

Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050

Thomas Nussbaumer Hochschule Luzern – Technik & Architektur und Verenum (CH)*

Perspectives of biomass combustion and its role in the energy strategy 2050

Wood energy contributes 4% to the total energy demand in Switzerland and is expected to reach 6% by 2020. As a directly storable fuel, energy wood is highly valuable to complement temporarily available solar and wind energy. Since the potential of wood is limited, highly effective applications to substitute fossil fuels need to be prioritised. For this, the energy yield factor is introduced, which reveals that heat and power from wood achieve a high substitution efficiency enabling a reduction of fossil CO₂ of up to 90%. Consequently, the unused potential of energy wood should be mobilised for heating, district heat, and combined heat and power (CHP). For these applications, the following developments need to be carried on: small-scale devices with low pollutant emissions by two-stage combustion, stringent execution of air pollution control to avoid inappropriate operation, improvements of grate boilers by aerodynamic optimisation, sectoral fuel conversion, and reduction of fuel NO_x emissions by advanced staged combustion. With respect to power from wood, technologies with reduced cost for applications smaller than 1 MW_e must be developed, while for low-quality wood fuels, a limited number of highly efficient plants based on Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) is most promising. The findings reveal that the assumptions for the Swiss energy strategy 2050 with a decline of energy wood for heat by 60% and a shift to biofuels are not justified, since wood for heat, power, and CHP achieves higher energy yields with technologies which are available or ready to implementation (IGCC) and economically viable.

Keywords: bioenergy, energy yield factor, CO₂ mitigation, combustion, pollutant formation, energy strategy
doi: 10.3188/szf.2013.0389

* Technikumsstrasse 21, CH-6048 Horw, E-Mail thomas.nussbaumer@hslu.ch

Unsere Gesellschaft ist in hohem Mass von der Umwandlung nicht erneuerbarer Ressourcen in Abfallstoffe abhängig. Direkt erkennbar ist dies bei der Verbrennung fossiler Energieträger zu Kohlendioxid zur Nutzung der Wärme in Heizungen, Motoren und Kraftwerken für die Energieversorgung und Mobilität. Daneben dienen Erdöl und Erdgas zur Herstellung von Dünger, Kunststoffen, Textilien, Farben und Medikamenten und bilden so auch die Basis für die Nahrungsmittelversorgung, das Gesundheitswesen und den Konsum.

Dass der Erdölverbrauch an Grenzen stossen wird, wurde 1956 von Marion King Hubbert mit Modellrechnungen beschrieben (Hubbert 1956). Das für die US-Ölförderung auf 1970 prognostizierte Maximum traf im Jahr 1972 tatsächlich ein. Der für 1995 vorhergesagte globale Peak Oil wurde dagegen durch Erschliessung neuer Quellen bis heute hinausgeschoben. Zudem zeigt die US-Ölproduktion seit zehn Jahren wieder nach oben, da mit gestiegenen Ölpreisen auch Schieferöl sowie Erdöl aus Ölsand und aus der Tiefsee wirtschaftlich werden.¹ Hinzu kommen neue

Techniken wie das Fracking, bei dem Gas und Öl durch Einpressen von Wasser, Sand und Chemikalien aus Schiefergestein freigesetzt werden. Die neuen Fördermethoden sind allerdings wegen möglicher Umweltschäden umstritten, und sie beschleunigen die Klimaerwärmung zusätzlich, da mit dem erhöhten Förderaufwand auch die Netto-CO₂-Emissionen steigen.

Eine neue Dimension erhielt die Diskussion mit dem Bericht «The Limit to Growth» von Meadows et al (1972), der aufzeigt, dass das einmalige Überschreiten einer Systemgrenze die Leistungsfähigkeit des Systems irreversibel reduzieren kann. In den 1970er- und 1980er-Jahren standen mit Boden, Luft und Wasser Bereiche im Vordergrund, für die teils klare Fortschritte erzielt wurden. Dies gilt für das Waldsterben, das dank Entschwefelung des Erdöls und Einführung von Katalysatoren zur Stickoxid-

¹ HOSP G (2013) Knappheit sieht anders aus. Neue Zürcher Zeitung vom 15. Juni 2013. www.nzz.ch/meinung/kommentare/knappheit-sieht-anders-aus-1.18099452 (15.10.2013).

minderung eingeschränkt wurde. Daneben konnte für die nach Entdeckung des Ozonlochs 1985 diskutierte Ozonproblematik mit dem Montreal-Protokoll ein seit 1990 sinkender Trend des FCKW-Gehalts eingeleitet werden. Dieser Erfolg war ein historischer Durchbruch der internationalen Zusammenarbeit im Umweltschutz. Im Klimaschutz steht ein vergleichbarer Erfolg aus, wie der seit dem Kyoto-Protokoll von 1997 weiter steigende Verbrauch fossiler Energieträger zeigt. Was sind die Gründe? Beim Klimaschutz ist möglicherweise der Konsens geringer, wichtiger ist aber wohl, dass er einschneidendere Massnahmen verlangt. So war der weitgehende Verzicht auf FCKW verkraftbar, weil rasch Ersatztechnologien bereitstanden und deshalb kaum Verhaltensänderungen notwendig waren. Deutlich schwieriger wird der Wandel zum Klimaschutz, zu gross sind die Vorteile billig verfügbarer Energie und der wirtschaftliche Nachholbedarf von Teilen Asiens und Afrikas.

Um den Trend zu brechen, sind deshalb Massnahmen gefordert, die einen sanfteren, aber effektiveren Wandel ermöglichen. Wie beim Ersatz eines FCKW-haltigen Kälteaggregats durch eines mit Propan oder CO₂ sind auch im Gebäude Fortschritte möglich, die keine Nachteile mit sich bringen. Niedrig-, Null- und Plusenergiegebäude sind Stand der Technik und erzielen über den ganzen Lebenszyklus eine Reduktion der Treibhausgase auf einen Bruchteil. Solche Fortschritte sind mit Nachdruck umzusetzen, und gleichzeitig sind Rebound-Effekte, etwa durch weitere Zunahme der Wohnfläche pro Person, zu vermeiden.

Während bei Gebäuden der Verbrauch allein durch Effizienz deutlich reduziert werden kann, sind bei der Mobilität Fortschritte nicht in gleichem Umfang möglich. Obwohl Elektromobilität und Hybridisierung zu einer Verbesserung beitragen können, kann damit noch keine nachhaltige Mobilität erzielt werden. Das Gleiche gilt für Biotreibstoffe, die den Verbrauch bei Weitem nicht decken und zudem Nahrungskonkurrenz und Umweltschäden bewirken können. Aus diesen Gründen sind auch die Bedürfnisse punkto Mobilität zu hinterfragen.

Trotz diesen Unterschieden ist Wohnen und Mobilität gemeinsam, dass zur Effizienzsteigerung vielfach elektrische Aggregate eingesetzt werden. Bei-

spiele sind die kontrollierte Lüftung in Gebäuden oder Elektroantriebe im Strassenverkehr. Ein Fortschritt sind solche Techniken allerdings nur dann, wenn die erzielte Einsparung ein Mehrfaches des zusätzlichen Stromverbrauchs ausmacht und der Strom erneuerbar produziert wird. Werden dagegen heutige Fahrzeuge durch mit fossilem Strom betriebene ersetzt, kann die Elektrifizierung gar zu höheren CO₂-Emissionen führen. Ein Ziel ist es deshalb, erneuerbare Energien direkt zur Substitution fossiler Energien im Gebäude zu nutzen und daneben zur Stromproduktion einzusetzen. Im Gebäude und bei der Stromversorgung kann Solarenergie durch speicherfähige Holzenergie ergänzt werden. Weil das Potenzial an Holz jedoch begrenzt ist, sind zu dessen Nutzung hohe Umwandlungswirkungsgrade und eine maximale Substitutionswirkung sicherzustellen.

Wandel zur Nachhaltigkeit

Der Wandel zu einer nachhaltigen Energieversorgung gelingt am ehesten, wenn nicht nur spektakuläre neue Technologien mit Jahrzehnten Entwicklungszeit verfolgt, sondern ab sofort die Techniken genutzt werden, die schon verfügbar sind und die in den nächsten Jahrzehnten eine maximale Substitution fossiler Energien erzielen. Dieses Vorgehen nach dem Grundsatz «pick the low hanging fruit first» ist aus ökonomischer Sicht vernünftig und aus ökologischer Sicht effektiv, weil die beschränkten Mittel mit maximaler Wirkung eingesetzt werden. Da der Wandel damit nicht abgeschlossen wird, sind parallel dazu Entwicklungen voranzutreiben, die höhere Effizienz oder tiefere Kosten versprechen. Daneben gilt es, für unterschiedliche Standorte die jeweils geeigneten Energieträger einzusetzen und dazu die geografische Verteilung sowie den zeitlichen Anfall zu beachten. Die Energiebilanz der Erde macht dabei deutlich, dass der Solarenergie eine zentrale Rolle zukommt, ihr schwankender Anfall mit begrenzter Energiedichte jedoch einen Bedarf an Energiespeicherung (zum Beispiel Wasserkraft in Stauseen und Solarstrom in Pumpspeicherwerken) sowie an lagerfähigen Energieträgern wie insbesondere Holz verursacht.

Sortiment	2008			2020		
	Mio. m ³ /a	PJ/a	% GEV	Mio. m ³ /a	PJ/a	% GEV
Energieholz aus dem Wald	2.1	18.1	2.0	3.1	26.8	3.0
Flurholz	0.9	7.8	0.9	1.2	10.4	1.2
Restholz aus der Holzverarbeitung	0.7	6.0	0.7	1.1	9.5	1.1
Altholz	0.3	2.6	0.3	0.6	5.2	0.6
Altpapier	0.3	2.6	0.3	0.3	2.6	0.3
Total	4.3	37.2	4.1	6.3	54.4	6.0

Tab 1 Energieholzverbrauch 2008 und Potenzial bis 2020 in Mio. m³/a nach Manser (2010). Werte in PJ/a berechnet mit 1 Mio. m³ = 2400 GWh = 8.64 PJ. % GEV: Anteil am Gesamtenergieverbrauch.

Potenzial der Holzenergie

Potenzial

Global ist Biomasse (alle pflanzlichen und tierischen Erzeugnisse, die energetisch genutzt werden) heute mit rund 11% Anteil am Primärenergieverbrauch der wichtigste erneuerbare Energieträger, und ihr Anteil kann noch verdoppelt bis verdreifacht werden. So wird bei einer Nutzung von heute 51 EJ pro Jahr (1 EJ = 10^{18} J) ein technisch verfügbares Potenzial von 104 EJ pro Jahr ausgewiesen, das durch Energiepflanzen noch erhöht werden kann (Kaltschmitt & Thrän 2009). Auch in der Schweiz hat die Biomasse ein Potenzial, das neben Holz zur thermischen Nutzung auch biogene Reststoffe zur Vergärung umfasst. So wurden im Jahr 2008 alleine 4.3 Mio. m³ Holz (Wald-, Flur-, Rest- und Altholz sowie Altpapier) für energetische Zwecke verwendet (Manser 2010; Tabelle 1) und damit rund 4% des Energieverbrauchs gedeckt. Dieser Anteil könnte nach Manser (2010) auf rund 6% des heutigen Energieverbrauchs gesteigert werden – eine Entwicklung, die unter anderem ein Waldenergieholzpotenzial von rund 3 Mio. m³ beinhaltet. Neue Erhebungen von Thees et al (2013, dieses Heft) weisen demgegenüber ein Waldenergieholzpotenzial von etwa 4 Mio. m³ pro Jahr (Derbholz und Reisig) aus. Das Potenzial wird damit heute bereits rund 1 Mio. m³ höher geschätzt.

Energieholzsortimente

Um die Nutzung zu optimieren, ist eine Unterscheidung der Holzsortimente wichtig. Einerseits gilt es, Holz vorab stofflich zu nutzen, um Produkte aus fossilen oder anderen endlichen Ressourcen wie Aluminium zu substituieren. Diese Kaskadennutzung erzielt höhere CO₂-Einsparungen und eine nach Schätzungen um einen Faktor 4 bis 15 höhere ökonomische Wertschöpfung (Manser 2010). Restholz und Altholz können als Nebenprodukte zur Energieerzeugung eingesetzt werden. Die Zahlen zeigen allerdings, dass heute Energieholz aus dem Wald die Mengen an Rest- und Altholz übersteigt, wobei zwischen Nadel- und Laubholz zu unterscheiden ist. So wird Nadelholz zu 75% stofflich genutzt, Laubholz dagegen zu 83% direkt als Energieholz (Streiff 2010). Um die Wertschöpfung zu verbessern, strebt die Holzindustrie denn auch eine Erhöhung des Nadel-Rundholzes durch Mobilisierung der Reserven auf 3.5 Mio. m³ pro Jahr an (Streiff 2010). Insgesamt sollen damit in der Schweiz jährlich 4.5 Mio. m³ Nadel- und 1.7 Mio. m³ Laubholz oder insgesamt 6.2 Mio. m³ Holz geerntet werden.

Bei der Nutzung von Energieholz ist sicherzustellen, dass belastetes Holz in Anlagen mit Abgasreinigung eingesetzt wird. Daneben werden auch bei naturbelassenem Holz Sortimente unterschiedlicher Qualität unterschieden. Für kleine Anlagen sind dies

nebst Stückholz vor allem Holzpellets, die dank hoher Lagerdichte neue Anwendungen ermöglichen. Daneben kommen auch qualitativ höherwertige Waldhackschnitzel zum Einsatz, für die eine Trocknung und Aussiebung erfolgt. Erst in den letzten Jahren ist es gelungen, in Europa über 200 Holzvergasungsanlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) mit knapp 50 kW_e bis 200 kW_e zu installieren. Für einen störungsfreien Betrieb solcher Anlagen ist homogener Brennstoff erforderlich, und es wird sich zeigen, ob der Durchbruch dank entsprechenden Brennstoffsortimenten gelingt. Daneben ist zur Erhöhung der Energieholzmenge der Trend zu unterstützen, einige Grossanlagen zur Nutzung von minderwertigen Holzsortimenten einzusetzen.

Bei Zunahme der Holzenergie werden Bestrebungen zum Schliessen der Stoffkreisläufe mit Verwertung der Mineralstoffe bedeutend, während gleichzeitig die Anforderungen an die Entsorgung steigen. Sofern die Aschen aufbereitet und die Schadstoffe entsorgt werden, kann eine flächendeckende Energieholznutzung sogar zu einer Dekontamination der Umwelt beitragen, indem durch Verkehr und Landwirtschaft freigesetzte Schwermetalle über die Asche der Umwelt wieder entzogen werden (Hermle et al 2006). Dies betrifft insbesondere die mit Schwermetallen angereicherten Filteraschen, die sachgerecht zu entsorgen sind. Gleichzeitig ist anzustreben, Rostasche von nicht belasteten Standorten in den Kreislauf zurückzuführen. Weil die Aschemengen aus Holz gering sind, besteht für optimale Entsorgungswege noch Entwicklungsbedarf. Für den Nährstoffkreislauf ist dabei positiv zu bewerten, dass mit Säge- und Industrieholz zwar rund 56% der Nährstoffe aus dem Wald entfernt werden, aber immerhin rund 34% in Reisig und Blättern enthalten sind (Jacobsen et al 2003). Da Nährstoffe die thermische Nutzung erschweren, kann es für Verwertung und Nährstoffhaushalt sinnvoll sein, dieses nährstoffreiche Feinmaterial mit zudem hohem Wassergehalt im Wald zu belassen.

Substitutionseffekt

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 von rund 1 MW_e bis 20 MW_e (Schweiz) respektive bis über 50 MW_e (andere Länder) 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,

	EF	EF _{NE}	PEV _{NE} (%)	ΔPEV _{NE} (%)
Stückholzheizung	0.76	14	5	95
Automatische Holzheizung	0.73	13	5	95
Automatische Holzheizung mit Fernwärme	0.66	9.0	8	92
Holzpellets aus ohne fossile Energie getrocknetem Holz	0.65	8.3	8	92
Holzpellets aus mit Heizöl getrocknetem nassem Holz	0.64	3.3	21	79
Ölheizung mit Brennwertkessel	0.70	0.70	100	0
WKK mit Holz mit Eta _e = 25% und Strom 2.5-fach bewertet	0.55–1.0	10	5	93
WKK mit Holz mit Eta _e = 45% und Strom 2.5-fach bewertet	1.0	15	7	95
Treibstoff aus Holz	0.36–0.52			
Heizen mit Gas oder Flüssigbrennstoff aus Holz	0.29–0.42			

Tab 2 Energie-Erntefaktoren EF und EF_{NE} nach Nussbaumer (2005). EF bewertet erneuerbare und nicht erneuerbare Ressourcen, EF_{NE} nur die nicht erneuerbaren. 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. WKK: Wärme-Kraft-Kopplung, Eta_e: elektrischer Wirkungsgrad.

dargestellt als Wärmenutzung in Funktion der Stromnutzung, über der Verbindungslinie 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 Grösse knapp 15% bis 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 fossile Energie getrocknetem Holz oder Fernwärme aus Holz ermöglichen gegenüber Heizöl eine Einsparung um 92% (Tabelle 2). Diese Substitutionswirkung ergibt sich aus den Energie-Erntefaktoren der über den ganzen Lebenszyklus verbrauchten nicht erneuerbaren Energie. Wenn die Vorleistungen 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 Holzketten, was der Einsparung von 92% nach Tabelle 2 entspricht. Mit Wärme aus Stückholz oder aus automatischen Feuerungen wird ein Substitutionseffekt von 95% erzielt, mit wärmegeführter Wärme-Kraft-Kopplung ein solcher von 93%. Im Vergleich dazu wird durch Treibstoff aus Holz ein deutlich niedrigerer Substitutionseffekt erzielt, da die initiale Umwandlung von Holz zu Treibstoff einen Wirkungsgrad von nicht wesentlich über 50% 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 bietet sich daneben auch der Einsatz von Holz als Ersatzbrennstoff in diesen Kraftwerken an. Durch die Zuführung von Holz kann meist 5% bis 20% der Kohle ersetzt und dazu dank

der effizienten Abgasreinigung unter anderem auch Altholz verwertet werden.

Fazit zum Stand der Technik und Anwendung

- Die Technik ist verfügbar, zuverlässig und in geeigneten Fällen wirtschaftlich für
 - Wärme für dezentrale Einzelverbraucher bis 70 kW,
 - Wärme und Fernwärme von 70 kW bis über 10 MW,
 - Wärme-Kraft-Kopplung von 1 MW_e bis 50 MW_e,
 - Zuführung in Kohlekraftwerken.
- Die Anwendung
 - erzielt eine über 90%ige Substitution für fossile Energie und fossiles CO₂ und
 - ergänzt Sonne und Wind dank der Speichereffizienz von Holz ideal.
- Die Nutzung als Energieträger ermöglicht die Verwendung von Schwach- und Restholz, was die Kaskadennutzung unterstützt.

Entwicklungstrends

Stromerzeugung und Wärme-Kraft-Kopplung

Bei der Stromerzeugung aus Holz sind die elektrischen Wirkungsgrade physikalisch begrenzt, und es besteht ein deutlicher Skaleneffekt, da mit der Grösse die spezifischen Kosten sinken und die Wirkungsgrade zunehmen. Dampfkraftanlagen erzielen bei zugeführter Leistung von 5 MW elektrische Wirkungsgrade um 15%, bei 50 MW gegen 25%, während heute erst in Grosskraftwerken von 500 MW 40% möglich wären. Da die elektrischen Wirkungsgrade deutlich tiefer als 50% sind, sollte die Abwärme durch Wärme-Kraft-Kopplung so weit als möglich genutzt werden. Dies setzt die Anbindung an Wärmeverbraucher voraus, die vorzugsweise einen Bandlastbedarf mit über 5000 Vollbetriebsstunden pro Jahr aufweisen.

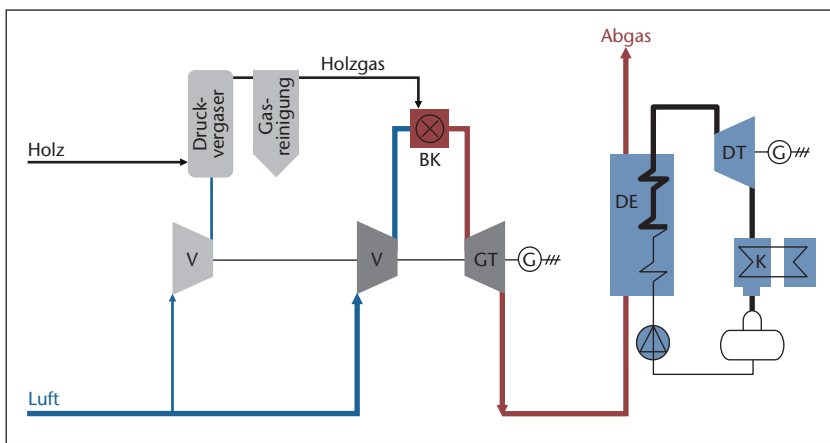


Abb 1 Holzgas-Kombikraftwerk mit Druckvergasung in einer zirkulierenden Wirbelschicht sowie mit Gasturbine und Dampfturbine und mit Anbindung an ein Erdgaskraftwerk (Nussbaumer 2006). V: Verdichter, BK: Brennkammer, GT: Gasturbine, G: Generator, DE: Dampferzeuger, DT: Dampfturbine, K: Kondensator.

Neue Technologien können dazu beitragen, die elektrischen Wirkungsgrade im Leistungsbereich bis etwa 50 MW nahezu zu verdoppeln, wodurch die Stromerzeugung aus Holz deutlich interessanter wird und sich mehr Anwendungsmöglichkeiten erschliessen. Der technische Ansatz hierfür ist die Holzvergasung (Hofbauer & Kaltschmitt 2001). In kleineren Einheiten kann das Holzgas in Motoren von 50 kW_e bis 1 MW_e genutzt werden. Dazu existieren seit über 20 Jahren Entwicklungen, die wegen hoher Kosten und hohen Betriebsaufwands bis anhin nicht kommerziell etabliert sind. Erst in den letzten Jahren konnte eine grössere Zahl von Anlagen installiert werden, deren langfristiger Erfolg ist aber noch offen. Daneben ist die Holzvergasung in Wirbelschichtanlagen technisch zu hoher Reife entwickelt. Für grössere Leistungen erlaubt dies eine Nutzung des Gases in einer Gasturbine mit Abwärmenutzung in einer Dampfturbine als Kombikraftwerk. Dieses Konzept verspricht einen elektrischen Wirkungsgrad von über 40%. Infrage kommt daneben auch die Zufuehrung von Holzgas in mit Erdgas betriebenen Kombikraftwerken. Dies ermöglicht die Ausnutzung des Skaleneffekts und ist als Übergangslösung von Interesse (Abbildung 1).

Obwohl auch dezentrale WKK-Anlagen von Interesse sind, ist für Kleinanlagen zu beachten, dass nicht um jeden Preis an jedem Standort eine dezentrale Holzverstromung sinnvoll ist. Das Ziel muss vielmehr sein, alle erneuerbaren Ressourcen im Verbund möglichst effektiv zu nutzen. Da die Kosten der Fotovoltaik in den letzten Jahren deutlich gesunken sind und Anlagen bereits ab 100 kW_e nur noch einen geringen Skaleneffekt aufweisen, ist Fotovoltaik auch für kleine Einheiten attraktiv, während für Energieholz wegen des Skaleneffekts grössere Anlagen sinnvoll sind. Für die Holzverstromung ergeben sich damit zwei Ziele. Einerseits sind für Leistungen unter 1 MW_e einfache Techniken für Bandlastwärme von Interesse. Ansätze dazu sind nebst ORC und Holzvergasung auch Heissgasprozesse mit Stirling-

motoren und geschlossenen Gasturbinen. Daneben sind im Bereich über 10 MW_e Technologien mit bis zu über 40% elektrischem Wirkungsgrad von Interesse. Dazu ist die nächste Generation der Kraftwerkstechnik mit dem Holzgas-Kombiprozess für einzelne holzreiche Standorte und zum künftigen Ersatz heutiger Holzheizkraftwerke, wie sie in den vergangenen Jahren zum Beispiel in Domat/Ems und in Zürich Aubrugg realisiert wurden, umzusetzen.

Wärme aus Holz

Die Entwicklung der Fotovoltaik wirkt sich auch auf die Trends der Nullenergie- und Plusenergiegebäude aus. Nebst Solarthermie für Warmwasser kommen heute standardmässig Wärmepumpen und Wärmerückgewinnung zum Einsatz, zu deren Antrieb sich gebäudeintegrierte Fotovoltaik eignet. Holzheizungen können dabei eine sinnvolle Ergänzung bilden. So ermöglicht es etwa ein Holzofen, die Wärmepumpe kleiner zu dimensionieren und die Heizwärme an den kältesten Tagen zu erzeugen. Dies setzt Holzöfen mit kurzer Startphase, geringer Leistung und langer Abbranddauer voraus. Dazu wurde ein Verbrennungskonzept entwickelt, das durch Nachrutschen des Holzes in eine Verbrennungsrorte funktioniert und eine zweistufige Verbrennung aufweist (Abbildung 2). Dieser Holzofen erreicht eine Abbranddauer von über 5 Stunden mit einer Charge von 12 kg Holz und erzielt niedrige Emissionen ab dem Anzünden. Dank hohem Wirkungsgrad und Betrieb an Tagen mit niedrigster Effizienz der Wärmepumpe erzielt das System eine relevante Stromersparung, die zudem in eine Periode mit geringer Solarstromproduktion fällt.

Daneben kommen Holz-Zentralheizungen mit Stückholz oder Holzpellets zum Einsatz. Bei Stückholz zwingend und bei Holzpellets empfohlen ist die Anbindung eines Wärmespeichers, der einen emissionsarmen Betrieb mit langen Laufzeiten und ohne Leistungsrosselung ermöglicht. Da auch Solarthermie einen Wärmespeicher benötigt, bietet sich eine Kombination der beiden Systeme an.

Weil Holzfeuerungen zum Feinstaub in der Umgebungsluft beitragen (Baltensperger et al 2013, dieses Heft), die Emissionen bei unsachgemässen Betrieb teilweise deutlich ansteigen (Nussbaumer et al 2008) und Staub aus unvollständiger Verbrennung besonders gesundheitsschädlich ist (Klippel & Nussbaumer 2007), sind Kontrollen durchzuführen und Vollzugsmassnahmen umzusetzen, die eine unsachgemässe Bedienung der Feuerungen unterbinden.

Für Waldhackschnitzel und Restholz kommen Unterschubfeuerungen und Rostfeuerungen zum Einsatz, wobei Rostfeuerungen auch für hohe Aschegehalte geeignet sind (Abbildung 3). Diese Anlagen erreichen im stationären Betrieb eine hohe Ausbrandqualität. In weiteren Entwicklungen werden der Teillastbetrieb optimiert und der Einsatzbereich



Abb 2 Holzofen mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung (Odermatt & Nussbaumer 2012). Schema (links) und Beispiel einer Ausführung (rechts). Foto: Tiba AG

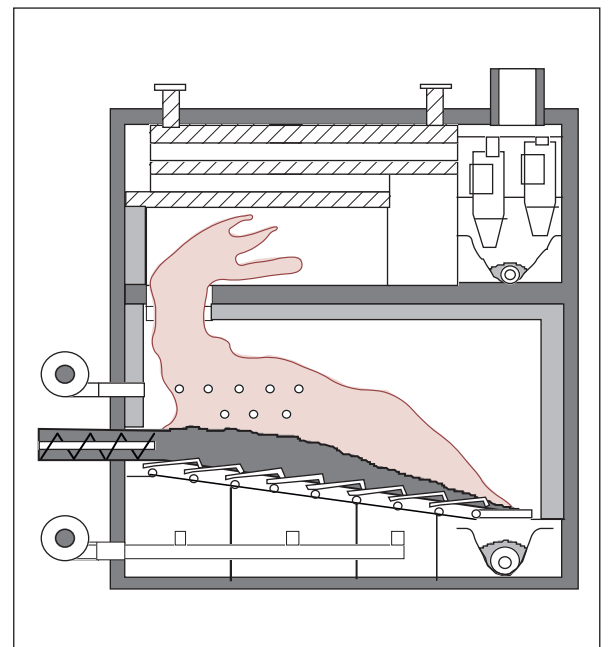


Abb 3 Vorschubrostfeuerung (Nussbaumer 2003).

erweitert. Dazu werden mit numerischen und experimentellen Methoden aerodynamische Massnahmen zur optimalen Strömung und Mischung zwischen Gasen und Luft entwickelt (Abbildungen 4 und 5). Daneben ist die Brennstoffverteilung auf dem Rost für den Ausbrand entscheidend (Kiener & Nussbaumer 2012b), weshalb ein Zonenrost für eine optimierte Brennstoffumsetzung entwickelt wird. Ergänzend dazu erlaubt die Modellierung des Abbrands auf dem Rost, Einflüsse der Betriebsparameter zu erfassen (Peters 2002). Damit kann das Verhalten bei Änderung eines Brennstoffparameters identifiziert und zur Anlagenoptimierung genutzt werden (Abbildung 6).

Weiteres Potenzial weist die Entwicklung und Regelung von Feinstaubabscheidern mit dem Ziel einer 100%igen Verfügbarkeit auf. Beim Einsatz von nassen Brennstoffen besteht zudem ein Potenzial zur Wirkungsgraderhöhung um 10 bis 20% durch Abgaskondensation oder durch Trocknung des Brennstoffs mit Abwärme oder erneuerbarer Energie.

Schliesslich ist eine geeignete hydraulische Einbindung Voraussetzung, um die Anlagen in der Praxis effizient und schadstoffarm zu betreiben. Dazu kommt das System zur Qualitätssicherung nach QM Holzheizwerke zum Einsatz (Good et al 2004).

Da die Feinstaubemissionen automatischer Holzfeuerungen durch Elektroabscheider und Gewebefilter reduziert werden, steigt die Bedeutung der im Vergleich zu Öl und Gas erhöhten Stickoxidemissionen, die bei Holzfeuerungen vorwiegend aus dem Holzstickstoff stammen. Deshalb gilt es, Primärmassnahmen zur Reduktion von Stickoxiden durch gestufte Verbrennung (Nussbaumer 1997) konsequent umzusetzen, was mit Luftstufung und Abgaszirkulation geplant ist.

Begleitend dazu kommt in Zukunft auch der Fixierung und Endlagerung von Kohlenstoff eine wichtige Rolle für den Klimaschutz zu. Nebst der Abscheidung von Kohlendioxid in Kraftwerken (Carbon Capture and Storage, CCS) können die Verwendung von Biokohle zur Bodenverbesserung und die Endlagerung von Kohlenstoff mit schwarzer Erde (Terra preta) eine Option darstellen (Glaser & Birk 2012). Für Länder mit Kohlekraftwerken wird zudem die Produktion torrefizierter Biomassebrennstoffe nach einem dem Rösten ähnlichen Verfahren verfolgt. Dies ermöglicht die Aufbereitung von Biomasse geringer Schüttdichte zu einem kohleartigen Brennstoff, der für Transporte geeignet ist und als Ersatzbrennstoff in Kraftwerken dient (Kiel 2012).

Fazit zu den Entwicklungstrends

1. Die Technik wird laufend verbessert, um Umweltschäden zu reduzieren. So können
 - Emissionen aus unvollständiger Verbrennung durch sachgemässen Betrieb der Feuerungen und konsequenten Vollzug der Vorschriften verhindert,
 - organische Emissionen durch verbesserte Feuerungstechnik reduziert,
 - Russ, der in Form von Black Carbon (BC) zur Klimaerwärmung beiträgt, durch Regelung der Luftmengen und korrekten Betrieb vermieden,
 - Feinstaub durch Feinstaubabscheider weiter vermindert und
 - Stickoxidemissionen durch Low-NO_x-Technik mit gestufter Verbrennung und in grösseren Anlagen durch Denox-Techniken reduziert werden.

Weiter tragen auch die optimale Systemintegration im Praxisbetrieb mit Qualitätsmanagement,

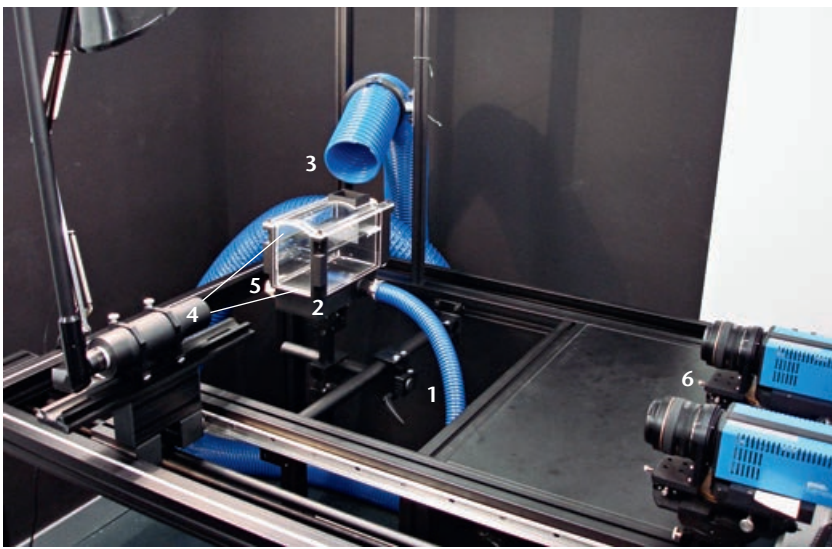


Abb 4 Modell einer Rostfeuerung im Labor zur Strömungsuntersuchung mit Particle Image Velocimetry (PIV). 1: Luftzufuhr zum Modell, 2: Modell einer Rostfeuerung, 3: Luftabsaugung, 4: Laseroptik, 5: Laserlicht-Ebene, 6: Kamera(s).

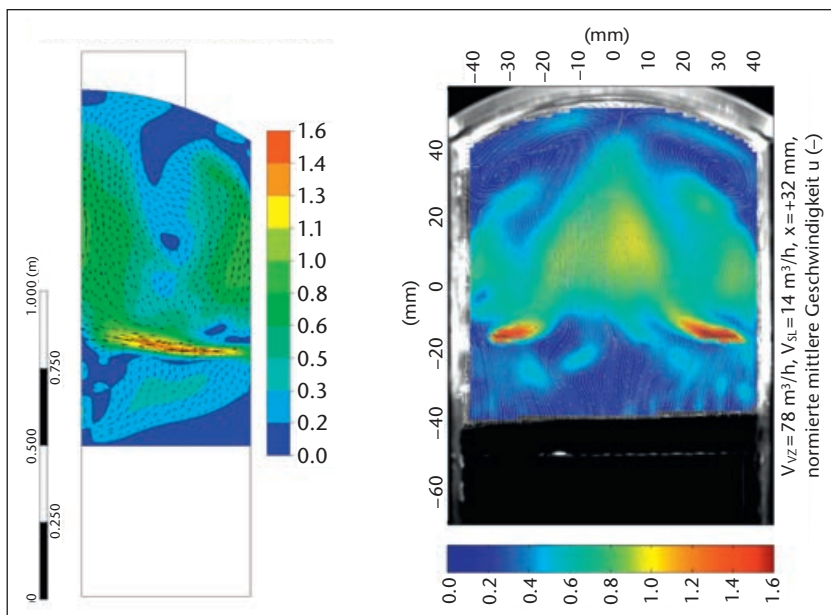


Abb 5 Sekundärlufteindringung zur Optimierung von Impulsverhältnis und Eindringtiefe (Kiener & Nussbaumer 2012a). Links: Berechnung mit Computational Fluid Dynamics (CFD), rechts: Messung am Modell mit PIV.

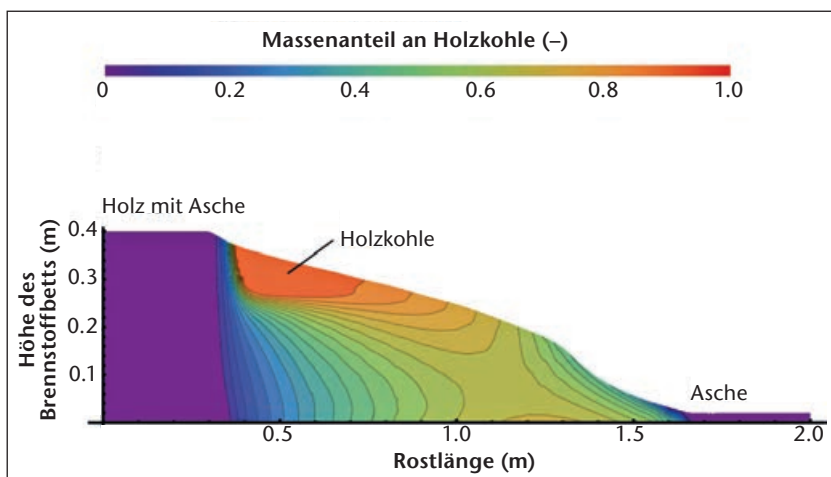


Abb 6 Modellierung der Brennstoffkonversion auf einem Vorschubrost bei idealer Bedeckung für 1.2 MW, Nominallast, 30% Wassergehalt und Primärluftüberschuss 0.7 (Martinez & Nussbaumer 2013).

leistungsfähige Regelungen mit hoher Auslastung und Optimierung der Start- und Ausbrandphase sowie der vermehrte Einsatz von Holzpellets in Kleinfeuerungen zur Reduktion von Umweltschäden bei.

2. Die Anwendung erreicht eine höhere Wertschöpfung im Sinne der Exergie und damit auch der Wirtschaftlichkeit

- durch Wärme-Kraft-Kopplung in Anlagen mittlerer Grösse mit reduzierten Kosten,
- durch Stromerzeugung in grösseren Einheiten mit Holzvergasung und Kombikraftwerkstechnik mit elektrischen Wirkungsgraden von bis zu über 40%.

3. Die Nutzung wird ergänzt

- durch Gebäudeeffizienz und Solarenergie sowie
- durch Massnahmen zur Dekarbonisierung der Atmosphäre durch CO₂-Abscheidung bei Kraftwerken und als Option durch Einsatz von Bio-kohle zur Bodenverbesserung und Endlagerung von Kohlenstoff.

Beitrag von Holz zur Energiestrategie 2050

Der Schweizerische Bundesrat fällte am 25. Mai 2011 den Entscheid zum Ausstieg aus der Kernenergie und beauftragte im Anschluss daran das Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation mit der Erarbeitung einer Vernehmlassungsvorlage zur neuen Energiestrategie 2050. Die danach vom Bundesamt für Energie vorgestellte «Neue Energiepolitik» umfasst nebst dem Ausstieg aus der Kernenergie das langfristige Ziel eines CO₂-Ausstosses von nur noch 1 bis 1.5 Tonnen pro Person und Jahr und basiert auf der Prämisse «Effizienz vor Erneuerbar» (Previdoli 2012). Die Holzenergie kann einen Beitrag zu diesen Zielen leisten. Bei der Wahl der zu unterstützenden Form der Energieholznutzung sollte jedoch sichergestellt werden, dass auch für die Holzenergie der Grundsatz der Effizienz im Vordergrund steht. Unter diesem Aspekt sollen nachfolgend die für die Energiestrategie 2050 im Auftrag des Bundes erarbeiteten und im September 2012 zur Vernehmlassung aufgelegten Energieperspektiven diskutiert werden.

Prognosen für die Energiestrategie

Für das Energieholz werden im Szenario «Neue Energiepolitik» nach Prognos (2012) folgende Trends erwartet:

1. Die Stromproduktion aus Holz in Anlagen zur Wärme-Kraft-Kopplung soll von heute 0.5 PJ pro Jahr auf 4.5 PJ im Jahr 2050 gesteigert werden (Tabelle 3).
2. Die mit Holz beheizte Wohnfläche soll bis 2030 zuerst zunehmen, danach bis 2050 jedoch auf die Hälfte der heutigen sinken, sodass ihr Anteil bei

zunehmender Wohnfläche von 8.5% auf 3.1% sinkt (Tabelle 4). Entsprechend wird für die Endenergienachfrage nach Holz zur Wärmeversorgung bis 2050 eine Abnahme um knapp 60% von 37.4 PJ pro Jahr auf 15.6 PJ pro Jahr erwartet (Tabelle 3).

3. Gleichzeitig wird für flüssige Biotreibstoffe ein Anstieg vorausgesagt, der bis 2050 mit 37.2 PJ pro Jahr etwa dem Heizwert des heutigen Energieholzverbrauchs entspricht (Tabelle 3). Wenn zur Herstellung von 1 MJ Biotreibstoff im Mittel 2 MJ an Biomasse benötigt werden, entspricht der Bedarf für Biotreibstoffe dem Doppelten des heutigen und dem Fünffachen des prognostizierten Holzverbrauchs für Wärme, wobei aus dem Szenario allerdings nicht hervorgeht, welche Rohstoffe für die Biotreibstoffe vorgesehen sind.

Fazit aus Sicht der Ressourcenökonomie

Der für die Energiestrategie 2050 prognostizierte Trend zur vermehrten Wärme-Kraft-Kopplung mit Holz ist nachvollziehbar und sinnvoll, da damit eine hohe Wertschöpfung erzielt wird und Holz die Stromversorgung geeignet ergänzt. Die Prognose des um knapp 60% abnehmenden Holzverbrauchs für Wärme ist aus ressourcenökonomischer Sicht dagegen nicht gerechtfertigt. Sofern zudem ein Teil der prognostizierten Biotreibstoffkapazität aus Holz stammt, wird der Effekt zur Substitution fossiler Energieträger damit verringert, da die Wärme- und Stromproduktion aus Holz eine höhere Substitutionswirkung auf fossile Energien haben. Die Herstellung von Biotreibstoffen ist in erster Linie sinnvoll zur Nutzung von biogenen Reststoffen, die anderweitig nur schwierig oder mit niedrigem Wirkungsgrad verwertbar sind, also zum Beispiel von nassen und für die Vergärung geeigneten Lebensmittelabfällen. Um jedoch mit Holz einen maximalen Beitrag zur Energiewende zu leisten und diesen rasch

zu erschliessen, gilt es nebst der Verwendung von Holz als Roh- und Werkstoff effiziente Anwendungen zur Wärme- und Stromproduktion aus Holz zu realisieren und die Energieholzpotenziale damit auszuschöpfen. ■

Eingereicht: 2. Juli 2013, akzeptiert (mit Review): 15. Oktober 2013

Dank

Wir danken dem Bundesamt für Energie, dem Bundesamt für Umwelt, der Kommission für Technologie und Innovation, dem Schweizerischen Nationalfonds, der Tiba AG und der Schmid AG Energy Solutions, ohne deren Unterstützung der vorliegende Artikel nicht möglich gewesen wäre.

Literatur

- BALTENSPERGER U ET AL (2013)** Holzfeuerungen: eine bedeutende Quelle von Feinstaub in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 164: 420–427. doi: 10.3188/szf.2013.0420
- BFE (2011)** Richtlinie kostendeckende Einspeisevergütung (KEV), Art. 7a EnG, Biomasse, Anhang 1. 5 EnV. Bern: Bundesamt Energie, Version 1.4 vom 1.10.11. 20 p.
- GLASER B, BIRK JJ (2012)** State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Indio). Geochim Cosmochim Acta 82: 39–51.
- GOOD J ET AL (2004)** Planungshandbuch. Straubing: Carmen. 245 p.
- HERMLE S, GÜNTHARDT-GOERG MS, SCHULIN R (2006)** Effects of metal contaminated soil on the performance of young trees growing in model ecosystems under field conditions. Environ Pollut 144: 703–714.
- HOFBAUER H, KALTSCHMITT M (2001)** Vergasung. In: Kaltschmitt M, Hartmann H, editors. Energie aus Biomasse. Berlin: Springer. pp. 427–505.
- HUBBERT M (1956)** Nuclear energy and the fossil fuels. www.resilience.org/stories/2006-03-08/nuclear-energy-and-fossil-fuels (20.10.2013).
- JACOBSEN C, RADEMACHER P, MEESEBURG H, MEIWES KJ (2003)** Gehalte chemischer Elemente in Baumkompartimenten. Literaturstudie und Datensammlung. Göttingen: Niedersächs Forstl Vers.anstalt. 87 p.
- KALTSCHMITT M, THRÄN D (2009)** Biomasse im Energiesystem. In: Kaltschmitt et al, editors. Energie aus Biomasse. Berlin: Springer, 2 ed. pp. 7–35.
- KIEL J (2012)** Torrefaction: fundamentals, processes and potential. www.holzenergie-symposium.ch/Dokumente/Tgband-12HES.pdf (20.10.2013).
- KIENER M, NUSSBAUMER T (2012A)** Strömungsoptimierung einer Vorschubrostfeuerung mit CFD und PIV. www.holzenergie-symposium.ch/Dokumente/Tgband12HES.pdf (20.10.2013).
- KIENER M, NUSSBAUMER T (2012B)** Influence of uneven fuel distribution on a grate on gas flow conditions and combustion quality. doi: 10.5071/20thEUBCE2012-2BO.10.2
- KLIPEL N, NUSSBAUMER T (2007)** Health relevance of particles from wood combustion in comparison to Diesel soot. www.verenum.ch/Publikationen/W1612Berlin2007.pdf (20.10.2013).
- MANSER R (2010)** Holzpotenzial der Schweiz und Entwicklungsstrategien aus Sicht des Bundes. www.holzenergie-symposium.ch/Dokumente/Tgband11HES.pdf (20.10.2013).

Rubrik	Energieträger	2010 (PJ/a)	2030 (PJ/a)	2050 (PJ/a)	Veränderung von 2010 bis 2050 (PJ/a)
Endenergienachfrage ¹⁾	Holz	37.4	28.6	15.6	-21.8
	Flüssige Biotreibstoffe	0.4	35.0	37.2	+36.8
Erneuerbare Stromproduktion ^{2), 3)}	Biomasse (Holz), Stromproduktion gekoppelt	0.5	4.4	4.5	+4.0

Tab 3 Szenario «Neue Energiepolitik» (Prognos 2012: ¹⁾ Tabelle 8-37, ²⁾ Tabelle 8-62).

³⁾ Stromproduktion gekoppelt (WKK), umgerechnet auf PJ.

	2010	2030	2050	Veränderung von 2010 bis 2050
Gesamtwohnfläche in Mio. m ² EBF	487	614	666	+37%
Mit Holz beheizte Fläche in Mio. m ² EBF	41.2	50.9	20.7	-50%
Anteil mit Holz beheizte Fläche	8.5%	8.3%	3.1%	-64%

Tab 4 Mit Holz beheizte Wohnfläche im Szenario «Neue Energiepolitik» (Prognos 2012, Tabelle 8-4). EBF: Energiebezugsfläche.

- MARTINEZ J, NUSSBAUMER T (2013) A one-dimensional transient solid fuel conversion model for grate combustion optimisation. doi: 10.5071/21stEUBCE2013-2DV.3.61
- MEADOWS D, MEADOWS D, RANDERS J, BEHRENS W (1972) The limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books. 205 p.
- NUSSBAUMER T (1997) Primärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen, Teil 1, BWK 49 (1/2): 46–49, und Teil 2, BWK 49 (3): 59–62.
- NUSSBAUMER T (2003) Combustion and co-combustion of biomass. *Energ Fuel* 17: 1510–1521.
- NUSSBAUMER T (2005) Vergleich von Wärme, Strom und Treibstoff aus Holz. *BWK* 57 (12): 59–61.
- NUSSBAUMER T (2006) Holzgas- und Holzgas/Erdgas-Kombikraftwerke. *BWK* 58 (5): 58–62.
- NUSSBAUMER T, DOBERER A, KLIPPEL N, BÜHLER R, VOCK W (2008) Influence of ignition and operation type on particle emissions from residential wood combustion. www.verenum.ch/Publikationen/Biomass-Conf9.5.pdf (20.10.2013).
- ODERMATT P, NUSSBAUMER T (2012) Holzofen mit Verbrennungserorte und zweistufiger Verbrennung. www.holzenergiesymposium.ch/Dokumente/Tgband12HES.pdf (20.10.2013).
- PETERS B (2002) Measurements and application of a Discrete Particle Model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual fuel particles. *Combust Flame* 131: 132–146.
- PREVIDOLI P (2012) Energiestrategie 2050, Infoanlass Energiestrategie 2050, Bern 5.2.2012. www.bfe.admin.ch/themen/00526/00527/index.html?lang=de&dossier_id=05024 (23.9.2013).
- PROGNOS (2012) Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Bern: Bundesamt Energie. 904 p.
- STREIFF HR (2010) Bedarf, Quellen und Bedarfsentwicklung für Säge- und Industrieholz. www.holzenergiesymposium.ch/Dokumente/Tgband11HES.pdf (20.10.2013).
- THEES O, KAUFMANN E, LEMM R, BÜRGI A (2013) Energieholzpotenziale im Schweizer Wald. *Schweiz Z Forstwes* 164: 351–364. doi: 10.3188/szf.2013.0351

Entwicklungstrends der Holzenergie und ihre Rolle in der Energiestrategie 2050

Die Holzenergie trägt heute zu rund 4% zum Gesamtenergieverbrauch der Schweiz bei, und ihr Anteil kann bis ins Jahr 2020 auf 6% erhöht werden. Als direkt lagerbarer Energieträger ist Holz eine ideale Ergänzung zu unregelmässig anfallender Solar- und Windenergie. Weil der Rohstoff Holz jedoch begrenzt ist, müssen solche Anwendungen unterstützt werden, die möglichst effektiv zur Substitution fossiler Energien beitragen. Um dies zu beurteilen, wird im Beitrag der Energie-Erntefaktor eingeführt. Dieser zeigt, dass Wärme und Strom aus Holz eine hohe Substitutionswirkung mit einer bis zu 90%igen Reduktion fossiler CO₂-Emissionen erzielen. Aus diesem Grund gilt es, die noch ungenutzten Energieholzpotenziale für Heizungen, Fernwärme und Wärme-Kraft-Kopplung zu erschliessen. Dazu sind folgende Entwicklungen weiterzuführen: die Reduktion des Schadstoffausstosses bei Kleinf Feuerungen dank zweistufiger Verbrennung, der konsequente Vollzug der Luftreinhaltevorschriften zur Verhinderung unsachgemässer Betriebsweise der Feuerungen sowie die Optimierung automatischer Feuerungen durch aerodynamische Verbesserungen, sektorielle Brennstoffumwandlung und gestufte Verbrennung zur Stickoxidminderung. Zur Stromerzeugung aus Holz sind kostengünstige Technologien im Leistungsbereich bis 1 MW_e zu entwickeln und eine begrenzte Anzahl von Kombikraftwerken mit integrierter Holzvergasung zu realisieren, die höchste Wirkungsgrade und die Nutzung auch qualitativ minderwertiger Brennstoffsortimente ermöglichen. Die Bewertung der Technologien zeigt, dass die der Schweizer Energiestrategie 2050 zugrunde gelegte Annahme einer 60%igen Reduktion der Wärmeenergieerzeugung aus Energieholz bei gleichzeitiger vermehrter Verwendung desselben für Biotreibstoffe aus ressourcenökonomischer Sicht nicht gerechtfertigt ist, da Wärme, Strom und Wärme-Kraft-Kopplung aus Holz eine höhere energetische Wertschöpfung erzielen, und zwar mit Technologien, die bereits verfügbar oder im Fall der Kombikraftwerkstechnik umsetzbar und zudem ökonomisch konkurrenzfähig sind.

Energie-bois: tendances et rôle dans la stratégie énergétique 2050

L'énergie-bois représente aujourd'hui environ 4% de l'utilisation énergétique totale de la Suisse et pourrait augmenter à 6% jusqu'en 2020. Le bois, par sa capacité d'entreposage, est un complément idéal aux énergies solaire ou éolienne plus irrégulières. Etant donné que le potentiel de bois-énergie est limité, les utilisations qui sont les plus efficaces en matière de substitution d'énergie fossile doivent être favorisées. Pour en juger, cet article introduit le facteur de retour énergétique qui démontre que la chaleur et l'énergie produite à partir de bois a un excellent effet de substitution avec une réduction allant jusqu'à 90% des émissions de CO₂ fossile. Pour cette raison, il s'agit d'utiliser le potentiel bois-énergie encore non utilisé pour du chauffage, des réseaux de chaleur à distance et des centrales chaleur-force. Les développements suivants doivent être renforcés: la réduction des émissions nocives des petites installations grâce à la combustion en deux étapes, l'application stricte des normes de qualité de l'air pour éviter une mauvaise opération des centrales, ainsi que l'amélioration des chaudières par l'optimisation aérodynamique, la transformation sectorielle du combustible sur les grilles d'avancement et la combustion étagée pour réduire les émissions de NO_x. Pour la production d'électricité, des technologies bon marché pour des puissances inférieures à 1 MW_e doivent être développées, et un nombre restreint de centrales combinées avec gazéification du bois doivent être construites pour permettre la valorisation d'assortiments de bois-énergie de moindre qualité. L'évaluation des technologies démontre que l'hypothèse de la stratégie énergétique 2050 de la Confédération d'une réduction de 60% de la production de chaleur issue du bois et une augmentation de son utilisation pour des biocarburants n'est pas justifiée en termes d'utilisation rationnelle des ressources, car les utilisations pour la chaleur, l'électricité et le couple chaleur-force ont un meilleur rendement énergétique avec des technologies déjà existantes (ou prêtes à l'emploi dans le cas des techniques combinées) et économiquement concurrentielles.