

# Die Abwärme von Blockheizkraftwerken kann intelligent genutzt werden

Absorptionskreisprozesse bieten vielfältige Möglichkeiten zur Abwärmenutzung und können den erhöhten Anlagenaufwand durch verbesserte Wirkungsgrade rechtfertigen

Von Petra Bittrich

**Primärenergie muss umgewandelt werden, ehe sie dem Verbraucher als Elektroenergie, mechanische Energie, Wärme oder Kälte zur Verfügung steht. Die Energiewandlungskette sollte im Sinne einer ressourcenschonenden und nachhaltigen Entwicklung so effizient wie möglich sein. In diesem Beitrag werden die Unterschiede zwischen einfacher Energiewandlung und Energietransformation dargestellt sowie die unterschiedlichen Formen von Absorptionskreisprozessen und ihre Einsatzmöglichkeiten für die Abwärmenutzung an Blockheizkraftwerken erläutert.**

Die qualitativ hochwertigsten Energien sind mechanische oder elektrische Energie sowie die beispielsweise in Brennstoffen gespeicherte chemische Energie. Sie lassen sich nahezu vollständig in andere Energieformen umwandeln. Die Qualitäten von Wärme und Kälte sind dagegen von ihrer jeweiligen Temperatur abhängig. Sie werden danach beurteilt, welcher Anteil der Wärme sich in Arbeit umwandeln lässt, bzw. welcher Betrag an Arbeit notwendig ist, um Kälte (Wärme unterhalb Umgebungstemperatur) bereitzustellen.

Bei der Umwandlung fossiler Energieträger in Arbeit, aber auch bei der Nutzung von Biomasse als Brennstoff oder bei der Verwendung von Biogas aus Vergärung oder thermischer Vergasung, steht am Beginn der Umwandlungskette eine Verbrennungsreaktion, mit der Hochtemperaturwärme erzeugt wird. Die an die Verbrennungsreaktion anschließenden Energiewandlungsprozesse lassen sich in einfache Energiewandlungsprozesse und Energietransformationsprozesse unterteilen.

### **Einfache Energiewandlung**

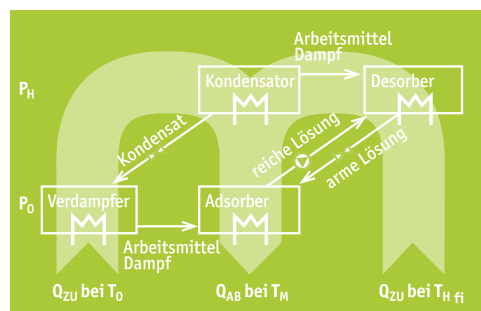
An der einfachen Energiewandlung sind nur zwei Energieformen mit unterschiedlicher Qualität, z.B. zwei Wärmen unterschiedlicher Temperatur, beteiligt. Die einfache Energiewandlung kann dann vorteilhaft sein, wenn eine Mehrfachnutzung der Energie auf unterschiedlichen Temperaturniveaus, d.h. eine Energiekaskade mit regenerativer Wärmenutzung, möglich ist. Effektive Regeneration ist jedoch daran gebunden, dass Wärmebedarf bei unterschiedlichen Temperaturen vorliegt, z.B. in Stoffwandlungsprozessen mit verzweigter Technologie, und dass die Temperaturdifferenzen zwischen den unterschiedlichen Niveaus der Wärmenutzung nicht zu groß sind. Die Abwertung der Qualität der Energie bei einfacher Energiewandlung ist endgültig, die Prozesse sind irreversibel.

### **Energietransformation**

Durch Energietransformation wird die bei der Umwandlung zur Verfügung stehende Potentialdifferenz zur Anhebung der Qualität einer Energieform genutzt. Der Potentialabbau erfolgt damit zumindest teilweise reversibel und die Energietransformation stellt im Gegensatz zur einfachen Energiewandlung eine effektivere Form der Energiewandlung dar. An Energietransformationsprozessen müssen mindestens drei Energieströme auf drei unterschiedlichen Qualitätsniveaus der Energie beteiligt sein. Beispiele für solche Energietransformationsprozesse sind Arbeitsmaschinen, in denen ein Teil der zugeführten Verbrennungswärme zu Arbeit aufgewertet wird und ein anderer Teil auf ein niedriges Temperaturniveau abgewertet wird. Andere Prozesse, z.B. Kompressions-Wärmepumpen und -Kältemaschinen, werten hochwertige Energie (Arbeit) ab, um dafür Wärme von niedrigerer Temperatur auf höhere Temperatur anzuheben.

### Wärmetransformationsprozesse

Neben den Prozessen mit Arbeitsbeteiligung gibt es auch Wärmetransformationsprozesse, an denen nur Wärmeströme auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus beteiligt sind. Das Funktionsprinzip der meisten Wärmetransformationsprozesse beruht auf der Verwendung eines Zweistoffgemisches mit einem niedrig siedenden Arbeitsmittel, das aus der gasförmigen Phase in ein höher siedendes Lösungsmittel aufgenommen – absorbiert – wird. Man spricht deshalb auch von Absorptionskreisprozessen. In der Praxis werden meist Ammoniak-Wasser und Wasser-Lithiumbromid als Arbeitsmittel-Lösungsmittel-Kombinationen verwendet.



Funktionsprinzip von Absorptionswärmepumpe und -Kältemaschine

In der Absorptionswärmepumpe (AWP) wird das Arbeitsmittel bei hohem Druck und hoher Temperatur im Desorber durch Heizwärmezufuhr angetrieben und im Kondensator unter Nutzwärmeabgabe wieder kondensiert (siehe die Grafik oben). Das Kondensat wird in den Verdampfer hinein auf den niedrigen Druck gedrosselt, so dass es aus der Umgebung Wärme aufnehmen kann. Der entstehende Arbeitsmitteldampf wird im Adsorber unter erneuter Nutzwärmeabgabe von der Lösung wieder absorbiert. Der Lösungs-kreislauf zwischen Adsorber und Desorber muss geschlossen werden.

Als Wärmeverhältnis der AWP wird das Verhältnis zwischen der in Kondensator und Absorber freiwerdenden Nutzwärme und der aufzuwendenden Desorberwärme bezeichnet. Es kann für den stark vereinfachten Fall, dass in jedem Apparat in etwa die gleiche Wärme umgesetzt wird, maximal den Wert zwei erreichen. Die gleichen Prozesse sind auch als Absorptionskältemaschinen (AKM) bekannt. Hier arbeitet der Verdampfer unterhalb der Umgebungstemperatur, und die Mitteltemperaturwärme wird an die Umgebung abgegeben. Das Wärmeverhältnis – Nutzen (Verdampferkälte) zu Aufwand (Desorberwärme) – liegt dann in der Größenordnung von eins.

Es gibt geschlossene Absorptionskreisprozesse auch unter Vertauschung der Druckniveaus – Absorber und Verdampfer arbeiten dann bei hohem Druck. Solche Anlagen bezeichnet man als Absorptionswärmetransformator im engeren Sinne. Diese Anlagen eignen sich zur Aufwertung des Temperaturniveaus einer Abwärme, die sonst im Produktionsprozess nicht mehr genutzt werden kann, weil ihre Temperatur zu niedrig ist. In diesem Fall kann ein Teil der Abwärme durch den Wärmetransformator auf nutzbare Temperatur angehoben werden, ein anderer Teil wird auf Umgebungsniveau abgegeben. Das theoretische Wärmeverhältnis zwischen angehobener und abgewerteter Wärme beträgt 0,5.

Möglich sind auch offene Prozesse, in denen das Arbeitsmittel an einer Stelle aus der Umgebung entnommen wird, z.B. der in Verbrennungsabgasen enthaltene Wasserdampf, und an einer anderen Stelle wieder an die Umgebung abgegeben wird, z.B. als flüssiges Kondensat. Bekannt sind schließlich auch arbeitsleistende Kreisprozesse, in denen aus einem Arbeitsmittel-Lösungsmittelgemisch das Arbeitsmittel ausgetrieben, in einer Turbine entspannt und anschließend wieder in die Lösung absorbiert wird.

Die Wärmemengen, die in Wärmetransformationsprozessen ab- und aufgewertet werden können, sind nicht beliebig, sondern mit dem Qualitäts- bzw. Temperaturunterschied der beteiligten Energien verknüpft. Da die Wärmeverhältnisse der Absorptionskreisprozesse durch die näherungsweise gleichen Wärmemengen, die in allen Apparaten umgesetzt werden, weitgehend festgelegt sind, sind auch die erreichbaren Temperaturverhältnisse nicht frei wählbar. Diese Tatsache bringt einen erhöhten Aufwand bei der Integration von Absorptionskreisprozessen in ein technologisches System mit sich.

**Blockheizkraftwerke** sind z.B. öl- oder gasgetriebene Motoren, die über einen Generator zur Elektroenergieerzeugung genutzt werden. BHKW sind im Gegensatz zu KWK-Anlagen auf Basis von Dampfturbinen in einem sehr breiten Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis zu einigen Megawatt verfügbar und haben sich deshalb im Bereich der dezentralen Energieversorgung stark durchgesetzt. Im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung können BHKW auch für die Nutzung von Biogas aus der Vergärung oder aus thermischer Vergasung oder Deponieabgas genutzt werden.

#### **Einsatzmöglichkeiten von Absorptionskreisprozessen**

Im Weiteren sollen einige Einsatzmöglichkeiten von Absorptionskreisprozessen im Zusammenhang mit der Abwärmenutzung an **Blockheizkraftwerken** dargestellt werden, an denen das Kompetenzfeld „Nachhaltige Energieversorgung von Gebäuden“ der FHTW in den vergangenen Jahren beteiligt war bzw. noch beteiligt ist.

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind Anlagen zur besonders effektiven Bereitstellung von Heizwärme in der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Während im Heizkessel die Verbrennungswärme durch einfache Energieumwandlung ausschließlich abgewertet und zur Heizwärmebereitstellung genutzt wird, wird im Blockheizkraftwerk das hohe Potential der Verbrennungswärme zunächst zur Arbeitserzeugung genutzt, und die Abwärme des Prozesses dann als Heizwärme verwendet.

Die Heizwärmebereitstellung kann im BHKW sowohl aus Motor- als auch aus Abgasabwärme erfolgen. Der Temperaturbereich der ausgekoppelten Wärme liegt wegen der Erfordernisse der Motorkühlung zwischen ca. 80° Celsius, bei heißgekühlten Motoren bis 110° Celsius Vorlauftemperatur und ca. 70° Celsius Rücklauf-

temperatur, während die Abgaswärme in einem Temperaturbereich von 400° Celsius bis zur Umgebungstemperatur anfällt. Eine Faustregel besagt, dass beide Wärmen sowie die Elektroenergie jeweils ca. ein Drittel der eingesetzten Brennstoffenergie betragen.

#### **Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung**

Beim „klassischen“ Einsatz zur Wärmebereitstellung durch Kraft-Wärme-Kopplung wird das BHKW nach der Grundlast des Wärmebedarfs ausgelegt. Um ein häufiges An- und Abschalten des BHKW, das zu hohem Verschleiß führt, zu vermeiden, kann stets nur ein relativ kleiner Anteil des tatsächlichen Wärmebedarfs durch das BHKW gedeckt werden. Probleme für die Wärmenutzung ergeben sich insbesondere im Sommer, wenn kein Heizwärmebedarf für die Gebäude besteht. Hier kann sich eine Verbesserung der Wärmenutzung ergeben, wenn im Sommer ein Kältebedarf, z.B. für die Klimatisierung der Räume, besteht. Durch verlängerte Laufzeiten oder größere Auslegungsleistung und damit höhere Stromproduktion können sich ökonomische Vorteile für das BHKW ergeben. Insbesondere auch bei einem kontinuierlichen technologisch bedingten Kältebedarf ist die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch Kombination von Absorptionskältemaschine und BHKW zu bedenken.

Probleme bestehen bei der Nutzung des Motorkühlwassers für die Desorberheizung durch die niedrige Heiztemperatur, hier müssen eventuell mehrstufige Absorptionsprozesse ins Auge gefasst oder Leistungseinbußen bei der Kälteerzeugung hingenommen werden. Untersuchungen zur energetischen Analyse und zu einem möglichen Einsatz von Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungen wurde im vergangenen Jahr im Rahmen von Diplomarbeiten in zwei Berliner Großbetrieben durchgeführt.

Als Problem erwies sich dabei in beiden Fällen die unzureichende Datenerfassung im Bereich der Kälteerzeugung. Zahlreiche Kleinverbraucher mit unterschiedlichen Vor- und Rücklauftemperaturen, deren Anschaffung und Einbindung in den Produktionsprozess meist nur lokal erfolgt, erschweren die betriebswirtschaftlichen Untersuchungen. Belastet sind die Absorptionskältemaschinen durch hohe Investitionskosten und niedrige Benutzungsdauern, sofern kein Prozesskältebedarf vorliegt.

Während in früherer Zeit Absorptionskältemaschinen ausschließlich im großen Leistungsbereich hergestellt und produziert wurden, geht die Tendenz heute auch zur Entwicklung von Kleinkältemaschinen, die z.T. auch durch Solarwärme angetrieben werden können.

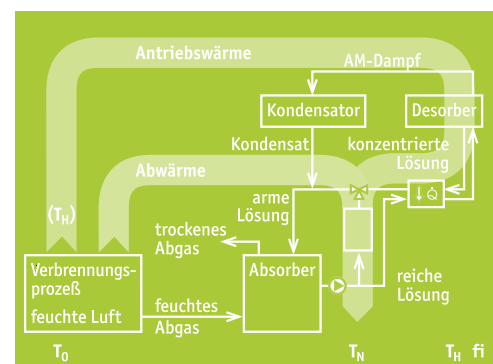
#### Brennwert- und Abgaswärmenutzung bei hohem Wärmebedarf

Das Abgas der Verbrennungsmotoren beinhaltet eine erhebliche Menge an Wasserdampf, der durch eine Abgaswärmenutzung nach dem Verbrennungsprozess (Brennwertnutzung) zurück gewonnen werden kann. Für Anwendungen, in denen ein großer Heizwärmebedarf besteht, kann dadurch eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Prozesses erreicht werden. Die Hochtemperaturbrennwertnutzung ist nicht nur für das Abgas von Blockheizkraftwerken, sondern auch für die Wärmerückgewinnung aus dem Abgas einfacher Heizkessel von Interesse.

Hochtemperaturbrennwertnutzung beruht auf dem Prinzip eines offenen Absorptionswärmepumpenprozesses. Eine hygroskopische Lösung wird in einem Absorber in direkten Kontakt mit dem Abgas gebracht, nimmt dabei die fühlbare Wärme des Gases auf, und absorbiert einen Teil des im Rauchgas enthaltenen Wasserdampfes auf einem Temperaturniveau, das deutlich höher liegt als der ursprüngliche Taupunkt des Abgases.

Die im Absorber aufgenommene Wärme, einschließlich der entstandenen Absorptionswärme, wird anschließend in einem Wärmeübertrager als Nutzwärme aus dem Lösungskreislauf ausgekoppelt. Der absorbierte Wasserdampf wird aus einem Teilstrom der Lösung in einem Desorber mit Heizdampf aus der Lösung ausgetrieben und seine Kondensationswärme kann im Kondensator nochmals bei einer Temperatur von ca. 100° Celsius genutzt werden.

Das Kondensat wird aus dem Kreislauf ausgeschleust und kann zusätzlich zu erheblichen Frischwassereinsparungen innerhalb des Produktionsprozesses führen. Die regenerierte Lösung wird, nach einem regenerativen Wärmeaustausch mit der wasserreichen Lösung, wieder mit dem Gesamtstrom gemischt und in den Absorber zurückgeleitet.



Prinzipischeschema der Hochtemperaturbrennwertnutzung

Die Abgaswäsche mit einer hygroskopischen Lösung setzt den Abgastaupunkt gegenüber der herkömmlichen Kondensationstechnik deutlich herauf. Die hohen Wärmenutzungstemperaturen ermöglichen einen sinnvollen Einsatz der Brennwerttechnik auch im industriellen Bereich, wo diese Technik bisher wegen niedriger Wärmenutzungstemperaturen kaum eingesetzt wurde.

### Weiterführende Literatur

Bittrich, Petra. Energietransformation, Shaker Verlag 2001.

Bittrich, Petra, T. Bergmann, D. Hebecker: Erste Anwendung eines offenen Absorptionskreisprozesses zur Hochtemperaturbrennwertnutzung in einem Nahwärmenetz.

VDI-Berichte 1746, „Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung“, S. 397 – 409, Düsseldorf, 2003.

Pokojsski, M. u.a., Hochtemperaturbrennwertnutzung in Dampfkesselanlage, Euroheat & Power 36 (2007), S.54/55.

Der Aufbau und die Inbetriebnahme einer durch die BHF-Verfahrenstechnik GmbH installierten HT-Brennwertnutzungsanlage im Heizkraftwerk Buch der Vattenfall Europe GmbH wurde durch die FHTW wissenschaftlich begleitet. Der Einsatz der Brennwertnutzung kann auch in Kraftwerken mit notwendiger Brennstoffvortrocknung (Biomasse, Braunkohle) ins Auge gefasst werden, weil hier durch die Einsparung von Niederdruckanzapfdampf zusätzliche elektrische Leistung in der Turbine erzeugt werden kann.

### Abwärmenutzung mit zusätzlicher Arbeitserzeugung

Für zahlreiche Einsatzgebiete von Blockheizkraftwerken ist eine zusätzliche Wärmeauskopplung aus dem Abgas für Heizzwecke nicht sinnvoll, weil die zur Verfügung stehende Abwärme ohnehin schon kaum genutzt werden kann. Das trifft z. B. auf Anlagen zu, bei denen die Verwertung eines Gases im Vordergrund steht und der Wärmebedarf im Umfeld gering ist, wie es häufig bei der Biogasproduktion in landwirtschaftlichen Produktionsbetrieben der Fall ist.

Hier kann die Erzeugung eines zusätzlichen Anteils von Elektroenergie oder mechanischer Arbeit aus einem Niedertemperaturkreisprozess neben der Verbesserung der Effektivität des Prozesses auch noch zu einer erhöhten Wärmenutzung führen, die den für die Erlangung des KWK-Bonus erforderlichen Gesamtnutzungsgrad von 70 Prozent zu erfüllen hilft. Aber auch für den mobilen Betrieb sind Abwärmenutzungsprozesse denkbar, die den insbesondere im Teillastbereich schlechten Wirkungsgrad der Verbrennungsmotoren aufbessern können. Bei der Abwärmenutzung wird sowohl der Einsatz von Dampfkraftprozessen, ORC (Organic-Rankine-Cycle, Dampfkraftprozesse mit organischem Arbeitsmittel) als auch der Einsatz eines arbeitsleistenden Absorptionskreisprozesses (Kalina-Prozess mit dem Arbeitsmittelgemisch



**Petra Bittrich**, Jahrgang 1959, war nach dem Studium der Verfahrenstechnik viele Jahre als Lehrerin im Hochschuldienst tätig sowie als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TH Merseburg und der Martin-Luther-Universität Halle auf

dem Gebiet Thermodynamik und Energietechnik. 1992 promovierte sie, 2000 folgte die Habilitation zur Theorie und Anwendung von Absorptionskreisprozessen. Petra Bittrich entwarf und betreute zahlreiche Versuchs- und Pilotanlagen zur Abwärmenutzung, u.a. zur Hochtemperaturbrennwertnutzung von feuchten Verbrennungsabgasen. Seit 2004 ist sie Professorin im Studiengang Regenerative Energiesysteme der FHTW Berlin und betreut das Themengebiet Energie aus Biomasse.

Ammoniak-Wasser) diskutiert. Der Einsatz von Absorptionskreisprozessen erfordert zwar einen erhöhten Anlagenaufwand, ermöglicht aber die Einbeziehung der bei niedrigen Temperaturen anfallenden Kühlwasserabwärme in die Abwärmenutzung und vermindert durch das gleitende Temperaturniveau bei der Verdampfung die äußeren Verluste des Prozesses.

Im Rahmen eines durch die Technologiestiftung Berlin (TSB) und europäische Fördermittel unterstützten Forschungsprojektes werden an der FHTW in Kooperation mit der TU Berlin und einem Praxispartner vergleichende Untersuchungen zur Effektivität beider Prozesse durchgeführt.