

8. Heizkraft- und Kraftwerke

1986 wurde von der dänischen Regierung eine energiepolitische Vereinbarung getroffen, die u.a. vorsah, bis 1995 dezentrale Heizkraftwerke mit einer gesamten elektrischen Leistung von 450 MW zu bauen. Die Werke sollten mit heimischen Brennstoffen befeuert werden: Stroh, Holz, Abfall, Biogas und Erdgas. 1990 wurde eine weitere Vereinbarung über eine stärkere Nutzung von Erdgas und Biobrennstoffen getroffen, in erster Linie durch den Bau neuer Heizkraftanlagen und die Umstellung existierender kohle- und ölbefuehrter Fernwärmanlagen auf erdgas- und biomassebasierte Kraft-Wärme-Kopplung.

Das Prinzip eines Heizkraftwerks

In einem herkömmlichen kohlebefeierten Kraftwerk (kondensierend) werden ca. 40-45% der Brennstoffenergie in Elektrizität umgewandelt. Die restliche Energie bleibt ungenutzt und verschwindet mit dem warmen Rauchgas aus dem Schornstein in die Atmosphäre oder mit dem Kühlwasser ins Meer (vgl. Schaubild 20).

In einem Heizkraftwerk erfolgt die Stromerzeugung genau wie in einem Kraftwerk, allerdings wird die Kondensationswärme des Dampfes nicht mit dem Kühlwasser ins Meer abgeleitet, sondern mit dem kalten Rücklaufwasser aus einem Fernwärmeleitungsnetz gekühlt, das dabei gleichzeitig wieder erhitzt wird. Gegenüber einem Kraftwerk bietet ein Heizkraftwerk mehrere Vorteile, u.a. wird zur Kühlung kein Meerwasser benötigt, das Werk kann daher in der Nähe größerer Städte platziert werden (dezentral), wo der Fernwärmebedarf groß genug und ein Leitungsnetz vorhanden ist. Des Weiteren können bis zu 85-90% der Brennstoffenergie genutzt werden.

Dagegen können in einem Heizkraftwerk nicht die gleichen hohen



foto: burmeister & wain energi

Das Heizkraftwerk Masnedø wurde 1996 in Betrieb genommen und verbraucht jährlich ca. 40.000 Tonnen Stroh und ca. 8.000 Tonnen Holzhackschnitzel.

Stromwirkungsgrade (Verhältnis zwischen erzeugter Elektrizität und Brennstoffenergie) erzielt werden wie in einem Kraftwerk. Der Stromwirkungsgrad von Strohverbrennungsanlagen liegt bei 20-30%.

Beim Betrieb eines Heizkraftwerkes drückt der Jahres-Stromwirkungsgrad (Jahresdurchschnitt) nicht notwendigerweise aus, was technisch möglich ist. Die Forderung nach Lieferung von Prozessdampf, die Gewichtung der Fernwärmeversorgung und die Stromerzeugung nach bestimmten Abrechnungstarifen resultieren in einem niedrigeren Stromwirkungsgrad als bei Vollast. Vgl. Tabelle 6.

In einem Heizkraftwerk kann die Turbine innerhalb gewisser Grenzen reguliert werden, so daß sich das Verhältnis von Strom- und Wärmeerzeugung ändert. Grundsätzlich gilt: Je größer der Wärmebedarf, desto mehr Dampf kann

durch das Fernwärmewasser gekühlt werden und desto mehr Dampf kann der Kessel erzeugen. Je mehr Dampf erzeugt werden kann, desto größer ist die Stromerzeugung. In einem Kraftwerk besteht diese Abhängigkeit nicht, da hier durch das Meerwasser stets ausreichend Kühlkapazität vorhanden ist. Um die Stromerzeugung in einem Heizkraftwerk unabhängiger vom Fernwärmebedarf zu machen, sind alle Anlagen mit einem Speicher ausgerüstet, in dem die Kondensationswärme gespeichert werden kann, wenn der Fernwärmebedarf gering ist.

In Dänemark hat Kraft-Wärme-Kopplung hohen Stellenwert, auch wenn es um Kraftwerke in der Nähe großer Städte wie Kopenhagen, Århus, Aalborg, Odense u.a. geht. In diesen Kraftwerken wird ein Teil der Verluste von ca. 60%

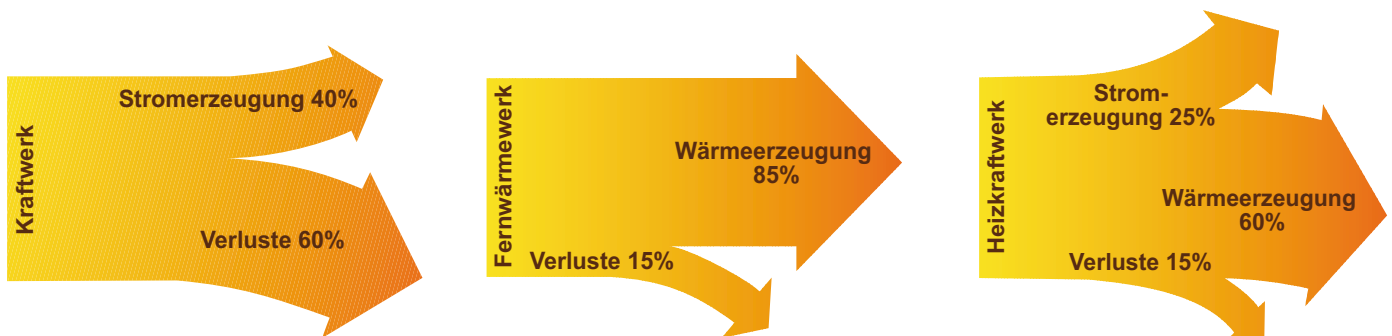


Schaubild 20: Bei der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung in einem Kraftwerk und einem Fernwärmewerk sind die Verluste (inkl. eigenverbrauch des Werkes) erheblich größer als bei der kombinierten Erzeugung in einem Heizkraftwerk.

	Rudkøbing	Haslev	Slagelse	Masnedø	Grenå	Måbjerg	Maribo/ Sakskøbing
Stromleistung (netto)	2,3 MW	5,0 MW	11,7 MW	8,3 MW	18,6 MW	28 MW	9,3 MW
Wärmeleistung	7,0 MJ/s	13,0 MJ/s	28,0 MJ/s	20,8 MJ/s	60,0 MJ/s	67 MJ/s	20,3 MJ/s
Vollast Stromwirkungsgrad (netto)	21%	23%	27%	26%	18%	27%	29%
Jahres-Stromwirkungsgrad	17%	17%	22%	23%	14%	20%	26%

Tabelle 6: Stromleistung, Wärmeleistung und Wirkungsgrad für die sieben dezentralen Heizkraftwerke. Wie im Text erläutert, ist der Jahreswirkungsgrad niedriger als der Wirkungsgrad bei Vollast. Der Jahres-Stromwirkungsgrad wurde nach den Produktionszahlen für 1997 berechnet (der Wert für Maribo/Sakskøbing ist ein geschätzter Wert). Der Grund für die hohen Werte für Slagelse ist, daß der Dampf von der Müllanlage ohne Kesselverluste berechnet wird. Die niedrigen Werte für das Heizkraftwerk Grenå sind auf die Lieferung von Prozeßdampf für Industriezwecke zurückzuführen. Alle Werte sind Nettowerte, d.h. der Eigenverbrauch des Werkes an Strom und Wärme ist abgezogen. Vgl. auch Tabelle 7.

(vgl. Schaubild 20) für die Fernwärmeerzeugung genutzt.

Die sechs strohbefeuerten dezentralen Heizkraftwerke, die bereits in Betrieb sind, sowie das kommende Werk in Maribo/Sakskøbing basieren auf dem beschriebenen Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. Da die Werke aber zum Teil als Demonstrationswerke errichtet wurden, bestehen recht große Unterschiede im Aufbau der Anlagen.

Vergleichende Daten für die sieben Werke: siehe Tabellen 6, 7, 8 und 9.

Rudkøbing, Haslev, Slagelse, Masnedø und Maribo/Sakskøbing

Die Heizkraftwerke in Haslev und Rudkøbing wurden 1989 und 1990 in Betrieb

genommen und sind die ersten stromerzeugenden Anlagen in Dänemark - und soweit bekannt auch weltweit - die ausschließlich mit Stroh befeuert werden. Das Werk auf Masnedø bei Vordingborg, das 1996 in Betrieb genommen wurde, ist ebenfalls ausschließlich strohbefeuert, kann aber auch mit Holzhackschnitzel bis zu 20% der gesamten Brennleistung befeuert werden. Das Werk bei Maribo/Sakskøbing wird Anfang 2000 in Betrieb genommen und ist ausschließlich strohbefeuert.

Eigentümer und Betreiber der Werke sind die Energieversorgungsunternehmen i/s Sjællandske Kraftværker, SK Energi und i/s Fynsværket. Der erzeugte Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist, die Wärme wird an die Fernwärmesysteme der Städte geliefert.

Anlagengröße

Die Stromleistung der Werke in Rudkøbing, Haslev und Masnedø beträgt 2,3 und 5 und 8,3 MW_{el} (MW elektrisch). Mit einer Wärmeleistung von 7,0 und 13 und 20,8 MJ/s liegt der jährliche Strohverbrauch bei 12.500, 25.000 und 40.000 Tonnen. Strom- und Wärmeleistung sind Nettowerte, d.h. der Eigenverbrauch der Werke an Strom und Wärme ist abgezogen.

Da die Anlage in Slagelse einen müllbefeuerten und einen strohbefeuerten Kessel hat, die Dampf für die gleiche Turbine erzeugen, gelten die Daten in Tabelle 6 und 7 - 11,7 MW_{el}, bzw. 28 MJ/s Wärme - für die gesamte Anlage. 65-70% der Produktion basieren auf Stroh, das entspricht einem Strohverbrauch von ca. 25.000 Tonnen pro Jahr.

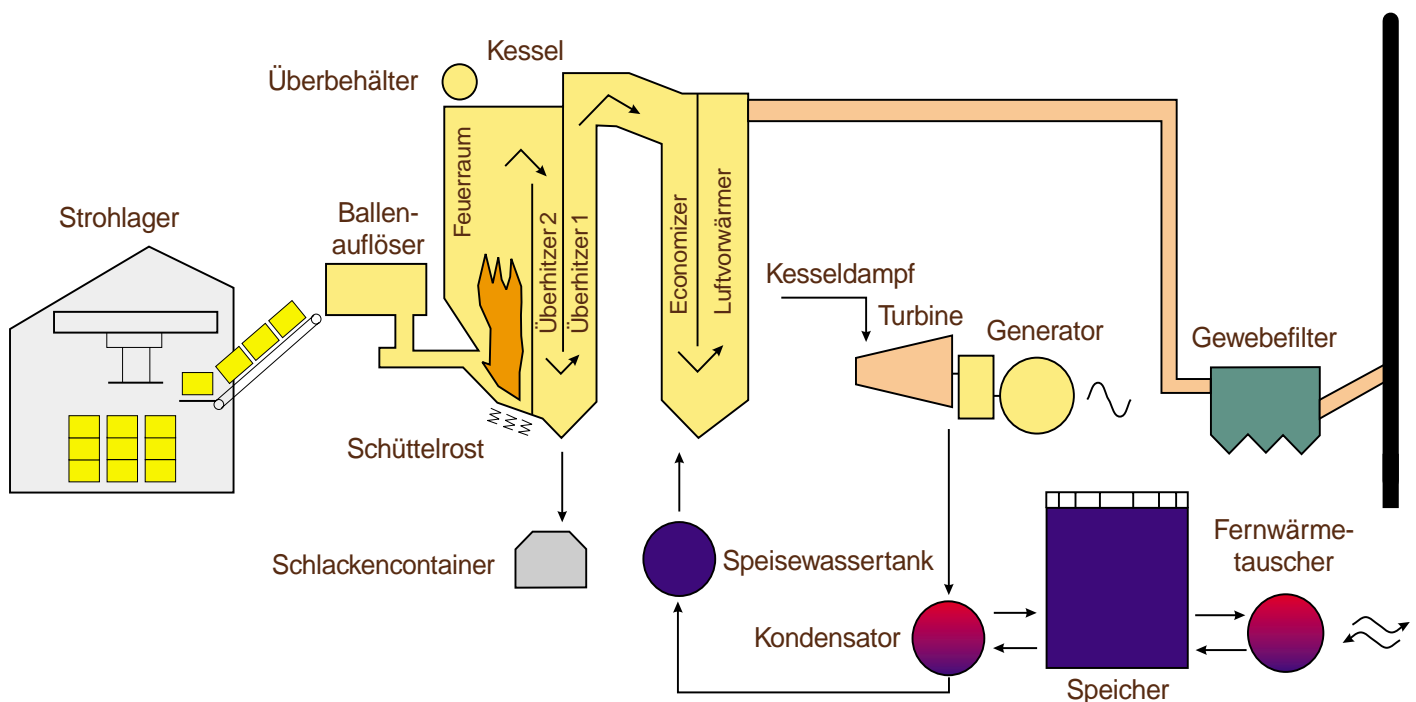


Schaubild 21: Prinzipdiagramm für das Heizkraftwerk Rudkøbing. Die Rauchgase werden durch den Feuerraum zur Überhitzersektion und von dort weiter durch einen Economizer und einen Luftvorwärmer geleitet. Bevor sie den Schornstein mit ca. 110°C verlassen, werden sie in einem Gewebefilter gereinigt.

Das Werk bei Maribo/Sakskøbing wird eine Stromleistung von 9,3 MW und eine Wärmeleistung von 20,3 MJ/s haben. Der Strohverbrauch liegt bei ca. 40.000 Tonnen pro Jahr.

Befeuerungs- und Verbrennungssystem

In Slagelse transportieren zwei automatische Krane die Großballen von den Reihen im Lager zu drei parallel angeordneten Beschickungssystemen. Die Ballen werden über ein geschlossenes Brand-schleusensystem (das verhindert, daß sich bei Rückbrand das Feuer bis ins Lager ausbreitet) zu einem Ballenauflöser des gleichen Typs wie im Heizkraftwerk Grenå geführt. Die Bänder, die den Ballen zusammenhalten, werden automatisch zerschnitten und entfernt.

Der Ballenauflöser besteht aus drei übereinander angeordneten rotierenden

Zylindern mit einer Art tellerförmigem Zerreißer. Das lose Stroh fällt vom Auflöser in eine Zellenschleuse und von dort auf die Stokerschnecken (drei Schnecken für jedes Beschickungssystem). Die Stokerschnecken pressen das Stroh durch den Beschickungstrichter auf den Rost, der aus einem schrägen, beweglichen Vorschubrost und einem kurzen waagerechten Vorschubrost besteht. Nach dem Ausbrennen auf dem Rost fällt die Asche/Schlacke durch einen Schlackenschacht in ein wassergefülltes Schlackebad, eine Förderanlage transportiert die nasse Asche/Schlacke zu Containern.

Im Heizkraftwerk Rudkøbing mit einer Brennstoffleistung von 10,7 MW ist nur ein Befeuerungssystem erforderlich. Nach dem Auflösen fällt das Stroh in das Stokersystem, das aus einem rechteck-

kigen Kolben besteht, der sich vor- und zurückbewegt und das Stroh durch einen wassergekühlten Kanal auf den Rost schiebt. Durch die Bewegung des Kolbens wird das Stroh im Beschickungskanal zu einem gasdichten Pfropfen zusammengepreßt, der ein Rückbrennen verhindert. Das Stroh brennt auf einem Schüttelrost aus, und die Asche/Schlacke fällt in ein wassergekühltes Schlackebad und wird von da aus in einen Container befördert.

Im Heizkraftwerk Haslev werden die Großballen in vier parallelen Zigarrenbrennersystemen ohne Auflösen verfeuert. Der Zigarrenbrenner ist in Kapitel 7: Fernwärmewerke näher beschrieben.

Im Heizkraftwerk Masnedø erfolgen die Lagerung und die Hantierung des Strohs bis zum Befeuerungssystem mit

Daten	Einheit	Rudkøbing	Haslev	Slagelse ³⁾	Masnedø	Grenå	Måbjerg ¹⁾	Maribo/Sakskøbing
Stromerzeug. (netto)	MW	2,3	5,0	11,7 ⁴⁾	8,3	18,6	28 ²⁾	9,3
Wärmeerzeugung	MJ/s	7,0	13	28 ⁴⁾	20,8	60,0 ⁵⁾	67 ²⁾	20,3
Dampfdruck	bar	60	67	67	92	92	67	93
Dampftemperatur	°C	450	450	450	522	505	410/520	542
Dampfflow max.	Tonnen/Std.	13,9	26	40,5	43,2	104	125	43,2
Speicher	m ³	2.500	3.200	3.500	5.000	4.000	5.000	5.600
Rauchgasflow, max.	kg/s	6,8	9,9	13,4	14	39	71	14
Rauchgastemperatur	°C	110	120	120	120	135	110	110
Strohlager	Tonnen	350	350	550	1.000	1.100	432	1.000
Strohverbrauch	Tonnen/Jahr	12.500	25.000	25.000	40.000	55.000	35.000	40.000
Feuchtegehalt, Stroh	%	10-25	10-25	10-25	max. 25	10-23	10-25	max. 25
Filtertyp		Gewebe.	Gewebe.	Elektro.	Elektro.	Elektro.	Gewebe.	Gewebe.
Feuerungssystem		aufgelöst/Stoker	Zigarrenbrenner	aufgelöst/Stoker	aufgelöst/Stoker	aufgelöst/pneumat.	Zigarrenbrenner	aufgelöst/Stoker
Kosten der Anlage	DKK	64 Mill.	100 Mill.	140 Mill. ⁶⁾	240 Mill.	365 Mill.	600 Mill.	240 Mill.
Inbetriebnahme	Jahr	1990	1989	1990	1996	1992	1993	2000
Spezif. 1995 ⁷⁾ -preis	DKK/MW _{el}	30 Mill.	23 Mill.	21 Mill.	28 Mill.	21 Mill.	22 Mill.	23 Mill.

- 1) Das Werk besteht aus zwei haumüllbefeueren und einem stroh-/hackschnitzelbefeueren Kessel.
- 2) Bei den angegebenen Daten handelt es sich um die gesamte Strom- und Wärmeerzeugung von Stroh-/Hackschnitzelkessel und Hausmüllkesseln, hiervon erzeugt der Stroh-/Hackschnitzelkessel ca. 27%.
- 3) Das Werk besteht aus einem haumüllbefeueren und einem stroh-/hackschnitzelbefeueren Kessel.
- 4) Bei den angegebenen Daten handelt es sich um die gesamte Strom- und Wärmeerzeugung von Strohkessel und Hausmüllkessel, hiervon erzeugt der Strohkessel ca. 66%.
- 5) Verteilt auf Fernwärme (max. 32 MJ/s) und Prozeßdampf (max. 53 MJ/s).
- 6) Anlagenpreis nur für den Strohkessel
- 7) Der spezifische Preis ist nur richtungweisend, da unterschiedlich ist, was die Baukosten umfassen. Bei Vergleichen mit anderen Heizkraftwerktypen sollte angegeben werden, daß für die Berechnung des spezifischen Preises die Netto- und nicht die Brutto-Stromleistung (umfaßt den Eigenverbrauch des Werkes) verwendet wurde.

Tabelle 7: Daten für die sieben strohbefeueren dezentralen Heizkraftwerke.

Kran und Beschickungstisch. Für das Verfeuern des Stroh wurde ein ganz neues System entwickelt, bei dem der Strohballen gegen zwei senkrechte Schnecken gepreßt wird, die das Stroh durch ihre Rotation auflösen und das lose Stroh zu einem Satz waagerechter Schnecken befördern, die entgegengesetzt rotieren und das Stroh als einen gasdichten Pfropfen durch eine fast quadratische Feuerungstür auf den Rost pressen. Mit zwei dieser Befuerungssysteme kann die Anlage bei Vollast 19 Großballen verfeuern, d.h. 10 Tonnen Stroh pro Stunde. Jedes der beiden Befuerungssysteme kann gleichzeitig mit Stroh auch Holzhackschnitzel verbrennen. Vorläufige Versuche haben ergeben, daß Hackschnitzel bis zu 40% der gesamten Brennstoffenergie ausmachen kann. Die Anlage ist für 20% Hackschnitzel ausgelegt.

Asche- und Schlackehantierung

In allen Werken werden Schlacke und Asche vom Kesselboden und die Flugasche vom Filter getrennt gehalten. Schlacke und Bodenrasche werden als Düngierzusatz an den Landwirt zurückgeliefert, die Flugasche muß wegen eines zu hohen Schwermetallgehaltes entweder auf einer überwachten Deponie entsorgt oder mit Kunstdünger gemischt werden. Näheres dazu in Kapitel 11 "Restprodukte".

Kesselleistung, Dampfdaten und Wärmespeicherung

Bei den Kesseln handelt es sich um Wasserrohrkessel mit Überbehälter und natürlicher Zirkulation im Verdampfersystem. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen ist eine hohe Stromerzeugung wünschenswert. Dies setzt hohen Dampfdruck und hohe Dampftemperatur voraus. Damit der Kessel den hohen Drücken standhalten kann, wird das Kesselwasser durch Wasser/Dampfrohre geleitet, die die Seiten (sowie Decke und Boden) des Kessels bilden. Vom Überbehälter, wo Wasser und Dampf getrennt werden, wird der Dampf zu den Überhitzern geleitet, die z.B. wie Girlanden senkrecht von der Decke hängen können oder in waagerechten Rohrbündeln in selbständigen Überhitzerzügen nach dem Feuerraum liegen. Nach dem Überhitzerzug folgt ein Zug mit Economizer und Luftvorwärmer, wo das Speisewasser und die Verbrennungsluft erhitzt werden. Wegen des relativ hohen Gehalts der Strohasche an Alkalimetallen (Kalium und Natrium) und Chlor sind die Rauchgase besonders bei hohen Temperaturen (über 450 °C) korrosiv, und die Aschepartikel können wegen der niedrigen Ascheschmelztemperaturen zu Schlackenproblemen im Kessel führen.



foto: weiss a/s

Schweißarbeiten an einem Wasserrohrkessel für ein Heizkraftwerk. Die Rohre haben kleine Flossen, so daß sie zu einer gasdichten Wand verschweißt werden können, die die Seite, die Decke und den Boden des Kessels bildet.

Wenn die Schlacke fest und klebrig wird, läßt sie sich während des Betriebes nur schwer entfernen und hemmt die Wärmeübertragung von den Rauchgasen auf den Dampf in den Rohren. In gravierenden Fällen kann die freie Rauchgasströmung so stark behindert werden, daß der Unterdruck und damit die Kessellast nicht aufrechterhalten werden kann. In den Werken in Haslev, Slagelse und Rudkøbing wurde versucht, diese Probleme durch eine Begrenzung der Überhitzerteremperatur auf max. 450 °C zu vermeiden. In Haslev und Slagelse wurden die Überhitzersektionen dazu so weit in das Kesselsystem zurückgezogen, daß die Rauchgase bereits auf 650-700 °C abgekühlt sind, bevor sie mit der ersten Überhitzersektion in Berührung kommen.

Im Heizkraftwerk Masnedø wurde die Dampftemperatur versuchsweise auf 522 °C erhöht. Durch die höhere Temperatur steigen wie bereits erwähnt auch das Korrosionsrisiko und das Risiko von

Schlackeproblemen. Der Überhitzer und die Decke des Kessels sind daher so konstruiert, daß korrodierte Überhitzerrohre problemlos ausgewechselt werden können.

Das künftige Heizkraftwerk Maribo/Sakskøbing, dessen Inbetriebnahme für Anfang 2000 geplant ist, soll mit einer Dampftemperatur von 542 °C arbeiten. Eine Reihe von Versuchen soll zeigen, wie gravierend die Korrosionsprobleme sind.

Die Möglichkeiten der dänischen Industrie, mit strohbefeuerten Heizkraftwerken auf den Exportmärkten Fuß zu fassen, hängen von hohen Stromwirkungsgraden und damit hohen Dampfdrücken ab (bis 580 °C) wie in den neuesten kohlenstaubbefeuerten Kraftwerken. Bei so hohen Temperaturen ist es abgesehen von den Problemen mit Korrosion und Schlackebelägen - erforderlich, die Anlage mit Turbinen einer anderen und teureren Qualität auszurüsten als die bisher in den beschriebenen Heizkraftwerken benutzte.

Andere Brennstoffe	Einheit	Masnedø	Grenå	Måbjerg	Slagelse
Hausmüll	Tonnen/Jahr	-	-	150.000	20.000
Kohle	Tonnen/Jahr	-	40.000	-	-
Gas	Nm ³ /Jahr	-	-	4 Mill.	-
Holzhacks.	Tonnen/Jahr	8.000	-	25.000	-

Tabelle 8: Vier Werke sind für die Kombinationsbefuerung mit anderen Brennstoffen eingerichtet.

Grenå und Måbjerg

Eigentümer und Betreiber der Heizkraftwerke in Grenå und Måbjerg bei Holstebro sind die Stromversorgungsunternehmen i/s Midtkraft und i/s Vestkraft.

Das Grenå-Werk wurde 1992 in Betrieb genommen, die Anlage in Måbjerg 1993. Beide Werke sind für die Kombinationsbefeuerung mit Stroh und anderen Brennstoffen ausgelegt.

Das Heizkraftwerk in Grenå

Das Heizkraftwerk in Grenå wird mit Kohle und Stroh befeuert und soll nicht nur Strom erzeugen, sondern auch zusammen mit einer kommunalen Müllverbrennungsanlage und Abwärme aus nahegelegenen Industriebetrieben 90% des Fernwärmeverbrauchs in Grenå sowie 90% des Prozeßdampfverbrauchs des Unternehmens Danisco Paper decken. Seit 1997 deckt das Industriedampfsystem auch den Prozeßdampfverbrauch von Danisco Distillers. Grenå ist vorläufig die einzige kraftwärmerezeugende Anlage in Dänemark, die mit einem Kessel mit zirkulierender Wirbelschicht arbeitet.

Wirbelschichtverfahren

Ein Wirbelschichtkessel besteht aus einer zylindrischen, senkrechten Brennkammer,

in der die festen Partikel, bestehend aus Brennstoff und einem Fluidisierungsmedium, z.B. Sand, von Luft durchströmt und verwirbelt werden. Die Mischung wird dadurch fluidisiert, d.h. sie bekommt flüssigkeitsähnliche Eigenschaften.

Vorteilhaft an einem Wirbelschichtkessel ist, daß er gut für die Befeuerung mit Brennstoffmischungen geeignet ist.

Das Wirbelschicht-Prinzip gibt es in vielen Varianten, im wesentlichen lassen sich jedoch zwei Haupttypen unterscheiden:

- Stationäre Wirbelschicht (SWS)
- Zirkulierende Wirbelschicht (ZWS)

Das Werk in Grenå arbeitet mit einem Kessel mit zirkulierender Wirbelschicht. Von der Wirbelschichtsektion zirkuliert das warme Rauchgas mit den festen Partikeln in einen Zyklon, wo die Feststoffpartikel abgeschieden und zur Wirbelschicht rezirkuliert werden. Das Rauchgas wird vom Zyklon in einen Rohrzug mit Economizer und Luftvorwärmer geleitet. Zwischen Zyklonauslaß und Economizersektion durchzieht das Rauchgas zwei Rohrzugsektionen, die zusammen mit einem Rohrbündel im Wirbelbett selbst den Überhitzer bilden. Der Überhitzer wurde 1996 um eine Sektion im Ascherezirkulationssystem erweitert.

Strohbehandlungs- und Feuerungssystem

Im Heizkraftwerk Grenå wird das Stroh wie in den anderen Werken auch in Form von Großballen angeliefert. Bei einer jährlichen Liefermenge von ca. 55.000 Tonnen erschien es notwendig, das Wiegen und die Bestimmung des Feuchtegehaltes bei Anlieferung im Werk zu automatisieren. Ein automatischer Kran mit Greifern lädt jeweils 12 Ballen auf einmal ab. Mit Mikrowellen, die von einer Greiferklaue zur anderen durch den Ballen geschickt werden, sowie einer Wiegezelle zwischen Greifer und Kran werden der durchschnittliche Feuchtegehalt und das Gewicht gemessen und in einem Computer registriert.

Ein Kran bringt die Ballen vom Lager zu den 4 Strohaflöserlinien. Die Strohaflöser arbeiten mit einem relativ geringen Energieverbrauch (1,8 kWh pro GJ Brennstoffenergie). Das aufgelöste Stroh wird von den vier Auflöserlinien über Zellenschleusen zu 2 Feuerungslinien befördert. Über die Feuerungslinien wird das Stroh zum Ascherezirkulationssystem geblasen und von hier aus in die Wirbelschicht geführt. Die stückige Kohle wird zunächst zu einer Korngröße von max. 8 mm zermahlen und entweder über Stoker unten in den Kessel oder



Das Måbjerg-Werk. Links der 5000 m³-Speicher. Das Strohlager ist in dem niedrigen Gebäude rechts untergebracht. Ganz rechts das nicht überdachte Hackschnitzel-Lager.

foto: biopress/forben skatt

durch Zellschleusen in das Aschere-zirkulationssystem ausgetragen.

Sonstige Daten

Der Kessel in Grenå ist für die Befeuerung mit Kohle und Stroh in einem Mischungsverhältnis von 50% auf Energiebasis ausgelegt. Er erzeugt bei 100% Vollast 104 Tonnen Dampf pro Stunde bei 505°C und 92 bar. Hiervon werden zwischen 37 und 77 Tonnen Dampf pro Stunde bei 210°C und 8,3 bar als Prozeßdampf für die Betriebe Danisco Paper und Danisco Distillers entnommen. Pro Jahr werden 55.000 Tonnen Stroh und ca. 40.000 Tonnen Kohle verbraucht. Das Kohlenlager entspricht einem Verbrauch von 20 Tagen bei reiner Kohlebefeuerung, das Strohlager einem Verbrauch von 4,2 Tagen bei 50/50% Brennstoffmix. Die Anlage ist wie die anderen Heizkraftwerke mit einem Wärmespeicher ausgerüstet, und wie in den Werken in Slagelse und Masnedø werden die Feststoffpartikel im Rauchgas in einem Elektrofilter abgefiltert.

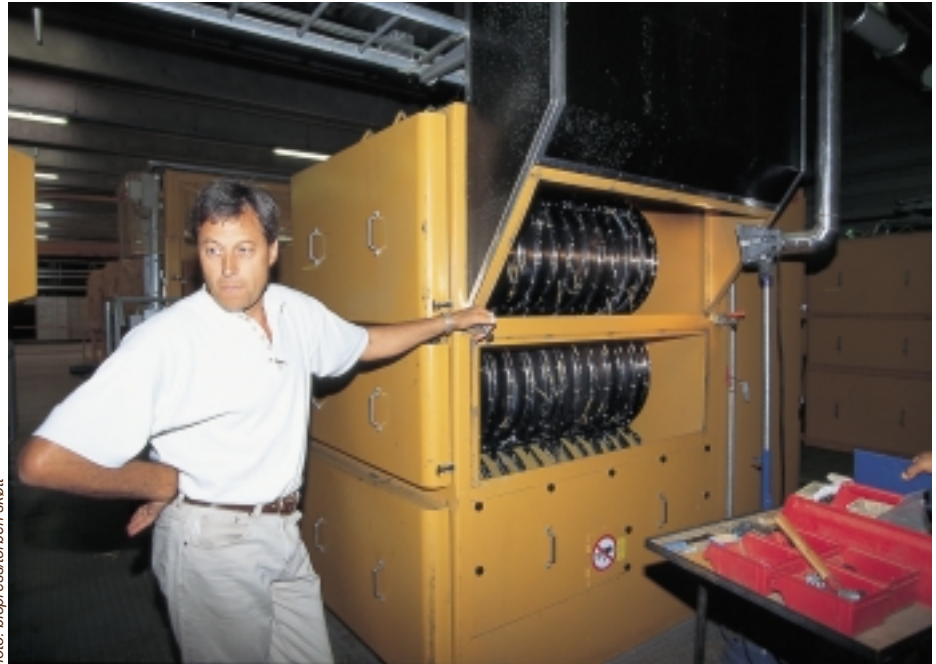


foto: biopress/forben skoff

Der Betriebsleiter des Heizkraftwerkes Grenå an einem zu Inspektionszwecken geöffneten Strohauflöser.

Das Heizkraftwerk in Måbjerg

In Måbjerg unweit von Holstebro hat i/s Vestkraft ein Heizkraftwerk errichtet, das mit Müll, Stroh, Hackschnitzel und Erdgas befeuert wird. Alle drei Kessel haben einen separaten, erdgasbefeueren Überhitzer, um die Dampftemperatur von 410 °C auf 520 °C bei einem Druck von 67 bar zu erhöhen. Befeuert wird die Anlage mit Großballen, die in 6 Zigarrenbrennern (jeweils drei gegeneinander angeordnet) verbrannt werden. Hackschnitzel wird mit einem pneumatischen Beschickungssystem auf einen Schüttelrost ausgetragen, auf dem unverbranntes Stroh und Hackschnitzel ausbrennen. Die Rauchgase aus dem Stroh-/Hackschnitzelkessel werden in einem Gewebefilter gereinigt, bei den Hausmüllkesseln wird die Rauchgasreinigung von einem Naßreinigungssystem ergänzt, das die Emission von Chlorwasserstoff, Fluorwasserstoff und Schwefelwasserstoff senken soll. Das Naßreini-

gungssystem führt gleichzeitig zu einer gewissen Freisetzung von Schwermetallen aus der Flugasche. Der Stroh-/Hackschnitzelkessel kann 100% Vollast mit Stroh, bzw. Hackschnitzel oder einer Kombination aus beidem fahren. Die Kapazität des Kessels beträgt 12 Tonnen Stroh pro Stunde. Weitere Daten siehe Tabellen 6, 7, 8 und 9.

Umweltschutzanforderungen

Die Richtlinie Nr. 6/1990 des dänischen Umweltministeriums über die "Begrenzung der Luftverschmutzung durch Betriebe" (42) schlägt für strohbefeuerte Anlagen über 1 MW Brennstoffenergie Richtgrenzwerte für die Staub- und CO-Emission von 40 mg/Nm³, bzw. 0,05% CO (Volumen-% bei 10% O₂ im Rauchgas) vor. Für die hier beschriebenen Heizkraftwerke werden jedoch in den jeweiligen Umweltgenehmigungen individu-

elle Anforderungen gestellt, siehe Tabelle 9.

Anlage- und Betriebskosten

Gemessen in Millionen DKK pro installierte MW_{el}-Kapazität sind die Anlagekosten für die dezentralen biomassebefeueren Heizkraftwerke vergleichsweise höher als die für konventionelle kohlebefeuerte Kraftwerke. Die spezifische Anlageinvestition schwankt für die sieben Werke zwischen 21 und 30 Mill. DKK pro MW_{el}. Die aus Tabelle 7 hervorgehenden Anlagekosten sind auf den Preisstand von 1995 umgerechnet und daher vergleichbar. Die relativ hohen Anlagepreise hängen in erster Linie von der Größe der Anlage ab (je kleiner die Anlage, desto höher der spezifische Anlagepreis). Durch Technologieentwicklung eines bestimmten Anlagentyps fällt der spezifische Preis für neue Anlagen verglichen mit älteren Anlagen gleicher Größe. Der

Emission	Einheit	Rudkøbing	Haslev	Slagelse	Grenå	Aabenraa	Måbjerg	Masnedø	Maribo/Saksøbing
CO	Volumen % tr. Rauchgas	0,2 bei 12% CO ₂	0,05 bei 10% O ₂	0,2 bei 12% CO ₂	Keine	Keine	0,05 bei 10% O ₂ ²⁾	0,05 bei 10% O ₂	0,05 bei 10% O ₂
Staub	mg/Nm ³	50	50	50	50	50	40	40	40
NO _x	mg/Nm ³	350	340	340	160	400	Keine	200	400
SO ₂	mg/Nm ³	Keine	300	300	280	2.000 ¹⁾	Keine	Keine	Keine

Tabelle 9: Maximale Emissionen aus den 7 dezentralen Heizkraftwerken und dem Kraftwerk in Aabenraa. Die Zahlen stammen aus den Umweltgenehmigungen der einzelnen Werke.

1) Während des Betriebes ist die Emission 100-200 SO₂/Nm³.

2) Umgerechnet von 650 mg/Nm³.

spezifische Preis ist als richtungweisend zu betrachten, denn es ist unterschiedlich, was in den in Tabelle 7 angegebenen Anlagekosten enthalten ist. Bei einem Vergleich mit Heizkraftwerken anderer Typen sollte angegeben werden, daß bei der Berechnung des spezifischen Preises in Tabelle 7 die Netto-Stromleistung und nicht die Brutto-Stromleistung, die den Eigenverbrauch des Werkes umfaßt, benutzt wurde. Auch der Status der Anlagen als Versuchs- und Demonstrationsanlagen trägt zu höheren Anlagekosten bei. Auch dies macht das Preisbild undeutlich.

Der volumetrische Brennwert von Stroh ist ein Faktor, der um das Zehnfache bis Fünffache unter dem von Kohle liegt. Gleichzeitig ist Stroh schwerer zu hantieren, und insbesondere die Kosten für Lagerung, Hantierung und Befeuerungssysteme tragen zu den hohen spezifischen Anlagekosten der Werke bei. Mit einem Strohpreis von ca. 45 Öre pro kg oder ca. 11 Öre pro kWh ist Stroh etwa dreimal so teuer wie Kohle, die verstromt wird. Vgl. Schaubild 1, Kapitel 1.

Stroh in Kraftwerken

Im Rahmen des energiepolitischen Ziels einer CO₂-Reduktion verpflichtete das dänische Folketing die dänischen Elektrizitätswerke 1993, spätestens im Jahr 2000 1,2 Mill. Tonnen Stroh (später wurde beschlossen, daß 0,2 Mill. Tonnen durch Holz- oder Weidenhackschnitzel ersetzt werden können) und 0,2 Mill. Tonnen Holzhackschnitzel zu verwenden.

Von den Stromversorgungsunternehmen ELSAM und ELKRAFT wurden daher zahlreiche Aktivitäten ins Werk gesetzt, um die Probleme bei der Verfeuerung großer Mengen Stroh in Kraftwerken zu beleuchten. Wichtige Fragen waren in diesem Zusammenhang u.a.:

- Hochtemperaturkorrosion der Überhitzer bei hohen Dampftemperaturen
- Industrielle Nutzung des Aschegemischs bei gleichzeitiger Verfeuerung von Stroh und Kohle
- Rauchgasreinigung bei Kombinationsbefeuerung mit Stroh und Kohle
- Ressourcenfeststellung und Strohversorgungssicherheit
- Kosten

Gearbeitet wird mit mehreren übergreifenden Lösungskonzepten:

1. Separate Befeuerung: Das Stroh wird in einem separaten Biomassekessel verbrannt, der Dampf für den Dampfkreislauf des kohlebefeuerten Kessels liefert.
2. Kombinationsbefeuerung: Stroh und Kohle werden zusammen im Kraftwerkskessel verfeuert.
3. Vorgeschalteter Vergaser: Das Stroh wird vergast und das Gas in einem Kessel verbrannt, der für die Kombibefeuerung mit Strohgase und Kohlenstaub ausgelegt sein kann. Dieses Konzept befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Bei separater Befeuerung entstehen keine Probleme mit Hochtemperaturkorrosion, weil die Dampftemperatur im Bio-

massekessel unter dem kritischen Niveau bleibt. Die industrielle Nutzung der Asche aus dem Kohlekessel ist kein Problem, da die Asche aus beiden Kesseln nicht gemischt wird. Nachteilig bei separater Befeuerung sind in erster Linie die hohen Anlagekosten. Bei Kombinationsbefeuerung müssen die Probleme mit Hochtemperaturkorrosion und der industriellen Nutzung des Aschegemischs gelöst werden. In Kraftwerken mit Entschwefelungs- und Stickstoffreduktionsanlagen (DeNO_x-Anlagen) führt der Gehalt der Strohasche an Alkalimetallen (Kalium und Natrium) sowie Chlor zu Betriebsproblemen. Ein wesentlicher Vorteil bei Kombinationsbefeuerung sind die niedrigen Anlagekosten.

Das Interesse an einem vorgeschalteten Vergaser ist teils auf die niedrigen Anlagekosten, teils auf die Möglichkeit eines geringen Alkali- und Chlorgehaltes im Gas zurückzuführen. In ELSAM-Regie wurde bisher in einem Kraftwerk eine Strohverbrennung eingerichtet. "Sønderjyllands Højspændingsværk" hat im Herbst 1997 im Ensted-Werk einen separaten Biomassekessel in Betrieb genommen, der parallel mit dem kohlenstaubbefeuerten Block 3 des Werkes arbeitet. Im Studstrup-Werk führt Midtkraft seit 1995 Versuche mit der Kombinationsbefeuerung mit Stroh und Kohlenstaub in einem 150 MW_{el}-Kraftwerkskessel durch.

Auf Seeland hat ELSAM geplant, im Avedøre-Werk Stroh in einem separaten Biomassekessel zu verbrennen.

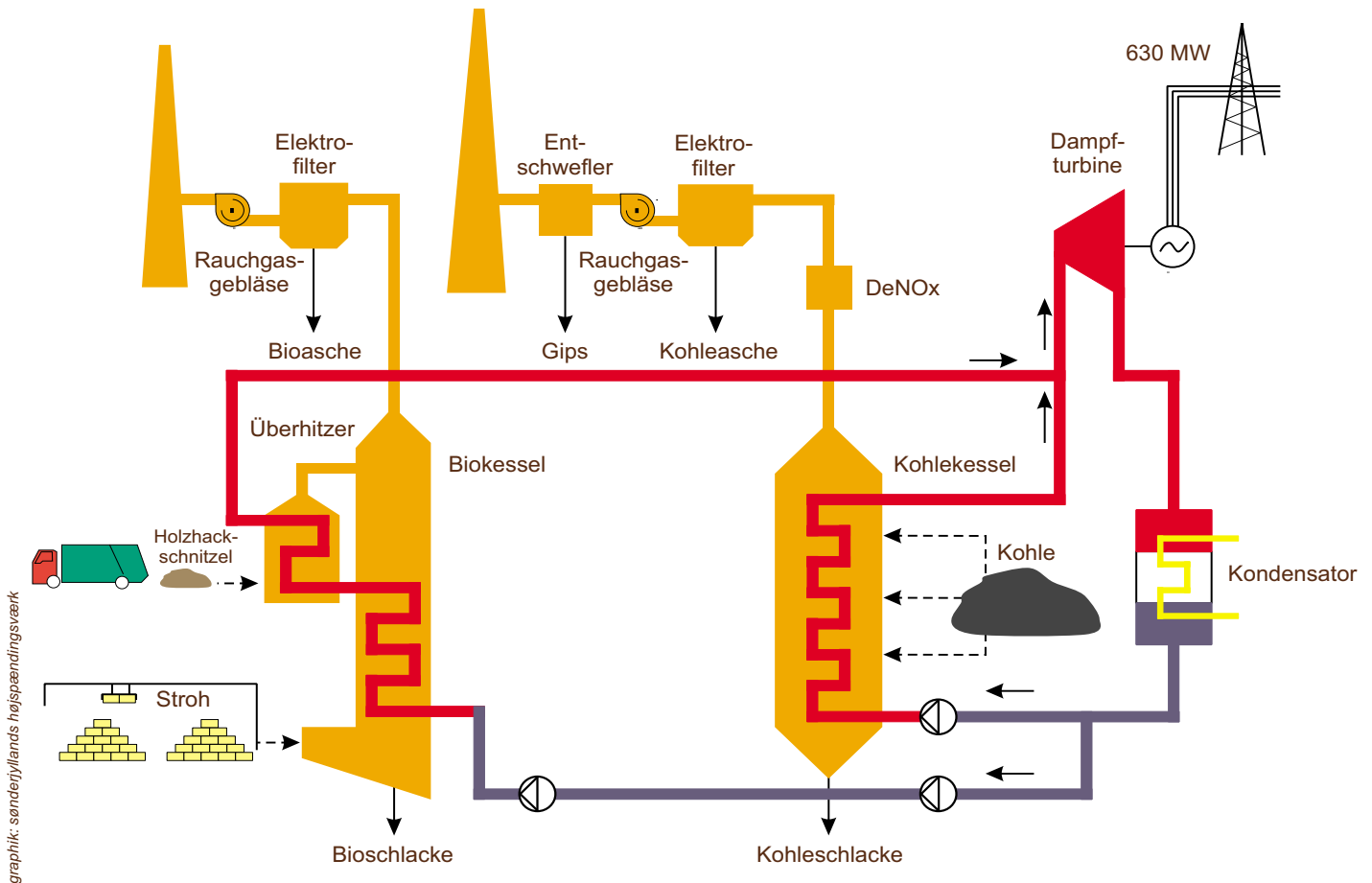
Das Ensted-Werk

Der Biomassekessel im Ensted-Werk besteht aus zwei Kesseln, einem strohbefeuerten, der Dampf mit einer Temperatur von 470 °C erzeugt, und einem hackschnitzelbefeuerten Kessel, der den Dampf aus dem Strohkessel auf 542 °C überhitzt. Der überhitzte Dampf wird in das Hochdruckdampfsystem (210 bar) im kohlebefeuerten Block 3 des Werkes geleitet. Mit einem geschätzten Jahresverbrauch von 120.000 Tonnen Stroh und 30.000 Hackschnitzel, entsprechend einer Brennenergieleistung von 95,2 MJ/s, leistet der Biomassekessel 88 MW thermisch, hiervon 39,7 MW_{el} (ca. 6,6% der gesamten Stromerzeugung von Block 3). Der Biomassekessel ist also erheblich größer als die größten dezentralen biomassebefeuerten Heizkraftanlagen. Der Netto-Stromwirkungsgrad liegt bei 40%. Der Jahreswirkungsgrad liegt vermutlich etwas niedriger aufgrund des gemeinsamen Betriebes mit Block 3 und schwankender Lastbedingungen. Der Biomassekessel soll 6000 Vollaststunden pro Jahr arbeiten. Mit einer Lagerkapazität von nur 1008 Ballen, ent-



foto: sønderjyllands højspændingsværk

3 von 4 Strohlagen im Ensted-Werk. Die Großballen kommen auf einem Förderband aus dem Strohlager und werden über einen querlaufenden Wagen auf die 4 Linien verteilt.



graphik: sønderjyllands højspeningsværk

Schaubild 22: Prinzipdiagramm des 40 MW_{el}-Biokessels und des 630 MW_{el}-Kohlekessels im Ensted-Werk. Der Biokessel ersetzt den Verbrauch von 80.000 Tonnen Kohle pro Jahr, die CO₂-Emission reduziert sich damit um 192.000 Tonnen pro Jahr.

sprechend dem Verbrauch eines Tages (24 Stunden), müssen durchschnittlich 914 Großballen pro Tag geliefert werden, entsprechend vier Wagenladungen pro Stunde, 9,5 Stunden pro Tag.

Der Strohkessel ist mit 4 Strohlagen ausgerüstet, kann aber auch mit nur 3 Linien 100% Vollast fahren. Jede Strohlage besteht aus einer Brandschleuse, Förderketten, Ballenauflöser, Brandschutzklappe und Befüerungskanal. Der Strohauflöser besteht wie im Masnedø-Werk aus zwei zusammengekoppelten, konischen, senkrechten Schnecken, gegen die der Ballen gepreßt wird. Vom Strohauflöser wird das aufgelöste Stroh über die Brandschutzklappe in die Befüerungsschnecke dosiert, die das Stroh wie einen Pfropfen durch den Befüerungskanal auf den Rost drückt. Der Hackschnitzelkessel hat zwei druckluftbetriebene Klappen, die das Hackschnitzel auf den Rost austragen. Die Dosierung erfolgt mit einer Dosierschnecke aus einem Zwischensilo. Die Rauchgase werden in Elektrofiltern gereinigt. Um die Bodenrasche und die Schlacke aus dem Biomassekessel als Dünger verwenden zu können, werden Flugrasche aus den Filtern (die den Großteil der Schwerme-

talle in der Rasche enthält) und Bodenrasche getrennt gehalten.

Die gesamten Anlagekosten für die Biomasseanlage im Ensted-Werk betragen ca. 400 Mill. DKK (1995-Preise). Der Preis deckt Kessel, Brennstofflager und Dampfleitung zur Turbine von Block 3. Kesselhaus und Elektrofilter wurden wiederverwendet. Das Projekt wurde im Januar 1995 beschlossen, und der kommerzielle Betrieb wurde Anfang 1998 aufgenommen.

Das Studstrup-Werk

Bevor die Kombinationsbefüerung mit Stroh und Kohle im Studstrup-Werk beschlossen wurde, führte das Stromversorgungsunternehmen Midkraft von 1992-94 Versuche in zwei älteren Kraftwerksblöcken durch, einem kohlenstaubbefüerten von 125 MW_{el} und einer rostbefüerten Stokeranlage von 70 MW_{el}. Untersucht werden sollten die bekannten Probleme mit der Verfeuerung von Stroh in Kraftwerken, u.a.:

- Hantierung und Verfeuerung von Stroh in einem Kraftwerkskessel, der gleichzeitig mit Kohle befeuert wird

- Auswirkungen auf Kesselleistung und Rauchgasemissionen
- Korrosion an Überhitzern und Schlackenprobleme
- Aschegemischproblematik
- Einfluß des Strohs auf die Rauchgasreinigungssysteme

Die Versuchsergebnisse führten zu einem 1996/97 durchgeführten Demonstrationsprojekt mit kombinierter Stroh/Kohlefeuerung im kohlenstaubbefüerten 150 MW_{el} Kraftwerksblock (Block 1) des Studstrup-Werkes. Studstrup ist für einen Strohanteil von max. 20% der gesamten Brennstoffenergie ausgelegt. Errichtet wurde ein Strohlager mit Platz für 1100 Großballen sowie insgesamt vier Strohhandlungslinien. Jede Linie besteht aus einem Strohauflöser und einem Hammerbrecher, der die aufgelösten Halme zerkleinert. Das Stroh wird zusammen mit dem Kohlenstaub in vier Kombinationsbrennern in den Feuerraum geblasen.

Der Kessel ist für eine Leistung von 500 Tonnen Dampf pro Stunde bei einem Dampfdruck von 143 bar und einer Überhitzertemperatur von 540 °C ausgelegt. Die Anlagekosten für Lager, Hantie-

rungs- und Befuerungssysteme belaufen sich auf ca. 90 Mill. DKK.

Das Avedøre-Werk

Im Zusammenhang mit dem Bau eines neuen Kraftwerksblocks (Block 2) im Avedøre-Werk wird eine Biomasseanlage mit einer Kapazität von 150.000 Tonnen Biomasse pro Jahr errichtet. Verwendet werden soll hauptsächlich Stroh. Ausgehend von den im Masnedø-Werk gemachten Erfahrungen ist ein separater Stroh-/Hackschnitzelkessel geplant, der Dampf bei 300 bar und 580 °C erzeugen kann. Der Dampf wird zum Dampfturbinensystem des Hauptkessels geleitet. Falls sich die hohe Dampftemperatur nicht ohne zu große Korrosionsprobleme erreichen läßt, soll das Überhitzen teilweise in einem erdgasbefeuerten Überhitzer erfolgen können. Mit dem geplanten Anlagekonzept und der hohen Dampftemperatur wird mit einem Stromwirkungsgrad von 43% im Biomasseteil gerechnet. Die Anlage soll Ende 2001 in Betrieb genommen werden.



foto: sønderjyllands højspændingsværk

Strohballen werden im Ensted-Werk vom Lkw abgeladen. Der Kran hebt jeweils 12 Ballen auf einmal, dabei werden sie gewogen, und der Feuchtegehalt wird mit in den Greiferklauen montierter Mikrowellenausrüstung bestimmt.