Bericht zur Qualitätssicherung für das Blockheizkraftwerk (BHKW) im Wohn- und Geschäftshaus Möhringsberg, 30167 Hannover-Nordstadt

Ingenieurbüro energiekontor Hannover

Hannover, November 2016

Inhaltsverzeichnis (Übersicht):

Wohn- und Geschäftshaus + Kita, Möhringsberg / Vordere Schöneworth

Energiebedarf – Haus Möhringsberg

BHKW-Auswahl - Fabrikat

Spitzenkessel

Pumpen (Hocheffizienzpumpen)

Wärme- und Volumenstromzähler

Übergeordnetes Steuer- Regel- und Überwachung-System

Hydraulik – Energiezentrale Möhringsberg

Auslegung und Auswahl eines BHKW

BHKW- Strom-Geldbilanz (neues KWK-Gesetz 2016)

Kaufmännische Abrechnung / Bilanzierung

Strompreise der Leipziger Strombörse EEX

EEG-Umlage – Wer ist Eigenversorger?

BHKW- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Amortisationsrechnung (Barwertmethode)

BHKW-Investitionskosten und Zuschüsse

Ergebnisse der BHKW-Auslegung und Wirtschaftlichkeits-Prognose

Anhang:
Wieso sparen Blockheizkraftwerke Energie und CO_2?

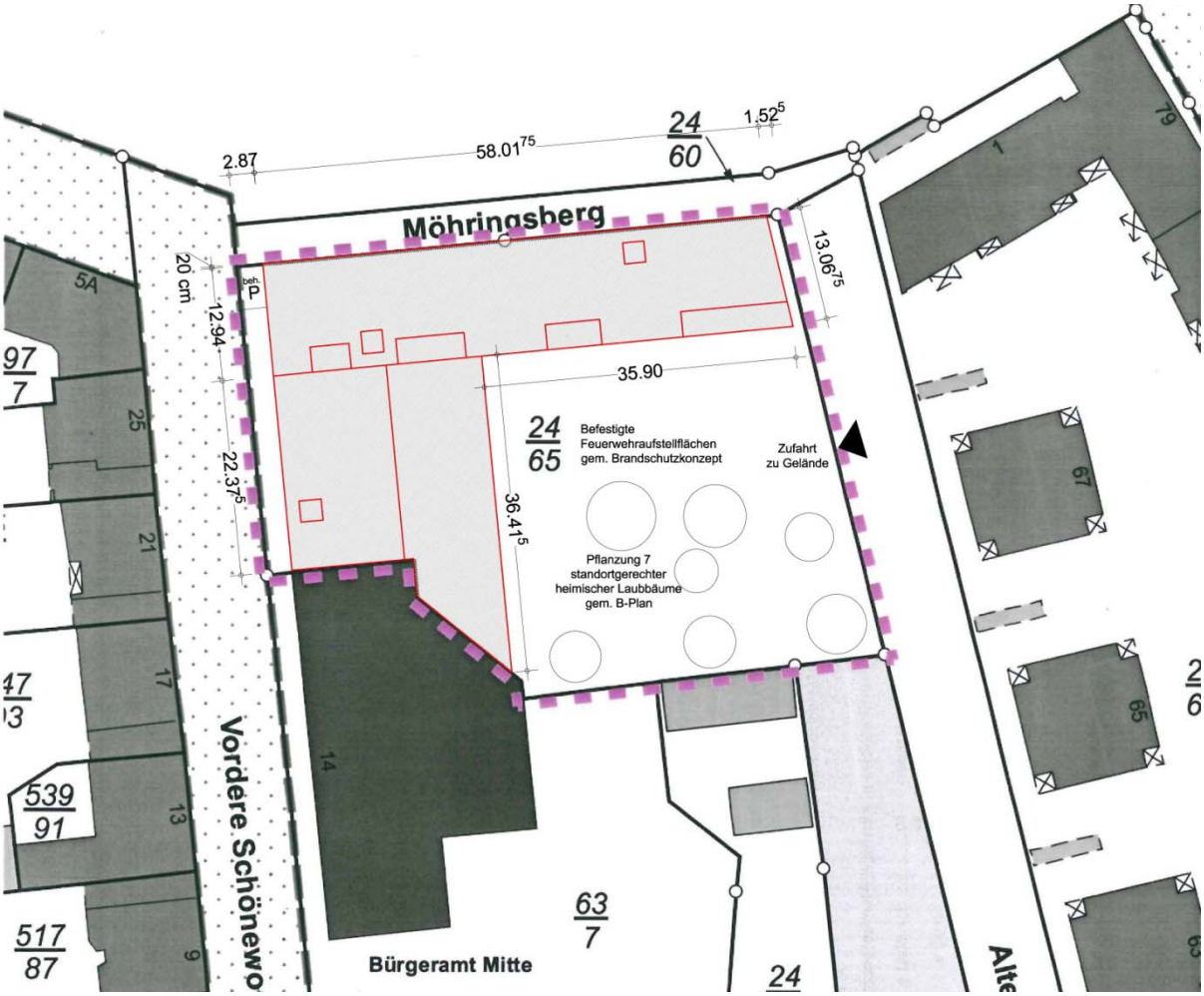
Wohn- und Geschäftshaus + Kita, Möhringsberg / Vordere Schöneworth

Das Haus ist ein Neubau in der hannoverschen Nordstadt auf dem Areal des ehemaligen Güterbahnhofs. An der östlichen Seite wurde zwischen Weidendamm und der bestehenden Wohnbebauung die „Alte Ladestraße“ erhalten. Auf der nördlichen Seite befindet sich ein Stadtteilpark. Auf der anderen Seite des Parks liegt das Studentenwohnheim „The Fizz“.

Das Haus wurde im Passivhaus-Standard errichtet. Die gesamte Nutzfläche beträgt 4330 m³.

Im Erdgeschoss befindet eine Kindertagesstätte (Kita) mit fünf Gruppen für insgesamt ca. 95 Kinder. In den Obergeschossen 1, 2 und 3 befinden sich 11 Wohngemeinschaften (WG’s), in denen insgesamt 72 Einzelzimmer-Apartments mit eigenem Duschbad/WC jeweils in 6er- bzw. 7er-WG’s eine Gemeinschaftsküche mit einem Balkon nutzen.
Im 4ten Obergeschoss sind vier Familienwohnungen mit jeweils ca. 120 m² Wohn-/ Nutzfläche. Zwei Drei- und zwei Einzimmerwohnungen runden das Angebot ab.
Aufgrund der Nähe zu den Einrichtungen der Leibniz Universität Hannover richtet sich das Mietangebot vornehmlich an Studierende.

Im Keller gibt es Fahrradstellplätze, Waschmaschinen mit Warm-Wasser-Anschluss, Wäschetrockner mit Wärmepumpe und einen großzügigen Raum für die Energiezentrale.



Energiebedarf – Haus Möhringsberg

Schon in der Planungsphase wurde der Einsatz eines BHKW mit Spitzenkessel und zentraler WarmWasser (WW) -Versorgung diskutiert und beschlossen. Das BHKW soll nicht nur den Grundlast-Wärmebedarf decken, sondern auch zur Stromversorgung des Hauses beitragen. Aktuell wird noch eine Photovoltaik (PV) -Anlage mit ca.30 kW Spitzenleistung installiert.
Die Idee dabei ist, dass sich BHKW und Photovoltaik gut ergänzen. Die PV-Anlage wird vornehmlich im Sommer Strom erzeugen, wenn der Wärmebedarf klein ist und das BHKW weniger (nur zur Warmwasserbereitung WWB) in Betrieb sein wird.

Zur sinnvollen Auslegung bzw. Dimensionierung von BHKW, Spitzenkessel, WWB und PV-Anlage muss insbesondere der Wärmebedarf aber auch der Strombedarf möglichst gut prognostiziert werden. Die Prognose war für dieses Projekt besonders schwierig, da es keine vergleichbaren Referenzgebäude gibt.

Für die Heizlastberechnung gibt es umfangreiche Berechnungen nach PHPP (Passivhaus Projektierungs Paket). Für die technische und wirtschaftliche Auslegung des BHKW ist jedoch der Jahres-Wärmebedarf ab Heizzentrale, d.h. einschließlich der Verteilungsverluste, ausschlaggebend. Über die tatsächlichen Energieverbräuche von Passivhäusern gibt es wenig belastbare Zahlen. 2015 wurde jedoch von der „energydesign Braunschweig GmbH“ eine Studie „8 Passivhaus-Kitas in Hannover“ zu deren tatsächlichen Energieverbräuchen veröffentlicht. Danach lag der tatsächliche Energieverbrauch deutlich höher als nach den PHPP-Berechnungen. Jedenfalls ist wohl der PHPP-Kennwert-Heizwärme von 15 kWh/(m²*a) in der Praxis nicht zu erreichen. Die hier prognostizierten Verbrauchswerte sind in der nachfolgenden Excel-Datei dargestellt. Für den Raumwärmebedarf wurden darin 20 kWh/(m²*a) Nutzwärme und 15 kWh/(m²*a) für die Verteilungsverluste angesetzt.

Ähnlich schwierig war die Abschätzung des WW- und Stromverbrauchs.
Für normale Wohnnutzung liegen Verbräuche aus vielen umgesetzten Projekten vor.
Wie hoch ist jedoch der WW- und Strombedarf von Kitas, Studenten und Büros?
Besonders für die Studenten gingen die Meinungen zu deren Verbraucherverhalten weit auseinander – von: „Die haben ja dauernd Semesterferien“ – bis „die duschen meist zweimal am Tag“ oder „der PC läuft doch bei Studenten immer“…
Bei rund 80 Singles oder Studenten liegt die „Wahrheit“ wahrscheinlich irgendwo in der Mitte.
Mit solchen Überlegungen wurden die WW- und Stromverbräuche „ingenieursmäßig mutig geschätzt“.

Die Kita ist schon in Betrieb, sodass hierfür erste Verbrauchwerte vorliegen.
Danach stimmt die Schätzung des Kita-WW-Bedarfs sehr gut mit den tatsächlichen Verbräuchen überein. Beim Raumwärmebedarf zeichnet sich ab, dass die tatsächlichen Verbräuche höher sind als prognostiziert. Eine belastbare Aussage ist jedoch erst nach einem vollen Betriebsjahr möglich. Die Energiezentrale mit moderner Steuerungstechnik ist auf die Erfassung der Daten vorbereitet.

Möhringsberg - Schöneworth **Abschätzung Energiebedarf**

blau = Eingabewerte

beheizte Flächen:			**Anteil**	**WoE**
Wohnungen	2.828	m²	65,3%	86
KITA (5 Gruppen ~ 95 Kids)	950	m²	21,9%	*5*
Büros	362	m²	8,4%	*3*
Gewerbe	190	m²	4,4%	*1*
Gesamt	**4.330**	**m²**	100,0%	95

Personen (ca. für Abschätzung WWB+Strom)		**Anteil**
Wohnungen	98	73,1%
KITA (5 Gruppen ~ 95 Kids)	*30*	22,4%
Büros	*3*	2,2%
Gewerbe / Laden	*3*	2,2%
Personen Gesamt	**134**	100,0%

1) Raumwärmebedarf - Abschätzung

Nutzwärmebedarf spezifisch	**20**	kWh/m²*a
Verteilungsverlust Hzg	**15**	kWh/m²*a
NWB spezifisch gesamt	**35**	kWh/m²*a
beheizte Flächen Gesamt	**4.330**	**m²**
Raumwärmebedarf gesamt	**151.561**	**kWh/a**
Durchschnittsleistung (P-Schnitt)	17,3	kW
Anteil Hzg von Gesamtwärme	56%	
Anteil Kita (von Gesamt):	21,9%	
Hzg Kita	33.261	kWh/a
P-Schnitt Hzg-Kita	3,8	kW

2) WarmWasserBedarf - Abschätzung

Nutz-WWB spezifisch	**500**	kWh/Pers*a
Verteilungsverlust Zirkulation	**400**	kWh/Pers*a
NWB spezifisch gesamt	**900**	kWh/Pers*a
Personen gesamt (WWB)	**134**	Personen
WWB gesamt	**120.600**	**kWh/a**
Durchschnittsleistung (P-Schnitt)	13,8	kW
Anteil WW von Gesamtwärme	44%	
Anteil Kita (von Gesamt):	22,4%	
WWB Kita	27.000	kWh/a
P-Schnitt WW-Kita	3,1	kW

Wärmebedarf Gesamt (ab Zentrale	**272.161**	**kWh/a**
Durchschnittsleistung (P-Schnitt)	31,1	kW
Pmax / Pschnitt	**4,0**	Erfahrungswert
Pmax **ca.**	**124**	kW
Betrieb nur mit Gas-Kessel:		
Nutzungsgrad Kessel	95%	
Gasverbrauch Hu (Heizwert)	286.485	kWh/a-Hu
Gasverbrauch Ho (Brennwert)	**317.259**	kWh/a-Ho

3) Strom-Bedarf - Abschätzung

Strombedarf spezifisch	**666**	kWh/Pers*a	
Personen gesamt (Strom)	**134**	Anz.	
Strom gesamt	**89.244**	**kWh/a**	
Anteil Kita (von Gesamt):	22,4%		
Strom-Verbrauch Kita	19.980	kWh/a	Kita will keinen Strom
P-Schnitt Strom-Kita	2,3	kW	vom BHKW+PV-Anlage
Strom-Bedarf ohne Kita	**69.264**	kWh/a	
Durchschnittsleistung (P-Schnitt)	7,9	kW	

Nach der Prognose bzw. Abschätzung der Energiebedarfe wird der Gesamt-Wärmebedarf bei 272.161 kWh pro Jahr (a) liegen. Dies entspricht (geteilt durch die 8760 Stunden eines Jahres) einer fiktiven Durchschnittsleistung von 31 kW. Dies ist schon ein guter Richtwert für die Auswahl eines BHKW. Die thermische Nenn-Leistung des BHKW sollte im ähnlichen Leistungsbereich liegen (s.a. Auslegung eines BHKW im übernächsten Kapitel).

Der WW-Bedarf hat mit ca. 120.600 kWh/a (einschließlich Zirkulationsverlusten) einen Anteil von ca. 44% am Gesamt-Wärmebedarf. Dies ist eine Besonderheit von gut gedämmten Häusern. Der WW-Bedarf ließe sich nur durch (nicht durchsetzbaren) Komfort-Verzicht und etwas durch besonders gut gedämmte WW- und Zirkulationsleitungen senken. Für ein BHKW als Grundlast-Wärmeerzeuger bedeutet dies, dass es auch im Sommer nennenswert in Betrieb sein wird.

Der Strombedarf wurde zu ca. 89.244 kWh/a abgeschätzt.
Die Landeshauptstadt Hannover, als Betreiberin der Kita, wollte nicht Strom vom BHKW und der PV-Anlage beziehen. Für die folgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen musste daher auch der Strombedarf ohne Kita abgeschätzt werden (ca. 69.264 kWh/a).

Für eine ganzheitliche Betrachtung ist es sinnvoll, nicht nur die kWh, sondern auch die damit verbundenen Energiekosten in Euro zu betrachten:
Dazu wird zunächst angenommen, dass die Energieversorgung „standardmäßig“ mit „Wärme aus einem Gaskessel“ und „Strom aus dem Netz“ erfolgt.
Damit ergeben sich Energiekosten für das Erdgas mit ca. 6,2 ct/kWh (netto ohne Mehrwertsteuer und bezogen auf den abgerechneten Brennwert Ho, neu Hs) von ca. 19.670 Euro/a. Strom für Endkunden kostet einschließlich Grundgebühr ca. 26,6 ct/kWh (netto). Daraus errechnen sich Stromkosten von ca. 23.739 Euro/a für den Gesamtstrombedarf.

Die Kosten für den Strombedarf sind also höher als für den Wärmebedarf.
Es lohnt sich daher in mehrfacher Hinsicht über den Strom genauso gut nachzudenken, wie über die Wärme.

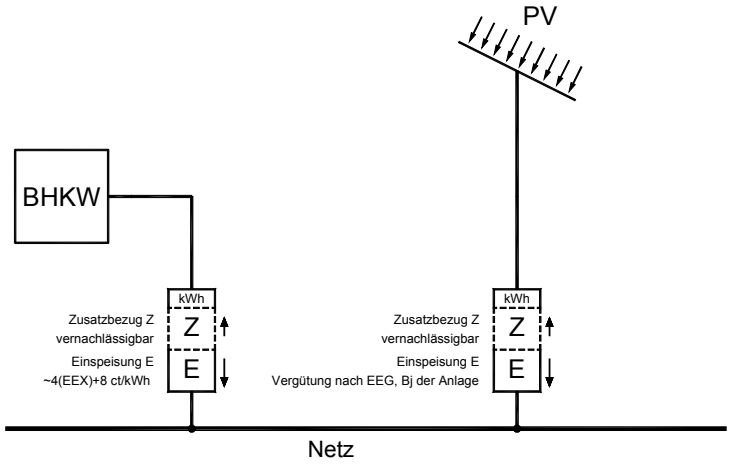
Passivhaus mit BHKW und Photovoltaik – viel mehr kann man nach heutigen Maßstäben kaum tun um Energieverbrauch und Umweltbelastung so gering wie möglich zu halten.

Was sich auf den ersten Blick gut anhört, ist in der praktischen Umsetzung jedoch alles andere als einfach – wenn sich das Ganze auch noch wirtschaftlich rechnen soll.

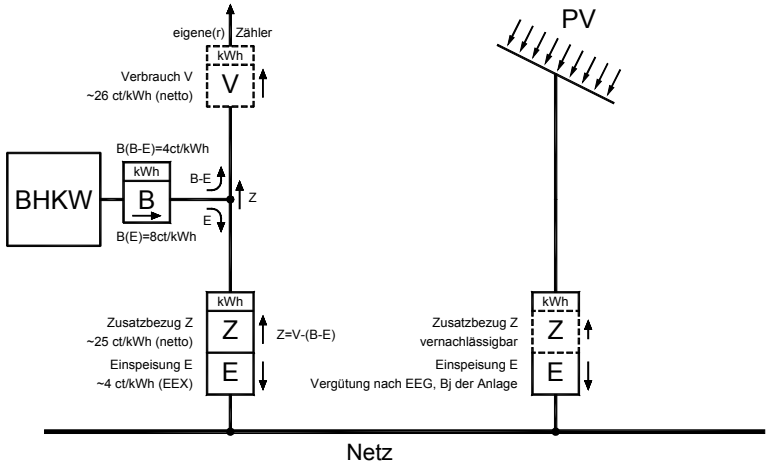
Nach der heutigen Gesetzeslage (EEG und KWK-G) lassen sich BHKW und PV-Anlagen nur wirtschaftlich betreiben, wenn der erzeugte Strom zu einem möglichst großen Teil im Objekt verbraucht werden kann. Wie für das BHKW noch im Detail gezeigt wird, ist dann jedoch ein lukrativer Betrieb mit einer effektiven Verzinsung von über 15 % möglich.
(Umweltschutz mit Eigennutz)

Die Zählerschaltungen (insbesondere „Zweifacher-Selbstverbrauch“) auf der nächsten Seite sollen schon einmal darauf einstimmen, dass die so genannte „Strom-Gegenrechnung“ (mit „zweifachen Selbstverbrauch“) eine komplizierte Angelegenheit ist.

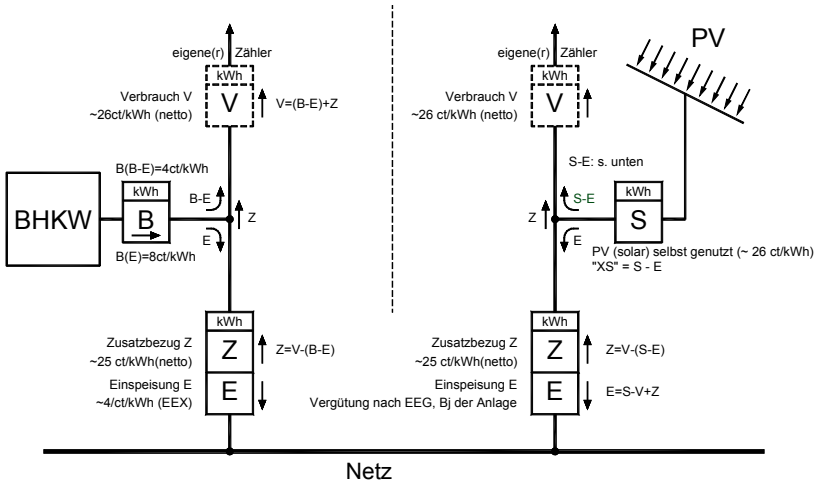
Voll-Einspeisung



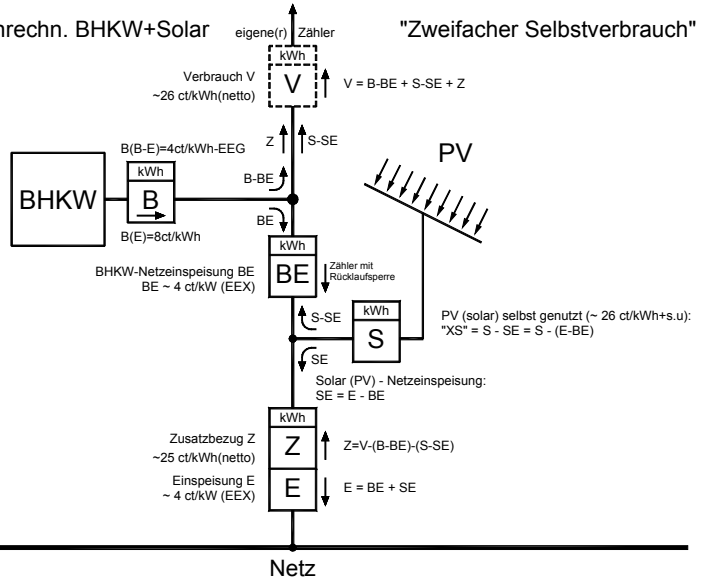
BHKW: Stromgegenrechnung - Solar: Volleinspeisung



Strom-Gegenrechnung (in verschiedenen Objekten)



Strom-Gegenrechn. BHKW+Solar "Zweifacher Selbstverbrauch"



Ingenieurbüro energiekontor Hannover
Zur Bettfedernfabrik 1
30451 Hannover
Tel.: 0511-7010236

Blockheizkraftwerk (BHKW) + Photovoltaikanlage (Solar)
Anordnung der Stromzähler + Strompreise / Vergütung

Datum: 10.11.2016

Zähler-BHKW+PV

Ingenieurbüro energiekontor Hannover
Zur Bettfedernfabrik 1
30451 Hannover
Tel.: 0511-7010236

Blockheizkraftwerk (BHKW) + Photovoltaikanlage (Solar)
Anordnung der Stromzähler + Strompreise / Vergütung

Datum: 10.11.2016

Zähler-BHKW+PV

BHKW-Auswahl - Fabrikat

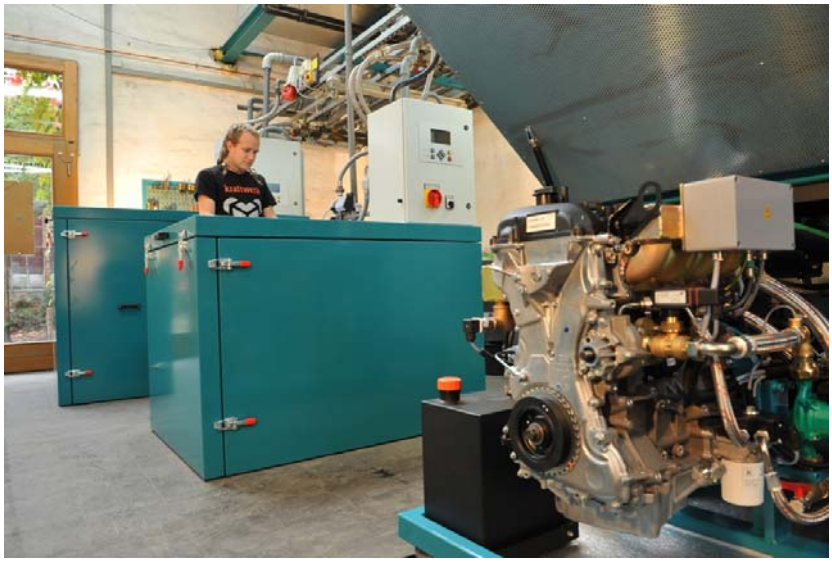
BHKW sind in einigen Aspekten mit Autos vergleichbar. Es reicht nicht, „wenn man eines hat“ – es sollte auch „laufen“. In ihrer Lebenszeit kommen PKW auf ca. 2.000 Betriebsstunden. Bei BHKW sind das etwa 80.000 Betriebsstunden. Ein weiterer wichtiger Unterschied ist, dass BHKW nicht zur Wartung in die Werkstatt kommen. Die Kosten für die BHKW-Wartung während ihrer technisch / wirtschaftlichen Lebendauer liegen in der gleichen Größenordnung wie der Anschaffungspreis.

Bei BHKW ist es daher dringend empfehlenswert, schon bei Kauf des BHKW einen so genannten Vollwartungsvertrag abzuschließen – und genau auf die Bedingungen zu achten.

Für das Projekt Möhringsberg war zunächst angedacht, zwei kleine Senertec-BHKW („Dachs“) mit jeweils 5,5 kW elektrischer und ca. 13 kW thermischer Leistung einzusetzen. Nach detaillierten Vergleichen mit Preisen, Wartungskosten und Wirkungsgraden wurde entschieden, ein leistungsregelbares BHKW der Fa. Kraftwerk mit 16 kW elektrischer und ca. 36 kW thermischer Nennleistung einzusetzen. Ein wichtiges Kriterium war dabei, dass das „Kraftwerk-BHKW“ selbst bei kleiner Leistung von ca. 10 kWel noch bessere Wirkungsgrade hat als die Senertec-BHKW. Die Wirtschaftlichkeitsvergleiche haben lax gesagt ergeben, dass man mit dem größeren BHKW „einfach mehr fürs gleiche Geld bekommt“.

Sehr wichtig für die Entscheidung war außerdem, dass Fa. Kraftwerk Vollwartungsverträge mit einer Verfügbarkeits-Garantie von 95% anbietet. Wenn diese Garantie nicht erfüllt wird, zahlt Fa. Kraftwerk eine Entschädigung.

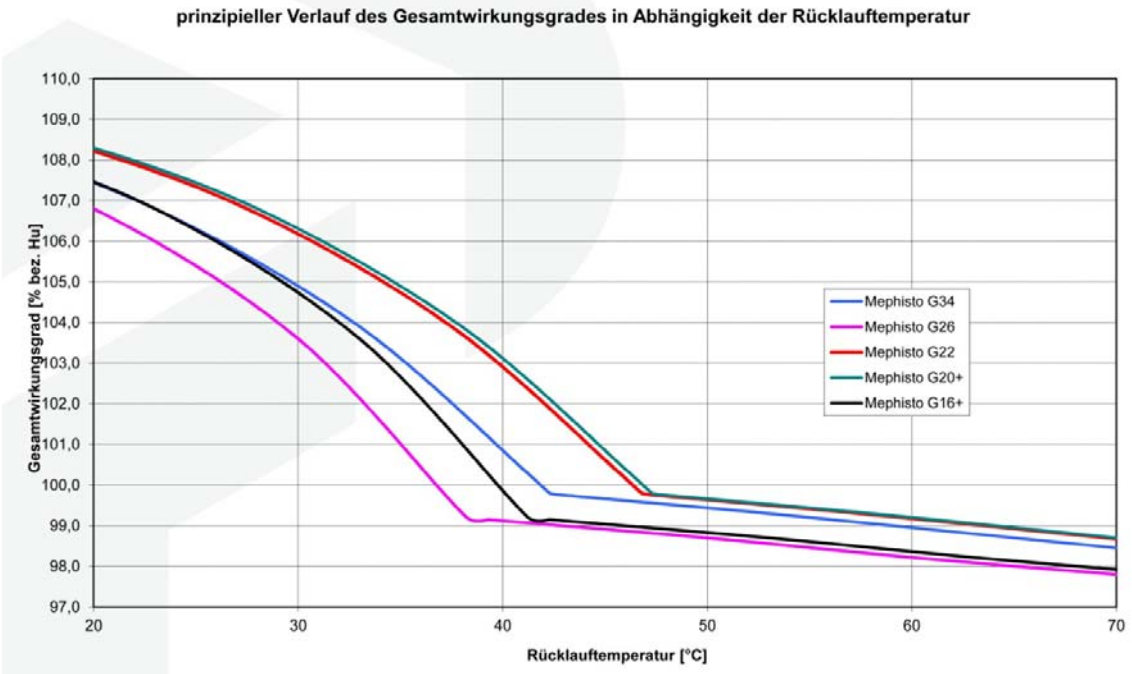
Bei den Kraftwerk-BHKW ist ein Internet-Anschluss obligatorisch. Hierüber werden Störungen und Zustandsmeldungen an Fa. Kraftwerk bzw. die Software-Organisation „webgate“ geschickt. Fa. Kraftwerk kann sich „in die Anlagen einwählen“ und so in der Regel erkennen, wo genau ein eventuelles Problem liegt. Der Betreiber muss so im Wesentlichen nur dafür sorgen, dass Fa. Kraftwerk jederzeit Zugang zum BHKW hat und dass möglichst ein Handwaschbecken für das Wartungspersonal vorhanden ist.



BHKW-Teststände bei Fa. Kraftwerk

Zur Überwachung, Steuerung und Regelung der BHKW-Module verfügen Kraftwerk-BHKW über eine leistungsfähige Rechnerplatine. Damit sind u.a. Bus-Kommunikationen mit anderen Systemen möglich. Für die Energiezentrale Möhringsberg hat dies den großen Vorteil, dass das BHKW vollständig mit der übergeordneten Steuerung kommunizieren kann. Die übergeordnete Steuerung kann dem Kraftwerk-BHKW hier über „CAN-Bus“ z.B. die elektrische Leistung und die Vorlauf-Solltemperatur vorgeben. Zurückgegeben werden vom BHKW alle wichtigen Zustandsgrößen und Daten, wie z.B. die BHKW-Ist-Leistung.

Die Kraftwerk-BHKW sind standardmäßig brennwertfähig. Das heißt, die BHKW verfügen über einen Abgas-Wärmetauscher, der die Abgase bis auf wenige Grad über die heizungsseitige BHKW-Rücklauf-Temperatur abkühlt. Bei entsprechend niedrigen Rücklauftemperaturen beginnt der im Abgas enthaltene Wasserdampf zu kondensieren. Dann sind, bezogen auf den (unteren) Heizwert des Erdgases (Hu neu: Hi) Gesamt-Wirkungsgrade über 100% möglich.



BHKW-Gesamtwirkungsgrade in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur

Das obige Diagramm zeigt, dass die Brennwertnutzung erst bei Heizungs-Rücklauf-Temperaturen unter ca. 47°C beginnt. Der Zusammenhang ist bei Brennwert-Gaskesseln sehr ähnlich. Um hohe thermische Wirkungsgrade und möglichst Brennwertnutzung zu erzielen, ist es also notwendig die Heizungsanlage so auszulegen und zu betreiben, dass die Rücklauftemperaturen möglichst niedrig sind. Dies wird im Kapitel „Hydraulik“ ausführlich beschrieben.

Die Kurven im obigen Diagramm zeigen, dass die G20 und G22 die besten Modelle bezüglich der Gesamtwirkungsgrade sind. Das gewählte G16+ (Nennleistung 16kWel) ist demgegenüber mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. **99%** bei 48°C Rücklauftemperatur vergleichsweise „schlecht“.
Der Grund liegt darin, dass das „G16“ zur Schadstoffreduktion mit Luftüberschuss betrieben wird, während die Modelle G20 und G22 mit Lamda1 und 3-Wege-Katalysatoren arbeiten. Der Luftüberschuss im Abgas bewirkt, dass das Abgas erst bei niedrigeren Rücklauf-Temperaturen kondensiert.

Das BHKW–Modell G16 hat jedoch einen etwas höheren elektrischen Wirkungsgrad. Details sind ohne Zugangsbeschränkung über die Homepage der Fa. Kraftwerk abrufbar.

Die BHKW-Modelle G20 und G16 sind im Wesentlichen baugleich. Möglich ist, das G16 nachträglich zum G20 umzubauen - etwa zum Preisunterschied zwischen den Modellen. Wenn sich also im Betrieb herausstellen sollte, dass doch eine höhere BHKW-Leistung sinnvoll ist, lässt sich dies relativ einfach umsetzen.

Durch den Verbrennungsmotor erzeugen BHKW Geräusche und Schwingungen. Dies kann zu Problemen führen, wenn das BHKW z.B. im Keller direkt unter einer Wohnung installiert werden soll. Bezüglich der Vermeidung von Geräuschbelästigungen hat sich Fa. Kraftwerk viele Gedanken gemacht und Lösungen entwickelt, wie z.B. große externe Abgas- und Ansaug- Schalldämpfer, Druckausdehnungsgefäße in den Heizungs-Anschlussleitungen oder Leitungsaufhängungen über Federelemente. In sensiblen Bereichen sollte grundsätzlich ein BHKW-Fundament installiert werden, dass über spezielle Kunststoffstreifen vom Fußboden entkoppelt wird. Eine solche BHKW-Aufstellung mit Fundament zeigt das nachfolgende Foto – mit einem Überblick zur Gesamtinstallation.

Energiezentrale Ostlandstraße

In der Energiezentrale Möhringsberg wurden vorsorglich ein BHKW-Fundament und die externen Ansaugluft- und Abgas-Schalldämpfer installiert. (s.a. Fotos im Kapitel „Hydraulik“). Weitere Schallschutzmaßnahmen wurden nicht ergriffen.

Das BHKW ist erstaunlich leise und außerhalb der Energiezentrale kaum wahrnehmbar. Beschwerden über Geräuschbelästigungen gab es bisher nicht.

Spitzenkessel

Anlagen mit BHKW werden in aller Regel und sinnvollerweise als Grundlastwärmeerzeuger ausgelegt. Bei hohem Wärmeverbrauch, vornehmlich an kalten Wintertagen, ist daher ein so genannter Spitzenlastkessel notwendig. Die Spitzenlastkessel sind bei üblicher Auslegung nur etwa 600 Volllaststunden in Betrieb, gegenüber den etwa 6.000 Vollaststunden des BHKW also sehr wenig. Die Spitzenkessel erzeugen etwa 25% des Gesamt-Wärmebedarfs. Früher wurden daher oft sogenannte Niedertemperatur-Kessel (ohne Brennwertnutzung) eingesetzt. Brennwertkessel sind heute jedoch „Stand der Technik“ und sind vergleichsweise preiswert. Die Auswahl an Fabrikaten und Typen ist groß.

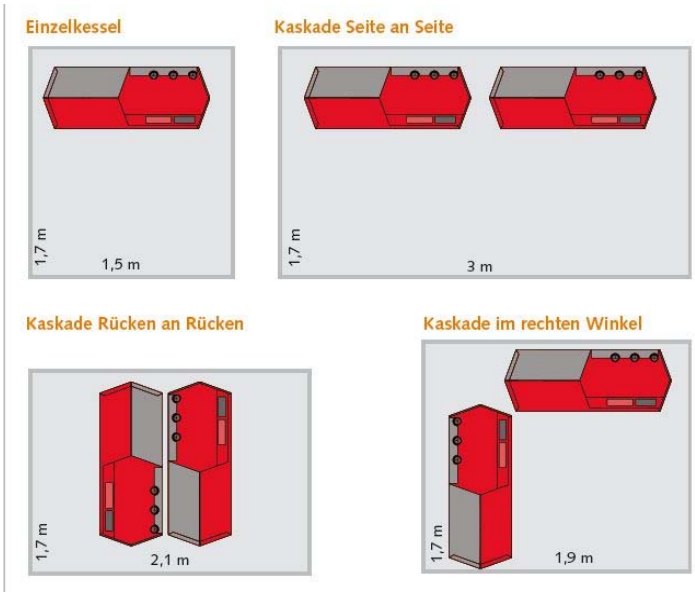
Für die Energiezentrale Möhringsberg wurde ein „Remeha eco pro 210 – 120 kW“ mit integriertem Vormischbrenner und Aluminium-Druckguss-Wärmetauscher gewählt.

Remeha „eco-pro 210“

eco-pro 210 „Innenleben“

Gegenüber Stahl- oder Grauguss-Kesseln mit externem Brenner sind diese Kessel klein, leicht und leise und erzielen trotzdem sehr gute Wirkungsgrade.
Ein weiterer Vorteil der „eco pro 210“ – Baureihe ist, dass alle Anschlüsse oben liegen. Dadurch können die Kessel platzsparend direkt an einer Wand oder bei zwei Kesseln auch „Rücken an Rücken“ aufgestellt werden (s.a. Aufstellungsbeispiele auf der nächsten Seite).

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Remeha-Kessel ist, dass sie gut von einer übergeordneten Steuerung geregelt und überwacht werden können. Die Soll-Leistung lässt sich einfach über ein 0-10V Signal vorgeben, dem der Kessel recht präzise folgt. Außerdem wird ein 0-10V Signal der Ist-Leistung zurückgegeben. Hiermit kann die übergeordnete Steuerung kontrollieren, ob der Kessel auch „tut was er soll“. Die Leistungsrückmeldung entspricht in guter Näherung der tatsächlichen Kessel-Wärmeleistung, sodass die übergeordnete Steuerung – auch ohne Kessel-Wärmezähler – aufzeichnen kann, wie viel Wärme der Spitzen-Kessel erzeugt hat. Für eine genaue Kontrolle des Kessel-Wirkungsgrades ist jedoch ein Gas- und Wärmezähler notwendig.



Aufstellungsbeispiele des „eco-pro 210"

Diese modernen Brennwertkessel haben jedoch einen Nachteil. Sie benötigen einen Mindest-Volumenstrom. Genauer: Die Temperaturdifferenz von Kessel – Vor- und Rücklauf-Temperatur (Fachjargon: „*Spreizung*“) darf nicht höher als 30 Grad (Kelvin) werden.
Wenn die „Spreizung“ größer wird, regeln die Kessel selbsttätig ihre Leistung herunter oder schalten sich (vorübergehend) ganz ab.
Diese Kessel benötigen daher bei üblichen Hydraulikschaltungen eine Kesselpumpe, die möglichst so geregelt werden sollte, dass die zulässige Spreizung nicht überschritten wird.

Bei guten Hydraulik-Systemen sind Rücklauftemperaturen von ca. 40 °C möglich. Für die WW-Bereitung sind jedoch Vorlauftemperaturen von ca. 70 °C notwendig, um die vorgeschriebene WW-Temperatur von 60°C nicht zu unterschreiten. Der Kessel muss daher eine Spreizung von ca. 30 Grad „machen“ – darf aber andererseits die Spreizung von 30 Grad (Kelvin) nicht überschreiten.
Moderne Brennwertkessel sind in weitem Bereich leistungsregelbar – meist zwischen 30% und 100% der Nennleistung. Die Regelung der Kessel-Pumpe muss oder sollte auch bei jeder Kesselleistung die Kessel-Spreizung auf knapp unter 30 Grad regeln. Das ist regelungstechnisch eine schwierige Aufgabe (s.a. nächstes Kapitel „Pumpen“).

Weil dies in der Praxis in den seltensten Fällen gelingt, werden die Hydraulikschaltungen so gewählt oder die Anlagen so betrieben, dass die Rücklauftemperatur des Kessels soweit „angehoben“ wird, bis die gewünschte Vorlauftemperatur (von z.B. 70°C) erreicht wird.
Dies wiederum führt zu schlechteren Kessel-Wirkungsgraden. Eine Brennwertnutzung findet in der Regel nicht statt.
Alle aufwendigen Bemühungen zur Erreichung niedriger Rücklauf-Temperaturen (z.B. „Hydraulischer Abgleich“) werden so zunichte gemacht.

Die Hersteller von modernen Brennwertkesseln sind also gefordert, sinnvolle Lösungen zu entwickeln und anzubieten.

Das BHKW ermöglicht Spreizungen von ca. 40 Grad (Kelvin). In der Praxis führt das dazu, dass BHKW höhere Gesamt-Wirkungsgrade als Brennwertkessel erreichen.

Pumpen (Hocheffizienzpumpen)

Bei Heizungs-Pumpen ist das so ähnlich wie bei Glühbirnen. Es ist inzwischen verboten sogenannte „Standardpumpen“ einzusetzen.
Bis auf wenige Ausnahmen ist der Einsatz von „Hocheffizienzpumpen" vorgeschrieben, die deutlich weniger elektrische Energie verbrauchen, als die Standardpumpen.

Die Stromeinsparung wird durch den Einsatz von „permanent erregten Synchronmaschinen“ erreicht. Dafür sind Frequenzumrichter und ziemlich viel Elektronik notwendig.

Grundfos „Magna3“

Wilo „Stratos“

Grundfos Standardpumpe

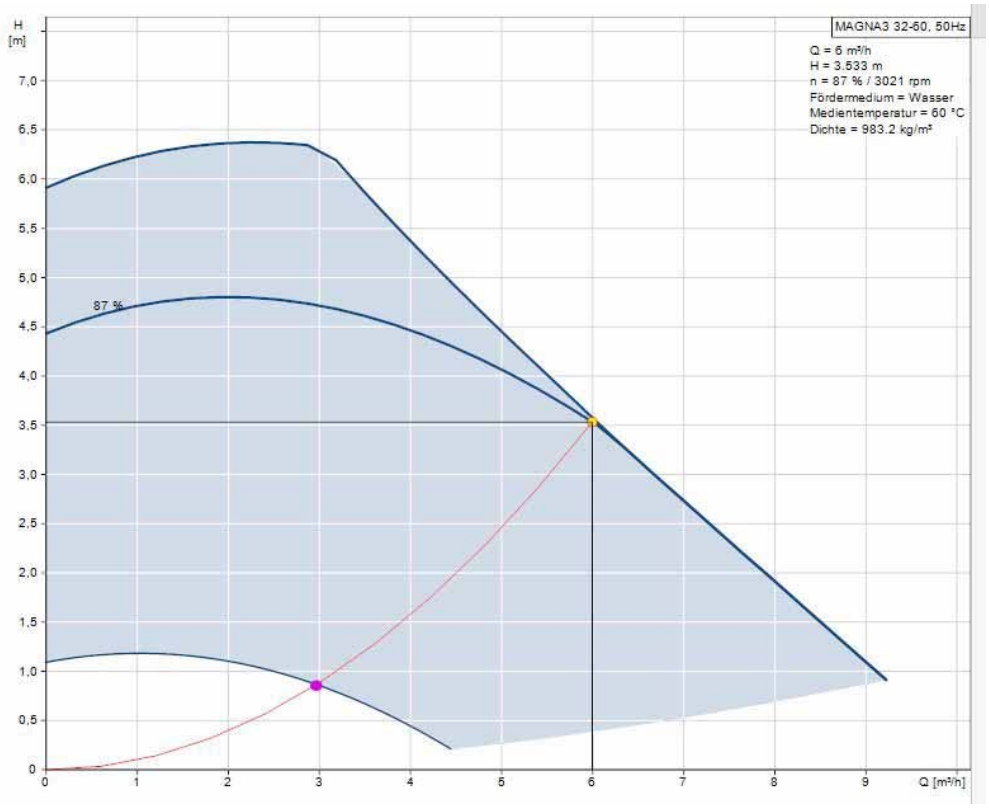
In den modernen Hocheffizienzpumpen gibt es kleine „Computer“. Bei der Magna3 sogar mit Farb-LCD-Display und umfangreicher Menüführung im Klartext.
Der Hintergrund für diesen Aufwand liegt darin begründet, dass sich ungeregelte Pumpen für die meisten Aufgaben im Heizungsbereich anders verhalten als es sinnvoll wäre. Ungeregelte Pumpen erzeugen bei kleinen Volumenströmen „viel Druck“. Bei großen Volumenströmen wird der Pumpen-Differenzdruck dagegen kleiner. Insbesondere bei den Pumpen für Heizkreise sollte der Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druck (Pumpenkennlinie) genau andersherum sein. Die richtigen „Kennlinien“ werden durch entsprechende Regelung der Motoren über die Frequenzumrichter erreicht.

An den Pumpen können in der Regel drei verschiedene Kennlinien-Typen gewählt werden:
Proportional-Druck, Konstant-Druck und Konstant-Kennlinie. Proportional-Druck bedeutet, dass der Pumpendruck bei steigendem Volumenstrom steigt. Um diese Kennlinien zu realisieren, errechnen die Pumpen intern den Volumenstrom und regeln danach den Pumpendruck – der bei den Magna3-Pumpen sogar gemessen wird.
Fa. Grundfos hat sogar damit Werbung gemacht, dass der errechnete Volumenstrom so genau wäre, dass man damit Wärmezähler realisieren könnte. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass der errechnete Volumenstrom für genaue Verbrauchs-Messungen nicht hinreichend verlässlich ist.
Dennoch sind die Informationen aus den Pumpen-Computern hilfreich zur Betriebs-Beurteilung. Die größeren Hocheffizienzpumpen verfügen über verschiedene Bus-Systeme, so dass eine Kommunikation mit übergeordneten Steuerungen möglich ist.
In der Energiezentrale Möhringsberg wurde dies realisiert. Die übergeordnete Steuerung kommuniziert dort über den „Grundfos-GeniBus“ mit den Magna3-Pumpen. So können nicht nur die Informationen aus den Pumpen ausgelesen, sondern von der Steuerung auch die Kennlinien und Sollwerte vorgegeben werden. Hier sogar per Fernbedienung.

Wie grob beschrieben wurde, funktionieren die modernen Pumpen für Heizkreise sehr gut. Anders ist es jedoch leider bei dem Einsatz dieser Pumpen für den Kesselkreis und die WW-Frischwasser-Bereitungen.

Wie im Kapitel „Spitzenkessel“ beschrieben wurde, muss beim Kessel der Volumenstrom sehr genau und schnell geregelt werden, um die Spreizung bei jeder Kesselleitung auf knapp unter 30 Grad zu regeln. Eine Proportional-Druck-Regelung ist dafür ungeeignet. Für Volumenstromregelungen wird die „Konstant-Kennlinie“ genutzt, bei der die Pumpendrehzahl dem externen Sollwert folgt. Dies kann über den „GeniBus“ oder über ein 0-10V Sollwert-Signal erfolgen. So weit – so gut.

Die Magna oder Stratos-Pumpen lassen sich jedoch nur auf eine Mindest-Drehzahl herunter regeln. Durch den quadratischen Zusammenhang von Druck und Volumenstrom kann der Volumenstrom nur auf etwa 50% des Nennvolumenstroms herunter geregelt werden. Das nachfolgende Diagramm zeigt diesen Zusammenhang (max. 6m³/h – min. 3 m³/h).



Kennfeld einer Hocheffizienzpumpe Magna3 32-60 (Druck über Volumenstrom)

Moderne Kessel könnten jedoch mit nur ca. 30% Nennleistung betrieben werden. Um die erforderliche Spreizung zu erreichen müsste dafür auch der Volumenstrom auf 30% gesenkt werden. Das geht mit diesen Pumpen leider nicht.
Dies ist aus mehreren Gründen sehr ärgerlich und führt letztlich zu schlechteren Kessel-Nutzungsgraden durch Rücklaufanhebung oder vielen Kessel-Start-Stopp-Vorgängen.

Mit den Standard-Pumpen ist bzw. war eine Volumenstrom-Regelung bis auf ca. 15% des Nennvolumenstromes über Puls-Weiten-Modulation (PWM) gut und preiswert möglich.

Wärme- und Volumenstromzähler

Im Projekt Möhringsberg werden die Wohnungen „warm und hell“ vermietet. Das heißt, Wärme- und Strom-Verbrauch sind in der Miete enthalten. Daher gibt es keine Strom-Unterzähler und auch Wärmezähler zur Abrechnung wären bei diesem Konzept nicht notwendig.

Die Stadt Hannover wollte als Betreiber der Kitas jedoch Wärmezähler für die Raumheizung und den WW-Verbrauch. Um den WW-Verbrauch für die fünf Kita-Gruppen zentral (ohne mehrere Unterzähler an den Verbrauchsstellen) erfassen und abrechnen zu können, musste eine zweite WW-Bereitung geplant und installiert werden. Zur Abrechnung sind geeichte Wärmezähler im Heizkreis und der WW-Bereitung „Kita“ vorhanden. Zur Kontrolle und für die Erstellung einer Gesamtbilanz wurden auch geeichte Wärmezähler im Heizkreis und der WW-Bereitung „Wohnungen“ installiert.
Wärmezähler können in der Regel (ähnlich wie bei den Pumpen) über Bus-Systeme ausgelesen werden. Üblich ist bei Zählern der „M-Bus“ (Mess-Bus). Damit können die Wärmezähler an die übergeordnete Steuerung angeschlossen, ausgelesen, die Werte gespeichert, dargestellt und sogar per Fernbedienung abgerufen werden.

Ultaschall-Wärmezähler

Ultraschall Volumen-Impulsgeber

Flügelrad-Volumen-Impulsgeber

Die übergeordnete Steuerung kann mit den ohnehin notwendigen Temperaturfühlern und preiswerteren Volumenstromzählern (mit Impulsausgang) Wärmemengen errechnen. Dies wurde hier u.a. genutzt um die Zirkulationsverluste der WW-Bereitungen zu messen.

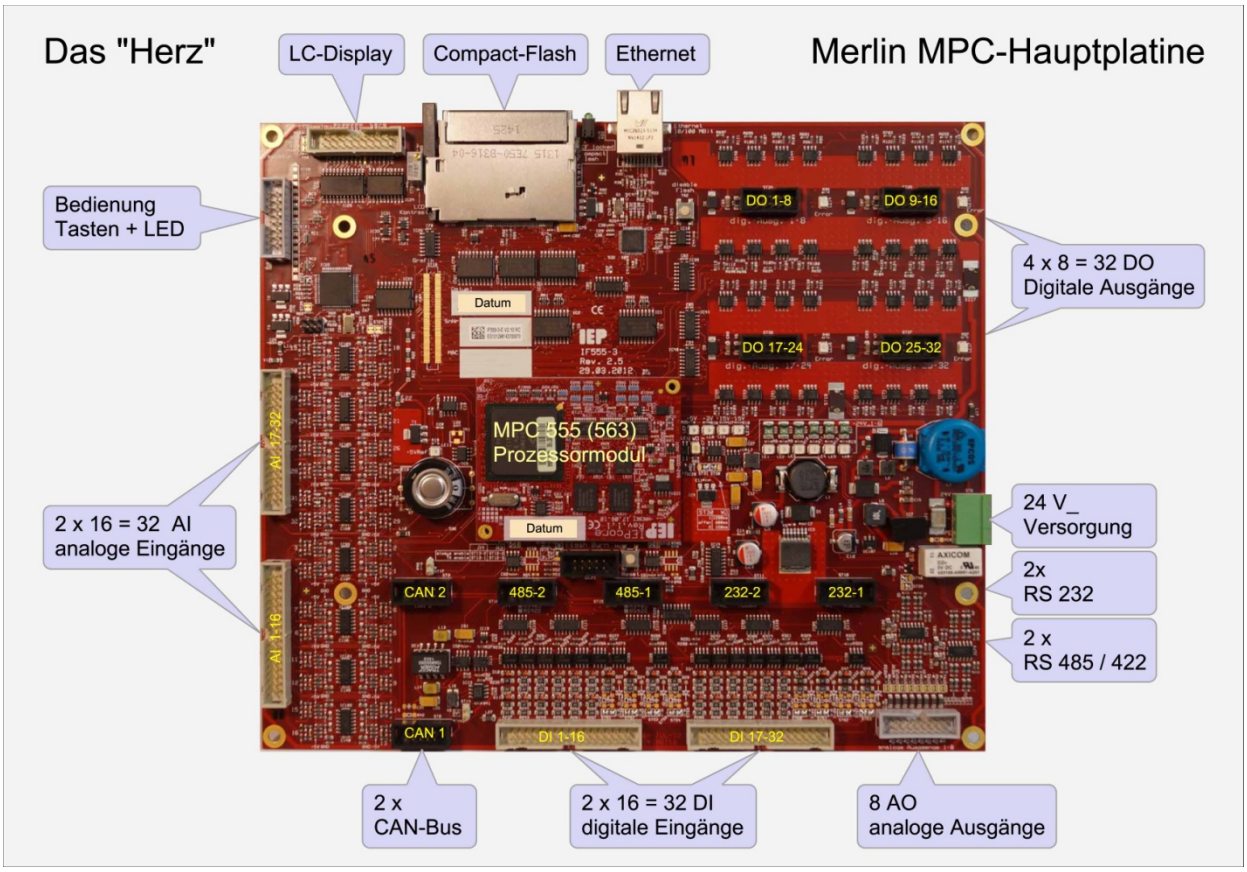
Wenn es um Genauigkeit geht, sind die Wärmezähler der Frischwasserbereitungen ein Problem, weil sich hier die Volumenströme und Temperaturen schnell ändern können.
Meist werden die Rechenwerke der Wärmezähler über Batterien versorgt. Um eine lange Lebendauer der Batterien zu erreichen, werden die Verbräuche nicht kontinuierlich, sondern in zeitlichen Abständen gemessen.
Daher ist es sehr empfehlenswert die Zähler über 230V Netzspannung zu versorgen. Dann wird die „Abtastrate“ meist automatisch erheblich erhöht, wodurch die Messung besonders bei Frischwasser-Bereitungen deutlich verbessert wird.
Außerdem können die Zähler viel schneller über den M-Bus ausgelesen und z.B. in der Visualisierung (s. nächstes Kapitel „Übergeordnete Steuerung“) „zeitnah“ angezeigt werden.

Bei den Abtastraten und Auslese-Zyklen gibt es bei den Fabrikaten erhebliche Unterschiede. Die besten Erfahrungen gibt es diesbezüglich mit Zählern der Fa. Diehl / Hydrometer.

Übergeordnetes Steuer- Regel- und Überwachung-System

Die übergeordnete Steuerung ist gewissermaßen das „Gehirn“ der Anlage. Alle Informationen sollten dort zusammenlaufen – und sie sollte so programmiert sein, dass sie daraus sinnvolle Entscheidungen trifft bzw. Befehle an die einzelnen Anlagenteile (BHKW, Kessel, Mischer, Pumpen) gibt. Außerdem sollte die übergeordnete Steuerung ein „Gedächtnis“ haben. Die aktuellen und gespeicherten Daten sollten in übersichtlicher Weise für die Benutzer dargestellt werden können.

In der Energiezentrale Möhringsberg wurde als übergeordnete Steuerung ein „Merlin 555 MPC-System“ eingesetzt. Das „Herz“ des Merlin-Steuerungssystems ist die MPC-Hauptplatine, mit einer Vielzahl von digitalen und analogen Ein- und Ausgängen sowie Bus-Systemen. (siehe Übersicht unten).



Mit „CAN-Erweiterungskarten“ kann das Merlin-System auf nahezu beliebig viele Ein- und Ausgänge erweitert werden. Über den CAN-Bus können mehrere Steuerungen miteinander verbunden werden. Für kleinere Steuerungs- und Regelungsaufgaben gibt es die Merlin „Piccolo“. Bus-Verbindungen sind auch drahtlos über Funk auf WLAN-Basis möglich. Weiterhin sind Verbindungen zu anderen Steuerungssystemen (z.B. BHKW) möglich, die über entsprechende Bus-Anschlüsse und Software verfügen.

Wie schon beschrieben, sind in der Energiezentrale Möhringsberg Bus-Verbindungen zum BHKW (CAN-Bus), den Grundfos Magna3-Pumpen (GeniBus) und den Wärmezählern (M-Bus) realisiert. Bei Bedarf kann die Ethernet-Schnittstelle der Hauptplatine aktiviert werden.

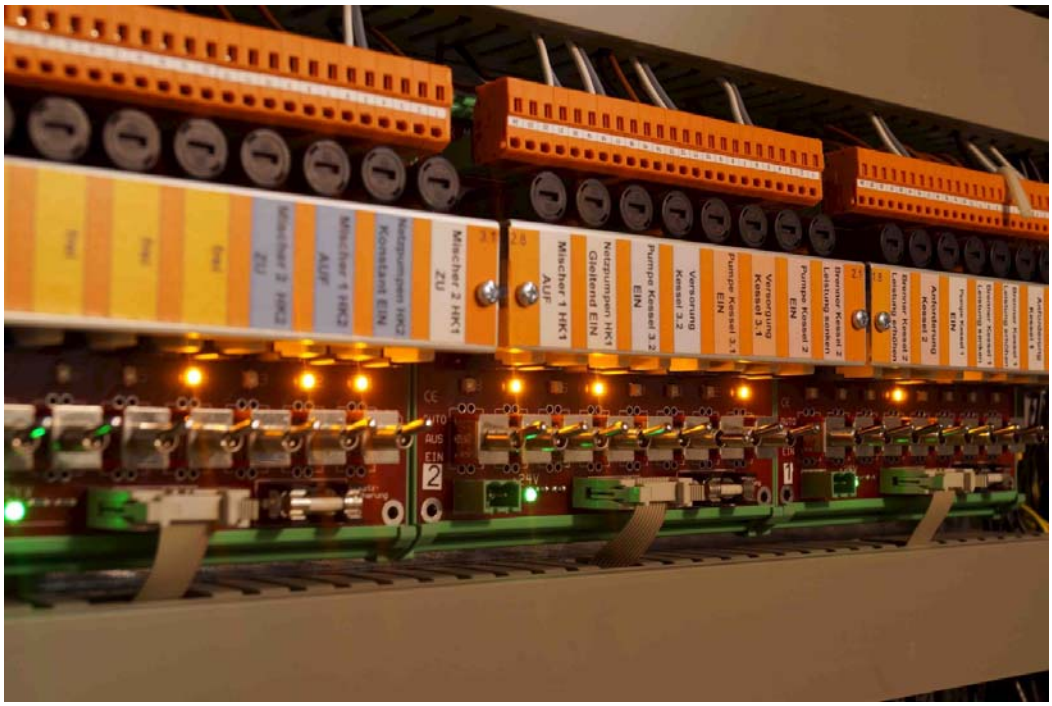
Die Hauptplatine wird im Normalfall in einen Schaltschrank eingebaut. Die Bedienung des Systems erfolgt über eine LCD-Anzeige und Tasten oder über einen Touchscreen-Panel-PC. Ein Panel-PC ermöglicht die Anzeige einer Anlagen-Visualisierung und Datenauswertung vor Ort (siehe nachfolgendes Foto eines Schaltschrankes mit Panel-PC).

Schaltschrank mit Panel-PC (wie in der Anlage Möhringsberg installiert)

Schaltschrank Innenansicht (Beispiel) – links die Hauptplatine und „Slim-PC

Die Schaltschränke werden nach den Anforderungen der jeweiligen Anlagen individuell aufgebaut (und programmiert).

Die digitalen Ausgänge der Hauptplatine werden über Flachbandleitungen auf Relaiskarten und von dort auf Anschlussklemmen geführt, so dass 230 V - Geräte, wie z.B. Pumpen oder Mischer, direkt angeschlossen werden können. Für Geräte mit größeren Leistungen werden Schütze und Sicherungsautomaten eingesetzt.



Relaiskarten mit Handschaltern, LED und Sicherungen

Für die anderen Ein- und Ausgänge gibt es Übergabe-Module, an die z.B. Temperaturfühler oder Steuersignale angeschlossen werden können. Digitale 230 V-Eingangs-Signale werden zuvor über Trennrelais geführt.

Fernbedienung und Störungsmeldungen:

Fast alle Merlin-Systeme haben die Möglichkeit der Fernbedienung bzw. Fernüberwachung. Mit der Fernbedienung ist eine Bedienung des Systems „wie vor Ort“ möglich. Früher wurde dies mit analogen Modems über das Telefonnetz realisiert. Seit 2015 wird die Fernbedienung standardmäßig über das Internet mit VPN-Routern organisiert.

Zur Fernbedienung gibt es drei Möglichkeiten: Einmal das Terminal-Programm „mterm“, das auf den jeweiligen PC installiert werden muss. Neu entwickelt wurde das Software-System, „webterm“, mit dem die Fernbedienung direkt über den Browser der PC möglich ist. Bei Systemen mit Panel-PC ist die Fernbedienung mit dem Windows-Programm „Teamviewer“ möglich – mit dem man sich direkt mit dem Panel-PC im Schaltschrank verbinden und diesen wie vor Ort bedienen kann.

Für alle Möglichkeiten ist ein Internet-Anschluss in der Energiezentrale notwendig.

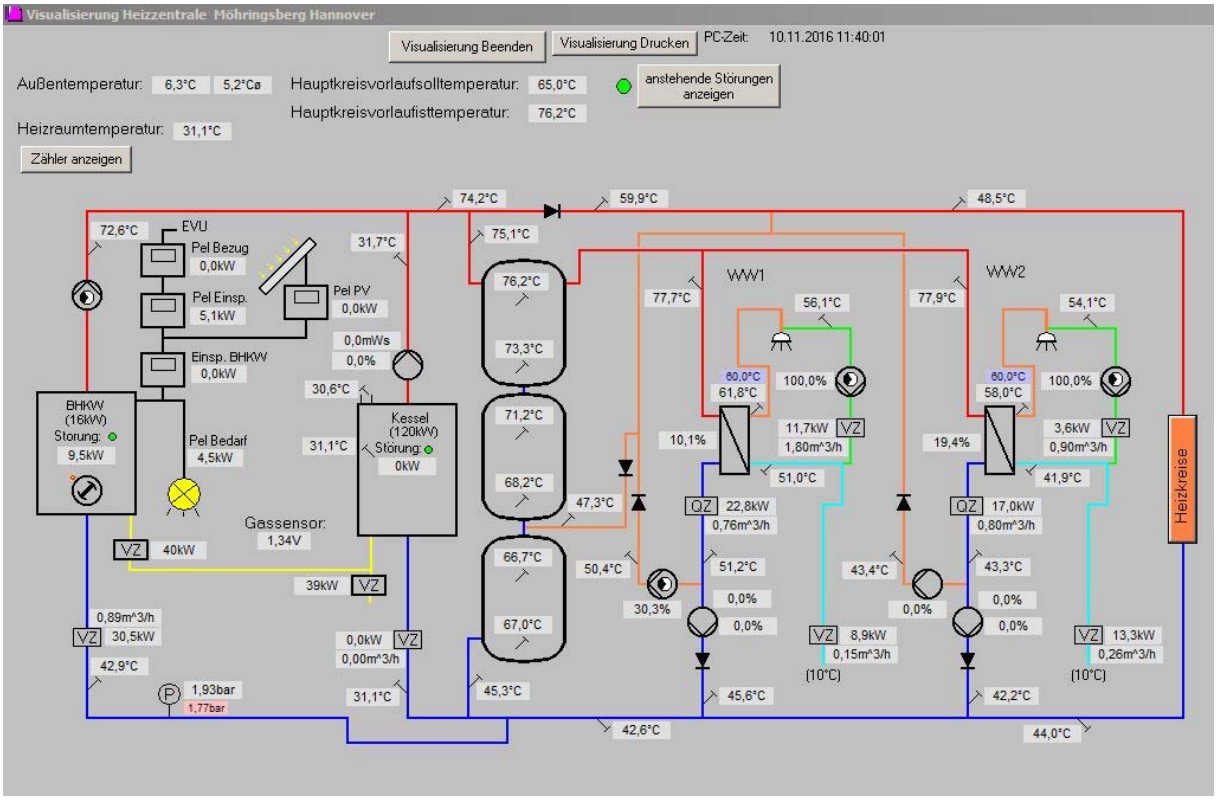
Das Merlin-System kann Störungsmeldungen als SMS oder als Email verschicken. Dabei kann ausgewählt werden, „wer welche“ Störungsmeldungen bekommen soll.

Software / Programmierung:

Die Merlin-Systeme werden zum großen Teil zur Steuerung und Regelung von Energiezentralen, meist mit Blockheizkraftwerken, eingesetzt. Dafür gibt es bewährte Software für viele Standardfunktionen, wie z.B. die witterungsgeführte Regelung von Heizkreisen. Es können jedoch auch alle Funktionen, die „logisch eindeutig formulierbar“ sind, programmiert werden.

Visualisierung:

Sehr hilfreich für die Kontrolle und Beurteilung der Funktionen einer Anlage ist die Visualisierung (mit Panel-PC vor Ort – oder per Fernbedienung).



Visualisierung der Anlage Möhringsberg (ohne Heizkreise)

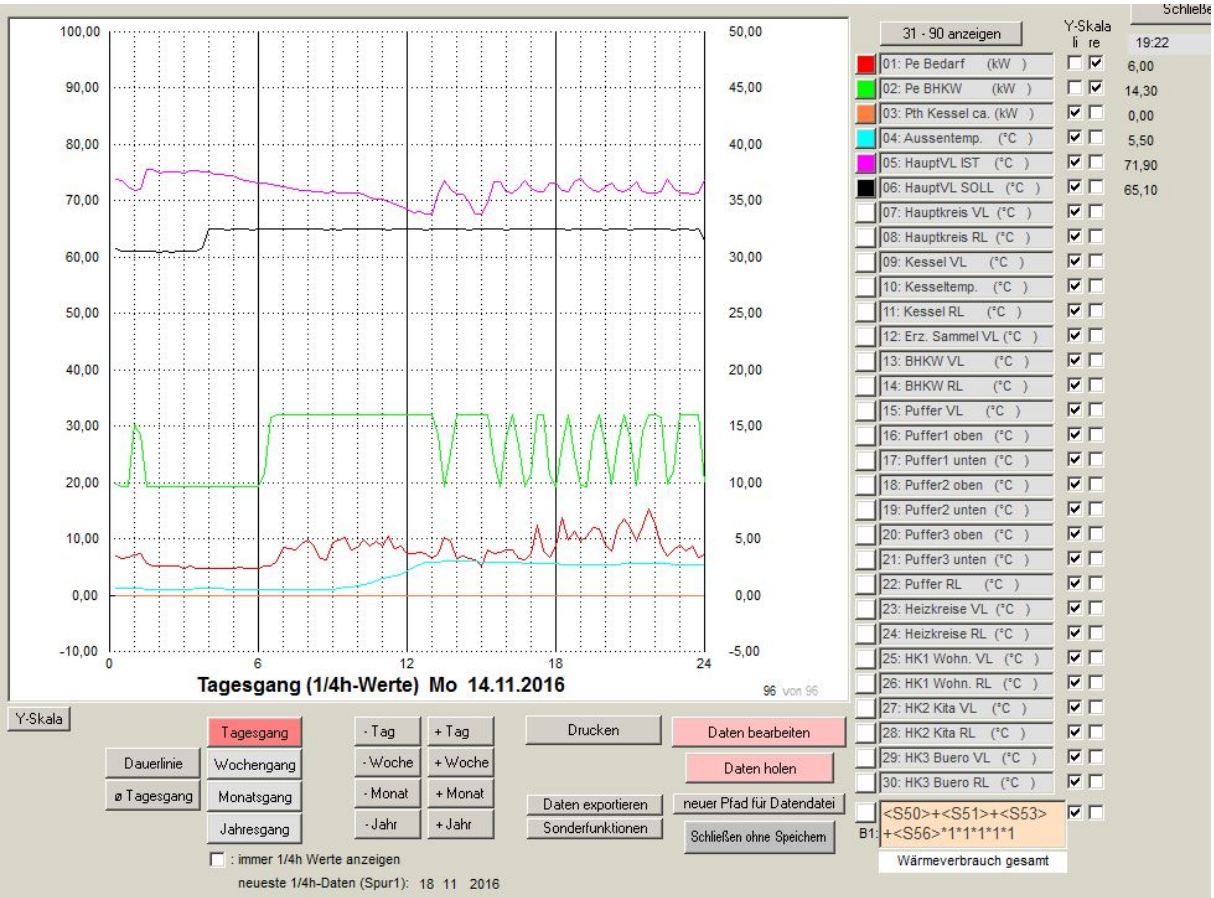
Die Visualisierung zeigt alle Betriebszustände und Temperaturen auf einen Blick. So lassen sich Fehler, nicht optimale Funktionen oder falsch eingestellte Parameter gut erkennen.
Falls eine Änderung der Software notwendig oder sinnvoll ist, kann die neue Software „online“ in das System übertragen werden („online-update“).

Die obige Visualisierung Möhringsberg gibt schon einen guten Überblick über den Aufbau der Anlage: Links das BHKW; darüber die Stromzähler für Einspeisung und Bezug. Die PV-Anlage wird zur Zeit installiert und ist noch nicht in Betrieb.
Weiterhin sieht man den Spitzenkessel, rechts daneben die Pufferspeicher und die beiden WW-Frischwasserstationen – mit spezieller Schaltung, die noch im nächsten Kapitel „Hydraulik“ genauer erläutert wird.

Die Heizkreise werden hier nicht gezeigt. Zur Anzeige der Heizkreise muss der Button ganz rechts bedient werden.

Datenaufzeichnung und Datenauswertung:

Das Merlin-System ist in der Lage alle wichtigen Daten aufzuzeichnen. Mit der Datenauswertung lassen sich so auch nachträglich und langfristig die Funktionen der Anlage beurteilen und gegebenenfalls Unzulänglichkeiten erkennen.



Tagesgang (1/4h Werte) Möhringsberg vom 14.11.2016

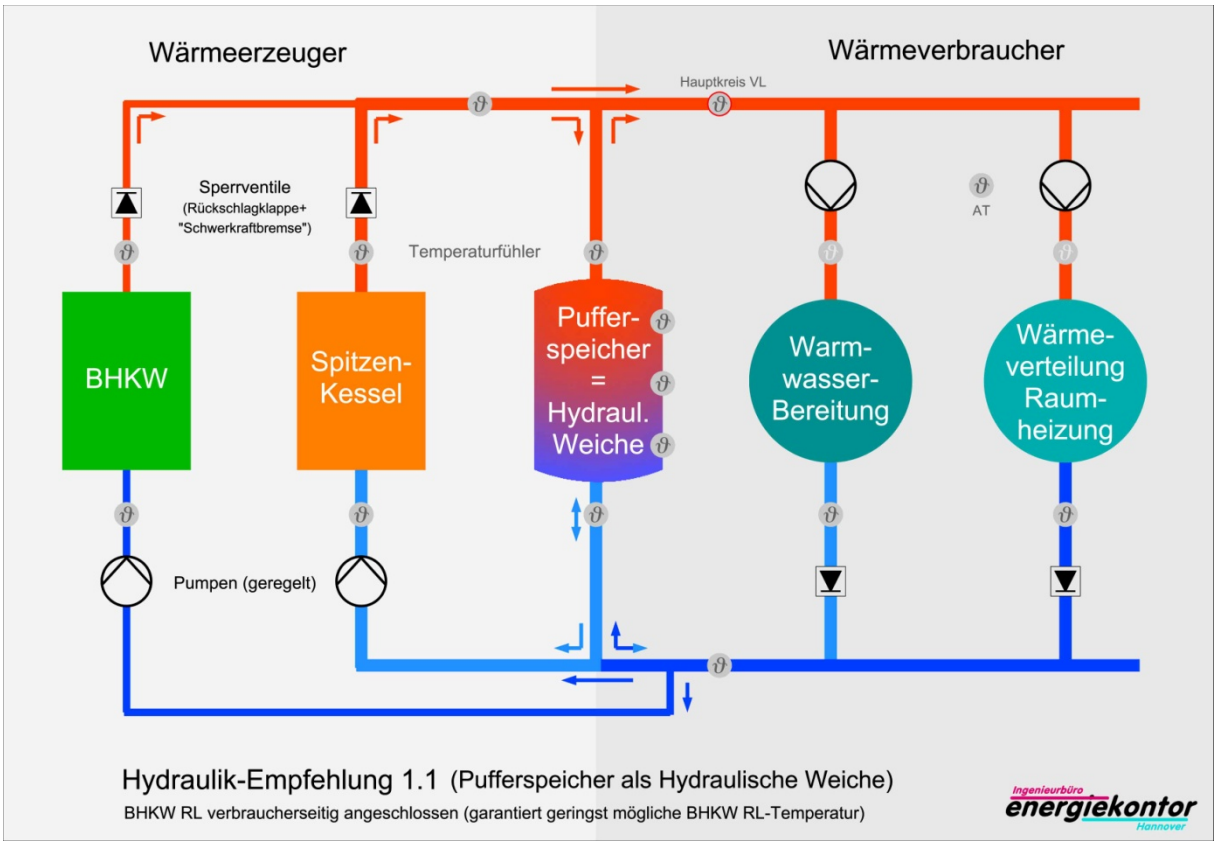
Die grüne Linie zeigt die elektrische Leistung des BHKW. Mit der roten Linie darunter ist der Verlauf des Strombedarfs vom Objekt dargestellt. (Diese Werte beziehen sich auf die rechte y-Skala) Die hellblaue Linie zeigt den Verlauf der Außentemperatur. Die lila Linie ganz oben zeigt die wichtige „Hauptkreis-Vorlauf-Temperatur"; die schwarze Linie darunter die Soll-Temperatur. Die Leistung des Spitzenkessels wird mit der hellbraunen Linie dargestellt. Diese ist an diesem Tag durchgehend Null – der Kessel ist also nicht in Betrieb gewesen.
Ganz rechts oben sind die jeweiligen Tages-Durchschnittswerte dargestellt.

Es lässt sich gut erkennen, dass das BHKW in der elektrischen Leistung zwischen 10 und 16 kW geregelt wurde. Wichtigstes Regel-Kriterium ist dabei die Hauptkreis VL-Temperatur, die mit dem BHKW nach Möglichkeit über der Soll-Temperatur gehalten werden sollte, um zu vermeiden, dass der Spitzenkessel zugeschaltet werden muss. Der Spitzenkessel würde zugeschaltet, wenn das BHKW mit voller Leistung läuft und die Hauptkreis-Temperatur unter den Sollwert sinkt. Die Leistung des BHKW wird gesenkt, wenn die Pufferspeicher weitgehend durchgeladen sind, um eine BHKW-Rücklaufanhebung zu vermeiden.

Man sieht auch, dass der Stromverbrauch noch deutlich unter der elektrischen Leistung des BHKW liegt. Das Haus war am 14.11.2016 jedoch nur zu einem kleinen Teil bezogen.

Hydraulik – Energiezentrale Möhringsberg

Als Grundschaltung wurde hier eine bewährte Hydraulikschaltung mit einem Pufferspeicher als „Hydraulische Weiche“ gewählt. (siehe nachfolgende Zeichnung).



Hydraulik-Grundschaltung – Energiezentrale Möhringsberg

Bei Einsatz einer Hydraulischen Weiche müssen nicht nur die Verbraucher, sondern auch die Wärmeerzeuger (BHKW und Kessel) Pumpen haben. Die hydraulische Weiche sorgt dafür, dass sich die Pumpen nicht (oder nur wenig) gegenseitig beeinflussen. Dazu müssen die Rohrleitungen und die Anschlüsse des Pufferspeichers hinreichend groß sein. Insbesondere die Pumpen der Wärmeerzeuger müssen sinnvoll geregelt werden. Der oder die Pufferspeicher sollen zeitweise unterschiedliche Wärmebedarfe ausgleichen. Mit hinreichend großen Pufferspeichern kann die Betriebszeit des BHKW deutlich verlängert und viele Start-Stopp-Vorgänge vermieden werden.

Den Pufferspeicher als Wärmespeicher zu nutzen, ist nur dann möglich, wenn die Summe der Verbraucher-Volumenströme im Mittel bzw. auf Dauer nicht höher sind als die Erzeuger-Volumenströme. Dazu müssen die Verbraucherkreise sinnvoll abgeglichen und geregelt werden.

Wie schon beschrieben, ist es bei den Spitzenkesseln schwierig den Volumenstrom bzw. die Spreizung immer optimal zu regeln, was zu Anhebungen der Rücklauftemperatur führt. Um dadurch auch eine Anhebung der BHKW-Rücklauftemperatur zu vermeiden, ist es empfehlenswert den Rücklauf des BHKW verbraucherseitig „vor“ dem Pufferspeicher bzw. der Hydraulischen Weiche anzuschließen.

Durch Rückschlagklappen (RSK) oder so genannte „Sperrventile“ (SVU) müssen unerwünschte Volumenströme verhindert werden.
Da die Leitungen und Anschlüsse des Pufferspeichers in der Praxis nicht „beliebig dick“ ausgeführt werden, kommt es zu (kleinen) Differenzdrücken zwischen Hauptkreis-Vorlauf (VL) und Hauptkreis-Rücklauf (RL). Wegen des quadratischen Zusammenhangs zwischen Volumenstrom und Differenzdruck (s. Kapitel „Pumpen“) können schon kleine Drücke zu relativ hohen bzw. störenden Volumenströmen führen. So können die Volumenströme der Verbraucher einen Volumenstrom durch den Kessel vom Rücklauf in den Vorlauf durch den abgeschalteten Kessel „ziehen“, was zur Absenkung der VL-Temperatur führt.
Sicher verhindert werden kann dies durch eine Motorklappe im Kesselkreis. Preiswerter sind Sperrventile, eine Kombination aus Rückschlagklappe und „Schwerkraftbremse“, die einen Öffnungsdruck vom ca. 20mbar in normaler Strömungsrichtung haben. In der Anlage Möhringsberg wurden solche Sperrventile von Fa. Oventrop (SVU) eingesetzt.

Hydraulikschaltung zur Senkung der Rücklauftemperaturen

Wie im Kapitel BHKW gezeigt wurde, sind niedrige Rücklauftemperaturen wichtig für hohe Wirkungsgrade der Wärmeerzeuger (BHKW und Spitzenkessel).

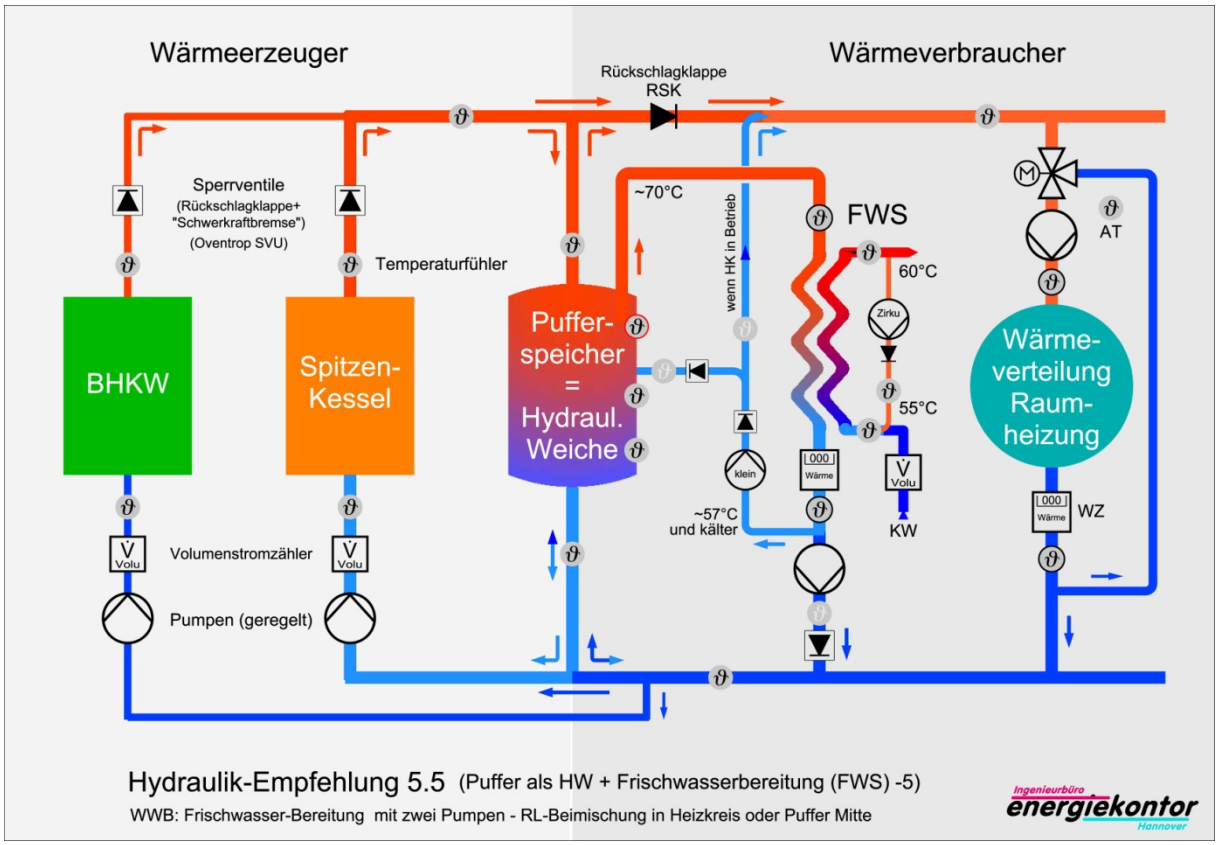
Bei Heizkreisen (für die Raumheizung) lassen sich niedrige Rücklauftemperaturen leicht erreichen, sofern das Heizungssystem (mit Thermostatventilen) einigermaßen sinnvoll abgeglichen wurde und keine schweren hydraulischen Fehler gemacht wurden – wie zum Beispiel der Einbau von „Überströmstrecken“.

Bei den WW-Bereitungen sieht das jedoch anders aus:
Gesetzlich gefordert sind zur Vermeidung von Keimbildungen (Legionellen) WW-Temperaturen von 60°C und Zirkulations-Rücklauftemperaturen von mindestens 55 °C. Zu den Zeiten, in denen der WW-Verbrauch gering oder Null ist, müssen nur die Zirkulationsverluste durch die Anlage gedeckt werden. Dann sind Rücklauftemperaturen der WW-Bereitung unter 55°C unmöglich.

Um trotzdem niedrige Rücklauftemperaturen zu erreichen, gibt es einen hydraulischen „Trick“: Zu den Zeiten geringen WW-Verbrauchs kann der Rücklauf der WW-Bereitung dem Vorlauf der Heizkreise beigemischt werden. Das Rücklaufwasser aus der WW-Bereitung wird dann in den Heizkörpern der Raumheizung abgekühlt. Dies ist (mit etwas Aufwand) bei allen Arten von WW-Bereitungen (mit oder ohne WW-Speicher) möglich.

Die Speicherung von Warmwasser in Behältern erhöht das Risiko der Keimbildung. Deshalb werden in den letzen Jahren vermehrt so genannte „Frischwasser-Bereitungen“ oder „Frischwasser-Stationen“ (FWS) eingesetzt, bei denen das Wasser ohne Speicher „just in time“ im Durchlaufprinzip erwärmt wird. In der Anlage Möhringsberg wurden zur getrennten Abrechnung von Kita und Wohnungen zwei solcher Frischwasserstationen installiert.

Die nachfolgenden Zeichnungen zeigen das Prinzip der Hydraulikschaltung - zur Vereinfachung mit nur einer FWS und einem Heizkreis. Dargestellt ist darin auch, wie die Beimischung des heizungsseitigen Rücklaufs der FWS zum Vorlauf der Heizkreise hier gelöst wurde.



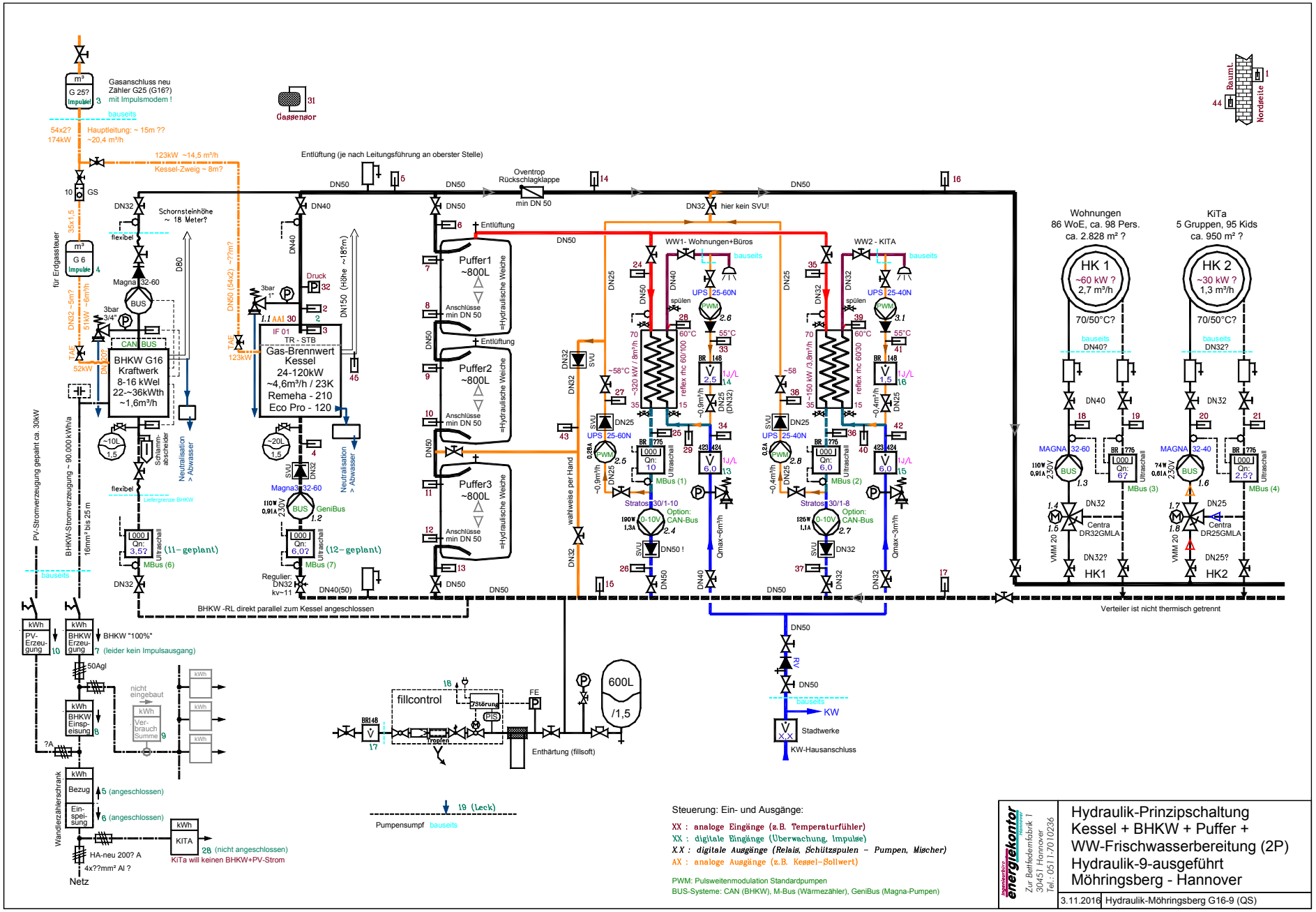
Hydraulik-Prinzip: Frischwasserbereitung mit Beimischung in den Vorlauf des Heizkreises

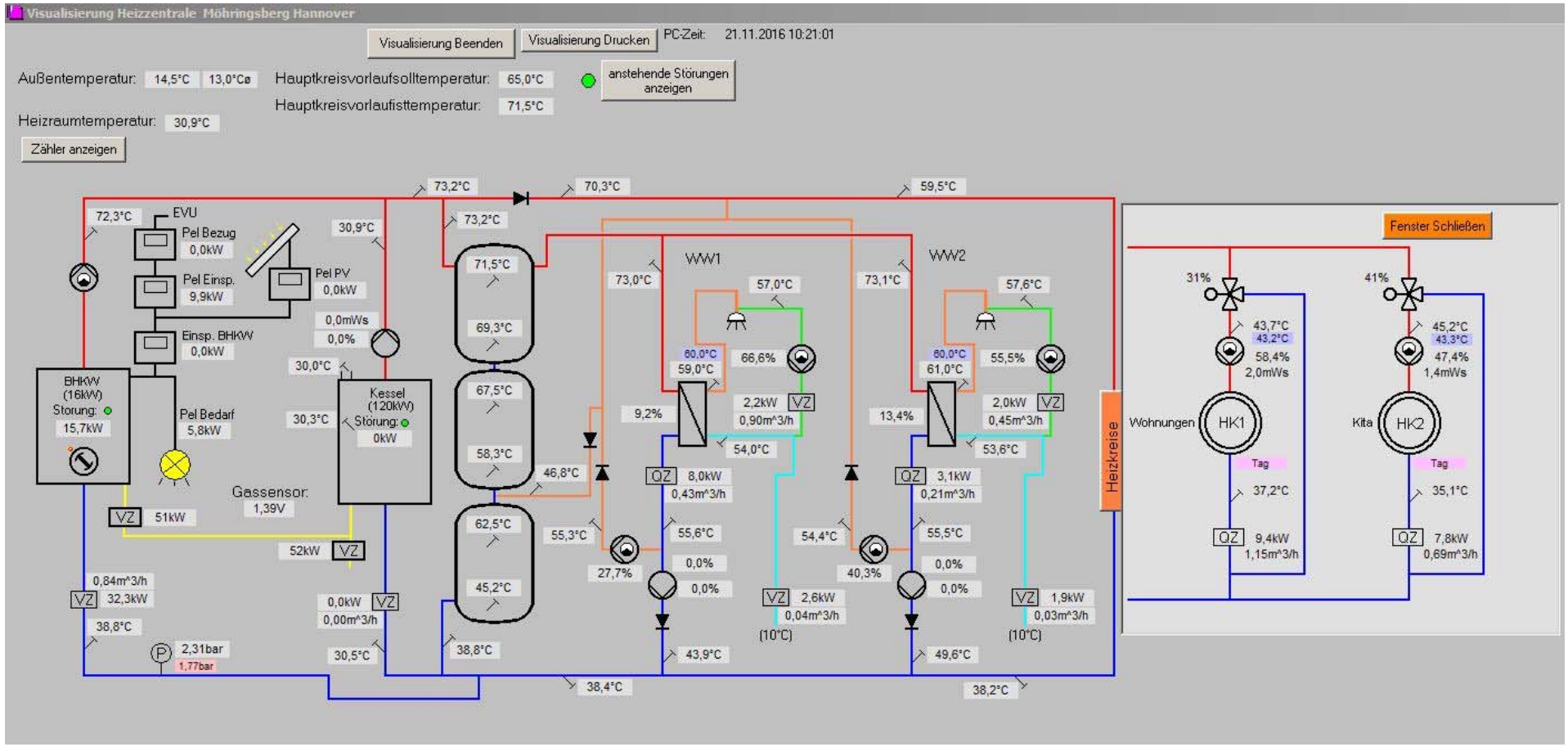
Ein zentrales Problem von Frischwasserstation (FWS) ist, dass sich die WW-Austritts-Temperatur auch bei sich schnell ändernden WW-Verbräuchen möglichst wenig verändern sollte. Wenn z.B. eine oder mehrere Duschen plötzlich geöffnet werden, muss der heizungsseitige Volumenstrom möglichst genauso schnell geändert werden. Das ist regelungstechnisch eine anspruchsvolle Problemstellung. In der übergeordneten Steuerung gibt es dafür einstellbare PID-Regler, die den Pumpen den jeweiligen Sollwert vorgeben.

Das eigentliche Problem ist jedoch, dass die Pumpen nicht immer genau und insbesondere schnell das „tun was sie sollen“. Der Volumenstrom sollte dabei von nahe Null auf 100% veränderbar sein.
Im Kapitel „Pumpen“ wurde am Beispiel einer Magna3 Hocheffizienzpumpe gezeigt, dass der Volumenstrom nur auf etwa 50% des Nennvolumenstroms herunter regelbar ist. Deshalb wurden hier zwei Pumpen eingesetzt. Die kleine Pumpe soll den Bereich kleiner Leistungen und Volumenströme abdecken. Die kleine Pumpe wird gleichzeitig dazu genutzt den warmen Rücklauf der FWS dem Heizkreis-Vorlauf beizumischen.

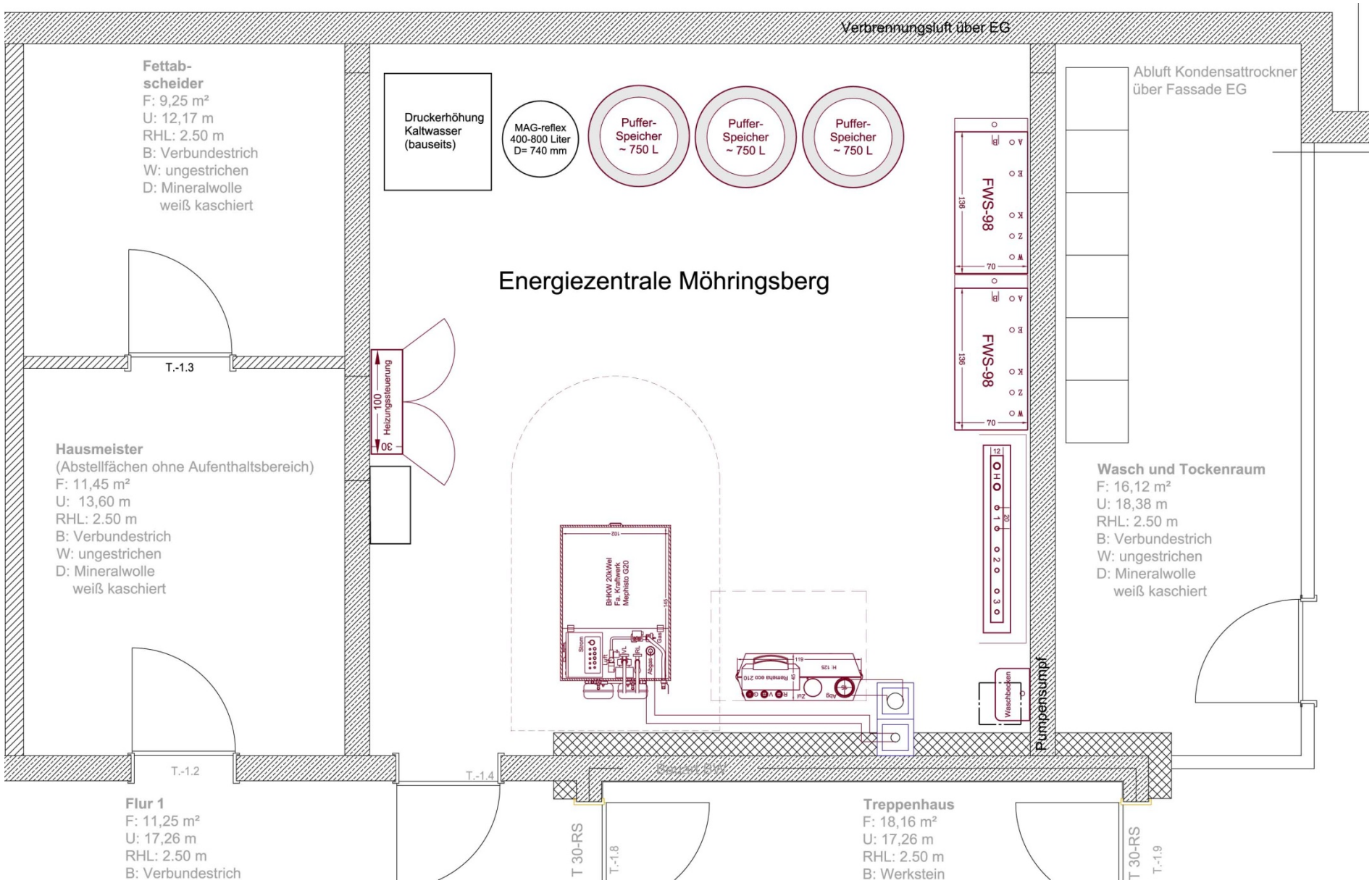
Bei hohem WW-Verbrauch mit Kaltwassertemperaturen um 10°C, wird auch der heizungsseitige Rücklauf der FWS entsprechend kalt. Dann soll die große Pumpe den Volumenstrom direkt in den Hauptkreis-Rücklauf pumpen. Als „große“ WW-Ladepumpen wurden hier Wilo-Stratos-Pumpen mit 0-10V Ansteuerung eingesetzt, da diese Pumpen schneller auf das Ein-Aus-Signal reagieren als die Magna-Pumpen.

Auf den nächsten Seiten sind die vollständige Hydraulik-Schaltung Möhringsberg, die Visualisierung mit Heizkreisen, der Aufstellungsplan und einige Fotos der Anlage dargestellt.


Gasanschluss neu
Zähler G25 (G16?)
mit Impulsmodem !
Hauptleitung: ~ 15m ??
~20,4 m³/h
54x2?
174kW
bauseits
123kW ~14,5 m³/h
Kessel-Zweig ~ 8m?
Gassensor
Entlüftung (je nach Leitungsführung an oberster Stelle)
Oventrop
Rückschlagklappe
min DN 50
hier kein SVU!
Raum
Nordseite
für Erdgassteuer
Schornsteinhöhe
~ 18 Meter?
Magna 32-60
BHKW G16
Kraftwerk
8-16 kWel
22-~36kWth
~1,6m³/h
Gas-Brennwert
Kessel
24-120kW
~4,6m³/h / 23K
Remeha - 210
Eco Pro - 120
Puffer1
~800L
Puffer2
~800L
Puffer3
~800L
Anschlüsse
min DN 50
=Hydraulische Weiche
WW1- Wohnungen+Büros
WW2 - KITA
UPS 25-60N
UPS 25-40N
Stratos 30/1-10
Stratos 30/1-8
Option:
CAN-Bus
Wohnungen
86 WoE, ca. 98 Pers.
ca. 2.828 m² ?
KiTa
5 Gruppen, 95 Kids
ca. 950 m² ?
HK 1
~60 kW ?
2,7 m³/h
HK 2
~30 kW ?
1,3 m³/h
70/50°C?
Centra
DR32GMLA
Centra
DR25GMLA
Neutralisation
> Abwasser
PV-Stromerzeugung geplant ca. 30kW
BHKW-Stromerzeugung ~ 90.000 kWh/a
BHKW -RL direkt parallel zum Kessel angeschlossen
Verteiler ist nicht thermisch getrennt
BHKW "100%"
(leider kein Impulsausgang)
fillcontrol
Enthärtung (fillsoft)
600L
/1,5
Stadtwerke
KW-Hausanschluss
Pumpensumpf
Netz
KITA
KiTa will keinen BHKW+PV-Strom
Steuerung: Ein- und Ausgänge:
XX : analoge Eingänge (z.B. Temperaturfühler)
XX : digitale Eingänge (Überwachung, Impulse)
X.X : digitale Ausgänge (Relais, Schützspulen – Pumpen, Mischer)
AX : analoge Ausgänge (z.B. Kessel-Sollwert)
PWM: Pulsweitenmodulation Standardpumpen
BUS-Systeme: CAN (BHKW), M-Bus (Wärmezähler), GeniBus (Magna-Pumpen)
Ingenieurbüro energiekontor Hannover
Zur Bettfedernfabrik 1
30451 Hannover
Tel.: 0511.7010236
Hydraulik-Prinzipschaltung
Kessel + BHKW + Puffer +
WW-Frischwasserbereitung (2P)
Hydraulik-9-ausgeführt
Möhringsberg - Hannover
3.11.2016
Hydraulik-Möhringsberg G16-9 (QS)



Visualisierung (Bildschirmaufnahme) der Anlage Möhringsberg mit Heizkreisen


Verbrennungsluft über EG
Fettab-
scheider
F: 9,25 m²
U: 12,17 m
RHL: 2.50 m
B: Verbundestrich
W: ungestrichen
D: Mineralwolle
weiß kaschiert
Druckerhöhung
Kaltwasser
(bauseits)
MAG-reflex
400-800 Liter
D= 740 mm
Puffer-
Speicher
~ 750 L
Puffer-
Speicher
~ 750 L
Puffer-
Speicher
~ 750 L
Abluft Kondensattrockner
über Fassade EG
FWS-98
FWS-98
Energiezentrale Möhringsberg
T.-1.3
Heizungssteuerung
Hausmeister
(Abstellfächen ohne Aufenthaltsbereich)
F: 11,45 m²
U: 13,60 m
RHL: 2.50 m
B: Verbundestrich
W: ungestrichen
D: Mineralwolle
weiß kaschiert
BHKW 20kWel
Fa. Kraftwerk
Mephisto G20
Remeha eco 210
Wasch und Tockenraum
F: 16,12 m²
U: 18,38 m
RHL: 2.50 m
B: Verbundestrich
W: ungestrichen
D: Mineralwolle
weiß kaschiert
Waschbecken
Pumpensumpf
T.-1.2
T.-1.4
Flur 1
F: 11,25 m²
U: 17,26 m
RHL: 2.50 m
B: Verbundestrich
T 30-RS
T.-1.8
Treppenhaus
F: 18,16 m²
U: 17,26 m
RHL: 2.50 m
B: Werkstein
T 30-RS
T.-1.9

Energiezentrale Möhringsberg: BHKW und Spitzenkessel – ganz rechts die Steuerung

Energiezentrale Möhringsberg: In der Mitte der Heizkreisverteiler, links daneben die FWS

Energiezentrale Möhringsberg: Drei Pufferspeicher, links daneben das Ausdehnungsgefäß

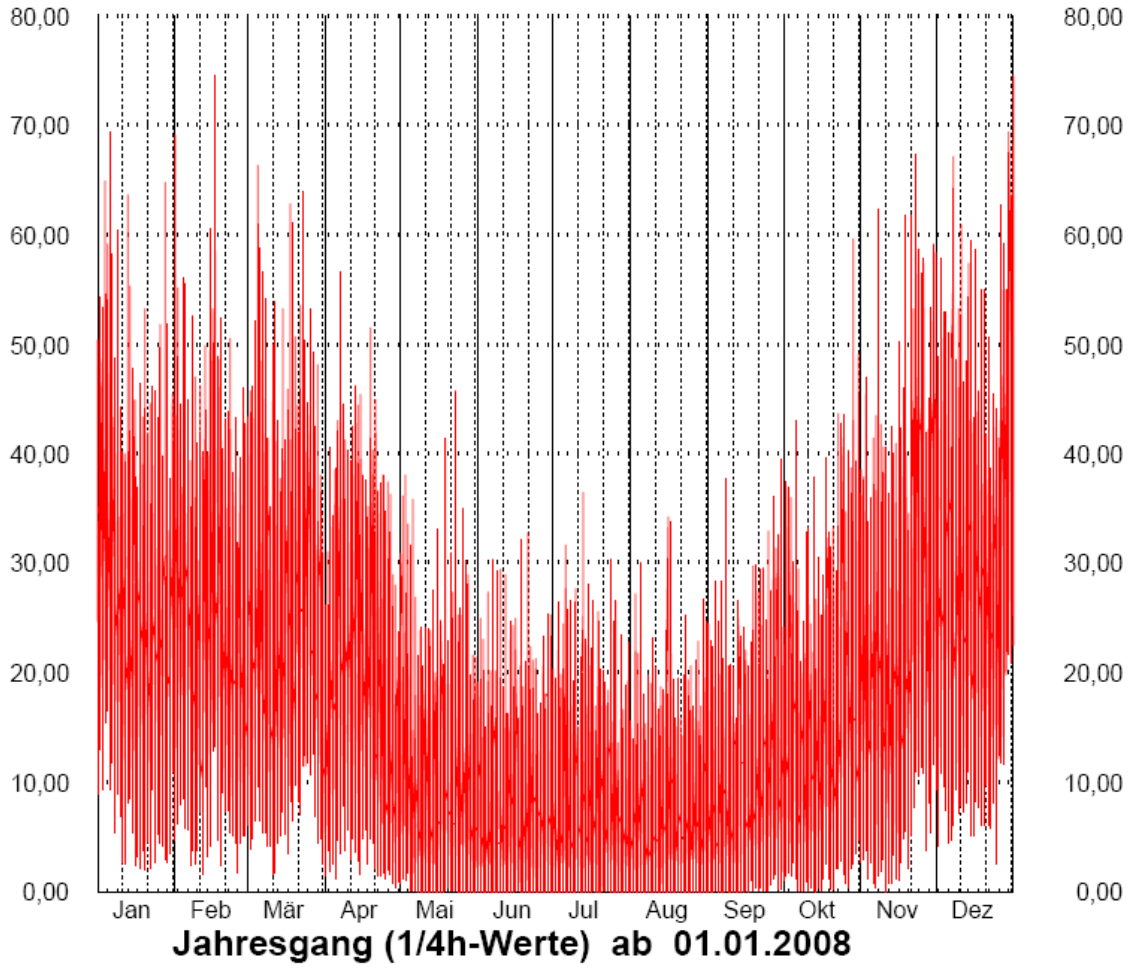
Energiezentrale Möhringsberg: Schwarzer „Kasten“: Plattenwärmetauscher der FWS1

Auslegung und Auswahl eines BHKW

BHKW sind, gemessen an der Wärmeleistung, spezifisch sehr viel teurer als Heizkessel. Deshalb ist es wirtschaftlich und technisch sinnvoll, BHKW (wie auch andere teure Wärmeerzeuger) in der Grundlast zu betreiben.

Da es in bestehenden Anlagen fast nie detaillierte Aufzeichnungen über den Verlauf des Jahres-Wärmebedarfs gibt, steht als einzige Größe meist nur der Jahres-Gesamtwärmebedarf zur Verfügung, der aus Gasrechnungen oder Wärmebedarfsberechnungen ermittelt wurde. Bei Neubauten, wie hier für das Projekt Möhringsberg, muss der Jahres-Wärmebedarf so gut wie möglich berechnet bzw. geschätzt werden (s. Kapitel „Energiebedarf") Damit gilt es nun die Größe bzw. Leistung eines BHKW sinnvoll auszuwählen.

Der Verlauf des Wärmebedarfs ist in komplizierter Weise von Außentemperatur, Warm-Wasser-Bedarf, Nutzerverhalten, Tageszeit und Wochentag abhängig. Die so genannte Auslegungs- oder Maximalleistung, die in Hannover für eine Außentemperatur von -14°C berechnet wird, tritt sehr selten, in manchen Jahren gar nicht auf.



Jahresgang Gesamtwärmebedarf gemessen mit ¼ Stunden-Werten

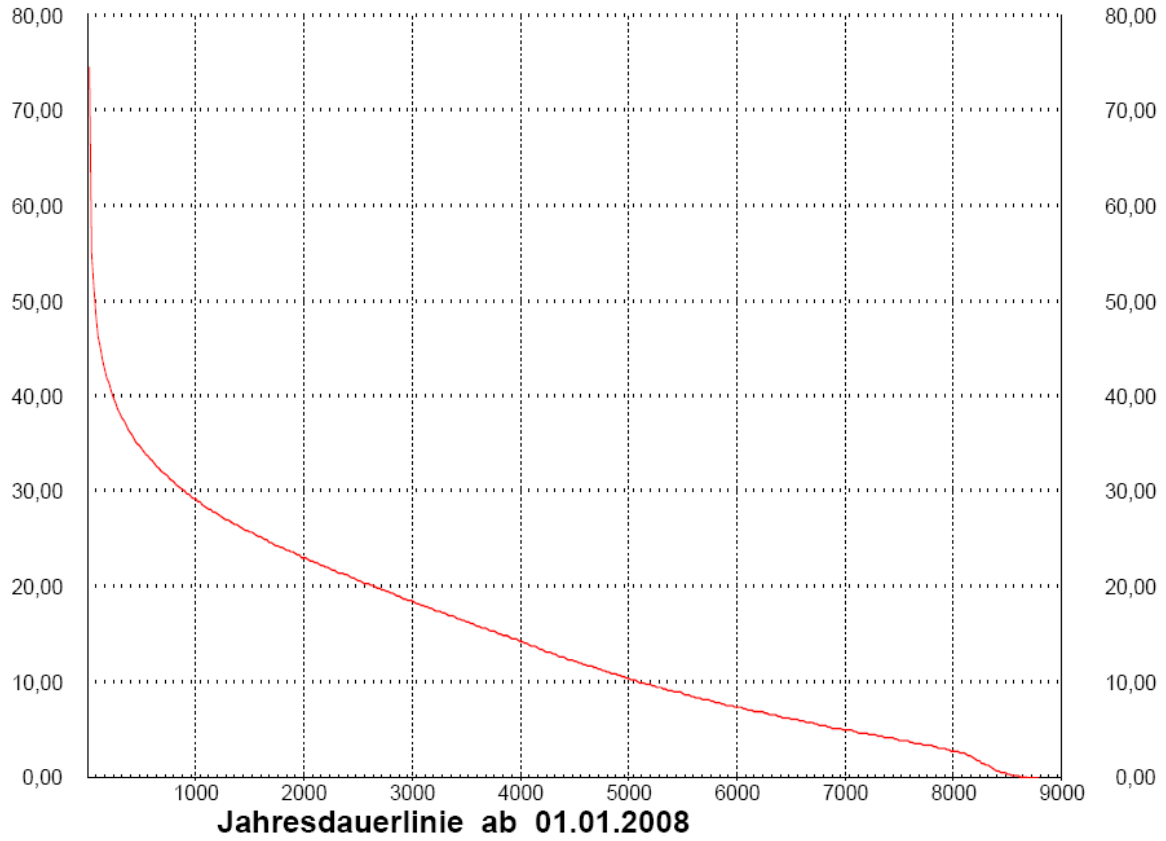
Mit einem modernen Steuerungs- und Datenaufzeichnungssystem (Merlin 555) wurden in einem anderen Wohnhaus mit 40 Wohnungen und guter Wärmedämmung unter anderem der Gesamtwärmebedarf mit ¼ Stundenwerten aufgezeichnet. Bei den 8.760 Stunden eines Jahres sind das 35.040 Werte. Dies ist in einer Jahresgrafik kaum darstellbar (siehe oben).

Aus diesem Jahresgang lassen sich nur mühsam einige Informationen entnehmen. Tendenziell lässt sich der jahreszeitabhängige Verbrauch erkennen. Weiterhin sieht man, dass auch an kalten Wintertagen sehr kleine Verbrauchswerte auftreten und dass Leistungen über 70 kW nur während zwei Viertelstunden aus der Heizzentrale abgefordert wurden.

In diesem Objekt wurde ein Brennwertkessel mit einer maximalen Wärmeleistung von 120 kW installiert. Da es hier auch eine Sonnenkollektoranlage mit Pufferspeichern gibt, welche auch dem Kessel zur Verfügung stehen, wäre für das (warme) Jahr 2008 eine Kesselleistung von etwa 60 kW sehr wahrscheinlich problemlos ausreichend gewesen.

Jahresdauerlinie:

Mit dem Merlin 555-System lassen sich die 1/4 h Daten auch nach der Größe sortieren. Damit erhält man eine sogenannte Jahresdauerlinie.



Farbe	Wert	y-Skala: li re	ø	Summe
—	WMZ ges. Verbr (kW)	x	14,91	130511,5

Jahresdauerlinie des Gesamtwärmebedarfs (gemessene 1/4h- Werten)

Aus der Jahresdauerlinie lässt sich nun sehr übersichtlich die Häufigkeitsverteilung des Wärmebedarfs, sowie die ausgeprägte Spitze von hier ca. 75 kW ablesen.
Die Fläche unter der Kurve repräsentiert den Jahreswärmebedarf (W), der in diesem Beispiel 130.511 kWh beträgt. Wenn man den Jahreswärmebedarf durch die 8.760 Stunden des (Norm)-Jahres teilt, erhält man die Durchschnittsleistung (P-Schnitt), hier 14,91 kW.

Ein charakteristischer Wert von Jahresdauerlinien ist das Verhältnis von Maximalleistung (Pmax) zur Durchschnittsleistung (Pschnitt). In diesem Beispiel beträgt das Verhältnis Pmax/Pschnitt ca. 75 kW geteilt durch 15 kW also etwa 5. Wenn man, wie gezeigt wurde, die sehr seltenen höchsten Spitzen vernachlässigen kann, ergibt sich ein Verhältnis von ca. 4. Dies ist ein typischer Wert für (gut gedämmte) Wohnhäuser mit zentraler WW-Bereitung.

Analytische Jahresdauerlinie

Wie noch gezeigt wird, kann mit Hilfe der Jahresdauerlinie ein „passendes“ BHKW ausgewählt, die Wärmebedarfsdeckung durch das BHKW sowie die Jahresbetriebsstunden berechnet werden.
Das Problem ist jedoch, dass die Jahresdauerlinie der Objekte (wie hier für einen Neubau) in der Regel nicht bekannt ist.

Eine sehr ähnliche Problemstellung besteht bei der Dimensionierung von elektrischen Netzen. Hier hat sich durch viele Messungen gezeigt, dass sich Jahresdauerlinien auch sehr gut analytisch, d.h. mit einer mathematischen Formel, beschreiben lassen.
Dieses hat den großen Vorteil, dass alle nachfolgenden Rechengänge mathematisch exakt durchgeführt werden können.

Die analytische Dauerlinie hat mit der „tatsächlichen“ Dauerlinie folgende Gemeinsamkeiten:
1) gleiche Höchstlast Pmax
2) gleiche Kleinstlast Pmin
3) gleicher Energieinhalt W
4) gleiches Ende der Jahresdauerlinie „ah“

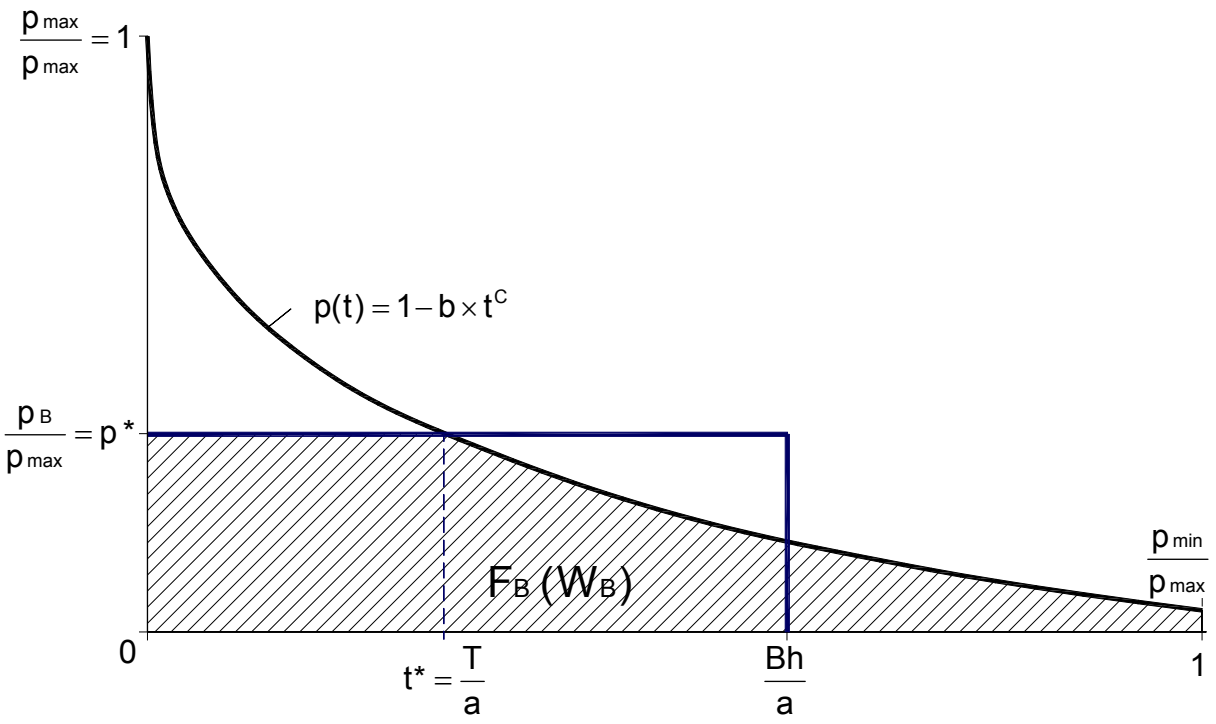
Besonders die dritte Bedingung erzwingt, dass die tatsächliche Jahresdauerlinie nur geringfügig von der analytischen abweichen kann. (Vergleiche von tatsächlich gemessenen zu analytischen Jahresdauerlinien werden im Anschluss an die mathematische Darstellung der analytischen Jahresdauerlinie gezeigt.)

Wie die obige Datenauswertung zeigt, liegt das Ende der Jahresdauerlinie meist in der Nähe von 8.760 h mit einem Minimalwert Pmin von etwa Null oder etwas darüber.

Der Maximalwert Pmax bzw. das Verhältnis Pmax/Pschnitt kann aus Erfahrungswerten gut geschätzt werden. Pmax bestimmt bei der analytischen Jahresdauerlinie im Wesentlichen den Verlauf zur Spitze. Für die Auslegung eines BHKW ist jedoch nur der Verlauf im unteren Bereich der Jahresdauerlinie ausschlaggebend. Bei besonderen Objekten, wie z.B. Schulen, ist eine „ingenieursmäßige“ Abschätzung des Endes der Jahresdauerlinie notwendig.

Auf der folgenden Seite sind die mathematischen Zusammenhänge dargestellt.
Die Wärmebedarfsdeckung durch das BHKW ergibt sich durch die Lösung des bestimmten Integrals FB.

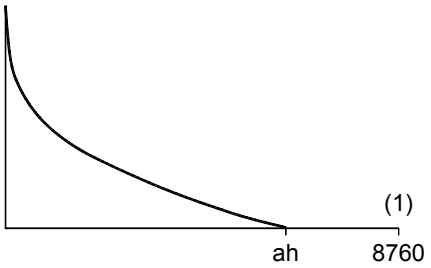
Normierte, analytische Jahresdauerlinie des Energiebedarfs und Bedarfsdeckung durch einen Grundlast-Energieerzeuger



$$p(t) = 1 - b \times t^C$$

$$b = 1 - m_0 \quad \leftarrow \quad m_0 = \frac{p_{min}}{p_{max}}$$

$$c = \frac{m - m_0}{1 - m} \quad \leftarrow \quad m = \frac{W}{P_{max} \times ah}$$



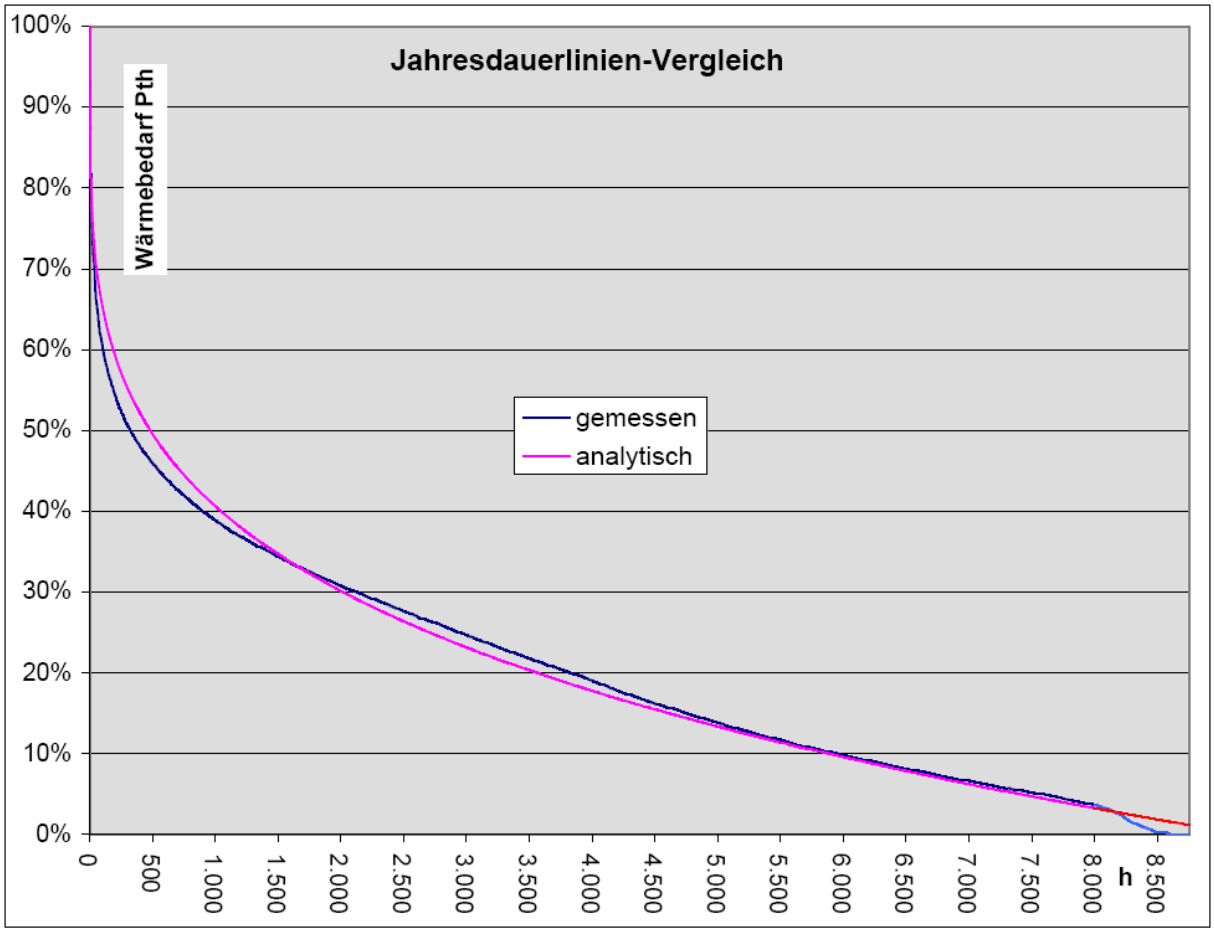
$$F_B = \frac{1}{m} \times \left(m - t^* + \frac{b}{c+1} \times (t^*)^{c+1} + p^* \times t^* \right) \quad \text{mit} \quad t^* = \left(\frac{1 - p^*}{b} \right)^{\frac{1}{C}}$$

$$bh = \frac{Bh}{a} = \frac{F_B}{p^* \times \frac{P_{max}}{P_{schnitt}}} \quad \leftarrow \quad P_{schnitt} = \frac{W}{a}$$

$$W_B = F_B \times W \qquad Bh = \frac{W_B}{P_B}$$

W= Jahresenergiebedarf
WB= Bedarfsdeckung durch Grundlast-Energieerzeuger
Bh= Jahresvolllaststunden des GL- Energieerzeugers
PB= Leistung des Grundlastenergieerzeugers

Vergleich Jahresdauerlinien: gemessen - analytisch



Vergleich: gemessener Wärmebedarf und analytische Jahresdauerlinie

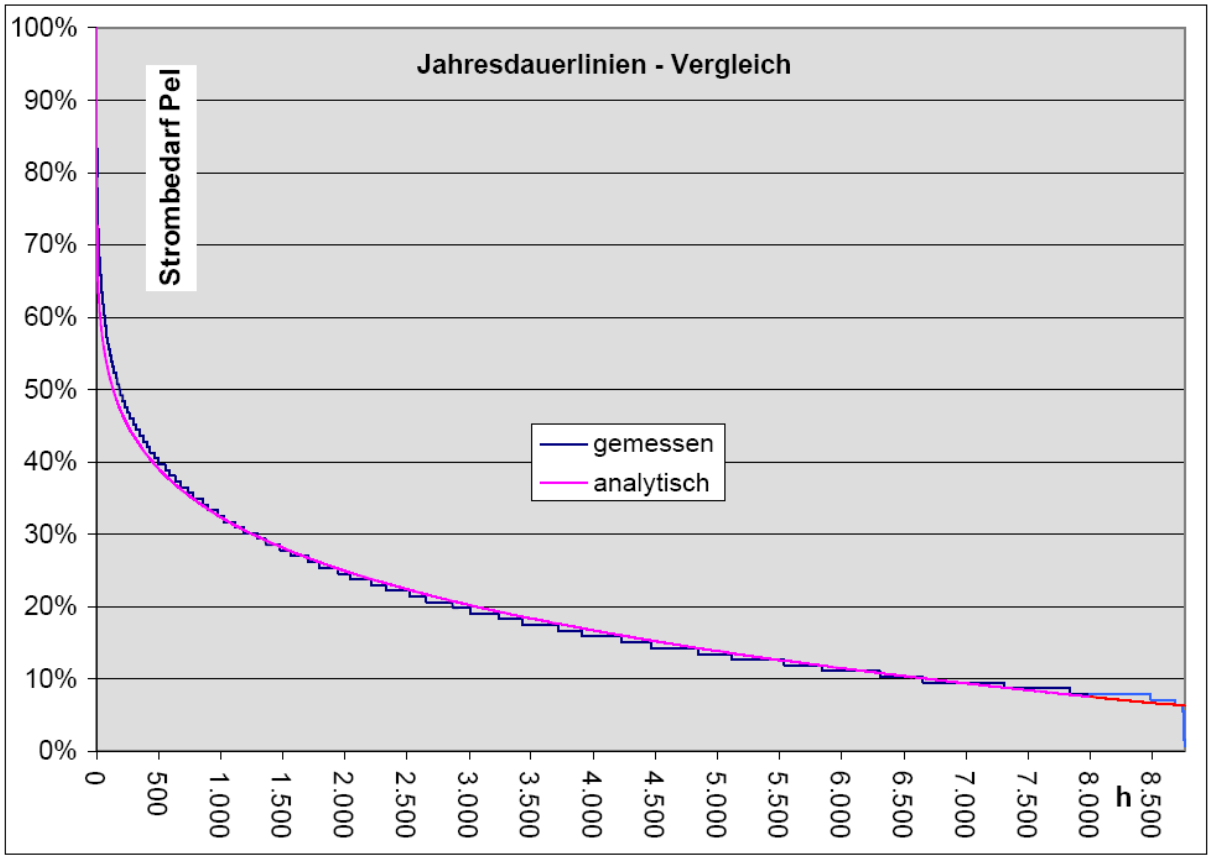
Zunächst soll hier für das schon dargestellte Beispiel gezeigt werden, dass die gemessene und analytische Jahresdauerlinie recht gut übereinstimmen.

Für die analytische Jahresdauerlinie wurden folgende Werte eingegeben:

Pmax/Pschnitt= 5,005
Pmin/Pschnitt = 6%
Ende der JDL = 8760 h

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines BHKW ist auch notwendig, die „Strombedarfs-deckung“ zu ermitteln – also auszurechnen, welcher Anteil des Strombedarfs des Objektes von der Stromerzeugung des BHKW gedeckt werden kann.

Auch hierzu kann die analytische Jahresdauerlinie verwendet werden.
Im nächsten Diagramm ist die Jahresdauerlinie des Strombedarfs eines 8-Familien-Wohn-hauses dargestellt. Man sieht, dass der Strombedarf nie Null wird und dass die gemessene Jahresdauerlinie noch besser als beim Wärmebedarf mit der analytischen Jahresdauerlinie übereinstimmt.
Die Ursache für den etwas stufigen Verlauf der gemessenen Jahresdauerlinie liegt in der begrenzten Auflösung des Impulsausgangs des Stromzählers.



Strombedarf - 8 Familienwohnhaus, gemessener und analytischer Verlauf

Gemessen und für die analytische Jahresdauerlinie eingegeben wurden:

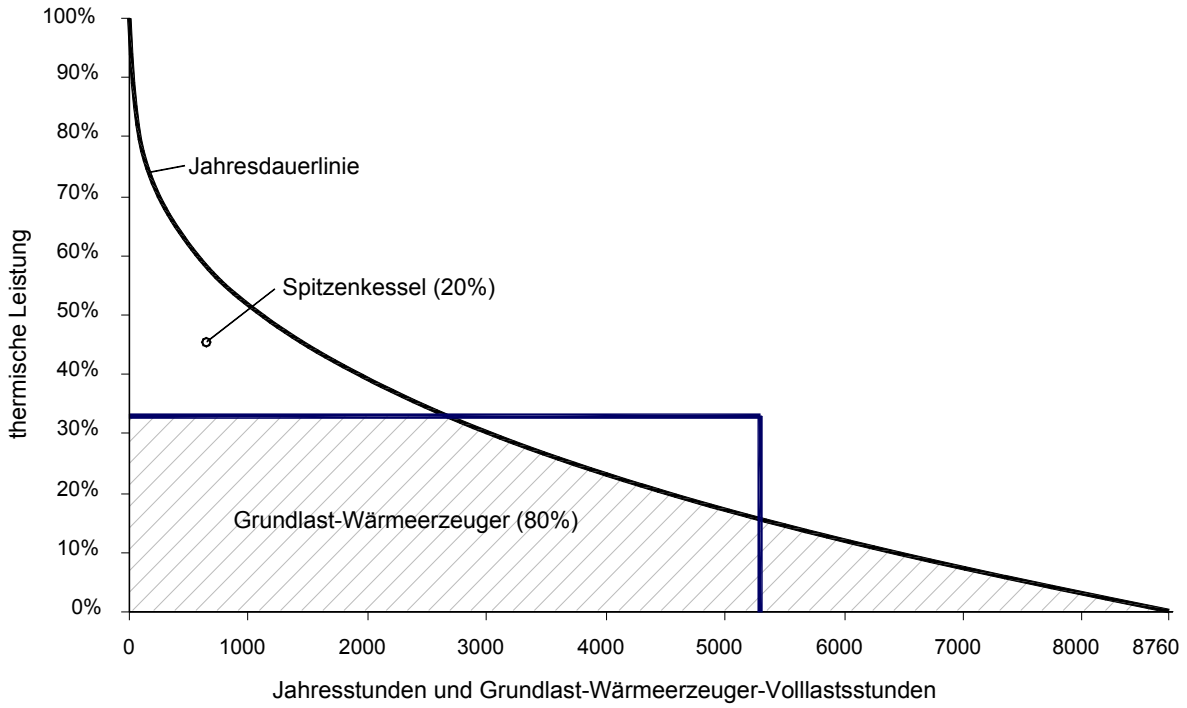
Gesamtstrombedarf: 20.485 kWh/a
Pmax (1/4 h): 12,6 kW
Pmax/Pschnitt = 5,39
Pmin/Pschnitt = 34%

Auslegung des BHKW nach Wärmebedarf - Optimierung

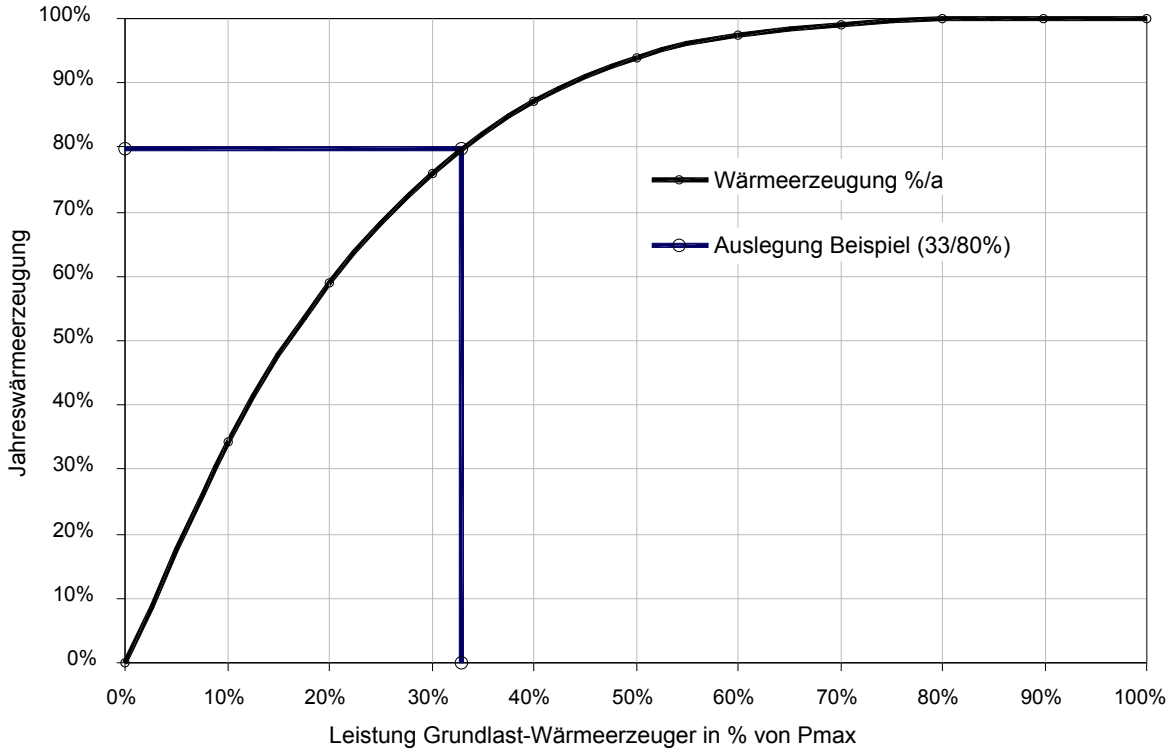
Bei der Auswahl der Leistungsgröße eines BHKW (oder eines anderen Grundlastwärmeerzeugers) gibt es den Zielkonflikt, einerseits möglichst viel des Wärmebedarfs durch das BHKW decken zu wollen, andererseits möglichst viele Jahres-Betriebsstunden zu erreichen.

Für übliche Jahresdauerlinien im Wohnbereich sind diese Zusammenhänge in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

Man sieht in diesem Beispiel, dass bei einer thermischen Leistung des BHKW von nur 33% des maximalen Wärmebedarfs (Pmax) schon 80% des Wärmebedarfs durch das BHKW gedeckt werden. Dabei erreicht das BHKW ca. 5.300 Jahresbetriebsstunden.
Meist werden BHKW noch etwas kleiner ausgelegt, um 6.000 Betriebsstunden und mehr zu erreichen.
Als Faustformel gilt, die thermische Leistung des BHKW etwa auf die durchschnittliche Leistung des Wärmebedarf (Pschnitt) auszulegen, was sehr leicht zu errechnen ist!



Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs und Bedarfsdeckung durch ein BHKW



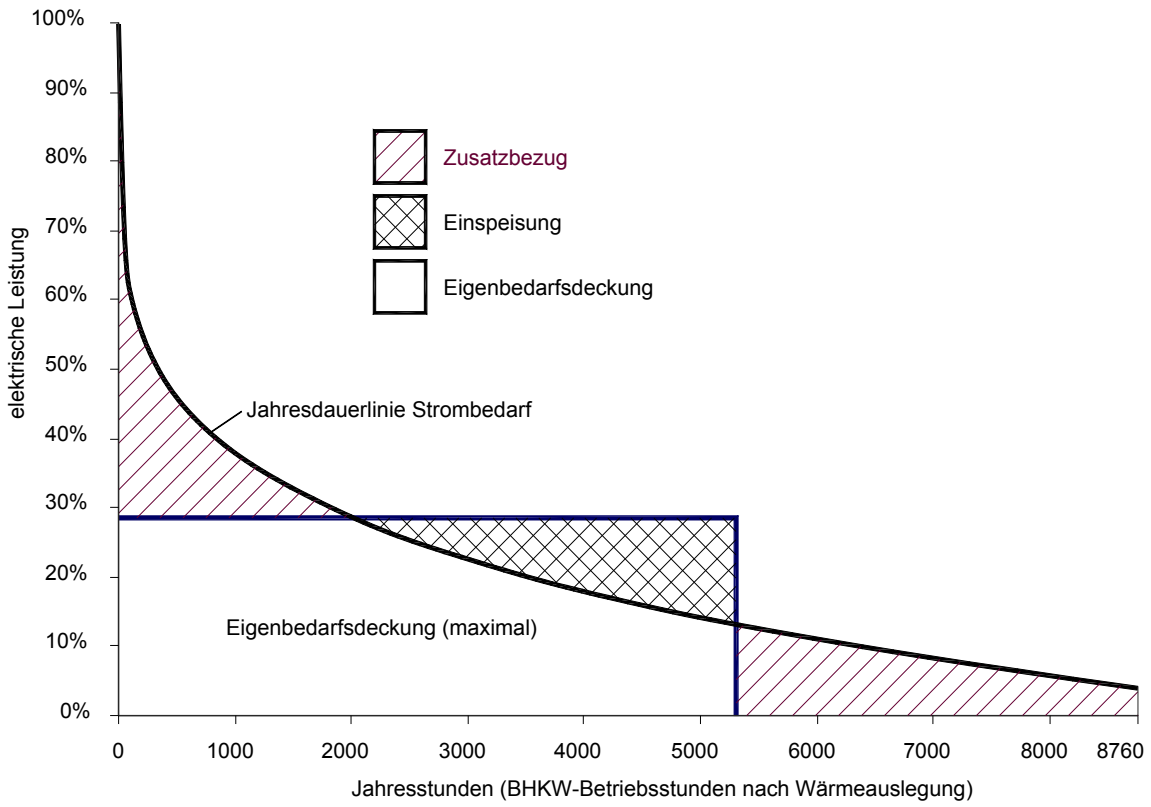
Wärmebedarfsdeckung durch das BHKW in Abhängigkeit der prozentualen Leistung von Pmax

Auslegung des BHKW nach Strombedarf

Meist soll, wie bei dem Projekt Möhringsberg, mit BHKW nicht nur weitgehend der Wärmebedarf des Objektes, sondern auch der Strombedarf gedeckt werden.
Die Verhältnisse von Wärme- und Strombedarf können in den Objekten sehr unterschiedlich sein. Im Wohnbereich bei „normal“ wärmegedämmten Häusern passen Wärme- und Strombedarf, bezüglich der BHKW-Auslegung, meist gut zusammen.

Für die BHKW-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gilt es zunächst möglichst gut abzuschätzen, wie viel des Objekt-Strombedarfs vom BHKW gedeckt werden kann.

Auch hierfür kann die analytische Jahresdauerlinie des Strombedarfs genutzt werden. Die Berechnung ist jedoch etwas komplizierter.



Stromeigenbedarfsdeckung durch das BHKW (maximal)

Im obigen Bild wurde die Stromerzeugung des BHKW in die Jahresdauerlinie des Strombedarfs gelegt. Mit den gezeigten Berechnungsmethoden lässt sich so die maximale Eigenbedarfsdeckung errechnen. Die restlichen Größen, Strom-Einspeisung ins Netz und der noch benötigte Strombezug aus dem Netz (Zusatzbezug) ergeben sich dann mit einfacher Algebra. (s. nachfolgende Darstellung).

Das Problem für eine genaue Berechnung der Strom-Eigenbedarfsdeckung ist, dass der Wärmebedarf - und damit der Betrieb des BHKW – mit dem Strombedarf in keinem festen Zusammenhang stehen. Das obige Bild zeigt den zeitlich optimalen Betrieb des BHKW bezüglich des Strombedarfs.

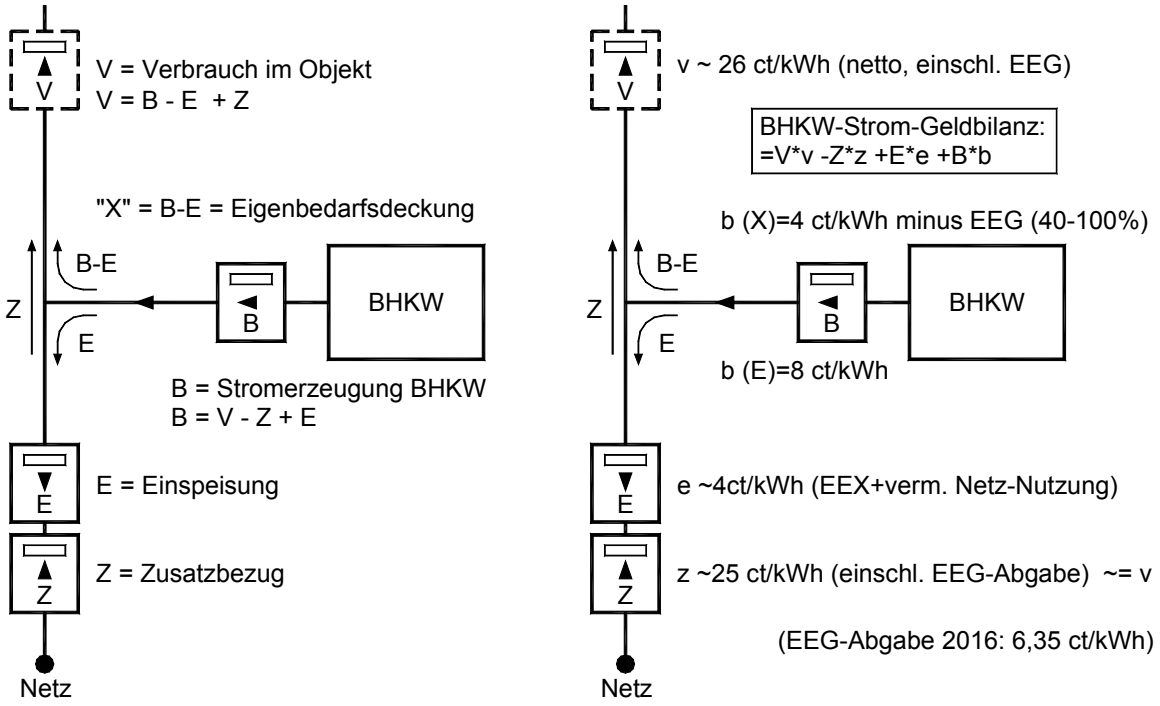
Um der tatsächlichen Strombedarfsdeckung näher zu kommen, wird noch eine zweite Berechnung durchgeführt, bei der angenommen wird, dass der Strombedarf während des BHKW-Betriebs und der Stillstandzeiten jeweils den Verlauf der Jahresdauerlinie hat. Dieses lässt sich nur schwer grafisch darstellen, sodass hier das Vorstellungsvermögen gefragt ist.

Weiterhin lässt sich annehmen, dass zwischen dem Wärmebedarf und dem Strombedarf doch ein gewisser Zusammenhang besteht. So wird in den Nachtstunden bei kleinerem Wärmebedarf (Nachtabsenkung) auch der Strombedarf geringer sein. Außerdem liegt der Strombedarf im Wohnbereich in den Sommermonaten um ca. 20% niedriger als im Winter.

Mit diesen Überlegungen wird aus den Berechnungen der maximalen Strombedarfsdeckung und der statistisch gleichmäßig verteilten Strombedarfsdeckung der Mittelwert gebildet. Die Berechnungen zeigen, dass die beiden Werte gar nicht so weit auseinander liegen und man so der tatsächlichen Stromeigenbedarfsdeckung recht nahe kommt.

Erfahrungen aus vielen bestehenden Anlagen haben bestätigt, dass die „Prognose“ mit den tatsächlichen Werten gut übereinstimmt.

Strombilanz beim Gegenrechnungsmodell



Strombilanz und „BHKW- Strom-Geldbilanz“ (Gegenrechnungsmodell)

Wenn die Strom-Eigenbedarfsdeckung bekannt ist, die hier aus mathematischer Gewohnheit „X“ genannt wurde, lassen sich die weiteren Größen leicht berechnen. Wenn von der BHKW-Stromerzeugung B „X“ abgezogen wird, erhält man den Stromanteil der vom BHKW-Strom ins Netz eingespeist wird (Einspeisung „E“). Wenn von dem Stromverbrauch „V“ die Eigenbedarfsdeckung abgezogen wird, erhält man den Zusatzstrombezug Z (Z= V-X).
Mit X=B-E wird somit Z=V-(B-E) = V-B+E. Durch Umstellung dieser Formeln lässt sich aus jeweils drei Größen die vierte Größe errechnen.

BHKW- Strom-Geldbilanz (neues KWK-Gesetz 2016)

Für die Wirtschaftlichkeit eines BHKW ist die Vergütung des vom BHKW erzeugten Stromes die wichtigste Größe. BHKW „veredeln“ einen Teil des eingesetzten Brennstoffes (meist Erdgas) zu etwa 30% in wertvollen Strom. Die Wertigkeit der Energie spiegelt sich auch in den Preisen wieder. Erdgas kostet ganz grob 6 ct/kWh, die Stromtarifpreise liegen zurzeit bei 26 ct/kWh (ohne MwSt.).
Aus der Differenz von der Stromvergütung und den Brennstoffkosten muss beim BHKW die Investition und die Wartung finanziert werden.

Die Berechnung des Strompreises, der dem BHKW gutgeschrieben werden kann, ist leider recht kompliziert. Als Beispiel soll für die Darstellung ein Objekt angenommen werden, in dem ein BHKW unter 50 kW elektrischer Leistung (wie im Möhringsberg) installiert ist. Für BHKW mit höherer Leistung gelten andere Bedingungen. Der BHKW-Betreiber soll hier vereinfacht „BHKW“ genannt werden. Die Strom-Einnahmen und Ausgaben errechnen sich für den „BHKW-Strom-Geldtopf“ nach der Formel:

$$\mathbf{BHKW_{Geld} = V \cdot v - Z \cdot z + E \cdot e + B \cdot b}$$

(Die großen Buchstaben sind die Strommengen, die kleinen Buchstaben die Strompreise)

v ist der Strompreis der sonst (ohne BHKW) an das Energieversorgungsunternehmen (EVU) zu zahlen wäre (Vollbezug).
z ist der Strompreis für den Zusatzstrombezug, der meist etwa gleich oder etwas niedriger dem Strompreis für den Vollbezug ist oder sein sollte.
e ist der Vergütungspreis für den ins Netz eingespeisten Strom. Dieser Preis richtet sich nach dem an der Leipziger Strombörse EEX gehandelten Strompreisen. Dazu kommt noch ein Zuschlag von ca. 1 ct/kWh für vermiedene Netznutzungsgebühren.
b ist ein Zuschlag von 5,41 ct/kWh, der nach dem Kraftwärmekopplungsgesetz 2014 (KWK-G) für 10 Jahre ab Betriebsbeginn für BHKW unter 50 kW elektrischer Leistung bezahlt wird.

Mit dem KWK-G 2016 wurde dies (**b**) im Detail geändert: Nun gibt es für den vom BHKW erzeugten Strom (B) einen Zuschlag von 8 ct/kWh für den BHKW-Strom-Anteil, der ins Netz eingespeist wird (b (E)) und 4 ct/kWh für den Anteil, der im Objekt verbraucht wird (b(X)). X=B-E. Die Förderdauer beträgt nun 60.000 BHKW-Betriebsstunden (Bh) statt 10 Jahre.
Aktuell soll nun für den BHKW-Stromanteil, der im Objekt verbraucht wird (X-B-E) EEG-Abgabe bezahlt werden und zwar ab 2017 40% der jeweils gültigen EEG-Abgabe, wenn es sich um „Eigenverbrauch“ handelt und 100% EEG-Abgabe, wenn es sich nicht um Eigenverbrauch handelt. Die Definition von „Eigenverbrauch“ ist so kompliziert, dass dies in einem eigenen Abschnitt (zumindest ansatzweise) behandelt wird.

Für eine genaue Rechnung müssen noch die jeweiligen Zählergebühren und gegebenenfalls Ablese- und Abrechnungskosten für eigene Unterzähler berücksichtigt werden.
Richtig kompliziert wird es, wenn der bisherige Vollbezug und der neue Zusatzbezug nicht nur nach Arbeitspreisen, sondern auch nach Leistungspreisen berechnet werden. Eine detaillierte Darstellung würde hier zu weit führen.
Zu berücksichtigen ist außerdem, ob der BHKW-Betreiber privat oder gewerblich ist. Ein gewerblicher Betreiber bekommt für den eingespeisten Strom auch die Mehrwertsteuer ausbezahlt.

Die oben dargestellten Zähler für die Einspeisung (E) und den Zusatzstrombezug (Z) sind „offizielle“ Zähler des jeweiligen EVU bzw. Netzbetreibers. Neu hinzugekommen ist mit dem am 1.1.2009 in Kraft getretenen KWK-Gesetz der Zähler für den BHKW-Strom (B). Vorher wurde der Zuschlag von 5,11 ct/kWh nur auf den ins Netz eingespeisten Strom (E) bezahlt. Nun gibt es diesen Zuschlag auf den *gesamten* vom BHKW erzeugten Strom (B) - s. oben.

BHKW- Stromvergütung

Wie gezeigt wurde, ist die Vergütung des BHKW-Stromes recht kompliziert und kann in verschiedenen Objekten sehr unterschiedlich sein. Hier sollen nur die „Extremfälle“ kurz beschrieben werden.

Strom-Volleinspeisung:
Wenn der komplette BHKW-Strom ins Netz eingespeist wird (Volleinspeisung), wird dieser Strom mit dem EEX-Preis und dem Zuschlag von 8 ct/kWh vergütet. Der EEX- Preis liegt zurzeit (einschließlich der vermiedenen Netznutzungsgebühren) bei 3,8 ct/kWh. Zusammen mit dem Zuschlag ergibt sich also eine BHKW-Stromvergütung bei Volleinspeisung von ca. 11,8 ct/kWh. Das KWK-G 2017 ist schon in Vorbereitung. Danach soll zukünftig auch die Anrechnung der „vermiedenen Netznutzung“ entfallen.

Wenn nach heutiger Rechtslage der Zuschuss von 8 ct/kWh nach 60.000 Betriebsstunden (das sind bei üblicher BHKW-Auslegung ca. 10 Jahre) entfällt, wird der BHKW-Strom nur noch nach den EEX- Preisen vergütet. Wie sich dieser Strompreis zukünftig entwickelt, kann nur vermutet werden. Wenn der Strompreis auf dem extrem niedrigen Niveau bleibt, können insbesondere kleinere BHKW mit einer Stromvergütung von 7 ct/kWh nicht wirtschaftlich betrieben werden, selbst wenn es das BHKW schon gibt und die Investition getätigt wurde. Wenn die Betriebskosteneinsparung im laufenden Betrieb negativ wird, müssten diese BHKW aus einzelwirtschaftlicher Sicht abgeschaltet- oder ein neues BHKW eingesetzt werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist dies nicht nachhaltig bzw. unsinnig, da die technisch-wirtschaftliche Lebensdauer von BHKW bei etwa 15 Jahren bzw. 80.000 Bh liegt.

Strom-Gegenrechnung:
Wenn der BHKW-Strom komplett im Objekt verbraucht wird, kann dem „BHKW“ einmal der Strompreis gutgeschrieben werden, der sonst an das EVU zu zahlen wäre. Bei Tarifkunden liegt dieser Preis zurzeit bei 26 ct/kWh ohne Mehrwertsteuer. Dazu kommt noch der Zuschlag von 4 ct/kWh für 60.000 Bh. Für die ersten 60.000 Bh beträgt die BHKW-Stromvergütung damit rund 30 ct/kWh. BHKW mit etwa 20kW elektrischer Leistung erzielen damit Amortisationszeiten um 2 Jahre, was fast einer „Lizenz zum Gelddrucken“ nahe kommt. Nach Wegfall des Zuschusses sinkt die Vergütung des BHKW-Stromes auf den Tarif-Bezugspreis, womit immer noch ein wirtschaftlicher BHKW- Betrieb gut möglich ist.

Bei Objekten, bei denen nur ein Teil des BHKW-Strom selbst verbraucht wird, oder wo die „normalen“ Strombezugspreise niedriger sind, liegt die effektive BHKW-Stromvergütung irgendwo zwischen den beschriebenen Extremwerten.

Der ökologische Effekt der BHKW ist von der Stromvergütung unabhängig.

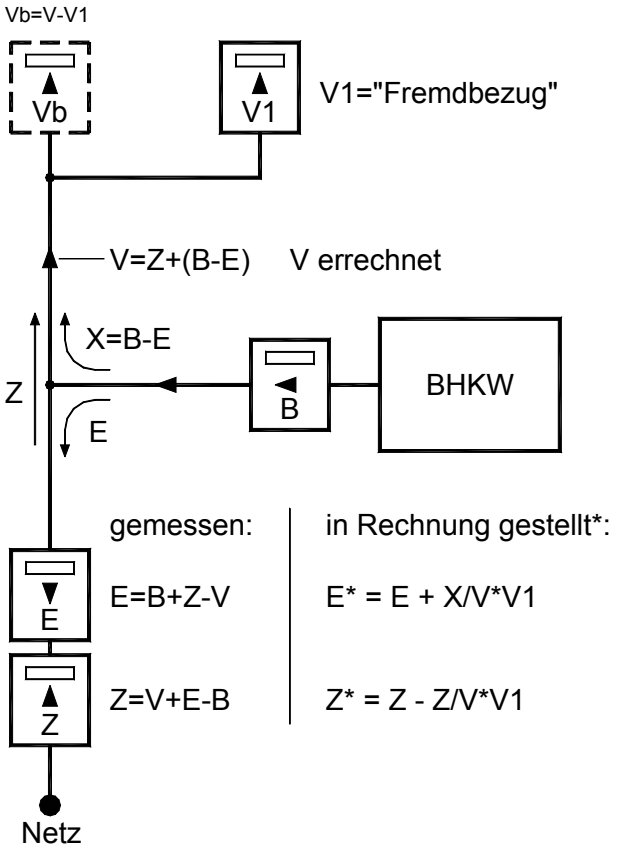
Kaufmännische Abrechnung / Bilanzierung

Wie gezeigt wurde, ist die BHKW-Strom-Volleinspeisung unattraktiv bis unwirtschaftlich. Insbesondere im Wohnbereich ist die Strom-Gegenrechnung schwierig, da Hausbesitzer oder Wohnungsbaugesellschaften ihre Mieter (im Bestand) nicht zwingen können, den Strom vom „BHKW“ (BHKW-Betreiber) zu beziehen.

Nach dem KWK-Gesetz 2014 ist nun (wie auch schon vorher beim EEG) eine „kaufmännische Abrechnung“ oder „kaufmännische Bilanzierung“ möglich. Dieses ermöglicht, dass sich nicht alle Mieter in dem BHKW-Stromverbund beteiligen müssen und einige Mieter ihren Strom von einem EVU ihrer Wahl beziehen können. Dies ist zwar für den BHKW-Betrieb ungünstiger, als wenn 100% aller Mieter „mitmachen“ würden; es ermöglicht jedoch den wirtschaftlichen Betrieb von BHKW, wenn sich nur ein größerer Teil der Mieter an der BHKW-Versorgung beteiligt.

Daher ist die „kaufmännische Bilanzierung“ insbesondere für Hauseigentümer ein hoch interessantes Modell zum wirtschaftlichen Betrieb von BHKW.

Wie in der nachfolgenden Skizze dargestellt ist, wird der Stromverbrauch der „Fremdstrombezieher“ bilanziell aus Einspeisung und Zusatzbezug herausgerechnet.
Gezeigt wurde schon, dass sich der Stromverbrauch im Objekt (V) aus den Anteilen der Strombedarfsdeckung (X=B-E) und dem Zusatzstrombezug (Z) zusammensetzt V=Z+(B-E). Damit lässt sich nun, zumindest bilanziell, errechnen welchen Anteil die „Fremdbezieher“ vom BHKW-Strom verbraucht haben und welcher Anteil über den Zusatzstrom gedeckt wurde.



Kaufmännische Abrechnung – Bilanz

Die Zähler Z, E, B und V1 sind „offizielle“ Zähler. Damit kann X= B-E errechnet werden.
Der Stromverbrauch V setzt sich zusammen aus Z und X= B-E also V= Z+(B-E).

Der Anteil der von V1 vom BHKW-Strom gedeckt wurde, kann damit zu X/V•V1 und der Anteil des Zusatzbezuges zu Z/V•V1 rechnerisch ermittelt werden.

Der Anteil der von V1 vom BHKW gedeckt wurde, wäre „sonst“ ins Netz eingespeist worden.
Der Anteil der von V1 vom Zusatzstrom gedeckt wurde, hätte „sonst“ nicht bezogen werden müssen.

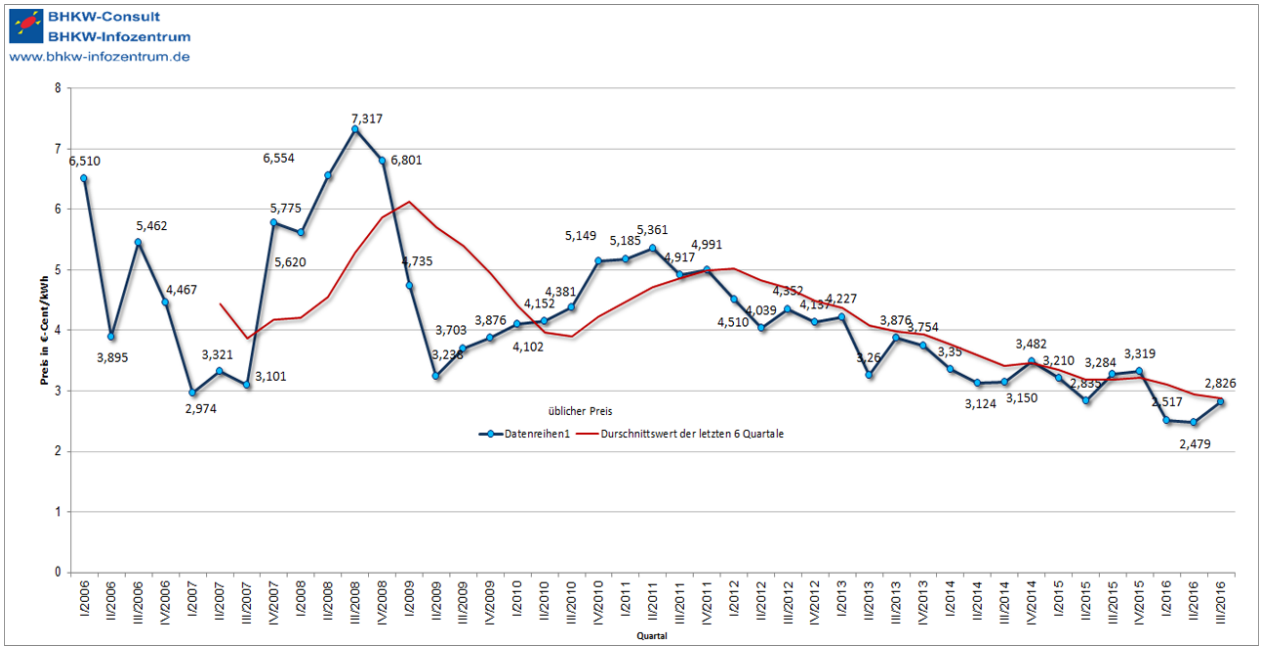
Diese Anteile werden auf die gemessene Einspeisung addiert, bzw. vom gemessenen Zusatz-Strombezug abgezogen.

Dem BHKW- Betreiber wird somit der Zusatzbezug Z* = Z – Z/V•V1 in Rechnung gestellt und die Einspeisung E* = E + X/V•V1 vergütet.

Die Zusammenhänge sind zwar auf den ersten Blick etwas kompliziert, sie lassen sich jedoch schon in einer einfachen Excel-Tabelle schnell und übersichtlich errechnen.
Diese Berechnung hat auch nicht der BHKW-Betreiber zu bewerkstelligen. Dieses ist Aufgabe des jeweiligen Netzbetreibers.

Strompreise der Leipziger Strombörse EEX:

Die vier großen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) *müssen* den Strom von Eigenerzeugungs-Anlagen in ihr Netz aufnehmen. Diesen Strom verkaufen sie ganz oder teilweise an der Leipziger Strombörse EEX. Dabei kann es den ÜNB weitgehend „egal“ sein, welchen Strompreis sie dabei erzielen. Die Differenz zur Stromvergütung für die Eigenerzeugungsanlagen und dem EEX-Preis wird als EEG-Abgabe von den kleinen Endverbrauchern ausgeglichen. Dieser Mechanismus hat dazu geführt, dass die EEX-Preise (auch „üblicher Preis“ genannt) in den letzten Jahren im Mittel kontinuierlich gefallen sind.

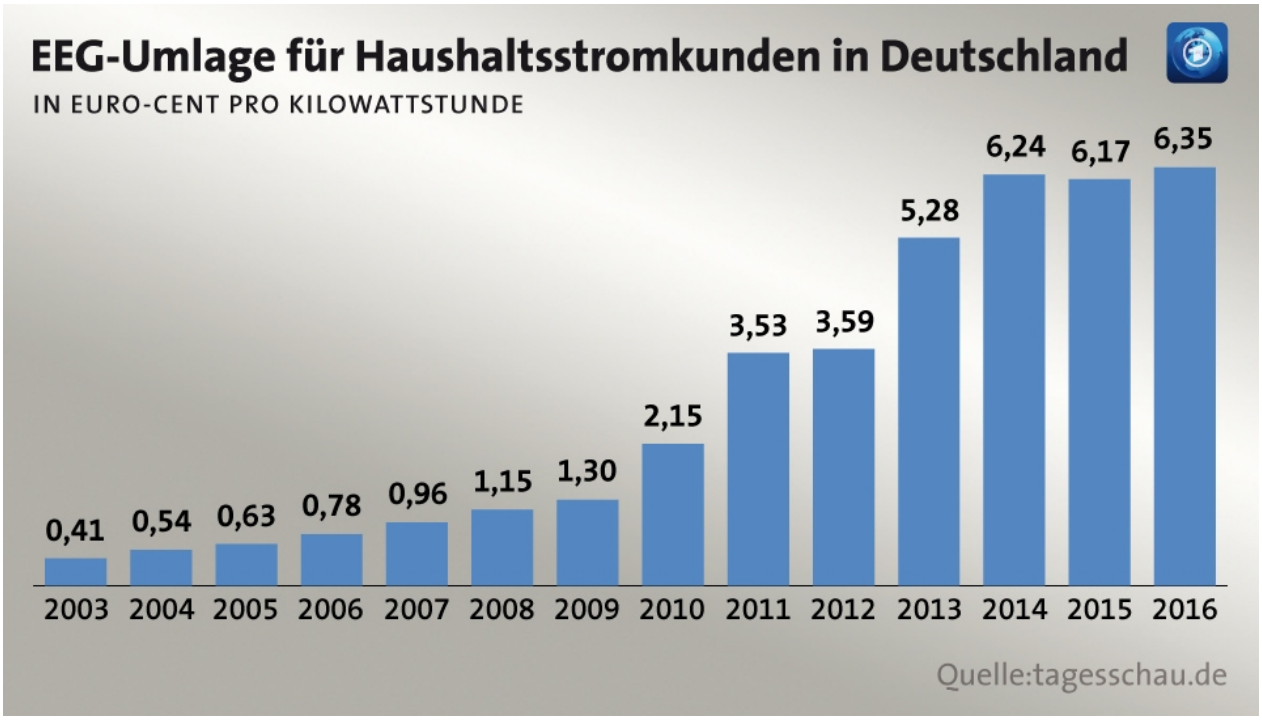


Strompreise der an der Leipziger Börse EEX gehandelten Strommengen

Der EEX-Preis beträgt aktuell 2,826 ct/kWh.
Zu diesem Preis haben auch die großen Kraftwerksbetreiber Probleme, Strom zu erzeugen. So hat z.B. RWE seine Stromerzeugungssparte „ausgelagert“. Braunkohle-Kraftwerke laufen „in der Grundlast“, während hocheffiziente Gaskraftwerke mit Fernwärmenutzung noch „in der Spitzenlast“ betrieben werden. Trotz zunehmendem Anteil der Stromerzeugung mit regenerativen Anlagen, von zurzeit etwa 30%, ist der CO2-Ausstoß in Deutschland kaum gesunken – obwohl große Teile CO_2 intensiver Produktion nach China +Co verlagert wurden.

EEG-Umlage – Wer ist Eigenversorger?

Die EEG-Umlage hat sich seit 2003 mehr als verzehnfacht.



Die Höhe der EEG-Abgabe ist auch darin begründet, dass große Stromverbraucher, wie Aluminiumwerke, aber auch Supermärkte und z.B. die hannoverschen Verkehrsbetriebe „Üstra“ von der EEG-Umlage befreit wurden, damit sie sich im internationalen Wettbewerb behaupten können.

Um die Höhe der EEG-Umlage einigermaßen in „den Griff zu bekommen“, sollen nun auch Betreiber von Eigenversorgungsanlagen EEG-Abgabe „auf den vom selbst erzeugten Strom selbst verbrauchten Strom“ EEG-Abgabe bezahlen.
Wenn es sich um Eigenbrauch handelt, sollen 40% der jeweils gültigen EGG-Abgabe, sonst 100% der EEG-Umlage abgeführt werden.
Für so genannte Altanlagen gibt es Ausnahme-Regelungen.

Was ist nun genau Eigenverbrauch oder Eigenversorgung?
Dies ist auch für das Projekt Möhringsberg sehr interessant.

Dazu gibt es aktuell (Juli 2016) von der Bundesnetzagentur einen „Leitfaden zur Eigenversorgung“. Die auf 135 Seiten dargestellten Bedingungen können hier nicht im Detail

diskutiert werden. Nachfolgend sollen nur einige Grundbegriffe und die „Denkweise“ des Leitfadens grob erläutert werden:

Das Schlüsselwort zur Eigenversorgung ist erst einmal „Personenidentität“.

Der „Leitfaden“ definiert dies an Beispielen genauer – mit der Herrschaft über die Endverbraucher (Geräte) – und das wirtschaftliche Risiko dazu:

In einem Hotel oder Krankenhaus hat der BHKW-Betreiber „Herrschaft / Verfügungsgewalt“ über die Endverbraucher. Wenn die Hotelgäste oder Patienten z.B. einen eigenen Wasserkocher mitbringen, wird dies als vernachlässigbar angesehen.
Bei Hotels oder Krankenhäusern sind nach dieser Definition Erzeuger und Verbraucher „personenidentisch“ und müssen danach keine (Altanlagen) oder den verringerten Satz von 40% EEG-Abgabe auf den selbst verbrauchten Strom abführen.

Bei Altenheimen oder Studentenheimen sieht der „Leitfaden“ dies anders. Hier hätte der Betreiber mehrheitlich *keine* Herrschaft über die Endverbraucher.

Das ist rechtlich sicherlich ein sehr schmaler Grat.

Für den Möhringsberg könnte man eventuell argumentieren, dass der überwiegende Teil des Stromverbrauchs in der Herrschaft und im wirtschaftlichen Risiko des BHKW-Betreibers liegt. (Zum Beispiel Strom für zentrale Lüftungsanlagen, Küchen in den Gemeinschaftsräumen, Gemeinschafts-Waschmaschinen, Flurbeleuchtung, EDV und Pumpen der Heizungsanlage.)

In dem Objekt Möhringsberg werden die Wohnungen „warm und hell“ vermietet. Es gibt keine Strom-Unterzähler. Damit trägt hier der BHKW-Betreiber das wirtschaftliche Risiko des Strom-Endverbrauchs (wie z.B. in Hotels).
In dem „Leitfaden“ sind jedoch Beispiele aufgeführt, nach dem die Definition des Eigenverbrauchs davon *un*abhängig ist, ob es Strom-Unterzähler gibt oder nicht.

Das ist alles in sich nicht schlüssig oder logisch.

Für das Objekt Möhringsberg ist die Höhe der EEG-Abgabe bisher nicht eindeutig geklärt. Wahrscheinlich wird es ohne einen Rechtsanwalt, der sich in dieser „Materie“ auskennt, nicht zu klären sein.

Fazit zur BHKW-Stromvergütung:

Insbesondere für kleine BHKW unter 50kW elektrischer Leistung sind die Regelungen insgesamt viel zu kompliziert – und verhindern letztlich den Einsatz der umweltfreundlichen BHKW. Dies gilt hier auch für die im Bau befindliche Photovoltaik-Anlage.
Wie noch gezeigt wird, kommt beim BHKW dazu, dass es die Möglichkeit der Erdgassteuer-Rückerstattung für das vom BHKW verbrauchte Erdgas gibt. Weiterhin gibt es verschiedene Investitionskosten–Zuschüsse und günstige KfW-Kredite.

Auf der einen Seite werden BHKW gefördert, in dem es u.a. für den selbstverbrauchten Strom einen Zuschuss von aktuell 4 ct/kWh gibt. Für denselben Stromanteil soll jetzt mehr

oder weniger EEG-Umlage abgeführt werden. („linke Tasche – rechte Tasche“) Bei EEG–geförderten Photovoltaik-Anlagen ist das inhaltlich noch weniger einsichtig.

Eine Lösung wäre, den Zuschlag nach KWK-G für den selbstverbrauchten Strom und die EEG-Abgabe auf denselben Stromanteil (sowie die Erdgassteuer-Rückerstattung) ganz zu streichen – und dafür den Zuschlag für die Strom-Einspeisung zu erhöhen und die Förderdauer zu verlängern. Dann könnten auch BHKW mit Strom-Volleinspeisung wirtschaftlich betrieben werden und würden dann sicherlich in deutlich größerem Umfang eingesetzt.

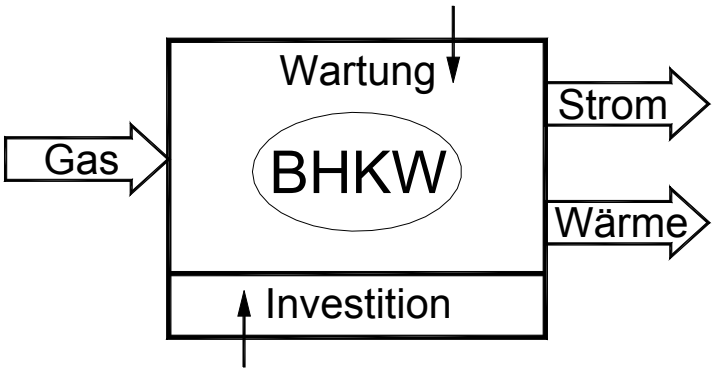
Erwähnt seien in diesem Zusammenhang noch das „Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz“ (EEWärmeG) und die Energieeinsparverordnung (EnEV).
Nach dem EEWärmeG *müssen* bei Neubauten erneuerbare Energien oder BHKW eingesetzt werden. Nach der EnEV gibt es unter bestimmten Bedingungen äußerst lukrative KfW-Mittel. Diese können so günstig sein, dass sich ein BHKW schon bei dessen Kauf amortisiert hat. Wenn BHKW nach 60.000 Bh stillgelegt werden, ist diese Förderung nicht nachhaltig.

Insgesamt zeichnet sich ab, dass die heutige Konstruktion aus „freiem“ Stromhandel an der Strombörse (EEX) und insbesondere dem EEG kein Modell für die Zukunft ist, wenn der Anteil der erneuerbaren und rationellen Stromerzeugung auf 80% oder mehr gesteigert werden soll. Eine Lösung wäre, die Kohlekraftwerke mit einer CO2-Abgabe zu belasten. Dadurch würde der Strompreis an der Börse steigen – und die EEG-Abgabe automatisch sinken, da die Differenz aus den geförderten EEG-Stromvergütungen und dem Börsenpreis sinkt.

BHKW- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die größten Hürden für eine BHKW-Wirtschaftlichkeitsrechnung sind nun überwunden.
Zunächst wurde ein BHKW ausgewählt und errechnet, wie viele Stunden dieses BHKW bei dem Wärmebedarf des Objektes im Jahr in Betrieb sein wird.
Außerdem wurde errechnet bzw. erläutert, welche BHKW-Stromvergütung mit „hoher Wahrscheinlichkeit“ zu erreichen ist (V, -Z, E, B).

Nun gilt es nur noch die **BHKW- Gesamtbilanz** zu erstellen:



Wenn man die komplizierte BHKW-Stromvergütung zunächst als einen Block betrachtet, gehen in die eigentliche BHKW-Wirtschaftlichkeitsbilanz bzw. BHKW-Betriebskosten-Einsparung folgende Größen ein:

Negativ: Brennstoff- bzw. Erdgaskosten
Positiv : Erdgassteuer-Rückerstattung (0,55 ct/kWhHs)
Positiv : Einnahmen aus Strombilanz (V, -Z, E, B)
Positiv : Wärmegutschrift („sonst“ mit Heizkessel zu erzeugen)
Negativ: Wartungskosten (Vollwartung)

Summe: BHKW- Betriebskosten-Einsparung pro Jahr (Euro/a)

Die Berechnung erschließt sich weitgehend von selbst.
Eine Besonderheit ist, dass für das vom BHKW verbrauchte Erdgas die Erdgassteuer von 0,55 ct/kWh bezogen auf den Brennwert (Hs), bzw. 0,61 ct/kWh bezogen auf den Erdgas-Heizwert (Hi) auf Antrag von den jeweiligen Zollämtern zurückerstattet wird.

Einschub: Brennwert / Heizwert:
Die Energieversorgungsunternehmen berechnen den Energieinhalt des Gases bezogen auf den Brennwert (damit die Gaspreise „freundlicher“ aussehen).
Die Kessel- und BHKW-Hersteller geben die Wirkungsgrade bezogen auf den Heizwert des Gases an (damit die Wirkungsgrade „freundlicher“ aussehen).

Erdgas besteht im Wesentlichen aus Methan CH4. Wie noch näher gezeigt wird, ergibt sich bei der Verbrennung mit Sauerstoff:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{Energie}$$

Wenn der entstehende Wasserdampf H_2O kondensiert, wird dabei maximal etwa 10% der im Erdgas gebundenen Gesamtenergie zusätzlich frei. Dieser Gesamtenergieinhalt in kWh/m³ der Brennstoffe wird Brennwert (Hs oder früher Ho) genannt.
Ohne die Kondensationswärme ergibt sich der Heizwert (Hi oder früher Hu).
Für hannoversches Erdgas gilt: Hi = 0,901 • Hs.

In diesen Definitionen liegt der Grund, weshalb Brennwertkessel theoretisch einen Wirkungsgrad von ca. 110% erreichen können. (s.a. Kapitel „BHKW-Auswahl“)
Hier wird in den Berechnungen der Heizwert angesetzt und der Erdgaspreis auf den Heizwert umgerechnet. Die Kessel- und BHKW-Wirkungsgrade werden, wie auch von den Herstellern angegeben, ebenfalls bezogen auf den Heizwert angesetzt.

Im Anschluss zu diesen Erläuterungen ist eine komplette BHKW-Wirtschaftlichkeits-Betrachtung für das Projekt Möhringsberg dokumentiert. Dies sind Auszüge aus einem Excel-Programm zur Auslegung und Wirtschaftlichkeitsrechnung von BHKW. Das Programm kann kostenlos von der Homepage des energiekontors heruntergeladen werden. Hier wird eine etwas „einfachere“ Version verwendet, bei der alle Eingaben und errechneten Werte auf einer Seite dargestellt werden. Damit ist nur die Berechnung von *einem* BHKW-Modul möglich. Eine ähnliche Software gibt es auch über die Homepage von Fa. Kraftwerk

Dabei handelt es sich um eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des *BHKW*. Es wird nicht die Gesamtanlage betrachtet, sondern nur, ob es wirtschaftlich sinnvoll ist, zusätzlich in ein BHKW zu investieren.

Für die Berechnung der Betriebskosteneinsparung werden real, also gemessen an der Kaufkraft; konstante Preise angenommen. Oft werden ähnliche Berechnungen mit prozentualen Energiepreissteigerungen durchgeführt. Nach den Erfahrungen der letzten Jahre, kommt dieses eher einem „Kaffeesatzlesen“ gleich. Zurzeit sind Preissenkungen beim Erdgas und Preiserhöhungen beim Strom absehbar. Beides würde die Wirtschaftlichkeit von BHKW verbessern. Diesen Trend fortzuschreiben, wäre sehr wahrscheinlich schlicht falsch. Sinnvoller ist, die realen Preise in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nach „Glauben“ zu variieren, um so den Einfluss dieser Parameter zu untersuchen.

Neben den Strompreisen ist in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch die Bewertung der BHKW-Wärme sehr wichtig. Die Wärme wird so bewertet, als käme sie „sonst“ aus dem Heizkessel. Der Wärmepreis errechnet sich so aus dem Gaspreis (Hi) geteilt durch den Kesselnutzungsgrad (Hi). Damit geht der Kesselnutzungsgrad stark in die Bewertung der Wärme ein.
Damit wird deutlich, dass die BHKW-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein *Vergleich* zu der alternativen, „normalen“ Energieversorgung ist. Im *Vergleich* zu einem Brennwertkessel schneidet daher das BHKW schlechter ab, als zu einem alten NT-Kessel.

Noch wichtiger ist sicherzustellen, dass das BHKW während der angesetzte Lebensdauer von z.B. 10 oder 15 Jahren auch „ordentlich läuft“. Wie schon im Kapitel „BHKW-Auswahl““ deutlich angesprochen, ist es fast immer sehr empfehlenswert einen Vollwartungsvertrag mit dem BHKW-Hersteller, schon zusammen mit dem Kauf des BHKW abzuschließen. Der Vollwartungsvertrag sollte alles enthalten, was für den langjährigen Betrieb des BHKW notwendig ist.

Die Berechnungen gehen davon aus, dass das BHKW immer optimal eingesetzt wird und der Spitzenkessel nur zugeschaltet wird, wenn es wirklich notwendig ist. BHKW tun das nicht irgendwie „von allein“. Dazu ist in der Regel intelligente Steuerungstechnik notwendig, die das Gesamtsystem entsprechend organisiert. (s. Kapitel „übergeordnete Steuerung“).

In diesem Zusammenhang ist auch eine sinnvolle hydraulische Einbindung des oder der BHKW-Module wichtig. Fast immer ist der Einsatz eines Pufferspeichers sinnvoll um Verbrauchsspitzen abzufangen. Dies wurde in den Kapiteln „Hydraulik“ und „Pumpen“ ausführlich beschrieben.

Amortisationsrechnung (Barwertmethode)

Wenn, wie oben gezeigt wurde, die BHKW- Betriebskosteneinsparung (pro Jahr) errechnet ist, gilt es noch einen Vergleich von Betriebskosteneinsparung und Investitionskosten vorzunehmen.

Die einfachste Methode ist die Amortisationszeit, in dem die Investitionskosten einfach durch die Betriebskosteneinsparung geteilt werden. Für eine genauere Betrachtung sind dabei noch die Kapitalkosten (Zinsen) zu berücksichtigen.

Aussagekräftiger ist in der Regel die sogenannte Barwert- oder Kapitalwertmethode.
Bei der Barwertmethode werden auf den *negativen* Barwert der Investition die jährlichen Betriebskosteneinsparungen addiert. Durch die Kapitalkosten (Zinsen), sind später erzielte Einnahmen weniger Wert als frühere Einnahmen.
Von dem nominalen Zinssatz wird die Inflationsrate abgezogen (im Detail etwas komplizierter), womit man, wie bei der Berechnung der Betriebskosteneinsparung, reale, inflationsbereinigte Werte erhält.

Mit diesen Ansätzen ist der Barwert der Gewinn, bewertet auf den Tag der Investition.

Die Entwicklung der Barwerte wird in der Wirtschaftlichkeits-Betrachtung grafisch dargestellt. Die Investition hat sich amortisiert, wenn der Barwert Null wird (Schnittpunkt mit der Zeitachse).

BHKW-Investitionskosten und Zuschüsse

Das 16 kWel (G16) BHKW hat mit Zubehör, Montage und Inbetriebnahme ca. 45.000 Euro (netto) gekostet. Die übrigen Kostenanteile lassen sich z.T. nur schätzen, da sie Teil des Gesamtumfangs waren. Bei der Steuerungstechnik kann man nur „mit Gefühl“ sagen, welcher Anteil dem BHKW „angelastet“ werden sollte bzw. kann.
Angesetzt wurden für die BHKW-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung folgende Investitionskosten:
Hydraulische BHKW-Einbindung in das Gesamtsystem: 1.500 Euro, Pufferspeicher mit Leitungen: 3.500 Euro. BHKW-Elektro-Anschluss und BHKW-Zähler: 2.000 Euro. Steuerungstechnik anteilig: 5.000 Euro. Das ergibt zusammen 57.000 Euro (netto).

Die Planung einer solchen Anlage sollte nie ohne Fachplaner, oder zumindest mit kompetenter Beratung, durchgeführt werden. Dafür wurden für das BHKW anteilig 5.700 Euro angesetzt. Als Zuschuss vom hannoverschen enercity-Fonds „proklima“ wurden für das brennwertfähige BHKW 5.000 Euro angenommen.

Daraus ergeben sich BHKW-Gesamt-Investitionskosten von 57.700 Euro (netto).

In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden die Investitionskosten netto – ohne MwSt. eingesetzt. Dann müssen auch alle anderen Kosten und Preise ohne MwSt. eingesetzt werden. Für die Amortisationszeit macht es keinen, oder nur ganz im Detail einen kleinen, Unterschied, ob mit oder ohne MwSt. gerechnet wird.

In der nachfolgen BHKW-Auslegungs- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stehen leider ganz viele Zahlen, die jedoch zum allergrößten Teil erläutert wurden. Die Eingabewerte sind in blau dargestellt.

Die wichtigsten Eingangsgrößen sind zunächst die im Kapitel „Energiebedarf-Möhringsberg“ dargestellten Wärme- und Stromverbräuche des Objektes.

Für die EEG-Abgabe wurden 40% angesetzt. Bei einer EEG-Abgabe von 100% würde die jährliche Betriebskosten-Einsparung und ca. 2.000 Euro geringer und die Amortisationszeit um ca. 2 Jahre erhöht.

BHKW-Wirtschaftlichkeitsrechnung - Übersicht

hier nur für ein BHKW-Modul !

Objekt: **Möhringsberg** **blau: Eingabewerte**

2016 MwSt: ohne EEG-Abg.: **40%** BHKW: **Kraftwerk G16+** Anzahl: **1**

nur **1** !

1

KWK-Zuschlag für **60.000** Vollbenutzungsstunden

entspricht 10,12 Jahren

Objekt-Daten:	kWh/a	Pmax/PØ	MIN
Stromverbrauch	**69.264**	6,0	5,0
Wärmebedarf	**272.161**	**4,0**	2,0
Wärme-Bedarfsdauer / a (WBD):		8.760	h/a

BHKW-Daten:	14,7 KWel ~Empfehlung		
Betriebsstunden:	**5.932**	Bh (Auslegung-termisch)	
	kW (Hu)	η (Hu)	kWh/a
Strom (Pel):	**16,0**	31,5%	94.907
Wärme (Pth):	33,8	66,5%	200.359
Strom+Wärme:	49,8	98,0%	295.266
Brennstoff/Gas:	50,8	100,0%	301.291
Kessel - gewählt:	120,0	95,0%	71.802
Kessel-Mindestleistung:	90,5		26,4%

	BHKW-Bilanz	kWh/a	ct/kWh(Hu)	**€/a**
-	Gas BHKW	301.291	6,161	18.563
+	Erdgassteuer-Rück	301.291	0,6105	1.839
+	**Strom-Summe**	94.907	*19,94*	18.926
+	Wärme (sonst Kessel)	200.359	6,485	12.994
-	Voll-Wartung BHKW	94.907	3,250	3.084
	Betriebskosten-Einsparung BHKW/a:			**12.113**
	BEa nach 10,1 Jahren (ohne B-Zuschlag):			**6.559**
		0	Kontrolle:	6.559

	Strom-Bilanz	kWh/a	ct/kWh	**€/a**
+	**V**-Verbrauch	69.264	26,600	18.424
-	**X=B-E** (EEG-Abgabe)	50.982	2,540	1.295
-	**Z**-Bezug (Netz)	18.282	*26,600*	4.863
+	**E**-Einspeisung-EEX	43.925	2,826	1.241
	E2 Verm. Netznutz.	43.925	1,060	466
+	**B-Z**uschlag Eigenv.(KWKG)	50.982	4,000	2.039
+	**B-Z**uschlag Einsp.(KWKG)	43.925	8,000	3.514
-	Strom-Abrechnung intern (Ansatz)			600
	B=V-X-Z+E+BZ		**Summe-Strom:**	18.926
			nach 10,1 Jahren:	13.373

BHKW-Wirtschaftlichkeit

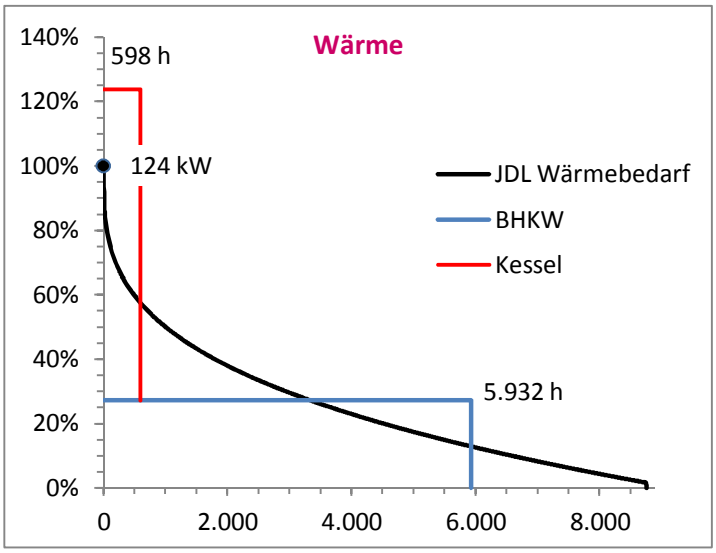
BHKW-Investition:	**57.700**	Euro
Zinsfaktor i	3,0%	
Inflation g	1,0%	
Betrachtungszeitraum	15	Jahre

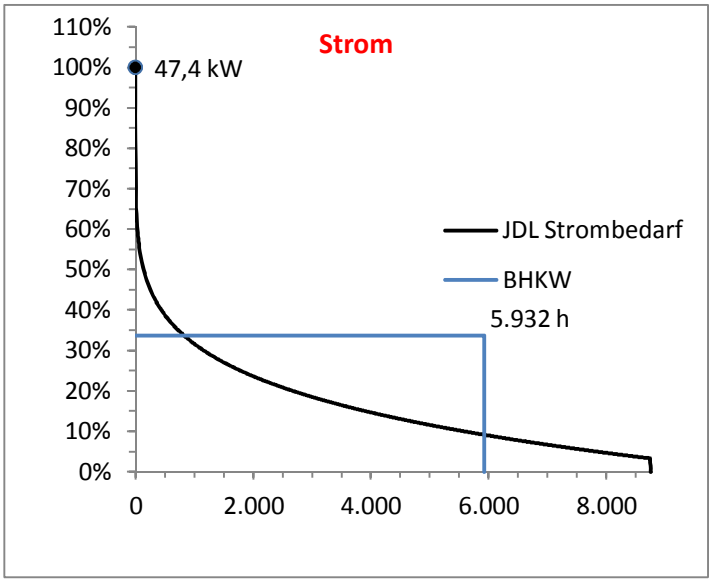
Ergebisse:

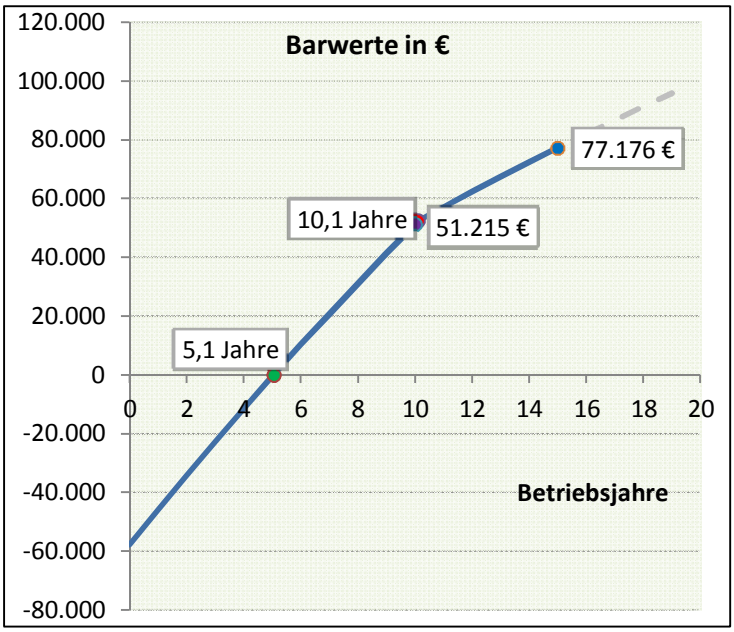
Amortisation mit Kap.Kosten:	**5,1**	Jahre
Barwert nach **10** Jahren	**51.215**	Euro
Barwert nach **15** Jahren	**77.176**	Euro

BHKW-Ökobilanz

CO_2-Einsparung:	**64.342**	**kg CO_2/a**
	51,6%	
Primärenergie-Einsparung:	**159.367**	**kWh/a**
	34,6%	





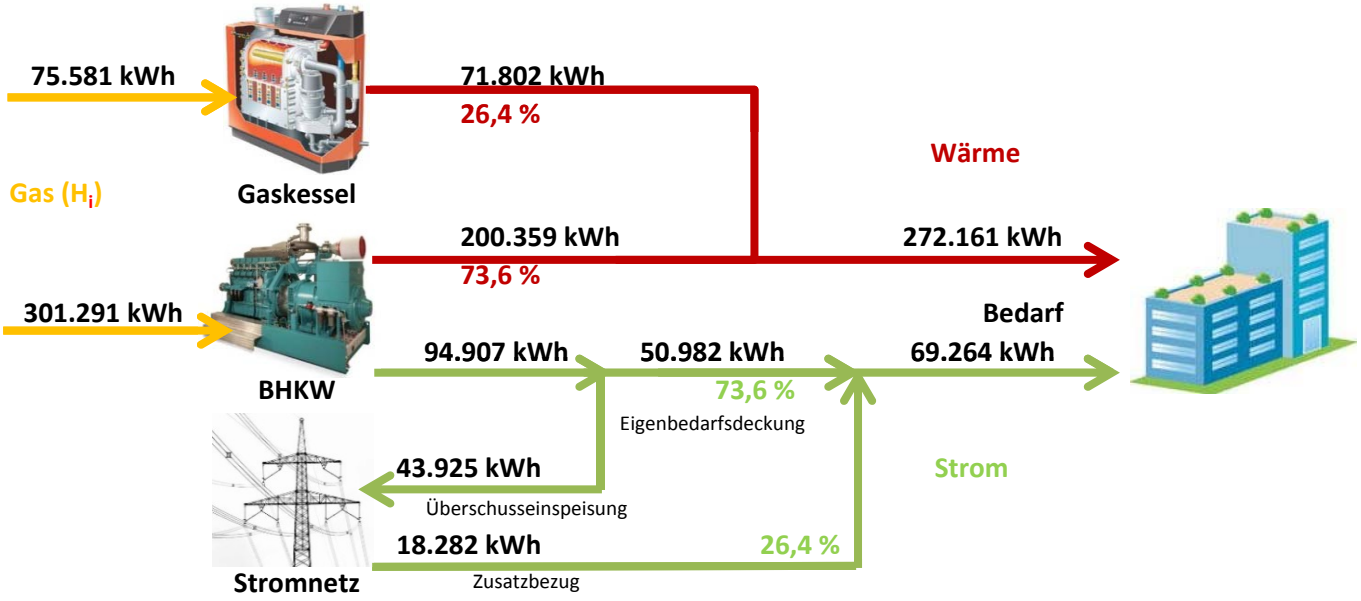


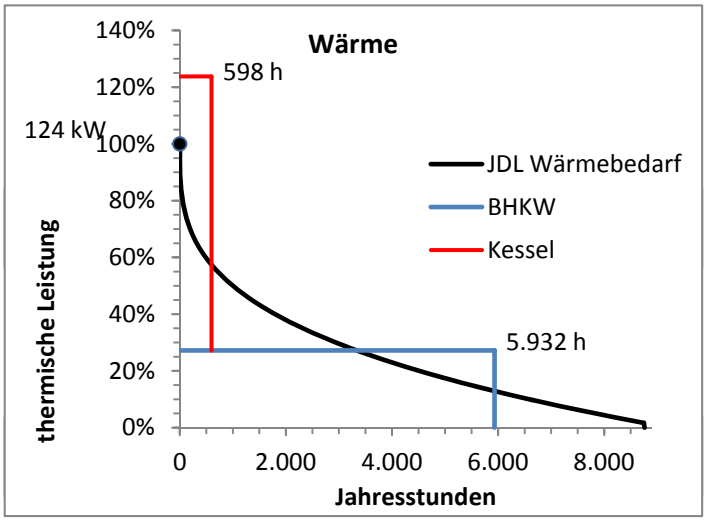
BHKW und Spitzenlastkessel mit Stromeigenverbrauch

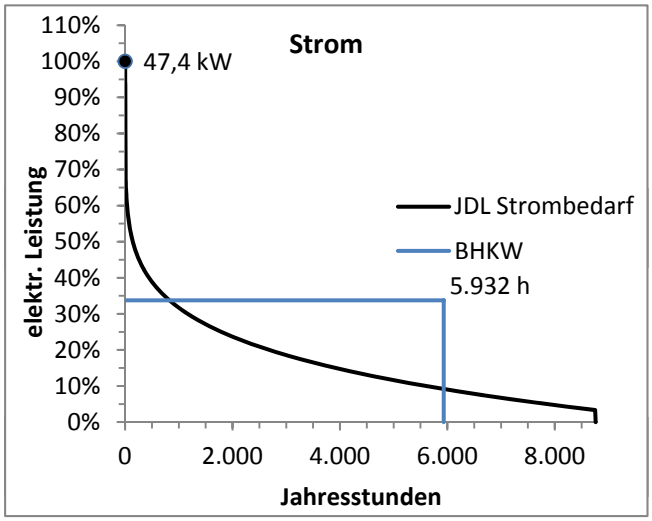
Objekt: Möhringsberg

Jahreswärmebedarf: 272.161 kWh
Heizlast ($P_{th,max}$): 124,3 kW
Jahresstrombedarf: 69.264 kWh

Kraftwerk G16+







Bedarfsdeckung durch BHKW:

Wärme:	73,6%	200.359 kWh
Strom:	73,6%	50.982 kWh

CO_2-Einsparung:	**64.342 kg CO_2/a**
	51,64 %
Primärenergie-Einsparung:	**159.367 kWh**
	34,60 %

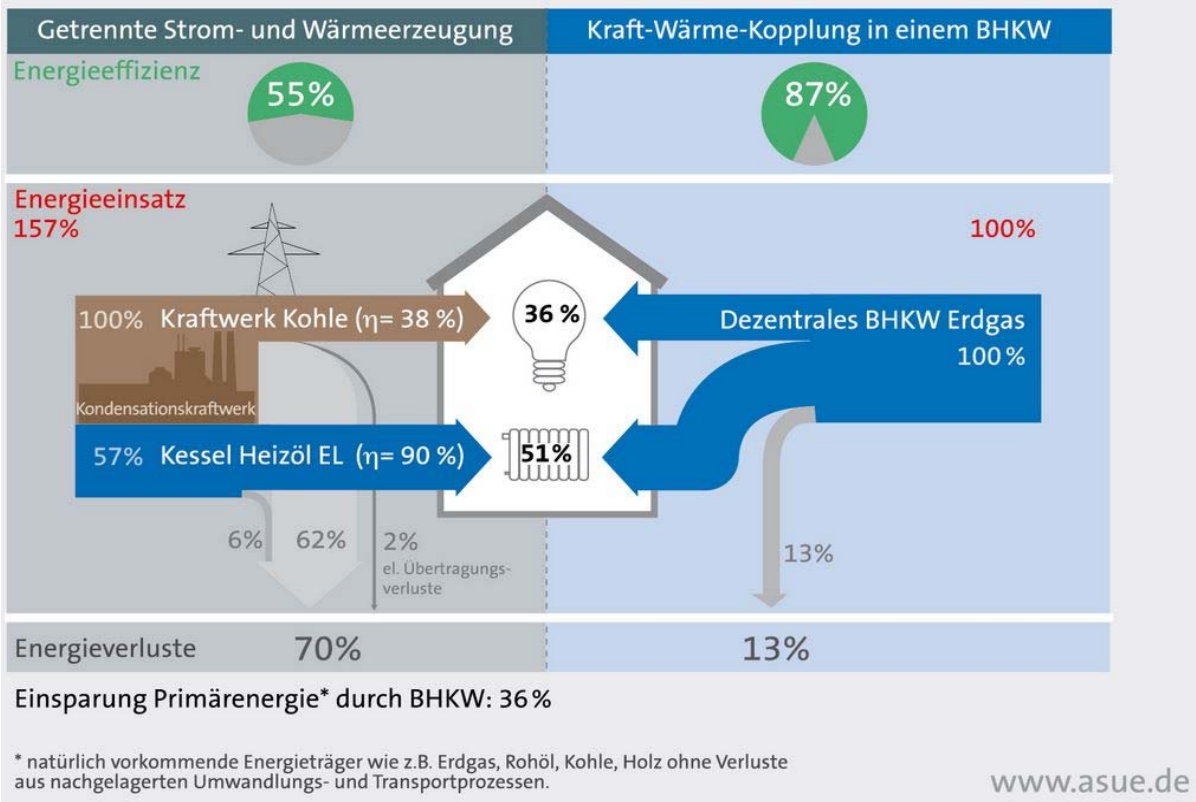
Kessel:	P_{th} (kW)	η (H_i)
Typ?	120	0,95

BHKW:	P_{el} (kW)	P_{th} (kW)	η_{el} (H_i)	η_{th} (H_i)	Betr. stunden
Kraftwerk G16+	16	33,8	0,315	0,665	5932

Energie- und CO2-Einsparung durch BHKW-Einsatz

Möhringsberg Kraftwerk G16+

Vergleich der kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung durch BHKW mit Stromerzeugung in konventionellen Kohle-Kondensationskraftwerken (ohne KWK) und Wärmeerzeugung durch modernen Gaskessel



Primärenergieeinsatz

konventionell/ getrennt

	kWh (el/th)	η (el/th)	kWh prim
Großraftwerk	94.907	0,38	249.755
Gaskessel	200.359	0,95	210.904
Summe:			**460.659**

BHKW

	kWh (el/th)	η (el/th)	kWh prim
Strom (el)	94.907	0,315	96.844
Wärme (th)	200.359	0,665	204.448
BHKW ges.	295.266	0,98	**301.291**

Primärenergie-Einsparung: 159.367 kWh prim = **34,6%**

CO_2-Emissionen

konventionell/ getrennt

	kWh prim.	kg CO_2/kWh	kg CO_2
Großraftwerk	249.755	0,33	82.419
Gaskessel	210.904	0,20	42.181
Summe:			**124.600**

BHKW

	kWh prim.	kg CO_2/kWh	kg CO_2
BHKW ges.	301.291	0,2	**60.258**

CO_2-Einsparung: 64.342 kg CO_2/a = 51,6%

Ergebnisse der BHKW-Auslegung und Wirtschaftlichkeits-Prognose

Das 16 kW-BHKW wird Jahres-Betriebsstunden von knapp 6.000 Stunden (Bh) erreichen.
Da die BHKW-Nennleistung angesetzt wurde, das BHKW jedoch leistungsregelbar ist, werden die tatsächlichen BHKW-Betriebsstunden höher sein.

Die BHKW-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist wohlgemerkt eine Prognose. Wenn der tatsächliche Wärmebedarf höher ist als angesetzt, wird dies die Laufzeit des BHKW verlängern. Wenn der tatsächliche Strombedarf niedriger ist als angesetzt, würde sich die Wirtschaftlichkeit verschlechtern.

Das Merlin-Steuerungssystem hat eine Funktion, dass die Leistung des BHKW nach dem Strombedarf geregelt wird, wenn die notwendige Hauptkreis-Vorlauf-Temperatur erreicht ist. Das kann die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessern.

Mit den angesetzten Werten errechnen sich eine Amortisationszeit von rund 5 Jahren und ein Barwert nach etwa 10 Jahren von über 50.000 Euro. Das entspricht einer effektiven Verzinsung von mehr als 15%.

Nach dem 10ten Betriebsjahr wird die Steigung der Barwertkurve geringer. Das liegt daran, dass die Zuschläge auf die Stromerzeugung entfallen. Die Steigung wird jedoch nicht Null oder negativ. Das bedeutet, dass sich der Betrieb des BHKW auch dann noch „rechnet“. Bei Strom-Volleinspeisung würden die Steigung der Barwertkurve und die BHKW-Betriebskosten-Einsparung negativ. Aus wirtschaftlicher Sicht müsste das BHKW dann sofort abgeschaltet werden – obwohl die Investition schon getätigt wurde.

Auf dem zweiten Blatt sollen die Zusammenhänge von Strom-Bezug, Einspeisung und Eigenverbrauch etwas anschaulicher dargestellt werden.

Das dritte Blatt zeigt den ökologischen Vorteil des BHKW bezüglich der Primär-Energie und CO2-Einsparung im Vergleich zu einer „üblichen“ Energieversorgung. (Gaskessel und Strombezug aus Kohlekraftwerken).

Bei Windkraft oder Photovoltaik-Anlagen ist leicht einsichtig, warum diese (fossile) Energie und CO_2 einsparen.

Bei Blockheizkraftwerken ist das viel schwieriger. Dem Gerät sieht man nicht an, dass es Energie- und CO_2 einspart. Dies lässt sich nur durch einen *Vergleich* von einem BHKW mit der üblichen Strom- und Wärmeerzeugung erklären.

Das Projekt Möhringsberg kann mit der Kombination aus Passivhaus, BHKW und Photovoltaik – und dazu mit „ausgeklügelter“ Hydraulik und moderner Steuerungstechnik als Vorzeige- oder „Leuchtturm-Projekt“ bezeichnet werden.
Deshalb gingen die bisherigen Darstellungen weit über einen normalen Qualitäts-Sicherungsbericht hinaus.

Um die Darstellungen abzurunden, soll auf den nächsten Seiten zum Abschluss gezeigt werden, warum eigentlich BHKW Energie und CO_2 einsparen.

Wieso sparen Blockheizkraftwerke Energie und CO_2?

(Kraft-Wärme-Kopplung, Energiewertigkeit)

Eine der wichtigsten Grundlagen der Physik ist der Energieerhaltungssatz (erster Hauptsatz der Thermodynamik). Danach kann die Energie zwar ihre Form ändern, aber grundsätzlich *nicht* vernichtet werden.

Wieso gibt es dann ein Energieproblem?

Es muss offensichtlich noch ein anderes Merkmal der Energie geben.
Dies ist die Energiewertigkeit. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt die Energiewertigkeit über die Grenzen der Umwandlung von der einen in die andere Energieform.
Anschaulich wird dies, wenn man bedenkt, dass unsere Umwelt bei Null Grad Celsius immer noch rund 273 Kelvin über dem absoluten Temperatur-Nullpunkt liegt. Die darin gespeicherte Energie ist zwar nicht wertlos, denn sie ermöglicht erst das Leben auf der Erde; sie kann jedoch nicht dazu benutzt werden, mechanische oder elektrische Energie zu erzeugen.

Um **Wärme** in mechanische Energie umzuwandeln, sind Temperaturen notwendig, die (deutlich) über der Umgebungstemperatur liegen.
Der thermische- oder Carnot- Wirkungsgrad η_{th} gibt den höchstmöglichen Wert an, die eine Wärmekraftmaschine dabei erreichen kann.

$$\eta_{th} = \frac{T - T_U}{T} = 1 - \frac{T_U}{T}$$

T_U = Umgebungstemperatur

T = Temperatur der thermischen Energie (Wärme)

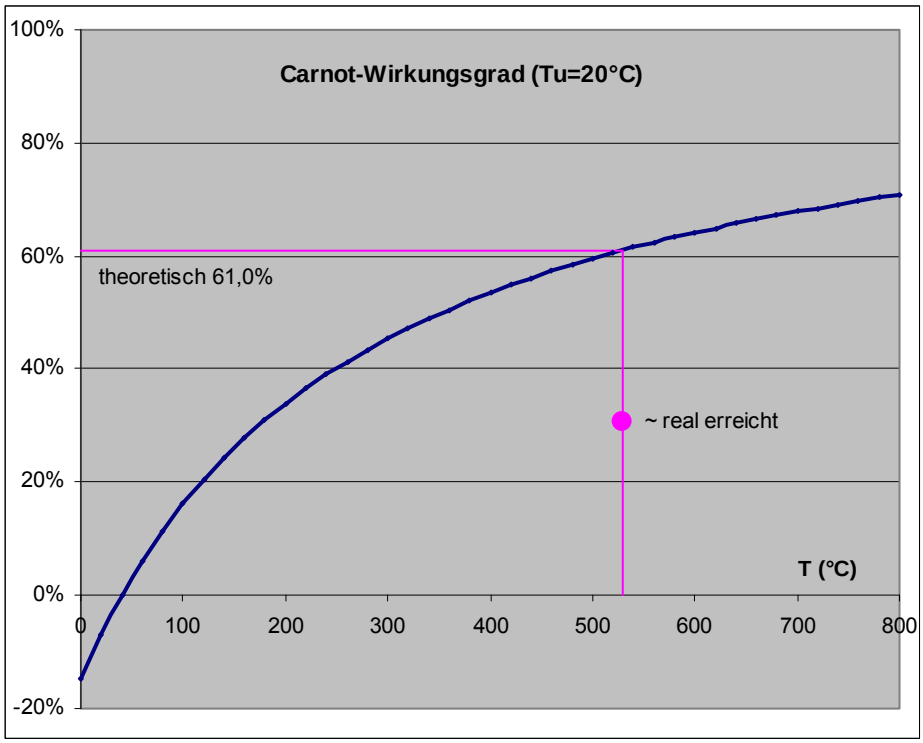
Der Carnot- Wirkungsgrad wird demnach umso größer, je höher die Temperatur der eingesetzten Wärme über der Umgebungstemperatur liegt. Somit ist diese Temperaturdifferenz ein Maßstab für die Wertigkeit der Energie.

Diese Zusammenhänge lassen sich auch „anders herum“ verdeutlichen:
Mit elektrischer Energie (lax: „Strom“) lassen sich theoretisch beliebig hohe Temperaturen erreichen. Damit ist Strom eine sehr wertvolle Energieform. In der Physik sagt man, Strom ist voll reversibel oder besteht aus 100% Exergie. Umweltwärme ist Anergie.

Energie = Exergie + Anergie.

Mit Strom lässt sich, mit geringem technischem Aufwand, eine Badewanne voll warmen Wassers bereiten. Mit diesem warmen Wasser kann jedoch mit keiner Maschine wieder Strom erzeugt werden. Die hohe Wertigkeit der Energie (Exergie) wurde vernichtet.
„Energie-Verbrauch“ müsste eigentlich / genauer „Exergie-Verbrauch“ heißen.

Diese theoretischen Zusammenhänge haben entscheidenden Einfluss auf die Realität unserer Energieversorgung und deren ökologischer Auswirkungen.
Der größte Teil der deutschen Stromproduktion wird noch über Wärmekraftprozesse erzeugt. Mit der eingesetzten Primärenergie (Kohle, Uran, Gas, Öl) können insbesondere über Dampfprozesse nur Temperaturen um etwa 500 °C erreicht werden.



Carnot- Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperatur der thermischen Energie

Wie das Diagramm mit dem eingezeichneten Beispiel zeigt, beträgt der mögliche Carnot-Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Wärmeenergie in hochwertige Energie (Strom, Exergie) bei einer Temperatur von 530 °C und einer Umgebungstemperatur von 20 °C maximal 61%.
Durch eine Vielzahl von technischen Gründen werden in der Praxis nur Wirkungsgrade von rund 36% erreicht. Die höchsten elektrischen Wirkungsgrade von etwa 50% erreichen Kombinationsanlagen mit Gasturbine und nachgeschaltetem Dampfprozess (GUD) oder sehr große Dieselmotoren.

Der Rest der eingesetzten Primarenergie fällt als Abwärme an, die meist über Kühltürme und/oder Flüsse an die Umwelt abgegeben wird. Die Wärmemengen sind so riesig, dass insbesondere bei Atomkraftwerken die Kühltürme die größten Bauwerke sind.
(s. nachfolgende Fotos).

Mit der Abwärme der bundesdeutschen Kraftwerke ließe sich der gesamte deutsche Heizwärme-Bedarf decken. Hier liegt die Idee der „zentralen Kraft-Wärme-Kopplung“; diese (Ab)-Wärme über Fernwärmesysteme zu nutzen. Da Fernwärmeleitungen relativ teuer sind, bzw. lange Amortisationszeiten haben, ist dieses nur bei ca. 10% aller Wärmekraftwerke realisiert. In Hannover liegt der Fernwärmeanteil an der gesamten Wärmeversorgung bei 25%.

Auf der anderen Seite werden große Mengen Gas und Öl zur Erzeugung von (niederwertiger) Heizwärme verbraucht. Hier liegt die Idee der „dezentralen Wärme-Kraft-Kopplung“, mit diesen Brennstoffen über Blockheizkraftwerke Strom zu erzeugen - und die auch dabei anfallende Wärme vor Ort zu Heizzwecken zu nutzen – vereinfacht gesagt:
Die Brennstoffe „doppelt zu nutzen“.

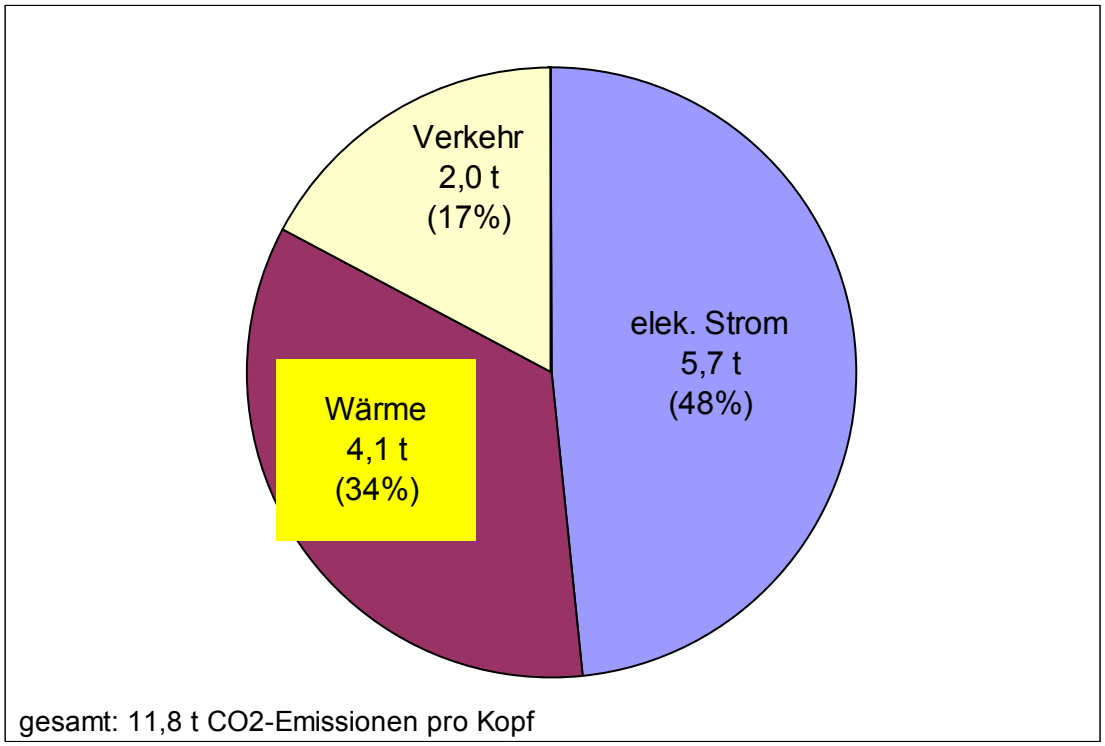
In Hannover wird rund 70% der Heizwärme mit Erdgas erzeugt. Bei einem Einsatz in BHKW könnte damit mehr Strom erzeugt werden, als Hannover insgesamt verbraucht.

Kohlekraftwerk Hannover-Stöcken

Atomkraftwerk Grohnde

CO2-Einsparung durch dezentrale Wärme-Kraft-Kopplung

Das nachfolgende Diagramm aus der CO2-Bilanz für Hannover verdeutlicht eindrucksvoll, dass fast die Hälfte alle CO2-Emissionen durch den Stromverbrauch verursacht werden.



CO2-Emissionen 2005 in Hannover – in Tonnen pro Kopf

Wie qualitativ gezeigt wurde, ist die durch das Nutzungsprinzip der Kraft-Wärme-Kopplung erzielbare Primärenergieeinsparung erheblich.

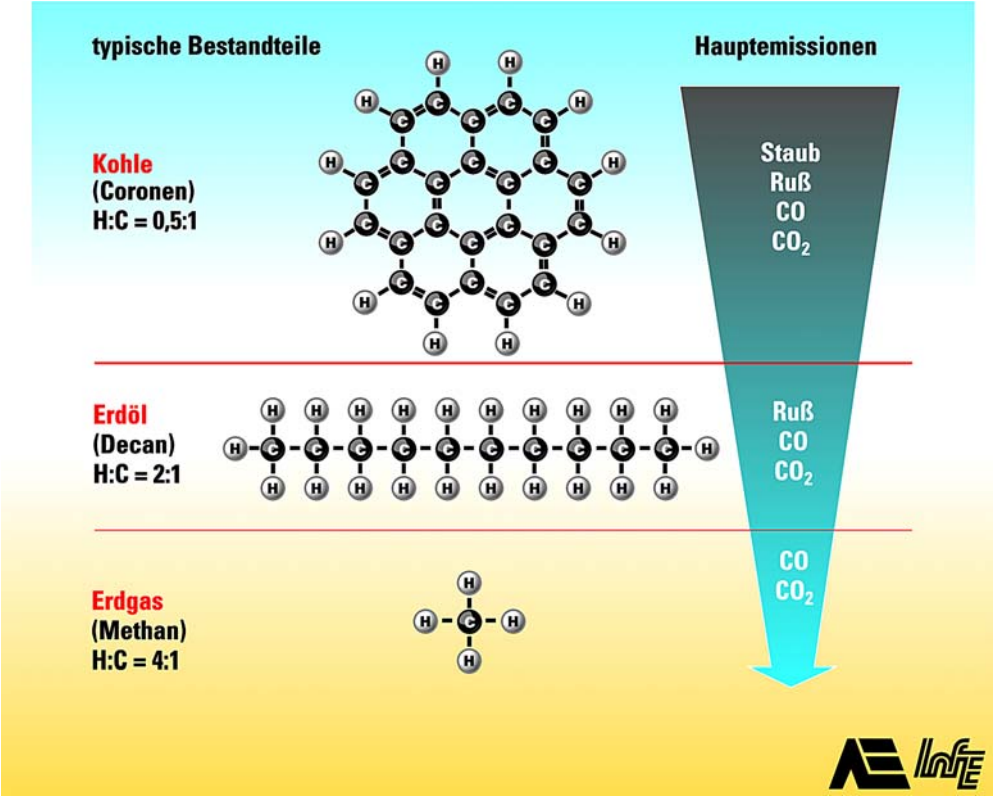
Wenn das für die Wärmeerzeugung „ohnehin“ verbrauchte Erdgas in BHKW eingesetzt würde, ist die erzielbare CO_2- Einsparung noch deutlich höher als die Energieeinsparung:

Erdgas besteht im Wesentlichen aus Methan CH4 – also einem Anteil Kohlenstoff und vier Anteilen Wasserstoff. Bei der Verbrennung entstehen ein Anteil CO2 und zwei Anteile Wasser.

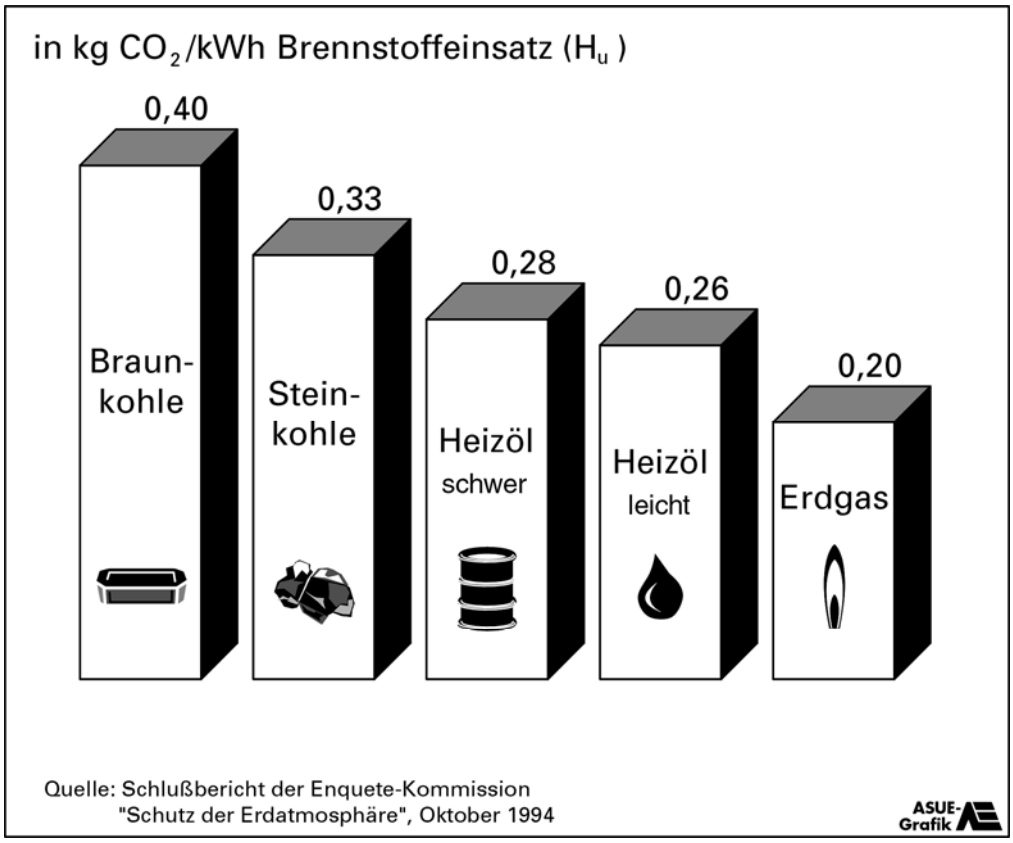
$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + \text{Energie}$$

Gegenüber der Verbrennung von Kohle, die im Wesentlichen aus Kohlenstoff besteht, wird beim Erdgas somit deutlich weniger CO_2 frei.

Diese Zusammenhänge, mit den spezifischen CO2-Emissionsfaktoren, sind in den beiden nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

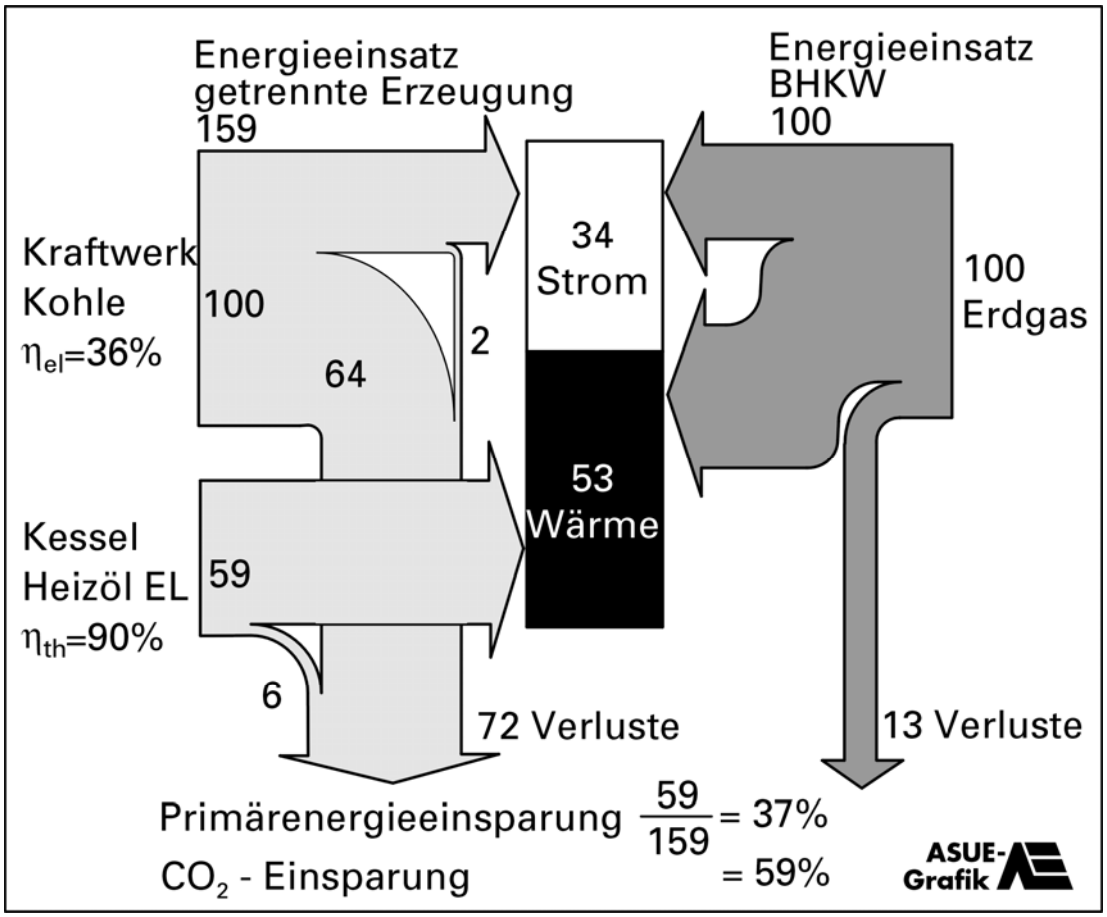


Bestandteile der Brennstoffe



CO2-Emissionen der Brennstoffe

Energie- und CO2-Einsparung durch BHKW:



Vergleich: Getrennte Strom- und Wärmeerzeugung - BHKW

Das obige Bild zeigt die Primärenergie- und CO2-Einsparung durch BHKW im Vergleich mit der getrennten Stromerzeugung in einem Kohle-Kondensationskraftwerk und der Wärme-Erzeugung mit einem Heizölkessel.

Dabei ergeben sich eine Primärenergieeinsparung von 37% und eine CO2-Einsparung von 59%.

Bei modernen (neuen) Kohlekraftwerken sind elektrische Wirkungsgrade über 40% erreichbar. Brennwert-Heizkessel können im realen Betrieb thermische Wirkungsgrade bis 100% (Hi) erzielen.

Aber auch bei BHKW ist die Entwicklung weiter gegangen. Moderne BHKW sind inzwischen ebenfalls brennwertfähig, so dass sie gleiche Gesamt-Wirkungsgrade wie Brennwertkessel erreichen.

Der elektrische Wirkungsgrad von BHKW ist erheblich von der Größe abhängig. Sehr kleine BHKW mit einer Leistung von etwa 5 kW erzielen nur elektrische Wirkungsgrade von ca. 26%. Bei einer elektrischen Leistung von 20kW werden schon 31% erzielt. Große Erdgas-BHKW liegen bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 40%.

Die tatsächliche CO2-Einsparung muss daher für jedes Objekt berechnet werden.