

Elektrotechnische Aspekte der Kraft-Wärme-Kopplung mit Motor-Blockheizkraftwerken

Nach Vorträgen beim VDE Kassel am 23.06.2005 und beim VDE Göttingen am 06.10.2005

Dipl.-Ing. Norbert Nordmeyer (VDE / VDI)

1. Zusammenfassung:

Blockheizkraftwerke (BHKW) werden seit Beginn der 80er-Jahre in unterschiedlichsten Objekten (Hallenbäder, Schulen, Kläranlagen usw.) zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und in letzter Zeit zunehmend zur energetischen Biomassennutzung betrieben. Die gekoppelte Stromerzeugung erfuhr Neuerungen durch die Einbeziehung von Stirlingmotoren, Mikrogasturbinen, Permanentmagnet-Generatoren und Brennstoffzellen. Durch die Weiterentwicklung von lokalen Steuerungen hin zu immer leistungsfähigerer Elektronik, schnellerer Datenübertragung und größerer Speicherkapazität ergaben sich immer mehr Möglichkeiten, die Betriebsweise zu verbessern und die einzelnen Anlagen in übergeordnete Systeme zu integrieren. Vorgestellt werden die Anforderungen an die elektrischen und elektronischen Komponenten und Lösungen hinsichtlich MSR-Technik, Überwachung und Dokumentation, Datenhistorie, Leistungsteil und sowie die Integration in elektrische Netze. Die Hintergründe zu Stichworten wie Netzanschlussbedingungen, Netzparallelbetrieb, Internet-unterstützte Überwachung, "Virtuelles Kraftwerk" werden erläutert und Kriterien vorgestellt.

2. Kraft-Wärme-Kopplung

Bei der Kraft-Wärme-Kopplung wird durch die gleichzeitige Nutzung von Strom und Wärme innerhalb einer einzigen Anlage eine unter globalen Aspekten besonders hohe Brennstoffausnutzung gegenüber konventionellen Systemen (Strom aus Großkraftwerken, Wärme aus Kesselanlagen) erreicht. Die dezentrale, bedarfsnahe Anwendung der KWK und die Nutzung von Sondergasen (Biogas, Klär- und Deponiegas) führen zur Ressourcenschonung und zur Minderung der globalen Emissionen [1], [2], [3], [4], [5].

Die gekoppelten Prozesse stellen hohe Anforderungen sowohl an die Anlagentechnik und die Elektro-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (EMSR) als auch Systemeinbindung in das elektrische Netz und die Wärmeversorgung.

3. Hauptkomponenten

Eine **BHKW-Anlage** besteht aus ein oder mehreren BHKW-Modulen sowie Spitzenkessel(n), der Brennstoffversorgung, einer Verbindung zum elektrischen Netz (Hausnetz oder öffentliches Netz), der Einbindung in ein Heizsystem und schließlich der Abgasanlage.

Ein **BHKW-Modul** beherbergt als Hauptbestandteile ein Antriebsaggregat und einen davon angetriebenen Elektrogenerator, ferner Pumpen, Lüfter und die gesamte EMSR-Technik. Alles ist kompakt und hinsichtlich Schwingungen entkoppelt auf einem gemeinsamen Grundrahmen, meist in einer Schallschutzkabine montiert (**Abb. 1**).

3.1 Brennstoffversorgung

Grundsätzlich lassen sich alle Brennstoffe für KWK nutzen. Für kleinere BHKW werden zum Antrieb hauptsächlich Flüssigbrennstoffe (z. B. Diesel, RME), Gase (Erd-, Flüssig-, Bio-, Klär-, Deponie- und Grubengas) sowie Wasserdampf eingesetzt. Das Brenn- bzw. Treibstoffangebot kann gleichmäßig und homogen aber auch diskontinuierlich und von wechselnder Zusammensetzung sein [6].

3.2 Antrieb

In BHKW werden alle Typen von Verbrennungsmotoren (Gas-Otto-Motor, Dieselmotor) als Antriebsaggregat eingesetzt, ferner Gasturbinen, Stirlingmotoren, Spilling-Dampfkolbenmotoren, Dampfschraubenmotoren und Dampfturbinen sowie Brennstoffzellen [7].

Im Folgenden werden ausschließlich Verbrennungsmotor-BHKW und hierbei Gas-Otto-Motoren betrachtet.

Die eigentliche Verbrennung muss je nach Motortyp und Abgasbehandlung ($\lambda = 1$ -Motor mit 3-Wege-Katalysator, Magermotoren mit $\lambda = 1,5$ bis $1,8$) mittels Lambda-Regelung und Lambda-Stellventil unterschiedlich behandelt werden. Bei $\lambda = 1$ ist eine Toleranz von nur 2 ‰ einzuhalten, bei Magerbetrieb sind es 5 ‰. Zusammen mit Drehzahlregler und Leistungsregler komplettiert sich das System. Bei den Magermotoren gibt es Maschinen mit Turbolader sowie interner oder externer Gemischkühlung.

3.3 Start- und Zündanlage

Je nach Anforderungen (Netzparallelbetrieb, Notstrombetrieb) kommt die Startenergie aus einem Netzstartgerät oder einer robusten Starterbatterie. Der Anlasser wird betätigt, über die Gasregelstrecke wird zeitverzögert Gas zugeführt, im Gas-Luft-Mischer mit Luft gemischt. Dadurch steht im Verbrennungsraum ein zündfähiges Gemisch bereit, die Zündeinrichtung gibt Hochspannung (ca. 50 kV) auf die Zündspulen, der Motor beginnt zu drehen und wird durch einen elektronischen Drehzahlregler auf die Nenn Drehzahl gebracht.

3.4 Elektrogenerator

Bei BHKW sind Drehstromgeneratoren üblich. Bei kleineren Anlagen werden Asynchron-generatoren eingesetzt, die wegen des Blindstrombedarfes für den Aufbau des Magnetfeldes meist eine Kompensationsanlage (i. a. Kondensatoren) benötigen, um den $\cos \phi$ innerhalb der Grenzen zu halten um die Scheinleistung und damit den Netzstrom nicht zu hoch werden zu lassen.

Grundsätzlich lassen sich die Asynchrongeneratoren auch als Anlasser des Verbrennungsmotors einsetzen, jedoch wird dieses nur selten praktiziert. Gründe sind die hohen Anfangsströme und die höhere Belastung der Wicklungen.

Größere Generatoren werden grundsätzlich mit Synchron-Generatoren mit automatischer $\cos \phi$ -Regelung ausgerüstet, die keinerlei externe Kompensationseinrichtung benötigen. Ferner sind nur diese Generatoren ohne weitere Maßnahmen für einen Insel-/Notstrombetrieb tauglich (siehe 3.5.2).

Dreht der jeweilige Generator nach dem Starten mit Zieldrehzahl, kann mittels Synchronisier-einrichtung die Verbindung mit dem Versorgungsnetz hergestellt werden.

Bei einigen BHKW werden permanentmagnet-erregte Generatoren mit nachgeschalteten Wechselrichtern eingesetzt. Ziel ist es hier, den Verbrennungsmotor von der netzbedingten Drehzahl zu entkoppeln und so im mechanischen Optimum zu betreiben.

3.5 Elektrischer Anschluss

3.5.1 Parallelbetrieb mit dem öffentlichen Netz

Für den Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen mit dem öffentlichen Netz sind die Richtlinien der Netzbetreiber maßgebend [8], [9], jeweils den Spannungsebenen zugeordnet.

Die Synchronisation erfolgt nach Abgleich von Frequenz, Phasenlage und Amplitude der Spannungen mittels Leistungsschalter. Zum sicheren Betrieb werden laufend die relevanten Kenngrößen überwacht und die Maschine ggf. nach Ansprechen der dafür eingebauten Relais (Unter-/Überfrequenz, Unter-/Überspannung, Vektorsprung) abgeschaltet.

Die Leistung der BHKW muss bei dem evtl. Einsatz von Transformatoren und bei der Netzplanung bzgl. Lastfluss und Kurzschlussstrom berücksichtigt werden.

3.5.2 Notstrom- oder Netzersatzfunktion

BHKW mit Synchrongeneratoren können ohne führendes Netz betrieben werden, dafür ist die Frequenz zu regeln. Dieser Einsatz kann von einfachen Insel-Lösungen über Netzersatzanlagen zu den eigentlichen Notstromanlagen reichen [10]. Neben den üblichen Dieselgeneratoren sind unter bestimmten Voraussetzungen auch Gasmotor-BHKW als Notstromaggregate zugelassen [11], [12], [13]. Der $\cos \phi$ wird in diesen Fällen nicht geregelt.

Die VDE – Normen unterscheiden hier zwei Bereiche:

In Deutschland wurden medizinisch genutzte Bereiche jahrzehntlang nach der VDE 0107 installiert. Diese Norm wurde im November 2002 ersetzt durch DIN VDE 0100-710 [14].

Bereiche mit Menschenansammlungen regelt DIN VDE 0100-718 (ehem. VDE 0108) [15].

Die Anforderungen umfassen eine von dem abzusichernden Netz unabhängige Brennstoffversorgung (Erdgas ohne elektrische Hilfsantriebe, Flüssiggas), eine robuste Starter-Batterie, einen stärker dimensionierten Synchron-Generator (kVA statt kW), Rücksynchronisierereinrichtungen und schließlich einen Notkühler zur Wärmeabfuhr bei einem Notstromfall ohne Wärmeabnahme.

3.6 Sicherheitstechnik

Alle Teilsysteme der Gesamt-BHKWs werden überwacht. In Gas- und Heisswasserleitungen befinden sich Druckwächter, Druckschalter und Temperatursensoren.

Öldruck- und Ölstandsschalter sichern den Motor ab. Der Netzschutz wurde bereits angesprochen. Gas- und Rauchmelder innerhalb der BHKW-Schallschutzkabinen komplettieren die Sicherheitskette.

3.7 Wärmesystem

Die Einbindung des BHKWs in die Heizungstechnik erfolgt a) hydraulisch und b) über eine übergeordnete Steuerung. Zu b) gehört die Kesselfolgeschaltung, die den BHKW-Modulen Priorität gibt, wobei Taktzeiten (Start-/Stop-Verhältnis) und Laufzeiten mit erfasst werden, um

z. B. bei mehreren Modulen einen Ausgleich unter diesen herbeizuführen. Die Ansteuerung der Pumpen (drehzahl geregelt, in Abhängigkeit z. B. von Volumenstrom bzw. Temperaturen) gehört ebenso zu diesem System wie die Überwachung der Wärmeleitungen auf Leckage. Die Wärmemengenzähler bei den Wärmekunden bilden dann das Ende dieser Kette. Eingesetzt werden hierfür Speicherprogrammierbare Steuerungen. Die Darstellung des System in Plänen erfolgt normgerecht [16].

3.8 Betrieb

Die installierte Anlagentechnik muss auch mit unterschiedlichen Randbedingungen betrieben werden. Für die Optimierung müssen Parameter verändert oder für Statistiken (z. B. Statistisches Bundesamt, BAFA, Zollamt wegen Ökosteuernbefreiung usw.) Daten erfasst und dokumentiert werden (Datenhistorie). Große Anlagen über 1.000 kW Brennstoffleistung und Sondergas-BHKW unterliegen der Genehmigungspflicht gem. Bundesimmissionschutz Gesetz (BImSchG), zur Einhaltung der geforderten Werte sind Messungen und Einstellungen erforderlich. Nach Wartungsarbeiten werden Werte neu justiert.

Die Bedienung erfolgt oft durch ein speziell angepasstes Bedienterminal, die Netzüberwachung über Multifunktionsrelais (MFR, **Abb. 2**). In der Anlage werden sowohl analoge Signale (z. B. 0 – 20 mA Leistungsvorgabe, 0 – 20 mV λ -Sondenspannung) als auch digitale Daten verarbeitet.

3.9 Datenfernübertragung

Neben den lokalen Möglichkeiten des MFR und des Bedienterminals können Daten auch im Objekt an eine Warte oder per Datenfernübertragung (DFÜ) in eine Zentrale übermittelt werden. In der umgekehrten Richtung sind Parametrierungen und andere Eingriffe möglich, wobei die Sicherheitsaspekte (z. B. bei der Fern-Quittierung von Störungen) zu beachten. Die Ankopplung geschieht dabei über Modem-Verbindungen, moderner sind Internet-basierte Lösungen, die auch die Beobachtung per Webcam einschließen.

4. Virtuelles Kraftwerk

Die gemeinsame Betrachtung mehrerer kleiner Einheiten leitet über zur Idee des „virtuellen Kraftwerkes“. Dabei sind die Stabilitätskriterien für den Netzbetrieb zu berücksichtigen (Momentanreserve, Sekundenreserve usw.). Weiter gehen Untersuchungen des Institutes für Solare Energieversorgungstechnik e. V., Kassel (zusammen mit 17 Industriepartnern), die sowohl Erzeugung als auch Bedarf zum Gegenstand haben und ein Bidirektionales Energie Management einsetzen [17], [18], [19], [20].

5. Ausblick

Komplexere z. B. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung [21] und sensiblere Systeme (z. B. Biogasanlagen mit empfindlicher Biologie, Biogasaufbereitungsanlagen) erfordern immer mehr Überwachung und Steuerung. Neue Technologien werden daran angepasst. Der Bedarf der Wärme- und Stromnutzer wird in die Betrachtungen integriert und mit zur Steuerung herangezogen.

Literatur und Internet-Adressen

- [1] BHKW-Fibel (1993), ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern
- [2] BHKW-Grundlagen (1999), ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern
- [3] www.asue.de
- [4] www.bhkw-info.de
- [5] www.bhkw-infozentrum.de
- [6] BHKW und Methanzahl - Einfluß der Gasbeschaffenheit auf den Motorbetrieb (2000), ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern
- [7] Mikro-KWK - Motoren, Turbinen und Brennstoffzellen (2001), ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Kaiserslautern
- [8] VDEW, Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz - Richtlinie für Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, 2001 mit Ergänzungen des VDN
- [9] VDEW, Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz - Richtlinie für Anschluß und Parallelbetrieb von Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz, 1998
- [10] VDN – Verband Deutscher Netzbetreiber VDN e. V. beim VDEW: Notstromaggregate – Richtlinie für Planung, Errichtung und Betrieb von Anlagen mit Notstromaggregaten, 2004
- [11] DIN 6280-13
Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Teil 13
Sicherheitsstromversorgung in Krankenhäusern und in baulichen Anlagen für Menschenansammlungen
- [12] DIN 6280-14
Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Teil 14
Blockheizkraftwerke (BHKW); Grundlagen, Anforderungen, Komponenten, Ausführung und Wartung
- [13] DIN 6280-15
Stromerzeugungsaggregate mit Hubkolben-Verbrennungsmotoren, Teil 15
Blockheizkraftwerke (BHKW); Prüfungen
- [14] DIN VDE 0100-710
Errichten von Niederspannungsanlagen -
Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art
Teil 710: Medizinisch genutzte Räume
ehem. DIN VDE 0107
- [15] DIN VDE 0100-718
Errichten von Niederspannungsanlagen –
Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art
Teil 718: Bauliche Anlagen für Menschenansammlungen
ehem. DIN VDE 0108
- [16] DIN 19227 Grafische Symbole und Kennbuchstaben für die Prozessleittechnik, Teil 1
- [17] Bendel, Christian: Energietransfer und Kommunikation bidirektional;
Erneuerbare Energien 10/2004
- [18] www.iset.uni-kassel.de
- [19] www.eus.de
- [20] www.projektdinar.de
- [21] www.koehler-ziegler.de -> <http://www.bosch-kwk.de/de/>



Abb.1:

BHKW-Kompaktmodul: Gasmotor-Generator-Einheit, schwingungsentkoppelt auf gemeinsamem Grundrahmen in Schallschutzkabine; komplett mit MSR-Technik, Gasregelstrecke, Zu- und Abluft, Netzstartgerät / Batterie, Schaltanlage, Wärmetauschern, Pumpen, Schmierölvorrat und Abgasschalldämpfer



Abb. 2

Frontseite eines BHKW-Moduls mit Bedienterminal und Multifunktionsrelais sowie weiteren Anzeigen und Bedienelementen (z. B. Nullvoltmeter, Quittierungstaster, Service-Schalter, NOT-AUS-Taster (unten))

Quelle: Köhler & Ziegler (ab 1.4.2012 Bosch KWK Systeme), Lollar