

Mikro-KWK-Anlagen im Gewerbe

Teilprojekt F im Bayerischen Forschungsverbund BayFORETA

Energieeffiziente Technologien und Anwendungen

Gefördert durch das
Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst

Projektpartner: Energie Südbayern GmbH, München

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Josef Lipp
Dipl.-Ing. Florian Sängler
Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler

München, Dezember 2012

Inhalt

1	Kurzbeschreibung des Vorhabens.....	3
2	Wissenschaftlicher und technischer Innovationscharakter.....	3
3	Arbeitsprogramm und Arbeitsplan	3
4	Ergebnisse	6
4.1	Energiebedarfsanalyse nach Branchen	6
4.2	Synthese typischer Bedarfsgänge am Beispiel eines Bürogebäudes	6
4.3	Auswahl der Untersuchungsobjekte	7
4.4	Ergebnisse des Feldtests	10
4.5	Modellierung und Simulationsergebnisse	22
4.6	Prüfstanduntersuchung	27
4.8	Fazit.....	36
5	Übertragbarkeit und Verwertung der Ergebnisse	36
	Quellenverzeichnis:	37

1 Kurzbeschreibung des Vorhabens

Der Anteil der Kraftwärmekopplung (KWK) an der Stromerzeugung in Deutschland soll bis 2020 auf 25% verdoppelt werden. Neben der Erweiterung der bestehenden Fernwärmesysteme und dem Ausbau industrieller KWK-Nutzung werden auch Potenziale dezentraler Anlagen im unteren Leistungsbereich erschlossen werden müssen, um dieses Ziel zu erreichen. In den nächsten Jahren wird ein Rückgang des Raumwärmebedarfes erwartet, daher bietet sich an, den Wärmebedarf im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) verstärkt zu berücksichtigen.

Mikro-Blockheizkraftwerke (BHKW) im Leistungsbereich bis 10 kW elektrisch, bzw. 25 kW thermisch bieten sich hierfür an, sie können in vielen Fällen ohne großen Aufwand ein konventionelles Heizsystem ersetzen. Im Rahmen dieses Projektes soll untersucht werden, welche Branchen in Bayern aufgrund ihres typischen Wärmebedarfs für den Einsatz dieser Systeme geeignet sind. Schwerpunkte werden die Auslegung und der Betrieb der Anlagen sein. Die Ergebnisse theoretischer Überlegungen werden im Rahmen eines Feldversuchs verifiziert und der Betrieb mit Hilfe von Simulationen und Prüfstandversuchen optimiert.

Prinzipiell eignen sich neben Verbrennungskraftmaschinen auch andere KWK Technologien für den Einsatz im Gewerbe, jedoch stehen derzeit in der untersuchten Leistungsklasse weder Systeme mit Stirlingmotoren noch mit Brennstoffzellen am Markt zur Verfügung. Deshalb liegt der Fokus der Untersuchungen auf Ottomotoren (Mikro-BHKW), die mit Erdgas betrieben werden.

Den Abschluss bildet eine Potenzialabschätzung der (Mikro-) KWK-Technologie aller Branchen des GHD Sektors für Bayern.

2 Wissenschaftlicher und technischer Innovationscharakter

Während es zahlreiche Untersuchungen zum Einsatzpotenzial von Mikro-BHKW-Systemen in Wohngebäuden gibt, fehlen wegen der Heterogenität des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) entsprechende Analysen.

Die Besonderheit dieses Vorhabens ist die Methodenkombination aus statistischer Analyse, Einsatz der Systeme im Feldversuch mit messtechnischer Datenerfassung und Durchführung praxisnaher Prüfstanduntersuchungen. Durch Umsetzung der im Feldversuch gewonnenen Messdaten auf den Prüfstand kann unter reproduzierbaren Bedingungen der Betrieb der KWK-Systeme optimiert werden und dies wiederum im Feldversuch verifiziert werden. Dies bildet die Basis für eine realistische Potenzialabschätzung für den Einsatz von Mikro-BHKW in ausgewählten Branchen im Sektor GHD in Bayern.

3 Arbeitsprogramm und Arbeitsplan

a) Phase 1

AP 1.1 Analyse des Wärme-, Kälte- und Strombedarfs nach Branchen

Als Ausgangspunkt für die Auswahl geeigneter Branchen wird eine Analyse des Wärme-, Kälte- und Strombedarfs von Betrieben verschiedener Wirtschaftszweige in Bayern durchgeführt, der Schwerpunkt liegt dabei auf kleinen und mittleren Betrieben. Die Gewinnung der Daten erfolgt durch Literaturrecherche, Datenbereitstellung von Gewerbebetrieben und ggf. Messungen vor Ort.

AP 1.2 Synthese typischer Bedarfsgänge von ausgewählten Branchen in Bayern

Auf Basis der in der Energiebedarfsanalyse gewonnenen Informationen werden Branchen ausgewählt, die für den Einsatz von Mikro-BHKW-Systemen besonders geeignet sind. Für die Auslegung dieser Systeme und die nachfolgenden Prüfstanduntersuchungen werden typische Bedarfsgänge des Strom- und Wärmebedarfs erarbeitet und als Tageslastprofile nach Typtagen und Branchen differenziert abgebildet.

AP 1.3 Auswahl und Festlegung konkreter Untersuchungsobjekte für Phase 2

Anhand der Ergebnisse aus AP1.1 und AP1.2 werden Branchen ausgewählt, für die mit einer optimalen Anlagenauslegung ein wirtschaftlicher Betrieb bzw. der Betrieb nahe an der Wirtschaftlichkeit möglich ist. In den ausgewählten Branchen werden gezielt geeignete Gewerbebetriebe im Versorgungsgebiet der Energie Südbayern GmbH (ESB) hinsichtlich der Teilnahme am Feldversuch angesprochen.

b) Phase 2

AP 2.1 Prüfstandmessungen

Am KWK-Prüfstand des Lehrstuhls kann ein praxisnaher Betrieb eines multifunktionalen Heizsystems, bestehend aus BHKW, Spitzenlastkessel, thermischen Speichern und dem Regelsystem realisiert und messtechnisch erfasst werden. Neben den zeitlichen Verläufen aller wichtigen Parameter, wie Temperaturen, Durchflüssen und Leistungen, können auch Energiebilanzen zur Bewertung des Betriebs erstellt werden. Als Beispiel hierzu zeigt Abbildung 1 die Tagesbilanz eines Wohngebäudes für einen Wintertag [Arndt 07].

In diesem Teilprojekt werden die in Phase 1 entwickelten Bedarfsgänge als Vorgabewerte eingesetzt, um den praxisnahen Einsatz von Mikro-BHKW Anlagen in Betrieben des Gewerbesektors zu untersuchen.

Durch die exakte Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen ist es möglich, das Gesamtsystem in Abhängigkeit von den Anforderungen durch die dynamische Wärmelast hinsichtlich seiner Auslegung und Regelung zu optimieren. Neben dem Regelverhalten der Anlage hat die Auslegung der thermischen Speicher einen großen Einfluss auf die Effizienz der Energiebereitstellung und die Wirtschaftlichkeit des Betriebs.

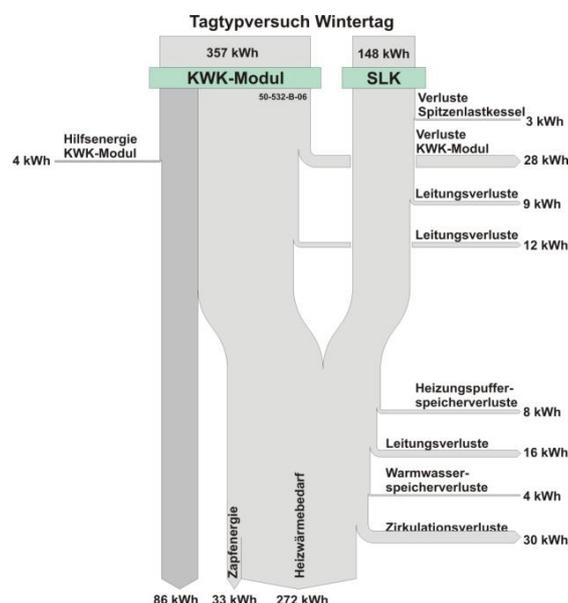


Abbildung 1: Energieflussdiagramm eines Wintertages für ein Wohngebäude

AP 2.2 Feldversuch mit Mikro-BHKW in Gewerbebetrieben in Bayern

Die im Rahmen von Prüfstandmessungen gewonnenen Erkenntnisse sollen durch einen Feldversuch umgesetzt und im Praxisbetrieb validiert werden. Dazu wurden in Phase geeignete Unternehmen ermittelt, die Interesse an dieser Technologie haben und bereit sind, ein Mikro-BHKW für die Wärmegrundlast und teilweisen Stromversorgung ihres Betriebes zu installieren. Es wird angestrebt, die Messungen über mindestens ein Jahr durchzuführen.

Die im Rahmen des Feldversuchs untersuchten Anlagen werden messtechnisch ausgestattet, um alle wesentlichen Energieflüsse des Gesamtsystems, wie Brennstoffverbrauch, Strom- und Wärmeerzeugung, aber auch Strom- und Wärmenutzung aufzunehmen. Die gewonnenen Daten werden über Fernabfrage ausgelesen und anschließend ausgewertet, analysiert und, soweit möglich, eine Optimierung des Anlagenbetriebs durchgeführt.

Sobald die Ergebnisse der Prüfstanduntersuchungen vorliegen werden die Erkenntnisse auf die im Feldversuch vorhandenen Anlagen übertragen.

AP 2.3 Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials für Mikro-KWK-Anlagen in Bayern

Aus den Informationen der energetischen Analyse, der Prüfstandmessungen und des Feldversuchs wird zusammen mit einer Betrachtung ökonomischer Einflussgrößen das wirtschaftliche Potenzial für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in Gewerbebetrieben in Bayern ermittelt. Dabei wird, soweit quantifizierbar, auch auf mögliche zukünftige Entwicklungen des Energiebedarfs, der Brennstoffpreise und neuer KWK Technologien (z.B. Brennstoffzellen) eingegangen.

Tabelle 1: Arbeits- und Zeitplan

Arbeitspakete / Quartal	Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Phase 1	■	■			■							
Analyse des Energiebedarfs nach Branchen	■	■			■							
Synthese typischer Bedarfsgänge		■	■		■							
Auswahl der Untersuchungsobjekte			■	■	■	■						
Phase 2												
Feldversuch mit Mikro-BHKW-Anlagen					■	■	■	■	■	■	■	■
Auswertung der Messdaten							■	■	■	■	■	■
Prüfstandsuntersuchungen							■	■	■	■	■	■
Potenzialabschätzung					■						■	■
Berichtserstellung			■				■					■

4 Ergebnisse

4.1 Energiebedarfsanalyse nach Branchen

Von den insgesamt 23 Branchen des GHD-Bereichs sind nicht alle für den Einsatz von Mikro-BHKW geeignet. Ein kontinuierlicher Wärmebedarf ist eine Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Einsatz dieser Systeme. Neben dem Raumheizwärmebedarf kann dies durch einen signifikanten Warmwasser- oder Prozesswärmebedarf gegeben sein.

Haben büroähnliche Betriebe, Handelsbetriebe oder Schulen keine zentrale Warmwasserbereitung, ist die Wärmegrundlast über das Jahr nur sehr klein. Andere Branchen haben zwar Prozesswärmebedarf, benötigen jedoch Temperaturniveaus von über 80°C, die für verfügbare Mikro-BHKW zu hoch sind (Bäckerei, Nahrungsmittelgewerbe, Metallgewerbe). Weitere Hemmnisse für den Einsatz von Mikro-BHKW ist die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Anlagengröße. So eignen sich beispielsweise Krankenhäuser oder Hallenbäder hervorragend für Kraft-Wärme-Kopplung, die Anlagengrößen sind in den meisten Fällen jedoch deutlich über 50 kW_{el}.

Die Analyse ergab, dass insbesondere Beherbergungsbetriebe, Heime, Fitnesscenter, Metzgereien und Gaststätten für den Einsatz von Mikro-BHKW geeignet sind [Wieser 2010]. Durch die Vernetzung von Gewerbebetrieben, die sich in räumlicher Nähe zueinander oder zu Wohngebäuden befinden, zu Nahwärmenetzen, können sich Einsatzmöglichkeiten für Mikro-BHKW auch in eher „ungünstigen“ Branchen ergeben.

Ein immer wichtiger werdender Bestandteil der Energieversorgung ist die Kältebereitstellung. Mit Hilfe einer Kombination aus Mikro-BHKW und einer Adsorptionskältemaschine kann Pluskälte zur Klimatisierung von Gebäuden erzeugt werden. Kälte wird in vielen Bereichen des GHD Sektors bei der Produktion, dem Transport und bei der Lagerung von Nahrungsmitteln benötigt, wird jedoch meistens mit Hilfe von Kompressionskältemaschinen erzeugt, insbesondere wenn Temperaturen um den Gefrierpunkt oder darunter benötigt werden [GHD 09]. Die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit Hilfe von thermisch betriebenen Adsorptionskältemaschinen ist im GHD-Bereich insbesondere für die Branchen Büro und Gaststätten interessant.

4.2 Synthese typischer Bedarfsgänge am Beispiel eines Bürogebäudes

Abbildung 2 zeigt beispielhaft an einem Bürogebäude die Ergebnisse der Energiebedarfsgangsynthese. Mit Hilfe von TRNSYS [TRNSYS 2009] wurde der Wärme- und Kältebedarf für ein Bürogebäude ($20^{\circ}\text{C} < T_{\text{Soll}} < 26^{\circ}\text{C}$) am Standort München-Riem ermittelt. Abbildung 2 zeigt dabei die Simulationsergebnisse als geordnete Jahresdauerlinien für die Wärme- und Kältelast. Die Jahresdauerlinie für die Antriebswärme der Adsorptionskältemaschine erfolgt durch Division der Kältelast durch einen angenommenen Wirkungsgrad von 60%. [Wieser 2011] Die „Jahresdauerlinie gesamt“ entsteht anschließend durch Addition der Wärmelasten für die Raumheizung und der Kältemaschine sowie absteigender Sortierung.

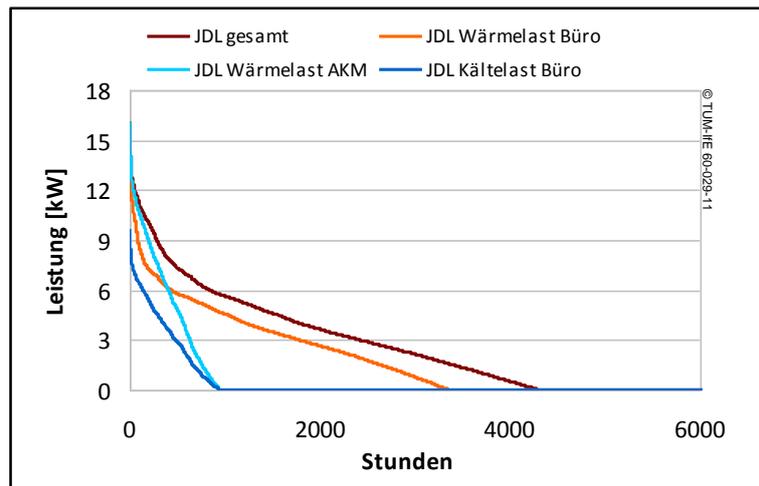


Abbildung 2: Jahresdauerlinien für ein Bürogebäude

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass sich die benötigte Wärmemenge um 44 % (von 23.600 kWh auf 33.900 kWh) erhöht, die Spitzenlast jedoch nur um 14 % zunimmt (von 14,1 auf 16,1 kW). Demzufolge steigt eine mögliche BHKW Laufzeit durch den Einsatz einer Adsorptionskältemaschine stark an. Ein weiteres interessantes Ergebnis liefert ein Blick auf die Spitzenlast. Diese tritt nicht mehr im Januar (am kältesten Tag), sondern am heißesten Tag im Juli auf.

Weiterhin muss festgestellt werden, dass eine Zunahme möglicher BHKW Laufzeiten von sehr vielen Faktoren abhängig ist. Neben der gewünschten Raumtemperatur sind hier vor allem die Gebäudephysik und der Fensteranteil inklusive deren Ausrichtung entscheidend. Deshalb kann nicht pauschal für Bürogebäude oder andere Gewerbe mit Klimakälte eine Kombination aus BHKW und Adsorptionskältemaschine empfohlen werden. [Wieser 2011]

4.3 Auswahl der Untersuchungsobjekte

Auf Basis der ermittelten BHKW Potenziale wurden für die Feldmessungen vier Objekte ausgewählt. Darunter befinden sich mit einer Metzgerei, einem Beherbergungsbetrieb und einer Sportstätte Gewerbe mit hohem Mikro-BHKW Potenzial. Als weiteres Objekt wird ein Autohaus untersucht, um auch weitere mögliche Anwendungsfälle oder Sonderfälle nicht aus dem Fokus zu verlieren.

In Flintsbach, im südlichen Oberbayern wird das BHKW des Gasthofs Falkenstein (inkl. eigener Metzgerei und Beherbergung mit 7 Doppel- und Mehrbettzimmern) vermessen. Hierbei handelt es sich um eine Mischanwendung, aus zwei Wärmeverbrauchstypen mit hohem BHKW Potenzial, die sich gut ergänzen. Die Metzgerei garantiert einen ganzjährig hohen Warmwasserbedarf in den Morgenstunden. Durch die Beherbergung und Bewirtung im Gasthof wird der Warmwasserbedarf im weiteren Tagesverlauf auf hohem Niveau gehalten. Im Sommer wird diese Energie ausschließlich durch das Mikro-BHKW Dachs, von SenerTec, bereitgestellt.

Eine Besonderheit, im Gewerbe mit hohem Kühlbedarf aber durchaus üblich, ist die Wärmerückgewinnung aus den Kälteanlagen, die zur Warmwasservorwärmung eingesetzt wird (siehe Abbildung 3 inkl. Messschema). Einen wichtigen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit dieser BHKW-Anlage leistet die Spitzenlastabsenkung zu den Betriebszeiten der Küche, die durch einen zeitgesteuerten BHKW Betrieb durch Verwendung des Pufferspeichers ermöglicht wird (vgl. Kapitel 4.6).

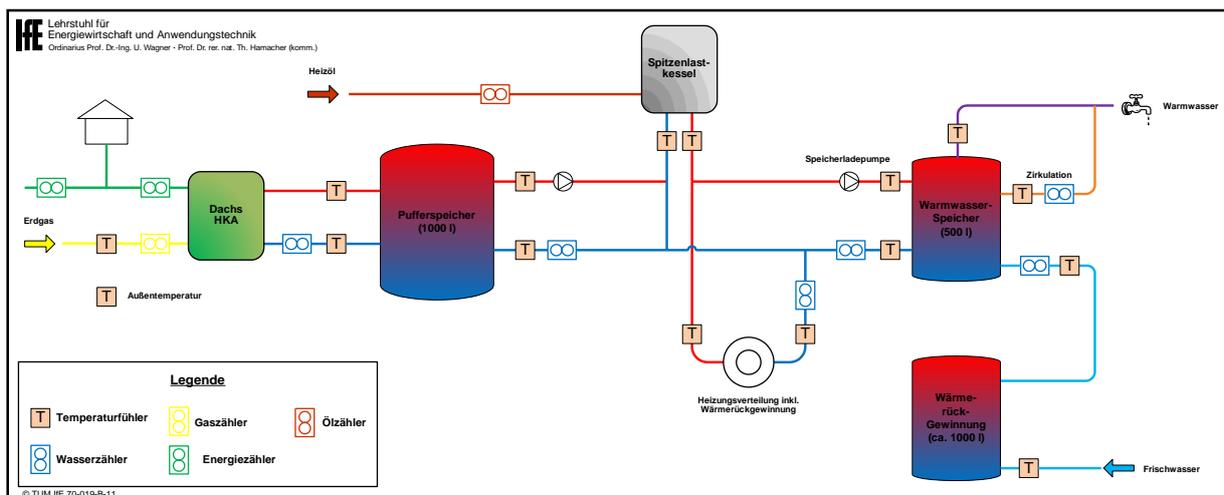


Abbildung 3: Hydraulikschema der Metzgerei Schwaiger in Flintsbach

Die Sportschule Puch (Abbildung 4) bei Fürstenfeldbruck zeichnet sich durch ihren ganzjährig hohen Warmwasserbedarf aus. Die Warmwasserbereitstellung wird durch zwei BHKW vom Typ Dachs sichergestellt. Bei diesem Objekt war vor Installation der BHKW bereits ein Vakuumröhrenkollektorsystem zur Warmwassererwärmung installiert. Der Einfluss solcher solarthermischer Anlagen auf die BHKW Betriebsstunden ist Teil der Untersuchung in der Sportschule Puch.

Die Metzgerei Baumann in Mallersdorf, eine Metzgerei mit mehreren Verkaufsfilialen in Niederbayern, zeichnet sich durch einen hohen Warmwasserbedarf und einen gleichzeitig auftretenden hohen Strombedarf in der Produktion aus. Hier wird zur Erprobung ein Aisin Marathon BHKW (Leistung laut Datenblatt: 4,6 kW elektrisch und 11 kW thermisch), welches momentan noch nicht auf dem deutschen Markt etabliert ist, eingebaut. Neben den gewöhnlichen Warmwasserspeichern sind auch hier zwei Systeme zur Wärmerückgewinnung aus den Kälteanlagen und Vorwärmung des Brauchwassers, vorhanden.

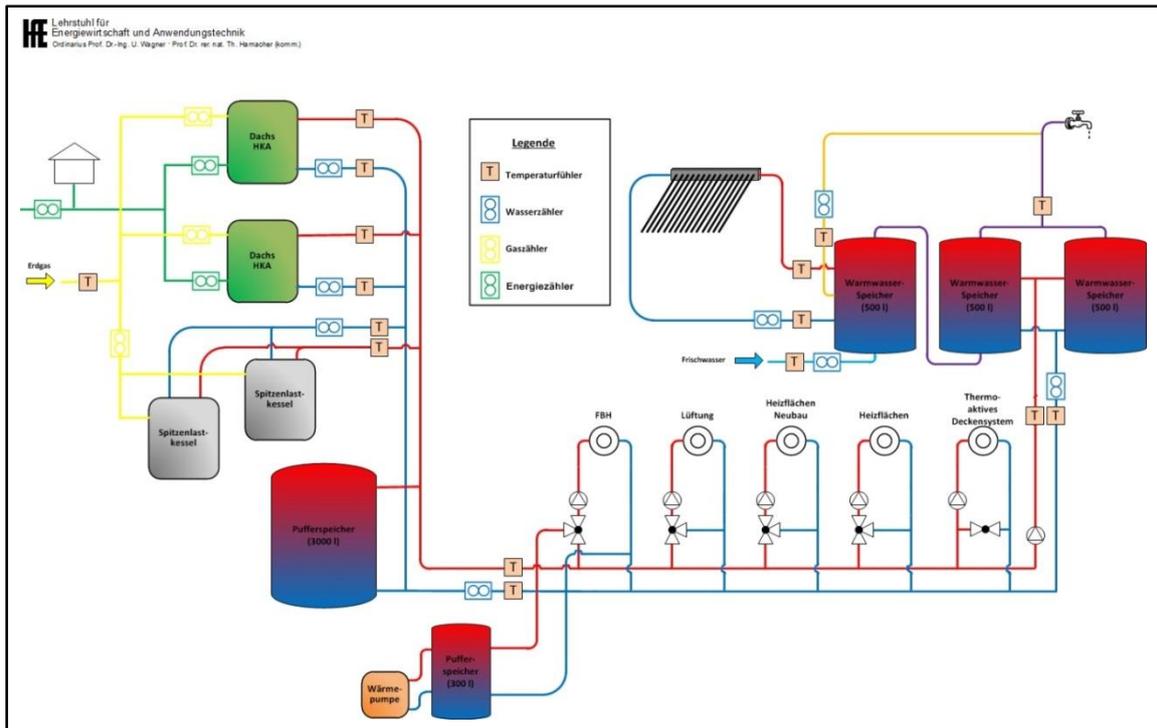


Abbildung 4: Hydraulikschema der Sportschule Puch bei Fürstenfeldbruck

Tabelle 2: Übersicht der Messstandorte

Standort	Flintsbach	Puch	Mallersdorf	Ottobrunn
Gewerbe	Metzgerei, Beherbergung & Wohnhaus	Sportschule	Metzgerei, Wohnhaus	Autohaus, Nahwärme- netz
Mikro-BHKW Typ	1 Dachs	2 Dachse	2 Dachse, 1 Aisin	1 EC Power
Leistung laut Datenblatt el. / th. [kW]	5,5 / 13	11 / 26	16 / 40	6-15,2 / 17-30
Spitzenlastkessel Leistung [kW]	Viessmann Paromat 105	2 x Viessmann Vitodens 200 60	Viessmann Atola 40	Weißhaupt WTC GB 90
Wärmeverbrauch [kWh]	103.971	181.600	303.621	150.968
Stromverbrauch [kWh]	144.979	172.875	144.855	83.431
Anteil der Wärme, die durch BHKW erzeugt wird [%]	76,7	67,7	62,7	82,8
Stromerzeugung [kWh]	32.612	53.513	85.024	44795
Stromeigennutzung [%]	100,0	94,0	71,7	42,5
Stromselbstversorgung [%]	22,5	29,1	42,1	22,8

4.4 Ergebnisse des Feldtests

In den folgenden Unterkapiteln a)– f) wird anhand des Gasthofs Falkenstein (Flintsbach) die Auswertung der Feldmessdaten beispielhaft aufgezeigt. Im letzten Unterkapitel (g) wird die Effizienz des Aisin Mikro-BHKW gezeigt.

a) Wärme- und Stromverbrauch

Abbildung 5 zeigt die aufgenommenen Tageswerte für den Wärme- (Heizkreis und Warmwasserspeicherladung) und Stromverbrauch vom 08.07.2011 bis einschließlich 13.09.2012. Die Messperiode umfasst insgesamt einen Zeitraum von 433 Tagen. Für 323 Tage liegen die Messwerte vollständig vor. Die durch Störungen der Hard- oder Software fehlenden Messtage sind in Abbildung 5 grau gekennzeichnet.

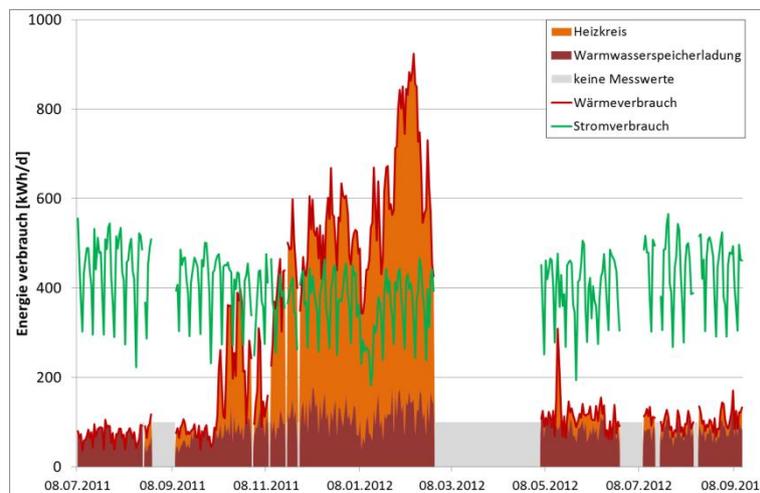


Abbildung 5: Wärme- und Stromverbrauch am Standort Flintsbach

Bei durchgehendem Betrieb kann ein Dachs Mikro-BHKW pro Tag maximal 312 kWh Wärme und 132 kWh Strom erzeugen. Dies hat zur Folge, dass in der Regel (wenn der Stromverbrauch über den Tag hinweg konstant ist) kein Strom in das Netz eingespeist werden muss, da der Tagesbedarf an elektrischer Energie zwischen 182 kWh (15.01.2012) und 566 kWh am 27.07.2012 liegt. Eine detaillierte Analyse des Stromverbrauchs findet sich in Kapitel 4.6. Der Gesamtwärmeverbrauch liegt zwischen 36 kWh (11.07.2011, mittlere Tagesaußentemperatur: 21,1°C) und 924 kWh (12.02.2012, mittlere Tagesaußentemperatur: -14,2°C), was einer BHKW Laufzeit zwischen drei und 24 Stunden entspricht. Dabei ist zu beachten, dass sich der Gesamtwärmeverbrauch aus dem Heizkreisverbrauch und der Wärme für die Warmwasserspeicherladung zusammensetzt. Während der Wärmeverbrauch für den Heizkreis stark mit der Außentemperatur schwankt, bleibt der Energieverbrauch der Warmwasserspeicherladung über das Jahr annähernd konstant.

Im Gegensatz zum Heizwärmeverbrauch ist der Stromverbrauch im Mittel in den Sommermonaten größer als im Winter. Die wöchentlich wiederkehrenden Schwankungen, die sich insbesondere aus den verschiedenen Betriebszeiten verstehen lassen, sind dabei stärker ausgeprägt als die jahreszeitlichen Unterschiede.

b) Wochentagsanalyse der Wärme- und Stromverbräuche

Eine detailliertere Verbrauchsanalyse der einzelnen Wochentage (Abbildung 6) zeigt, dass insbesondere am Montag der Verbrauch an elektrischer Energie (Abbildung 6, links) und an Warmwasser (Abbildung 6, rechts) deutlich geringer ist als an den restlichen Tagen. ¹

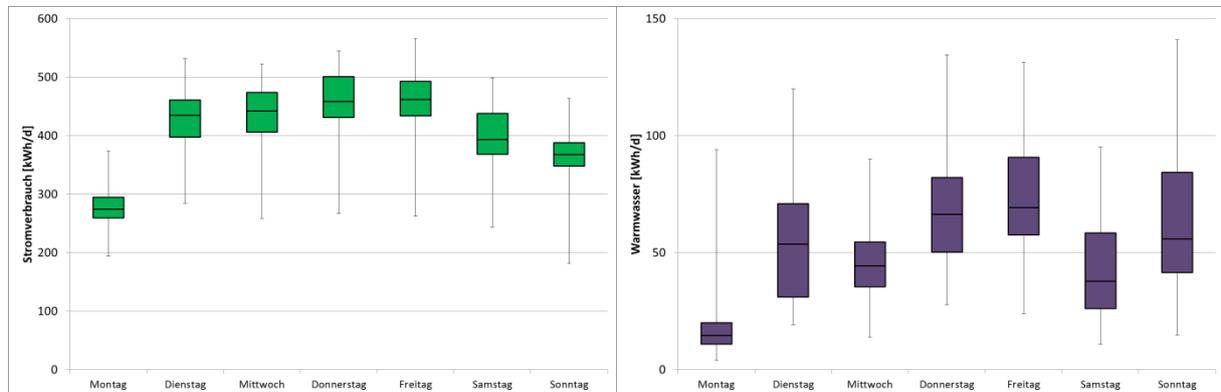


Abbildung 6: Strom- und Warmwasserverbrauch vs. Wochentage

Auf Nachfrage bestätigte sich die Annahme, dass die Metzgerei montags Ruhetag hat. Demzufolge ist der Montagsmedian für den Warmwasserverbrauch (14,6 kWh) sehr viel kleiner als an den restlichen Tagen (37,9 bis 69,3 kWh). Am Ruhetag ist auch der Stromverbrauch gegenüber den anderen Tagen deutlich kleiner. Jedoch verbleibt aufgrund der restlichen Kühlaggregate, dem Gasthof, der Beherbergung und dem restlichen Gebäude weiterhin ein großer Stromverbrauch (im Mittel größer 250 kWh).

Weiterhin führt die gesunkene Kühlnachfrage montags zu einem deutlich geringeren Wärmeeintrag durch die Wärmerückgewinnung in den „Vorwärme“-Warmwasserspeicher (vgl. Abbildung 7, links), während die anderen Tage auf einem ähnlichen Niveau (ca. 70 kWh) liegen. Keinen Wochentags-Einfluss haben die Zirkulationsverluste (Abbildung 7, rechts). Diese sind, aufgrund der Zeitsteuerung, im Verlauf einer Woche nahezu konstant.

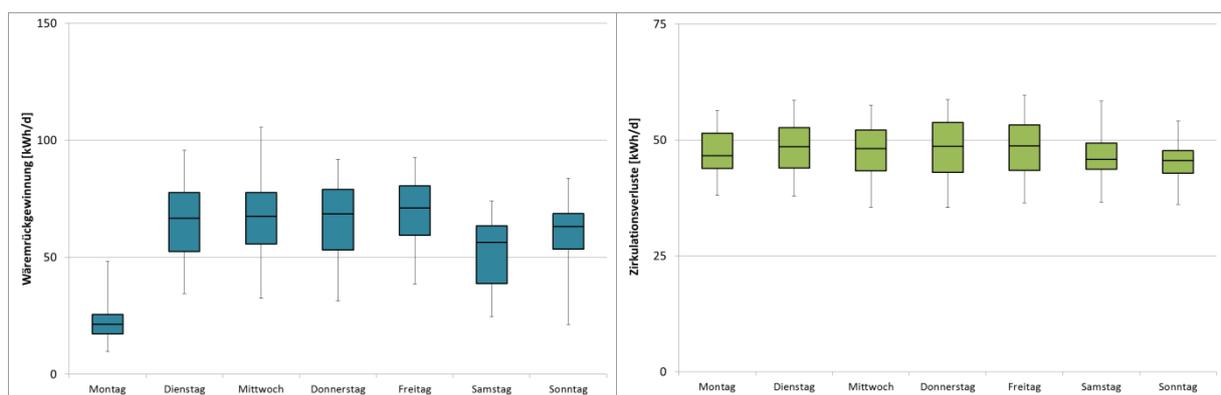


Abbildung 7: Wärmerückgewinnung und Zirkulationsverluste vs. Wochentage

Aus dem Warmwasserverbrauch, der Deckung der Zirkulationsverluste abzüglich des Beitrags durch die Wärmerückgewinnung ergibt sich die für den Betrieb des Mikro-BHKW

¹ Abbildung 6 bis Abbildung 8 zeigen sogenannte Boxplots. Diese bestehen aus dem Minimum, dem unteren Quantil, dem Median, dem oberen Quantil und dem Maximum. Die Boxplot Darstellung wurde hier gewählt, damit die Verteilung der Werte sichtbar wird.

entscheidende Größe, nämlich die Wärmemenge die dem Warmwasserspeicher zu Verfügung gestellt werden muss (Abbildung 8, links). Trotz Ruhetag, ist aufgrund des geringeren Energieeintrags durch die Wärmerückgewinnung, die benötigte Energie für die Warmwasserspeicherladung meist größer als 50 kWh, was auch im Sommer zu längeren BHKW-Laufzeiten führt.

Eine sehr geringe Wochentags-Abhängigkeit weist der Heizkreisverbrauch (Abbildung 8, rechts) auf. Während die absoluten Maxima, relativ gesehen, sehr nahe beieinander liegen (12,7 %), ist der Unterschied bei den Medianen schon deutlich größer (55,5 kWh an den Dienstagen gegenüber 194,2 kWh an Samstagen, entspricht 250 %). Die Ursache für die größeren Mediane von Donnerstag bis Sonntag liegt an der höheren Zimmerauslastung an den (langen) Wochenenden.

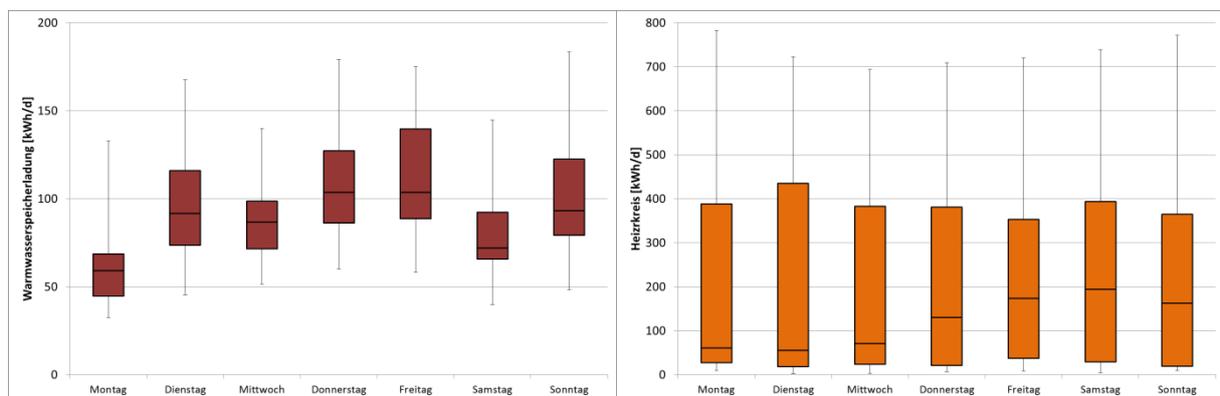


Abbildung 8: Warmwasserspeicherladung und Heizkreis vs. Wochentage

c) Zusammenhang zwischen Wärme- und Stromverbräuchen und der Außentemperatur

Da sowohl die Transmissions-, als auch die Lüftungsverluste linear mit der Temperaturdifferenz zwischen der Raum- und der Außentemperatur zunehmen, hängt der Wärmeverbrauch des Heizkreises sehr stark von dieser Differenz ab. Die Messungen zeigen, dass dieser theoretische, lineare Zusammenhang vor allem für den Temperaturbereich zwischen 0°C und 10°C gilt. Bei tieferen Temperaturen können die Heizkörper die Verluste nicht immer decken. Ebenso steigen die Lüftungsverluste weniger stark an, da bei sehr kalten Temperaturen in der Regel weniger gelüftet wird. Im Bereich größer 10°C gibt es Tage die weniger oder auch viel mehr Wärme benötigen. Weniger Heizwärme wird an Tagen mit hohen solaren Einträgen, oder nach einer manuellen Heizungsdeaktivierung in den Sommermonaten, benötigt. Deutlich seltener treten Tage mit höherem Heizenergieverbrauch auf. Diese Tage weisen oft eine große Temperaturschwankung auf, wodurch morgens und/oder nachts geheizt wird, obwohl im Mittel die Außentemperatur größer als die geforderte Temperatur ist.

Um einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Wärmeverbrauch des Heizkreises und der Außentemperatur herzustellen ist demzufolge ein linearer Zusammenhang nicht geeignet. Um die abgeflachten Ränder mathematisch besser, also mit geringerer Abweichung, darstellen zu können eignen sich Sigmoidfunktionen. Diese sind, im Gegensatz zu Polynomen, monoton steigend bzw. fallend und entsprechen dadurch dem intuitiven Verbrauchsverhalten. Darüber hinaus werden die „Knickstellen“ [Hell 2003], also die Übergänge zwischen dem linearen Teil und den abgeflachten Rändern abgerundet.

Für die folgenden Auswertungen wurden zwei ähnliche Funktionen verwendet:

I) $y = -A \times \text{tanhyp}(B \times T_A - C) + D$ „Regressionskurve (TANHYP)“

II) $y = \frac{A}{(1+(\frac{B}{T_A - 40})^C)} + D$ „Regressionskurve (Sigmoid)“

Die Koeffizienten A, B, C und D werden so angepasst, dass das Fehlerquadrat zwischen den Messpunkten und der Funktion minimiert wird.

Abbildung 9 zeigt die aufgenommenen Tagesverbräuche für den Heizkreis, die beiden Regressionskurven und zum Vergleich die Regressionsgerade.

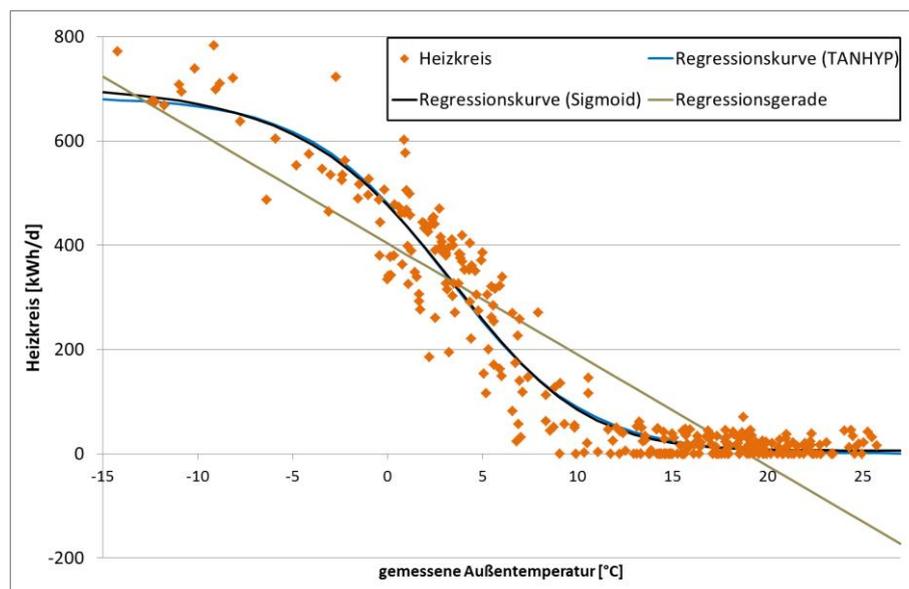


Abbildung 9: Heizkreis vs. Außentemperatur

Man erkennt, dass die beiden Regressionskurven sowohl den linearen, als auch die beiden abgeflachten Bereiche sehr gut treffen. Die Regressionsgerade ist einerseits im linearen Bereich zu flach und andererseits bei Außentemperaturen größer 20°C kleiner Null. Der Absolutwert der Fehlerquadrate für die Regressionsgerade (Steigung: -21,3301, y-Achsenabschnitt: 403,416) ist 2.362.070, während die Werte für die Regressionskurven im Bereich von 900.000, also ca. 62% darunter liegen,

Tabelle 3 zeigt die gefundenen Koeffizienten für die beiden Ausgleichskurven und die jeweiligen absoluten Fehler.

Tabelle 3: Koeffizienten der Regressionskurven

	A	B	C	D	absoluter Fehler
Regressionskurve (TANHYP)	342,316	0,137616	0,425351	341,951	911.705
Regressionskurve (Sigmoid)	702,735	-37,1924	9,67177	6,23009	877.650

Die weiteren Zusammenhänge zwischen Verbrauch und der Außentemperatur zeigen nachfolgende Abbildungen. Wie schon in Abschnitt a) vermutet ist der Stromverbrauch im Sommer tendenziell höher als im Winter (Abbildung 10, links), was sich aus dem erhöhten Kältebedarf des Metzgereibetriebs erschließt.

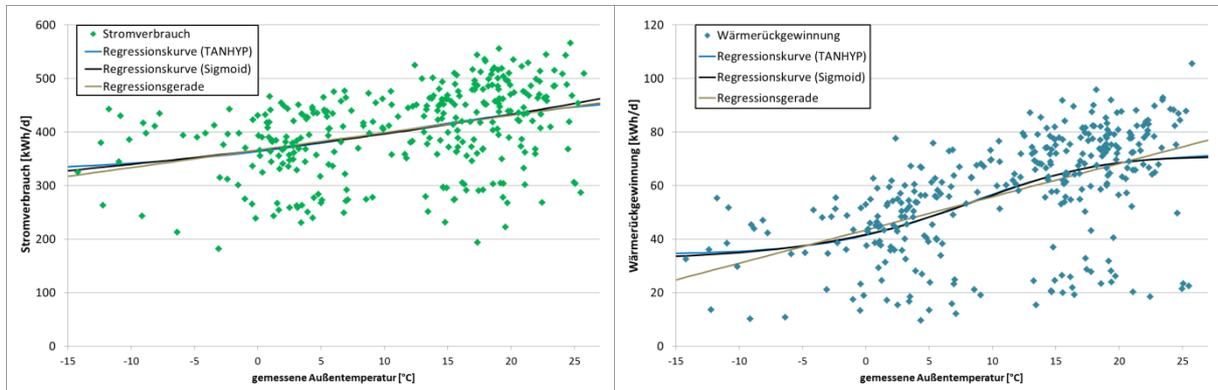


Abbildung 10: Gebäudestromverbrauch und Wärmerückgewinnung vs. Außentemperatur

Der Einfluss des erhöhten Kühlbedarfs zeigt sich ebenfalls in Abbildung 10, rechts. Mit steigender Temperatur erhöht sich auch die nutzbare Wärmeenergie aus der Vorwärmung.

Gleichzeitig sinkt jedoch die gezapfte Energiemenge aus dem Warmwasserspeicher (Abbildung 11, links) da durch das warm eintretende Wasser der Temperaturunterschied zwischen der Zapftemperatur und der Eintrittstemperatur deutlich gesunken ist. Insgesamt ist der volumetrische Warmwasserverbrauch (vgl. Abbildung 11, rechts) als auch der Energieverbrauch zur Warmwasserbereitstellung (Wärmerückgewinnung plus Warmwasser) über das Jahr hinweg nahezu konstant.

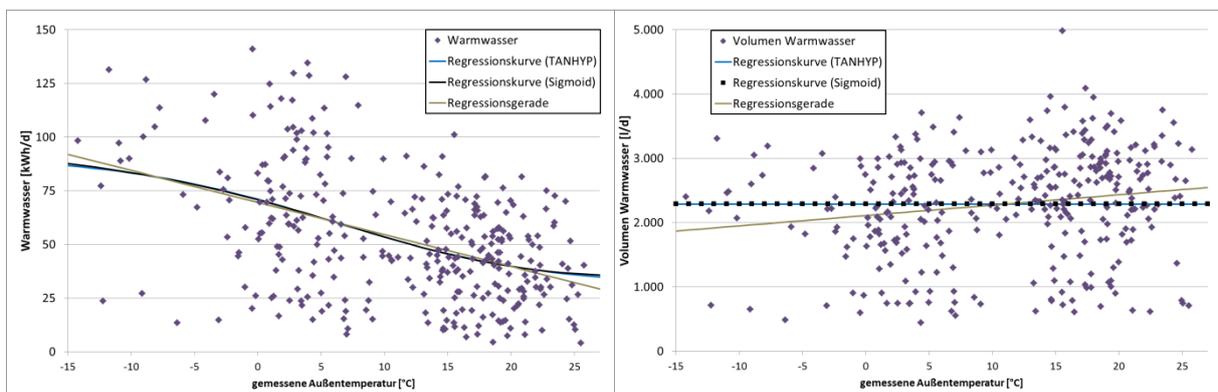


Abbildung 11: Warmwasser vs. Außentemperatur

Für die Mikro-BHKW Laufzeit ausschlaggebend ist die Energie, die dem Warmwasserspeicher zusätzlich zugeführt werden muss. Diese (Abbildung 12, links) sinkt analog zur resultierenden Warmwassermenge mit steigender Temperatur. Zusammengefasst bedeutet dies, dass die Wärmerückgewinnung an warmen Tagen besonders effektiv ist, einen größeren Wärmeeintrag in den Warmwasserspeicher verursacht und dadurch der Warmwasserspeicher mit deutlich weniger Wärme versorgt werden muss.

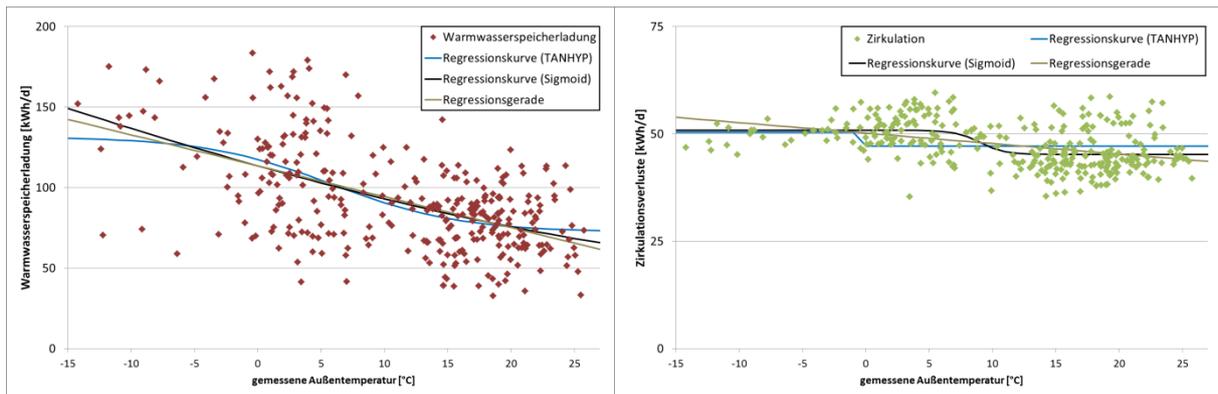


Abbildung 12: Warmwasserspeicherladung und Zirkulationsverluste vs. Außentemperatur

Zusätzlich zu den Warmwasserzapfungen hat der Warmwasserspeicher noch die Aufgabe die Zirkulationsverluste zu decken. Diese hängen fast ausschließlich von den Betriebszeiten der Zirkulationspumpe ab. Trotzdem ist mit steigenden Temperaturen ein leichter Rückgang der Zirkulationsverluste (Abbildung 12, rechts) zu beobachten. Dies ist auf den höheren Raumtemperaturen im Sommer und dem damit verbundenen kleineren Temperaturunterschied zwischen dem zirkulierenden Wasser und dessen Umgebung zurückzuführen.

d) Wärme- und Stromproduktion

Analog zu Abbildung 5 zeigt Abbildung 13 die Wärme- und Stromerzeugung vom 08.07.2011 bis 13.09.2012. Aufgrund baulicher Änderungen (siehe Unterkapitel e) am Standort Flintsbach waren für die Wärme- und Stromerzeugung in diesem Zeitraum „nur“ 304 Messtage vollständig.

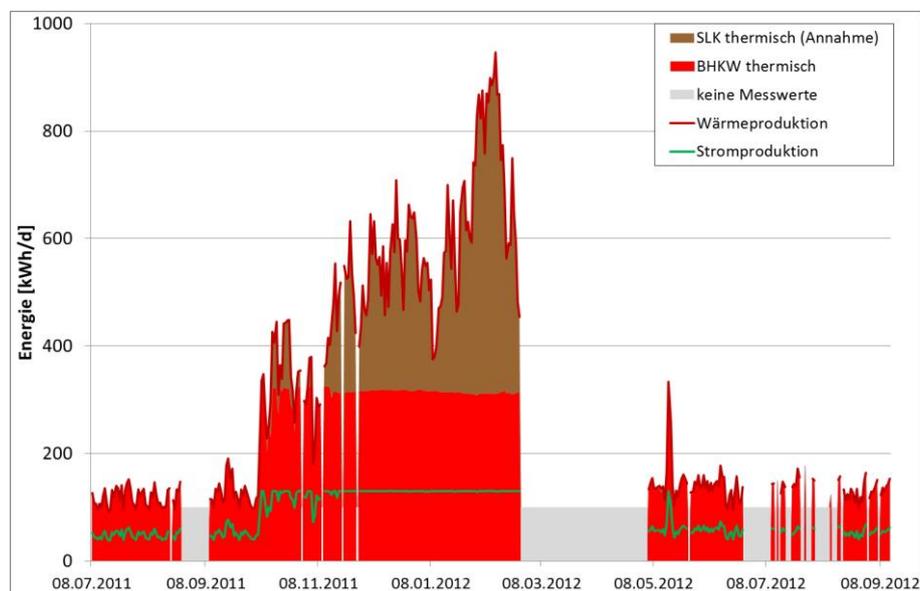


Abbildung 13: Wärme- und Stromerzeugung

Obwohl insbesondere im Frühjahr 2012 viele Tage fehlen fällt sofort auf, dass im Sommer das Mikro-BHKW monovalent den Wärmebedarf deckt und dabei deutlich weniger als die maximal erzeugbaren $312 \text{ kWh}_{\text{th}}$ erzeugt, das BHKW also nur zu gewissen Stunden läuft. Im Winter hingegen läuft das BHKW 24 Stunden und wird vom Spitzenlastkessel unterstützt. In der Übergangszeit ist das BHKW Verhalten unterschiedlich. Je nach Außentemperatur und

Wochentag läuft das BHKW manchmal nur unwesentlich länger als im Sommer. Bei kälteren Tagen und hohem Verbrauch hingegen sehr lange und inkl. Spitzenlastkessel. Da die thermische Leistung des Spitzenlastkessels messtechnisch nicht erfasst wird, bestimmt sich diese im Folgenden aus der zugeführten Ölmenge und einem angenommenen Wirkungsgrad von 0,9.

Abbildung 14 zeigt links die Mittelwerte der Wärme- und Stromerzeugung bzw. des benötigten Erdgases des Mikro-BHKW an den verschiedenen Wochentagen. Es ist ersichtlich, dass die benötigte Energie zur Warmwasserspeicherladung (vgl. Abbildung 8, links) bei der Mittelwertbildung an Einfluss gegenüber dem Verbrauch für den Heizkreis verliert. Trotzdem ist die Stromproduktion im Mittel an Montagen um über 10 kWh (82,1 gegenüber 92,4 kWh), also fast zwei Betriebsstunden kleiner als an Freitagen.

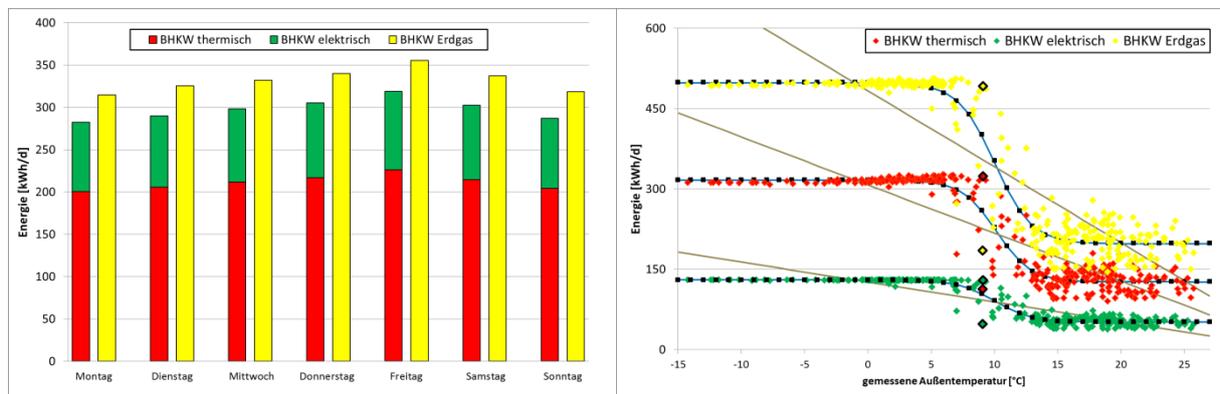


Abbildung 14: Wärme- und Stromerzeugung des Mikro-BHKW

Rechts in Abbildung 14 sind die BHKW Betriebspunkte über der Außentemperatur aufgetragen. Man erkennt dabei, ähnlich wie bei der Analyse des Heizkreises, drei charakteristische Abschnitte. In der Sommerzeit, wenn die Heizung aus ist, erzeugt das BHKW im Mittel 51 kWh elektrische Energie. Die dabei auftretenden Schwankungen sind relativ klein. In der Übergangszeit steigt die BHKW Laufzeit im Mittel linear an, jedoch mit häufigen Ausreißern nach oben und unten. Die in Abbildung 14, rechts hervorgehobenen Tage (Tabelle 4) zeigen beispielhaft wie unterschiedlich das BHKW Verhalten bei nahezu gleichen äußeren Bedingungen sein kann.

Tabelle 4: BHKW an Übertagtagen

Datum	18.10.2011	14.05.2011
Außentemperatur [°C]	9,09	9,06
BHKW thermisch [kWh]	324	113
BHKW elektrisch [kWh]	130	48
BHKW Erdgas [kWh]	492	185
Heizkreis [kWh]	135	0

Der Hauptgrund für die 2,7-fache Stromproduktion am 18.10.2011 liegt am Wärmeverbrauch des Heizkreises. Der Verbrauch des Heizkreises bei einer Außentemperatur von 9°C liegt im Mittel bei 110 kWh (vgl. Abbildung 9). Der real auftretende Verbrauch an diesem Tag liegt

bei 135 kWh und folglich in der Nähe der Regressionskurven. Im Mai 2012 waren der 10.05. und 11.05. sehr warm (20,0°C und 22,8°C), weshalb der Betreiber den Heizbetrieb ausgeschaltet hat² und diesen erst wieder am 15.05. eingeschaltet hat. Obwohl die Tage dazwischen relativ kalt waren (13,8°C, 9,9°C und 9,1°C) blieb die Heizung aus und das BHKW nur wenig in Betrieb.

Der dritte Abschnitt in Abbildung 14, links ist der BHKW Dauerbetrieb, der ab Temperaturen kleiner 5°C auftritt. Das BHKW läuft jetzt durch und kann auch an kälteren Tagen die Stromproduktion nicht mehr steigern. Die zusätzlich benötigte Wärme erzeugt der Öl-Spitzenlastkessel. Da die thermische Leistung des Kessels in Flintsbach nicht gemessen werden kann zeigt Abbildung 15 den täglichen Heizölverbrauch. Auch der Ölkessel wird vom Betreiber im Winter oder bei Störungen manuell zugeschaltet. Eine BHKW Störung trat beispielsweise am 11.05.2012 auf, wodurch der Kessel an diesem Tag (gemessene Außentemperatur: 22,8°C) kurz lief und knapp 6 kWh Heizöl verbraucht hat.

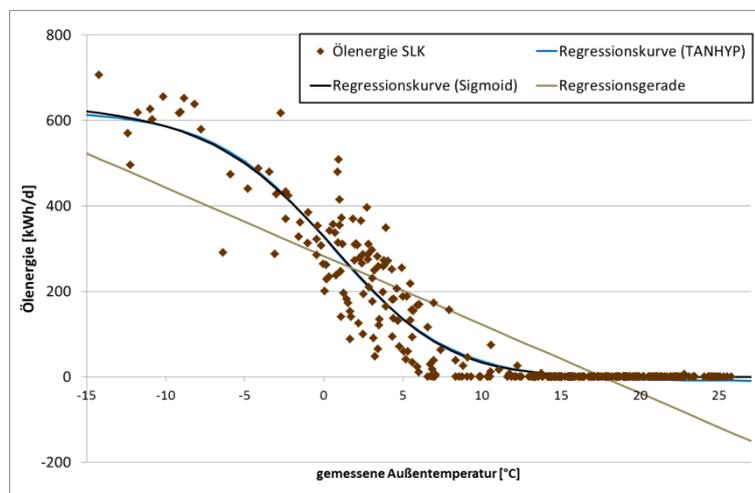


Abbildung 15: Heizölverbrauch vs. Außentemperatur

e) Jahresbilanzierung

Für eine abschließende Bewertung einer KWK-Anlage ist immer ein ganzes Jahr zu betrachten. Da es hierfür aber keine Messausfälle geben darf müssen passende Methoden verwendet werden um trotzdem eine gültige Aussage über das BHKW Verhalten eines kompletten Jahres treffen zu können. Darüber hinaus sollte das zu wählende Jahr den mittleren Temperaturbedingungen an dem betrachteten Standort möglichst nahe sein, damit ein besonders kaltes oder warmes Jahr das Ergebnis nicht verfälscht.

Auf der Homepage der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft [LfL 2012] gibt es Wetterdaten von 144 Standorten in Bayern. Für Flintsbach bietet sich die Wetterstation 125 „Karolinenfeld“ in der Gemeinde Kolbermoor bei Rosenheim, aufgrund der Nähe zu Flintsbach (ca. 18 km), an. Daten dieser Wetterstation gibt es seit dem 21.07.2003.

Um ein Jahr zu finden, welches insbesondere die Heizperiode möglichst repräsentativ beschreibt, werden die Gradtagszahlen [VDI 2067] und die Heizgradtage [VDI 3807] der Wetterstation „Karolinenfeld“ bestimmt. Für die Berechnung wurde die Raumtemperatur auf 20°C und die Heizgrenze auf 15°C (vgl. Abbildung 9) festgelegt (Tabelle 5).

² Der Betreiber des Gasthauses Falkenstein in Flintsbach schaltet im Herbst die Heizung manuell ein und im Frühjahr manuell wieder aus. Sollte es zu danach wieder wärmer bzw. kälter werden schaltet er die Heizung wieder aus bzw. zu.

Tabelle 5: Gradtagzahlen und Heizgradtage der Wetterstation „Karolinenfeld“

Jahr	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Mittelwert
Gradtagszahl [Kd/a]	4.112	4.179	4.065	3.745	3.867	3.804	4.264	3.824	3.982
Abweichung vom Mittelwert	+3,3%	+4,9%	+2,1%	-6,0%	-2,9%	-4,5%	+7,1%	-4,0%	
Heizgradtage [Kd/a]	2.687	2.824	2.707	2.408	2.497	2.504	2.826	2.432	2.610
Abweichung vom Mittelwert	+2,9%	+8,2%	+3,7%	-7,8%	-4,3%	-4,1%	+8,2%	-6,8%	
Produkt der Abweichungen	+6,3%	+13,5%	+5,8%	-13,3%	-7,1%	-8,4%	+15,9%	-10,5%	

Mit Hilfe des Mittelwerts für die Jahre 2004-2011, der jeweiligen Abweichung und dem Produkt aus den beiden Abweichungen wird das Jahr 2006, aufgrund der kleinsten relativen Abweichung für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

Abbildung 16 zeigt die Temperaturunterschiede der mittleren Tagesaußentemperatur der gemessenen Werte in Flintsbach und der Wetterstation „Karolinenfeld“ während der Feldmessperiode. Dabei fällt auf, dass die gemessenen Werte im gesamten Messzeitraum über den Werten der Wetterstation liegen. Grund hierfür ist meist, dass die angebrachten Außentemperaturfühler an der Hauswand über der Belüftungszufuhr angebracht werden und dort die Temperatur oft etwas höher ist als die „wahre“ Lufttemperatur.

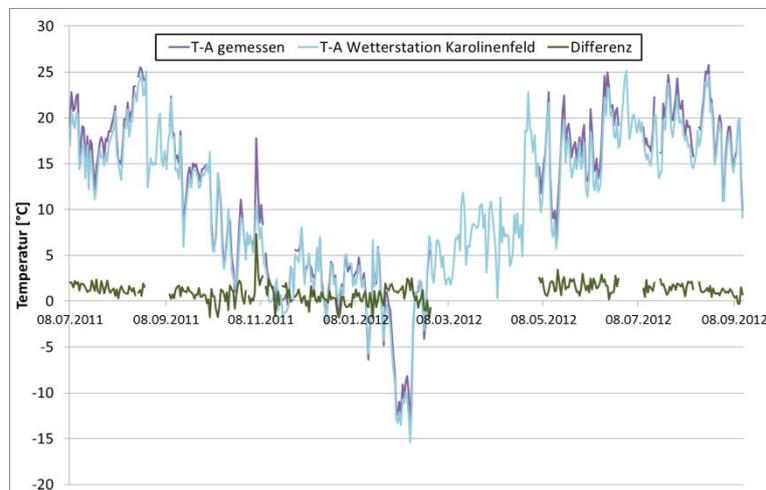


Abbildung 16: Temperaturunterschied zwischen dem gemessenen Wert in Flintsbach und der Wetterstation „Karolinenfeld“

Demzufolge werden die Temperaturen des Jahres 2006 mit der mittleren auftretenden Messabweichung (+1,0°C) addiert und diese Temperatur mit den Koeffizienten der besten Annäherung (Sigmoid, TANHYP oder Gerade) verrechnet. Abbildung 17 zeigt beispielhaft die Jahreshochrechnung der erzeugten elektrischen Energie.

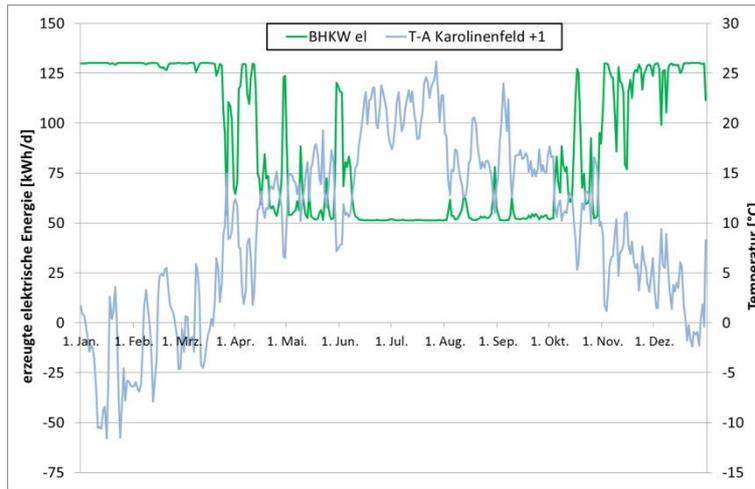


Abbildung 17: Erzeugte elektrische Energie für das Jahr 2006 am Standort Flintsbach

Eine Übersicht aller kumulierten Jahreswerte finden sich in **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke..** Bei den Warmwasserspeicherwerten ist die Summe aus den Zirkulationsverlusten und der Energiemenge aus den Warmwasserzapfungen größer als die Warmwasserspeicherladung. Dies ist energetisch nicht möglich. Der Grund hierfür liegt in der Messungenauigkeit der Zähler und Fühler. Insbesondere die Anlegetemperaturfühler reagieren langsam auf große Temperaturgradienten, die im Warmwassersystem sehr häufig vorkommen.

Tabelle 6: kumulierte Jahreswerte für das Jahr 2006 am Standort Flintsbach

Erzeuger [kWh]	BHKW Erdgas	BHKW thermisch	BHKW elektrisch	Pufferspeicher	SLK-Ölverbrauch	SLK-therm. (Annahme)
	125.020	79.776	32.612	73.579	46.029	41.426
Verbraucher [kWh]	Heizkreise	WW Speicherladung	Wärmerückgewinnung	Zirkulationsverluste	Warmwasser	
	69.358	34.613	20.162	17.397	20.234	

Eine Möglichkeit die Energieverläufe grafisch aufzuzeigen bieten Energiefluss- bzw. Sankeydiagramme. Diese zeigen den Weg von der Primärenergie, über die einzelnen Energiewandlungen, hin zur Nutzenergie. Mit Hilfe der Energieflussdiagramme kann man die auftretenden Verluste in jedem Umwandlungsschritt sehen und die energetischen Verbesserungen anhand der Verluste priorisieren.

Abbildung 18 zeigt links das Energieflussdiagramm am Standort Flintsbach³ mit der derzeitigen Installation. Der rechte Teil stellt die Referenz zum jetzigen System dar. Dabei wird der erzeugte BHKW Strom vom Netz bezogen und der Ölkessel stellt die gleiche Wärmemenge zu Verfügung wie das BHKW inkl. Pufferspeicher und der Spitzenlastkessel.

Das Referenzsystem zeigt hohe Potenziale zur Energieeinsparung bzw. für den Einsatz energieeffizienter Technologien. Auf der Verbrauchsseite ist der Warmwasserzyklus schon optimiert. Ca. 1/3 der benötigten Wärme wird aus der externen Wärmerückgewinnung der

³ Als Stromverbrauch wird hier nur der vom BHKW produzierte Strom betrachtet.

Kältemaschinen gewonnen. Eine Verbrauchsreduzierung ist unter Beibehaltung der Produktionsmenge in der Metzgerei bzw. den Komfortwünschen der Pensionsgäste bzw. der Betreiberfamilie nicht möglich. Eine Verminderung des Wärmeverbrauchs für die Heizung (Außendämmung, Fenstertausch, etc.) ist möglich, aber nach Aussage des Betreibers finanziell nicht rentabel.

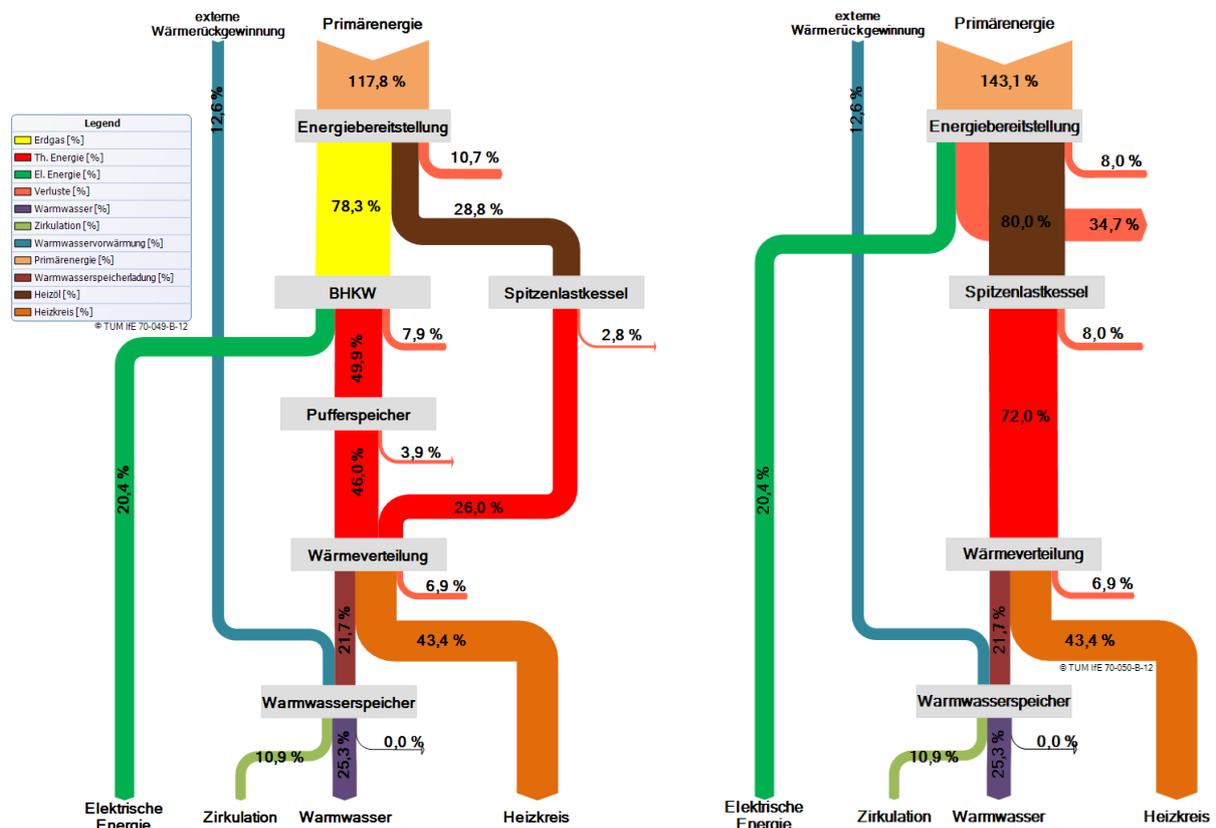


Abbildung 18: Energieflussdiagramm am Standort Flintsbach mit und ohne BHKW

Für die Wärmeerzeugung könnte ein Brennwertkessel die Verluste des Niedertemperatur-ölkessels (8,0%) reduzieren. Jedoch sind die benötigten Temperaturen im Heizsystem relativ und für die Warmwasserbereitung relativ hoch wodurch der Effizienzvorteil nur sehr gering ist. Der Einsatz von Solarthermie wäre eine weitere Möglichkeit Brennstoff einzusparen. Diese würde aber, je nach hydraulischer Einbindung, zu einer geringeren Effizienz der externen Wärmerückgewinnung oder der solarthermischen Anlage führen. Darüber hinaus hat sich der Betreiber für die Installation von Photovoltaikmodulen entschieden, wodurch fast die gesamte südorientierte Dachfläche bereits genutzt wird.

Der größte Verlustposten in Abbildung 18, rechts ist mit 34,7% die Strombereitstellung. Diese kann durch den Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung reduziert werden. Da KWK bei entsprechender Laufzeit und Stromeigennutzung auch finanziell sehr attraktiv ist hat sich der Anlagenbetreiber für eine solche Anlage entschieden. Der Primärenergieeinsatz hat sich dadurch von 143,1 auf 117,8%, also um 17,7% reduziert.

f) Zweites BHKW am Standort Flintsbach

Da der BHKW Betreiber mit seiner Dachs-Mikro-BHKW Anlage sehr zufrieden ist wollte er wissen wie viele Stunden ein zweiter Dachs laufen würde. Fragen dieser Art können mit Hilfe geordneter Jahresdauerlinien beantwortet werden.

Abbildung 19 zeigt die geordneten Jahresdauerlinien für die Warmwasserspeicherladung, den Heizkreis und der thermischen BHKW Leistung. Aufgrund der Sortierung und einem ineffizienteren Sommerbetrieb steigen die Verluste am Ende der Dauerlinie stark an. Da die thermische Leistung des Spitzenlastkessels nicht bekannt ist, wurde für die zu erzeugende Wärme angenommen, dass diese um 35 kWh (Mittelwert aus den Verlusten) größer ist, als die Addition aus Warmwasserspeicherladung und dem Heizkreisverbrauch.

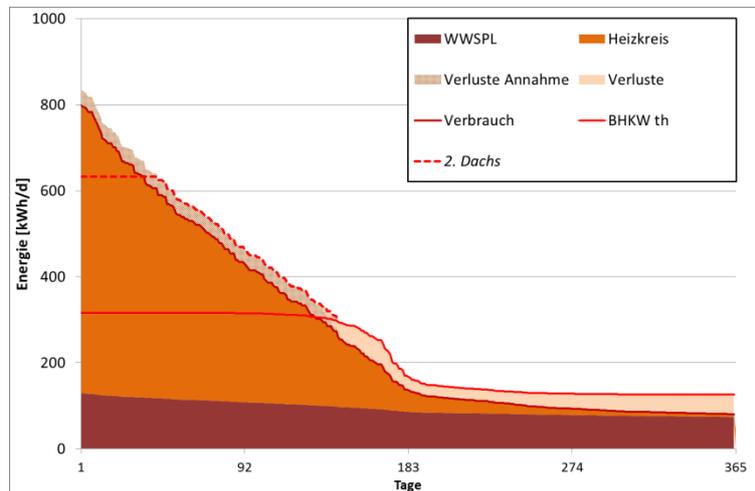


Abbildung 19: Sortierte Jahresdauerlinie des Wärmeverbrauchs am Standort Flintsbach

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass ab dem Tag 142 das Mikro-BHKW monovalent die benötigte Wärme bereitstellen kann. Dementsprechend kann ein zweites Mikro-BHKW an maximal 141 Tagen laufen. Die dabei erzeugte Wärme ist die Fläche in Abbildung 19 zwischen der gestrichelten Linie und der vom BHKW erzeugten Wärme. Das 2te BHKW kann also maximal (gilt bei nahezu konstantem Wärmeverbrauch, deaktiviertem Spitzenlastkessel oder ausreichend dimensioniertem Pufferspeicher) 28.648 kWh, welche 2.292 Betriebsstunden entsprechen, erzeugen. Weil der Betreiber noch das Nachbarhaus über eine Nahwärmeversorgung anschließen kann hat sich der Betreiber trotz der berechneten geringen Laufzeit für den Kauf eines zweiten Mikro-BHKW entschieden.

g) Aisin Mikro-BHKW

Im Rahmen des Feldtests konnte ein Prototyp eines Aisin Mikro-BHKW, welches zum Start der Feldmessung noch nicht auf deutschem Markt erhältlich war getestet werden. Laut Datenblatt [Aisin 2011] liefert das Aisin BHKW 4,6 kW elektrische und 11 kW thermische Leistung bei einer Gaszufuhr von 18,4 kW. Abbildung 20 zeigt den Leistungsverlauf und die dazugehörigen Wirkungsgrade beispielhaft für den 28.11.2012. Die abgegebene elektrische Nettoleistung (Bruttoleistung minus Eigenbedarf minus Transformatorverluste) beträgt 4,1 kW. Die gemessene thermische Leistung schwankt zwischen 8,5 und 10,2 kW bei einer konstanten Gaszufuhr über 20 kW.

Das hat zur Folge, dass die berechneten Wirkungsgrade (Abbildung 20, rechts) bei 20% (elektrisch) und thermisch zwischen 40 und 47% liegen, was an diesem Tag zu einem Gesamtnutzungsgrad von weniger als 70% führt.

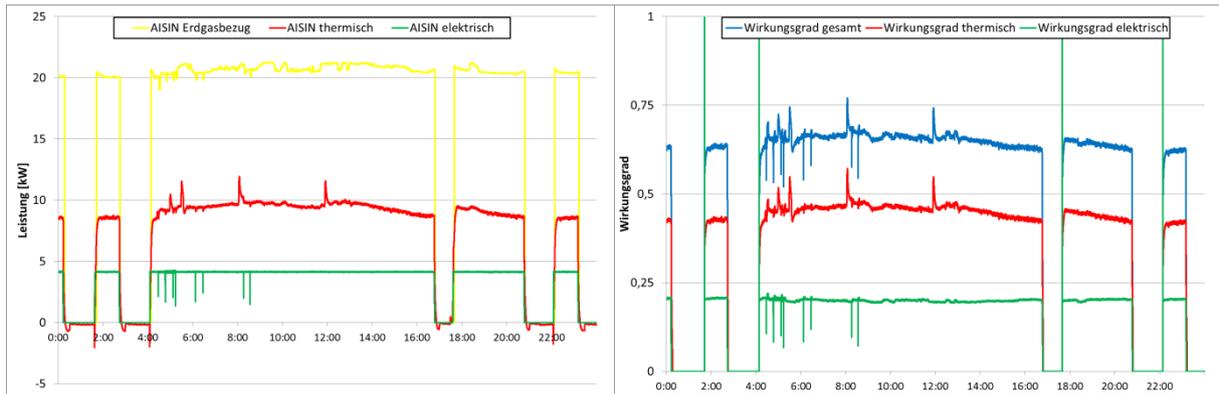


Abbildung 20: Leistungen und Wirkungsgrade des Aisin Mikro-BHKW

4.5 Modellierung und Simulationsergebnisse

Um die Auswirkungen von baulichen Einflüssen oder regelungstechnischen Änderungen auf das BHKW Verhalten zu testen ist es meist nicht möglich eine Vorher-Nachher Messung im Feldtest durchzuführen. Für Änderungen in der Regelungstechnik benötigt man exakt gleiche Verhältnisse und eine sehr lange Messperiode. Bauliche Veränderungen sind weiterhin oft nur schwer umsetzbar und meist teuer. Um Veränderungen dieser Art trotzdem prüfen zu können eignen sich Simulationsrechnungen. Für die beiden folgenden Untersuchungen wurde die Simulationssoftware TRNSYS verwendet. Beispielhaft werden für die Sportschule Puch der Einfluss der solarthermischen Anlage sowie die hydraulische Verschaltung des Mikro-BHKW Systems in Flintsbach gezeigt.

a) Einfluss der solarthermischen Anlage auf das Betriebsverhalten der BHKW und des Spitzenlastkessels in der Sportschule Puch

Die in der Sportschule Puch installierte Anlage (vgl. Abbildung 4) wurde in TRNSYS modelliert, simuliert und mit den Messdaten validiert. Anschließend wurde das Simulationsmodell verwendet und anhand zweier Beispieltage (Winter- und Sommertag) den Einfluss der solaren Vorwärmung des Brauchwassers auf die Betriebsstunden der BHKW und des Spitzenlastkessels zu untersuchen.

Die Anlage in Puch besteht aus zwei Dachs Modulen von SenerTec, welche parallel zu zwei Spitzenlastkesseln einen 3.000 l Pufferspeicher laden. Dieser trennt die Wärmeerzeugung von den Verbrauchern. Da es nicht möglich war die einzelnen Heizkreise messtechnisch zu erfassen, wird die thermische Leistung am Pufferspeicherausgang („Verteilung“) und die Leistung der Warmwasserspeicherladung gemessen. Die benötigte Energie für den Heizkreis ergibt sich aus der Subtraktion der Warmwasserspeicherladung von der Verteilung. Im Warmwassersystem werden die Leistung der solarthermischen Anlage (Viessmann Vitosol 200, 2x40 Röhren), die Zirkulationsleistung (wie sich später herausstellte ist die Zirkulationspumpe nie eingeschaltet) und die Zapfleistung gemessen.

Für die Simulation wurde auf Erzeugerseite der „Type 154-ICE-Internal Combustion Engine“, der im Rahmen des ANNEX 42 [ANNEX 2007] entstanden ist, und ein Standardkessel (Wirkungsgrad: 90%) verwendet (Abbildung 21). Um die Messung exakt nachzubilden wurde für die maximale BHKW Vorlauftemperatur 75°C bzw. 80°C (vgl. Abbildung 22) gewählt. Der Pufferspeicher versorgt den Heizkreis und den Warmwasserspeicher mit je 1 l/s. In der Simulation werden die gemessenen Verbräuche als Wärmesenken integriert. Das nachlaufende Wasser in der Kaltwasserleitung wird durch die gemessene Solarleistung vorgewärmt.

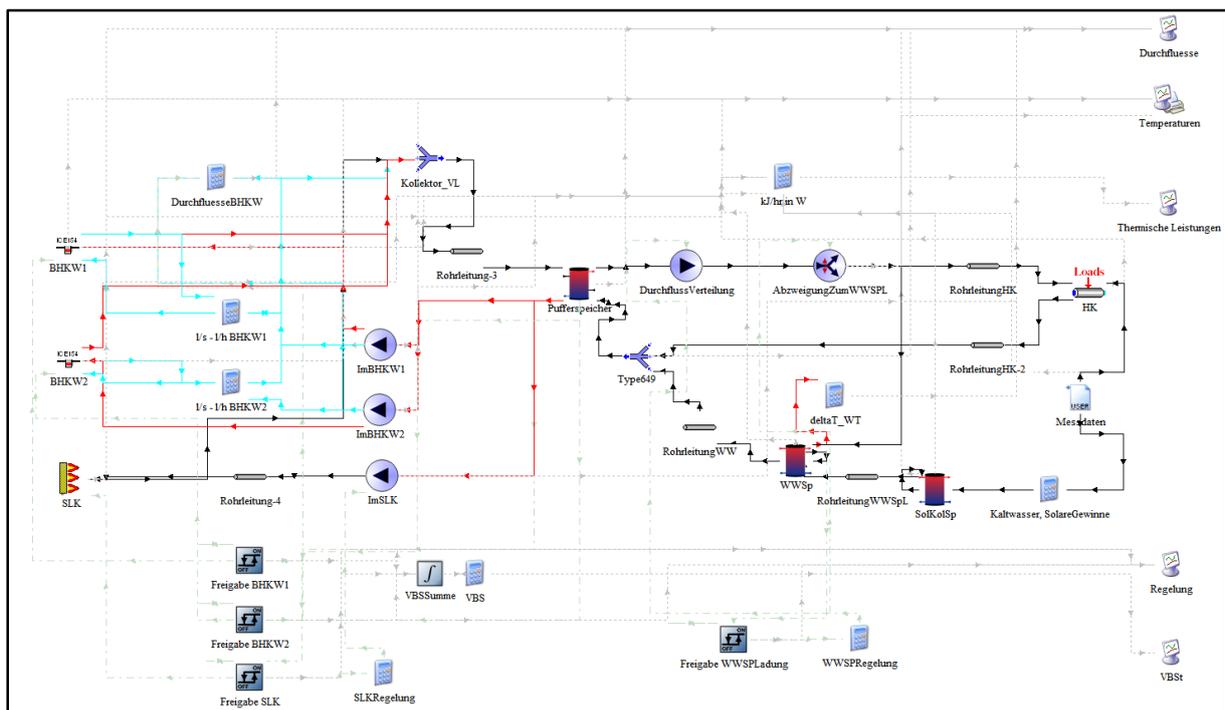


Abbildung 21: TRNSYS Modell der Wärmeversorgung der Sportschule Puch

Um die Master-/Slave-Regelung der beiden BHKW nachzubilden wurde eine Einschalt-hysterese für die beiden BHKW und den Spitzenlastkessel programmiert. Der Warmwasserspeicher wird geladen wenn die Temperatur im Speicher unter 55°C fällt und geladen bis 65°C erreicht werden.

Abbildung 22 zeigt die Validierung der Simulation anhand des 08.12.2011. Die durchgezogenen Linien zeigen die simulierten Temperaturen für die Vorläufe der beiden BHKW, des SLK und der Pufferspeicherrücklauftemperatur. Die ebenfalls eingezeichneten gestrichelten Linien stellen die real aufgetretenen Messwerte dar. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die Simulation das reale Verhalten gut widerspiegelt. Insbesondere das Zuschalten des Spitzenlastkessels tritt nahezu zeitgleich und ähnlich lang auf.

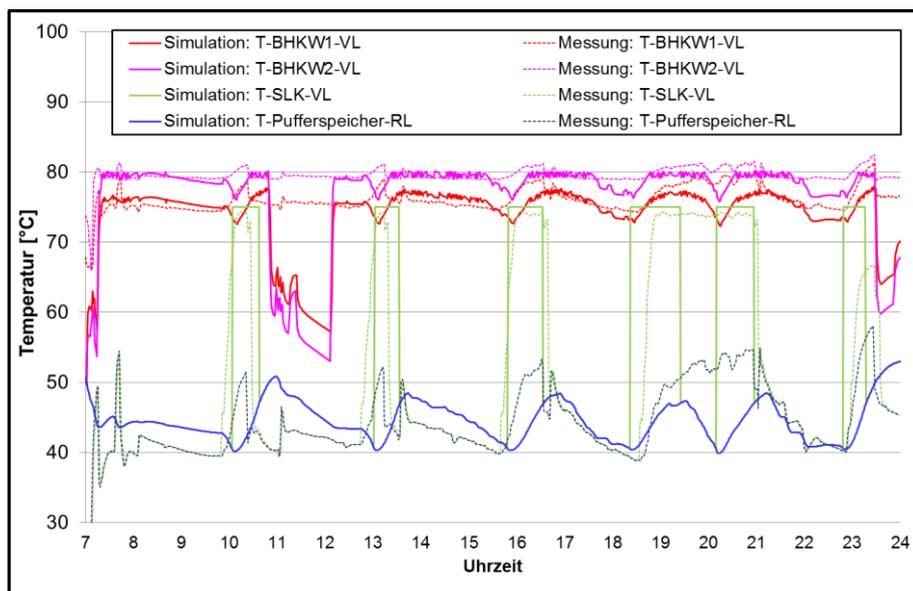


Abbildung 22: Validierung der Simulation

Einen Ausschnitt der auftretenden Temperaturen der Simulation des Systems mit Kollektoren zeigt Abbildung 23 (ebenfalls 08.12.2011). Die ab ca. 11 Uhr aufgetretene solare Leistung erwärmt das in die Warmwasserspeicher eintretende Wasser von 10°C auf bis zu 20°C. Die an diesem Tag eingebrachte Solarenergie war 6,5 kWh.

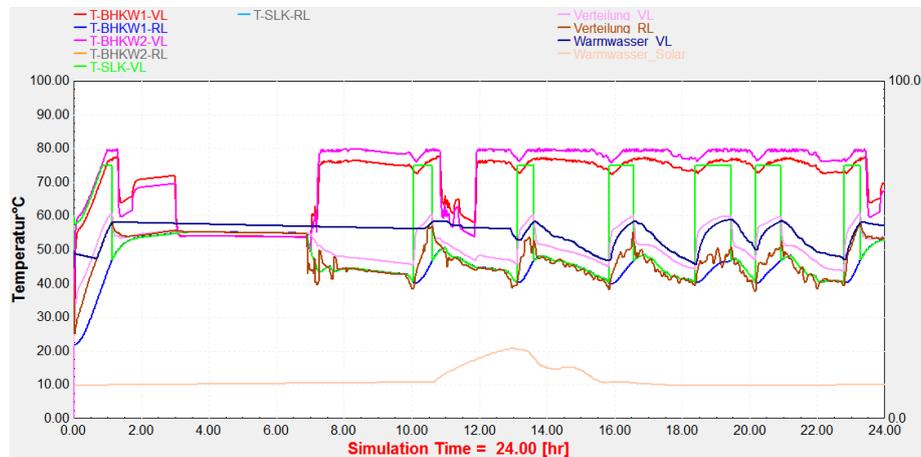


Abbildung 23: Simulationsergebnis Sportschule Puch Wintertag

Um die Auswirkung der Kollektoren auf das Gesamtsystem an einem Wintertag überhaupt zu erkennen wurde in Abbildung 24, unten die Kollektorfläche und der Solarspeicher und folglich der Eintrag aus der Solaranlage vervierfacht. Es ist zu erkennen, dass der Spitzenlastkessel anfangs (ab ca. 16 Uhr) später einsetzt und die letzte Kesselansteuerung komplett wegfällt. Die Betriebsdauer des Kessels sinkt an diesem Tag aufgrund der solaren Einstrahlung die Kollektoren von 5,2 auf 4,2 Stunden, wobei die Speicherfüllstände für die beiden Simulationen nicht identisch sind. Da sich für die BHKW Laufzeiten keine Änderung ergeben kann darauf geschlossen werden, dass der solare Eintrag im Winter die Laufzeit bzw. den Energieverbrauch des Spitzenlastkessels reduziert und sich nicht negativ auf das BHKW Verhalten auswirkt.



Abbildung 24: Simulation ohne und mit Kollektoren am 08.12.2011

Im Sommer hingegen, wenn der Spitzenlastkessel nicht läuft, reduziert der solare Gewinn die BHKW Laufzeit. So sinkt die BHKW Laufzeit des BHKW 2 (Slave) am 09.05.2012 (mittlere solare Einstrahlung; $E_{\text{Solar}} = 33,2 \text{ kWh}$) von 9,5 auf 7,72 Stunden, während BHKW 1 (Master) in beiden Fällen 17,33 Stunden läuft (Abbildung 25). Zusammenfassend lässt sich

sagen, dass je nach Außentemperatur entweder die Laufzeit des Kessels oder die Betriebsstunden der BHKW zurückgehen.

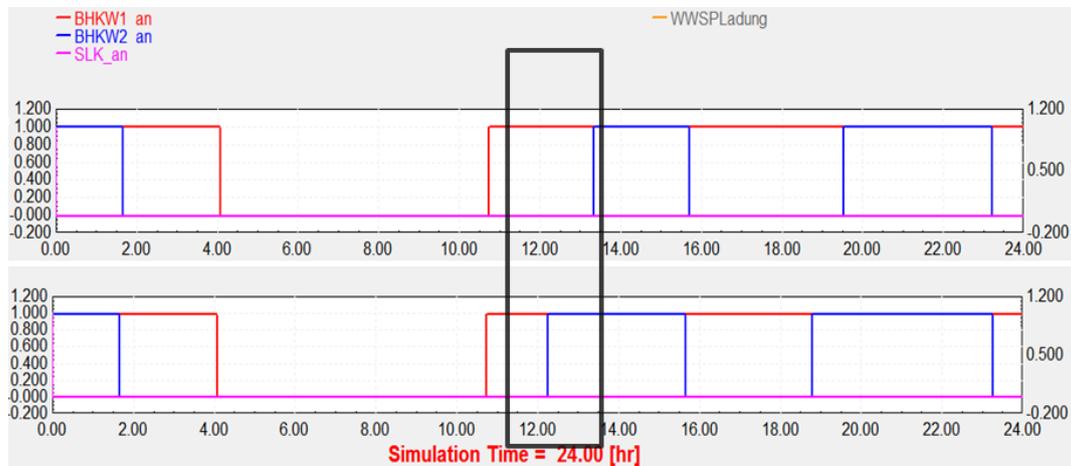


Abbildung 25: Simulation ohne und mit Kollektoren am 09.05.2012

b) Einfluss der hydraulischen Verschaltung auf den Energieverbrauch des Mikro - BHKW Systems in Flintsbach

Die Mikro-BHKW-Anlage in Flintsbach wurde in ihrer ursprünglichen hydraulischen Verschaltung mit dem Programm TRNSYS modelliert und simuliert. Anschließend wurden mehrere alternative Verschaltungen aufgebaut und ebenfalls simuliert. Hier wird kurz auf das Modell Flintsbach (Ausgangssituation) und eine vielversprechende Variante (Modell I) eingegangen. Von den Modellen muss jeweils der gemessene Lastgang am Standort Flintsbach gedeckt werden. Dieser liegt für ein halbes Jahr, von 16.07.2011 bis 15.01.2012, vor. Lücken in den Messwerten wurden durch vergleichbare Messwerte der angrenzenden Tage geschlossen.

Wie im Hydraulikschema (Abbildung 3) zu sehen ist, besteht die Anlage in Flintsbach aus einem BHKW, welches einen Pufferspeicher (PS) mit 1000 l Volumen belädt. Dieser wird über eine Thermostatpumpe in Abhängigkeit seines Temperaturniveaus entladen. Der Vorlauf des Pufferspeichers endet nahe des Spitzenlastkessels (SLK) in dessen Rücklauf. Etwas früher im SLK-Rücklauf zweigt der Rücklauf zum PS ab. Wenn nun der Durchfluss, den die Verbraucher Heizkreis (HK) und Warmwasserspeicher (WWSP) erzeugen über dem Durchfluss der Entladepumpe des Pufferspeichers liegt, so funktioniert diese Zumischung wie eine Rücklaufanhebung. Fließt jedoch wenig oder kein Heizungswasser zu den Verbrauchern, so führt die Verschaltung zu einem Kurzschluss und einer starken Durchmischung des Speicherinhalts.

Abbildung 26 zeigt die Implementierung dieser Verschaltung in TRNSYS. Links ist das BHKW (Type 154) inklusiv Pumpe und Pufferspeicher zu sehen. Die Elemente V_4 und V_5 ermöglichen das Entladen des Pufferspeichers und berechnen in Abhängigkeit der Verbraucher die Durchflüsse sowie die Rücklauftemperatur des PS und des SLK. Um das interne Volumen des NT-Kessels (SLK) und dessen Auskühlen nachzubilden wurde ihm ein Pufferspeicher (Type 4a) mit 160 l Volumen nachgeschaltet. Rechts sind der Warmwasserspeicher und der Heizkreis zu sehen, die dem System die entsprechenden Lasten aufrägen.

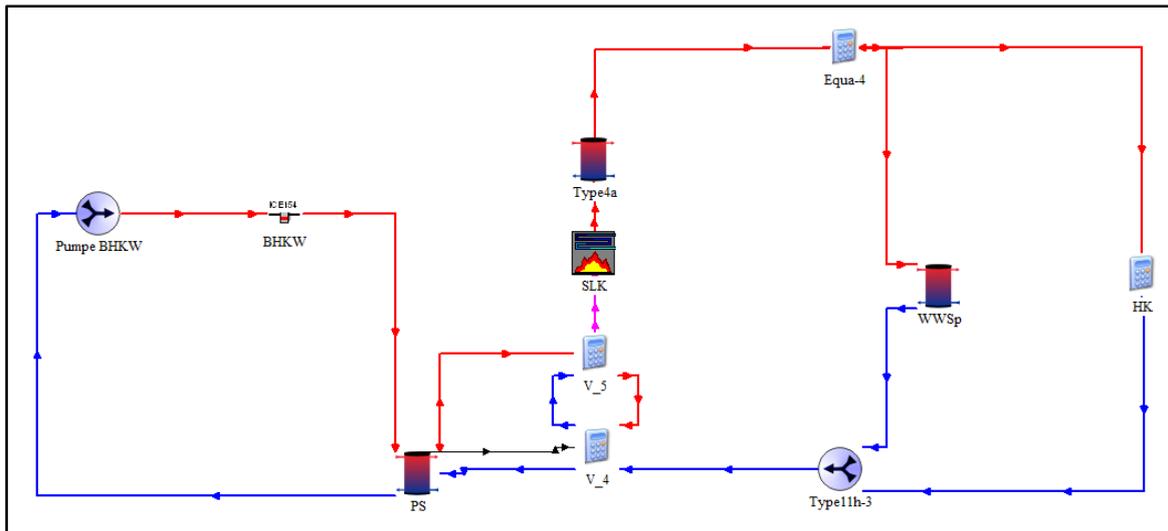


Abbildung 26: Vereinfachtes Simulationsmodell der Anlage in Flintsbach

In Abbildung 27 ist eine optimierte hydraulische Verschaltung (Modell I) zu sehen. Hier speisen sowohl der SLK wie auch das BHKW den Pufferspeicher. Die Versorgung der Verbraucher erfolgt direkt aus dem Pufferspeicher. Der SLK wird mit einem Zweipunktregler angesteuert. Er startet wenn die Vorlauftemperatur des Pufferspeichers unter 52°C fällt und stoppt wenn der Pufferspeicher in seiner mittleren Schicht 65°C erreicht hat. Durch diese Änderung wird ein häufiges Takten sowie eine unnötige Durchströmung des SLK vermieden.

In Abbildung 28 werden beispielhaft die Simulationsergebnisse gegenübergestellt. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass der Nutzungsgrad des SLK von 45,5% im Modell Flintsbach auf 70,6% in Modell I gesteigert werden konnte. Dies liegt einerseits am selteneren Takten und andererseits an den vermiedenen Stillstandsverlusten, die durch das permanente Durchfluten des SLK in Modell Flintsbach entstehen.

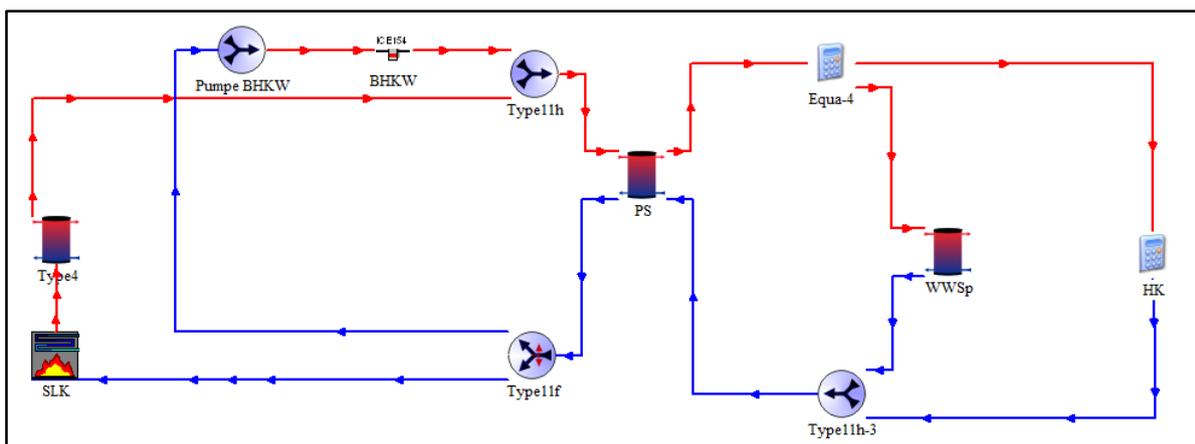


Abbildung 27: Simulationsmodell mit optimierter Verschaltung (Modell I)

Da der SLK im Modell I mehr thermische Energie bereitstellt (Winter) und gleichzeitig weniger Verluste verursacht (Sommer), sinkt die thermische Erzeugung des BHKW um 14,6%. Deshalb muss im Modell I zusätzlich elektrische Energie aus dem Stromnetz bezogen werden, die beim Endenergieverbrauch wie auch beim Primärenergieverbrauch berücksichtigt werden muss. Trotz dieses Nachteils kann durch eine Verbesserung der

hydraulischen Verschaltung eine Primärenergieeinsparung von 5,6% (Tabelle 7) erreicht werden.

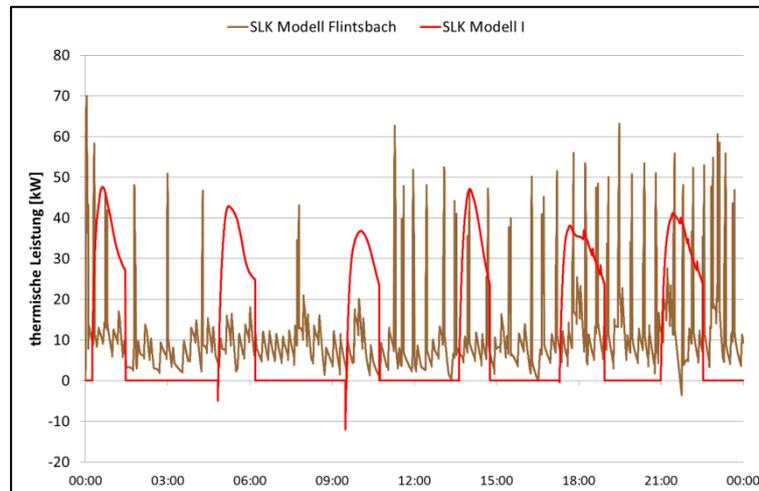


Abbildung 28: Taktverhalten des Kessel In Modell Flintsbach und In Modell I

Tabelle 7: Vergleich zwischen Modell Flintsbach und Modell I

		Modell Flintsbach	Modell I
Erdgas BHKW	[kWh]	71.763	61.380
Thermische Energie BHKW	[kWh]	39.497	33.681
Elektrische Energie BHKW	[kWh]	18.650	15.947
Heizöl SLK	[kWh]	23.987	22.592
Thermische. Energie SLK	[kWh]	10.904	15.541
Thermische Energie WW	[kWh]	18.198	18.198
Thermische. Energie HK	[kWh]	30.211	30.211
Bezug elektrische Energie	[kWh]	0	2.703
Endenergie	[kWh]	95.750	86.675
Primärenergie (inkl. Strombezug)	[kWh]	105.325	99.397
Primärenergieeinsparung	[-]	---	5,6%

4.6 Prüfstanduntersuchung

Um die Simulationsergebnisse zu bestätigen wurden am KWK-Prüfstand des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik Vergleichsmessungen vorgenommen. Dafür wurden die hydraulischen Schaltungen des Modell Flintsbach und des optimierten Modells I aufgebaut und vermessen.

Die Messung wurde mithilfe sogenannter Typtage vorgenommen, die repräsentativ für eine Periode des Jahres stehen. Das Vorgehen beruht auf dem Auswahlverfahren für Typtage aus einem Testreferenzjahr (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (Mühl 2007). Hierbei werden die Tage anhand ihrer Außentemperatur und dem Bedeckungsgrad in fünf Gruppen eingeteilt: Wintertage und Übergangstage, jeweils trüb und heiter, sowie Sommertage. Anschließend wird der Wärmelastgang simuliert und der mittlere Lastgang für jede Periode berechnet. Nach der Methode des kleinsten quadratischen Fehlers wird dann jeweils der Tag ausgewählt, der vom mittleren Lastgang am wenigsten abweicht. Somit erhält man einen

repräsentativen Tag, der jedoch das dynamische Verhalten eines einzelnen Tages enthält. Die Strom- und Warmwasserverbräuche werden aus Normen oder von Messwerten abgeleitet und sind für alle Typtage identisch.

Da für die Feldmessungen neben dem Heizwärmeverbrauch auch der Strom- und der Warmwasserverbrauch bekannt sind, werden diese bei der Auswahl mit berücksichtigt. Zunächst werden die Tage anhand der Außentemperatur in die Gruppen Wintertag ($T_A < 4^\circ\text{C}$), Übergangstag und Sommertag ($T_A > 11^\circ\text{C}$) eingeteilt. Da der Bedeckungsgrad nicht gemessen wird, kann dieser nicht mit in Betracht gezogen werden. Die Grenztemperaturen wurden so gewählt, dass der Heizwärmebedarf der Sommertage zumeist null entspricht und dass er an Wintertagen überwiegend in einem Bereich liegt, der nicht mehr vom BHKW alleine gedeckt werden kann (vgl. Abbildung 15). Anschließend werden die mittleren Heizwärme-, Strom-, und Warmwasserlastgänge je Periode erstellt. Die quadratischen Fehler zwischen mittleren und jeweils gemessenen Lastgängen werden je Messtag berechnet und miteinander multipliziert. Es wird jeweils der Tag mit dem geringsten Fehlerwert als Typtag ausgewählt.

Als Wintertag wurde Dienstag der 24.01.2012 ausgewählt. An diesem Tag werden 498,0 kWh Heizwärme und 70,9 kWh Warmwasser verbraucht. Alle ausgewählten Typtage mit ihren Verbräuchen und der mittleren Außentemperatur finden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8: Ausgewählte Typtage

	Wintertag	Übergangstag	Sommertag
Gewählter Tag	Di. 24.01.2012	Mi. 16.05.2012	Mi. 20.07.2011
Mittlere Außentemperatur [$^\circ\text{C}$]	1,1	6,9	13,3
Heizwärmeverbrauch [kWh]	498,0	226,4	0,0
Stromverbrauch [kWh]	384,0	487,9	443,8
Warmwasserverbrauch [kWh]	70,9	53,9	41,3

Als Wintertag wurde Dienstag der 24.01.2012 ausgewählt. An diesem Tag werden 498,0 kWh Heizwärme und 70,9 kWh Warmwasser verbraucht. In Abbildung 29, links ist der Leistungsverlauf des Heizkreises (orange) und der Warmwasserspeicherladung (rot) zu sehen. Der Heizkreis nimmt im Mittel etwa 20 kW auf wobei die Leistung in Abhängigkeit des SLK starke Schwankungen zeigt. Auch die Leistung der WWSPS wird vom SLK stark beeinflusst. Sie startet an diesem Tag elf Mal. Ihre jeweilige Dauer hängt vor allem vom aktuellen Warmwasserverbrauch (Abbildung 29, rechts) ab. Dieser hat mittags sein Maximum, verbleibt aber nachmittags und abends auf hohem Niveau. Der Warmwasserspeicher wird zusätzlich von den Zirkulationsverlusten entladen. Sie treten zu den Zirkulationszeiten von 0:00 Uhr bis 05:30 Uhr sowie von 11:30 Uhr bis 24:00 Uhr auf, wodurch sich eine Zirkulationszeit von 18 h/d ergibt.

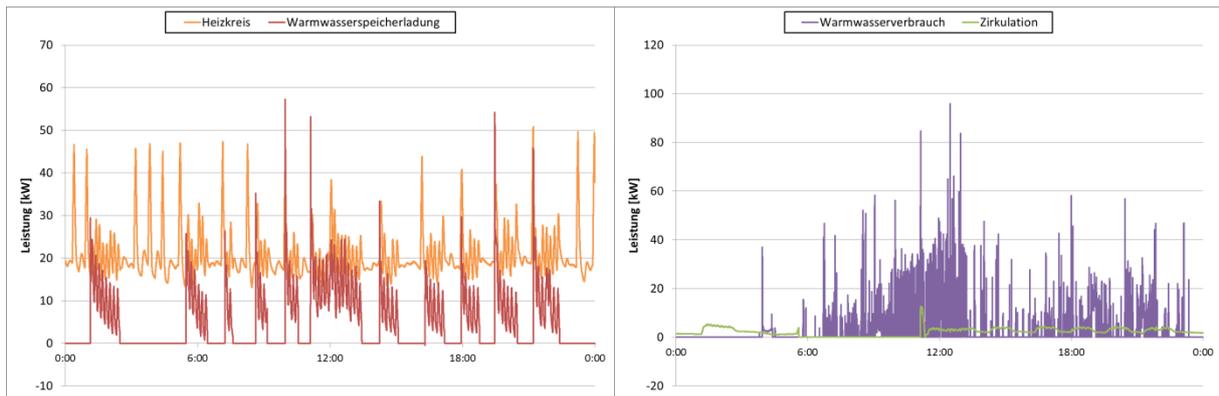


Abbildung 29: Lastgang von Heizkreis und Warmwasserspeicherladung (links) sowie Warmwasserverbrauch und Zirkulationsverluste (rechts)

In Abbildung 30, links ist die Bereitstellung von thermischer Energie durch das BHKW und den SLK bzw. der zugeführten Ölleistung zu sehen. Erwartungsgemäß läuft das BHKW 24 Stunden im Grundlastbetrieb wohingegen der SLK häufig taktet um die Spitzen zu decken. Auffällig ist hierbei, dass er fast ausschließlich zu Zeiten der Warmwasserspeicherladung läuft.

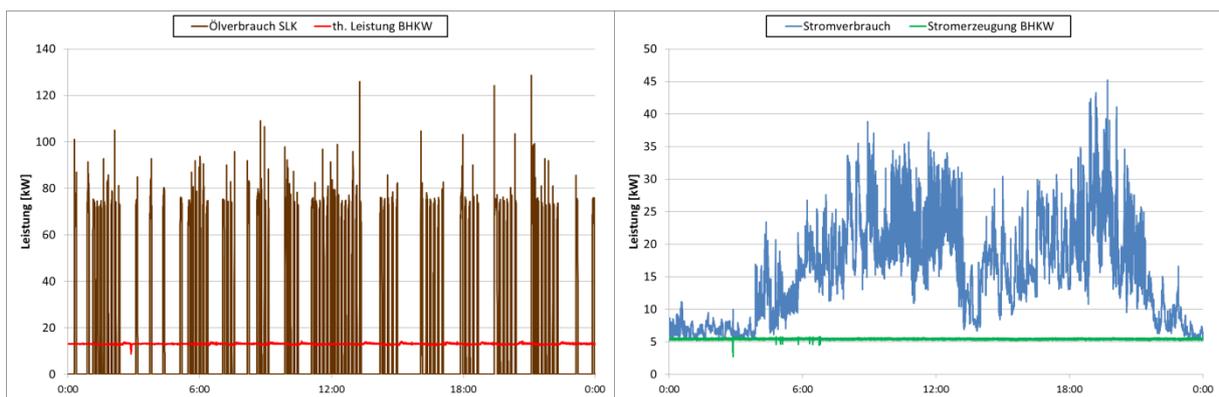


Abbildung 30: Wärmeerzeugung (links) sowie Verbrauch und Erzeugung elektrischer Energie

Mittwoch, der 16.05.2012, wurde als repräsentativster Übergangstag ausgewählt. Es werden 226,4 kWh Heizwärme, 487,9 kWh Strom und 53,9 kWh Warmwasser verbraucht. Der qualitative zeitliche Verlauf der Leistungen ist dem Wintertag ähnlich. So zeigt der Stromverbrauch ähnliche Leistungsspitzen zur Mittags- und Abendzeit. Die Leistung des BHKW, das auch hier 24 h in Betrieb ist, wird ebenso zu 100% im Gebäude verbraucht. Bei den Verläufen der thermischen Leistungen ergeben sich einige Änderungen. Der Heizwärmeverbrauch ist im Mittel nur noch halb so hoch, wie am Wintertag und liegt bei Durchschnittlich 9,4 kW. Durch diesen geringeren Wärmeverbrauch sowie die höhere Außentemperatur (Heizkurve), läuft der SLK an diesem Tag nur fünf Mal. Dadurch ergibt sich ein zu geringes Temperaturniveau für die WWSPL. Sie ist den kompletten Tag in Betrieb, da die Ladeendtemperatur nicht erreicht wird. Auf den Warmwasserverbrauch hat dies allerdings keinen Einfluss da zu jeder Zeit ausreichend heißes Warmwasser bereitgestellt werden kann. Die Zeiten, an denen die Zirkulation in Betrieb ist, sind durch den Betreiber etwas verändert worden. Sie läuft jetzt mit 18:45 h/d etwas länger und ist bis 09:30 Uhr sowie ab 14:45 Uhr in Betrieb.

Am ausgewählten Sommertag, Montag den 20.07.2011, werden 443,8 kWh Strom und 41,3 kWh Warmwasser verbraucht. Heizwärme wird am Sommertag nicht benötigt. Durch

den geringen Wärmeverbrauch wird die BHKW-Laufzeit reduziert. Das BHKW wird im Sommer nach einem fest vorgegebenen Zeitprogramm betrieben, das sicherstellt, dass der BHKW Strom zu den Zeiten des höchsten elektrischen Verbrauchs mittags und abends erzeugt wird und die elektrische Spitzenlast somit verringert wird. Die Zirkulationszeiten sowie die zeitliche Verteilung des Warmwasserverbrauchs entsprechen weitestgehend dem Wintertag. Die Warmwasserspeicherladung als einziger Verbraucher wird im Folgenden an den Messergebnissen der Prüfstandsuntersuchung erläutert und mit einer optimierten hydraulischen Verschaltung nach Modell I verglichen.

An den Ergebnissen des Sommertages kann sehr gut die qualitative Verbesserung der Wärmeerzeugung in der optimierten Verschaltung gezeigt werden. An diesem Tag wird der Warmwasserbedarf, wie bereits erwähnt, komplett vom BHKW gedeckt. Es wird zeitgesteuert von 7:30 Uhr bis 13:00 Uhr und von 16:20 Uhr bis 20:00 Uhr betrieben, sodass in diesen 9:10 h 115 kWh thermische Energie bereitgestellt werden. Dies reicht aus, um 41 kWh Warmwasserverbrauch und 25 kWh Zirkulationsverluste sowie alle weiteren Verluste im System zu decken.

Im oberen Teil von Abbildung 31 wird die WWSPL gezeigt. Für die Verschaltung Flintsbach (rot) wird die Ausschalttemperatur (56°C) der Pufferspeicherladung nur zwei Mal am Tag erreicht. Dies geschieht jeweils zu den Laufzeiten des BHKW um 11:24 Uhr sowie um 18:54 Uhr. Das Temperaturniveau im Pufferspeicher (Abbildung 31, unten; untere Kurvenschar), aus dem die Ladeleistung bereitgestellt wird ist zu diesen Zeiten etwas höher und fällt danach schnell wieder ab. Somit läuft die WWSPL ca. 22 Stunden. Im Fall der Verschaltung nach Modell I wird die WWSPL mit deutlich höheren Leistungen durchgeführt und ist meist nach kurzer Zeit beendet. Nachts, wenn das BHKW längere Zeit nicht in Betrieb ist, kann die WWSPL nicht beendet werden und läuft somit bis 9:45 Uhr. Zu dieser Zeit konnte das BHKW die PS-Temperaturen bereits deutlich anheben. Das untere Diagramm zeigt für beide Verschaltungen die Temperaturverteilung im Pufferspeicher, die mit zehn Temperatursensoren über der Speicherhöhe erfasst wurde. Aufgrund der wärmeabhängigen Dichte verbleiben wärmere Wasserschichten im Speicher oben, wohingegen sich das kältere unten befindet. Die Wanderung der Mischzone zwischen warmen und kalten Wasser im Speicher kann durch die gestaffelte Veränderung der Temperaturen erkannt werden. Durch die optimierte Verschaltung liegt im Pufferspeicher oft eine deutliche Schichtung vor. Hingegen ist der Pufferspeicher im Modell Flintsbach (untere Kurvenschar) zumeist stark durchmischt, so dass die unterste und die oberste Temperatur nahezu identisch sind. Nur in den Zeiten ohne WWSPL, das heißt ohne Durchmischung kann sich kurzzeitig eine Temperaturschichtung ausbilden.

Aufgrund der voreingestellten BHKW Laufzeiten kann an diesem Sommertag durch die verbesserte Hydraulik keine Energieeinsparung erzielt werden. Jedoch ist die Qualität der Warmwasserbereitung gesteigert und die Betriebszeit der Warmwasserspeicherladepumpe verringert worden. Der Warmwasserspeicher erreicht mehrmals am Tag seine Ladeendtemperatur und somit auch die gewünschte Maximaltemperatur im Warmwasserspeicher.

Das Energieeinsparpotenzial aus den Simulationen kann anhand der Prüfstandmessung am Wintertag verdeutlicht werden. In der Verschaltung Flintsbach beträgt der Gasverbrauch des SLK 370 kWh und der des BHKW 453 kWh. Im Gegensatz dazu verbrauchen sie in der optimierten Verschaltung nach Modell I 296 kWh (SLK) und 463 kWh (BHKW). Mit diesen Werten ergibt sich eine Reduzierung des Brennstoffverbrauchs um 8%. Diese Reduktion ist vor allem auf eine verbesserte Ausnutzung des Brenngases, durch bessere Brennwertnutzung aufgrund eines niedrigeren Temperaturniveaus im Rücklauf, verminderte Verluste und ein günstigeres Taktverhalten des Spitzenlastkessels zurückzuführen.

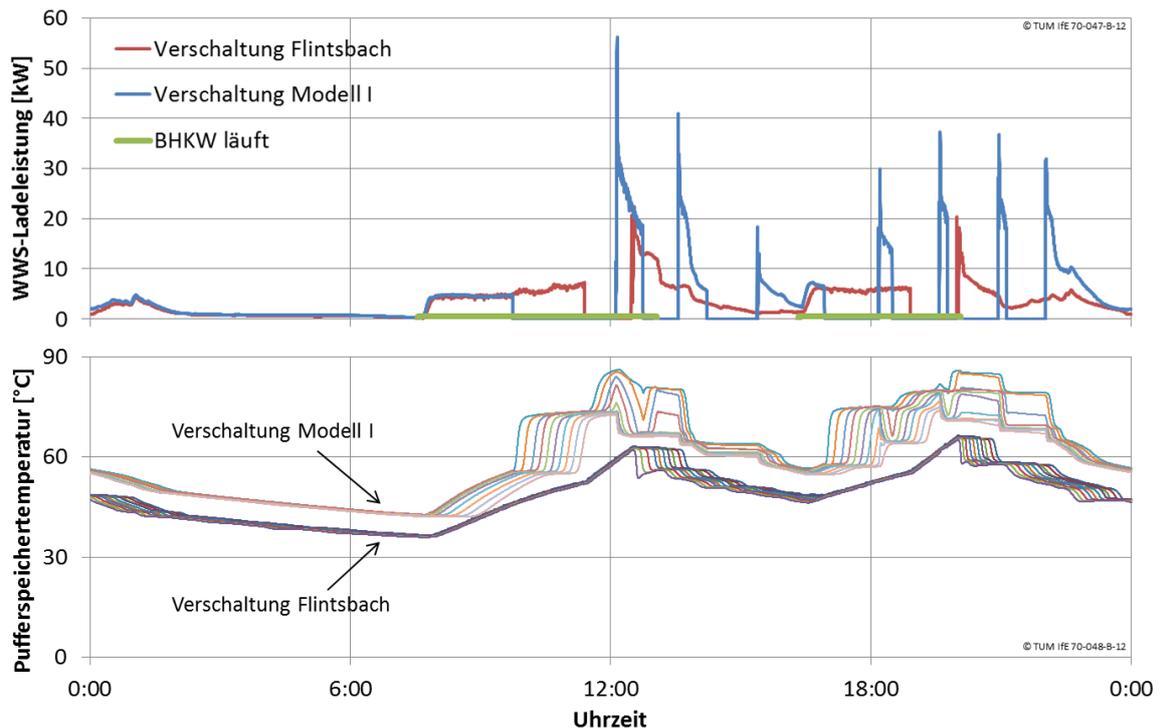


Abbildung 31: Warmwasserspeicherladung (oben) und Temperaturverteilung des Pufferspeichers

Das Ladeverhalten des Warmwasserspeichers konnte für diesen Wintertag auch verbessert werden. In der Schaltung Flintsbach wird die Ladung vier Mal gestartet und läuft jeweils für mehrere Stunden, mit sehr niedriger, wenn das Temperaturniveau im Vorlauf absinkt teils sogar negativer Leistung. In der optimierten Verschaltung mit zentralem Pufferspeicher wird die WWSPL doppelt so oft gestartet und endet meist nach weniger als einer Stunde.

Die Messung des Wintertages konnte zeigen, dass die ermittelten Einsparpotentiale durch eine Optimierung von hydraulischer Verschaltung sowie der Regelung auch in der Realität zu Einsparungen führt. Deshalb sollte beim Aufbau einer Mikro-BHKW-Anlage immer das Gesamtsystem betrachtet werden und nicht versucht werden die Installationskosten auf Kosten der Effizienz zu senken.

4.7 Potenzialabschätzung

Abschließend soll das Potenzial für Mikro-KWK Anlagen im Gewerbe in Bayern abgeschätzt werden. Anders als im Abschnitt 1, wo Mikro-KWK nur Anlagen im Leistungsbereich bis 10 kW elektrisch bzw. rund 25 kW thermisch umfasst, werden hier Systeme bis 50 kW elektrische und rund 120 kW thermische Leistung betrachtet. Um dieses Potenzial zu bestimmen werden zunächst die Rahmenbedingungen untersucht, unter denen ein wirtschaftlicher Betrieb eines KWK-Systems möglich ist. Anschließend werden für ausgesuchte Branchen die Anteile am Wärmebedarf ausgewiesen, die durch KWK-Systeme gedeckt werden können.

Anhand von Daten der Energiebilanz und Parametern zum Energiebedarf im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen wird somit das Potenzial für Mikro-KWK Systeme ermittelt. Es werden durchgängig Daten für das Jahr 2010 verwendet.

a) Rahmenbedingungen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Mikro-KWK Anlagen

Zahlreiche Faktoren haben Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit, mit der eine Mikro-KWK Anlage in einem Versorgungsobjekt betrieben werden kann. Anhand eines Beispiels ist in

Abbildung 32 die Sensitivität des Jahresüberschusses auf wesentliche Einflussparameter dargestellt. Die Investitionskosten werden nach Abzug eines Förderzuschusses von 2.550 € mit einem Zinssatz von 5 % über einen Zeitraum von 10 Jahren annuitätisch abgeschrieben. Es werden Gasbezugskosten von 6 €/kWh, Strombezugskosten von 20 €/kWh und eine Einspeisevergütung von 5 €/kWh angenommen. Für den erzeugten Strom erhält der Betreiber den KWK-Bonus von 5,11 €/kWh, für die abgegebene Nutzwärme werden 6,7 €/kWh gutgeschrieben. Weiterhin wurden Gutschriften der Energiesteuer und für vermiedene Netznutzung eingerechnet.

Abbildung 32 zeigt, dass die erreichbare Ausnutzungsdauer einen signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat und deshalb eine KWK-Anlage nicht überdimensioniert werden sollte. Bei steigenden Installationszahlen ist zukünftig mit sinkenden Investitionskosten zu rechnen und somit mit einer besseren Wirtschaftlichkeit.

Durch den Betrieb der KWK-Anlage sinkt der Strombezug aus dem Stromnetz. Folglich steigt der Jahresüberschuss mit steigendem Strompreis, sinkt jedoch bei steigendem Erdgaspreis.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat auch der Anteil des Stroms, der in das Netz eingespeist werden muss, da er nicht im Versorgungsobjekt genutzt werden kann. Während für aus dem Netz bezogenen Strom 20 €/kWh gezahlt werden muss, wird die Einspeisung nur mit 5 €/kWh vergütet. Daher sollte KWK-Strom soweit möglich im Objekt genutzt werden. Es wird angenommen, dass 30 % des erzeugten KWK-Stroms in das Stromnetz eingespeist werden müssen.

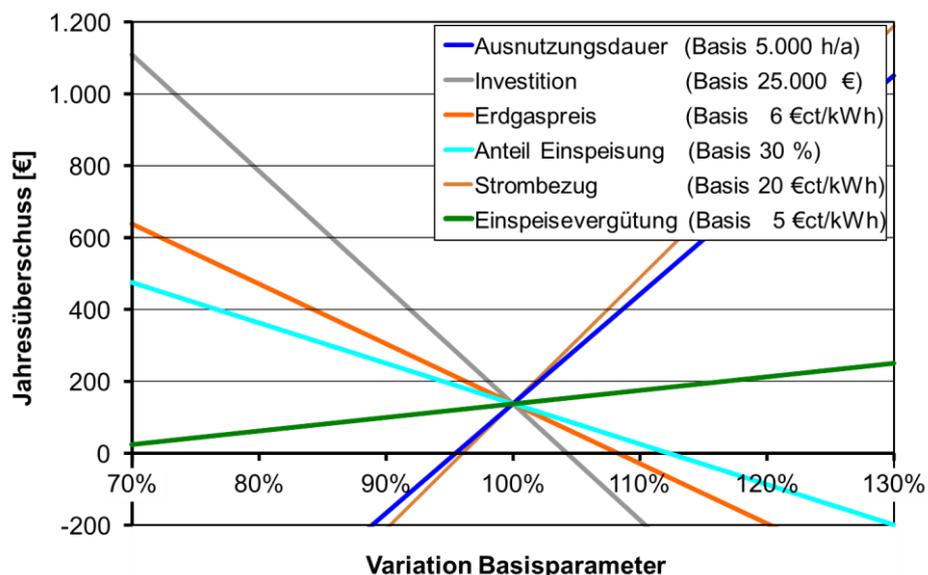


Abbildung 32: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit von Mikro-KWK Systemen

In der nachfolgenden Potenzialabschätzung werden die Mikro-KWK Systeme so ausgelegt, dass eine Ausnutzung von mindestens 5.000 Vollbenutzungsstunden jährlich erreicht wird.

b) Auswahl der in die Potenzialabschätzung einbezogenen Branchen

Im 1. Zwischenbericht [FORETA 2010] wurden bereits Branchen des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen identifiziert, die sich aufgrund einer gleichmäßig hohen Wärmenachfrage im Temperaturbereich bis ca. 80°C für den Einsatz von Mikro-KWK-Systemen eignen. Eine detaillierte Beschreibung enthält [Wieser 2010].

In Abbildung 33 sind Jahresdauerlinien des Tageswärmebedarfs verschiedener Branchen dargestellt. Da der Betrag des Wärmebedarfs je nach Branche und Größe des Betriebs stark variieren kann, wurde die Darstellung auf einen Jahreswärmebedarf von 1 MWh normiert. Die Daten zu den Jahresdauerlinien wurden aus in [Hell 2003] und [BGW 2006] beschriebenen Gaslastprofilen anhand eines Testreferenzjahres abgeleitet, bzw. stammen aus Datenbeständen früherer Arbeiten des Lehrstuhls [GeKleS 2008].

Ausgehend von der Jahresdauerlinie des Tageswärmebedarfs werden die KWK-Systeme in ihrer thermischen Leistung so ausgelegt, dass 5.000 Vollbenutzungsstunden im Jahr erreicht werden können. Dies ist in Abbildung 34 am Beispiel eines Hotels dargestellt.

Ein nach o.g. Kriterien ausgelegte BHKW hat in diesem Beispiel eine thermische Leistung von 25 kW. Damit kann die maximale Wärmelast zu 40 % gedeckt werden, der Jahreswärmebedarf jedoch zu rund 90 %. Um geringe Wärmelasten im Sommer und morgendliche (bzw. abendliche) Spitzen im Winter decken zu können, muss ein entsprechend großer Wärmespeicher eingeplant werden.

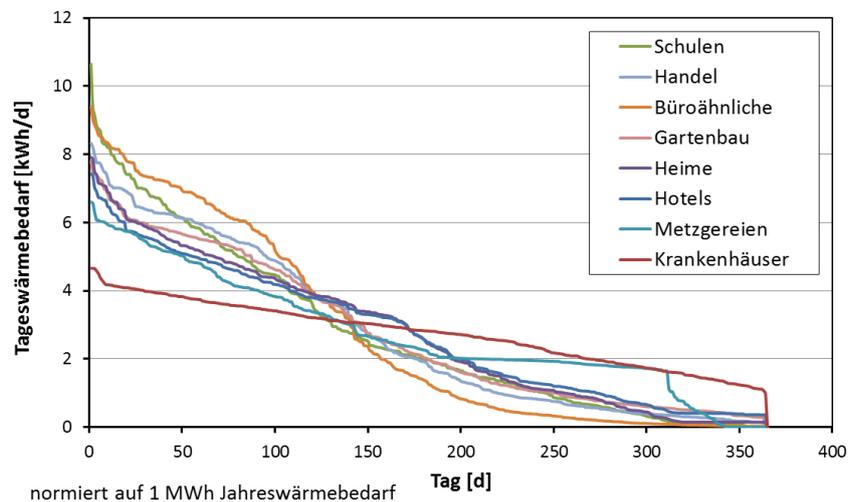


Abbildung 33: Geordnete Dauerlinie des Wärmebedarfs ausgewählter Branchen

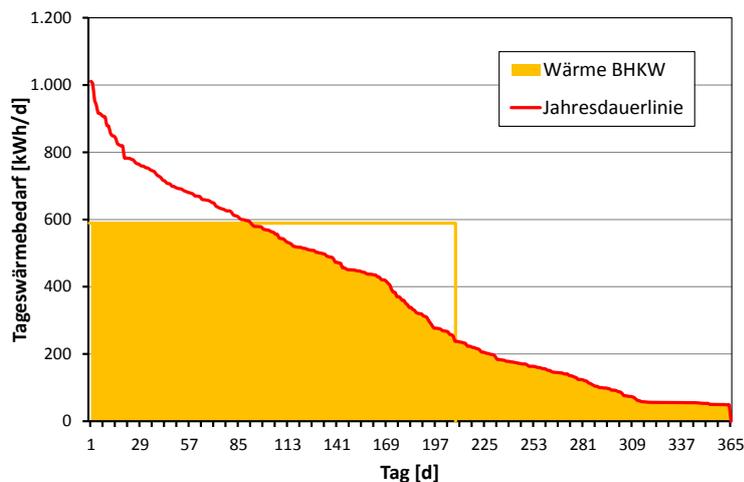


Abbildung 34: Geordnete Dauerlinie des Wärmebedarfs und der BHKW Wärmebereitstellung eines Hotels

c) Potenzialabschätzung für Deutschland und Bayern

Anhand der in vorherigen Abschnitten beschriebenen Daten wird zunächst für die Bundesrepublik Deutschland das Potenzial für die Wärmebereitstellung von Mikro-KWK Anlagen ermittelt und getrennt nach Branchen in Tabelle 9 dargestellt. Nachfolgend werden die Daten der einzelnen Spalten kurz beschrieben:

- Der Endenergiebedarf für Wärme wurde der Studie [GHD 2012] entnommen. Die Anteile von Öl und Gas auf Basis dieser Quelle berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass nur öl- und gasversorgte Heizanlagen durch ein BHKW ersetzt werden können.
- Für die Umrechnung von Endenergie zur Nutzenergie Wärme wird ein einheitlicher Nutzungsgrad von 85 % angesetzt.
- Da derzeit verfügbare Mikro-BHKW Wärme nur mit Temperaturen bis ca. 80°C liefern können, wurde abgeschätzt, welcher Anteil des Wärmebedarfs einer Branche in diesem Bereich liegt. Bei Branchen, die Wärme nicht ausschließlich zur Deckung von Raumwärme und Brauchwarmwasserbedarf benötigen, wurden Abstriche gemacht.
- Der Anteil der Wärme, die von einem KWK-System gedeckt werden kann, wurde soweit möglich aus den Dauerlinien des Wärmebedarfs der Branche ermittelt (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34) und ansonsten abgeschätzt.
- Ein Mikro-KWK System mit 120 kW thermischer Leistung kann bei den angestrebten 5.000 Vollbenutzungsstunden eine Wärmemenge von 600 MWh zur Verfügung stellen. Demnach können Betriebe mit einem durch KWK deckbaren Wärmebedarf, der diesen Wert nicht übersteigt durch Mikro-KWK Anlagen versorgt werden. Da keine Verteilung der Betriebsgrößen nach Branchen vorliegt, jedoch die Anzahl der Beschäftigten in Betrieben bis 10 Beschäftigte, wurde dieser Anteil an der Gesamtzahl der Beschäftigten herangezogen, um den Anteil von Mikro-KWK am gesamten KWK Potenzial zu bestimmen. Bei Krankenhäusern, Bädern und Flughafen wird davon ausgegangen, dass größere Anlagen zum Einsatz kommen würden und deshalb kein Potenzial für Mikro-KWK besteht.

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich, ergibt sich für Deutschland ein Potenzial für die Wärmeerzeugung aus Mikro-KWK von knapp 30 TWh im Jahr. Bei einer Stromkennzahl von 0,40 entspricht dies einer Stromerzeugung von rund 12 TWh/a.

Tabelle 9: Potenzialabschätzung der Mikro-KWK in Deutschland

Gr.	Branche	Endenergie für Wärme [TWh/a]	Anteil Öl und Gas [-]	Nutzungsgrad Öl/Gas [-]	Anteil < 80°C [-]	Kommentar	Anteil KWK [-]	Kommentar	Anteil Mikro KWK [-]	Wärme-potenzial Mikro KWK [TWh/a]
1	Baugewerbe	10,6	88%	85%	100%	RW und WW	65%	Abschätzung	43%	2,2
2	Büroähnliche Betriebe	66,5	83%	85%	100%	RW und WW	50%	analog Dauerlinie	27%	6,3
3	Herstellungsbetriebe	7,7	90%	85%	50%	Abschätzung	65%	Abschätzung	83%	1,6
4	Handel	41,7	94%	85%	100%	RW und WW	60%	analog Dauerlinie	33%	6,7
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder									
21	Krankenhäuser	12,0	72%	85%	80%	(Dampf für Küche)	90%	analog Dauerlinie	0%	0,0
22	Schulen	20,1	59%	85%	100%	RW und WW	60%	analog Dauerlinie	50%	3,0
23	Bäder	4,5	20%	85%	100%	RW und WW	65%	evtl. WRG vorhanden	0%	0,0
6	Beherbergung, Gaststätten, Heime	47,9	86%	85%	70%	(Kochgas)	85%	analog Dauerlinie	23%	4,9
7	Nahrungsmittelgewerbe									
5	Backgewerbe	0,9	88%	85%	20%	(Backöfen)	70%	Abschätzung	93%	0,1
6	Fleischereien	0,5	93%	85%	60%	Abschätzung	80%	analog Dauerlinie	93%	0,2
7	Restl. Nahrungsmittelgewerbe	0,3	94%	85%	50%	Abschätzung	65%	Abschätzung	93%	0,1
8	Wäschereien	0,7	100%	85%	50%	(Kochw./Dampf)	90%	Abschätzung	30%	0,1
9	Landwirtschaft	18,1	37%	85%	100%	RW und WW	60%	Abschätzung	100%	3,4
10	Gartenbau	4,7	97%	85%	100%	RW und WW	60%	analog Dauerlinie	33%	0,8
11	Flughäfen	1,9	38%	85%	100%	RW und WW	65%	Abschätzung	0%	0,0
12	Textil, Bekleidung, Spedition	3,5	89%	85%	100%	RW und WW	65%	Abschätzung	31%	0,5
Summe Gruppen 1 - 12		241,4	79%	85%	91%		63%		33%	29,9
99	Übrige	3,7	64%	85%	50%	Abschätzung	0%	Abschätzung	0%	0,0
Gesamtsumme		245,1	79%	85%	90%		62%		32%	29,9

Um den Anteil des auf Bayern entfallenden Potenzials zu bestimmen, werden Daten des Unternehmensregisters [BfS 2012, LfS 2012] verwendet und den Branchen der GHD Statistik zugeordnet. Auf Bayern entfallen, abhängig von der Branche, zwischen 18 % und 43 % der in Deutschland ansässigen Betriebe in den Größenklassen bis 49 Beschäftigte (Tabelle 10).

Tabelle 10: Betriebe in Deutschland und Bayern nach Branchen und Zuordnung der Wirtschaftsabschnitte

Branche		Betriebe mit sozialversicherungspflichtig Beschäftigten ¹⁾				Anteil Bayern	Gruppe, Wirtschaftsabschnitt
		Deutschland		Bayern			
Gr.	Größenklasse	0 bis 9	10 bis 49	0 bis 9	10 bis 49		
1	Baugewerbe	352.037	32.683	60.017	5.189	34%	F Baugewerbe
2	Büroähnliche Betriebe	78.716	6.432	15.124	1.292	18%	K Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen
		310.754	3.300	55.434	469		L Grundstücks- und Wohnungswesen
		477.717	24.974	85.293	4.174		M Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen
		174.280	16.461	28.409	2.186		N Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen
		241.250	10.373	47.862	1.425		S Erbringung von sonstigen Dienstleistungen
3	Herstellungsbetriebe	198.940	47.027	38.982	7.653	26%	C Verarbeitendes Gewerbe
4	Handel	695.282	72.738	121.278	12.100	34%	G Handel, Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder						
	21 Krankenhäuser	204.292	29.098	32.881	4.437	28%	Q Gesundheits- und Sozialwesen
	22 Schulen	68.735	15.926	12.921	3.130	29%	P Erziehung und Unterricht
	23 Bäder					28%	Abschätzung
6	Beherbergung, Gaststätten, Heime	251.343	15.867	43.852	3.000	43%	I Gastgewerbe
7	Nahrungsmittelgewerbe	198.940	47.027	38.982	7.653		C Verarbeitendes Gewerbe
	5 Backgewerbe					26%	
	6 Fleischerereien					26%	
	7 Restl. Nahrungsmittelgewerbe					26%	
8	Wäschereien	174.280	16.461	28.409	2.186	31%	N Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen
9	Landwirtschaft			97,9		33%	
10	Gartenbau	299,1				33%	Anzahl der Betriebe in 1.000 ²⁾
11	Flughäfen		nicht relevant			-	
12	Textil, Bekleidung, Spedition	112.256	19.169	19.506	2.808	26%	H Verkehr und Lagerei

1) Unternehmensregister 2010, Anteil Bayern: gewichtetes Mittel, aus den Größenklassen 0 bis 9 und 10 bis 49
2) Statistik der Landwirtschaftl. Betriebe

Als Ergebnis zeigt

Tabelle 11 das Potenzial für die Wärmebereitstellung und die Stromerzeugung in Bayern. In Summe könnten mit Mikro-KWK Systemen rund 9 TWh/a Wärme und 3,6 TWh Strom jährlich bereitgestellt werden. Dies entspricht jeweils knapp 13 % des Wärme- bzw. Strombedarfs. Bei einer angenommenen Anlagengröße von 25 kW thermisch und 10 kW elektrisch und einer Ausnutzungsdauer von 5.000 h/a wären rund 72.000 Anlagen erforderlich, um dieses Potenzial zu erschließen.

Diese Potenzialabschätzung erfolgte auf Basis des Wärmebedarfs und mit der Annahme, dass 70 % der erzeugten elektrischen Energie im Betrieb genutzt werden kann.

Tabelle 11: Potenzialabschätzung der Mikro-KWK in Deutschland und Bayern

Gr.	Branche	Deutschland				Anteil Bayern	Bayern ²⁾			
		Wärmebedarf GHD ¹⁾	Strombedarf GHD	Potenzial Mikro KWK			Wärmebedarf GHD	Strombedarf GHD	Potenzial Mikro KWK	
				Wärme	Strom				Wärme	Strom
		[TWh/a]	[TWh/a]	[TWh/a]	[TWh/a]	[-]	[TWh/a]	[TWh/a]	[TWh/a]	[TWh/a]
1	Baugewerbe	10,6	3,4	2,2	0,9	34%	3,6	1,2	0,8	0,3
2	Büroähnliche Betriebe	66,5	27,5	6,3	2,5	18%	11,6	4,8	1,1	0,4
3	Herstellungsbetriebe	7,7	4,3	1,6	0,6	26%	2,0	1,1	0,4	0,2
4	Handel	41,7	23,3	6,7	2,7	34%	14,0	7,8	2,2	0,9
5	Krankenhäuser, Schulen, Bäder									
	21 Krankenhäuser	12,0	5,8	0,0	0,0	28%	3,3	1,6	0,0	0,0
	22 Schulen	20,1	4,2	3,0	1,2	29%	5,8	1,2	0,9	0,3
	23 Bäder	4,5	2,2	0,0	0,0	28%	1,3	0,6	0,0	0,0
6	Beherbergung, Gaststätten, Heime	47,9	18,5	4,9	2,0	43%	20,4	7,9	2,1	0,8
7	Nahrungsmittelgewerbe									
	5 Backgewerbe	0,9	0,5	0,1	0,0	26%	0,2	0,1	0,0	0,0
	6 Fleischereien	0,5	0,4	0,2	0,1	26%	0,1	0,1	0,0	0,0
	7 Restl. Nahrungsmittelgewerbe	0,3	0,2	0,1	0,0	26%	0,1	0,0	0,0	0,0
8	Wäschereien	0,7	0,4	0,1	0,0	31%	0,2	0,1	0,0	0,0
9	Landwirtschaft	18,1	5,8	3,4	1,4	33%	5,9	1,9	1,1	0,4
10	Gartenbau	4,7	0,5	0,8	0,3	33%	1,5	0,2	0,3	0,1
11	Flughäfen	1,9	1,6	-	-	-	-	-	-	-
12	Textil, Bekleidung, Spedition	3,5	0,8	0,5	0,2	26%	0,9	0,2	0,1	0,1
	Summe Gruppen 1 - 12	241,4	99,5	29,9	11,9		71,1	29,0	9,1	3,6
99	Übrige	3,7	1,5	-	-					
	Gesamtsumme	245,1	101,0	29,9	11,9		71,1	29,0	9,1	3,6

1) Endenergie

2) Werte für Bayern anhand der Anteile aus den Werten für Deutschland berechnet

4.8 Fazit

Die im Feldversuch untersuchten Anlagen werden von den Betreibern nahe am möglichen Optimum gefahren. Auch bei wärmegeführtem Betrieb kann ein hoher Anteil des erzeugten Stroms im Versorgungsobjekt genutzt werden und die Spitzenlast reduziert werden. Die Integration der Mikro-KWK Anlage in das Heizsystem des Gebäudes ist häufig nicht gut gelöst in Hinblick auf die hydraulische und regelungstechnische Einbindung.

Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass durch Optimierung der Einbindung und der Betriebsweise der Primärenergiebedarf und CO₂-Ausstoß noch weiter gesenkt (bis zu 6 %) und die Wirtschaftlichkeit der Systeme verbessert werden können.

Eine Standardauslegung eines Mikro-KWK Systems für einen Gewerbebetrieb gibt es nicht. Anlagenleistung, Größe des thermischen Speichers, hydraulische Einbindung und Regelungsparameter müssen auf das jeweilige Versorgungsobjekt abgestimmt werden.

Die Potenzialabschätzung ergab ein Potenzial für Mikro-KWK Systeme im Gewerbe, Handel und Dienstleistungsbereich von rund 9,1 TWh Wärme und 3,6 TWh Strom. Damit könnten knapp 4 % des bayerischen Strombedarfs gedeckt werden und eine Erzeugungsleistung von rund 720 MW zur Verfügung gestellt werden. Durch intelligentes Management der Mikro-KWK Anlagen, z.B. im Rahmen von virtuellen Kraftwerken, wird diese Erzeugerleistung teilweise disponibel und kann einen wertvollen Beitrag bei der Integration erneuerbarer Energien leisten und zur Energiewende in Bayern beitragen.

5 Übertragbarkeit und Verwertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden vielfältig genutzt. Als erstes werden mit Hilfe der Ergebnisse die Anlagen der Feldtestbetreiber energetisch und wirtschaftlich optimiert. Zweitens hat die Energie Südbayern GmbH die Möglichkeit konkret Betriebe, welche sich besonders gut für den Einsatz von Mikro-BHKW eignen, anzusprechen oder sogar über Wärmecontractingverträge Anlagen selbst zu installieren. Drittens können viele Ergebnisse in den weiteren Arbeiten des Lehrstuhls verwendet werden. Insbesondere die Auswertung

der Feldtestdaten mit Hilfe der Sigmoidfunktionen (4.4.c), die Verwendung bzw. Verbesserung der Simulationsmodelle (4.5.) und die Typtagfindung (4.6.) werden Eingang in den weiteren Arbeiten des Lehrstuhls finden.

Quellenverzeichnis:

- [AEU 2004] Amtsblatt der Europäischen Parlaments und des Rates über die Förderung einer am Nutzwärmebedarf orientierten Kraft-Wärme-Kopplung im Energiebinnenmarkt und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG, 2004
- [Aisin 2011] Aisin: <http://www.aisin.de/bhkw/produktangebot/mini-bhkw/> eingesehen am 19. August 2011
- [ANNEX 2007] Kelly N. (University of Strathclyde), Beausoleil-Morrison I. (Natural Resources Canada) et al.: Specifications for Modelling Fuel Cell and Combustion-Based Residential Cogeneration Devices within Whole-Building Simulation Programs
- [Arndt 2007] Arndt, U., Mauch, W., Mühlbacher, H., Geiger, B., et al.: Innovative KWK-Systeme zur Hausenergieversorgung - Messtechnische Untersuchung Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Systemvergleich und Optimierung. Bearbeiter durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE e.V., München und den Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 2007
- [BfS 2012] Unternehmensregister - Betriebe nach Beschäftigtengrößenklassen. Statistisches Bundesamt. www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/UnternehmenHandwerk/Unternehmensregister/Tabellen/BetriebeBeschaeftigtengroessenklassenWZ08.html, abgerufen 12/2012
- [BGW 2006] n.n. (2006): Anwendung von Standardlastprofilen zur Belieferung nichtleistungsgemessener Kunden; Herausgeber: BGW Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft; Berlin
- [GEKLES 2008] Geiger B., Kleeberger H. (2008): GEKLES, Gewerbeklassifizierung mit Energiestrukturen; München
- [GHD 2009] Schlomann B., Gruber E., Geiger B., Kleeberger H., Wehmhörner U.: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung für die Jahre 2004 bis 2006; Studie im Auftrag des BMWi, 2009
- [GHD 2011] Kleeberger H., Tzscheutschler P., Geiger B.: Erstellen der Anwendungsbilanz 2009 und 2010 für den Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD); Im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., 2011, Berlin
- [GHD 2012] Schlomann B., Kleeberger H., Piech A., Gruber E., et.al.: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010. Studie im Auftrag des BMWi, (noch unveröffentlicht), 2012
- [Hell 2003] Hellwig M.: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München 2003

- [LfL 2012] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Agrarmeteorologisches Institut: <http://www.lfl.bayern.de/agm/start.php> eingesehen am 28.20.2012
- [LfS 2012] Betriebe 2010 nach Beschäftigtengrößenklassen und Wirtschaftsabschnitten. Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung, www.statistik.bayern.de/medien/statistik/wirtschaftshandel/0409_betriebe_2010_nach_bgk_und_wirtsch_abschn.xlsx, abgerufen 12/2012
- [Mühl 2007] Mühlbacher H. Verbrauchsverhalten von Wärmeerzeugern bei dynamisch variierten Lasten und Übertragungskomponenten, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München 2007
- [TRNSYS 2009] Documentation. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA, 2009
- [VDI 2067] Verein Deutscher Ingenieure VDI 2067 Entwurf: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen Grundlagen und Kostenberechnung, September 2010
- [VDI 3807] Verein Deutscher Ingenieure VDI 3807 Entwurf: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte für Gebäude Grundlagen, März 2007
- [Wieser 2010] Wieser B., Lipp J.: The Possible Relevance of Micro-CHP on Future Energy Supply, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 2010
- [Wieser 2011] Wieser B. : Kältebereitstellung mit Adsorptionskältemaschinen im GHD Bereich, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, 2011