Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 8

Artikel: Regenerative Stromerzeugung mit Holzfeuerung
Autor: Schemenau, Wolfgang
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76517

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: 16.07.2025

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

Regenerative Stromerzeugung mit Holzfeuerung

Von Wolfgang Schemenau, Mannheim

Holz lässt sich als regenerative Energiequelle für die Stromerzeugung verwenden. Um zerstörerisches Abholzen der natürlichen Waldbestände zu vermeiden, könnten besondere Plantagen Holz als Brennstoff liefern. Der Artikel informiert über ein Stromerzeugungssystem für 5 MW elektrische Leistung einschliesslich Holzfarm und Holzverarbeitung. Die Hauptmerkmale, besondere Anforderungen bei der Standortwahl und ungefähre Zahlen für die Investitions- sowie Stromgestehungskosten werden aufgezeigt.

Länder, die aus wirtschaftlichen Gründen dazu gezwungen sind, ihre Ausgaben in fremder Währung zu drosseln, müssen die Einfuhr konventioneller Brennstoffe einschränken und die Erschliessung nationaler Energiequellen fördern. Als Möglichkeit bietet sich die Nutzung alternativer Primärquellen an, besonders regenerativer, wie Biomassen im weitesten Sinne und wie in diesem Falle Holz.

Im Zusammenhang mit der Stromknappheit wird der Einsatz von Holz als Brennstoff diskutiert. Aus Gründen der Umweltpolitik empfiehlt sich besonders die Nutzung von Holz im Rahmen eines zyklischen Wiederaufforstprogramms, bekannt unter dem Begriff «Energiefarm».

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der Planung holzgefeuerter Kraftwerke ist, dass man das zur Feuerung vorgesehene Holz auf Plantagen anbauen und fällen kann, um so das zerstörerische Abholzen der natürlichen Wälder zu vermeiden. Die Förderung dieses Konzeptes trägt nicht nur zur Erreichung des Hauptziels, der Stromerzeugung, bei, sondern sie kann auch die soziale und wirtschaftliche Entwicklung abgelegener Gebiete unterstützen.

Das Holz der Energiefarmen wird in speziellen Kesseln zur Erzeugung von Hochdruckdampf verbrannt. Eine Turbine entspannt diesen Dampf und treibt einen elektrischen Generator an. Die in dieser Betrachtung gewählte Kraftwerkleistung von 5 MW ist ein oberer Grenzwert, um zu grosse Anbaugebiete zu vermeiden. Kleinere Leistungen mit entsprechend kleineren Anbaugebieten lassen sich ebenfalls ausführen.

Optimale Holzeigenschaften

Das zur Verbrennung geeignete Holz muss schnell und einheitlich wachsen, es muss auf einer verhältnismässig begrenzten Fläche (Plantage) anbaubar sein und einen regelmässigen Erntezyklus (5-7 Jahre) erlauben. Ausserdem sollte sein Heizwert innerhalb vernünftiger Grenzen liegen.

Verschiedene Baumarten erfüllen diese Bedingungen, z. B. Giant Leucaena (Ipil-Ipil), Eukalyptus und Gmelina.

Die Eignung der jeweiligen Holzart lässt sich nur direkt vor Ort bestimmen, da die Bodenzusammensetzung das Baumwachstum entscheidend beeinflusst.

Die Bodenfeuchtigkeit muss in regenarmen Zeiten sicher ausreichen; Trockenheit darf das gewünschte schnelle Wachstum nicht negativ beeinflussen. Nach dem Fällen der Bäume sollte das Blattwerk auf der Plantage bleiben, um ein Auslaugen des Bodens zu verhindern. Die Asche aus dem Kraftwerkprozess lässt sich ebenfalls als natürliches Düngemittel und als Schutz gegen das Auslaugen des Bodens verwenden.

Zurzeit liegen die erwarteten jährlichen Produktivitätsraten für Holzbiomasse bei 12 bis 30 Trockentonnen/ha, wobei ein 5-MW-Wärmekraftwerk ein rund 800 bis 2000 ha grosses Anbaugebiet erfordert (Tabelle 1).

Man geht davon aus, dass die gefällten Stämme einen Durchmesser von 10 bis 15 cm und eine Länge von 4 m haben. Für den Verbrennungsprozess bieten sich 2 Möglichkeiten an: direktes Verbrennen der Stämme in speziellen Kesseln oder vor der Beschickung aufbereiten zu Holzschnitzeln. Wir gehen davon aus, dass das Holz zu Hackschnitzeln verarbeitet wird. Das Verfahren ermöglicht höhere Dampfparameter am Kesselaustritt und eine einfachere Kesselausführung.

Diese Annahmen sind für jedes einzelne Produkt zu überprüfen. Viele Entwicklungsländer erfüllen diese Bedingungen. Die Planer müssen abweichende Projektparameter entsprechend berücksichtigen.

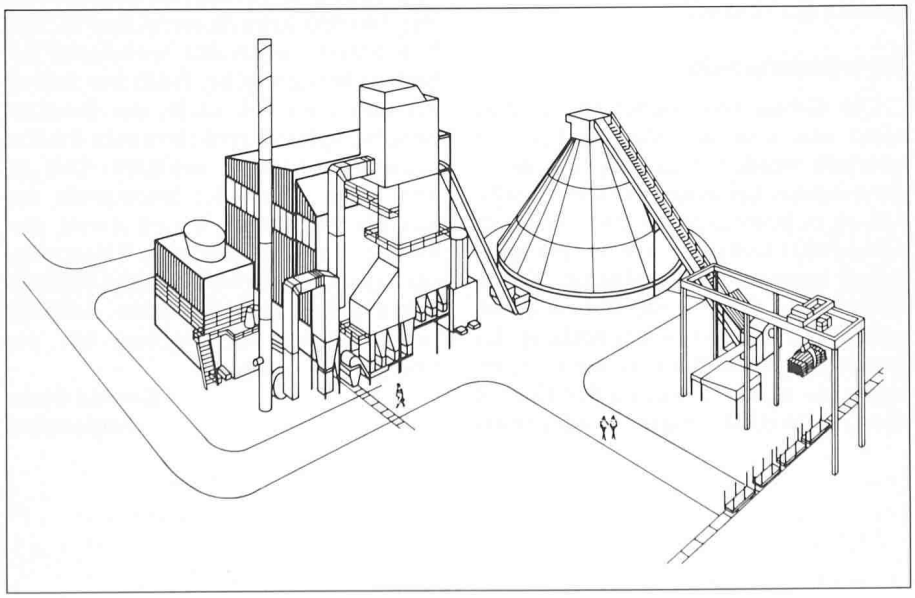
Energiefarm

Der Brennstoffbedarf des Dampferzeugers liegt bei rund 8,2 t/h bei einem unteren Heizwert des Holzes von 10 500 kJ/kg. Unter Berücksichtigung der möglichen Schwankungen des Heizwertes aufgrund unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalte wird der Holzbedarf mit 10 t/h angenommen.

Ausgehend von einem täglichen Brennstoffbedarf von 240 t mit 50% Feuchtigkeitsgehalt, entsprechend 120 t trockenem Holz, und von 5000 Stunden Betriebszeit pro Jahr, liegt der gesamte Trockenbrennholzbedarf des Kraftwerks bei 25 000 t pro Jahr.

Bei 15 t/ha jährlicher Ertragsfähigkeit wird die gesamte erforderliche Farmfläche etwa 1700 ha betragen. Dieses Gebiet kann in drei oder vier verschiedene Plantagen eingeteilt werden. Der Standort des Kraftwerks sollte möglichst gleiche Entfernung zu den einzelnen Plantagen haben, um die Holztransportkosten zu minimieren.

Bild 1. Entwurf eines holzgefeuerten Kraftwerkes für 5 MW



Die Farmen sollten mindestens 650 mm Regen pro Jahr erhalten und ein Gefälle von weniger als 30% (17°) haben. Das vorgesehene Plantagengebiet sollte sich nicht zur Nahrungsmittelerzeugung eignen.

Im Hinblick auf die kostengünstige Arbeitskraft und die hohe Arbeitslosigkeit in Entwicklungsländern ist ein geringer Mechanisierungsgrad sinnvoll. Fällen und Vorbereiten des Holzes für den Transport kann mit Äxten und Motorsägen erfolgen. Für den Ersttransport vom Fällort zum Sammelort eignen sich Pferde- oder Ochsengespanne.

Die Abholzzyklen müssen zwischen 5 und 7 Jahre betragen. 30 Jahre Produktionszeit pro Farm ist realistisch. Während der ersten 5 Jahre könnte die Brennholzproduktion auf Bäumen basieren, die aus dem Gebiet stammen, das für die Pflanzschule vorbereitet wird. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 50% müsste die Produktion etwa 100 t/ha betragen (Tabelle 2).

Während der ersten zwei Rotationszyklen (10 Jahre) ist es unnötig, mit neuen Sämlingen zu arbeiten. Nach dem Fällen der Stämme wachsen neue Sprosse aus den Baumstrünken.

Kraftwerk und Brennstoffversorgung

Bei der Brennstoffversorgung wird angenommen, dass das Kraftwerk in unmittelbarer Nähe der Energiefarm liegt. Die hier gewählte Anlagengrösse und die entsprechende Grösse der Plantage (etwa 3,5×5 km) führen jedoch zu grösseren Transportdistanzen. Um sie wirtschaftlich zu überwinden, muss die Farm an zahlreichen geeigneten Orten Lager erhalten, in denen die gefällten Stämme gelagert werden.

Bei dieser Lagerung trocknen die Stämme auf natürliche Weise, je nach Region. Eine leicht verlegbare Schmalspureisenbahn transportiert das Holz zum Kraftwerk. Unter den angenommenen Umständen eignen sich besonders Sammeltransporte zur Brennstoffversorgung. Der Transport mit Lastwagen würde bei den gegebenen Transportentfernungen beträchtliche Mengen an Kraftstoff erfordern.

Der gewählte Mechanisierungsgrad der Brennstoffversorgung lässt sich bei kleineren Anlagen mit niedrigerem Brennstoffbedarf, je nach Kundenwünschen, verringern; er ist jedoch für die hier gewählte Anlagenkapazität zu empfehlen. Die Auslegung der Komponenten der Brennstoffversorgung basiert darauf, dass 6 Tage in der Woche und 10 Stunden täglich abgeladen wird und dass das Kraftwerk durchgehend 24 Stunden täglich und während der ganzen Woche mit Vollast arbeitet. Die Kapazität des Holzlagerraums (für Schnitzel) beruht auf diesen Arbeitsdaten. Das Lager ist am Ende der 8stündigen Samstagsschicht aufgefüllt und ein Vorrat für 20 Stunden ist nach dem Wochenendbetrieb noch verfügbar.

Die täglich erforderlichen 280 t Festholz werden an den Lagerplätzen der Energiefarm von Traktoren mit Ladevorrichtungen in offene Waggons der Schmalspurbahn (jeder hat ein Fassungsvermögen von 20 m³) geladen. Der das Kraftwerk versorgende Zug hat rund 30 Waggons.

Am Kraftwerk entlädt ein Brückenkran (Hebeleistung 5 t) die Waggons und versorgt direkt ein Schnitzelwerk. Ein Trogkettenförderer befördert die Holzschnitzel in einen Silo mit 2500 m³ Speicherkapazität. In diesem Fall hat die Schnitzeleinrichtung eine Leistung von etwa 35 t pro Stunde (Festholz), was einer Menge von 140 m³ Holzschnitzeln entspricht. Diese Leistung reicht aus, um den Kessel bei Dauerbetrieb zu versorgen und um den Schnitzelsilo hin und wieder während der Woche aufzufüllen. Eine Abzugsschnecke entnimmt die Schnitzel aus dem Silo, und ein Trogkettenförderer speist sie in den Kessel ein.

Falls die Abzugsschnecke ausfallen sollte, lässt sich der Trogkettenförderer mit einem Schaufellader beladen. Der Silo ist entsprechend ausgelegt. Aufgrund der grossen zur Erzeugung von 5 MW benötigten Holzmenge kann auf Hebezeuge nicht verzichtet werden.

Wesentlich niedrigere Kraftwerkleistungen erfordern entsprechend kleinere Energiefarmen. In einem solchen Fall sollten alternative Transport- und Versorgungssysteme in Erwägung gezogen werden. Das Holzkraftwerk ist als Kondensationsanlage mit den für die einfache Anordnung und den leichten sowie zuverlässigen Betrieb unbedingt nötigen Einrichtungen ausgelegt. Um die Investitionskosten niedrig zu halten, wurde auf einen höheren Wirkungsgrad verzichtet. Die Hauptkomponenten der Kraftwerksanlage sind:

- Kessel
- Turbine
- Generator
- mechanische Ausrüstung (Pumpen, Ventile, Rohrleitungen)
- Kondensations- und Vorwärmeranlage
- Kühlturm
- Holzhandhabungsgeräte

schnell wachsende Baumarten	
Erntezyklus:	5–7 Jahre
jährliche Produktivität:	12–30 t/ha Trockenholz
unterer Heizwert:	
trocken	19 800 kJ/kg
30% Feuchte	13 800 kJ/kg
50% Feuchte	10 500 kJ/kg

Tabelle 1. Bedingungen und Eigenschaften von Holz für Kraftwerke zur regenerativen Stromerzeugung

Tabelle 2. Wichtige Merkmale einer Holzfarm zur regenerativen Stromerzeugung

erforderliche Gesamtfläche	800–2000 ha
Mindestniederschlag	650 mm/a
Gefälle	unter 30%
ungeeignet für Nahrungsmittelproduktion	
Holzproduktion der Farm:	

Jahr	Fläche	Holzproduktion 50% Feuchte		
		Geländevorbereitung	Abschlag	Gesamt
	ha	t	t	t
1	340	34 000		34 000
2	340	34 000		34 000
3	340	34 000		34 000
4	340	34 000		34 000
5	340	34 000		34 000
6 bis 30	340	–	50 000	50 000

Wirtschaftliche Aspekte

Die Energiefarmkosten hängen stark von den Standortbedingungen ab. Unsere Schätzung beruht zum Teil auf Daten von bestimmten Standorten (Tabelle 3).

Die Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Kraftwerkkosten. Die Investitionskosten für Kraftwerk und Brennstoffversorgung wurden entsprechend der vorgelegten Auslegung bei normalen Standortbedingungen in Entwicklungsländern geschätzt.

Die Stromerzeugungskosten ergeben sich aus dem Gesamtbetrag der jährlichen Brennstoffkosten und der Kraftwerkkosten geteilt durch die Nettostromerzeugung der Anlage.

$$\frac{\text{Energiefarmkosten + Kraftwerkkosten}}{\text{elektrische Leistung}} =$$

$$\frac{740\,000 \text{ US-\$/a} + 1\,030\,000 \text{ US-\$/a}}{25 \times 10^6 \text{ kWh/a}} =$$

$$= 0{,}07 \text{ US-\$/kWh}$$

Die erwarteten Stromerzeugungskosten sind durchaus für Anlagen dieser Grösse üblich, selbst wenn sie mit fossilen Brennstoffen arbeiten.

Gesamtinvestition	1 200 000 US$
Annuitätsfaktor (30 Jahre, 9%)	9734%/a
Kapitalkosten (1 200 000 × 0,09734)	117 000 US$/a
Landpacht (1700 ha à 60 US$/ha)	102 000 US$/a
Düngemittel und Herbizide	150 000 US$/a
Wartung, Reparaturen und Kraftstoff:	240 000 US$/a
Personal	131 000 US$/a
Energiefarm-Gesamtkosten pro Jahr	740 000 US$/a
Holzproduktion (bei 50% Holzfeuchte)	50 000 t/a
Holzkosten $\left(\frac{740\,000\ \text{US\$/a}}{50\,000\ \text{t/a}}\right)$	14,8 US$/t Holz

Tabelle 3. Zusammenstellung der Energiefarmkosten

Tabelle 4. Zusammenstellung der Kraftwerkkosten

Gesamtinvestition (einschliesslich Holzverarbeitung)	7 000 000 US$
Annuitätsfaktor (25 a/9%)	10,18%/a
Kapitalkosten (7 000 000 × 0,1018)	712 600 US$/a
Personalkosten	107 400 US$/a
Verschleiss	210 000 US$/a
Gesamtkraftwerkkosten	1 030 000 US$/a
Vollast-Betriebsstunden	5000 h/a
Jahresleistung (5000 h × 5000 kW)	25×10^6 kWh/a

Erforderliche Arbeitskräfte

Zum Betreiben der Energiefarm braucht es 34 Personen, für das Kraftwerk 30 Personen (5 Schichten).

Zusammenfassung

Bei Stromerzeugungsanlagen mit direkter Holzverbrennung können spezielle Farmen das benötigte Brennholz produzieren. Es wurden die Möglichkeiten der Stromerzeugung mit Holzfeuerung erläutert, ohne dabei der vorgestellten Lösung den Realisierungsvorzug zu geben. Diese Frage lässt sich nur nach Untersuchung der jeweiligen örtlichen Bedingungen beantworten.

Wir nehmen an, dass sich die Stromerzeugung mit Hilfe einer Energiefarm für Gebiete eignet, in denen folgende Bedingungen zutreffen:

- schon vorhandene Stromversorgung bei zu hohen Stromkosten
- hohe Öl- und Kohlepreise aufgrund der Abgelegenheit des Gebietes oder Einschränkung der Stromerzeugung durch schlechte Zugänglichkeit
- Fehlen von Flüssen, die sich für die Errichtung von Wasserkraftwerken eignen
- grosse verfügbare Landflächen, die sich zwar für eine Bewaldung, jedoch nicht ausgesprochen für den Nahrungsanbau oder die Viehzucht eignen
- Arbeitslosigkeit in einem Gebiet und Bedarf an Projekten, die eine grosse Anzahl von Arbeitskräften erfordern.

Der beschriebene Kraftwerktyp ist besonders interessant für Länder mit grossen Waldgebieten und einem niedrigen Stromversorgungsniveau. Unser Anliegen ist, regenerative Energiequellen, wie z. B. Holz, als Alternativenergie zur wirtschaftlichen Stromerzeugung nutzbar zu machen. In diesem Zusammenhang werden wir die für die Stromversorgung verantwortlichen Behörden, insbesondere in den Entwicklungsländern, in ihren Bemühungen unterstützen, die Stromversorgungsprogramme voranzutreiben.

Adresse des Autors: Dipl.-Ing. *W. Schemenau*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Mannheim BRD.

Erschütterungen infolge Bau, Industrie und Verkehr

Von Jost A. Studer, Zürich, und A. Süsstrunk, Baden

Anhand von Beispielen wird ein Überblick über die Eigenschaften technischer Schwingungen unter dem Gesichtspunkt des Erschütterungsschutzes vermittelt. Dabei geht es um diejenigen Erschütterungen, wie sie z.B. am Maschinenfundament selbst oder in einiger Entfernung davon auftreten und nicht um die Schwingungen einzelner Maschinenteile wie Wellen, Schaufeln usw. Es werden die interessierenden Amplituden- und Frequenzbereiche diskutiert. Es wird festgestellt, dass die Eigenschaften der Erschütterungen an einem Empfänger nicht allein aufgrund der Charakteristiken der Erschütterungsquelle vorausgesagt werden können. Die Erschütterung beim Empfänger hängt in den meisten Fällen auch vom Übertragungsmedium und den Schwingungseigenschaften des Empfängers selbst ab. Die Einflüsse von Baukonstruktion und Baugrund lassen sich in der Regel ohne eingehende Untersuchung nicht erfassen.

Einleitung

Erschütterungen gehören leider zum Alltagsbild einer städtischen Umgebung. Mit der zunehmenden Überbauung in städtischen Agglomerationen der Industriestaaten gewinnen deshalb Probleme des Immissionsschutzes immer grössere Bedeutung. Die *Vorhersage* von Erschütterungsintensitäten infolge Bautätigkeit, Industrieproduktion oder Verkehr, die *Beurteilung der Auswirkungen* der Erschütterungen und die Ausarbeitung allfälliger *Gegenmassnahmen* sind heute bei vielen Bauprojekten Bestandteil der Aufgabenstellung.

Erschütterungen breiten sich im Boden in Form von Wellen aus. Diese werden an geologischen Schichtgrenzen, am Grundwasserspiegel reflektiert und refraktiert. Die genaue Voraussage einer Erschütterungsausbreitung ist deshalb sehr komplex, und es ist dazu die Ermittlung einer Vielzahl geometrischer Bedingungen und Materialkennziffern notwendig. Zur Beurteilung oder zur Erfassung von Erschütterungsproblemen hat sich die folgende grundsätzliche phänomenologische Modellvorstellung bewährt (Bild 1).

Erschütterungen können Bewohner belästigen, Geräte am einwandfreien Funktionieren hindern oder Bauwerke