

Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz

Kumulierter Energieaufwand und Erntefaktor verschiedener Nutzungsketten von Holz

In der EU bestehen große Anstrengungen, Holz zur Treibstoffherstellung einzusetzen und damit den Verkehr teilweise mit erneuerbarer Energie zu versorgen. Ein Vergleich des kumulierten Primärenergieaufwands zeigt allerdings, dass durch die Wärme- und Stromerzeugung aus Holz mehr fossile Brennstoffe substituiert werden können als durch Herstellung von Treibstoff aus Holz. Dies ist auf die zusätzlichen Verluste zur Umwandlung fester Biomasse in flüssige oder gasförmige Treibstoffe zurückzuführen. Solange Heizöl und Erdgas für die Wärmeerzeugung eingesetzt werden, ist die Treibstoffherstellung aus Holz aus Sicht der Ressourcenökonomie nicht zu rechtfertigen.



Unsere Gesellschaft ist abhängig von einer funktionierenden Energieversorgung, die derzeit zu fast 80 % auf fossilen Energieträgern basiert. Das Maximum der Ölförderung ist allerdings nahezu erreicht oder wird spätestens in wenigen Jahren überschritten [1; 2]. Um unsere Energieversorgung zu sichern, sollte die Maximierung der Ressourcenökonomie bei der Wahl zukünftiger Technologien an erster Stelle stehen. Gerade bei der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien ist entscheidend, dass wir diejenigen Energiesysteme identifizieren und auswählen, die eine maximale Primärenergie-Effizienz erzielen. Nur so können erneuerbare Energieträger einen maximalen Beitrag leisten, gleichzeitig sind die effizientesten Verfahren zumindest langfristig auch ökonomisch vorteilhaft.

Unter den erneuerbaren Energieträgern ist zwischen beinahe unbegrenzt verfügbaren Ressourcen wie Sonne oder Wind und begrenzt verfügbaren wie zum Beispiel Holz zu unterscheiden. Da Sonnenenergie den Bedarf theoretisch um ein Tausendfaches decken kann, können solare Energiesysteme auch dann sinnvoll sein, wenn sie nur einen geringen Wirkungsgrad aufweisen. Als Einschränkung ist lediglich zu fordern, dass die über die Lebensdauer der Anlage produzierte Nutzenergie ein Vielfaches der investierten Primärenergie betragen muss. Demgegenüber ist bei Holz, das zwar erneuerbar, aber im Gegensatz zur Sonnenenergie nur beschränkt verfügbar ist, unbedingt darauf zu achten, dass die Nutzung mit maximaler Effizienz erfolgt. Versorgungsketten mit höherer Gesamteffizienz sind

deshalb solchen mit tieferer Effizienz auf jeden Fall vorzuziehen. Am Beispiel einer Solaranlage kann ein geringerer Wirkungsgrad dagegen unter Umständen mit einer größeren Kollektorfläche ausgeglichen werden.

Kumulierter Energieaufwand und Erntefaktor

Zur Bewertung der Gesamteffizienz müssen alle Verluste der Versorgungskette berücksichtigt werden. Dazu wird anhand einer Lebenszyklusanalyse der kumulierte Primärenergieaufwand (KEA) bestimmt und als dimensionslose, auf die Nutzenergie bezogene Größe kea angegeben [3; 4]. Der Kehrwert von kea beschreibt das Verhältnis zwischen erzeugter Nutzenergie und investierter Primärenergie und wird als Erntefaktor (EF) bezeichnet.

Die Berechnung dieser Kenngrößen erfolgt einmal unter Berücksichtigung aller Betriebsenergie und einmal unter Berücksichtigung lediglich der nicht erneuerbaren Betriebsenergie. Letzteres wird mit dem Index NE gekennzeichnet. Somit gilt:

$$EF = \text{Nutzenergie} / \text{Primärenergie}$$

$$EF_{NE} = \text{Nutzenergie} / \text{nicht erneuerbare Primärenergie}$$

- Für alle Energieträger gilt die Bedingung $EF < 1$.
- Für nicht erneuerbare Energien gilt $EF_{NE} = EF$.
- Für erneuerbare Energieträger ist $EF_{NE} > EF$, wobei $EF_{NE} > 1$ möglich ist und als Ziel $EF_{NE} > 5$ anzustreben ist.

Für einen Vergleich von nicht erneuerbaren mit erneuerbaren Energieträgern muss der Erntefaktor EF_{NE} bewertet werden. Wenn dagegen zwei erneuerbare Versorgungsketten miteinander verglichen werden, sollte der Vergleich sowohl anhand von EF_{NE} als auch anhand von EF erfolgen, da ein System nur dann eindeutig besser ist, wenn beide Kennzahlen höher sind.

Versorgungsketten mit Holzverbrennung

Zur Nutzung von Holz bieten sich dezentrale Heizsysteme mit Stückholz und Holzpellets sowie zentrale Anlagen zum Betrieb von Fernwärmenetzen oder zur Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung an. Bei einem Jahresnutzungsgrad von 80 % erzielen Heizsysteme die

Autor

PD Dr. sc. techn. **Thomas Nussbaumer**, Jahrgang 1960, Studium des Maschinenbaus an der ETH Zürich, 1989 Promotion. Inhaber des Ingenieurbüros Verenum, Privatdozent an der ETH Zürich, Berater des Bundesamts für Energie und Vertreter in der Internationalen Energie Agentur (IEA).

Die Studie wurde im Auftrag der Internationalen Energie Agentur (IEA) sowie des Bundesamtes für Energie (BFE) durchgeführt.

System	EF [-]	EF _{NE} [-]	PEV _{NE} [%]	ΔPEV _{NE} [%]
Stückholzheizung	0,76	14,0	5,0	95,0
Holzschnitzelheizung	0,73	13,0	5,4	94,6
Holzschnitzelheizung mit Wärmenetz	0,66	9,0	7,8	92,2
Holzpellets ohne fossile Energie zur Trocknung	0,65	8,3	8,4	91,6
Holzpellets aus mit Heizöl getrocknetem nassem Holz	0,64	3,3	21,2	78,8
Ölheizung mit Brennwertkessel	0,7	0,7	100	0
Stromerzeugung und Wärmekraftkopplung mit Holz ¹⁾	0,55 bis 1	10 bis 15	5 bis 7	93 bis 95
Treibstoff aus Holz	0,36 bis 0,52			
Heizen mit Gas- oder Flüssig-Brennstoff aus Holz	0,29 bis 0,42			

¹⁾ Strom wird 2,5-fach bewertet; dies entspricht der Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen

in der **Tabelle** und in **Bild 1** angegebenen Erntefaktoren. Die Zahlen zeigen, dass Holzheizungen und auch Wärmekraftkopplung aus Holz energetisch attraktiv ist. Für Heizanlagen können verschiedene Versorgungsketten anhand des Erntefaktors verglichen werden. **Bild 2** zeigt dazu den Einfluss des Jahresnutzungsgrades auf den kumulierten Energieaufwand. Daraus kann abgelesen werden, dass folgende Szenarien eine identische Gesamteffizienz von $\eta_{\text{ea}} = 1,5$ entsprechend einem Erntefaktor $EF = 0,67$ aufweisen:

- Stückholzkessel mit 70 % Jahresnutzungsgrad,
- Holzschnitzelfeuerung mit 73 % Jahresnutzungsgrad,
- Holzschnitzelfeuerung mit 81 % Jahresnutzungsgrad und typischem Nahwärmenetz,
- Pelletheizung mit 83 % mit Holzpellets aus mit Heizöl getrocknetem Sägemehl.

Eine Heizzentrale mit Holzschnitzelfeuerung muss also an der Übergabestation an das Fernwärmenetz einen Jahresnutzungsgrad von 81 % erzielen, um energetisch gleichwertig zu sein wie eine Stückholzheizung mit 70 % Jahresnutzungsgrad. Im Fall des Stückholzkessels ist zu beachten, dass beim Einsatz als monovalente Heizung noch ein Wärmespeicher notwendig ist. Aus dem Zahlenvergleich kann deshalb abgeleitet werden, dass eine automatische Holzheizung ohne Wärmenetz die höchste energetische Wertschöpfung aufweist, während eine Stückholzheizung mit Speicher, ein guter Nahwärmeverbund mit Holzheizung sowie eine Pelletheizung geringfügig tiefere Werte erzielen. Die verschiedenen Sortimente an Energieholz ergänzen sich somit in geeigneter Weise.

Substitutionswirkung von Wärme und Strom

Der Ersatz einer Ölheizung durch eine Holzheizung ermöglicht eine Reduktion an nicht erneuerbarer Primärenergie um rund 95 %. Eine Holzschnitzelheizung

mit Wärmenetz oder eine Zentralheizung mit ohne fossile Energie getrockneten Holzpellets erzielt rund 92 % Einsparung an fossilen Ressourcen. Stromerzeugung und Kraft-Wärme-Kopplung mit Holz weisen ein noch höheres Potenzial auf, sofern Anlagen mit hohem Wir-

Tabelle 1

Erntefaktoren EF und EF_{NE} verschiedener Energieversorgungssysteme mit Holz bezogen auf den Heizwert. Für Wärme und Strom sind zudem der relative Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie PEV_{NE} im Vergleich zu einer Ölheizung sowie die erzielbare Einsparung ΔPEV_{NE} angegeben. Daten nach [3], außer für Ölheizung gemäß [5] sowie für Treibstoffe gemäß Abschätzung im Text. Die Zahlen für Treibstoff sind nicht direkt mit anderen Ketten vergleichbar, da Treibstoff als Sekundärenergie bewertet ist, während Wärme Nutzenergie darstellt. Aus diesem Grund erfolgt der Vergleich im Text über die Substitutionswirkung.

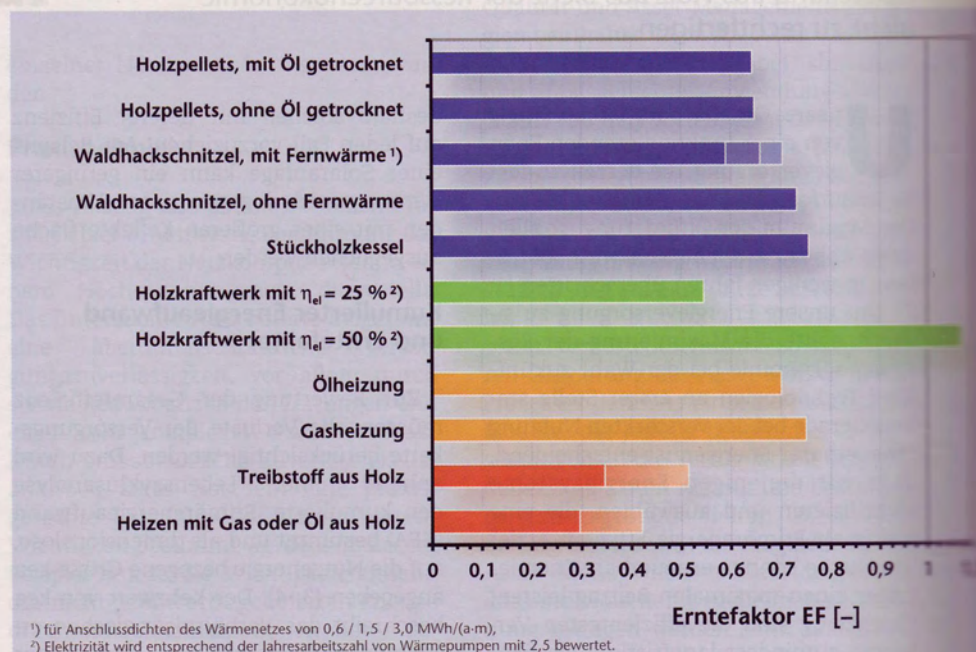


Bild 1

Erntefaktor EF für verschiedene Versorgungsketten mit Holz. Für Treibstoff gelten die Anmerkungen in der Bildunterschrift zur Tabelle 1.

kungsgrad eingesetzt und die Elektrizität zum Antrieb moderner Wärmepumpen zum Ersatz von Öl- und Gasheizungen genutzt werden.

Substitutionswirkung der Treibstoffherstellung

Die Herstellung von flüssigen oder gasförmigen Treibstoffen aus Holz ist mit zusätzlichen Umwandlungsverlusten verbunden. Da Transportenergie und Heizwärme nicht direkt vergleichbar sind, bietet sich ein Vergleich anhand der Substitutionswirkung der verschiedenen Szenarien wie folgt an: Da Stückholz und Holzschnitzel einen mit Heizöl und Erdgas vergleichbaren Erntefaktor EF aufweisen (nämlich rund 0,7), ersetzt eine Energieeinheit Holz gerade eine

Energieeinheit Erdöl oder Erdgas. 1 MJ Heizwert in Form von Holz ersetzt also 1 MJ Heizwert in Form von Heizöl oder Erdgas, wobei in beiden Fällen die Primärenergie bewertet ist. Zur Abdeckung unserer Mobilitätsbedürfnisse steht somit beim Ersatz einer Öl- oder Gasheizung durch eine Holzheizung der eingesparte, fossile Treibstoff im Verhältnis 1:1 zur Verfügung.

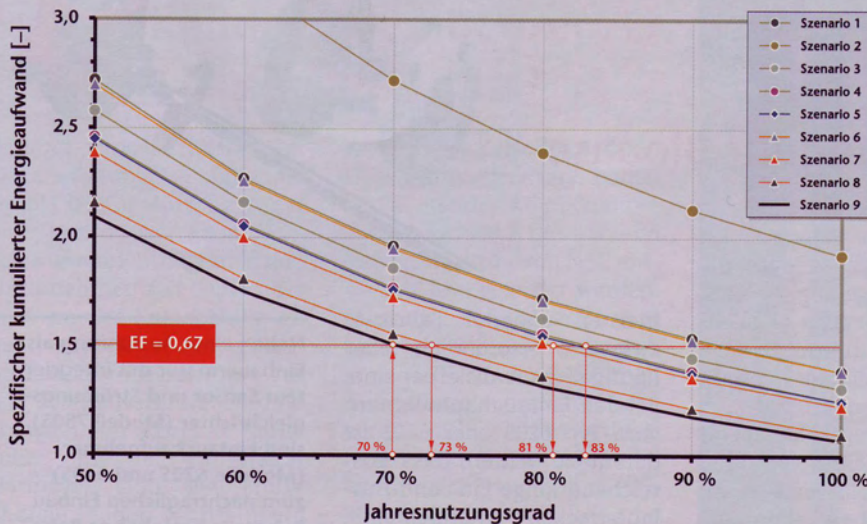


Bild 2

Spezifischer kumulierter Energieaufwand kea [-] für Holzheizanlagen als Funktion des Jahresnutzungsgrades der Heizanlage nach [3]. Elektrizität ist mit einem Faktor von 2,5 bewertet. Bei den Szenarien mit Fernwärme ist die Anschlussdichte des Wärmenetzes angegeben. Alle anderen Szenarien beschreiben dezentrale Heizanwendungen ohne Fernwärme. Pellets sind aus feuchtem Sägemehl hergestellt, das mit Heizöl getrocknet wurde, und Öko-Pellets aus feuchtem Sägemehl, das mit erneuerbarer Energie getrocknet wurde.

Nr.	Szenario
1	Pellets, FW = 1,5 MWh/(a-m), TD = 50 km
2	Pellets, TD = 5 000 km
3	Pellets, TD = 500 km
4	Pellets, TD = 50 km
5	Öko-Pellets, TD = 50 km
6	Waldhackschnitzel, FW = 0,6 MWh/(a-m), TD = 15 km
7	Waldhackschnitzel, FW = 1,5 MWh/(a-m), TD = 15 km
8	Waldhackschnitzel, TD = 15 km
9	Stückholzkessel, TD = 5 km

FW: Fernwärmeanschlussleistung; TD: Transportdistanz, Waldhackschnitzel: TD = 15 km; Stückholz: TD = 5 km.

Für die Treibstoffherzeugung aus Holz kommen vor allem zwei Umwandlungsverfahren in Frage. Zum einen die Pyrolyse zu einem Pyrolyseöl, das nach einer Reinigung und Aufbereitung als Treibstoff dient. Zum andern die Vergasung von Holz zu einem Produktgas, das zum Beispiel zur Fischer-Tropsch-Synthese von Diesel (Sun-Diesel oder Biomass to Liquid (BTL)) dient. Das Produktgas kann aber auch zur Synthese von Methanol, Methan, Wasserstoff oder Benzin verwendet werden. Bei diesen Verfahren ist für die Holzgewinnung und den Transport mit einem Erntefaktor von 0,9 bis 0,95 zu rechnen. Für die Umwandlung von Holz zu einem Produktgas kann für eine Großanlage ein Erntefaktor von rund 0,4 bis maximal 0,55 erzielt werden, wie folgende Beispiele zeigen:

Die Pyrolyseöl-Ausbeute aus Holz erreicht maximal 60 % bezogen auf den Heizwert und ist noch mit einem anschließenden Umwandlungswirkungsgrad von rund 80 bis 90 % für die Aufbereitung zu einem technisch nutzbaren Treibstoff verbunden. Als Alternative kann durch Vergasung zwar ein höherer initialer Wirkungsgrad von rund 75 % zu Gas erreicht werden, für die anschließende Aufbereitung zu einem Treibstoff wie Methanol oder Methan ist aber mit einem Wirkungsgrad von lediglich rund 65 bis 75 % zu rechnen. In beiden Fällen ist noch die graue Energie zum Bau der Anlage zu berücksichtigen, so dass insgesamt ein Erntefaktor vom Holz zum Treibstoff von rund 0,4 bis maximal 0,55 resultiert.

Unter Berücksichtigung der Holzgewinnung kann somit unter günstigen Bedingungen ein Erntefaktor vom Holz im Wald zum Treibstoff ab Anlage von rund 0,36 bis 0,52 erreicht werden.

Damit wird im heutigen Energiesystem entweder fossiler Treibstoff substituiert (also wie bei der Holzheizung Erdöl oder Erdgas), weshalb dieser Erntefaktor demjenigen der Holzheizung von rund 0,7 gegenüber zu stellen ist.

Sofern der aus dem Holz hergestellte Treibstoff dagegen zum Heizen eingesetzt wird (zum Beispiel mittels über das Gasnetz verteiltes Methan), vermindert sich der Erntefaktor noch um den Jahresnutzungsgrad der Heizung von 0,8 bis 0,9, so dass unter Berücksichtigung der grauen Energie ein Erntefaktor von weniger als 0,29 bis 0,42 resultiert.

Vergleich von Wärme und Strom mit Treibstoff

Der Vergleich zeigt, dass der Einsatz von Treibstoffen aus Holz im Verkehr lediglich 50 % bis 75 % der Substitutionseffekt einer Holzheizung erzielt. Wenn aus Holz hergestellter Gas- oder Flüssig-Brennstoff zum Heizen eingesetzt wird, resultiert ein noch geringerer Substitutionseffekt. Für die gleiche Wirkung muss über die Treibstoffherstellung somit mindestens die 1,5fache Menge Holz genutzt werden. Umgekehrt erzielt eine Holzheizung einen 35 bis 95 % höheren Substitutionseffekt als die Treibstoffsynthese aus Holz. Ähnliche

Resultate gehen aus Ökobilanzen für die CO₂-Einsparung hervor [6]. Daneben zeigen auch Well-to-wheel-Analysen für die Treibstoffherstellung aus Biomasse wenig versprechende Resultate [7]. Obwohl die Treibstoffsynthese aufwändiger ist und zentrale Großanlagen voraussetzt, ist somit ihr potenzieller Beitrag zur Energieversorgung geringer als durch Verwendung der gleichen Holzmenge zur Wärme- und Stromerzeugung, weshalb die Treibstoffherstellung aus Holz aus Sicht der Ressourcenökonomie nicht zu unterstützen ist.

Literatur

[1] Campbell C.J.; Laherrère J.H.: The end of cheap oil. *Scientific American*, March 1998, 80–86.
 [2] Campbell, C.J.: *The Coming Oil Crisis*. Multi-Science Publishing Co. & Petroconsultants, 1997.
 [3] Nussbaumer, T.; Oser, M.: *Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems*. International Energy Agency (IEA), 2004, ISBN 3–908705–07-X. Download: www.ieabcc.nl oder www.verenum.ch.
 [4] Nussbaumer, T.: Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung. 8. Holzenergie-Symposium, Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3–908705–10-X, 7–27.
 [5] Kessler, F.; Knechtle, N.; Frischknecht, R.: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000.
 [6] Jungmeier, G.; Canella, L.: *Greenhouse Gas Emissions of Energy Systems with Bio-oil*. *Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*, Victoria, BC, Canada, 2004 (in press).
 [7] Edwards, R.: *Well-to-wheels analysis of biofuels*. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10–14 May 2004, Rome, Presentation PD 2.4.