

Dieses Manuskript wurde für die Vorlesung Hydraulik im Masterstudiengang Energie- und Gebäudesysteme der Hochschule Biberach (HBC) erstellt. Da es darüber hinaus als Grundlage mehrerer Veröffentlichungen dient, wird es zu Recherchezwecken auf der Homepage der HBC öffentlich zugänglich gemacht.

© Hochschule Biberach, Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß, September 2022

# Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärme­erzeugung mittels BHKW und BW-Kessel

## Hydraulik von entscheidender Bedeutung

**Teil I: Block-Heiz-Kraft-Werke (BHKW) und Brennwertkessel (BW-Kessel) sowie deren Anforderungen an die Hydraulik**

Teil II: Hydraulische und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen mit BHKWs und BW-Kesseln

Teil III: Bewertung von Praxisbeispielen und Entwicklung optimierter Lösungsansätze

### Einleitung

Knapp 55 % der in Deutschland verwendeten Endenergie fließt in den Wärmesektor. Weit über die Hälfte (59 %) hiervon wird für Raumwärme und Brauchwassererwärmung auf einem Temperaturniveau meist deutlich unter 90°C benötigt [1]. Nur ca. 14 % davon wird derzeit durch erneuerbare Energien und damit CO<sub>2</sub>-frei bereitgestellt [2]. Die vom Klimaschutzplan [3] für 2050 angestrebte CO<sub>2</sub>-Neutralität kann nur mit einer Umstellung auf regenerative Energieträger erreicht werden. Dies lässt sich aber nicht von heute auf morgen erreichen.

Problematisch ist vor allem, dass die regenerativen Energiequellen Sonne, Wind und z.T. auch Wasser einer starken Fluktuation unterliegen und die benötigten Nutzenergien Strom und Wärme sich in großen Mengen und über lange Zeiten schlecht speichern lassen. Eine Möglichkeit, das Problem des zeitlichen Versatzes von regenerativem Energieangebot und Nutzenergiebedarf zu lösen, besteht in der Energieumwandlung und Speicherung in sogenannten Bio- oder Synthetischen Kraftstoffen, auch E-Fuels genannt. In diesem Bereich wird momentan sehr intensiv geforscht und entwickelt. Bis die notwendigen Energiemengen flächendeckend zur Verfügung gestellt werden können, wird es aber noch einige Jahre dauern. Schon heute lässt sich relativ klar vorhersagen, dass die Kosten dieser E-Fuels mit ca. 0,1 bis 0,2 €/kWh ohne Steuern [4,5,6] deutlich über dem von uns gewohnten Preisniveau von Heizöl oder Erdgas (0,025 bis 0,07 €/kWh) liegen werden.

Vor diesem Hintergrund müssen die am Markt vorhandenen Technologien sofort optimiert werden, um Kosten einzusparen. Dies gilt für sowohl für die Nutzung fossiler Energie, als auch die „zeitnahe

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärme­erzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Nutzung“ von regenerativer Energie in möglichst großem Umfang. Nur so können die ehrgeizigen Einsparziele für 2030 (55 % CO<sub>2</sub>-Reduktion bezogen auf 1990) [3] erreicht werden. Wenn parallel hierzu die Langzeitspeicherung von regenerativer Energie forciert wird, haben wir eine reale Chance, die für 2050 angestrebte CO<sub>2</sub>-Neutralität zu erreichen, wenn auch wahrscheinlich mit ein paar Jahren Verspätung. Für einen schnellen Fortschritt ist ein energisches Handeln auf allen Ebenen und in allen Bereichen unabdingbar und wichtiger, als die ewige Diskussion um den vermeintlich besten Weg.

### **Sometimes the Perfect is the Enemy of the Good!**

Es gilt also schnellst möglich:

1. den Verbrauch an Nutzenergie (Heizwärme) deutlich zu reduzieren (z.B. durch Gebäudewärmedämmung, kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung),
2. die direkte und zeitnahe Nutzung (Speicherkapazität im Bereich des Tagesverbrauchs) regenerativer Energien zu erhöhen (Solarthermie, Photovoltaik, Wärmepumpen),
3. die zur Deckung des Nutzenergieverbrauchs benötigten fossilen Endenergien durch Optimierung in der Energieumwandlung, -verteilung und -speicherung weiter stark zu verringern (Effizienzsteigerung im Bereich der Anlagentechnik) und
4. Langzeit-speicherbare, regenerativer Energieträger wie Holz, Bio- oder E-Fuels bereitzustellen.

Die vorliegende Beitragsreihe beschäftigt sich mit der zukünftigen Bedeutung von Block-Heiz-Kraftwerken (BHKWs) und Brennwertkesseln (BWK). Im Mittelpunkt steht die Steigerung der Anlageneffizienz bei bivalenten Systemen. Hier sind die Anlagenhydraulik und eine darauf abgestimmte Regelungsstrategie von entscheidender Bedeutung.

Teil I beschäftigt sich mit diesen Wärmeerzeugern und erläutert deren Anforderungen an die Hydraulik. Im zweiten Teil werden Probleme, die aus den z.T. gegensätzlichen Anforderungen resultieren, erörtert. Der dritte Teil zeigt Lösungsvorschläge aus der Praxis und beurteilt diese. Abschließend werden eigene optimierte Lösungsansätze vorgestellt.

### **Effiziente Wärmeerzeuger für die Zukunft**

Im Rahmen der Energiewende spielt der Einsatz dezentraler Energiesysteme, bei denen der Strom mittels Block-Heiz-Kraftwerk (BHKW) nah am Ort des Verbrauchers erzeugt und die dabei zwangsläufig entstehende Abwärme möglichst umfänglich, d.h. verlustarm genutzt werden kann, eine bedeutende Rolle, da die hierbei erzielte Gesamtenergieausnutzung (exergetische Nutzung) sehr hoch ist. Ein mit Erdgas betriebenes BHKW kann gegenüber der getrennten Erzeugung von Wärme und Strom (Heizölkessel und Strom-Mix Deutschland) ca. 38 % CO<sub>2</sub> einsparen [7]. Wird beim Vergleich ein Steinkohlekraftwerk herangezogen, beträgt die Einsparung sogar 51% [7]. BHKWs können schon heute problemlos mit Biogas oder zukünftig mit Bio- bzw. E-Fuels betrieben werden. Unter Anrechnung der Wärmegutschrift (Einsparung an CO<sub>2</sub>-Emissionen durch fossil betriebene Heizungsanlagen) erzielen sie dann nach heute üblicher Bilanzierung „auf dem Papier“ sogar negative CO<sub>2</sub>-Emissionen von ca. minus 250 gCO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub> [8]. Diese Aussage von negativen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch BHKWs ist irreführend und nur bedingt richtig (abhängig von der Bilanzierung). Richtig aber ist, dass der Einsatz von BHKWs einen hilfreichen und wertvollen Beitrag zur umgehenden CO<sub>2</sub>-Reduzierung leistet. Beim Einsatz entsprechender regenerativer Energieträger kann hiermit auch effizient CO<sub>2</sub>-Neutralität erreicht werden.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

BHKWs erfordern hohe Investitionen. Um wirtschaftlich betrieben werden zu können, mussten sie in der Vergangenheit in der Regel hohe Auslastungen (Vollbenutzungsstunden) erreichen. Vor diesem Hintergrund wurden sie meist nur für eine Grundlastabdeckung mit mindestens 6.000 Vollbenutzungsstunden ausgelegt und mit Brennwertkesseln (BWK) zur Spitzenlastabdeckung ergänzt. Geänderte Strom-Vergütungen und Leistungspreise, vor allem aber im letzten Jahrzehnt stark gesunkene Finanzierungszinsen haben die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen stark verändert, so dass heute und zukünftig eine viel differenziertere Betrachtung bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit vorzunehmen ist. Gas-Brennwertkessel können dank Abgaskondensation realistische Jahresnutzungsgrade von bis zu 107% (bezogen auf den Heizwert) erreichen. Auch wenn man bei der Verbrennung von Erdgas keine CO<sub>2</sub>-Neutralität erreichen kann, lassen sich energetische Einsparpotentiale gegenüber meist überdimensionierten Öl-Standardkesseln von theoretisch ca. 30 % [9] realisieren. In Verbindung mit den um knapp 25 % geringeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Erdgas (0,202 kg CO<sub>2</sub>/kWh) gegenüber leichtem Heizöl (0,266 kg CO<sub>2</sub>/kWh) lässt sich somit insgesamt eine knapp 50 % ige CO<sub>2</sub>-Einsparung realisieren. In weiterer Zukunft könnten Brennwertkessel mit Biogas oder synthetischen Bio-Fuels befeuert werden. Ob und in welchem Umfang dies geschehen wird, oder ob eher Hochtemperatur-Wärmepumpen zum Einsatz kommen, ist derzeit nicht absehbar.

Moderne BHKWs werden auch mit Brennwerttechnologie angeboten. Durch die Abkühlung der Abgase unter den Kondensationspunkt kann der thermische Wirkungsgrad um 10 % bis max. 20 % erhöht werden. Die hydraulische Einbindung ist hier von besonderer Bedeutung.

Brennwertkessel (BWK) und Blockheizkraftwerke (BHKW) sind moderne etablierte Komponenten, die den Ruf einer hohen Effizienz genießen. Beide besitzen in der Praxis eine große Verbreitung, erreichen aber nur selten die von den Herstellern versprochenen und auf den Prüfständen erzielten Wirkungs- bzw. Nutzungsgrade [9,10]. Die häufig stark reduzierte Effizienz ist meist auf eine wenig oder gar nicht geeignete hydraulische Einbindung sowie auf eine nicht hinreichend auf die Hydraulik abgestimmte Regelungsstrategie zurückzuführen.

Es sei hier am Rande angemerkt, dass die von den Herstellern angegebenen Wirkungs- und ggf. Nutzungsgrade sich immer auf den Heizwert beziehen. Die von den Energieversorgern angeführten Werte für den Energieinhalt beziehen sich aber meist auf den Brennwert, der bei Erdgas 11 % über den Heizwert liegt. Da für die Krafterzeugung (Strom) nur der Heizwert dienlich ist, wird empfohlen, alle Angaben auf den Heizwert zu beziehen.

## **Bedeutung der Hydraulik in thermischen Energiesystemen**

Thermische Energiesysteme (Wärme-, Kälte- und Lüftungssysteme) lassen sich in die Bereiche Erzeugung, Hydraulik (Speicherung und Verteilung) und Verbraucher unterteilen. Die Aufgabe der Hydraulik liegt in der Übertragung von thermischer Energie vom Ort der „Erzeugung“ zu den „Verbrauchern“ mittels strömender Fluide. Ziel dabei ist, dass die thermische Energie zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge am richtigen Ort zur Verfügung steht. All dies soll mit einem minimalen Aufwand an Antriebsenergie (i. d. R. Strombedarf für Pumpen bzw. Ventilatoren) und mit geringen thermischen Verlusten erfolgen. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die eingesetzten, oft verschiedenartigen Verbraucher und Erzeuger möglichst nah an ihrem Wirkungsgrad-Optimum betrieben werden und das thermische Gesamtenergiesystem so möglichst energieeffizient

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

arbeitet. Dies gilt nicht nur für den Auslegungsbetriebspunkt, sondern vielmehr auch für den weiten Teillastbereich, in dem die meisten Systeme überwiegend betrieben werden.

In den 60/70er Jahren hat die Hydraulik von Heizungs- und Kälteanlagen weitgehend problemlos funktioniert. Auf einen effizienten und anlagenoptimierten Betrieb wurde allerdings wenig Augenmerk gelegt. Die Sicherung der Übertragungsleistung war das oberste Gebot, wozu die Anlagen großzügig überdimensioniert wurden. Überkapazitäten wurden durch Überströmung oder Drosselung abgebaut. Auf die damals z. B. in der Heizungstechnik verwendeten Standardkessel hatte ein solches Überströmen von warmem Vorlaufwasser über die hydraulische Weiche in den Rücklauf auch keinen negativen Einfluss. Darüber hinaus konnte aufgrund nicht regelbarer Komponenten auf eine effiziente Verteilung oftmals gar keine Rücksicht genommen werden.

Werden solche Altanlagen heute saniert oder Neuanlagen erstellt, müssen deren Komponenten (z. B. Brennwertkessel, Block-Heizkraftwerk, Kältemaschine, Wärmepumpe oder Schichtenspeicher und regelbare Umwälzpumpe) den aktuellen gesetzlichen und normativen Effizienzanforderungen entsprechen, was in der Praxis kein allzu großes Problem darstellt. Viel schwieriger gestaltet sich die Abstimmung der Komponenten aufeinander. Eine einfache „Komponentensubstitution“ nutzt die vielfältigen Möglichkeiten der Energieeinsparung und optimierten Betriebsweise bei weitem nicht aus und führt in der Praxis oft zu neuen, bisher ungekannten Problemen im Gesamtsystem. Die Einführung von regelbaren Pumpen hat hier in Verbindung mit der modernen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik in den vergangenen Jahren völlig neue Möglichkeiten eröffnet, die aber auch richtig eingesetzt werden müssen. So wäre es oft vorteilhaft und energiesparend, zur Reduzierung der thermischen Übertragungsleistung nicht nur die Vorlauftemperaturen, sondern auch den Fördermassenstrom der Umwälzpumpen im gesamten hydraulischen System an den Bedarf der Verbraucher anzupassen. Dabei darf aber eine Überprüfung der hydraulischen Anforderungen der eingesetzten Erzeuger und Verbraucher nicht außer Acht gelassen werden.

Die von den Komponentenherstellern im Heizungs-, Wärmepumpen- und Kälteanlagenbau vorgeschlagenen Hydraulik- und Regelungskonzepte konzentrieren sich allzu oft auf einen möglichst optimalen Betrieb der jeweiligen Einzel-Komponente am Auslegungspunkt. Vernachlässigt wird zum einen, dass die Systeme im laufenden Anlagenbetrieb meist nicht im Auslegungspunkt, sondern überwiegend unter Teillast betrieben werden. Zum anderen werden bei komplexeren Systemen mit mehreren Wärme- bzw. Kälteerzeugern und thermischen Speichern die oft sehr unterschiedlichen hydraulischen Anforderungen nicht hinreichend berücksichtigt. Beispielhaft sei hier eine Broschüre „Einbindung von kleinen und mittleren Blockheizkraftwerken / KWK-Anlagen“ [11] der Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) genannt, die zahlreiche Vorschläge liefert, ohne auf die grundsätzlich notwendige Klassifizierung von Wärmeerzeugern mit und ohne Anforderungen an den Mindestmassenstrom einzugehen. Auch die VDI Richtlinie 2073 Blatt 1 „Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung; Hydraulische Schaltungen“ [12] geht mit ihren hydraulischen Vorschlägen auf die Massenstromanforderungen unterschiedlicher Komponenten nur sehr allgemein ein. Vor allem wird hier die Hydraulik der Verbraucherkreise isoliert von den Anforderungen der Erzeuger betrachtet und es werden keine Hinweise für eine passende Regelstrategie geliefert.

Soll die Effizienz thermischer Energiesysteme nachhaltig verbessert werden, liegt das größte Potenzial nicht in der weiteren Optimierung der einzelnen Komponenten, sondern in deren Abstimmung in

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

einem möglichst weiten Arbeitsspektrum. Hierauf ist beim hydraulischen Entwurf und der Festlegung der Regelungsstrategie thermischer Energiesysteme von Anfang an ein spezielles Augenmerk zu legen.

## Anforderungen an die Hydraulik

Die in thermischen Energiesystemen eingesetzten Wärmeerzeuger und -verbraucher haben recht unterschiedliche Anforderungen an die Hydraulik. Dies betrifft zum einen die Vor- und Rücklaufemperatur, zum anderen aber auch den Massenstrom durch die jeweilige Komponente. Letzteres findet in der Praxis meist eine unzureichende Beachtung, obwohl beides, einen sehr großen Einfluss auf den störungsfreien und effizienten Betrieb hat.

## Anforderungen von Brennwertkesseln an die Hydraulik

### Temperatur-Anforderungen

Die bei richtiger Betriebsweise, hohe Effizienz von Brennwertkesseln beruht im Wesentlichen auf der Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfes. Abbildung 1 zeigt den auf den Heizwert bezogenen Feuerungstechnischen Wirkungsgrad und die anfallende spezifische Kondensat Menge über der Abgastemperatur. Es wird ersichtlich, dass oberhalb des idealen Taupunktes (57°C bei Erdgas mit  $\lambda = 1$ ) der Wirkungsgrad mit fallender Abgastemperatur linear ansteigt. Unterschreitet die Abgastemperatur den Taupunkt, kommt es aufgrund der großen Kondensationswärme zunächst zu einem deutlichen Wirkungsgrad-Anstieg, der sich mit einer weiteren Absenkung der Abgastemperatur abschwächt. Entgegen einer weit verbreiteten Meinung, wonach der optimale Betriebspunkt erreicht ist, wenn die Abgastemperatur den Taupunkt erreicht, verdeutlicht Abbildung 1 ganz klar, dass die Effizienz umso höher ist, je niedriger die Abgastemperatur liegt.

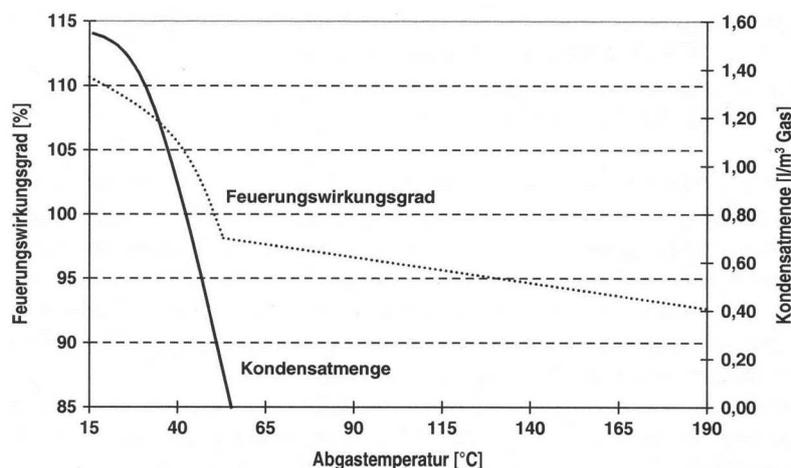


Abb. 1: Kondensatwasseranfall und Feuerungstechnischer Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Abgastemperatur (Verbrennung von Erdgas;  $\lambda = 1,0$ ) [9]

In Brennwert-Wärmeerzeugern wird, wie in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt, das Rücklaufwasser im Gegenstromprinzip zum Abgas geführt, weshalb die Rücklauftemperatur die Abgastemperatur maßgeblich beeinflusst.

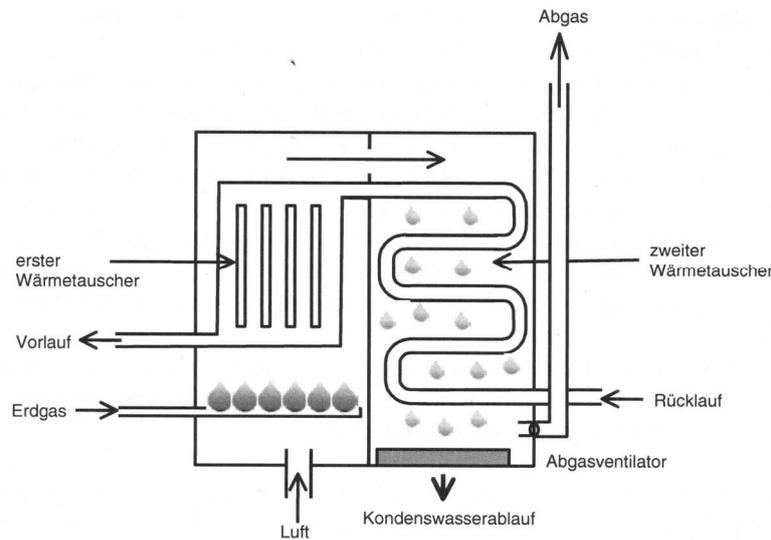


Abb. 2: Prinzipschema Brennwertkessel [13]

Je nach Dimensionierung und übertragener Leistung besteht am Wärmetauscher eine Grädigkeit von 5 bis 15 K. Somit kommt es erst bei Rücklauftemperaturen unterhalb von ca. 42 bis 52°C zur Abgaskondensation. Damit ist die Effizienz von Brennwertanlagen maßgeblich von tiefen Rücklauftemperaturen abhängig.

Ein in der Praxis üblicher Luftüberschuss bei der Verbrennung verschärft die Problematik dahingehend, dass die Kondensationstemperatur absinkt. Damit werden noch niedrigere Rücklauftemperaturen benötigt, um eine Effizienz-steigernde Kondensation zu erzielen.

Generell kann festgehalten werden, dass die Effizienz der Brennwerttechnik umso höher ausfällt, je niedriger die Rücklauftemperatur ist. Die Höhe der Vorlauftemperatur hat dagegen keinen direkten Einfluss auf das Kondensationsverhalten im BWK und beeinflusst die Effizienz durch die Abstrahlverluste nur in geringem Maße. In der Regel können alle Brennwertkessel Vorlauftemperaturen von bis zu 95°C erreichen. Brennwertkessel werden aber häufig an Abgas-Zuluft-Systeme aus Kunststoff angeschlossen. In diesem Fall dürfen sie mit maximal 75°C Vorlauftemperatur betrieben werden.

Vorsicht ist beim Einsatz von Gussbrennwertkesseln geboten. Aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber thermischen Spannungen dürfen diese Kessel meist nur mit einer Vorlauf-Rücklaufspreizung von 30 K betrieben werden. Werden hier von nur einem Verbraucher hohe Vorlauftemperaturen gefordert, muss die Rücklauftemperatur angehoben werden, was bei Brennwertnutzung effizienztechnisch völlig kontraproduktiv ist.

## Massenstrom-Anforderungen

Von entscheidender Bedeutung ist, dass beim überwiegenden Teil der heute verbauten BW-Kessel der Massenstrom nach unten begrenzt ist. Ursächlich für die Forderung eines solchen Mindestmassenstroms ist die Gefahr lokaler Verdampfung und Kavitation in schlecht durchströmten Bereichen des BWK-Wärmetauschers. Mindestmassenströme werden vornehmlich von sogenannten Hochleistungswärmetauschern gefordert. Diese Wärmetauscher weisen sich meist durch einen geringen Wasserinhalt und kleine Wasserkanäle aus. Hier wird im Nennbetrieb durch hohe Turbulenzen ein guter Wärmeübergang erzielt. Bei zu starker Reduzierung des Massenstroms besteht aber die Gefahr, dass zumindest lokal die Strömungsturbulenz auf laminar umschlägt, was zu einer Reduzierung der Wärmeabfuhr und damit zu einer Überhitzung mit Verdampfung und Kavitation führen kann. Um dies zu vermeiden, wird ein Mindestmassenstrom gefordert. Bei Massenstromvariablen Verbrauchern wird dieser meist bauseits zu garantierende Mindestmassenstrom durch ein Überströmen von Vorlaufwasser in den Rücklauf sichergestellt. Dies kann durch ein Überströmventil, wie in Abbildung 3 a, oder eine Hydraulische Weiche, wie in Abbildung 3 b dargestellt, geschehen. Der große Nachteil bei beiden Varianten ist die Rücklaufterperaturerhöhung, die in der Praxis sehr oft die Brennwertnutzung (Kondensation der Abgase) unmöglich macht und in jedem Fall die Effizienz der Wärmeerzeuger deutlich erniedrigt [9].

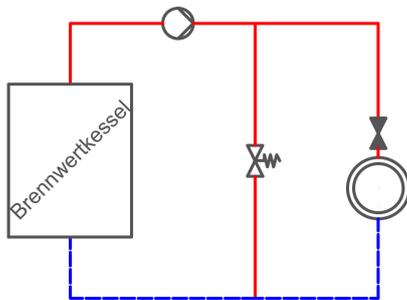


Abb. 3a: Garantierter Mindestmassenstrom mittels Überströmventil

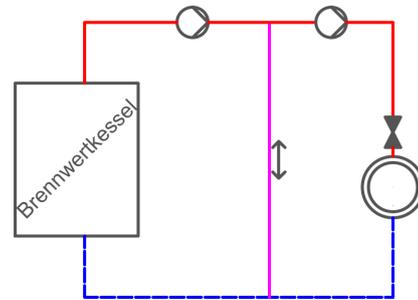


Abb. 3b: Garantierter Mindestmassenstrom mittels hydraulischer Weiche

Da die Sicherstellung eines Mindestmassenstroms in der Praxis von Planung und Ausführung hohe Aufmerksamkeit erfordert, wird hierauf in den Verkaufsunterlagen in der Regel nicht hinreichend eingegangen. Die Hersteller behaupten durch „optimierte Leistungsregelungen“ einen weitgehend störungsfreien Betrieb sicher stellen zu können, was in der Praxis nur bedingt funktioniert. Der notwendige Mindestmassenstrom wird von den Herstellern oft erst in der Betriebsanleitung angegeben. Einige Hersteller sprechen neuerdings nicht mehr von einem notwendigen Mindestmassenstrom, sondern begrenzen den zeitlichen Temperaturanstiegsgradienten des Wärmeerzeugers, was faktisch der Forderung nach einem Mindestmassenstrom gleichkommt.

An anderer Stelle wird speziell bei wandhängenden Thermen und Kesseln hervorgehoben, dass die beworbenen BW-Geräte **keine Anforderungen an den bauseitigen Mindestmassenstrom** stellen. Diese Formulierung weist darauf hin, dass der benötigte Mindestmassenstrom des Wärmeerzeugers durch eine interne Überströmung sichergestellt ist. Dies erleichtert zwar Planung und Ausführung, führt aber in der Praxis meist zu einer Rücklaufterperaturerhöhung und führt damit nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Effizienzsteigerung durch Nutzung der Kondensationswärme aus den Abgasen.

Hochleistungswärmetauscher besitzen aufgrund der geringen Strömungsquerschnitte und der damit erzielten hohen Turbulenz aber nicht nur den Vorteil einer guten Wärmeübertragung. Die speziell gestalteten Strömungskanäle weisen sehr hohe Druckverluste von nicht selten 40 bis 60 kPa im Nennbetriebspunkt des BW-Kessels auf. Da der Druckverlust eines Kessels proportional zum Massenstrom im Quadrat ist, sind solche Wärmeerzeuger im Massenstrom meist stark nach oben beschränkt.

Wärmetauscher in BW-Kesseln mit großem Wasserinhalt besitzen hingegen auch große Wasserkanäle. Hier kann die Wärme selbst ohne äußeren Massenstrom durch freie Konvektion von der Wärmetauscherwand abgeführt und im Kesselwasser eingespeichert werden. Auch wenn diese Kessel

- bei der sommerlichen Warmwasserbereitung aufgrund von größeren Aufheizverlusten eine schlechtere Effizienz aufweisen,
- mehr Platz benötigen und
- meist teurer sind,

besitzen sie zwei entscheidende Vorteile. Zum einen haben sie keine Anforderungen an einen Mindestmassenstrom, zum anderen ist der Druckverlust mit z.T. unter 2 kPa im Nennbetriebspunkt deutlich geringer.

### Anforderungen von Block-Heiz-Kraft-Werken an die Hydraulik

Unter Block-Heiz-Kraft-Werken (BHKW) versteht man eine vorkonfigurierte Einheit zur gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme. Diese Maschinen mit kleiner bis mittlerer Leistung (kleiner 1 kW bis ca. 1 MW elektrische Leistung) werden in den meisten Fällen von einem Hubkolbenmotor angetrieben, der mit Erdgas oder Sondergas versorgt wird. Die bei der Stromerzeugung (Kraft) unvermeidbar anfallende Abwärme des Motors wird zu Heizzwecken nutzbringend ausgekoppelt. Wie in Abbildung 4 beispielhaft dargestellt, werden die größten Abwärme-Mengen aus den Abgasen und der Motorblockkühlung ausgekoppelt. Bei großen Maschinen gibt es zusätzlich eine Motoröl- und eine Generatorkühlung.

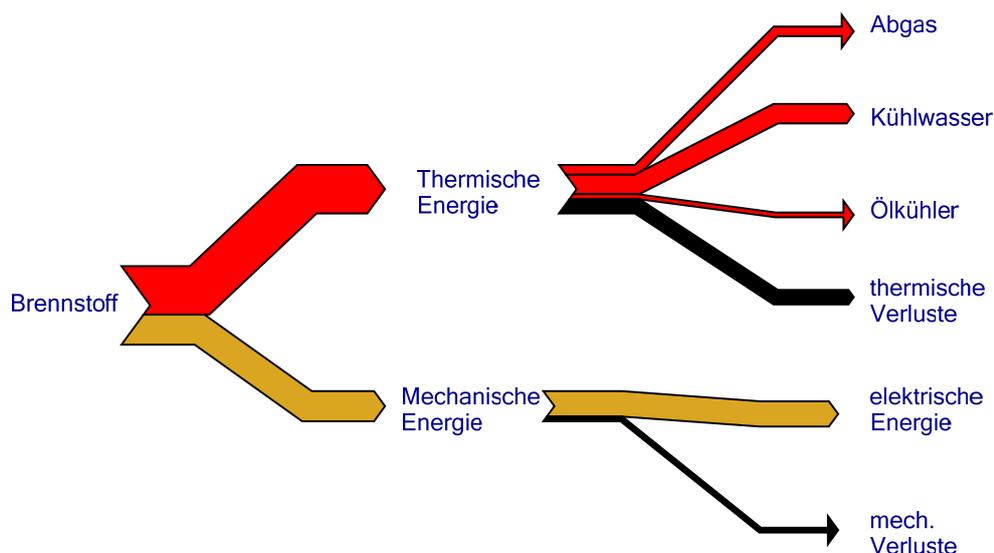


Abb. 4: Wärmeauskopplung bei BHKWs

STUDIENGANG / INSTITUT

Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL

**Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

## Temperatur-Anforderungen

Für einen effizienten, reibungsarmen Betrieb des Hubkolbenmotors wird dieser bei möglichst konstanten Temperaturen von in der Regel 90°C gefahren (Heißgekühlte Motoren, die bei höheren Temperaturen betrieben werden können, sind wesentlich teurer). Da die Gussmotorblöcke relativ empfindlich gegenüber thermischen Spannungen sind, werden sie in der Regel mit Rücklauftemperaturen von 70°C gekühlt, woraus sich eine relativ exakt einzuhaltende Vorlauf-Rücklaufspreizung von 90/70 am Motorblock ergibt. Ist die Rücklauftemperatur zum Motorblock kleiner 70°C kann sie durch eine Rücklauftemperaturenanhebung erhöht werden. Ist die Rücklauftemperatur jedoch größer 70°C, muss der Motor zur Vermeidung von Überhitzungsschäden abgeschaltet werden.

Unter Nennlast verlassen die Abgase den Motor mit mehreren hundert Grad Celsius. Je weiter sie abgekühlt werden, desto mehr Abwärme kann genutzt werden. Sind wie in Abbildung 5a dargestellt, Motorblock- und Abgaskühlung in Reihe geschaltet und liegt der Motorblock strömungstechnisch vor dem Abgaswärmetauscher, so können die Abgase auf minimal 100°C abgekühlt werden, wobei eine BHKW-Vorlauftemperatur von max. ca. 110°C erreicht werden kann.

In Abbildung 5b sind Motorblock- und Abgaskühlung ebenfalls in Reihe geschaltet. Allerdings liegt in diesem Fall der Abgas-WT vor der Motorblockkühlung. Somit können die Abgase weiter abgekühlt und damit die thermische Effizienz des BHKWs erhöht werden. Bei einer Rücklauftemperatur aus der Heizungsanlage von 30°C lassen sich die Abgase bis auf ca. 40°C abkühlen. Speziell bei Gasmotoren, die mit einem Luftverhältnis  $\lambda = 1$  betrieben werden, wird hierdurch der Kondensationspunkt der Abgase unterschritten und der Brennwerteffekt führt zu einer deutlichen Erhöhung des thermischen Wirkungsgrads und der thermischen Leistung.

Bei gleicher thermischer Leistung ist die benötigte Gasmenge eines BHKWs deutlich höher als bei einem BW-Kessel, da ja zusätzlich auch noch Strom erzeugt wird. Damit steigt aber auch die Abgasmenge und die hieraus gewinnbare Kondensationswärme an. Somit kann theoretisch die thermische Leistung von BHKWs durch Brennwertnutzung um bis zu 20 % gesteigert werden.

Allerdings darf die Tatsache nicht übersehen werden, dass bei dieser Schaltungsvariante die erreichbare BHKW-Vorlauftemperatur mit ca. 80°C deutlich geringer ausfällt.

Die Reihenfolge, in der Motorblock und Abgas-WT vom Kühlwasser durchströmt werden, hat aber nicht nur Einfluss auf den thermischen Wirkungsgrad und die maximal erreichbare Vorlauftemperatur, sondern auch auf die maximal zulässige Rücklauftemperatur. In allen Fällen muss nämlich sichergestellt werden, dass die Kühlwassereintrittstemperatur in den Motorblock nicht über 70°C ansteigt, da das BHKW sonst zum Schutz vor Überhitzung abgeschaltet werden muss. Bei der effizienteren Variante (Abb. 5b) muss sichergestellt sein, dass die Rücklauftemperatur aus der Heizungsanlage unter ca. 40 bis 50 °C bleibt, damit die Eintrittstemperatur von maximal 70°C in den Motorblock gewährleistet werden kann.

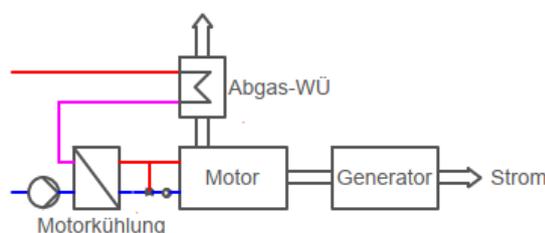


Abb. 5a: Motorblock vor Abgas-WT

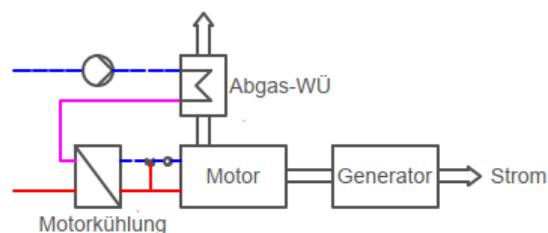


Abb. 5b: Abgas-WT vor Motorblock

STUDIENGANG / INSTITUT

Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL

**Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN

Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Nun lassen sich in diesem Bereich vielfältige Veränderungen und Optimierungen vornehmen. So wird bei sogenannten Brennwert-BHKWs der Abgas-WT oft in einen vor den Motorblock geschalteten Kondensations-WT und einen nach dem Motorblock angeordneten WT aufgeteilt. Werden hierzu noch WT-Bypass-Schaltungen implementiert, lässt sich das BHKW optimal an die äußeren Randbedingungen und Anforderungen anpassen. In vielen Fällen sind Motorblock und Abgas-WT aber auch parallel geschaltet, was ein guter Kompromiss sein mag.

Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

- BHKWs haben eine Anforderung an die maximal zulässige Rücklauftemperatur,
- die Höhe der gewünschten Vorlauftemperatur hat einen Einfluss auf den thermischen Wirkungsgrad und
- Brennwert-BHKWs sollen mit möglichst niedrigen Rücklauftemperaturen aus dem Heizungssystem angefahren werden.
- Die Nutzung der Kondensationswärme aus den Abgasen (Brennwertnutzung) sollte speziell bei Gasmotorischen BHKWs noch viel stärker ausgebaut werden. Bei konstantem Gaseinsatz und gleichbleibender Stromerzeugung lässt sich die thermische Ausbeute um bis zu 20 % steigern.

Da die Verbrennungsmotoren Kühlwasser-seitig meist recht empfindlich auf Verschmutzungen reagieren, bauen die meisten Hersteller einen WT zur Systemtrennung zwischen BHKW und Heizungssystem ein, wie in den Abbildungen 6a und 6b dargestellt. Hierbei muss allerdings die Grädigkeit an diesem WT berücksichtigt werden. Bei den heute üblichen Auslegungen reduziert sich damit die sekundärseitig (Heizungskreis) **maximal zulässige Rücklauftemperatur auf 60°C** und die **erreichbare Vorlauftemperatur oft auf 80°C** bis max. 85°C. Durch eine objektspezifische Planung und Konfiguration kann dieses Problem vermieden oder deutlich reduziert werden.

Die gegebenenfalls notwendige Anhebung der Eintrittstemperatur in den Motorblock wird heute in der Regel durch eine BHKW-interne Anhebung, wie in Abbildung 6a dargestellt, erreicht. Ist dies gegeben, so kann und soll auf die in Abbildung 6b dargestellte sekundärseitige Rücklauftemperaturanhebung schon aus Kostengründen verzichtet werden.

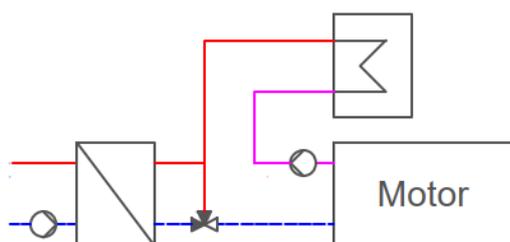


Abb. 6a: BHKW mit Systemtrennung und interner RLT-Anhebung

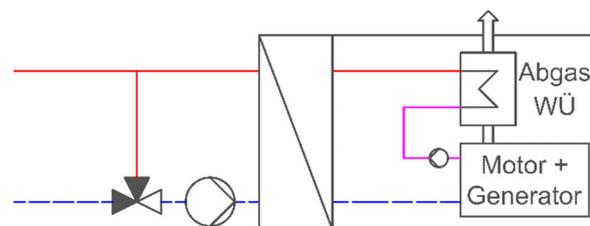


Abb. 6b: BHKW mit Systemtrennung und externer Temperaturanhebung

Die hier zur Erläuterung genannten Temperaturen sind beispielhaft (speziell bei Hubkolben BHKWs), nicht zwingend. Sie dienen vielmehr dem Verständnis für die Zusammenhänge. Die tatsächlichen Temperaturen müssen entweder vom Planer dem BHKW-Hersteller abverlangt werden, oder umgekehrt muss der Planer bauseits die Vorgaben des BHKWs-Herstellers einhalten.

Wird in der Praxis die maximal zulässige Eintrittstemperatur ins BHKW überschritten, was speziell in der Übergangszeit sehr häufig vorkommt, müssen die BHKWs entweder abgeschaltet werden oder die Notkühlung muss angefahren werden. Da sich beides sehr negativ auf die Effizienz des Gesamtsystems auswirkt, muss auf hinreichend niedrige Rücklauftemperaturen geachtet werden.

### Massenstrom-Anforderungen

Viele Hersteller fordern für ihre BHKWs einen bauseitigen Mindestmassenstrom (sekundäre Heizkreisseite), um sicherzustellen, dass die anfallende Wärme abgenommen und das BHKW somit hinreichend gekühlt wird. Dieser Mindestmassenstrom ergibt sich meist aus der thermischen Leistung sowie der Spreizung zwischen erreichbarer Vor- und maximal zulässiger Rücklaufemperatur auf der sekundären Heizkreisseite des systemtrennenden WTs (vgl. Abbildung 6a) bei Nennbetrieb zu:

$$\dot{m}_{\min} = \frac{\dot{Q}_{\text{Nenn}}}{c_p \cdot (\vartheta_{V,\text{Nenn}} - \vartheta_{R,\text{Nenn}})}$$

Bei einer thermischen Leistung von 100 kW sowie einer Vorlaufemperatur von 80°C und einer maximal zulässigen Rücklaufemperatur von 60°C ergibt sich hier im Nennbetriebspunkt ein Mindestmassenstrom von 4,3 m<sup>3</sup>/h. Da die tatsächliche Rücklaufemperatur von der maximal zulässigen Rücklaufemperatur aber erheblich abweichen kann (kann auf unter 30°C sinken) und je nach Regelstrategie auch die Heizleistung nicht konstant ist (kann auf 30 bis 50% der Nennleistung zurückgefahren werden), sollte dieser „Mindestmassenstrom“ den Randbedingungen angepasst (abgesenkt) werden. Anderenfalls kann die Vorlaufemperatur auch nicht konstant gehalten werden. Damit ist dieser „Mindestmassenstrom“ für den Bedarfsfall vorzuhaltender, nicht aber ein jederzeit zwingend erforderlich.

Die weit verbreitete Behauptung, dass BHKWs mit konstantem Massenstrom betrieben werden müssen bezieht sich lediglich auf die Motorblockkühlung und das nur bei konstanter Nennleistung.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

## Zusammenfassung

Nachdem im vorliegenden Beitrag ein Einblick in die Zukunftsfähigkeit von BHKWs und BW-Kesseln und in die wesentlichen Randbedingungen für einen störungsfreien und effizienten Betrieb gegeben wurde, soll im nächsten Beitrag auf hydraulische und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen eingegangen werden.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Energiedaten Deutschland: Gesamtausgabe, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>, Oktober 2019
- [2] Umweltbundesamt, Erneuerbare Energien in Deutschland, Daten zur Entwicklung im Jahr 2018, Publikation als PDF: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erneuerbare-energien-in-deutschland-2019>, März 2019
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Klimaschutzprogramm 2030 zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, Publikation als PDF: [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzprogramm\\_2030\\_umsetzung\\_klimaschutzplan.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzprogramm_2030_umsetzung_klimaschutzplan.pdf), Oktober 2019
- [4] A. Floß, Untersuchung der Bereitstellung von grünem LNG und Power-to-Gas-Prozessen, unveröffentlichter Forschungsbericht des Institutes für Gebäude und Energiesysteme der Hochschule Biberach, Oktober 2018
- [5] Süddeutsche Zeitung, CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe, Publikation als PDF: <https://www.sueddeutsche.de/auto/synthetische-kraftstoffe-benzin-elektroauto-1.4454765>, 27. Mai 2019
- [6] ADAC, Synthetische Kraftstoffe – Energieträger der Zukunft? Publikation als PDF: <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/synthetische-kraftstoffe/>, 19. November 2019
- [7] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung, Bedeutung der Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz, Publikation als PDF: [https://www.bkww.de/wp-content/uploads/2018/04/BKWK\\_Chance\\_fuer\\_Wirtschaft\\_und-Umwelt\\_Broschuere\\_A4\\_web.pdf](https://www.bkww.de/wp-content/uploads/2018/04/BKWK_Chance_fuer_Wirtschaft_und-Umwelt_Broschuere_A4_web.pdf), Mai 2020
- [8] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung: GEMIS, CO<sub>2</sub>-Emissionen von Stromerzeugungssystemen, Publikation als PDF: <https://kraftwerkforschung.info/quickinfo/kraft-waerme-kopplung/co2-emissionen-von-stromerzeugungssystemen/>
- [9] K. Lambrecht, Einsparungen von Energie und CO<sub>2</sub> beim Ersetzen alter Heizkessel durch Brennwertkessel, Kurzgutachten für den Bundesverband Erneuerbare Energien BEE Berlin, Erstellt durch ECONSULT, Rottenburg, März 2018

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

- [10] A. Floß, Qualitätssicherung bei Heizungsanlagen mit Brennwerttechnik - "Kondi-Check" – Ein neues Verfahren zur Effizienzbewertung, Heizung Lüftung Klimatechnik, Ausgabe : Nr. 1-2/2006 Seite 39-41, Springer Business Media Austria GmbH, Februar 2006
- [11] Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Einbindung von kleinen und mittleren Blockheizkraftwerken / KWK-Anlagen, Publikation als PDF:  
[https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2007/broschueren/05\\_01\\_07\\_einbindung\\_bhkw\\_03\\_07.pdf](https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2007/broschueren/05_01_07_einbindung_bhkw_03_07.pdf), März 2003
- [12] VDI Richtlinie 2073 Blatt 1, Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung; Hydraulische Schaltungen, Beuth-Verlag Technische Regeln, Mai 2014
- [13] M. Pehnt, Energieeffizienz, Ein Lehr- und Handbuch, ISBN 978-3-642-14250-5, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [14] Weishaupt, Mehrkesselanlagen optimieren – Mehrkesselregelung System Weishaupt, Produktinformation Max Weishaupt GmbH, Druck-Nr. 83150201, Feb. 2013

## Hyperlinks

Mit Urteil vom 12. Mai 1998 – 312 O 85/98 – „Haftung für Links“ hat das Landgericht Hamburg entschieden, dass man durch die Ausbringung eines Links die Inhalte der gelinkten Seite ggf. mit zu verantworten hat. Dies kann – so das Landgericht – nur dadurch verhindert werden, dass man sich ausdrücklich von diesen Inhalten distanziert. Vor diesem Hintergrund distanziert sich der Autor hiermit ausdrücklich von allen Inhalten sämtlicher in dieser Veröffentlichung angegebenen Links, da er keinen Einfluss auf Inhalt und Gestaltung der verlinkten Seiten hat. Die Angabe der Links dient der leichteren, eigenverantwortlichen Recherche.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

# Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel

## Hydraulik von entscheidender Bedeutung

Teil I: Block-Heiz-Kraft-Werke (BHKW) und Brennwertkessel (BW-Kessel) sowie deren Anforderungen an die Hydraulik

**Teil II: Hydraulische und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen mit BHKWs und BW-Kesseln**

Teil III: Bewertung von Praxisbeispielen und Entwicklung optimierter Lösungsansätze

### Einleitung

Im ersten Teil „Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel“ wurde zunächst die Bedeutung von BHKWs und BW-Kesseln im Zeitalter der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft dargestellt.

Darüber hinaus wurde detailliert und begründet auf die zum Teil sehr unterschiedlichen einzuhaltenden Anforderungen dieser Wärmeerzeuger eingegangen. Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

- Forderungen nach einem Mindestmassenstrom sollten vermieden werden.
- Beim Bestehen von Anforderungen an den Mindestmassenstrom muss diesen – meist mit Effizienzverlust - Rechnung getragen werden.
- Die hydraulischen Druckverluste der Wärmeerzeuger fallen sehr unterschiedlich aus, was nicht vernachlässigt werden darf.
- Nahezu alle BHKWs lassen eine maximale Rücklauftemperatur von 60°C bis 65°C zu.
- Eine erfolgreiche Brennwertnutzung – egal ob bei BW-Kessel oder BW-BHKW – kann nur mit niedriger Rücklauftemperatur erzielt werden. Damit ist die thermische Effizienz des Heizungssystems entscheidend von der Rücklauftemperatur abhängig.

Daher wird in diesem zweiten Teil folgenden Fragen nachgegangen:

1. Wie kann die Rücklauftemperatur am Erzeuger möglichst weit abgesenkt werden?
2. Wie kann ein Anheben der Rücklauftemperatur vermieden bzw. reduziert werden?
3. Welche Probleme ergeben sich beim Einsatz mehrerer Wärmeerzeuger, wenn diese einen hohen hydraulischen Druckverlust aufweisen?
4. Welche Probleme treten bei der Leistungsregelung der Wärmeerzeuger auf?

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

## Niedrige Mischwasser-Rücklauftemperaturen am Wärmeerzeuger

Obwohl in der wissenschaftlichen Literatur schon seit 35 Jahren auf das zunehmende Problem der Rücklauftemperaturenanhebung („delta T degradation“ oder „low delta T syndrom“) in Heizungssystemen hingewiesen wird [II 1], findet dies in der Praxis erst sehr langsam Aufmerksamkeit. Die Höhe der Mischwasser-Rücklauftemperaturen an den Wärmeerzeugern wird durch:

- die Rücklauftemperaturen von den einzelnen Verbrauchern,
- die hydraulische Verschaltung sowohl der Verbraucher als auch der Wärmeerzeuger sowie
- ein Anheben der Rücklauftemperaturen aufgrund von in den Rücklauf überströmenden Vorlaufwasser geprägt.

### Reduzierung der Verbraucher-Rücklauftemperaturen

Die Höhe der Rücklauftemperaturen direkt an den Verbrauchern wird zunächst durch die Wahl und Auslegung der Wärmeübertrager z.B. der Raumheizeinrichtungen festgelegt. Hier kann bei vorgegebener Leistung das Temperaturniveau in erster Linie durch eine große Wärmeübertragungsfläche abgesenkt werden. Die möglichst konsequente Beachtung des Gegenstromprinzips am Wärmetauscher hilft ebenfalls, die Rücklauftemperaturen abzusenken. Entgegen einer weit verbreiteten Einschätzung, führt auch eine Erhöhung der Vorlauftemperaturen bei konstanter thermischer Leistung und korrekt geregelter Massenstrom zu einem Absinken der Rücklauftemperaturen am Verbraucher.

Im Hinblick auf niedrige Rücklauftemperaturen ist in der Praxis nicht nur dem hydraulischen Abgleich, sondern auch der richtigen Dimensionierung von Regelventilen [II 1] große Aufmerksamkeit zu schenken.

In hydraulisch nicht abgeglichenen Systemen erhöht sich bei zu stark durchströmten Verbrauchern die Rücklauftemperaturen, während sie bei zu schwach durchströmten absinkt. Die Mischwasser-Rücklauftemperaturen zum Wärmeerzeuger, die sich aus den Massenstrom-gewichteten Rücklauftemperaturen der einzelnen Verbraucher ergibt, steigt bei konstantem Gesamtmassenstrom hierbei deutlich an [II 2]. Gleiches passiert, wenn Regelventile aufgrund fehlerhafter Dimensionierung nicht konstant regeln, sondern ins Schwingen geraten [II 1].

Weiterhin ist der Abgleich der Wärmekapazitätsströme an Wärmetauschern von Kreislauf-Verbund-Systemen eine altbekannte Möglichkeit [II 3], die Rücklauftemperaturen zu reduzieren, was in der Praxis aber sehr wenig Beachtung findet.

### Hydraulische Verschaltung der Verbraucher

Grundsätzlich lassen sich Verbraucher oder Verbrauchergruppen (Heizkreise) parallel oder in Reihe anordnen. Die Parallelschaltung hat den Vorteil, dass sich die Verbraucher individuell mit Heizungswasser versorgen lassen, wodurch auch die Leistung und die Vorlauftemperaturen eines jeden Verbrauchers beliebig variiert werden kann. Die Reihenschaltung hingegen bringt den Vorteil, dass der Rücklauf weiter ausgekühlt werden kann. Dies bietet sich besonders dann an, wenn die Verbraucher bzw. Verbrauchergruppen ohnehin unterschiedliche Vorlauftemperaturen benötigen, wie dies zum Beispiel bei Heizkörper- und Fußbodenheizkreisen der Fall ist. Hier ist der Rücklauf der Heizkörper in der Regel hinreichend warm, um als Vorlauf für den Fußbodenheizkreis zu fungieren. Problematisch

STUDIENGANG / INSTITUT     Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL     **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN     Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

bei der starren Reihenschaltung ist, dass der Heizwassermassenstrom nicht individuell auf den jeweiligen Verbraucherkreis angepasst werden kann, ohne dass sich auch der Massenstrom in den anderen Verbrauchern ändert.

H.-G. Baunach und R. Zortea sind als Pioniere der flexiblen Reihen- / Paralleleinbindung von Verbrauchern anzusehen. Vereinfacht ausgedrückt, können bei entsprechenden Randbedingungen die Verbraucher zu Gunsten einer niedrigen Rücklauftemperatur – und damit auch eines geringen Massenstroms aufgrund der großen Gesamt-Temperaturspannung - in Reihe betrieben werden. Fordert einer der Verbraucher (oder Verbrauchergruppen) aber einen anderen Massenstrom oder eine höhere Vorlauftemperatur, wird ein variabler Bypass aktiviert. Somit lassen sich die Verbraucher von der starren Reihenschaltung stufenlos in eine Parallelschaltung überführen. Damit lässt sich der Vorteil der Reihenschaltung, die niedrige Rücklauftemperatur, bei voller individueller Flexibilität eines jeden Verbrauchers bestmöglich erreichen.

Die Fa. Zortström erreicht dies mit Hilfe ihrer „ZORTSTRÖM-Multi Verteiler“ [II 4]. Hier wird wie in Abbildung 1 dargestellt der Verteiler in Form einer Hydraulischen Weiche ausgeführt. Durch den Einbau horizontaler, durchlässiger „FlowSplit“ Trennbleche werden verschiedene Temperaturzonen erzeugt, an die die unterschiedlichen Erzeuger- und Verbraucherkreise angeschlossen werden. Die FlowSplit Abtrennungen ermöglichen einen strömungsberuhigteren Wasseraustausch zwischen den einzelnen Zonen. Sind die Massenströme der verschiedenen Heizkreise aufeinander abgestimmt, so sind diese im günstigsten Fall streng in Reihe geschaltet. Differieren die Massenströme, kommt es im Verteiler zu einem Ausgleich der Massenströme über die durchlässigen Temperaturzonen-Trennbleche. Somit kann jeder Verbraucher individuell mit dem notwendigen Massenstrom versorgt werden.

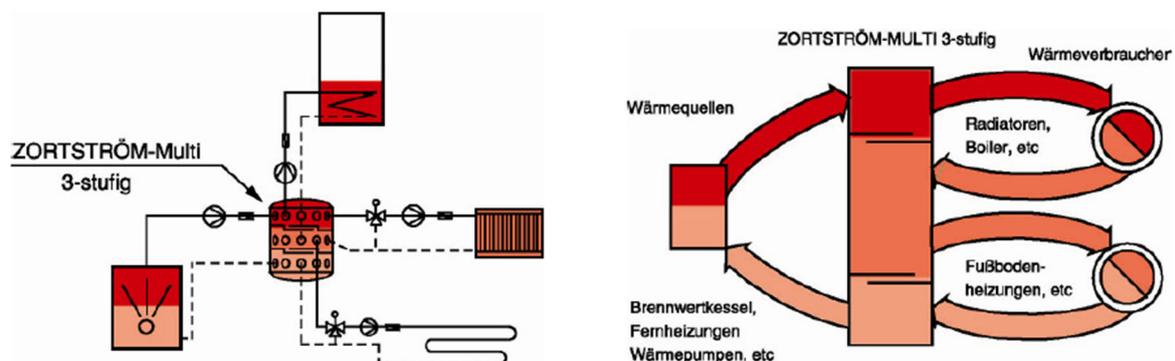


Abb. 1: Zortström-Multi Verteiler mit drei Temperaturzonen [II 4]

Mit dem Produkt „multiflow“ der Fa. Sinusverteiler wird seit wenigen Jahren ein sehr ähnlicher Ansatz verfolgt.

Die Firma Baunach bietet ein spezielles Mehrwege-Mischventil namens „rendeMIX“ an, welches die Vorlauftemperatur für den Niedertemperatur-Verbraucher (z.B. Fußbodenheizung) aus seiner eigenen Rücklauftemperatur, der Rücklauftemperatur des Hochtemperatur-Verbrauchers (Heizkörper) und der Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers zusammen mischen kann [II 5]. Wie in Abbildung 2 dargestellt, kann im vorliegenden Fall die Vorlauftemperatur des Heizkreises 2 aus der eigenen- und

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel</b> <b>Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

der Rücklauftemperatur des Heizkreises 1 zusammengemischt werden. Gegenüber der klassischen Parallelschaltung (Abbildung 3) kann - bei vorliegenden Randbedingungen – die strikte Reihenschaltung der Verbraucher die Mischwasser Rücklauftemperatur um mehr als 13°C auf 30°C reduzieren, was zu einer thermischen Effizienzsteigerung von 5 % führt. Hierbei ergibt sich gegenüber der klassischen Parallelschaltung aus Abbildung 3 ein um 33 % reduzierter Massenstrom, was den Druckverlust im Erzeuger mehr als halbiert.

Erst wenn zum Beispiel der Massenstrom im Heizkreis 1 zu gering oder dessen Rücklauftemperatur zu niedrig wird, um den Verbraucher 2 ausreichend zu versorgen, wird Vorlaufwasser direkt vom Erzeuger beigemischt und die Verbraucherkreise gehen so in eine Parallelschaltung über. Allerdings führt die Tatsache, dass Heizkreis 2 nicht mehr den kompletten Massenstrom von Heizkreis 1 verarbeiten kann, zu einer Anhebung der Mischwasserrücklauftemperatur am Erzeuger.

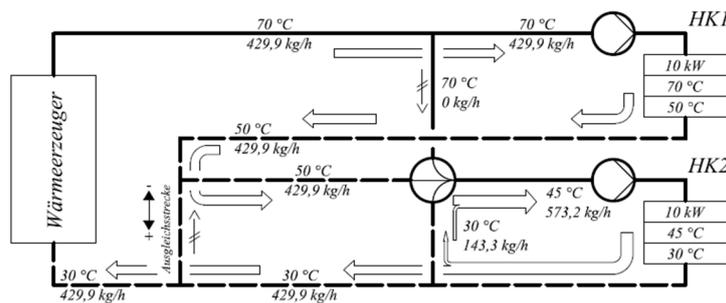


Abb. 2: Variable Reihen- Parallelschaltung von Heizkreisen mittels Mehrwege-Mischventil „rendeMix“ [II 6]

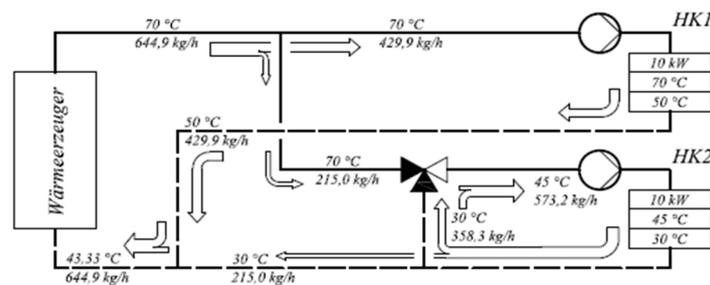


Abb. 3: Klassische Parallelschaltung von statischem- (HK 1) und gemischtem Heizkreis (HK 2) [II 6]

Die sehr kompakte Bauweise des patentierten „rendeMix“ Mehrwege-Mischventils kann bei Bedarf wie in Abbildung 4 dargestellt durch zwei Dreiecksmischventile ersetzt werden.

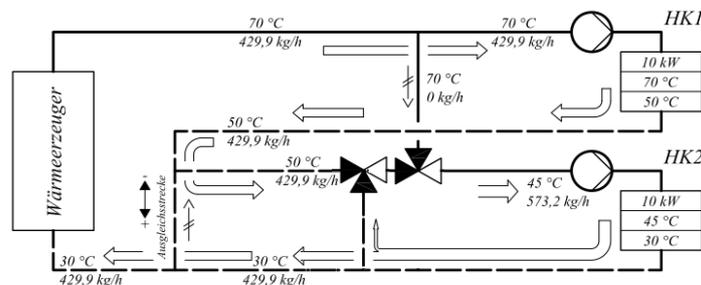


Abb. 4: Variable Reihen- Parallelschaltung von Heizkreisen mittels zwei Dreiecksmischventilen

Nachdem zahlreiche Patente auf diesem Gebiet ausgelaufen sind, oder sich in der Auslaufphase befinden, setzt am Markt derzeit eine Konkurrenzsituation durch weitere Hersteller ein. So bietet die Fa. Yados mit ihrem Energieeffizienzverteiler exakt die gleiche Funktionalität an, wobei hier das Angebot sehr verschiedenartiger Dimensionen schon heute besteht.

### Hydraulische Verschaltung der Wärmeerzeuger

Auch bei der hydraulischen Verschaltung der Erzeuger ergibt sich die Möglichkeit der Reihen- bzw. Parallelschaltung. Im folgenden Beispiel soll die Mischwasser-Rücklauftemperatur  $40^{\circ}\text{C}$  und die Verbraucher-Vorlauftemperatur  $80^{\circ}\text{C}$  betragen. Das BHKW ist mit 25 % der Spitzenheizlast als Grundlastwärmeerzeuger ausgelegt. Bei der Parallelschaltung, wie in Abbildung 5a gezeigt, greifen beide Wärmeerzeuger auf die niedrige Mischwasser-Rücklauftemperatur aus dem Heizungssystem zurück, was bei Nutzung von Brennwerttechnologie ideal ist. Beide Wärmeerzeuger sollten das Wasser auf die gewünschte Vorlauftemperatur von  $80^{\circ}\text{C}$  erwärmen. Die Massenströme sind entsprechend aufzuteilen was sich in der Praxis meist nicht als einfach erweist. Hierfür wäre im Idealfall eine eigene Massenstrom-Regelung notwendig, wobei die BHKW-Nutzung zu priorisieren ist. Darüber hinaus ist auf das Einhalten von Mindestmassenströmen zu achten. Bei vorgegebenem Massenstrom durch die jeweiligen Erzeuger kann die Vorlauftemperatur dann als Führungsgröße für deren Leistungsregelung benutzt werden.

Im Fall der Reihenschaltung der beiden Wärmeerzeuger ist deren strömungstechnische Reihenfolge zu beachten. In Abbildung 5b wird, wie in der Praxis meist vorzufinden, das BHKW vor dem BW-Kessel durchströmt. Diese Variante ist auch regelungstechnisch am einfachsten zu handhaben. Während das BHKW als Dauerläufer konzipiert im Nennbetrieb läuft und nur bei Bedarf abgeschaltet wird, wird die Leistung des BW-Kessels nach dessen Vorlauftemperatur, die gleichzeitig die gemeinsame Vorlauftemperatur ist, geregelt. Ein übergeordnetes Wärmeerzeuger-Managementsystem ist hier nicht notwendig.

In Abbildung 5c ist der BW-Kessel vor dem BHKW angeordnet. Unter Berücksichtigung der Totzeiten gestaltet sich hier die Wahl einer geeigneten Führungstemperatur wesentlich schwieriger.

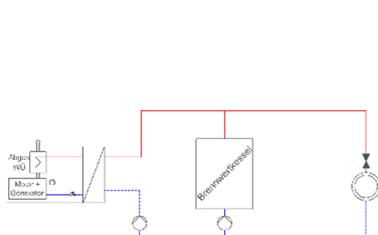


Abb. 5a: Parallelschaltung  
BHKW / BW-Kessel

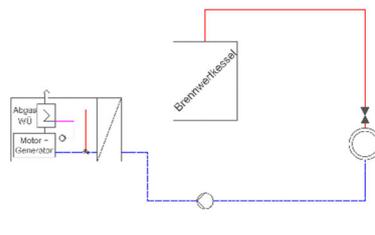


Abb. 5b: Reihenschaltung  
BHKW / BW-Kessel

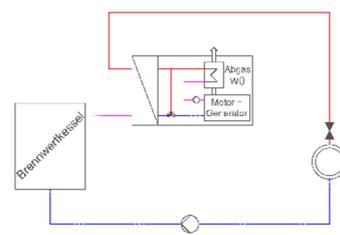


Abb. 5c: Reihenschaltung  
BW-Kessel / BHKW

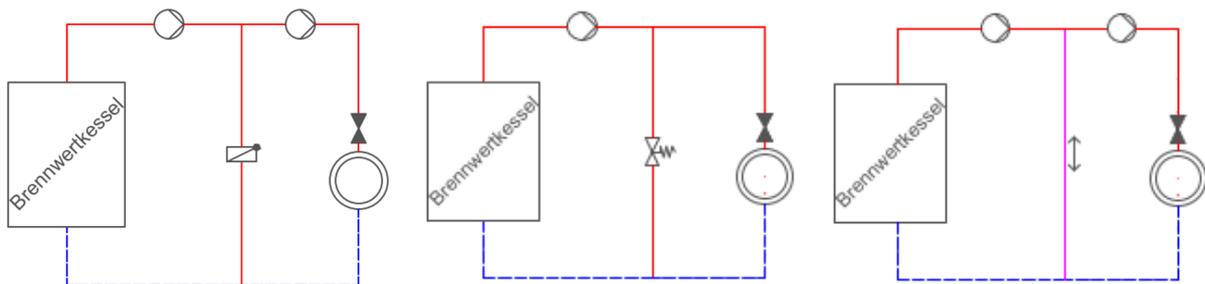
Ist wie in Abbildung 5b dargestellt, das BHKW vor dem BW-Kessel installiert, so wird dort das Rücklaufwasser von  $40^{\circ}\text{C}$  auf  $50^{\circ}\text{C}$  erwärmt. Unter Berücksichtigung der Grädigkeit am Wärmetauscher kann damit im nachgeschaltetem BW-Kessel nur noch ein minimaler Brennwertnutzen erzielt werden. Im umgekehrten Fall aus Abbildung 5c erwärmt der BW-Kessel das Rücklaufwasser von  $40^{\circ}\text{C}$  auf  $70^{\circ}\text{C}$  und weist dabei einen ca. 5 % höheren Wirkungsgrad auf. Allerdings überschreitet die Rücklauftemperatur des BHKW jetzt dessen zulässigen Grenzen.

Daher ist wie in der Praxis üblich, das BHKW vor dem BW-Kessel zu installieren. Allerdings drängt sich hier die Frage auf, ob es nicht wesentlich sinnvoller wäre, das BHKW anstelle des Spitzenlastkessels in Brennwertechnologie auszuführen.

### Überströmungen auf ein Minimum reduzieren

Im ersten Teil dieser Beitragsreihe ist ausführlich auf die Ursachen von Mindestmassenströmen bei verschiedenen Wärmeerzeugern eingegangen worden. Es ist anzumerken, dass die sehr umfangreich geforderten Mindestmassenströme auf Grund der besseren Leistungsregelung (größerer Leistungsbereich) in ihrer Höhe immer geringer werden.

In der Praxis wird der Forderung nach einem Mindestmassenstrom (MMS) in aller Regel durch den Betrieb mit konstantem Massenstrom Rechnung getragen. Dies kann durch einen Bypass mit Überströmventil (Abb. 6a) oder Rückschlagklappe (Abb. 6b) erfolgen. Am weitesten verbreitet, speziell bei mittleren und größeren Anlagen, ist aber der Einsatz einer hydraulischen Weiche wie in Abbildung 6c dargestellt. Diese hat den Vorteil der hydraulischen Entkopplung von Erzeuger- und Verbraucher- bzw. Primär- und Sekundärseite.



Garantierter Mindestmassenstrom mittels

Abb. 6a:

Bypass mit Rückschlagklappe

Abb. 6b:

Bypass mit Überströmventil

Abb. 6c:

hydraulische Weiche

Hierbei findet, von wenigen Ausnahmen abgesehen (z.B. Vier-Temperaturregelung [II 7]), schon am Auslegungspunkt ein Überströmen in den Rücklauf statt. Hintergrund ist ein in der Regel um ca. 20 % höherer Massenstrom auf der Erzeugerseite gegenüber der Verbraucherseite, um eine verbraucherseitige Vorlaufemperaturreduzierung über die hydraulische Weiche und damit eine Leistungsminderung an den Verbrauchern zu unterbinden. Allein dieser um 20 % höhere Erzeugermassenstrom am Auslegungspunkt führt zu einer Rücklauf Temperaturerhöhung von 4 bis 8 K. Verringert sich im Teillastbereich der Massenstrom der Verbraucherkreise, beim in der Praxis üblichen konstanten Erzeugermassenstrom, steigt die Rücklauf Temperatur immer weiter an. Dies führt zu den weit verbreiteten Problemen, dass zum einen die Brennwertnutzung in der Praxis gar nicht funktioniert [II 8] und zum anderen der Betrieb der BHKWs wegen Überschreitung der zulässigen Rücklauf Temperatur eingestellt werden muss.

Am Institut für Gebäude und Energiesysteme der Hochschule Biberach ist eine bisher nur interne theoretische Forschungsarbeit durchgeführt worden, in der das thermische Einsparpotential einer geregelten hydraulischen Überströmung gegenüber der klassisch unregulierten Variante ermittelt wurde. Bei der regelbaren hydraulischen Überströmung wird der Erzeugermassenstrom dem

Verbrauchermassenstrom angepasst. Erst beim Erreichen des Mindestmassenstroms wird der Erzeugermassenstrom konstant gehalten und der Überschuss in den Rücklauf gefahren. In Verbindung mit Brennwert-Heizkesseln konnte hier ein thermische Einsparpotential von 5 % (Gas) und ein elektrische Einsparpotential von ca. 50 % (Strom) erzielt werden.

### Wärmeerzeuger mit hohen Druckverlusten

Wie bereits erwähnt wird bei Hochleistungswärmetauschern die gute Leistungsübertragung durch einen sehr hohen Wärmeübergang aufgrund hoher Turbulenzen erreicht. Dies bringt aber meist den Nachteil eines hohen Druckverlustes mit sich und gilt für Brennwertkessel und BHKW gleichermaßen. Diese hohen Druckverluste in BHKWs und BW-Kesseln wirken sich u.U. nicht nur nachteilig auf die Ventilautorität nachgeschalteter Ventile, sondern auch nachteilig auf die gegenseitige Beeinflussung parallel geschalteter Verbraucherkreise aus.

### Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel

Bei der Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel fließt der gesamte Erzeugermassenstrom durch beide Wärmeerzeuger. Ist wie in der Praxis häufig ausgeführt, das BHKW als Grundlast-BHKW mit nur 25 % der Spitzenlastanteil ausgeführt, resultiert hieraus ein um den Faktor vier höherer Massenstrom durch die Anschlüsse des BHKWs als bei einer Parallelschaltung. Berücksichtigt man, dass in einem bestehenden hydraulischen System der Druckverlust mit dem Massenstrom im Quadrat

$$\Delta p \sim m^2$$

steigt, und die notwendige hydraulische Antriebsleistung mit der dritten Potenz des Massenstroms wächst, so werden die Probleme schnell deutlich. Ein vierfacher Massenstrom hat

$$P_{\text{hydr.}} \sim m^3$$

nämlich einen 16-fachen Druckverlust und eine um den Faktor 64 höhere -hydraulisch notwendige- Antriebsleistung zur Folge. Hier ist also eine sehr umsichtige Dimensionierung der Wärmeübergabe, oder aber die Verwendung eines BHKW-Bypasses wie in Abbildung 7 dargestellt, notwendig.

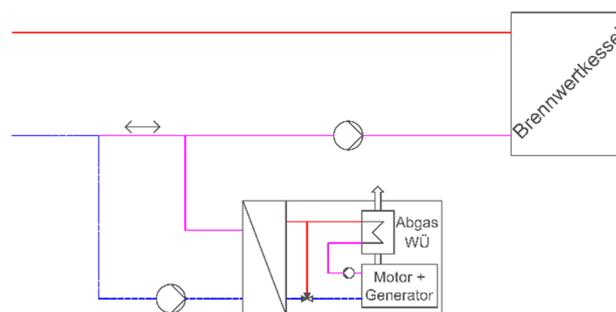


Abb. 7: Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel mit BHKW-Bypass

In letzterem Fall benötigt der BHKW- Anschluss eine zusätzliche Umwälzpumpe. Das BHKW wird jetzt mit reduziertem Massenstrom und höherer Vorlauftemperatur betrieben. Auf die Temperatur des Mischwasserrücklaufs zum BW-Kessel hat dies, im Vergleich zur festen Reihenschaltung aus Abbildung 5 b, keinen Einfluss.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel</b> <b>Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

## Parallelschaltung von BHKW und BW-Kessel

Auch bei der Parallelschaltung von BHKW und Brennwertkessel (Abb. 5a) kann es im Teillastbetrieb zu erheblichen Problemen kommen, wenn das BHKW im Auslegungszustand einen hohen hydraulischen Druckverlust aufweist. Auch in diesem Beispiel sei das BHKW als Grundlast-Wärmeerzeuger mit nur 25 % der Spitzenleistung ausgeführt. Daher muss im Auslegungszustand auch nur 25 % des Massenstrom über die BHKW-Anschlüsse gefahren werden. Beide Erzeuger erwärmen das Rücklaufwasser von 40°C auf 80°C. Wird in der Übergangszeit nur 25 % Heizleistung benötigt, könnte diese vom BHKW alleine zur Verfügung gestellt werden. Bei Büro oder Wohngebäude werden in der Übergangszeit die Verbraucher allerdings bei reduziertem Temperaturniveau betrieben. Im vorliegenden Beispiel soll dies bei 40°C/30°C liegen. Wird sowohl die Leistung der Verbraucher als auch die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf auf 25 % reduziert (bezogen auf den Auslegungszustand), bleibt der Massenstrom durch die Verbraucher konstant. Dieser konstante Massenstrom kann jetzt aber nicht auf BW-Kessel und BHKW aufgeteilt werden, sondern müsste komplett durch die BHKW-Anschlüsse gepumpt werden. Auch hier hätte der gegenüber dem Auslegungszustand vierfache Massenstrom einen 16-fachen Druckverlust und eine um den Faktor 64 höhere hydraulische Antriebsleistung zur Folge. In solchen Fällen kann das BHKW mit erhöhter Vorlauftemperatur bei reduziertem Massenstrom gefahren und die Vorlauftemperatur anschließend durch eine Beimisch-Schaltung, wie in Abbildung 8 dargestellt, abgesenkt werden.

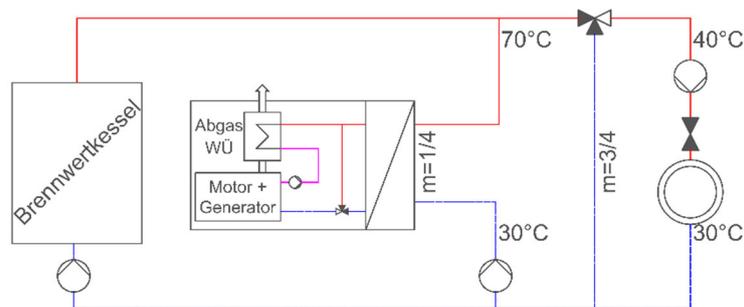


Abb. 8: Parallelschaltung von BHKW und BW-Kessel mit Beimisch-Schaltung

Allerdings wird nun der Regelungsaufwand wesentlich komplexer, was im nächsten Beitrag diskutiert wird.

## Leistungsregelung bei Wärmeerzeugern

Nur wenn die Leistung der Wärmeerzeuger gleich der Last der Verbraucher ist, können die Erzeuger kontinuierlich betrieben werden. Fällt die Last der Verbraucher unter die Leistung der Erzeuger, fangen letztere an zu takten. Das Takten von Wärmeerzeugern sollte aus verschiedenen Gründen auf ein Minimum reduziert werden. Zu diesen Gründen zählen insbesondere:

- deutlich erhöhte Emissionswerte in der Startphase bei allen Wärmeerzeugern außer Wärmepumpen,
- deutlich erhöhter mechanischer Verschleiß (z.B. bei BHKW, Wärmepumpen, mechanischen und elektrischen Schaltern etc.)
- schlechtere Effizienz, z.B. durch Spülverluste,
- Aufwand z.B. bei Holzfeuerung.

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter  
Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel  
Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Zur Reduzierung der Takthäufigkeit bieten sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Lösungswege an - die Erhöhung der effektiven Speicherkapazität und / oder die Leistungsregelung der Erzeuger.

### Reduzierung der Takthäufigkeit durch Erhöhung der effektiven Speicherkapazität

In der Vergangenheit konnten Wärmeerzeuger nur ein- und ausgeschaltet werden. Dieser digitalen Regelung folgte eine meist zweistufige Leistungsanpassung. Die heute viel gepriesene stufenlose Leistungsregelung hat sich im Wesentlichen erst in den vergangenen 25 Jahren entwickelt und wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Weder bei der digitalen- noch bei der Mehrstufen-Leistungsregelung lässt sich die Erzeugerleistung exakt auf den Bedarf der Verbraucher abstimmen, weswegen die Erzeuger häufig ein- und ausgeschaltet werden. Dieses Takten lässt sich durch eine Vergrößerung der Effektiven Speicherkapazität des Systems reduzieren. Wie [11 9] zeigt spielt hier nicht nur die Speichermasse, sondern auch die Positionierung der Temperaturfühler, die Einstellung von Sollwertvorgaben (z.B. Schalthysterese) und die Güte der Schichtung eine entscheidende Rolle.

Abbildung 9 zeigt die in der Praxis weit verbreitete parallele Pufferspeicher-Einbindung. Hier fungiert der Puffer als hydraulische Weiche zwischen Erzeuger und Verbraucher. Ist die Last der Verbraucher geringer als die Leistung der Erzeuger, wird der Pufferspeicher beladen. Wird am unteren Temperaturfühler ( $t_{\text{aus}}$ ) die gewünschte Temperatur erreicht, muss der Erzeuger samt Erzeugerkreispumpe abgeschaltet werden.

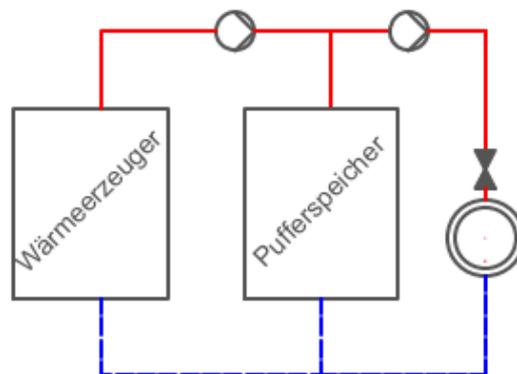


Abb. 9: Pufferspeicher zur Reduzierung der Takthäufigkeit

Der Verbraucherkreis versorgt sich nun aus dem Pufferspeicher. Wird am oberen Temperaturfühler ( $t_{\text{ein}}$ ) eine vorgegebene Temperatur unterschritten, muss der Wärmeversorger einschalten, um die Versorgung sicherzustellen. Ein in der Praxis gängiger Weg die Takthäufigkeit zu reduzieren, ist die Vergrößerung der Speichermasse. Allerdings ist hierfür ein erhöhter Platz- und Investitionsbedarf notwendig. Vor diesem Hintergrund ist schon vor etlichen Jahren ein zweiter Weg zur Reduzierung der Takthäufigkeit besprochen worden.

### Reduzierung der Takthäufigkeit durch Anpassung der Erzeugerleistung

Bei der stufenlosen Leistungsregelung der Wärmeerzeuger soll die Leistung der Erzeuger möglichst exakt an den Bedarf der Verbraucher angepasst werden, um ein Takten zu vermeiden. Hierzu muss zunächst die Frage beantwortet werden, nach welcher Führungsgröße die Erzeugerleistung geregelt

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel</b> <b>Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

werden soll. In Abbildung 10 ist ein einfaches System aus Verbraucher mit variablem Massenstrom (z.B. Heizkörper mit Thermostatventilen), regelbarer Umwälzpumpe und Wärmeerzeuger mit stufenloser thermischer Leistungsregelung dargestellt.

In Abhängigkeit von der Außentemperatur wird dem Wärmeerzeuger eine Vorlauftemperatur als Führungsgröße vorgegeben. Hierbei wird die Vorlauftemperatur so gewählt, dass bei Nennmassenstrom an allen Verbrauchern hinreichend thermische Leistung anliegt. Reduziert sich die aktuelle thermische Leistungsanforderung eines Verbrauchers z.B. durch solare Einstrahlung oder innere Lasten, wird der Massenstrom durch den Heizkörper durch ein Thermostatventil gedrosselt, und die abgegebene Heizleistung passt sich so den Erfordernissen des Raumes an. Das Drosseln des Thermostatventils lässt die hydraulische Anlagenkennlinie steiler werden; dies erkennt die regelbare Pumpe und reduziert daraufhin ihre Drehzahl. Durch die Reduzierung des Massenstroms ergibt sich am Verbraucher eine Reduzierung der Rücklauftemperatur, die auch die Misch-Rücklauftemperatur am Erzeuger absenkt. Damit hat der Erzeuger einen geringeren Massenstrom um eine höhere

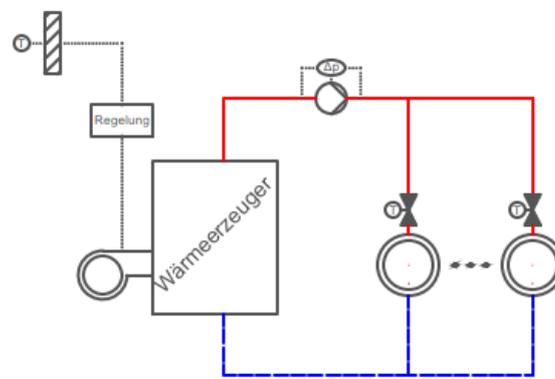


Abb. 10: Leistungsregelung zur Reduzierung der Takthäufigkeit

Temperaturdifferenz zu erwärmen. Insgesamt wird das Produkt aus Massenstrom, Wärmekapazität und Temperaturdifferenz – die thermische Leistung - geringer, weshalb der Erzeuger mit der Heizleistung zurückfahren muss. Als Führungsgröße für die thermische Leistungsregelung des Wärmeerzeugers kann hier sehr einfach die von der Außentemperatur abhängige Wärmeerzeugertemperatur vorgegeben werden.

Problematisch hierbei ist lediglich die Tatsache, dass alle Wärmeerzeuger einen gewissen Leistungsbereich aufweisen. Die Leistung kann somit nur bis zu einem unteren Mindestwert stufenlos reduziert werden. Stellt das System geringere Leistungsanforderungen an den Erzeuger, so kommt auch der stufenlos regelbare Wärmeerzeuger ins Takten. Da dies sehr häufig [10] vorkommt, wird in der Praxis die Leistungsregelung von Wärmeerzeugern oft mit der Verwendung von Pufferspeichern kombiniert.

### Die Kombination von Leistungsregelung und Pufferspeicher

Abbildung 11 zeigt die Kombination von leistungsgeregeltem Wärmeerzeuger und Pufferspeicher im Hydraulikschema einer Heizungsanlage. Auch hier ist es gängige Praxis, den Pufferspeicher als

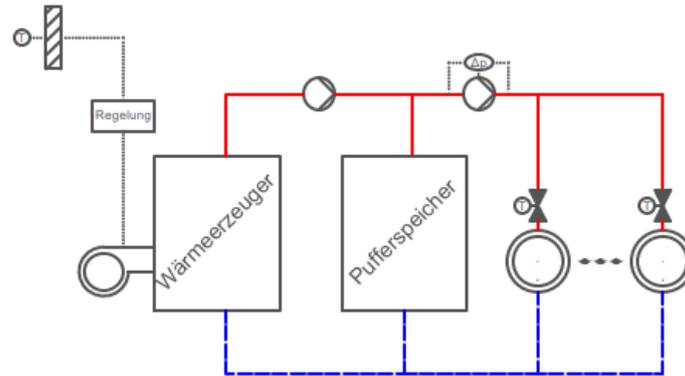


Abb. 11: Leistungsregelung und Pufferspeicher zur Reduzierung der Takthäufigkeit

hydraulische Weiche parallel zwischen Erzeuger und Verbraucher zu schalten und für die Leistungsregelung des Wärmeerzeugers die Erzeuger-Vorlauftemperatur (Außentemperaturabhängig) als Führungsgröße zu wählen. Die Verbraucher verfügen zur individuellen Lastanpassung über eine Massenstromregelung z.B. durch Thermostatventile an den Heizkörpern. Beide Umwälzpumpen im Erzeuger- und Verbraucherkreis sind meist als Differenzdruck-geregelte Pumpen ausgeführt.

Reduziert sich in diesem Beispiel die aktuelle thermische Leistungsanforderung eines oder mehrerer Verbraucher, so wird der jeweilige Heizkörper-Massenstrom durch ein Thermostatventil gedrosselt, und die abgegebene Heizleistung passt sich auch hier den Erfordernissen des Raumes an. Das Drosseln des Thermostatventils lässt die hydraulische Anlagenkennlinie im Verbraucherkreis steiler werden; die regelbare Verbraucherkreis-Pumpe erkennt dies und senkt die Drehzahl ab. Die Entkoppelung von Verbraucher- und Erzeugerkreis mittels hydraulischer Weiche führt aber dazu, dass die Information des reduzierten Verbrauchermassenstroms nicht auf den Erzeugerkreis übertragen wird. Da sich im Erzeugerkreis der Massenstrom nicht reduziert, wird der Pufferspeicher jetzt beladen.

Durch den geringeren Massenstrom im Verbraucher ergibt sich hier eine Reduzierung der Rücklauftemperatur, die nicht nur die Misch-Rücklauftemperatur des Verbraucherkreises, sondern auch die Misch-Rücklauftemperatur am Erzeuger absenkt. Abhängig von einer Vielzahl von Parametern wie z.B. der Ladegeschwindigkeit, der Schichtung im Pufferspeicher und dessen Größe, dauert es eine ganze Weile, bis die Rücklauftemperatur des Pufferspeichers ansteigt und somit das Abfallen der verbraucherseitigen Misch-Rücklauftemperatur kompensiert.

Damit erhält der Erzeuger zwar eine geringere Rücklauftemperatur, am Massenstrom auf der Erzeugerkreisseite ändert sich aber wie oben erwähnt nichts, da hier keine Änderung des Differenzdrucks stattfindet. Um nun den konstanten Erzeugermassenstrom von der abgesenkten Rücklauftemperatur auf die von der Regelung vorgegebene quasikonstante Erzeuger-Vorlauftemperatur (außentemperaturabhängig) anzuheben, wird eine größere Heizleistung benötigt.

Ein Absinken der Last am Verbraucher führt durch den parallel integrierten Pufferspeicher somit zunächst zu einem völlig kontraproduktiven Hochfahren der Erzeugerleistung. Erst wenn der Pufferspeicher durchgeladen ist, erhöht sich die Rücklauftemperatur am Erzeuger und dieser fährt mit der Heizleistung zurück.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, diese Problematik zu beseitigen. Eine besteht im Abgleich der verbraucher- und erzeugerseitigen Massenströme mit Hilfe einer übergeordneten Regelung, wie sie beispielsweise [II 7] durchführt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der zusätzlichen Berücksichtigung der Erzeuger-Rücklauftemperatur bei der Massenstromregelung.

## Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde auf vielfältige hydraulische- und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen hingewiesen und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt. Im nächsten Beitrag werden verschiedene Praxisbeispiele vorgestellt und bewertet. Abschließend werden eigene System-Vorschläge zur Reduzierung der umfangreichen Probleme gezeigt und diskutiert.

## Literatur

- [II 1] Gregor P. Henze, Alexander G. Floss: Evaluation of temperature degradation in hydraulic flow networks, Energy and Buildings Volume 43 issue 8, Elsevier, ISSN: 0378-7788, August 2011
- [II 2] H. Roos: Hydraulik der Wasserheizung, 4. Aufl., ISBN: 3-486-26399-4, Oldenburgverlag, 1999
- [II 3] R. Kober: Energieeffiziente Gebäudeklimatisierung, Raumluft in A<sup>++</sup> Qualität, 1. Auflage, ISBN: 978-3-922420-18-7, Promotor Verlag, 2009
- [II 4] R. Zortea: Zortström Planungsmappe, Veröffentlicht als PDF, <http://www.bosy-online.de/hydraulischeSchaltungen/Zortstroem-Panungsmappe.pdf>, Stand 2003
- [II 5] H.-G. Baunach: Firmenprospekt HG Baunach GmbH & Co. KG: Baunach rendeMIX, Veröffentlicht als PDF: <https://docplayer.org/18609785-Baunach-einfach-besser-prinzip-2007-02-rmix-250-2-4-lh-e-baunach-rendemix-einfach-besser.html>, Februar 2007
- [II 6] C. Dietrich: Effiziente Nutzung von Pufferspeichern, Diplomarbeit Hochschule Biberach, Studiengang Gebäudetechnik / Gebäudeklimatik, März 2008
- [II 7] Weishaupt: Mehrkesselanlagen optimieren – Mehrkesselregelung System Weishaupt, Produktinformation Max Weishaupt GmbH, Druck-Nr. 83150201, Feb. 2013
- [II 8] A. Floß: Qualitätssicherung bei Heizungsanlagen mit Brennwerttechnik - "Kondi-Check" – Ein neues Verfahren zur Effizienzbewertung, Heizung Lüftung Klimatechnik, Ausgabe : Nr. 1-2/2006 Seite 39-41, Springer Business Media Austria GmbH, Februar 2006
- [II 9] A. Floß, C. Dietrich: Optimierte Integration von Pufferspeichern in Hydraulischen Systemen, ISBN 978-3-95000919-8-4, Tagungsband internationaler Kongress e-nova, Pinkafeld, Austria, November 2008
- [II 10] C. Sulger, A. Floß, Einfluß der Takthäufigkeit auf die Schadstoffemissionen von Heizkesseln, IHKS Fach Journal 2018, <https://www.ihks-fachjournal.de/sector/heizungstechnik>, Seite 1-9,

## Hyperlinks

Mit Urteil vom 12. Mai 1998 – 312 O 85/98 – „Haftung für Links“ hat das Landgericht Hamburg entschieden, dass man durch die Ausbringung eines Links die Inhalte der gelinkten Seite ggf. mit zu verantworten hat. Dies kann – so das Landgericht – nur dadurch verhindert werden, dass man sich ausdrücklich von diesen Inhalten distanziert. Vor diesem Hintergrund distanziert sich der Autor hiermit ausdrücklich von allen Inhalten sämtlicher in dieser Veröffentlichung angegebenen Links, da er keinen Einfluss auf Inhalt und Gestaltung der verlinkten Seiten hat. Die Angabe der Links dient der leichteren, eigenverantwortlichen Recherche.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

# Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärme­erzeugung mittels BHKW und BW-Kessel

## Hydraulik von entscheidender Bedeutung

Teil I: Block-Heiz-Kraft-Werke (BHKW) und Brennwertkessel (BW-Kessel) sowie deren Anforderungen an die Hydraulik

Teil II: Hydraulische und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen mit BHKWs und BW-Kesseln

**Teil: III: Bewertung von Praxisbeispielen und Entwicklung optimierter Lösungsansätze**

### Einleitung

Im ersten Teil des Manuskripts „Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärme­erzeugung mittels BHKW und BW-Kessel“ wurde zunächst die Bedeutung von Block-Heiz-Kraft-Werken (BHKWs) und Brennwertkesseln (BW-Kesseln) im Zeitalter der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft dargestellt. Darüber hinaus wurde detailliert und begründet auf die zum Teil sehr unterschiedlichen, einzuhaltenden Anforderungen dieser Wärme­erzeuger an die Hydraulik eingegangen.

Im zweiten Teil wurde auf vielfältige hydraulische und regelungstechnische Probleme bei der Nutzung von BHKWs und BW-Kesseln speziell auch in bivalenten Heizungssystemen hingewiesen.

Im nun folgenden dritten Teil werden gängige hydraulische Einbindungen von BHKWs und BW-Kesseln vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert, wobei folgende Besonderheiten zu beachten sind:

- Die BHKWs sind im Vorrang vor den BW-Kesseln zu betreiben.
- Die Vorlauf­temperatur von BHKWs liegt in der Regel bei konstant 85° bis 90° C.
- Die Rücklauf­temperatur zum Motor des BHKW soll möglichst konstant 70° C betragen, darf diese aber nicht übersteigen - sonst schaltet das BHKW ab oder geht auf Notkühlung. Hierzu werden in der Regel Rücklauf­temperaturen unter 60° bis 65° C gefordert, da zum Schutz der Motoren vor Verschmutzung meistens eine Systemtrennung mittels Wärmetauscher im BHKW-Modul vorgenommen wird. Das Anheben der Rücklauf­temperatur ist kein Problem und kann mittels Beimischschaltung primär- oder sekundärseitig von der Systemtrennung des BHKWs erfolgen. Niedrige Rücklauf­temperaturen bringen daher viele Vorteile aber keinerlei Nachteile mit sich. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn das BHKW selbst mit einem Brennwerttechnik-Abgas-WT ausgestattet ist, da zur Nutzung des Brennwerteffektes möglichst niedrige Rücklauf­temperaturen erforderlich sind.
- Die meisten BHKWs fordern einen Mindestmassenstrom. Wird dieser unterschritten, geht das BHKW auf Störung. Da die Leistung der BHKWs oft nur für die Grundlast des Systems ausgelegt wird, ist eine Mindestmassenstrom­unterschreitung sehr unwahrscheinlich und entsprechend selten.
- Die Vorlauf­temperatur von BW-Kesseln ist sehr variabel, aber oft auf 70° C begrenzt. Dies hängt mit der möglichen Verwendung von Abgassystemen aus Kunststoff zusammen. Werden

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärme­erzeugung mittels BHKW und BW-Kessel**  
**Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

andere Abgassysteme verwendet, können Vorlauftemperaturen bis 95° C problemlos gefahren werden.

- Die hohe Effizienz von BW-Kesseln beruht auf der Kondensation des bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampfs aus den Abgasen. Je mehr Wasserdampf kondensiert wird, desto höher ist die Effizienz. Die weit verbreitete Behauptung, BW-Kessel würden schon optimal arbeiten, wenn die Rücklauftemperatur den Taupunkt der Abgase (Gasverbrennung 57° C, Ölverbrennung 47° C) unterschreitet, ist falsch [III 1]. Vielmehr gilt: je niedriger die Rücklauftemperatur, desto mehr Wasserdampf kann aus dem Abgas kondensiert werden und desto höher ist der Wirkungsgrad.
- Es gibt BW-Kessel mit Anforderungen an den Mindestmassenstrom und solche ohne entsprechende Anforderungen. Hier sind die Herstellerangaben sorgfältig zu lesen. Da die BW-Kessel auf die Spitzenleistung des Systems ausgelegt werden, wird es hier im Gegensatz zum BHKW viel häufiger zu einer Mindestmassenstromunterschreitung und damit zu Problemen kommen. In neuester Zeit fordern einige Hersteller nicht mehr einen Mindestmassenstrom, sondern begrenzen den Gradienten des Kesseltemperaturanstiegs. Da dieser aber direkt mit dem Massenstrom korreliert, entspricht dies eher einer „Problem-schön-Rederei“ als einer Problemlösung.

Anschließend werden eigene Vorschläge zur Systemoptimierung vorgestellt und diskutiert. Hierbei wird versucht, den Vorteil der Reihenschaltung (gute Regelbarkeit, stabiler Betrieb) mit dem Vorteil der Parallelschaltung (hohe Effizienz durch minimale Rücklauftemperatur) zu vereinen.

## Einbindung

BHKWs müssen sowohl elektrisch als auch thermisch in übergeordnete Energiesysteme eingebunden werden. Nur die möglichst umfangreiche und sinnvolle Nutzung von Strom und Wärme garantieren einen ökologischen und ökonomischen Betrieb. BHKWs besitzen den maximalen elektrischen Wirkungsgrad am Nennbetriebspunkt. Daher werden sie in Deutschland auf Grund der –zumindest in der Vergangenheit - guten Strom-Einspeisevergütung meist „wärmegeführt“ am Nennbetriebspunkt betrieben. Bei einer unter die BHKW-Heizleistung sinkenden thermischen Verbraucherlast gehen die Anlagen in den Taktbetrieb. Generell soll die Takthäufigkeit von Wärmeerzeugern - primär aus Emissions- und Verschleißgründen - niedrig gehalten werden, was insbesondere auch für die BHKWs gilt. Erreicht werden kann dies u.a. durch leistungsausgleichende thermische Speicher. Hierbei muss nicht zwangsweise immer ein Pufferspeicher in das hydraulische Netz eingebaut werden. In vielen Fällen stellen die Verbraucher eine sehr große Speicherkapazität (z.B. Schwimmbecken), die ggf. durch Anpassung der Schalthysterese aktiviert oder vergrößert werden kann.

Aufgrund der sinkenden Einspeisevergütung im öffentliche Stromnetz wird ein „stromgeführter Betrieb“, der sich am Eigenbedarf orientiert, immer verbreiteter. In solchen Fällen ist dann eine elektrische Leistungsanpassung gefragt, was eine schwankende Heizleistung zur Folge hat. Auch hier können thermische Puffer sehr sinnvoll sein. Zum einen, um die Wärmeabnahme zu Zeiten elektrischer Spitzenleistung zu garantieren, zum anderen, um ein Anspringen der Spitzenlastkessel zu Zeiten geringen Strombedarfs zu reduzieren.

Die hydraulische Einbindung und die Regelung sind so vorzunehmen, dass all diesen Forderungen möglichst umfangreich Rechnung getragen wird. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass BHKWs mit Vorrang möglichst nahe und lang am Nennbetriebspunkt betrieben werden sollen. Der

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Spitzenlastkessel muss das BHKW bei Bedarf unterstützen, darf es aber bei seinem Betrieb, im Hinblick auf eine möglichst hohe System-Effizienz und lange Laufzeiten, nicht stören.

## Hydraulische Schaltungen aus der Praxis

Vorweg sei angemerkt, dass die (bei den meisten BHKWs technisch notwendige) Rücklauf-temperatur-Anhebung auf 70°C für die Motorblock-Kühlung heute in der Regel im BHKW-Modul (primärseitig der Systemtrennung) erfolgt. Dies kann wie in Abbildung 1 gezeigt, dargestellt werden. Eine sekundärseitige (bezogen auf die BHKW-Systemtrennung) Rücklauf-temperatur-anhebung ist in diesen Fällen nicht notwendig.

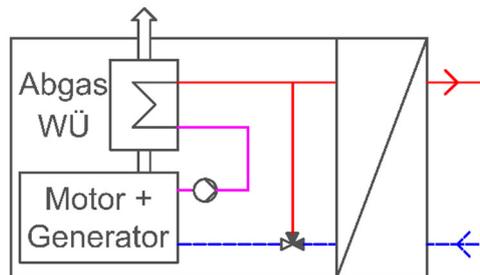


Abb. 1: BHKW-Modul mit integrierter Rücklauf-temperatur-anhebung

Grundsätzlich lassen sich BHKW und BW-Kessel parallel oder in Reihe zueinander einbinden. Die Parallele Einbindung hat den Vorteil, dass beide Wärmeerzeuger mit niedrigen Rücklauf-temperaturen angefahren werden, was deren Effizienz bzw. Einsatzmöglichkeiten erhöht. Die Reihenschaltung weist zwar niedrigere Wirkungsgrade im Bereich der Brennwertnutzung auf, lässt sich aber leichter regeln und führt damit zu einem wesentlich stabileren Betrieb in der Praxis [III 3,4].

## Serielle Einbindung

Abbildung 2 zeigt die einfachste Form der Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel. In der Regel wird das BHKW parallel zu einem Bypass (hydraulische Weiche) geschaltet, der bei Bedarf als Pufferspeicher auszuführen ist. Hintergrund ist die Entkopplung der meist sehr unterschiedlichen Massenstromanforderung von BHKW und BW-Kessel. Im Idealfall wird der Massenstrom der BHKW-Kreispumpe auf eine vorgegebenen BHKW-Kreis Vorlauf-temperatur geregelt. Auch wenn diese Massenstromregelung auf die Rücklauf-temperatur des BW-Kessels keinen Einfluss hat, kann bei niedriger Verbraucherlast der Pufferspeicher mit konstanter Temperatur stabil schichtend geladen werden. Die Abschaltung und Freigabe des BHKWs erfolgt über die Rücklauf-temperatur. Ist der Sensor hierzu im BHKW (bzw. BHKW-Kreis) platziert, muss sichergestellt werden, dass die BHKW-Kreispumpe auch bei abgeschalteten BHKW auf Minimalleistung läuft. Anderenfalls bekommt das „stehende BHKW“ einen Abfall der Rücklauf-temperatur und damit eine Freigabe u.U. nicht rechtzeitig mit.

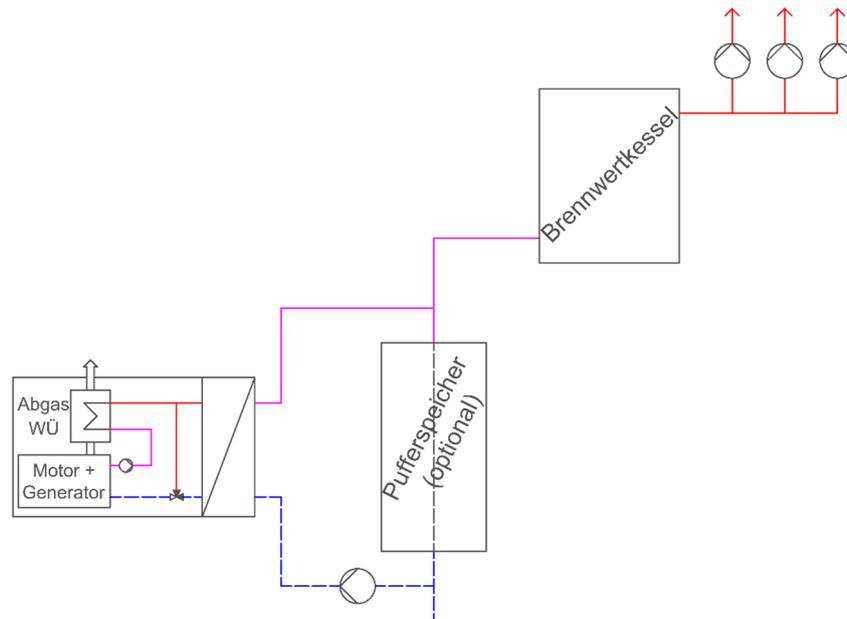


Abb. 2: Reihenschaltung von BW-Kessel und BHKW mit und ohne Pufferspeicher

Das BHKW wird meist vor den BW-Kessel geschaltet. Grund hierfür ist, dass zum einen eine unzulässig hohe Rücklauftemperatur beim BHKW zum völligen Abschalten, beim BW-Kessel hingegen lediglich zu Effizienzeinbußen führt. Zum anderen ist die Leistung und damit die Temperaturerhöhung durch das BHKW in der Regel viel geringer als beim BW-Kessel. Damit wirkt sich der Nachteil vom BHKW auf den BW-Kessel weit weniger gravierend aus als umgekehrt. Generell wäre es allerdings sinnvoll, die Brennwerttechnologie am BHKW zu verorten anstatt am Spitzenlastkessel.

Die Leistung des BW-Kessels kann in diesem Fall sehr einfach nach der Kesseltemperatur (Soll- Istwert Vergleich) geregelt werden. Wesentlich bei dieser Schaltung ist, dass der BW-Kessel keine Anforderungen an den Mindestmassenstrom besitzen darf, bzw. dass dieser von den Verbrauchern nicht unterschritten wird, da hier keinerlei hydraulische Entkopplung von Erzeuger- und Verbraucherseite vorliegt. Auch sollten die Druckverluste im BW-Kessel niedrig sein, da er über keine eigene Umwälzpumpe verfügt.

Diese einfache hydraulische Schaltung arbeitet in der Praxis sehr robust und bedarf keiner übergeordneten Regelung. Bei Bedarf kann wie in Abbildung 3 dargestellt der BW-Kessel auch mit einem „Sommer Bypass“ umfahren werden, um die Stillstands-Verluste am BW-Kessel zu vermeiden.

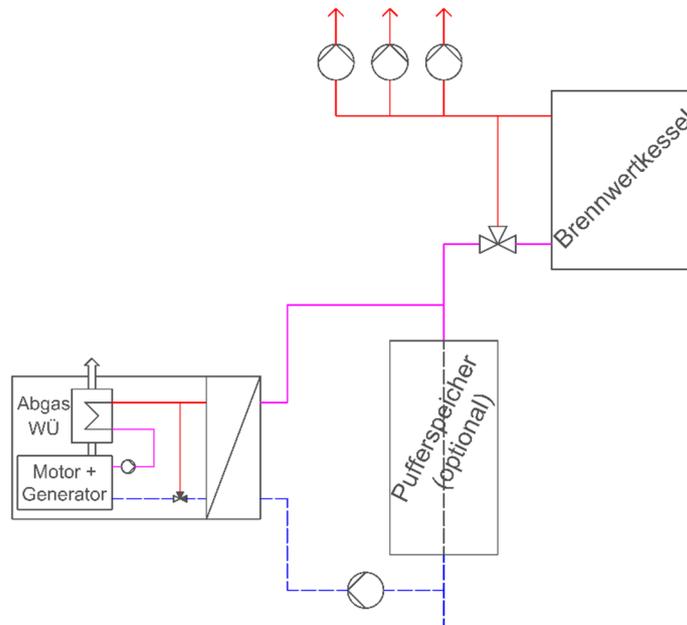


Abb. 3: Reihenschaltung von BW-Kessel und BHKW mit Sommer-Bypass

Sollte der BW-Kessel Anforderungen an den Mindestmassenstrom besitzen, kommt in der Praxis meist eine Reihenschaltung wie in Abbildung 4 dargestellt zum Einsatz. Hier wird der BW-Kessel ebenfalls durch eine hydraulische Weiche vom Verbraucherkreis entkoppelt. Diese wird in seltenen Fällen als Pufferspeicher ausgeführt um die Takthäufigkeit des BW-Kessels zu reduzieren.

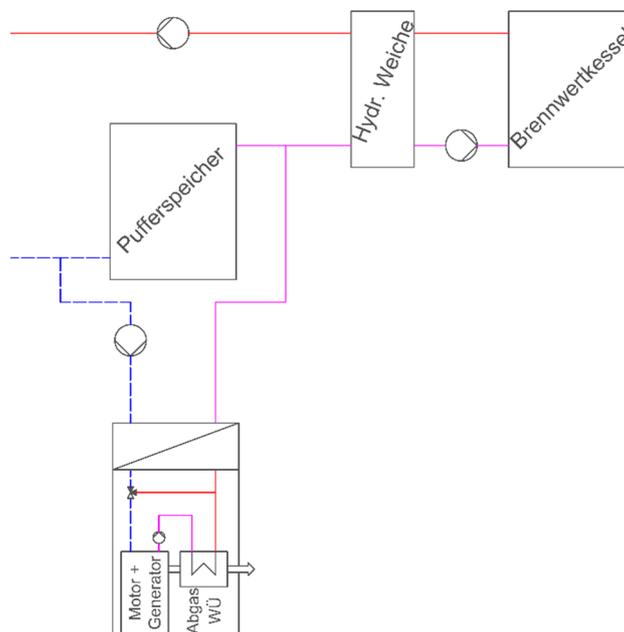


Abb. 4: Reihenschaltung von BW-Kessel mit Mindestmassenstrom und BHKW

In den meisten Anwendungsfällen kommt allerdings nur eine sehr einfache Regelstrategie zum Einsatz. Hier wird die Umwälzpumpe des BW-Kesselskreises unregelt mit einem Massenstrom ca. 20 % über

dem Auslegungs-Massenstrom der Verbraucherkreise betrieben und die Brennerleistung nach der Vorlauftemperatur des BW-Kessels geregelt. Dieser hohe Massenstrom soll das Überströmen von Rücklaufwasser in den Vorlauf über die hydraulische Weiche verhindern und dadurch die (hohe) Vorlauftemperatur und Heizleistung am Verbraucher sicherstellen. Diese einfach erkaufte „Sicherheit“ wird aber durch eine sehr umfängliche Rücklauftemperaturanhebung am BW-Kessel und somit durch eine drastische Reduzierung der Effizienz erkaufte.

Eine gute Betriebsweise, bei der ein Überströmen von Vorlaufwasser in den Rücklauf des BW-Kessels minimiert und der Brennwertnutzen bestmöglich erhalten wird, gestaltet sich aufwendiger und wird in der Praxis selten konsequent umgesetzt.

Problematisch hierbei ist, dass durch die hydraulische Weiche die Information einer Leistungsreduzierung am Verbraucher aufgrund von Massenstromreduzierung nicht direkt an den BW-Kessel übertragen wird. Die Leistungsregelung des BW-Kessels (Kesseltemperaturregelung) wird erst aktiv, wenn bei (konstantem Massenstrom) die Rücklauftemperatur am BW-Kessel (aufgrund einer Überströmung durch die hydraulischen Weiche), ansteigt. Dies ist effizienztechnisch aber zu spät. Besonders problematisch ist dieses Verhalten bei der Verwendung eines Pufferspeichers als hydraulische Weiche. Aufgrund der Trägheit kommt es mitunter zu einer erheblichen Totzeit, bis ein Anstieg der Rücklauftemperatur am BW-Kessel zu einer Leistungsreduzierung führt. Wenn der Pufferspeicher eine gute Schichtung aufweist (was in aller Regel gewünscht ist) führt eine Reduzierung des Verbrauchermassenstroms zu einer Reduzierung der Rücklauftemperatur an den Verbrauchern und damit zunächst auch am BW-Kessel. Bei konstantem Kessel-Massenstrom muss jetzt die Heizleistung erhöht werden, um die Vorlauftemperatur zu halten. Zu einer Reduzierung der Kesselleistung kommt es erst, wenn der Pufferspeicher voll ist und die Rücklauftemperatur angehoben wird.

Eine Möglichkeit, diese Problematik zu umgehen, besteht darin, die BW-Kessel-Vorlauftemperatur 5 K über der außentemperaturabhängigen Verbraucher-Vorlauftemperatur zu fahren. Der Massenstrom durch den BW-Kesselkreis wird über die Umwälzpumpe nach der einzuhaltenden Verbraucher-Vorlauftemperatur geregelt (Soll- / Istwert Vergleich). Nachdem dem Kessel somit Vorlauftemperatur und Massenstrom vorgegeben werden, kann seine Brennerleistung leicht geregelt werden. Sollte der Stellbereich der Umwälzpumpe im BW-Kesselkreis nicht groß genug sein, kann der überschüssige Massenstrom mit einem optionalen Durchgangsventil noch weiter gedrosselt werden. Vorsicht ist allerdings bezüglich der Einhaltung des Mindestmassenstroms geboten, was durch die übergeordnete Regelung sicher zu stellen ist. Ab Erreichen des Mindestmassenstroms wird der Massenstrom über den Kessel konstant gehalten und der Überschuss über die hydraulische Weiche in den Rücklauf gefahren.

Wie Simulationen am Institut für Gebäude- und Energiesysteme der Hochschule Biberach gezeigt haben, ergibt sich durch diese Massenstromregelung am BW-Kessel eine Gaseinsparung von ca. 5 %. Zusätzlich kann der Stromverbrauch der Umwälzpumpe um ca. 50 % gesenkt werden.

### **Parallele Einbindung**

Wie schon erwähnt hat die Parallelschaltung von BHKW und BW-Kessel den Vorteil, dass beide direkt auf die niedrigen Rücklauftemperaturen der Verbraucher zugreifen, was die Brennwertnutzung in jedem Fall begünstigt und obendrein die Gefahr der ungewollten BHKW-Abschaltung aufgrund zu hoher Rücklauftemperaturen reduziert.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Ist die gesamte Anlage so konzipiert, dass die Wärmeabnahme am BHKW und dessen Anforderungen an den Mindestmassenstrom unter allen übliche Bedingungen erfüllt sind, können die beiden Wärmeerzeuger wie in Abbildung 5 dargestellt, direkt parallel eingebunden werden. Der BHKW-Abzweig besitzt hierbei eine eigene Umwälzpumpe, die nur einen sehr leichten Überdruck erzeugt, damit aber gewährleistet, dass das BHKW mit Priorität betrieben wird. Bei konstanter (oder auch variabler) BHKW-Leistung wird hier der Massenstrom über die BHKW-Umwälzpumpe nach einer vorgegebenen Vorlauftemperatur geregelt. Wird die BHKW-Leistung durch die Verbraucher-Kreispumpe überfahren (Vorlauftemperatur kann nicht gehalten werden), öffnet das Absperrventil im BW-Kessel Abzweig. Da dieser Zweig über keine eigene Umwälzpumpe verfügt, wird nur der vom Verbraucher zusätzlich benötigte Massenstrom durch den BW-Kessel gefördert.

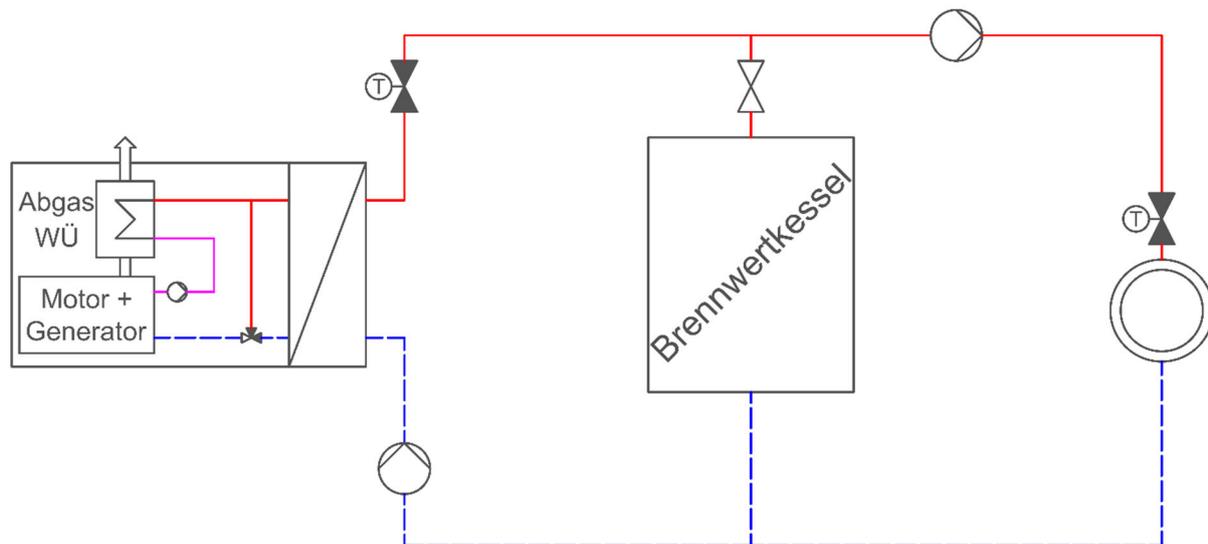


Abb. 5: Direkte Paralleleinbindung von BHKW und BW-Kessel

Die Leistungsregelung des BW-Kessels kann hier sehr einfach nach der vorgegebenen Kesseltemperatur bzw. Verbraucher-Vorlauftemperatur geführt werden. Für diese hydraulische Schaltung ist wieder zu beachten, dass der Kessel keine Anforderung an den Mindestmassenstrom besitzen darf und einen geringen Druckverlust aufweisen sollte.

Ist dies nicht gegeben, können Erzeuger und Verbraucher über eine hydraulische Weiche, die oft in Form eines Pufferspeichers ausgebildet ist, wie in Abbildung 6 dargestellt entkoppelt werden. Hierbei ergeben sich im Wesentlichen zwei Probleme. Wie weiter oben angesprochen und in [III 5] näher erläutert, unterbindet ein als hydraulische Weiche eingebauter Pufferspeicher die unmittelbare Informationsübertragung der Leistungsanforderung der Verbraucher an die Erzeuger, was deren effiziente Leistungsregelung sehr erschwert. Darüber hinaus müssten in einer übergeordneten Pumpenregelung die Massenströme entsprechend den Anforderungen und der Priorisierung abgeglichen werden. Dass dies in der Praxis in der Regel zumindest nicht hinreichend berücksichtigt wird, zeigen verschiedene Untersuchungen, u.a. eine der Ostbayerischen Hochschule [III 4]. Hier steigt die Rücklauftemperatur z.T. auf Werte, die jegliche Nutzung des BW-Effektes und den Einsatz von BHKWs unmöglich macht. Auch fällt es oft schwer, den BHKW-Betrieb zu priorisieren.

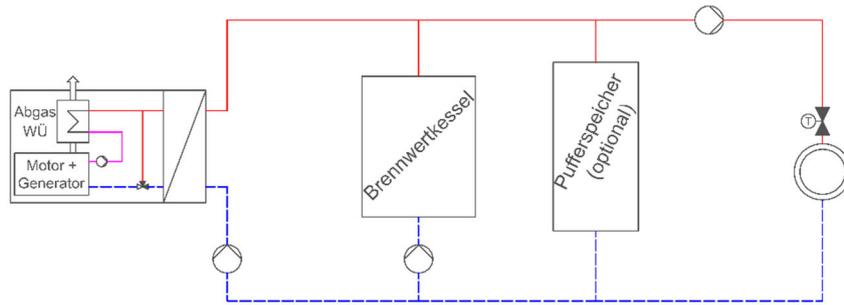


Abb. 6: Paralleleinbindung von BHKW und BW-Kessel mit hydraulischer Entkopplung

Varianten, bei denen der Rücklauf zum BW-Kessel oder zum BHKW rechts von der hydraulischen Weiche (sekundärseitig) abgegriffen wird, um den entsprechenden Erzeuger mit geringeren Rücklauftemperaturen anzufahren, bringen in der Praxis nur bedingt Verbesserungen bei der Brennwertnutzung bzw. der Laufzeitverlängerung des BHKWs. Weiterhin verhindert die Positionierung des Pufferspeichers links vom BHKW nicht, dass beide Erzeuger überschüssige Leistung in den Puffer einspeichern. Ursächlich hierfür sind zu hohe, nicht auf den Verbraucher abgestimmte Erzeugermassenströme. Es ist ein weit verbreitetes Problem, dass die Leistung, mit der der Puffer geladen wird, oft als aktuell notwendige Leistung interpretiert wird, und die Erzeugerleistung erst reduziert wird, wenn der Pufferspeicher befüllt ist.

Dem Wunsch, den Pufferspeicher nur für überschüssige Leistung des BHKWs zu nutzen und damit die BHKW-Laufzeiten zu verlängern, wird mit der Schaltung aus Abbildung 7 Rechnung getragen.

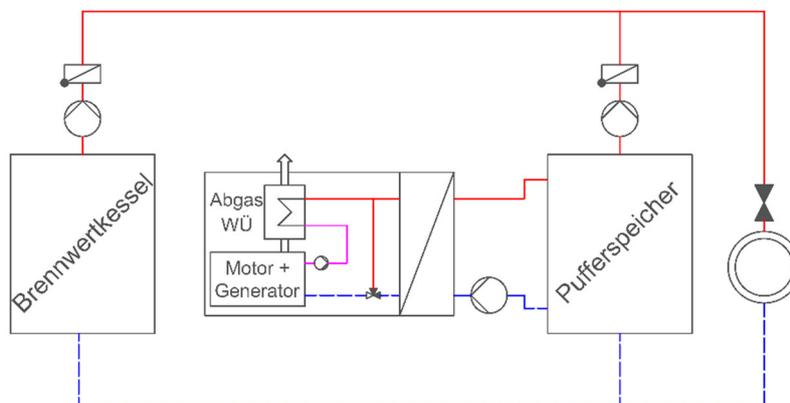


Abb. 7: Paralleleinbindung von BW-Kessel und Pufferspeicher mit direkt angeschlossenem BHKW

Hier sind BHKW- und Pufferspeicher-Kreis parallel geschaltet und jeweils mit eigener Umwälzpumpe sowie Rückschlagklappe ausgestattet. Das BHKW ist ebenfalls mit eigener Umwälzpumpe direkt an den Pufferspeicher angebunden. Im Grundlastfall lädt das BHKW den Pufferspeicher und die Pufferkreis-Pumpe versorgt die Verbraucher, indem Sie zeitgleich den Puffer entlädt. Reicht die Leistung des BHKWs nicht aus (Verbraucher-Vorlauftemperatur kann nicht gehalten werden), wird die Pufferspeicher-Umwälzpumpe ab- und der BW-Kessel samt Pumpe zugeschaltet. In diesem Betriebszustand lädt das BHKW den Pufferspeicher, ohne dass diesem Leistung entzogen wird. Die notwendige Leistung wird jetzt allein vom BW-Kessel zur Verfügung gestellt. Ist der Pufferspeicher hinreichend gefüllt, schaltet die Pufferspeicher-Umwälzpumpe ein und der BW-Kessel samt

Umwälzpumpe aus. Nun wird der Pufferspeicher bei laufendem BHKW entladen. Kann die Verbraucher- Vorlauftemperatur nicht mehr gehalten werden, beginnt der Zyklus von vorne. Der Verbraucher wird also abwechselnd aus dem Pufferspeicher des BHKWs oder vom BWK versorgt. Diese Schaltung weist den Vorteil auf, den BHKW-Betrieb ohne übergeordnete Pumpenregelung klar zu priorisieren und den Pufferspeicher nur für das BHKW zu nutzen. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass die Leistung des BW-Kessels den Bedarf der Verbraucher alleine decken muss. Die BHKW-Leistung darf hier nicht berücksichtigt werden. Zudem taktet der BW-Kessel häufiger. Darüber hinaus darf der in Abbildung 7 verwendete BW-Kessel keine Anforderungen an den Mindestmassenstrom besitzen. Anderenfalls ist wie in Abbildung 8 dargestellt, der BW-Kessel mittels hydraulischer Weiche vom Verbraucherkreis zu entkoppeln.

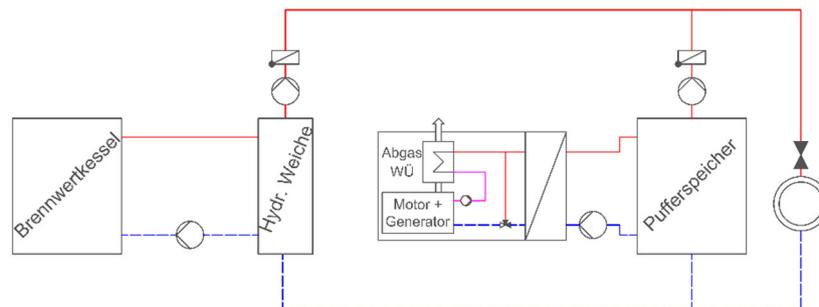


Abb. 8: Parallelschaltung von entkoppeltem BW-Kessel und Pufferspeicher mit direkt angeschlossenem BHKW

Gegenüber der Schaltung aus Abbildung 6 wird hier keine übergeordnete Pumpenregelung benötigt, um einen klar priorisierten BHKW-Betrieb sicher zu stellen. Allerdings besteht auch hier die große Gefahr der Rücklauftemperaturanhebung am BW-Kessel. Es bedarf daher einer klar überlegten Regelstrategie, um diesen Effizienz mindernden Effekt auf ein Minimum zu reduzieren.

Die hier dargestellten Überlegungen lassen sich mit zahlreichen Beispielen aus der Praxis belegen. Bei Verwendung von BW-Kesseln ohne Anforderung an den Mindestmassenstrom lassen sich wesentlich einfacher robuste und effiziente Systemlösungen erzielen, da hier keine hydraulische Entkopplung von Erzeuger- und Verbraucherkreis notwendig wird. Diese hydraulische Entkopplung führt bei den heute üblichen Ausführungen (keine Abstimmung von primär- und sekundärseitigem Massenstrom) zu einem Verlust an Informationen über den Lastzustand der Verbraucher, so dass sich die Leistungsregelung des Erzeugers meist als schwierig erweist.

Ganz wesentlich ist die Erkenntnis, dass für die Auswahl eines geeigneten hydraulischen Konzeptes mit einer passenden Regelstrategie die Kenntnis über die Massenstromanforderung der Erzeuger zwingend erforderlich ist.

### Optimierte hydraulische Einbindung

Hieran ändert auch das am Institut für Gebäude und Energiesysteme (IGE) der Hochschule Biberach entwickelte Hydraulikschema nichts. Dieses soll lediglich die Vorzüge der Reihenschaltung (leichte Regelbarkeit) mit denen der Parallelschaltung (hohe Effizienz durch niedrige Rücklauftemperatur) vereinen. Zwingend erforderlich ist hierfür ein BW-Kessel mit Nieder- und Hochtemperatur-

STUDIENGANG / INSTITUT Master Energie- und Gebäudesysteme

TITEL **Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmezeugung mittels BHKW und BW-Kessel**  
**Hydraulik von entscheidender Bedeutung**

ANSPRECHPARTNER/IN Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß

Rücklaufanschluss. Besitzt der BW-Kessel keine Anforderung an den Mindestmassenstrom, können die Komponenten wie in Abbildung 9 dargestellt verschaltet werden. Hier sind BHKW und Pufferspeicher zueinander parallel und mit dem BW-Kessel in Reihe geschaltet. Dabei wird das BHKW an den Hochtemperatur-Rücklauf und der Pufferspeicher an den Niedertemperatur-Rücklauf des BW-Kessels angeschlossen. Somit erfährt der BW-Kessel nur in sehr vereinzelt Betriebszuständen (Entladung des durchmischten, teilbeladenen Pufferspeichers mit unzureichender Vorlauftemperatur) eine den Brennwerteffekt reduzierende Rücklauftemperaturanhebung. Die Regelung erfolgt wie bei der Reihenschaltung in Abbildung 2. Das BHKW wird mit konstanter Leistung gefahren oder nach dem Strombedarf geregelt. Der Massenstrom der BHKW-Kreispumpe wird nach einer vorgegebenen BHKW-Kreis-Vorlauftemperatur geregelt. Diese Regelung besitzt den Vorteil, dass bei niedriger Verbraucherlast der Pufferspeicher mit konstanter Temperatur stabil schichtend geladen wird. Die Leistung des BW-Kessels wird nach der gewünschten Anlagen- (Kessel-) Vorlauftemperatur geregelt. Die Abschaltung und Freigabe des BHKWs erfolgt über dessen Rücklauftemperatur.

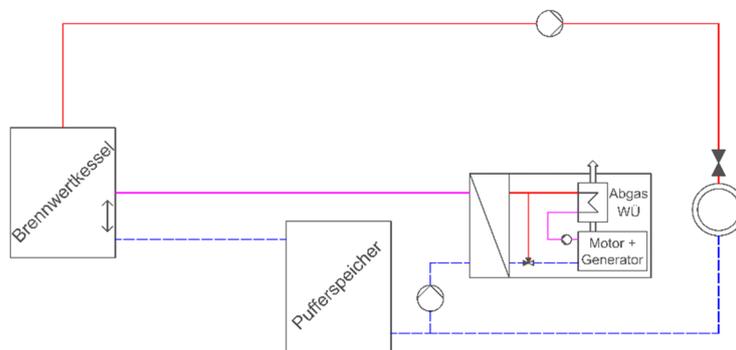


Abb. 9: Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel nach Floß

Das Besondere an dieser Schaltung ist, dass der Abgaswärmetauscher des BW-Kessels die Funktion einer hydraulischen Weiche bekommt und je nach Betriebszustand in unterschiedlicher Richtung durchströmt wird. Diese ungewöhnliche Einbindung erfordert unbedingt eine Freigabe des Kesselherstellers mit der Garantie, dass keine Rückfluss-Verhinderer in den BW-Kessel integriert sind.

Derzeit erprobt wird dieses Konzept vom Energieeinspar-Contractor Lean Energy Services GmbH (LEA) aus Unterschleißheim an mehreren Schulen in Schwabach. Bei stabilem Anlagenbetrieb erreichen die Systeme derzeit nicht immer die erhofften Laufzeiten der BHKWs. Hier ist eine weitere Optimierung der Regelung von Nöten.

Um unter Schwachlastbedingungen, in denen der BW-Kessel für lange Zeiträume nicht benötigt wird, dessen Abstrahlungsverluste zu vermeiden, kann der BW-Kessel wie in Abbildung 10 dargestellt mit einem Sommer-Bypass ausgeführt werden.

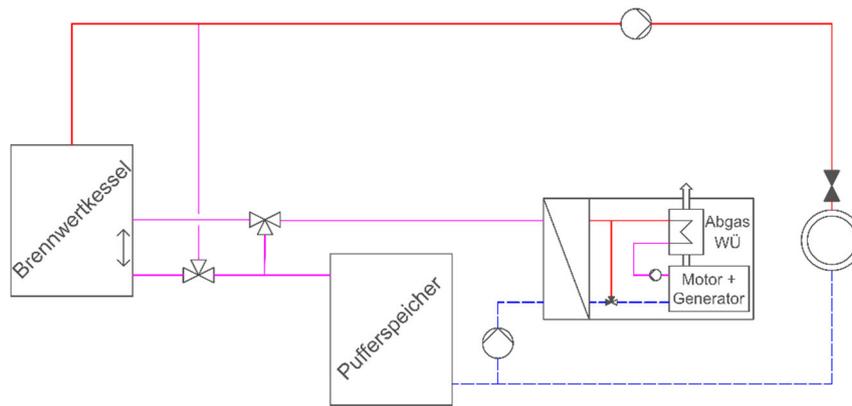


Abb. 10 Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel nach Floß mit Sommer-Bypass

Soll ein BW-Kessel, der Anforderungen an den Mindestmassenstrom stellt, verwendet werden, ist mit dem Hersteller abzuklären, ob sich dieser Mindestmassenstrom auf den gesamten Kessel oder nur auf den Brennraumwärmetauscher bezieht. Zweiteres kann, wie in Abbildung 11 dargestellt, mit Hilfe einer einfachen differenzdruckgeregelten Überströmung vom Vorlauf in den Hochtemperatur-Rücklauf sichergestellt werden. Dies beeinflusst die Nutzung des Brennwerteffekts nicht negativ. Allerdings erfordert eine gute Einjustierung des Mindestmassenstroms eine sorgfältige Abstimmung zwischen Pumpenregelung und Ventileinstellung.

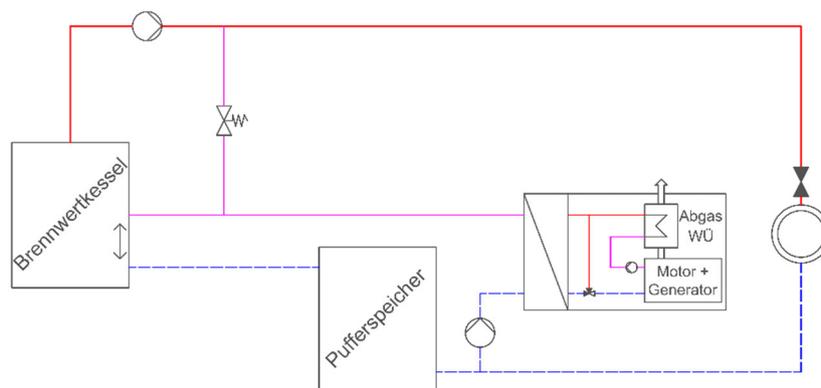


Abb. 11: Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel mit Anforderung an den Mindestmassenstrom nach Floß

Speziell bei Kesseln mit geringem Wasserinhalt und hoher Leistung kann, wie in Abbildung 12 gezeigt, die Takthäufigkeit des BW-Kessels durch die Integration eines Pufferspeichers in der Überströmung vom Kesselvorlauf zum Hochtemperaturrücklauf erheblich reduziert werden, was sich sehr positiv auf die Schadstoffemissionen des Kessels auswirkt [III 6]. Um den Pufferspeicher aber auch entladen zu können, ist in der Überströmung nun eine Umwälzpumpe (ggf. mit nachgeschaltetem Drosselventil)

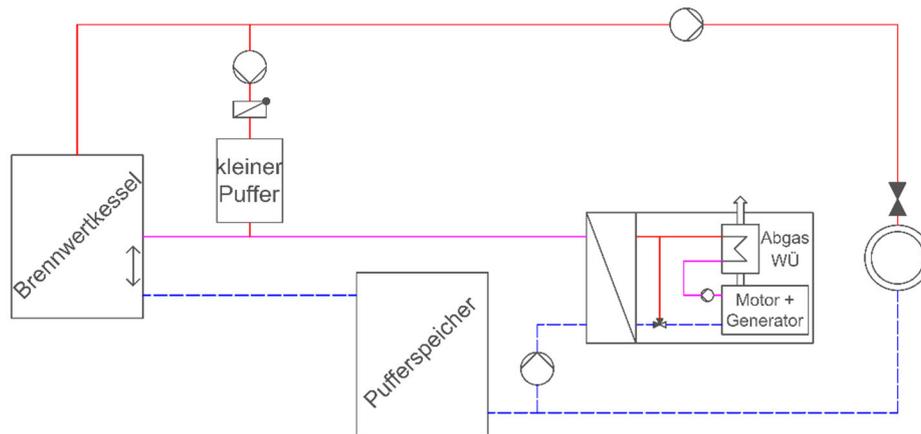


Abb. 12: Modifizierte Reihenschaltung von BHKW und BW-Kessel (mit Anforderung an den Mindestmassenstrom) und BW-Puffer nach Floß

notwendig. Auch bei dieser Variante wird die Kesselleistung nach der Kessel-Vorlauftemperatur geregelt. Während der Brennerlaufzeit wird die „Überströmpumpe“ so geregelt, dass im Kessel der notwendige Mindestmassenstrom erreicht wird. Ist der BW-Speicher geladen schaltet der Brenner aus, die Überströmpumpe bleibt aber weiterhin in Betrieb um ein Entladen des BW-Speichers sicherzustellen. Erst bei entladem BW-Speicher wird der Brenner wieder nach der Kesseltemperatur und die Pumpe nach dem notwendigen Mindestmassenstrom geregelt.

## Zusammenfassung

Die hier dargestellten Hydraulik schemata geben einen strukturierten Überblick über gängige Einbindungen von BW-Kesseln und BHKWs in bivalenten Heizungssystemen und zeigen die verschiedenen Probleme auf, ohne die vielfältigen Praxisbeispiele vollumfänglich darzustellen. Die serielle Einbindung hat den Vorteil einer einfacheren Regelung, die parallele Einbindung bietet den Vorteil einer höheren Effizienz. Kombinationen zur Systemoptimierung sind wie gezeigt möglich. Ganz wesentlich hierbei ist, dass die Kenntnis der hydraulischen Anforderungen aller im Gesamtsystem verwendeten Komponenten von entscheidender Bedeutung für einen optimalen Betrieb ist. Dies gilt insbesondere für den in der Praxis wenig beachteten Mindestmassenstrom, den viele Wärmeerzeuger fordern.

Speziell diejenigen, die Vorschläge verschiedener Hersteller (Quellen) miteinander kombinieren wollen, müssen die hydraulische und regelungstechnisch Funktionsweise und die System-Zusammenhänge möglichst vollumfänglich verstanden haben. Ein wildes Kombinieren von angepriesenen Vorteilen führt selten zu einem wirklich optimierten System.

## Literatur / Quellen

- [III 1] A. Floß, Qualitätssicherung bei Heizungsanlagen mit Brennwertechnik - "Kondi-Check" – Ein neues Verfahren zur Effizienzbewertung, Heizung Lüftung Klimatechnik, Ausgabe : Nr. 1-2/2006 Seite 39-41, Springer Business Media Austria GmbH, Februar 2006
- [III 2] Arbeitsgemeinschaft für Sparsamen und Umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Einbindung von kleinen und mittleren Blockheizkraftwerken / KWK-Anlagen, Publikation als PDF:  
[https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2007/broschueren/05\\_01\\_07\\_einbindung\\_bhkw\\_03\\_07.pdf](https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2007/broschueren/05_01_07_einbindung_bhkw_03_07.pdf), März 2003
- [III 3] D. Lotz, Parallele oder Serielle Einbindung? – Pufferspeicher bei bivalenten Anlagen, IKT-Fachplaner, November 2016
- [III 4] R. Lechner et. all., Optimierte Monitoring-, Betriebs- und Regelstrategien für Blockheizkraftwerke, Institut für Energietechnik, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, Abschlussbericht „SWS-10.08.18.7-14.27“, August 2017
- [III 5] A. Floß, Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel – Teil II: Hydraulische und regelungstechnische Probleme in bivalenten Heizungssystemen mit BHKWs und BW-Kesseln
- [III 6] C. Sulger, A. Floß, Einfluß der Takthäufigkeit auf die Schadstoffemissionen von Heizkesseln, IHKS Fach Journal 2018, <https://www.ihks-fachjournal.de/sector/heizungstechnik>, Seite 1-9,

## Hyperlinks

Mit Urteil vom 12. Mai 1998 – 312 O 85/98 – „Haftung für Links“ hat das Landgericht Hamburg entschieden, dass man durch die Ausbringung eines Links die Inhalte der gelinkten Seite ggf. mit zu verantworten hat. Dies kann – so das Landgericht – nur dadurch verhindert werden, dass man sich ausdrücklich von diesen Inhalten distanziert. Vor diesem Hintergrund distanziert sich der Autor hiermit ausdrücklich von allen Inhalten sämtlicher in dieser Veröffentlichung angegebenen Links, da er keinen Einfluss auf Inhalt und Gestaltung der verlinkten Seiten hat. Die Angabe der Links dient der leichteren, eigenverantwortlichen Recherche.

STUDIENGANG / INSTITUT	Master Energie- und Gebäudesysteme
TITEL	<b>Optimierung von Heizungsanlagen mit bivalenter Wärmeerzeugung mittels BHKW und BW-Kessel Hydraulik von entscheidender Bedeutung</b>
ANSPRECHPARTNER/IN	Prof. Dr.-Ing. Alexander Floß