Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 132 (2006)
Heft: 48: Holzenergie

Artikel: Schadstoffarme Verbrennung
Autor: Nussbaumer, Thomas / Klippel, Norbert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-108037

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Thomas Nussbaumer, Norbert Klippel

Schadstoffarme Verbrennung

Soll bis ins Jahr 2020 die Holzenergie verdoppelt werden, so müssen die Feinstaubemissionen der Holzfeuerungen deutlich reduziert werden. Problematisch sind insbesondere Russ und Teer, die vor allem bei handbeschickten Holzöfen und Cheminées entstehen. Automatische Holzfeuerungen emittieren demgegenüber vorwiegend salzartige Partikel, die mit Gewebefiltern oder Elektroabscheidern weitgehend abgeschieden werden können.

Die Verwendung von Holz als Energieträger ist sinnvoll, weil Holz erneuerbar ist und bei nachhaltiger Waldbewirtschaftung keinen Anstieg der Treibhausgase verursacht. Durch den Ersatz einer Öl- oder Gasheizung durch eine gute Holzheizung können rund 90 % der fossilen Primärenergie eingespart werden. 10 % graue Energie sind notwendig für die Versorgung mit Holz und den Bau der Heizung. Aus Sicht der Klimaveränderung ist ein Ersatz von Heizöl und Erdgas durch Holz somit vorteilhaft. Öl und Gas sind als nicht nachwachsende Rohstoffe zu wertvoll, um verbrannt zu werden. Sie sollten für Anwendungen gespart werden, bei denen es zum Erdöl kaum Alternativen gibt: für Kunststoffe und Pharmazeutika. Wenn Treibstoff aus Holz hergestellt wird, ist dies mit zusätzlichen Verlusten verbunden, weshalb Holz in Heizanlagen mehr fossile Energie einspart als im Verkehr.

Schadstoffe aus Holzfeuerungen

Dem Vorteil von Holz stehen vergleichsweise hohe Emissionen an Luftschadstoffen gegenüber. Die Emissionen können zum Teil durch die Feuerungstechnik beeinflusst werden, sie sind teilweise aber auch brennstoffbedingt. Bei handbeschickten Feuerungen werden sie zudem sehr stark durch die Betriebsweise beeinflusst. Entscheidend für die Art der Schadstoffe ist, ob eine vollständige Verbrennung des Holzes stattfindet.
Im nebenstehenden Kasten sind die relevanten Schadstoffe aufgeführt. Die Emissionen der 3. Gruppe sind gering, sofern naturbelassenes Holz verbrannt wird. Werden jedoch Altholz oder Abfälle mitverbrannt, so treten hohe Emissionen an Schwermetallen, HCl und meist auch an Kohlenwasserstoffen auf.

Feinstaub als Hauptschadstoff

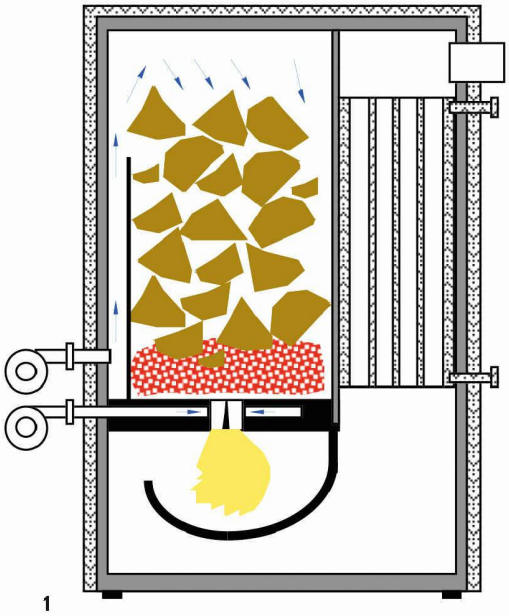
Lungengängiger Feinstaub kleiner als 10 Mikrometer (Particulate Matter PM 10) gilt seit der berühmten 6-Städte-Studie in den USA als wichtigster Indikator der gesundheitsschädigenden Wirkung von Schadstoffen in der Umgebungsluft.[1] Bei Holzheizungen ist Feinstaub der bedeutendste Schadstoff, wobei Feinstaub aus der Holzverbrennung vorwiegend aus Russ und Teer sowie salzartigen Partikeln besteht.[2]
Russ und Teer sind krebserzeugend und stark gesundheitsschädlich. Relativ hohe Konzentrationen an solchen organischen Substanzen verursachen handbeschickte Holzfeuerungen. Gute Stückholzkessel können vergleichsweise tiefe Gesamtstaubemissionen von deutlich unter 50 mg/m^3 (bei 13 Vol.-% O_2) erzielen. Dasselbe gilt für Cheminéeöfen bei idealem Betrieb mit kleinen Mengen und kleinen Holzscheitern. Bei nicht idealem Betrieb – zum Beispiel durch zu starkes Füllen oder zu frühes Schliessen der Luftklappen – können Holzöfen

Beim Verbrennen von Holz sind folgende Schadstoffe relevant:

1. Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung:
   - brennbarer Anteil im Feinstaub in Form von Russ, Teer und organischen Verbindungen
   - brennbare gasförmige Emissionen wie Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

2. Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung:
   - anorganischer Feinstaub aus Aschekomponenten (vorwiegend Salze)
   - Stickoxide (NO_X), die hauptsächlich aus dem im Holz gebundenen Stickstoff gebildet werden

3. Schadstoffe aus weiteren Inhaltsstoffen:
   - Schwermetalle
   - Chlorwasserstoff (HCl) und polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Furane (PCDD/F)
   - Schwefeldioxid (SO_2)



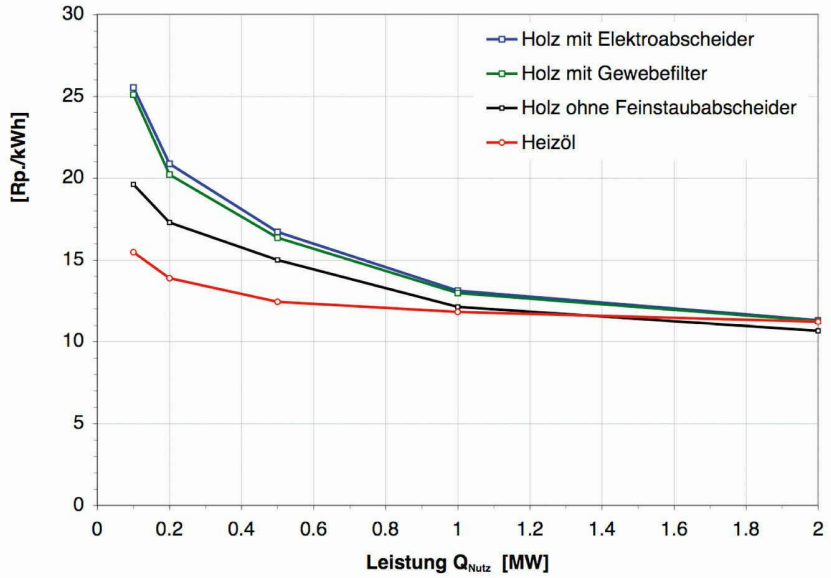
1
Prinzip der zweistufigen Verbrennung mit unterem Abbrand (gelbe Flamme) am Beispiel eines Sturzbrandkessels mit Zuluftventilatoren. Im Gluttbett erfolgt die Vergasung des Holzes mit Primärluft, in der Brennkammer die Gasverbrennung mit Sekundärluft und anschliessendem Wärmeentzug im Kessel (Bild: Autoren)

und Cheminées zehnfach höhere Emissionen verursachen. Gar bis zu hundertmal höhere Emissionen sind möglich, wenn nach dem Anfeuern die Luftklappen geschlossen werden, um den Abbrand zu verzögern. Der dabei emittierte Feinstaub (Holzruss) ist zudem viel toxischer als Dieselruss und deshalb besonders kritisch.[3] Da die Holzverbrennung, wie Analysen der Umgebungsluft zeigen, teilweise mehr als 50% der Russbelastung verursacht, sind solche Einzelquellen zu vermeiden. Nebst schlecht betriebenen Holzheizungen ist auch die unnötige Verbrennung im Freien zu bekämpfen.
Bei der Holzverbrennung gelangen auch salzartige Aschebestandteile durch Verdampfung und Oxidation ins Abgas. Diese Feinstäube sind deutlich weniger gesundheitsschädlich als Diesel- oder Holzruss. Sie treten bei automatischen Holzfeuerungen, die geringe Emissionen an Russ und Teer erzielen, in erhöhtem Mass auf und führen dort zu typischen Gesamtemissionen von 50 bis 150 mg/m^3 (bei 13 Vol.-% O_2).

Massnahmen zur Feinstaubminderung

Um die Luftverschmutzung durch Feinstaub zu reduzieren und die heute regelmässig überschrittenen Immissionsgrenzwerte einzuhalten, hat der Bund im Januar 2006 einen Aktionsplan gegen den Feinstaub lanciert. Von den neun angekündigten Massnahmen betreffen drei die Holzfeuerungen.[4] Mit diesen Massnahmen will die Schweiz sicherstellen, dass mit der aus energie- und klimapolitischen Gründen angestrebten Verdoppelung der Energieholznutzung mittel- bis langfristig keine gravierenden Luftreinhalteprobleme entstehen.
Aufgrund der Bildungsart der Schadstoffe sind folgende Massnahmen erforderlich, um bei Holzfeuerungen die Feinstaubemissionen zu reduzieren:
1. Leider zeigen Praxisuntersuchungen, dass in Holzheizungen oft unerlaubterweise Abfall verbrannt wird.[5] Eine wirkungsvolle Kontrolle zur Durchsetzung des Abfallverbrennungsverbots ist deshalb notwendig. Das Gleiche gilt für Altholz, das lediglich in speziellen Altholzfeuerungen genutzt werden darf.
2. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz können hohe Emissionen an organischen Stoffen auftreten.[3] Sichtbarer schwarzer Rauch ist ein Zeichen für zu hohe Emissionen und darf bei korrektem Betrieb höchstens während kurzer Zeit beim Anfeuern auftreten. Zur Vermeidung von Russ, Teer und gasförmigen Kohlenwasserstoffen sind folgende Anforderungen[6] zu erfüllen: Zentral ist eine gute Feuerungstechnik. Realisieren lässt sich diese mit einer zweistufigen Verbrennung: Zuerst wird im Glutbett das Holz mit Primärluft vergast. Anschliessend wird das Gas mit Sekundärluft vermischt und in einer heissen Brennkammer verbrannt. Dieses Prinzip wird bei handbeschickten Holzfeuerungen mit unterem Abbrand erzielt (Bild 1). Einfache Holzöfen weisen demgegenüber konstruktiv bedingte Limiten auf. Bei Pelletsfeuerungen und automatischen Holzfeuerungen wird eine Aufteilung der Verbrennungsluft dagegen standardmässig verwirklicht. Weiter ist geeigneter Brennstoff zu verwenden. Dieser unterscheidet sich je nach Feuerungstyp. Schwachlastbetrieb ist zu

2
Wärmegestehungskosten exklusive Wärmeverteilung für Holz sowie für Heizöl bei Brennstoffpreisen von 5 Rp./kWh für Holz und 8 Rp./kWh für Heizöl sowie einem Kapitalzins von 5 % pro Jahr (Bild: Autoren)



2

vermeiden, die Anfahrphasen sind zu minimiern. Die optimale Einstellung des Luft/Brennstoff-Verhältnisses (Luftüberschuss Lambda) sollte durch eine Regelung erfolgen.

3. Werden die Bedingungen für eine vollständige Verbrennung erfüllt, so entstehen aber immer noch salzartige Feinstäube und Stickoxide. Für handbeschickte Holzfeuerungen sind diese zwei Schadstoffe von untergeordneter Bedeutung. Die technische Weiterentwicklung muss sich deshalb vorab darauf konzentrieren, wie sich eine unvollständige Verbrennung vermeiden lässt. Bei automatischen Holzfeuerungen können die Staubemissionen künftig durch technische Massnahmen (Feinstaubabscheider) reduziert werden. Zur Verminderung der Stickoxidemissionen wurden feuerungstechnische Konzepte entwickelt, die in der Praxis aber noch nicht zum Einsatz kommen. Für grössere Anlagen kommen zudem Verfahren zur nachträglichen Stickoxidreduktion in Frage.

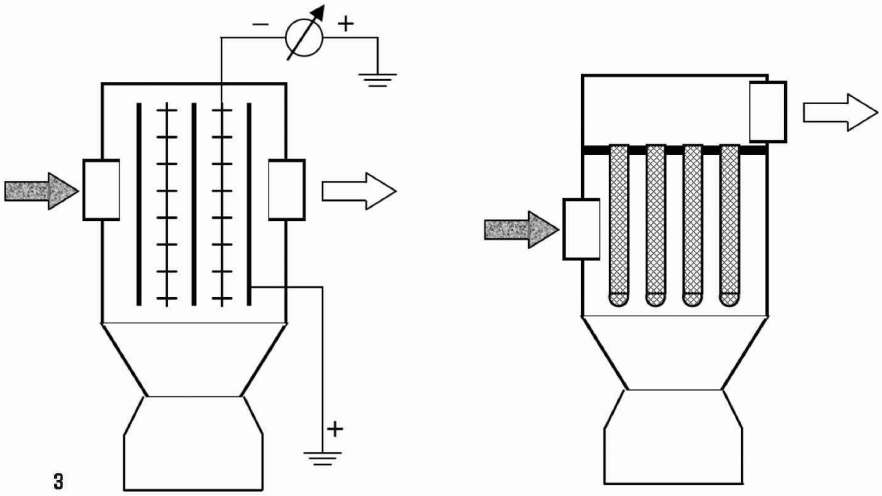
Handbeschickte Holzheizungen

Für diese Holzfeuerungen hat eine vollständige Verbrennung des Brennstoffs Priorität. Moderne Stückholzkessel weisen meist ein zweistufiges Verbrennungsprinzip auf (Bild 1). Im Weiteren verfügen sie über einen Ventilator, was eine kontrollierte Luftzufuhr mit verbesserter Mischung und wetterunabhängigem Betrieb ermöglicht. Zudem sollten sie über einen Wärmespeicher zur Vermeidung von Schwachlastbetrieb verfügen. Holzöfen und Cheminées weisen dagegen meist Kompromisse bezüglich Feuerungstechnik auf. Die Forderung, dass die Feuerraumtür jederzeit geöffnet werden kann, erschwert den Einsatz von zweistufigen Verbrennungsprinzipien. Auf den Einsatz eines Ventilators wird meist verzichtet, was die Regelbarkeit sowie die Mischungsqualität zwischen Luft und Gas einschränkt. Eine interessante Alternative sind Pelletsheizungen. Holzpellets ermöglichen eine vollautomatische Verbrennung für kleine Leistungen sowie einen stabilen und geregelten Betrieb. Wesentliche Vorteile sind die konstanten Brennstoffeigenschaften und der reduzierte Einfluss des Betreibers.

In den letzten Jahren ist zur Reduktion der Feinstaubemissionen bei Cheminées und Holzöfen ein Feinstaubabscheider entwickelt worden. In der Schweiz kommt derzeit ein einfacher Elektroabscheider auf den Markt, der den Kamin als Abscheidefläche nutzt und Abscheidewirkungen von rund 60 bis 80 % erzielt.[7] Der Staub muss vom Kaminfeger periodisch entfernt werden. In Norwegen wurde ein System entwickelt, das sich auch zum nachträglichen Anbau auf einen Kamin eignet und über 90 % Abscheidewirkung erzielt.[8]

Automatische Holzheizungen

In korrekt betriebenen automatischen Holzfeuerungen können die Anforderungen an eine vollständige Verbrennung zur Vermeidung von Russ und Teer weitgehend erfüllt werden. Automatische Holzheizungen sind schon für Leistungen unter 100 kW verfügbar, meist kommen jedoch Anlagen ab 250 kW bis 2 MW zum Einsatz. Wegen der grösseren Dimensionen und des höheren technischen Aufwands sind Holzheizungen zwar deutlich teurer als Öl- oder gar als Gasheizungen. Die Gesamtkosten hängen aber massgeblich von den Brennstoffpreisen ab. Bei heute typischen Preisen von 5 Rp./kWh für Holz und von 8 Rp./kWh für Heizöl (80 Fr./100 l) ist Wärme aus einer automatischen Holzheizung ohne Feinstaubabscheider für Leistungen bis zu 500 kW rund 3 Rp./kWh oder 25 % teurer als Wärme aus Heizöl. Bei 1 MW Leistung sind Holz und Heizöl wirtschaftlich annähernd gleichwertig (Bild 2).[9]



3

Elektroabscheider und Gewebefilter

Die Feinstaubemissionen, die aus Aschebestandteilen gebildet und weitgehend anorganischer Natur sind, können bis zu einem gewissen Grad durch besondere Gestaltung des Feuerraums und Betrieb mit stark reduzierter Luftzufuhr im Glutbett verringert werden (Low-Particle-Konzept).[10] Für eine weiter gehende Reduktion sind jedoch Feinstaubabscheider erforderlich. Dazu kommen Elektroabscheider und Gewebefilter zum Einsatz. In Elektroabscheidern werden die Partikel in einem elektrischen Feld aufgeladen und anschliessend an einer metallischen Elektrode abgeschieden, während die Abscheidung bei Gewebefiltern auf einer Filterschicht erfolgt (Bild 3). Da die Partikel grossteils anorganisch sind, ist kein Abbrennen wie bei Dieselruss möglich, weshalb im Gegensatz zu Dieselpartikelfiltern Filterasche als zu entsorgender Rückstand anfällt.

Der Einsatz von Feinstaubabscheidern erlaubt eine Reduktion der Emissionen unter 20 mg/m^3, wobei in der Praxis bei korrektem Betrieb sogar Werte von deutlich unter 10 mg/m^3 möglich sind. Diese Feinstaubemissionen sind somit kaum mehr relevant. Feinstaubabscheider stehen heute für Leistungen ab rund 500 kW zur Verfügung und verteuern die Wärme aus Holz für diese Leistung um knapp 2 Rp./kWh oder um rund 10 % bis 15 % (Bild 2).[11]

Neben Feinstaub verursachen automatische Holzheizungen auch höhere Emissionen an Stickoxiden (NO_X) als Öl- und Gasfeuerungen, weil im Holz Stickstoff in Form von Aminen enthalten ist, der bei der Verbrennung teilweise oxidiert wird. In Forschungsarbeiten wurden Konzepte zur Luft- und Brennstoffstufung entwickelt, die eine Stickoxidreduktion um 50 bis 80 % erzielen.[6] Diese Möglichkeiten zur Stickoxidminderung werden in der Praxis allerdings noch nicht eingesetzt.

Minimale Emissionen bei Grossanlagen

Neben der Nutzung in Heizanlagen ist auch die Stromerzeugung aus Holz in Kraftwerken eine Möglichkeit. Mit konventionellen Dampfkraftwerken werden in der in Frage kommenden Leistungsgrösse lediglich bescheidene elektrische Wirkungsgrade erzielt (typisch sind 20 % für Kraftwerke mit weniger als 5 MW und gegen 30 % mit rund 25 MW elektrischer Leistung). Solche Anlagen sind dann interessant, wenn mit der Abwärme ein grosser Wärmeverbraucher versorgt werden kann. Entsprechende Standorte sind in der Schweiz nur beschränkt vorhanden. Ein Wirkungsgradsprung um mehr als 10 % ist möglich durch den Einsatz neuer Techniken mit Holzvergasung und anschliessender Nutzung des Gases in einem Kombikraftwerk mit Gas-

Verschärfung der Feinstaub-Grenzwerte

Ende Oktober 2006 hat das Bundesamt für Umwelt (Bafu) die geplanten Änderungen der Luftreinhalteverordnung (LRV) mit den verschärften Emissionsgrenzwerten für Holzfeuerungen in die Vernehmlassung geschickt. Im Vordergrund stehen zwei Änderungen:

– Anlagen bis 350 kW Leistung dürfen ab 2008 nur noch in Verkehr gebracht werden, wenn ihre Konformität mit den entsprechenden Produktenormen der EU nachgewiesen ist (Typenprüfung) und die Grenzwertanforderungen der LRV erfüllt sind. Ein solcher Konformitätsnachweis war bisher nur für Öl- und Gasheizungen nötig.

– Für automatische Holzfeuerungen über 70 kW soll zusätzlich der Emissionsgrenzwert für Feinstaub gesenkt werden. Gegenwärtig beträgt dieser 150 mg/m^3. Je nach Anlagengrösse soll er neu zwischen 10 und 30 mg/m^3 liegen. Allgemein wird davon ausgegangen, dass die schärferen Grenzwerte den Einbau von Elektroabscheidern oder Gewebefiltern erfordern. Für Anlagen über 1 MW Leistung sollen die verschärften Grenzwerte bereits ab Mitte 2007 gelten. Laut Bafu ist für Anlagen dieser Grössenordnung die Feinstaubabscheidung Stand der Technik und auch bezüglich Kosten zumutbar. Für Anlagen unter 1 MW stünden kostengünstige Systeme hingegen erst mittelfristig zur Verfügung. Aus diesem Grund ist die Verschärfung der Grenzwerte für solche Anlagen erst ab 2009 bis 2015 vorgesehen, gestaffelt in drei Schritten nach Anlagengrösse.

Von der frühen Ankündigung erhofft man sich, dass die Kosten für die Filter noch einmal sinken werden. Die neuen Grenzwerte gelten auch für bestehende Anlagen, wobei grosszügige Sanierungsfristen gewährt werden. Anlagen, die vor der Verschärfung der Grenzwerte erstellt wurden, dürfen aus Gründen der Rechtssicherheit während 15 Jahren noch den alten Grenzwert in Anspruch nehmen. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise eine 300-kW-Anlage, die 2014 gebaut wird – also ein Jahr vor dem geplanten Inkrafttreten des strengeren Grenzwertes –, bis 2029 noch den alten Grenzwert beanspruchen dürfte.

Lukas Denzler, dipl. Forst-Ing. ETH, lukas.denzler@bluewin.ch

3
Elektroabscheider (links) und Gewebefilter (rechts).
Gewebefilter sind in der Anschaffung kostengünstiger und weisen einen kleineren Platzbedarf auf als Elektroabscheider. Sie verursachen aber höhere Betriebskosten als Elektroabscheider, zum einen wegen des filterbedingten Druckverlustes, zum anderen wegen der beschränkten Lebensdauer des Filtermaterials. Ein weiterer Nachteil der Gewebefilter ist, dass sie anfällig auf Funkenflug sind und durch Kondensation verklebt werden können (Bild: Autoren)

und Dampfturbine. Entsprechende Kraftwerke kämen ab rund 50 MW elektrischer Leistung in Frage und könnten Wirkungsgrade von 40 bis 45 % erzielen.[12] Aus ökonomischen Gründen wäre eine Anlagengrösse von rund 150 MW elektrischer Leistung ideal, was etwa einem Zehntel der Grösse eines modernen Kohle- oder Kernkraftwerks entspricht. Gemäss heutigen Abschätzungen könnte ein solches Holzkraftwerk rund einen Viertel des ungenutzten Energieholzes der Schweiz nutzen und mit jährlich rund 900 GWh Strom etwa 1.5 % des heutigen Strombedarfs erzeugen. Mit dezentralen Wärmepumpen, die aus 1 kWh Strom mehr als 3 kWh Wärme produzieren, könnten damit indirekte Heizungswirkungsgrade von mehr als 120 % erzielt werden, was einer höheren Ausnutzung als mit Holzheizungen entspräche. Ein solches Kraftwerk würde zudem sehr geringe Feinstaubemissionen aufweisen und könnte deshalb als Ergänzung zu dezentral betriebenen Holzheizungen sinnvoll sein. Ein weiterer Vorteil wäre, dass in einer Anlage dieser Grösse auch minderwertige Energieholzsortimente genutzt werden könnten, die in Kleinanlagen nicht verbrannt werden dürfen. Falls in der Schweiz ein Erdgas-Kombikraftwerk gebaut wird – was derzeit in der Elektrizitätswirtschaft diskutiert wird –, wäre eine Angliederung einer Holzvergasungseinheit an ein Erdgaskraftwerk möglich, wodurch fossiles CO_2 eingespart und die Vorteile noch grösserer Leistungen ausgenutzt werden könnten.

PD Dr. sc. techn. Thomas Nussbaumer ist Inhaber des Ingenieurbüros Verenum,
thomas.nussbaumer@verenum.ch
Dr. rer. nat. Norbert Klippel ist Projektleiter für Feinstaub bei der Firma Verenum,
norbert.klippel@verenum.ch
Weitere Informationen unter www.verenum.ch

Literatur

1 Dockery D. et al. (1993): An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities. The New England J. of Medicine, Vol. 329, 1753–1759.
2 Nussbaumer, T.; Hasler, P.: Bildung und Eigenschaften von Aerosolen aus Holzfeuerungen, Holz als Roh- und Werkstoff 57, 1999, 13–22.
3 Klippel, N.; Nussbaumer, T.: Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruss, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, ISBN 3-908705-11-8, 21–40.
4 Jansen, U.: Aktionsplan Feinstaub des Bundes im Bereich Holzfeuerungen und verschärfte Emissionsgrenzwerte, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, 7–12.
5 Zürcher, F.: FairFeuern – Aktionsplan zur Verhinderung erhöhter Emissionen und illegaler Abfallverbrennung, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, 13–20.
6 Nussbaumer, T.: Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, Energy & Fuels, Vol. 17, No 6, 2003, 1510–1521 .
7 Rüegg, P.: Klein-Elektroabscheider für Holzfeuerungen: Stand der Entwicklung und Praxiserfahrungen, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, 79–94.
8 Berntsen, M: Small scale electrostatic precipitator for residential wood combustion, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, 95–104.
9 Nussbaumer, Th.: Potenzial und Wirtschaftlichkeit der Holzenergie für Wärme, Wärmekraftkopplung sowie Stromerzeugung, 9. Holzenergie-Symposium, 2006, 123–159.
10 Oser, M.; Nussbaumer, Th.: Low particle furnace for wood pellets based on advanced staged combustion, Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, Volume 1, CPL Press, Newbury Berks (UK), 2006, ISBN 1-872691-97-8, 215–227.
11 Nussbaumer, Th.: Feinstaubabscheider für automatische Holzfeuerungen, HK Gebäudetechnik, 9 (2006), 24–31.
12 Nussbaumer, Th.: Holzgas-Kombikraftwerk: Chance für die Schweiz, HK Gebäudetechnik, 8 (2006), 32–38.

4
Nächste Doppelseite:
Laubmischwald im Zürcher Weinland
(Bild: Christian Schwager)