

## Kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung: Biomasseheizkraftwerke

Biomasseheizkraftwerke erzeugen elektrischen Strom aus biogenen Festbrennstoffen. So werden zum Beispiel Holzhackschnitzel oder Stroh verbrannt, und die Wärme wird zum Antrieb einer Turbine verwendet. Ein Teil der Wärme bleibt als so genannte Abwärme übrig und kann für die Raumbeheizung, zur Trinkwassererwärmung, als Prozesswärme oder zur Kühlung genutzt werden. Die Kombination aus Stromerzeugung und Nutzung der "Abwärme" heißt Kraft-Wärme-Kopplung.

### Inhalt

<b>Heizwerk oder Heizkraftwerk?</b> .....	1
<b>Der Dampfkraftprozess</b> .....	3
<b>Der ORC-Prozess</b> .....	5
<b>Feuerungstechnik</b> .....	6
<b>Stromerzeugung</b> .....	11
<b>Holzvergasungsanlagen</b> .....	12

### Heizwerk oder Heizkraftwerk?

Die Kombination einer Erzeugung von elektrischem Strom mit der Bereitstellung von Wärme in Heizkraftwerken darf nicht verwechselt werden mit der alleinigen Bereitstellung von Wärme in Heizwerken. Im Vergleich zum Heizwerk ist die Technologie eines Heizkraftwerkes deutlich aufwändiger und teurer. Heizkraftwerke müssen daher gut ausgelastet sein, damit sie wirtschaftlich betrieben werden können.

Bei identischer Wärmeleistung führen die zusätzliche Stromerzeugung und die hohe Auslastung dazu, dass in ein Heizkraftwerk deutlich größere Brennstoffmengen fließen als in ein Heizwerk. Entsprechend aufwändiger ist bei der Kraft-Wärme-Kopplung die Brennstofflogistik, und entsprechend stärker fällt der Brennstoffpreis ins Gewicht. Heizkraftwerke benötigen zudem eine ganzjährige Wärmeabnahme auf relativ hohem Niveau, die Stromerzeugung sollte möglichst hohe Vollbetriebsstunden aufweisen. Wichtig für einen dauerhaften und kontinuierlichen Betrieb der Stromerzeugungsanlage ist es, dass die zu versorgenden Wärmekunden nicht nur im Winter entsprechend Wärme brauchen. Auch im Sommer muss die "Abwärme", die bei der Stromerzeugung anfällt,



zum Beispiel in einem Wärmenetz mit entsprechendem Bedarf untergebracht werden; andernfalls müsste die Leistung der Feuerungsanlage und damit die der Stromerzeugung vermindert bzw. ein großer Wärmespeicher bedient werden.

Eine kombinierte Strom- und Wärmeerzeugung durch ein Heizkraftwerk macht also nur dort Sinn, wo ganzjährig eine gleichmäßig große Wärmemenge benötigt wird. Das Heizwerk, also die Wärmebereitstellung ohne gleichzeitige Stromerzeugung, erlaubt dahingegen u.U. auch bei niedriger Sommerlast eine Wärmeversorgung mit hohen Nutzungsgraden, wenn eine geeignete, nicht zu weitläufige Versorgungsstruktur vorliegt.

### **Technologie der Stromerzeugung**

Die meisten Heizkraftwerke arbeiten mit einem Dampfkraftprozess. Dabei wird Wasser durch die Verbrennung von Biomasse erhitzt, verdampft, und der Wasserdampf wird auf eine Dampfturbine oder auf einen Dampfmotor geleitet. Die Turbine oder der Motor erzeugen Strom, der in das Übertragungsnetz eingespeist oder vor Ort genutzt wird; mit der übrigen Wärme kann ein Fernwärmenetz versorgt werden. Die Technologie ist erprobt und weitgehend ausgereift. Darüber hinaus gibt es Anlagen, die mit einem ORC-Prozess oder mit einer Biomassevergasung arbeiten. Ein Viertel der Biomasse(heiz)kraftwerke in Deutschland arbeiten überwiegend oder ausschließlich mit Altholz als Brennstoff, die übrigen werden mit Frischholz betrieben, einzelne Holzvergaser verwenden Holzpellets.

### **Entwicklung**

Erste Stromerzeugungsanlagen, die Holzabfälle als Brennstoff verwendeten, entstanden in Deutschland bereits Ende des 19. Jahrhunderts im Zuge der Einführung der allgemeinen Elektrizitätsversorgung. Holzkraftwerke entwickelten sich dann vor allem in der Holz be- und verarbeitenden Industrie zur Eigenstromerzeugung, allerdings verhinderte das "Gesetz zur Förderung der Energiewirtschaft" von 1935 bis zur so genannten Verbändevereinbarung von 1979 im Wesentlichen eine Versorgung Dritter mit elektrischem Strom und eine Stromeinspeisung.

Erst mit dem Stromeinspeisegesetz von 1990 entstanden erste Biomasse(heiz)kraftwerke, wie wir sie heute kennen. Sie speisten den erzeugten Strom in das Versorgungsnetz ein und versorgten ggf. Kunden mit Wärme. Dafür nutzten sie überwiegend das damals noch recht kostengünstige Altholz als Brennstoff und arbeiteten mit dem bewährten Dampfkraftprozess. Ab dem Jahr 2000 entstanden im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) etliche weitere Biomasse(heiz)kraftwerke. Unterstützt durch diverse Boni im EEG wurden jetzt auch neue Technologien eingeführt, z.B. der ORC-Prozess, und es wurde verstärkt naturbelassene Biomasse als Brennstoff verwendet. Die jüngsten Ziele sind eine dezentrale Wärme- und Strombereitstellung mittels KWK-Anlagen sehr kleiner Leistung und eine Flexibilisierung der Strombereitstellung.



### **Aktuelle Anlagenzahl**

Gegenwärtig sind in Deutschland etwa 700 Biomasse(heiz)kraftwerke mit einer Leistung von 1.500 MW in Betrieb (Stand 2015, Quelle: DBFZ). Europaweit liegt die installierte elektrische Leistung bei etwa 20 GW (Stand 2018; Quelle: Bioenergy Europe). Weltweit sind rund 4.000 Biomasse(heiz)kraftwerke in Betrieb. Es wird ein weiterer, allerdings verhaltener Zubau erwartet. (Stand: 2019; Quelle: ecoprog.de)

Biomasse trägt in Bayern etwa 12 % zur Bruttostromerzeugung bei. Biomasse(heiz)kraftwerke liefern davon ca. 30 %, der Rest wird von Biogasanlagen bereitgestellt. Den größten Anteil an der Stromerzeugung in Bayern trägt die Kernenergie mit rund 30 %, gefolgt von der Photovoltaik mit 16 %, dann Wasserkraft und Erdgas mit je 14 %. (Stand: 2018; Quelle: Energieatlas Bayern)

### **Marktreife**

Anlagen zur Strom- und Wärmebereitstellung aus Biomasse sind am Markt verfügbar, allerdings weisen die verschiedenen Technologien einen recht unterschiedlichen Entwicklungsstand auf. Ausgereift und mit dem Brennstoff Biomasse erprobt sind der Dampfkraftprozess und der ORC-Prozess. Die Einsatzmöglichkeiten einer Dampfturbine beschränken sich auf den Leistungsbereich über 1 MWel. Im kleineren Leistungsbereich bietet sich der Dampfkolbenmotor als wirtschaftliche Alternative an. Die ORC-Technologie befindet sich im Leistungsbereich über 300 kWel im Bereich der Marktreife und darunter in der Einführung. Die Schwelle zur Marktreife hat mittlerweile auch die Biomassevergasung mit anschließender motorischer Gasnutzung im kleinen Leistungsbereich überschritten; in den letzten 10 Jahren wurde ein starker Zubau solcher KWK-Anlagen verzeichnet. Nur eingeschränkt als marktreif zu bezeichnen ist der Stirlingmotor.

## **Der Dampfkraftprozess**

Der Dampfkraftprozess ist eine bewährte Technologie für die Realisierung von Stromerzeugungsanlagen großer Leistung. Es lassen sich damit zuverlässige Anlagen mit hohen Verfügbarkeiten und guten elektrischen Wirkungsgraden realisieren. Der Dampfkraftprozess ist das gängige Prinzip der meisten Wärmekraftwerke.

Im Wärmekraftwerk wird Brennstoffenergie in Wärmeenergie überführt, anschließend wird die Wärme mit dem Dampfkraftprozess, einem thermodynamischen Kreisprozess, in mechanische und diese schließlich in elektrische Energie umgewandelt. Anschaulich ausgedrückt: Durch das Verbrennen von Brennstoff wird Wasser im Dampferzeuger erhitzt und verdampft. Der Wasserdampf wird auf eine Dampfturbine oder auf einen Dampfmotor geleitet. Die Turbine oder der Motor erzeugen elektrischen Strom, welcher in das Übertragungsnetz eingespeist oder vor Ort genutzt wird. Bei Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen wird auch die vom Dampfkraftprozess abgegebene Niedertemperaturwärme genutzt, beispielsweise wird ein Fernwärmenetz versorgt oder Prozesswärme bereitgestellt.



Die Technologie ist erprobt und weitgehend ausgereift. Nicht nur konventionelle Kraftwerke, sondern auch die meisten Biomasse(heiz)kraftwerke arbeiten mit dem Dampfkraftprozess, ebenso ehemalige Müllverbrennungsanlagen, die auf den Betrieb mit Biomassefestbrennstoffen umgerüstet wurden, sowie Kohlekraftwerke, die Biomassepellets (bis 30 % Massenanteil) mitverbrennen. Stand der Technik sind Dampfturbinen mit einer elektrischen Leistung von 1 MW und mehr. Für Leistungen unter 1 MW<sub>el</sub> ist die Dampfturbine allerdings kaum geeignet. In diesem Leistungsbereich werden mitunter Dampfkolbenmotore zur Stromerzeugung verwendet. Nach oben hin wird die Leistung von Biomasseheizkraftwerken durch den Aufwand für die Brennstoffbereitstellung begrenzt. Üblicherweise wird daher eine Leistung von 20 MW<sub>el</sub> bzw. etwa 60 MW<sub>th</sub> nicht überschritten. Der Dampfkraftprozess ist allgemein mit hohen spezifischen Investitionen und mit hohen Betriebskosten verbunden. Die spezifische Investition ist umso größer, je kleiner die Leistung der Anlage ist. Umgekehrt steigt die Effizienz mit der Größe der Anlagenleistung.

Die elektrischen Wirkungsgrade von Biomasseheizkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von 20 MW und einer Dampfturbine zur Stromerzeugung liegen zwischen 20 und 25 %. Bei den Anlagen, die mit Dampfkolbenmotoren arbeiten und wesentlich kleinere Leistungen erreichen, werden elektrische Wirkungsgrade um 15 % erzielt. Zur Steigerung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit kann der konventionelle Dampfkraftprozess um Vor- und Nachschaltprozesse ergänzt werden. Solche Kombiprozesse arbeiten beispielsweise mit einer dem Dampfkraftprozess vorgeschalteten Gasturbine oder mit einem nachgeschalteten ORC-Prozess.

Die erzielbaren elektrischen Wirkungsgrade von Biomasse(heiz)kraftwerken, die mit dem Dampfkraftprozess arbeiten, sind kleiner als die entsprechenden Wirkungsgrade konventioneller Gas- oder Kohlekraftwerke. Dies liegt im Wesentlichen an den niedrigeren Dampfparametern der Biomasseanlagen. Während mit den mit Kohle oder Erdgas befeuerten Dampferzeugern Dampfleistungen von bis zu 3.600 t Dampf pro Stunde und Dampfparameter von derzeit bis zu 350 bar und 640 °C erzielt werden können, arbeiten Biomasse(heiz)kraftwerke auf einem deutlich niedrigeren Druck- und Temperaturniveau. Wichtig ist daher, dass die nach dem Kreisprozess übrigbleibende Wärme der Biomasseanlagen möglichst vollständig genutzt wird, z.B. in einem Wärme- oder Kältenetz, damit ein möglichst großer Gesamtnutzungsgrad der Anlage erzielt wird.

Ein Dampfkraftwerk ist eine komplexe Anlage, bestehend aus dem Dampferzeuger, dem eventuell ein Überhitzer nachgeschaltet ist, der Dampfturbine oder einer Kolbendampfmaschine mit Generator, dem Kondensator und den zugehörigen Maschinen und Anlagenteilen wie Rohrleitungen, Pumpen, Mess-, Steuer- und Regeltechnik, Brennstofflager, Schornstein und Kesselhaus. Des Weiteren verfügen Dampfkraftwerke über Anlagen für die Aufnahme und den Abtransport von Aschen und Schlacken, außerdem elektrische Schaltanlagen und Transformatoren sowie Einrichtungen für die Nutzung der Abwärme, eventuell auch ein zusätzlicher Wärmeerzeuger zur Abdeckung der Spitzenlast des Wärmenetzes und als Notkessel, außerdem Notkühler.

### Der ORC-Prozess

Die ORC-Technik bietet vor allem im mittleren Leistungsbereich eine Möglichkeit, biogene Festbrennstoffe zur Stromerzeugung und zur Wärmebereitstellung zu nutzen.

Der ORC-Prozess – ORC steht für Organic Rankine Cycle – basiert wie der konventionelle Dampfkraftprozess auf dem Rankine-Prozess. Anstelle von Wasser wird jedoch ein organisches Arbeitsmedium verwendet, das geringere Siede- und Kondensationstemperaturen als Wasser aufweist, z.B. Silikonöl. Der ORC-Prozess ist aus verschiedenen Anwendungsbereichen bekannt, insbesondere zur Nutzung von Abwärme aus Produktionsprozessen. In jüngerer Zeit wurde er für die Nutzung von geothermischer Energie, von Solarenergie sowie zuletzt von Energie aus Biomasse weiterentwickelt.

Der ORC-Prozess ist ein typischer Nachschaltprozess. Er diente ursprünglich der Nutzung von Wärme, die auf einem niedrigen Temperatur- und Druckniveau anfällt. Ein Biomasseheizkessel jedoch stellt Wärme auf einem hohen Temperaturniveau zur Verfügung. Daher sind mit dem ORC-Prozess, wenn dieser Wärmeenergie aus einer Biomasseverbrennung nutzt, prinzipiell größere Wirkungsgrade zu erzielen als bei der Nutzung von Erdwärme. Allerdings kann die Wärme aus der Biomasseverbrennung dem ORC-Prozess nicht direkt zugeführt werden. Um eine Überhitzung und damit Zerstörung des organischen Arbeitsmittels zu verhindern, wird ein Thermoöl- oder Heißwasserkreislauf zwischen die Biomassefeuerungsanlage und den ORC-Prozess geschaltet, welcher die Wärmeenergie der Biomasseverbrennung in einem Verdampfer auf das organische Arbeitsmittel überträgt. Der Thermoölkreislauf verteuert die Anlage nicht unerheblich. Auch sind dadurch die erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade der Anlage begrenzt. Durch die Verbrennung von Biomasse wird das Thermoöl auf eine Vorlauftemperatur von ca. 300°C erwärmt, wobei ein praktisch druckloser Kesselbetrieb möglich ist. In einem Verdampfer wird die Wärme des Thermoöls auf das organische Arbeitsmedium übertragen, das Arbeitsmedium wird verdampft. Mit dem Dampf (z.B. 250 °C, 20 bar) wird eine langsam laufende Axialturbine beaufschlagt, die direkt, ohne Zwischenschaltung eines Getriebes, mit dem Generator gekuppelt ist. Der entspannte Dampf wird einem Regenerator und schließlich einem Kondensator zugeführt. Die vom Kondensator abgeführte Wärme kann als Prozess- oder Fernwärme ausgekoppelt werden. Vorwärmer, Verdampfer, Regenerator, Kondensator, Umwälzpumpe, Turbine und Generator werden anschlussfertig auf einem Rahmen montiert als ORC-Modul geliefert.

### Wirkungsgrade, Vorzüge

Der bei KWK-Anlagen wünschenswerte wärmegeführte Betrieb kann mit Hilfe des ORC-Prozesses bei relativ hohen Teillastwirkungsgraden im Bereich zwischen 10 und 100 % der Nennlast erfolgen. Die langsam laufende, getriebelose Turbinen-Generator-Einheit ermöglicht hohe Verfügbarkeiten der Anlage und einen akzeptablen elektrischen Wirkungsgrad. Dieser kann um 17 % liegen, wenn mit niedrigen Heißwasser-Vorlauftemperaturen am Austritt des Kondensators gefahren wird. Für die gesamte



## **C.A.R.M.E.N.-Information**

Anlage einschließlich Thermoölkreislauf liegen die erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade bei etwa 13 %. Der Verlauf der Taulinie erlaubt einen Turbinenbetrieb ohne die Gefahr einer vorzeitigen Kondensation des Arbeitsmittels. Der Personalbedarf einer ORC-Anlage wird mit drei bis fünf Stunden pro Woche angesetzt und ist damit vergleichsweise gering; insbesondere entfällt der in Deutschland beim Dampfkraftprozess übliche Dampfkesselwärter.

### **Feuerungstechnik**

Der Betrieb von Dampfmaschinen und -turbinen mit Biomassebrennstoffen setzt voraus, dass Wasser durch die Verbrennung der Biomasse erhitzt und verdampft wird und dass der so erzeugte Wasserdampf in den Motor bzw. auf die Turbine geleitet wird. Ähnlich ist es beim ORC-Prozess, dort wird statt des Wassers ein organisches Arbeitsmittel zum Sieden gebracht. Das Verbrennen der Biomasse erfolgt in speziellen Feuerungsanlagen, diese bestehen aus der Feuerung und einem Wärmeübertrager. In der Feuerung wird die chemische Energie des Brennstoffs freigesetzt, anschließend wird die Wärmeenergie im Wärmeübertrager auf das Arbeitsmittel übertragen. Nach diesem Prinzip funktionieren auch die Dampferzeuger konventioneller Dampfkraftwerke. Im Dampferzeuger wird durch die Verbrennung Wasser erhitzt, der so gewonnene Wasserdampf kann eine Dampfturbine oder einen Dampfmaschine antreiben.

Universalfeuerungen, die für Brennstoffe aller Art gleichermaßen geeignet sind, gibt es nicht. Vielmehr müssen Feuerungstechnik und Brennstoff aufeinander abgestimmt sein, damit eine schadstoffarme Wärmeerzeugung mit höchsten Nutzungsgraden und langen Reisezeiten der Feuerungsanlage erzielt wird. Für die Verfeuerung von Holz und anderen Biomassen verwendet man hauptsächlich Rostfeuerungen, insbesondere solche mit Vorschubrost. Seltener kommen Wirbelschichtfeuerungen zum Einsatz.

#### **Rostfeuerung**

Feststofffeuerungen mit Rost haben sich seit Jahrzehnten bewährt und sind heute in der Bioenergie Stand der Technik. Der Rost trägt das Brennstoffbett, auf dem Rost trocknet, entgast und verbrennt der Brennstoff. Bei Feuerungsanlagen großer Leistung ist der Rost grundsätzlich so gestaltet, dass er den Brennstoff automatisch und mit geringer Geschwindigkeit, die dem Trocknungs-, Entgasungs- und Verbrennungsverhalten des Brennstoffs entspricht, vom Aufgabebereich zum Asche- und Schlackeabwurf transportiert. Das Aufbringen des Brennstoffs auf den Rost erfolgt mechanisch. Die für die Verbrennung notwendige Luft wird dem Brennstoff teils von unten durch den Rost zugeführt.

##### *Vorschubrost*

Die meisten Holzkraftwerke arbeiten mit einem Vorschubrost. Dieser ist treppenförmig aufgebaut, jeweils eine Roststabelle bildet eine Treppenstufe. Der Vorschub des Brennstoffs auf dem Rost geschieht durch bewegliche Rostelemente. Jede zweite Roststabelle, also quasi jede zweite Treppenstufe, bewegt sich vor und zurück, die



## **C.A.R.M.E.N.-Information**

dazwischen liegenden Reihen stehen fest. Durch das Vor- und Zurückbewegen der beweglichen Reihe wird der Brennstoff vom oberen zum unteren Rostende geschoben und brennt dabei aus.

Ein besonderes Merkmal der Vorschubrostfeuerung ist, dass das Brennstoffbett durch die Bewegung des Rostes insgesamt sehr stark umgewälzt und durchmischt wird. Glutbereiche kommen an die Oberfläche, noch nicht gezündeter Brennstoff fällt in die Glut. Diese so genannte Schürwirkung trägt zu einem guten Ausbrand des Brennstoffes bei. Auf den Rost aufgegeben wird der Brennstoff mit einer hydraulisch arbeitenden Einschubvorrichtung. Am Ende des Rostes bleibt Asche übrig, die in einen mit Wasser gefüllten Nassentascher fällt.

Die Zugabe der Verbrennungsluft (Primärluft) erfolgt teils von unten durch die Roststäbe und teils seitlich und von vorne in das Brennstoffbett. Man unterscheidet mehrere Rostzonen: Trocknungs-, Entgasungs-, Hauptverbrennungs- und Nachverbrennungszone. Die größte Luftmenge wird der Hauptverbrennungszone zugeführt. Diese liegt noch im ersten Drittel des Rostes, wenn trockene Brennstoffe verwendet werden, die rasch zünden. Bei nassen Brennstoffen, die länger auf dem Rost trocken müssen und erst spät zünden, verschiebt sich die Hauptverbrennungszone in die Mitte des Rostes.

Der Feuerraum ist so gestaltet, dass ein möglichst guter Ausbrand der Brenngase erreicht wird, bevor der Gasstrom die Berührungsheizflächen (Wärmeübertrager) erreicht. Dazu dienen u.a. eine über die Ausbrandzone nach vorne gezogene hintere Feuerraumdecke sowie eine starke Einschnürung des Feuerraumes zwischen der unteren und der oberen Brennkammer. Sekundärluft und Rezirkulationsgase werden den Brenngasen in der Feuerraumeinschnürung zugeführt.

Vorschubrostfeuerungen können in Bezug auf Stückigkeit und Wassergehalt ein relativ breites Brennstoffband verwerten, die Anforderungen an die Brennstoffaufbereitung sind gering. Der Feinanteil des Brennstoffs sollte allerdings möglichst klein sein, und die Brennstoffbeschaffenheit sollte nicht zu stark variieren. Werden zu heizwertreiche Brennstoffe verbrannt, z.B. trockenes Altholz, kann die thermische Belastung des luftgekühlten Rostes so groß werden, dass Roststäbe u.U. durchbrennen können. Vorschubrostfeuerungen werden im Leistungsbereich bis 70 MW Feuerungswärmeleistung verwendet.

### *Wanderrost mit Wurfbeschickung (Spreader Stoker)*

Ein Wanderrost ist ein endloses Rostband mit beweglichen Gliedern, welches horizontal durch den Feuerraum läuft und an zwei Wellen umgelenkt wird. Der oben liegende Teil des Rostbandes trägt das Brennstoffbett. Der Brennstoff wird mit möglichst gleichmäßiger Schichthöhe auf das Rostband aufgebracht. Das Band wird mit geringer Geschwindigkeit durch den Feuerraum geführt, der Brennstoff brennt dabei aus. An der Umlenkstelle des Bandes werden Asche und Schlacke nach unten abgeworfen.

Wanderroste eignen sich gut für die Verbrennung von Kohle und Koks, weniger für Biomassen. Im Gegensatz zum Vorschubrost erfährt der Brennstoff auf dem Wanderrost nämlich keine Schürung. Um Biomassefestbrennstoffe dennoch mit Wanderrostfeuerungen verwerten zu können, wird eine besondere Art der Beschickung angewendet: die Wurfbeschickung. Bei der Wurfbeschickung zünden die feinen Brennstoffanteile bereits im Flug, sie verbrennen im Fallen und treffen nicht mehr auf den



Rost. Dadurch wird der Rost von Feinkorn entlastet, und das Zusammenbacken der Brennstoffschicht auf dem Rost durch Feinkorn wird verhindert. Das Brennstoffbett auf dem Rost wird vor allem von den größeren Brennstoffbestandteilen gebildet. Diese trocknen und entgasen bereits im Flug und bilden auf dem Rost eine sehr gleichmäßige Brennstoffschicht, die von oben beschickt wird und von unten gleichmäßig abbrennt. Die Asche liegt unter dem Brennstoffbett auf dem Rost. Wanderroste dienen bei Biomassefeuerungen also vorwiegend dem Ausbrand.

Der Wanderrost bewegt sich nur sehr langsam durch den Feuerraum, so dass ein guter Ausbrand gewährleistet ist. Da die großen Brennstoffteile auf der Hinterseite des Rostes auftreffen, läuft der Rost entgegengesetzt zur Wurfrichtung. Primärluft wird von unten durch den Rost zugegeben, eine Unterteilung in verschiedene Unterwindzonen wie beim Vorschubrost gibt es nicht. Sekundärluft wird dem Feuerraum wie bei der Vorschubrostfeuerung meist in einer Einschnürung zugeführt.

Wanderrostfeuerungen mit Wurfbeschickung erfordern eine relativ gleichmäßige und gleichbleibende Brennstoffzusammensetzung, so dass u.U. eine Brennstoffaufbereitung notwendig ist, sie erlauben aber einen leicht erhöhten Feinkornanteil. Im Vergleich zu Vorschubrostfeuerungen weisen Feuerungen mit Wanderrost eine bessere Elastizität auf, können also schwankender Leistungsnachfrage besser folgen, und sie stellen die kompaktere Bauart dar. Sie werden im Leistungsbereich bis 100 MW Feuerungswärmeleistung verwendet.

### *Wirbelschichtfeuerung*

Die Wirbelschichtfeuerung ist im Vergleich zu den Rostfeuerungen eine relativ junge Technologie. Der Brennstoff wird in der Feuerung nicht von einem Rost getragen, sondern in eine heiße, durch Luftdüsen von unten aufgewirbelte Sandströmung gegeben, in der er verbrennt. Bei der stationären Wirbelschicht (SWS) bleiben Sand und Brennstoff in einer bestimmten Höhe der Feuerung im Schwebезustand. Bei der zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS) ist die Luftströmung aus den Düsen dahingegen so stark, dass die Partikel von der Strömung mitgerissen werden, den gesamten Brennraum ausfüllen und schließlich mit dem Rauchgas aus der Brennkammer ausgetragen werden. Die zirkulierende Wirbelschichtfeuerung verfügt deshalb im Gegensatz zur stationären über einen dem Feuerraum nachgeschalteten feuerfest ausgekleideten Zyklon. In diesem werden Asche und Sand vom Rauchgasstrom getrennt, das Bettmaterial wird dem Feuerraum wieder zugeführt.

Nachteile von Wirbelschichtfeuerungen gegenüber Rostfeuerungen sind u.a. die Kosten für das Bettmaterial (meist Quarzsand), das regelmäßig ersetzt werden muss, der Abrieb durch den Sand (bei ZWS insbesondere an der Ausmauerung des Heißzyklons), die dadurch erhöhten Aschemengen (Flugasche!) und der relativ große Hilfsenergieverbrauch. Von Vorteil sind der gleichmäßige Ausbrand der Brennstoffe bei relativ niedrigen Verbrennungstemperaturen und die größere Flexibilität bezüglich des Heizwertes der Brennstoffe. Allerdings ist das Spektrum verwertbarer Korngrößen begrenzt, insbesondere können keine zu großen Brennstoffstücke verbrannt werden, die nicht in Schwebе mit den Sandkörnern gehalten werden können; u. U. ist eine entsprechende vorausgehende Brennstoffaufbereitung erforderlich. Wirbelschichtfeuerungen sind zudem nicht für leichte flockige Biomassebrennstoffe geeignet, die auf dem Sandbett



## **C.A.R.M.E.N.-Information**

aufschwimmen würden.

Die ZWS ist eine relativ aufwändige Bauweise und in ihrer Anschaffung relativ teure Technik, die erst ab einer Dampfleistung von 2.000 t/h gebaut wird. Die SWS dahingegen ist eine preisgünstigere Konstruktion und für kleinere Dampferzeuger mit Dampfleistungen unter 100 t/h geeignet. Wirbelschichtfeuerungen werden im Leistungsbereich bis 400 MWFWL verwendet.

### **Abgasreinigung und Wärmerückgewinnung**

Bevor das Abgas der Biomassefeuerungsanlage an die Umgebung abgegeben wird, müssen Schadstoffe herausgefiltert werden. Bei Biomasseheizwerken sind dies insbesondere Staubpartikel, eventuell auch Stickoxide. Außerdem sollte eine Rückgewinnung der im Abgas enthaltenen Wärme geprüft werden. Bei Heizkraftwerken ist bei entsprechenden Brennstoffen eventuell noch eine weitergehende Abgasreinigung erforderlich.

#### *Staub im Abgas*

Bei der Verbrennung von Biomasse entstehen u.a. staubförmige Emissionen, also Partikel unterschiedlicher Korngrößen, die dem Abgasstrom beigemischt sind und die aus diesem herausgefiltert werden müssen, da sie in der Luft als Schadstoffe wirken können. Man unterscheidet feine und gröbere Partikel.

Feinpartikel (Aerosole) im Abgasstrom mit Korngrößen von 0,01 bis 1 µm entstehen aus anorganischen Bestandteilen in der Biomasse, die während der Verbrennung verdampfen und in der Abkühlphase kondensieren und dabei Salze bilden. Bei naturbelassenem Holz mit geringem Rindenanteil sind dies hauptsächlich Kaliumverbindungen im Größenbereich um 0,1 µm. Vor allem bei der Verbrennung von Rinde entstehen zudem Calciumverbindungen im Größenbereich um 1 µm durch Calcium im Brennstoff, welches als feste Komponente in den Abgasstrom gelangt und in der Abkühlphase weiterwächst. Wesentlich größere Partikel im Abgasstrom, so genannte grobe Flugasche, entstehen, wenn Asche aus dem Brennstoffbett mitgerissen wird.

Primärmaßnahmen, die der Hersteller an der Feuerungsanlage vorsieht, können die Bildung der unerwünschten Partikel im Abgas senken. Solche Primärmaßnahmen können z.B. eine geeignete Luftzuführung und ein möglichst ruhiges Brennstoffbett sein. Ergänzend kann als Sekundärmaßnahme eine nachgeschaltete Staubabscheidung erforderlich sein, um die Schadstoffgrenzwerte im Abgas einhalten zu können, z.B. mittels Multizyklon, Gewebefilter, Elektrofilter, Wäscher.

#### *Minderung von Stickstoffoxid*

Stickstoffoxid (NO<sub>x</sub>) im Abgas entsteht bei der Verbrennung von Biomasse hauptsächlich durch Stickstoff, der im Brennstoff enthalten ist. Bei der Verbrennung von naturbelassenem Holz, welches relativ niedrige Stickstoffgehalte aufweist, ist die Bildung von NO<sub>x</sub> von untergeordneter Bedeutung. Relativ hohe Stickstoffgehalte weisen dahingegen regelmäßig gedüngte Feldkulturen auf (Ursachen: u.a. Düngung,



## **C.A.R.M.E.N.-Information**

Eiweißgehalt). Durch die Zugabe eines stickstoffhaltigen Reduktionsmittels ins Abgas - z.B. Ammoniak, Harnstoff - können die NO<sub>x</sub>-Emissionen gesenkt werden (Sekundärmaßnahme). Das Reduktionsmittel reagiert mit dem im Abgas enthaltenen NO<sub>x</sub> zu molekularem Stickstoff. Verfahren: selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR), selektive katalytische Reduktion (SCR).

### *Minderung von Chlorwasserstoff*

Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas entsteht durch Chlor, welches im Brennstoff enthalten ist. Chlor findet sich vor allem in Stroh, Ganzpflanzen, Gras, Körnern, möglicherweise auch in entsprechend belastetem Altholz. In naturbelassenem Holz ist es dahingegen kaum vorhanden. Durch das Einmischen von z.B. Kalkhydrat in den Abgasstrom und anschließendes Abscheiden des entstandenen Calciumchlorids im Gewebe- oder Elektrofilter – so genannte Trockensorption - kann HCl aus dem Abgas beseitigt werden. Eine andere mögliche Sekundärmaßnahme ist das Führen des Abgases durch Washwasser in einem Wäscher, welches die Schadstoffe zurückhält.

### *Economiser*

Ein Economiser (ECO) kann den Gesamtwirkungsgrad einer Biomassefeuerungsanlage um bis zu 9 % verbessern. Der ECO ist ein Wärmeübertrager, in dem das Abgas bis knapp über die Kondensationstemperatur (Taupunkt) abgekühlt wird, z.B. auf 80°C. Eine Kondensation, also eine Umwandlung des im Abgasstrom mitgeführten Wasserdampfs in Wasser, findet bei diesen Temperaturen noch nicht statt. Die im Wärmeübertrager gewonnene Wärme wird zur Vorwärmung des Systemrücklaufs genutzt. Ein ECO ist für die meisten Biomasseheizanlagen ab 100 kW geeignet; er ist mit niedrigen bis mittleren Investitionen verbunden.

### *Abgaskondensation*

Mit einer Abgaskondensationsanlage kann der Gesamtwirkungsgrad einer Biomassefeuerungsanlage um bis zu 20 % verbessert werden. Zusatzeffekte sind Abgasreinigung und Entschwadung. Die Abgase werden bis unter den Taupunkt abgekühlt, der im Abgas mitgeführte Wasserdampf wird kondensiert. Dies geschieht in drei Stufen: Economiser, Kondensator, Luftvorwärmer. Eine Kondensation kann für Biomasseheizanlagen ab 1 MW sinnvoll sein, wenn Brennstoffe mit einem Wassergehalt von mehr als 40 % verwendet werden und ein Heizsystem mit tiefen Rücklauftemperaturen (<40°C) vorliegt. Die Kondensation ist mit relativ hohen Investitionen verbunden und weist einen relativ großen Platzbedarf auf.

## Stromerzeugung

### Der Dampfkolbenmotor

Der Dampfkolbenmotor ist eine Weiterentwicklung der klassischen Dampfmaschine. Er wird in der Bioenergie im Leistungsbereich unter 2 MW und bei entsprechend geringen Dampfdurchsätzen zur Stromerzeugung genutzt. Der Dampfkolbenmotor arbeitet nach dem Prinzip der Verdrängermaschine. Die Massenkräfte der hin und her gehenden Kolen begrenzen die erzielbaren Laufgeschwindigkeiten und Leistungen.

Beim Dampfkolbenmotor handelt es sich um ein System, das weitgehend unempfindlich gegen schwankende Dampfzustände ist, mit Sattdampf betrieben werden kann und auch im Teillastbetrieb noch zufriedenstellende Wirkungsgrade erlaubt. Die Anforderungen an die Speisewasseraufbereitung sind relativ gering. Die modular aufgebauten Dampfkolbenmotore verarbeiten Dampfmassenströme von 0,5 bis 40 t/h und werden mit Leistungen bis 1.500 kW je Aggregat angeboten. Die erzielbaren elektrischen Wirkungsgrade liegen um 15 %. Die spezifische Investition von Biomasseheizkraftwerken mit Dampfkolbenmotor ist relativ groß.

### Die Dampfturbine

Die Dampfturbine ist eine ausgereifte Technologie mit hohen Verfügbarkeiten und guten Wirkungsgraden. Elektrischer Strom aus biogenen Festbrennstoffen wird üblicherweise erzeugt, indem die aus der Verbrennung der Biomasse gewonnene Wärme auf eine Dampfturbine geleitet wird, welche einen Generator antreibt. Auf diese Weise lassen sich elektrische Leistungen von 2 MW und mehr erzielen. Die elektrischen Wirkungsgrade von Biomasseheizkraftwerken mit einer elektrischen Leistung von 20 MW und einer Dampfturbine zur Stromerzeugung liegen zwischen 20 und 25 %.

Die Dampfturbine arbeitet nach dem Prinzip der Strömungsmaschinen und kommt bei größeren Dampfdurchsätzen zur Anwendung. Zur Vermeidung von Erosion an den Turbinenschaufeln darf eine bestimmte Dampfnaße nicht überschritten werden; der Dampf wird dazu überhitzt. Man unterscheidet Gegendruckturbinen, Anzapf- und Entnahmeturbinen, Kondensationsturbinen. Die Regulierung der Turbine erfolgt im Fest- oder im Gleitdruckbetrieb, ggf. auch im modifizierten Gleitdruck. Eine Wirtschaftlichkeit ist bei hohen Vollbetriebsstunden gegeben.

#### *Betriebsweisen*

Wärme- und Stromkraftwerke arbeiten im Kondensationsbetrieb, wenn ausschließlich Strom erzeugt wird. Erfolgt eine Kraft-Wärme-Kopplung, also eine Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme, arbeitet die Anlage entweder im Gegendruckbetrieb oder im Entnahme-Kondensations-Betrieb.

Kondensationskraftwerke, die ausschließlich Strom erzeugen und die Abwärme nicht nutzen, sondern z.B. in einem Kühlturm herunterkühlen, arbeiten im Kondensationsbetrieb.

Beim Gegendruckbetrieb folgt die Stromerzeugung der Wärmenachfrage. Die relativ



## **C.A.R.M.E.N.-Information**

starre Kopplung von Strom- und Wärmebereitstellung kann sinnvoll sein, wenn eine sehr gleichmäßige Wärmenachfrage besteht, z.B. wenn Prozesswärme geliefert wird, nicht jedoch bei stark schwankender Wärmenachfrage, wie sie bei der Nutzung der Niedertemperaturwärme für die Raumbeheizung auftreten kann.

Beim Entnahme-Kondensations-Betrieb ist die Stromerzeugung teils von der Wärmebereitstellung entkoppelt; es ist teilweise oder vollständiger Kondensationsbetrieb möglich. Die Betriebsart macht Sinn, wenn die Wärmenachfrage jahreszeitlich schwankt, z.B. bei der Lieferung von Wärme an Haushalte. Sie ist allerdings mit einer relativ hohen Investition verbunden.

### *Möglichkeiten der Effizienzsteigerung*

Die Steigerung der Effizienz von Biomasseheizkraftwerken hatte in der Vergangenheit vor allem das Auffangen von gestiegenen Brennstoffkosten zum Ziel. Bei Heizkraftwerken mit Dampfkraftprozess und Dampfturbine wird auf Maßnahmen zurückgegriffen, die bei Großkraftwerken bekannt und erprobt sind, z.B. Vorwärmung der Verbrennungsluft, Erhöhung der Frischdampf Temperatur, Reduzierung der Abgastemperatur.

## **Holzvergasungsanlagen**

Die Technologie der Holzvergasung hat sich im dezentralen Bereich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und hat mittlerweile die meisten Anlagen im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung mit fester Biomasse in Betrieb. Daher gibt es zu dieser Technologie von C.A.R.M.E.N. e.V. eine eigene Broschüre („Kleine Holzvergasungsanlagen – Handlungsempfehlungen für Investoren“), die sich auf über 50 Seiten intensiv mit allen Aspekten von Holzvergasungsanlagen beschäftigt.