

Vergleich des Substitutionseffekts von Holz für fossile Energieträger

Holzenergie ja, aber wie: für Wärme, Strom oder Treibstoff?

PD Dr. Thomas
Nussbaumer, Zürich*

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 mit Wärme- und Stromerzeugung aus Holz mehr fossile Brennstoffe substituiert werden können als durch Herstellung von Treibstoff aus Holz: Während 1 MJ Heizwert an Holz im Wärmesektor rund 1 MJ fossile Primärenergie substituiert, ersetzt 1 MJ Holz nach Umwandlung zu Treibstoff nur 0,5 MJ bis 0,75 MJ fossile Primärenergie. Der geringere Effekt ist auf die zusätzlichen Verluste zur Umwandlung fester Biomasse in flüssige oder gasförmige Treibstoffe zurück zu führen. So lange Heizöl und Erdgas zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden, ist die Treibstoffherstellung aus Holz aus Sicht der Ressourcenökonomie deshalb nicht zu rechtfertigen.



Brennholz ist wohl der älteste vom Menschen genutzte Energieträger. Nebst der Wärmeerzeugung in häuslichen Heizungen kommt Energieholz heute auch zur Beheizung von Fernwärmenetzen sowie zur Wärme-kraftkopplung und Stromerzeugung in automatischen Anlagen zum Einsatz. Um auch den Verkehrssektor

teilweise mit erneuerbaren Energieträgern zu versorgen, bestehen auch Anstrengungen, biogene Rohstoffe wie Holz und andere Pflanzen zur Treibstoffherstellung einzusetzen. Obwohl diese Zielsetzung im Grundsatz sinnvoll ist, muss hinterfragt werden, in welchen Sektoren biogene Rohstoffe einen maximalen Nutzen erzielen, wobei der Primärenergieaufwand für die gesamte Versorgungskette zu bewerten ist. Im vorliegenden Beitrag wird die entsprechende Methode anhand des kumulierten Energieaufwands und des Energie-Erntefaktors vorgestellt.

Bedeutung der Energieversorgung

Unsere Gesellschaft ist in hohem Mass abhängig von einer funktionierenden Energieversorgung, welche derzeit zu fast 80% auf fossilen Energieträgern basiert. Das Maximum der Ölförderung ist allerdings nahezu oder in Kürze erreicht [1–3]. Um unsere Energieversorgung zu sichern, sollten für die Zukunft solche Technologien ausgewählt werden, welche unseren Bedarf mit minimalem Ressourcenaufwand decken. Gerade beim Wandel zu erneuerbaren Energien ist entscheidend, dass wir diejenigen Energiesysteme identifizieren und auswählen, welche eine maximale Primärenergie-Effizienz erzielen. Nur so können die erneuerbaren Energieträger einen maximalen Beitrag leisten. Gleichzeitig sind die effizientesten Verfahren langfristig auch ökonomisch vorteilhaft.

Unter den erneuerbaren Energieträgern ist zu unterscheiden zwischen fast unbegrenzt verfügbaren wie Sonne und Wind sowie begrenzt verfügbaren wie zum



Beispiel Holz. Da Sonnenenergie den Bedarf theoretisch zehntausendfach 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 Mehrfaches der investierten Primärenergie betragen muss. Demgegenüber ist bei Holz, welches zwar erneuerbar, aber im Gegensatz zur Sonnenenergie nur beschränkt verfügbar ist, darauf zu achten, dass die Nutzung mit hoher Effizienz erfolgt. Für Holz sind Versorgungsketten mit höherer Gesamteffizienz immer vorzuziehen. Am Beispiel einer Solaranlage kann ein geringerer Wirkungsgrad dagegen unter Umständen ohne Nachteile mit einer grösseren Kollektorfläche ausgeglichen werden, beim Holz ist ein unnötiger Mehrverbrauch an Holz dagegen zu vermeiden.

Kumulierter Energieaufwand und Energie-Erntefaktor

Zur Bewertung der Gesamteffizienz müssen die Verluste der gesamten Versorgungskette berücksichtigt werden. Dazu wird anhand einer Lebenszyklusanalyse der kumulierte Primärenergieaufwand (*KEA*) bestimmt und als dimensionslose Grösse (*kea*), bezogen auf die Nutzenergie, angegeben [4, 5].

Der Kehrwert von *kea* beschreibt das Verhältnis zwischen erzeugter Nutzenergie und investierter Primärenergie und wird als Energie-Erntefaktor oder kurz 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:

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

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

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 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. Eine Bewertung anhand von EF und EF_{NE} zeigen nachfolgend Bild 1 und Bild 2.

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 Wärmekraftkopplung an. Bei einem Jahresnutzungsgrad von 80% erzielen Heizsysteme die in Tabelle 1 und Bild 1 sowie Bild 2 angegebenen Erntefaktoren. Die Zahlen zeigen, dass Holzheizungen und auch Wärmekraftkopplung mit Holz energetisch attraktiv sind. Für Heizanlagen können verschiedene Versorgungsketten anhand des Erntefaktors verglichen werden. Bild 3 zeigt dazu den Einfluss des Jahresnutzungsgrades auf den kumulierten Energieaufwand. Daraus kann abgelesen werden, dass folgende Szenarien eine identische Gesamteffizienz von $kea = 1,5$, entsprechend einem Erntefaktor EF von 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

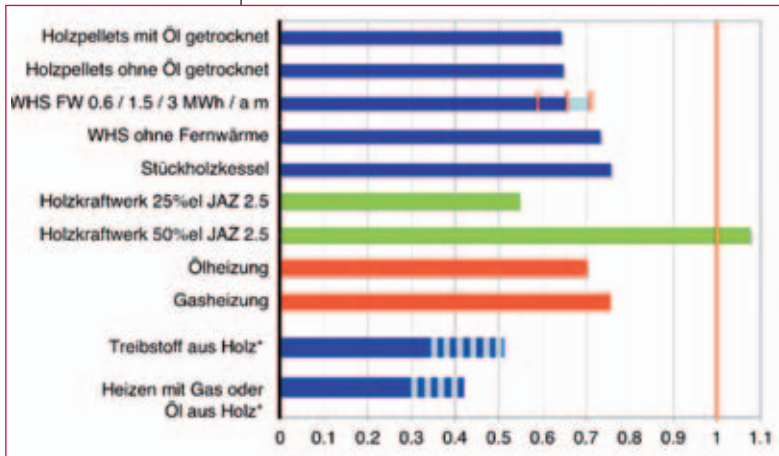
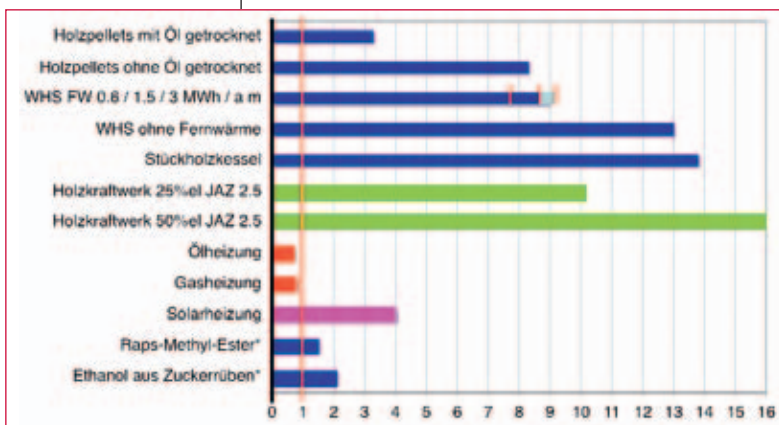


Bild 1: Energie-Erntefaktor EF für verschiedene Versorgungsketten mit Holz. WHS = Waldhackschnitzel, FW = Fernwärme, Elektrizität ist mit 2,5 bewertet, entsprechend der Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Wärmepumpe. Die Angabe in [MWh/a m] beschreibt die Anschlussdichte des Wärmenetzes in MWh pro Jahr und Meter Fernwärmeleitung. *Für Treibstoff gelten die Anmerkungen in Tabelle 1.

Bild 2: Energie-Erntefaktor EF_{NE} für verschiedene Versorgungsketten mit Holz im Vergleich zu anderen Energieträgern. Daten für Holz nach [4], für Öl- und Gasheizung nach [6], für Solarheizung nach [7], für Raps-Methyl-Ester nach [8] und für Ethanol nach [9]. Abkürzungen und Erläuterungen wie Bild 1.



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 daher in geeigneter Weise und es zeigt sich kein eindeutiger Vorteil eines Sortiments in Bezug auf die Ressourcenökonomie.

Substitutionswirkung von Wärme und Strom

Der Ersatz einer Ölheizung durch eine Holzheizung ermöglicht eine Reduktion an nicht erneuerbarer Primärenergie um rund 95% (Tabelle 1). Eine Holz-schnitzelheizung mit Wärmenetz oder eine Zentralheizung mit ohne fossile Energie getrockneten Holzpellets erzielt rund 92% Einsparung an fossilen Ressourcen. Stromerzeugung und Wärmekraftkopplung mit Holz weisen ein noch höheres Potenzial auf, sofern Anlagen mit hohem Wirkungsgrad 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. Dies heisst: 1 MJ Heizwert in Form von Holz ersetzt 1 MJ Heizwert in Form von Heizöl oder Erdgas, wobei in beiden Fällen 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 zu 1 zur Verfügung. Im Fall von Heizöl entspricht dies dem chemisch identischen Dieselöl, im Fall der Gasheizung dem als Motoren- oder Gasturbinen-Treibstoff nutzbaren Erdgas (also vorwiegend Methan).

Für die Treibstoffherzeugung aus Holz kommen vor allem zwei Umwandlungsverfahren in Frage. Zum einen die Pyrolyse zu einem Pyrolyseöl, welches nach einer Reinigung und Aufbereitung als Treibstoff für Dieselmotoren oder Gasturbinen dient. Zum andern die Vergasung von Holz zu einem Produktgas, welches zum Beispiel als Ausgangsstoff zur Fischer-Tropsch-Synthese von Diesel dient, der auch als Sun-Diesel oder BTL (Biomass to Liquid) bezeichnet wird. Das Produktgas kann aber auch zur Synthese anderer Treibstoffe wie Methanol, Methan, Wasserstoff oder Benzin verwendet werden. Da die dazu notwendigen Verfahren zwar im Grundsatz bekannt, jedoch nicht im kommerziellen Einsatz sind, ist die Bestimmung des Erntefaktors mit einer grösseren Unsicherheit behaftet als bei den Verfahren der Wärme- und Stromerzeugung. Für langfristige Technologie-Entscheidung interessiert jedoch in erster Linie der unter optimalen Bedingungen erzielbare Erntefaktor, welcher aus den einzelnen Verfahrensschritten nachfolgend abgeschätzt wird.

Für die Holzgewinnung und den Transport ist mit einem Erntefaktor von maximal 0,95 (entsprechend der Stückholzkette), bei langen Transportdistanzen von rund 0,9 zu rechnen.

Für die Umwandlung zu flüssigem oder gasförmigem Treibstoff durch Pyrolyse und Pyrolyseöl-Veredelung oder durch Vergasung und Synthese des Produktgases zu Treibstoff 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 gegen 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 zu-

	EF [-]	EF _{NE} [-]	PEV _{NE} [%]	ΔPEV _{NE} [%]
Stückholzheizung	0,76	14	5,0%	95,0%
Holzsnitzelheizung	0,73	13	5,4%	94,6%
Holzsnitzelheizung 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 (Strom 2,5fach bewertet, was der Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen entspricht)	0,55–1	10–15	5%–7%	93%–95%
Treibstoff aus Holz*	0,36–0,52			
Heizen mit Gas- oder Flüssig-Brennstoff aus Holz*	0,29–0,42			

Tabelle 1: Energie-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 [4], ausser für Ölheizung gemäss [6] 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.

sätzlichen Wirkungsgrad von rund 75% zu Gas erreicht werden, für die anschliessende Aufbereitung zu einem Treibstoff wie Methanol oder Methan ist aber noch mit einem zusätzlichen Wirkungsgrad von rund 65% bis 75% zu rechnen. In beiden Fällen ist noch die graue Energie zum Bau der Anlage zu berücksichtigen, sodass insgesamt ein Erntefaktor vom Holz zum Treibstoff von rund 0,4 bis 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 gegenüberzustellen ist. Sofern der aus dem Holz hergestellte Treibstoff zum Heizen eingesetzt wird (zum Beispiel mittels über das Erdgasnetz verteiltes Methan), vermindert sich der Erntefaktor noch um den Jahresnutzungsgrad der Heizung von 0,8 bis 0,9, sodass 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 Substitutionswirkung 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 [10]. Im Weiteren zeigen auch Well-to-wheel-Analysen für die Treibstoffherstellung aus Biomasse wenig versprechende Resultate [11]. Obwohl die Treibstoffsynthese aufwändiger ist, ist somit ihr potenzieller Beitrag zur Energieversorgung geringer als derjenige der Wärme- und Stromerzeugung aus Holz.

Förderung erneuerbarer Energieträger

Die heutigen Ziele der Klimapolitik können nur mit rationellem Energieeinsatz und einer vermehrten Nutzung erneuerbarer Energieträger erreicht werden. Als Ansporn können gezielte Fördermassnahmen sinnvoll sein. Um sicherzustellen, dass die erneuerbaren Energien einen maximalen Beitrag zur Energieversorgung erzielen, sollten entsprechende Massnahmen jedoch nicht zu einer Wettbewerbsverzerrung unter den Nutzungsarten eines Energieträgers führen. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn aus Holz hergestellte Treibstoffe von der Mineralölsteuer befreit werden. Die Substitution von 1 Liter Diesel durch Holz erzielt dann nämlich eine viel höhere Wertschöpfung als die Substitution von 1 Liter chemisch identischem Heizöl. Da dies dem Gebot der Ressourcenökonomie widerspricht, ist eine Mineralölsteuer-Befreiung von Treibstoff aus Holz fragwürdig, ausser wenn gleichzeitig auch Wärme und Strom aus Holz sowie Holzprodukte (auch da existiert eine Konkurrenz zwischen fossi-

len Rohstoffen und Holz) gleichwertig gefördert werden.

Potenzial für Wärme und Wärmekraftkopplung

Die Holzenergie kann in der Schweiz bei einer nachhaltigen Nutzung der Wälder noch mindestens verdoppelt werden, so dass der Beitrag zur Energieversorgung mehr als 5% betragen könnte. In waldreichen Ländern mit geringerer Bevölkerungsdichte kann Holz einen noch viel grösseren Beitrag leisten. Heutige Holzheizungen weisen allerdings vergleichsweise hohe Schadstoffemissionen auf, wobei insbesondere Feinstaub und Stickoxide von Bedeutung sind. Die Umweltbelastung von Holzheizungen wird denn auch durch diese zwei Schadstoffe dominiert, weshalb für einen vermehrten Einsatz von Energieholz Massnahmen zur Emissionsminderung prioritär sind. In verschiedenen Forschungsprojekten wurden in den vergangenen Jahren Techniken zur Emissionsminderung entwickelt, die eine Schadstoffreduktion zwischen 50% und teilweise bis zu über 90% erzielen. Es gilt nun, diese Techniken in die Praxis umzusetzen, was mit gezielten Massnahmen unterstützt werden kann. Wenn damit das Verbesserungspotenzial ausgeschöpft wird und ältere Anlagen nachgerüstet oder ersetzt werden, können die Gesamtemissionen der Holzenergie selbst bei einer Verdopplung des Energieholzverbrauchs reduziert werden.

Kraftwerk mit Holz oder mit Erdgas und Holz

Als Ergänzung zu dezentralen Anlagen ist auch der Bau eines oder mehrerer Kraftwerke zu prüfen. Zur Erzielung eines maximalen Wirkungsgrads bietet sich dazu ein Holzgas-Kombikraftwerk an, das über eine grosstechnische Holzvergasung mit nachgeschalteter Gas- und Dampfturbine verfügt. Bei einem Vergasungswirkungsgrad von 75% und einem Wirkungsgrad der Gasverstromung von 60% wie in einem modernen Erdgas-Kombikraftwerk könnte in einer entsprechenden Grossanlage ein Stromerzeugungswirkungsgrad aus Holz von rund 45% erzielt werden. Diese Technologie ist im Grundsatz bekannt und wurde in Schweden in einer Demonstrationsanlage mit 6 MWe umgesetzt.

Das in der Schweiz heute nicht genutzte Holz würde den Betrieb eines solchen Kraftwerks mit rund 630

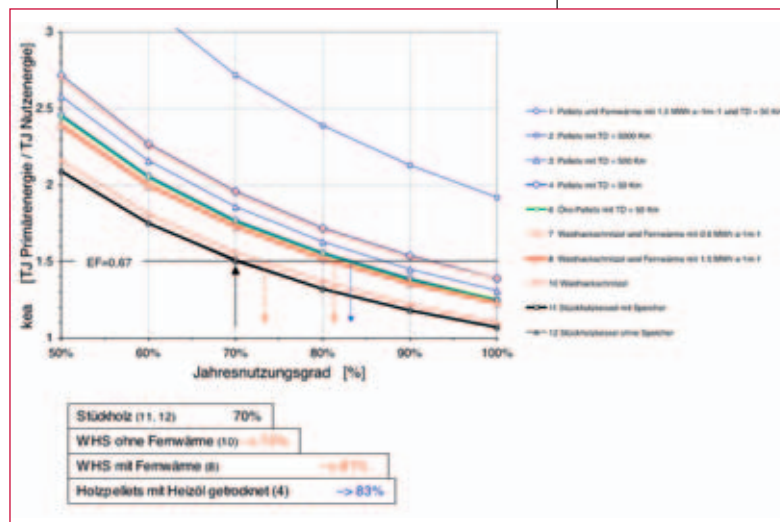


Bild 3: Spezifischer kumulierter Energieaufwand kea [-] für Holzheizanlagen in Funktion des Jahresnutzungsgrades nach [4]. Elektrizität ist mit einem Faktor 2,5 bewertet. TD = Transportdistanz, für Wälderschnitzel gilt TD = 15 km, für Stückholz 5 km. Bei Szenarien mit Fernwärme ist die Anschlussdichte des Wärmenetzes in MWh a⁻¹ m⁻¹ (MWh verteilte Wärme pro Jahr und Leitungslänge) angegeben. «Pellets» sind aus feuchtem Sägemehl hergestellt, das mit Heizöl getrocknet wurde, «Öko-Pellets» sind mit erneuerbarer Energie getrocknet.

MWe während 6000 Stunden pro Jahr erlauben und könnte jährlich rund 3800 GWh erneuerbaren Strom produzieren [12]. Um die Erschliessung des Potenzials und den Aufbau der Versorgung schrittweise zu ermöglichen, wird vorab der Bau eines Holzkraftwerks mit rund 150 MWe vorgeschlagen. Sofern in der Schweiz ein Erdgaskraftwerk realisiert wird – was derzeit zur Diskussion steht –, könnte das Holzgaskraftwerk an ein rund viermal grösseres Erdgaskraftwerk angegliedert werden. Die Kombination verspricht dank des Grössenvorteils einen höheren Wirkungsgrad für die Holznutzung. Im Weiteren bietet es die Möglichkeit, die Holzleistung zu einem späteren Zeitpunkt zu erhöhen und den Anteil an Erdgas zu reduzieren.

Im Vergleich zu dezentralen Anlagen bietet die Nutzung von Holz in einem Kraftwerk den Vorteil, dass dank der Anlagengrösse eine hochwirksame Gasreinigung zur Anwendung kommt und somit tiefere Reingaswerte an Schadstoffen wie Feinstaub, Stickoxiden und polychlorierten Dioxinen und Furanen (PCDD/F) erreicht werden. Daneben bieten Grossanlagen die Möglichkeit, minderwertige Energieholzsorimente wie Altholz oder andere in konventionellen Holzheizungen nicht verwertbare Sortimente einzusetzen.

Fazit

Mittels Wärme- und Stromerzeugung kann das verfügbare Potenzial an Energieholz den grössten Beitrag zur Energieversorgung leisten. Dabei besteht allerdings noch Handlungsbedarf zur Minderung der Schadstoffe, in erster Priorität an Feinstaub und Stickoxiden. Zur Förderung der Holzenergie sollten Entwicklungen zur Verminderung dieser Schadstoffe sowie zur weiteren Erhöhung der Anlagenwirkungsgrade unterstützt wer-

den. Nebst der Nutzung in dezentralen Anlagen kommt auch die Stromerzeugung in einem Holzkraftwerk infrage. Sofern ein Erdgaskraftwerk realisiert wird, bietet zudem die Kombination von Holz und Erdgas in einem Kombikraftwerk eine interessante Option mit hohem Wirkungsgrad.

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. & Petro-consultants, 1997
- [3] Rechsteiner, R.: *Grün gewinnt*, Orell Füssli 2003, ISBN 3-280-05054-5
- [4] Nussbaumer, T., Oser, M.: *Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems*, International Energy Agency (IEA), 2004, ISBN 3-908705-07-X
- [5] Nussbaumer, T.: Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung, 8. *Holzenergie-Symposium*, Bundesamt für Energie, Bern 2004, ISBN 3-908705-10-X, 7–27
- [6] Kessler, F.; Knechtle, N.; Frischknecht, R.: *Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz*, Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000
- [7] Sterkele, U.: Alternativenenergie im Kosten- und Ökovergleich, *Spektrum der Gebäudetechnik*, 5 2001, 42–45
- [8] Studer, R.; Wolfensberger, U.: Energie- und CO₂-Bilanzen über den Alternativ-Treibstoff Biodiesel, *Landwirtschaft Schweiz*, 4 (12), 1991, 637–640
- [9] Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Eds.): *Biomasse als erneuerbarer Energieträger*, Landwirtschafts-Verlag Münster (D), 2002
- [10] 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)
- [11] 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
- [12] Nussbaumer, T.: *Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerk für die Schweiz: Potenzial und Wirtschaftlichkeitsabschätzung*, Bundesamt für Energie, Bern 2005

Verdankung

Die Studie wurde im Auftrag der Internationalen Energie-Agentur (IEA) sowie des Bundesamts für Energie (BfE) durchgeführt.

*PD Dr. Thomas Nussbaumer
 Verenum, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich
 thomas.nussbaumer@verenum.ch
 www.verenum.ch