle weisen noch höhere Unsicherheiten auf und werden mit $T = 0.5$ bewertet.
6. Gesamtbewertung $GEST$: Mit dem Produkt $(GEST)^*$ werden alle Kriterien abgedeckt und die relative Gesamtbewertung $GEST$ abgeleitet.

dewärme und $G^* = 2$ für Elektrizität, Treibstoff, Pflanzkohle und Spitzenlast-Gebäudewärme. Mit E^* und G^* wird das Produkt $G^* E^*$ gebildet und daraus der relative Wert $0 \leq GE \leq 1$ bestimmt.

3. Substitutionsaufwand S : Der Substitutionsaufwand wird mit S^* gewichtet. Ein hoher Wert bedeutet, dass eine Substitution mit anderen erneuerbaren Energien als mit Energieholz aufwendig ist. Für Prozesswärme, Treibstoff und Pflanzkohle gilt $S^* = 100\%$. Für Gebäudewärme gilt $S^* = 20\%$, da sie auch mit Wärmepumpen erzeugt werden kann. Für Elektrizität wird $S^* = 80\%$ eingesetzt, da Solar- und Windenergie ein viel grösseres Potenzial zur Stromproduktion als Energieholz aufweisen. Durch Multiplikation von S^* mit E^* wird ein Total gebildet und daraus ein Wert mit $0 \leq S \leq 1$ bestimmt.
4. Gewichtete Energie und Substitutionsaufwand GES : Aus GE und S wird das Produkt $(GES)^*$ und daraus der relative Wert GES bestimmt.
5. Technologie T : Mit T wird die technologische Reife berücksichtigt. Direkte Prozesswärme, Gebäudewärme und Spitzenlast-Gebäudewärme werden als Stand der Technik mit $T = 1$ angenommen. Für indirekte Prozesswärme gilt $T = 0.75$, da die Vergasung verfügbar ist, aber für neue Anwendungen Unsicherheiten bestehen. Treibstoff aus Holz und Pflanzkohle weisen noch höhere Unsicherheiten auf und werden mit $T = 0.5$ bewertet.
6. Gesamtbewertung $GEST$: Mit dem Produkt $(GEST)^*$ werden alle Kriterien abgedeckt und die relative Gesamtbewertung $GEST$ abgeleitet.

Für die Umwandlungswirkungsgrade werden Erwartungswerte eingesetzt, die im Falle der Wärmeerzeugung als sicher gelten und mit einem einzigen Erwartungswert beschrieben werden. Für WKK, Treibstoff und Pflanzkohle werden drei Niveaus ausgewiesen. Die Werte beruhen auf in [1] beschriebenen Literaturdaten und Schätzungen. Bild 3 zeigt die Bewertung der Verwertungspfade nach den Kriterien 1 bis 6. Bild 4 illustriert die Gesamtbewertung und die Priorisierung mit folgenden Trends: Das Kriterium 1 der Energie E zeigt den

hohen Gesamtwirkungsgrad von Gebäudewärme und WKK. Diese Bewertung ist gut verständlich, aber ungeeignet zur Beurteilung des möglichen Beitrags des begrenzt verfügbaren Energieholzes zur Energieversorgung und wird deshalb nicht weiterverwendet.

Die Gesamtbewertung 6 nach GEST zeigt, dass Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme hohe Priorität aufweisen, wobei die direkte Prozesswärme vor der indirekten mit Umwandlung zu Holzgas zu favorisieren ist. Gebäudewärme als Hauptenergie erreicht eine sehr niedrige Priorität, während WKK, Treibstoff aus Holz und Pflanzenkohle dazwischenliegen, wobei WKK in der Gesamtbewertung dank etabliertem Stand der Technik eine höhere Priorität als Treibstoffe und Pflanzenkohle erzielt.

4 Szenarien

Die Verwertungspfade werden wie folgt für die in Bild 5 beschriebenen Szenarien berücksichtigt:

- Prio-1-Anwendungen sind einerseits Prozesswärme (zuerst direkt und danach indirekt) und andererseits Spitzenlast-Gebäudewärme mit 26% Energieholz in Kombination mit Wärmepumpen, welche mit einer Jahresarbeitszahl von 4.0 mit Solarstrom betrieben werden und den Rest decken [9]. Für Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme wird ein gleichwertiger Zubau angenommen.

- Als Prio-2-Anwendungen wird Energieholz zu gleichen Teilen für BtL und Pflanzenkohle genutzt, bis die heutigen 28 TWh/a Flugtreibstoff ersetzt sind. Für 28 TWh/a Flugtreibstoff folgt mit 50% Wirkungsgrad zur Herstellung von BtL oder Pflanzenkohle ein Energieholzbedarf von 56 TWh/a und somit von je 28 TWh/a für BtL und Pflanzenkohle. Zusätzlich wird auch für WKK eine Holznutzung entsprechend 50% der heutigen Flugtreibstoffe angenommen. Da bei WKK die initiale Umwandlung entfällt, entspricht dies 14 TWh/a Energieholz.
- Energieholz für ganzjährige Gebäudewärme wird als Prio-3-Anwendung berücksichtigt. Dabei ist zu beachten, dass dieser Bedarf durch die Prio-1-Anwendung der Spitzenlast-Gebäudewärme mit Energieholz reduziert wird und bis auf null sinkt, wenn der Bedarf an Spitzenlast-Gebäudewärme zu 100% gedeckt wird.

TWh/a entspricht 7,6% des Endenergieverbrauchs. Bei reduziertem Wärmeverbrauch der Gebäude steigt der Anteil der gleichen Energieholzmenge auf 9,4%.

- Wenn die Energieholznutzung bis 2050 auf 20 TWh/a erhöht wird und die Verwendung nach Szenario 1 «weiter wie bisher» überwiegend für Gebäudewärme erfolgt, deckt Energieholz 11,8% des Endverbrauchs. Wenn Energieholz in den Szenarien 2 bis 4 zunehmend für Spitzenlast eingesetzt wird, steigt der Anteil von Energieholz am Gesamtverbrauch und erreicht im Szenario 4, in dem kein Energieholz mehr für ganzjährige Gebäudewärme genutzt wird, einen auf 12,5% gesteigerten Anteil des Endverbrauchs.
- In allen Szenarien verbleibt ein ungedeckter Bedarf an Prio-1-Anwendungen, sodass für Treibstoff und Pflanzenkohle kein Energieholz mehr zur Verfügung steht. Im Szenario 1 «weiter wie bisher» beträgt der ungedeckte Prio-1-Bedarf rund 20 TWh/a, das Energieholz reicht somit nur für die Hälfte der Prozesswärme und der Spitzenlast-Gebäudewärme. Im Szenario 4 wird der ungedeckte Bedarf dagegen auf 9 TWh/a reduziert und gegenüber Szenario 1 somit mehr als halbiert. Dies zeigt, dass Energieholz bis im Jahr 2050 nicht mehr für ganzjährige Gebäudewärme genutzt werden sollte und dass die anderen erneuerbaren Energieträger noch deutlich stärker als die Energieholznutzung ausgebaut werden müssen.)

Als weitere Annahmen dienen für das Jahr 2020 ein Gebäudewärmebedarf von 79 TWh/a und ein Endenergieverbrauch von 210 TWh/a, wovon 123 TWh/a fossil und potenziell durch Energieholz zu ersetzen sind. Für 2050 wird von 39 TWh/a Gebäudewärme ausgegangen, sodass der Endverbrauch auf 170 TWh/a sinkt und noch 83 TWh/a fossile Energien zu substituieren sind.

Bild 6 und Bild 7 illustrieren ausgewählte Resultate mit folgenden Trends [1]:

- Die heutige Energieholznutzung von 16

Kriterium	1						2						3						4				5	6				
	Energieanteil der Produkte E*					Relativer Wert E	Gewichtungsfaktor Q*				Produkt G* E*	Relativer Wert GE	Substitutionsaufwand S*					Relativer Wert S	Technik T	GES	T	Produkt (GEST)*	Relativer Wert GEST					
	Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle	Total E*		Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle			Wärme	Strom	Treibstoff	Pflanzenkohle	Total S*							S	GE	S	(GES)*	GES
Prozesswärme Holzgas	65%				65%	0.81	2				1.30	0.81	100%					0.85	0.81	0.81	0.81	0.66	0.66	0.75	0.66	0.75	0.50	0.50
Prozesswärme Direkt	80%				80%	1	2				1.60	1	100%					0.80	1	1.00	1.00	1.00	1	1	1.00	1.00	1.00	1
Gebäudewärme	80%				80%	1.00	1				0.80	0.50	20%					0.16	0.20	0.50	0.20	0.10	0.10	1.00	0.10	1.00	0.10	0.10
Gebäudewärme Spitzenlast	80%				80%	1.00	2				1.60	1.00	80%					0.64	0.80	1.00	0.80	0.80	0.80	1.00	0.80	1.00	0.80	0.80
WKK Minimum	50%	20%			70%	0.69	1	2			0.90	0.58	20%	80%				0.28	0.33	0.56	0.33	0.18	0.18	1.00	0.18	1.00	0.18	0.18
WKK Mittel	50%	30%			80%	1.00	1	2			1.10	0.69	20%	80%				0.34	0.43	0.68	0.43	0.29	0.29	1.00	0.29	1.00	0.29	0.29
WKK Maximum	40%	40%			80%	1.00	1	2			1.20	0.75	30%	80%				0.40	0.50	0.75	0.50	0.35	0.35	1.00	0.38	1.00	0.38	0.38
Treibstoff Minimum			40%		40%	0.50		2			0.80	0.50			100%			0.40	0.50	0.50	0.50	0.25	0.25	0.50	0.25	0.50	0.13	0.13
Treibstoff Mittel			45%		45%	0.56		2			0.90	0.56			100%			0.45	0.56	0.56	0.56	0.32	0.32	0.50	0.32	0.50	0.16	0.16
Treibstoff Maximum			50%		50%	0.63		2			1.00	0.63			100%			0.50	0.63	0.63	0.63	0.30	0.30	0.50	0.30	0.50	0.20	0.20
Pflanzenkohle Minimum	25%			25%	50%	0.83	1			2	0.75	0.47	20%		100%	0.30	0.38	0.47	0.38	0.16	0.16	0.16	0.50	0.16	0.50	0.09	0.09	
Pflanzenkohle Mittel	25%			35%	60%	0.75	1			2	0.95	0.59	20%		100%	0.40	0.50	0.59	0.50	0.30	0.30	0.30	0.50	0.30	0.50	0.15	0.15	
Pflanzenkohle Maximum	20%			40%	80%	0.81	1			2	1.10	0.69	20%		100%	0.48	0.61	0.69	0.61	0.42	0.42	0.42	0.50	0.42	0.50	0.21	0.21	

Abb. 3) Bewertung der Verwertungspfade.

5 Schlussfolgerungen

Der Bedarf an Energieholz in zur Substitution fossiler Energien geeigneten Anwendungen übersteigt das Potenzial um mehr als einen Faktor 5. Aus diesem Grund sind Anwendungen zu bevorzugen, welche den höchsten Beitrag zur Energieversorgung erzielen.

Erste Priorität haben die Erzeugung von Prozesswärme und von Spitzenlast-Gebäudewärme. Im Fall der Gebäude ist die Wärmeversorgung auf eine Kombination von Wärmepumpen und Energieholz zu transformieren, bei der erneuerbare Elektrizität für den Betrieb von Wärmepumpen den Hauptteil von rund 74% der Wärme erzeugt und Energieholz den winterlichen Spitzenbedarf bei gleichzeitigem Mangel an erneuerbarer Elektrizität deckt. Die Umsetzung kann dezentral und mit Ausbau thermischer Netze erfolgen. Im Gebäudebereich übernimmt Energieholz damit die

Funktion der Saisonspeicherung und reduziert den Bedarf an teureren und ineffizienteren Ansätzen wie Power-to-Gas. Dazu muss Energieholz für ganzjährige Gebäudewärme bis 2050 auf ein Minimum oder gegen null reduziert werden. Daneben erzielt WKK mit Holz einen hohen Nutzen, da sie Winterstrom liefert und somit zur Versorgungssicherheit beiträgt.

Die Umwandlung von Holz zu Treibstoff durch Biomass-to-Liquids ist mit einem Wirkungsgrad von rund 50% verbunden, wodurch die Substitutionswirkung ungefähr halbiert wird. Treibstoffe aus Holz sind deshalb erst dann interessant, wenn Prozess- und Gebäudewärme 100% erneuerbar gedeckt werden. Wenn der Bodenverkehr bis im Jahr 2050 vorwiegend elektrisch erfolgt, verbleibt ein Bedarf an Flugtreibstoffen, für den theoretisch auch Energieholz eingesetzt werden kann. Da aber bereits die Anwendungen mit höherer Substitutionswirkung das Energieholz-

potenzial deutlich übersteigen, steht für Flugtreibstoffe kein Energieholz mehr zur Verfügung, weshalb dazu andere Lösungen wie die Treibstoffherstellung aus erneuerbarer Elektrizität (sogenannte E-Fuels) zu verfolgen sind.

Daneben besteht ein Interesse an Pflanzenkohle aus Holz, die zum Beispiel in der Landwirtschaft genutzt und als Kohlenstoffspeicher im Boden eingesetzt werden kann. Wenn für Netto-Null-Treibhausgasemissionen im Gegenzug fossiles Kerosin verwendet wird, kommt Pflanzenkohle auf eine ähnliche Substitutionswirkung wie Treibstoff aus Holz, sodass auch für Pflanzenkohle kein Energieholz mehr zur Verfügung steht. Demgegenüber bietet die Herstellung von Pflanzenkohle eine interessante Möglichkeit zur Nutzung von energetisch schwer verwertbaren biogenen Reststoffen aus der Landwirtschaft und aus Vergärungsanlagen. Vor einer Verwendung im Boden sollte inländische Pflanzenkohle allerdings zur Substitution importierter Grillkohle eingesetzt werden, da ein grosser Teil der importierten Holzkohle erhebliche Schäden durch Waldrodungen in anderen Weltregionen verursacht [10]. Für den Einsatz von Pflanzenkohle im Boden besteht noch Klärungsbedarf und es ist zu beachten, dass das Bundesamt für Umwelt, das Bundesamt für Landwirtschaft und die kantonalen Bodenschutzfachstellen einen grossflächigen Eintrag von Pflanzenkohle in Schweizer Böden bis anhin ablehnen [13].

Zusammenfassend ist das Energieholz prioritär für Prozesswärme und für Spitzenlast-Gebäudewärme zu nutzen, da damit der grösste Beitrag zur Energieversorgung erzielt wird. Da das Energieholzpotenzial damit bereits ausgeschöpft wird, ohne diese zwei Anwendungen vollständig zu decken, sollte Energieholz in Zukunft nicht mehr als Hauptenergieträger für Gebäudewärme genutzt werden. Weil auch die Herstellung von Treibstoff und Pflanzenkohle aus Holz den Anteil von Energieholz am Gesamtenergieverbrauch der Schweiz verringert, sind auch diese Anwendungen nicht zu unterstützen. Dagegen kann Energieholz in effizienten WKK-Anlagen eine ähnlich hohe Substitution fossiler Energien wie Prozesswärme und Spitzenlast-Gebäudewärme erreichen und dank der Produktion von Winterstrom zudem den Zubau von Solarstromanlagen unterstützen. ■

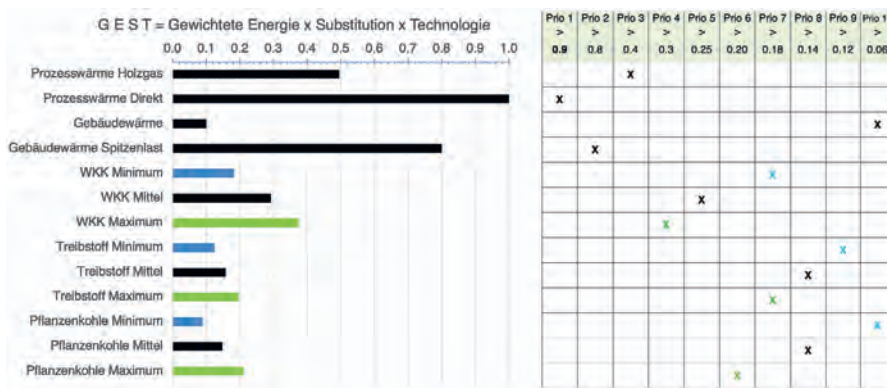
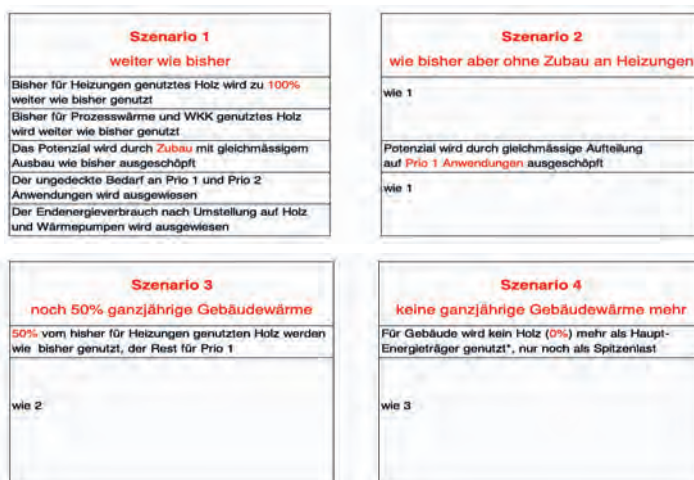


Abb. 4) Resultate der Gesamtbewertung GEST aus gewichteter Energie, Substitutionsaufwand und Technologie-Reife.

Abb. 5) Szenarien 1 bis 4 zur Ausschöpfung des Energieholzpotenzials.



Autor

* Prof. Dr. Thomas Nussbaumer ist Professor an der Hochschule Luzern und Inhaber der Verenum AG in Zürich

Literatur

- [1] Nussbaumer, T.: Verwertungspfade Holzenergie, BAFU, Bern 2023, aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=53947
- [2] Thees, O. et al.: WSL Berichte Heft 57, Birmensdorf, 2017
- [3] Stettler, Y.: Schweiz. Holzenergiestatistik, BfE, Bern 2020
- [4] Hammer, S. et al.: Analyse von Hemmnissen, BfE, Bern 2021
- [5] BfE: Schweiz. Gesamtenergiestatistik 2022, Bern 2023
- [6] Keel, A., Pflanzenkohle-Fachtagung 2023, 16.6.2023, charnet.ch
- [7] Wikipedia: Holzkohle. de.wikipedia.org/wiki/Holzkohle, 16.8.2023
- [8] Das Europäische Pflanzenkohle-Zertifikat: european-biochar.org/de, 16.8.2023
- [9] Nussbaumer, T., HK-Gebäudetechnik 1/23, 48–53
- [10] WWF: Marktanalyse Holzkohle 2018, WWF Schweiz, Zürich 2018
- [11] Energieförderungsverordnung (EnFV) vom 1. November 2017, Bern 2023
- [12] Faktenblatt CO₂-Emissionsfaktoren, BAFU, Bern 2023
- [13] Schwilch, G., Pflanzenkohle-Fachtagung 2023, 16.6.2023, charnet.ch

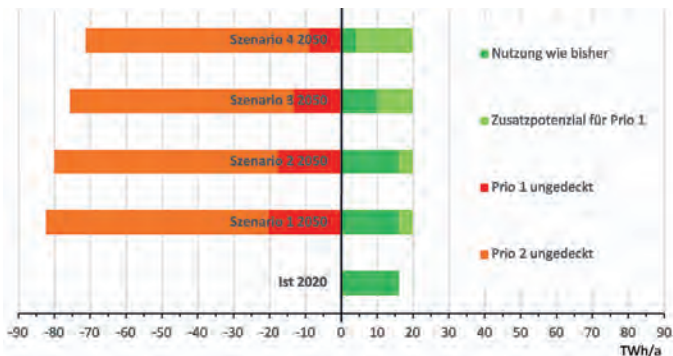


Abb. 6) Energieholzbedarf, unterteilt in Energieholznutzung (Werte >0) und ungedeckten Bedarf (Werte <0).

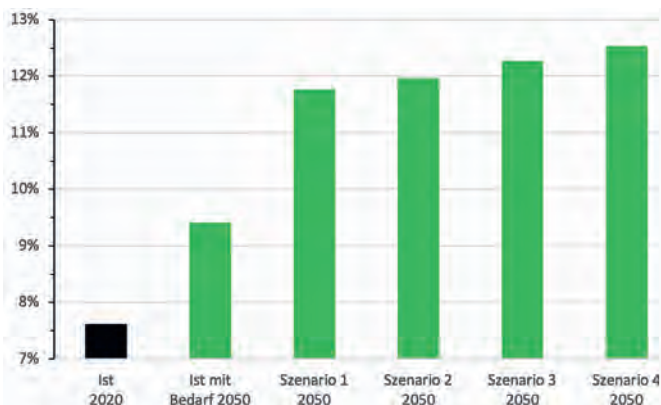


Abb. 7) Anteil Energieholz am Endenergieverbrauch. «Ist» gilt für den heutigen Energieholzverbrauch von 16 TWh/a, im ersten Fall für den Energiebedarf 2020 und im zweiten Fall für den mit saniertem Gebäudepark resultierenden Bedarf im Jahr 2050. Die Szenarien 1 bis 4 gelten für den Bedarf 2050 bei Ausschöpfung des Energieholzpotenzials von 20 TWh/a.



NEU
[meiertobler.ch/
lan1118cp](http://meiertobler.ch/lan1118cp)



Oertli LAN 1118CP Platzwunder mit natürlichem Kältemittel

Mit Inverter-Verdichter, natürlichem Kältemittel R290 und Kühlfunktion im Sommer repräsentiert die Luft-Wasser-Wärmepumpe Oertli LAN 1118CP den neusten Stand der Technologie. Mit einem Schalleistungspegel von lediglich 49 Dezibel gehört sie zu den leisesten Wärmepumpen auf dem Markt, und dank dem kompakten Querformat findet sie überall Platz. Der optional verfügbare SVGW-geprüfte Hydrotower mit Pufferspeicher und Warmwasserspeicher verwandelt die Oertli LAN 1118CP zudem im Handumdrehen in ein praktisches All-in-one-System.

- Höchste Energieeffizienz A+++ dank Inverter-Technologie und grosser Verdampferfläche, COP = 4,4 (+2/W35)
- Heizleistung 11,5 kW (-7/W35)
- Platzsparende horizontale Aufstellung
- Sehr leise (49 Dezibel nach ErP EN 12102)
- Natürliches Kältemittel R290 mit minimalem GWP von 3
- Komfortable Regelung über Farb-Touchdisplay
- Auch als montagefreundliches und platzsparendes «All-in-one-System» erhältlich
- Inklusive Ferndiagnostik SmartGuard 2.0

meiertobler.ch/lan1118cp

Einfach
Haustechnik

meier
tobler