

Mikro-BHKW im Ein- und Zweifamilienhaus

Jahresbericht 2010

Kooperationsprojekt zwischen der
Energie Südbayern GmbH (ESB)
und der
Technischen Universität München (TUM),
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE)

München, 21.09.2011

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Josef Lipp

Dipl.-Ing. Johannes Jungwirth

Dipl.-Ing. Florian Sängler

Dipl.-Ing. Urs Wehmhörner

Dr.-Ing. Peter Tzscheutschler

Inhaltsverzeichnis:

1. Projektüberblick	3
2. Remeha eVita Stirling BHKW	4
3. Installation und Messtechnik.....	5
4. Typtaganalyse.....	7
4.1 Wintertag	7
4.2 Übergangstag	8
4.3 Sommertag	9
5. Jahresbetrachtung	10
6. Primärenergie- und CO ₂ -Einsparung.....	11
7. Zusammenfassung.....	13

1. Projektüberblick

Im Vergleich zu zentralen Stromerzeugungsanlagen besitzen insbesondere dezentrale Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK) Anlagen viele Vorteile. Der größte Vorteil ist die gemeinsame Erzeugung von Strom und Wärme. In konventionellen thermischen Kraftwerken entsteht sehr viel (meist ungenutzte) Abwärme. Im Gegensatz dazu wird in zentralen KWK-Anlagen die Abwärme größtenteils in Fernwärmenetze eingespeist. Der weitere Ausbau der Fernwärmenetze ist mit erheblichen Kosten verbunden und vor allem die Nachrüstung in bestehenden Siedlungen sehr aufwendig. Durch den geringen Wärmebedarf moderner Gebäude ist eine Wärmeversorgung von Neubaugebieten meist nicht wirtschaftlich. Hier eröffnen kleine dezentrale KWK Systeme neue Möglichkeiten. Sie bieten eine hocheffiziente Strom und Wärmeversorgung ohne Wärmenetz.

Der Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE) untersucht seit längerem Mini-Blockheizkraftwerke (BHKW) mit ca. 5 kW elektrischer Leistung, die in Mehrfamilienhäusern, kleinen Gewerbebetrieben oder in Mischgebäuden eingesetzt werden. Diese Leistungsklasse ist jedoch zu groß für Ein- und Zweifamilienhäusern, so dass dieses enorme Einsatzpotential für KWK bisher nicht genutzt werden konnte. Demzufolge wurde in den letzten Jahren an verschiedenen Technologien gearbeitet um die KWK für diesen Gebäudebereich verfügbar zu machen.

In diesem Projekt wurden vier Gebäude mit eVita Stirling BHKW der Firma Remeha ausgestattet und hinsichtlich Zuverlässigkeit, Einfluss des hydraulischen Einbaus, energetischer Effizienz und Stromnutzung untersucht. Die Gebäude befinden sich im Versorgungsgebiet der Energie Südbayern GmbH in Pfaffenhofen, Hohenlinden, Bruckmühl und Oberau (vgl. **Abbildung 1**). Die Gebäude wurden anhand der Größe, des Gebäudealters (> 15 Jahre), des Wärme- und Strombedarfs und der Bewohneranzahl ausgewählt. Um den Einfluss der hydraulischen Einbindung abschätzen zu können wurden zwei Wärmeverbrauchsgruppen mit jeweils einem von zwei möglichen Speichertypen (siehe Kapitel 3) ausgestattet. Die dem Lehrstuhl im Vorfeld genannten Daten sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.



Abbildung 1: Standorte der Mikro-BHKW

Tabelle 1: Gebäudedaten

	Pfaffenhofen	Hohenlinden	Bruckmühl	Oberau
Gebäudefläche [m ²]	210	150	198	137
Bewohner	4	5	4	4
Wärmeverbrauch [kWh]	25.000	25.000	32.000	32.000
Stromverbrauch [kWh]	6.000	4.000	5.200	7.000
Installierter Speichertyp	Kombispeicher	Warmwasserspeicher	Kombispeicher	Warmwasserspeicher
Zirkulation	vorhanden	vorhanden	vorhanden	vorhanden

2. Remeha eVita Stirling BHKW

Für die Messungen wurden Mikro BHKW der Firma De Dietrich Remeha GmbH (**Abbildung 2**) verwendet. **Tabelle 2** zeigt die technischen Daten des Geräts:

Tabelle 2: Daten eVita

Quelle: Remeha

Thermische Leistung Stirlingmotor	ca. 5	kW
Thermische Leistung Remeha eVita	ca. 24	kW
Elektrische Leistung	max. 1	kW
Maße (Höhe x Breite x Tiefe)	91 x 49 x 47	cm
Gewicht	110	kg



Abbildung 2: Remeha eVita

Das eVita Stirling BHKW weist, neben der kleineren thermischen Leistung, gegenüber den konventionellen verbrennungsmotorischen BHKW einige Unterschiede auf:

Da Mini- und Mikro-KWK-Analagen als Grundlastwärmeerzeuger dimensioniert werden, wird meist ein zusätzlicher Spitzenlastkessel benötigt. Dieser ist im Remeha Gerät bereits integriert. **Abbildung 2** zeigt den unten sitzenden Stirlingmotor (ca. 5 kW_{th}) und das darüberliegende konventionelle Gasbrennwertgerät (ca. 19 kW_{th}). Dies führt zu einer ausreichend großen Gesamt-

leistung, um Ein- oder Zweifamilienhäuser mit nur einem Gerät versorgen zu können. Darüber hinaus sind die Abmessungen und das Gewicht ähnlich wie bei handelsüblichen Gasthermen. Auf den ersten Blick nachteilig erscheint die gegenüber anderen KWK-Technologien kleinere Stromkennzahl (Verhältnis aus abgegebener elektrischer zu thermischer Leistung). Allerdings ist die angegebene elektrische Leistung (1 kW) immer noch deutlich höher als die Grundlast der betrachteten Gebäude.

3. Installation und Messtechnik

Um den Einfluss eines thermischen Speichers auf die BHKW-Laufzeit und Effizienz aufzuzeigen werden zwei unterschiedliche hydraulische Konfigurationen untersucht. **Abbildung 3** zeigt in der oberen Hälfte die Variante mit Kombispeicher, die in Pfaffenhofen und Bruckmühl installiert wurde. Dabei speist die Mikro-KWK-Anlage den Kombispeicher (Volumen: ca. 750 l), der Heizkreis inklusive Mischergruppe entnimmt die Wärme dem Speicher. Dadurch ist der Heizwärmeverbrauch vom BHKW entkoppelt. Die Warmwasserbereitung erfolgt im Durchlaufprinzip. Kal-

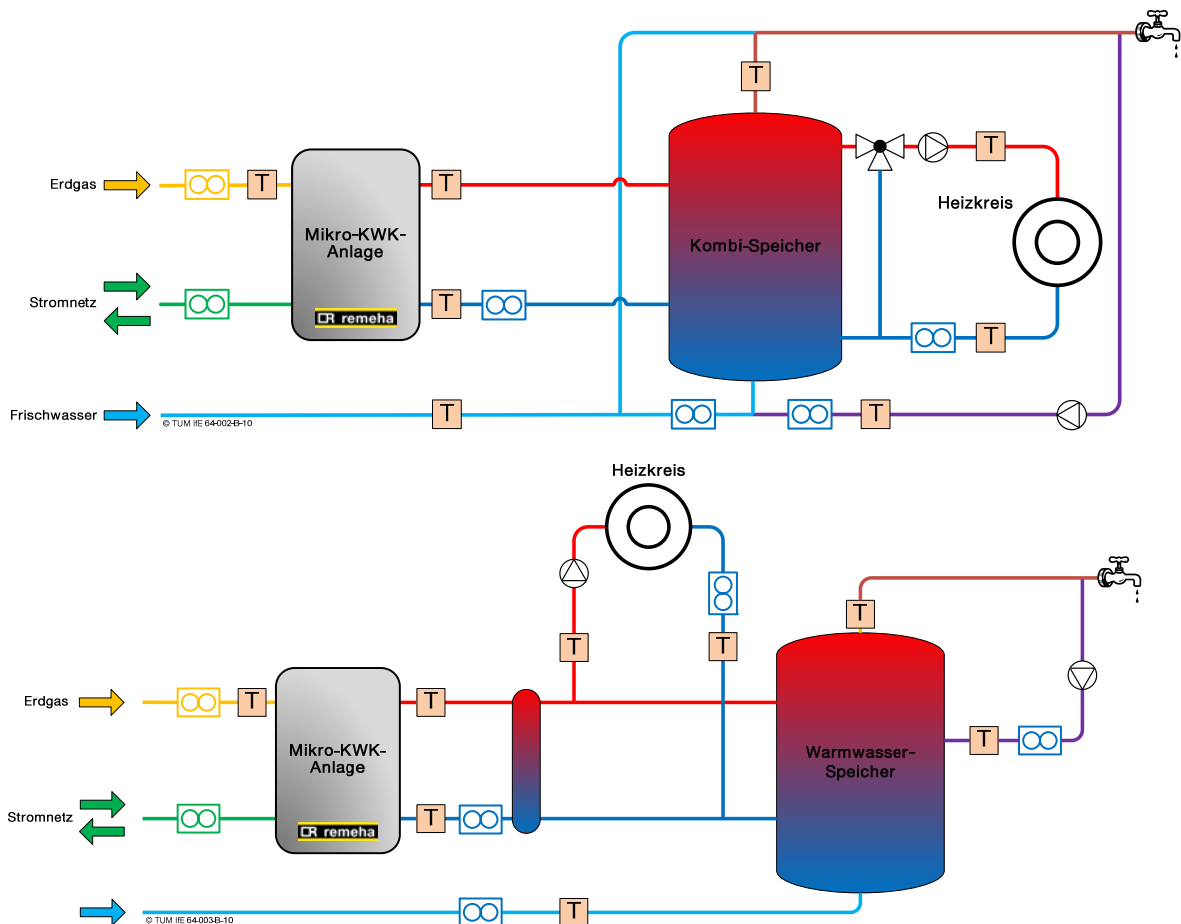


Abbildung 3: Hydraulik- und Messschema

tes Frischwasser durchläuft ein innen liegendes Wellrohr und wird dabei erhitzt. Die Zirkulationsleitung ist über eine Zirkulationslanze mit dem Wellrohr verbunden. Regelparameter hierbei sind ein am oberen Ende des Kombispeichers angebrachter Temperaturfühler für die Warmwassertemperatur und die Heizkreissolltemperatur.

In unteren Teil von Abbildung 3 ist die Konfiguration der Standorte Hohenlinden und Oberau zu sehen. Das BHKW ist direkt (über eine hydraulische Weiche) mit dem Heizkreis verbunden. Ein separater Warmwasserspeicher (Volumen: 200 l) wird über eine Warmwasservorrangschaltung bei Bedarf vom BHKW mit Wärme versorgt.

Weiterhin zeigt Abbildung 3 die installierten Wasser- (blau), Energie- (grün) und Erdgaszähler (gelb), die zusammen mit den integrierten Temperaturfühlern und der Messhardware und -software die Leistungsströme und Energiemengen in den untersuchten Gebäuden berechnen.



Abbildung 4: Kombispeicher und Warmwasserspeicher

Abbildung 4 zeigt die realen Anordnungen in Bruckmühl (oben) und Oberau (unten). In Bruckmühl ist links der Messrechner, in der Mitte der Kombispeicher inkl. Ausdehnungsgefäß und rechts das BHKW zu erkennen. Zwischen dem Messrechner und dem Speicher ist der IfE-Schaltschrank und ganz rechts der Heizkreismischer abgebildet. Im unteren Teil (Oberau) ist der Warmwasserspeicher, die Verteilung für Warmwasserspeicher und Heizkreis, die hydraulische Weiche und das BHKW zu sehen.

4. Typtaganalyse

Da die Mikro-BHKW-Laufzeiten stark von der Jahreszeit bzw. der Außentemperatur abhängen, ist es sinnvoll eine Ergebnisaussage mit Hilfe von Typtagen zu generieren. Dabei wird unterschieden zwischen Tagen, deren Tagesmitteltemperatur kleiner 5°C (Wintertag), zwischen 5°C und 15°C (Übergangstag) oder größer 15°C (Sommertag) ist.

Mittels Typtaganalyse soll auch der Einfluss des Speichertyps auf die BHKW-Laufzeit bzw. die Spitzenlastkesselzuschaltung untersucht werden. Da die Gebäude in Bruckmühl und Oberau in den Vorjahren einen ähnlichen Wärmeverbrauch hatten werden diese exemplarisch gegenübergestellt.

Die drei folgenden Diagramme (Abbildung 5 bis Abbildung 7) sind alle gleich aufgebaut. Sie bestehen aus jeweils vier Einzeldiagrammen, wobei die beiden linken zu Bruckmühl und die beiden rechten Diagramme zu Oberau gehören. Im oberen Diagramm wird jeweils das BHKW analysiert. Der Brennstoffbezug ist in grün, die Produkte Wärme und Strom sind in blau bzw. braun dargestellt. Die unteren Diagramme zeigen den Wärmeverbrauch. Die Heizleistung ist in rot aufgetragen, die Zirkulationsverluste in hellgrün und die thermischen Zapfleistungen in violett.

Hinzuzufügen ist noch, dass beide Anlagenbetreiber eine Nachtabsenkung zwischen 24.00 Uhr und 6.00 Uhr, in Bruckmühl auch eine Nachmittagsabsenkung mit veränderlicher Zeitdauer programmiert haben. Darüber hinaus lief die Zirkulation in Oberau am Anfang der messtechnischen Untersuchungen den ganzen Tag.

4.1 Wintertag

An Wintertagen (**Abbildung 5**) ist die Laufzeit für beide Speichertypen sehr hoch. Nur während der Nachtabschaltung steht das BHKW. Die resultierende BHKW-Laufzeit beträgt 18 bis 20 Stunden.

Erkennbar ist auch, dass die thermische Leistung des Stirlingmotors an diesem Tag (Tagesmitteltemperatur: $1,3^{\circ}\text{C}$) nicht ausreicht um den Wärmebedarf zu decken. Der Spitzenlastkessel läuft bei beiden hydraulischen Konfigurationen mehrere Stunden. Auf der Verbrauchsseite bleibt festzuhalten, dass der Kombispeicher eine sehr hohe morgendliche Wärmespitze von über 20 kW liefern kann und der Spitzenlastkessel dadurch erst relativ spät (nach einer Stunde) zuschaltet. An Wintertagen führt die Nachmittagsabsenkung zu einer Nachmittagswärmespitze (16.00 Uhr), worauf mit kurzer Zeitverzögerung der Spitzenlastbrenner anspringt.

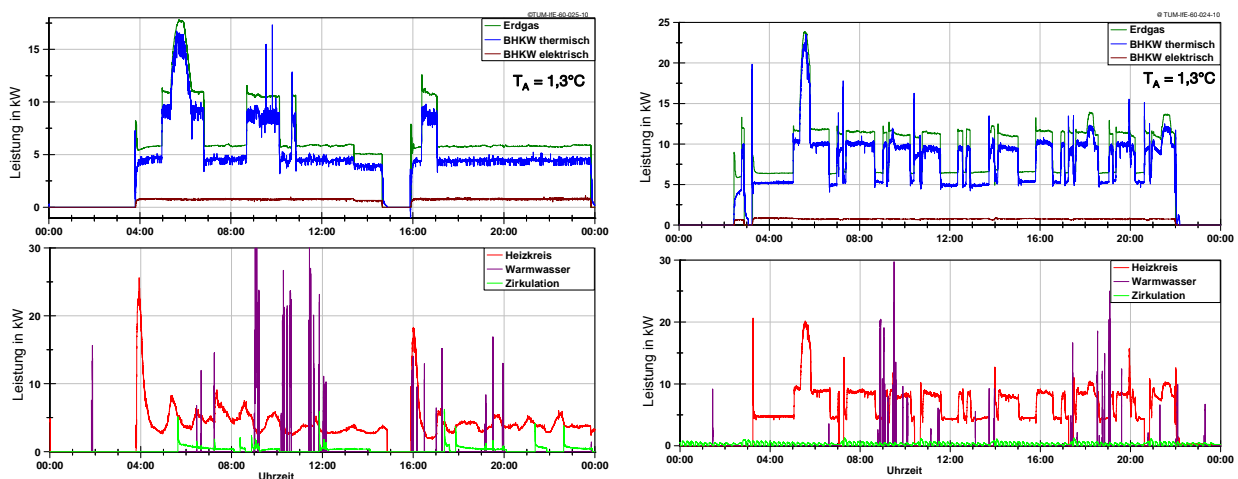


Abbildung 5: Wintertag - Bruckmühl und Oberau

4.2 Übergangstag

Im Falle eines Übergangstags (Tagesmitteltemperatur: $9,7^{\circ}\text{C}$; **Abbildung 6**) ergibt sich ein ganz anderes Bild. Die durchschnittliche Heizleistung ist kleiner als die thermische BHKW-Leistung. Das BHKW beginnt zu takten. In Bruckmühl gleicht der Kombispeicher den Unterschied zwischen Produktion und Verbrauch aus und liefert eine konstante Heizleistung. Es ergeben sich insgesamt vier Startvorgänge. Die Diagramme von Oberau zeigen ein grundverschiedenes Bild. Durch den direkten Anschluss von Heizkreis an das BHKW schwankt die Kesseltemperatur sehr stark. Es kommt zum häufigen Takten und an diesem Beispieltag zu über 30 Startvorgängen.

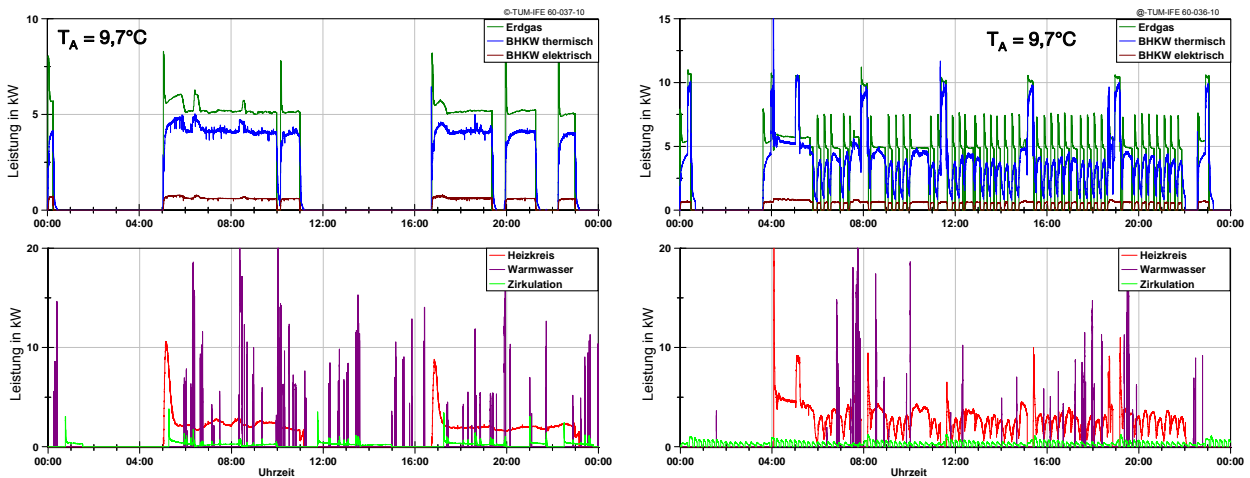


Abbildung 6: Übergangstag - Bruckmühl und Oberau

4.3 Sommertag

Erwartungsgemäß ist die BHKW-Laufzeit im Sommer (**Abbildung 7**) sehr gering. In Oberau läuft das BHKW aufgrund der Zirkulationsverluste und des relativ hohen Warmwasserverbrauchs noch ein paar Stunden. Bei weiterer Betrachtung fällt auf, dass der Spitzenlastbrenner, obwohl die Heizleistung gleich Null ist, nach einer kurzen Verzögerung anspringt. Grund hierfür ist, dass der Stirlingmotor die Rücklaufftemperatur nur um 7°C anheben kann, die Warmwassersolltemperatur jedoch viel höher ist. Dies hat zur Folge, dass nach der Spitzenbrennersperrzeit dieser hinzuschaltet und die BHKW-Laufzeit damit reduziert. Durch eine Anhebung der Sperrzeit konnte dieser Effekt teilweise aufgehoben werden.

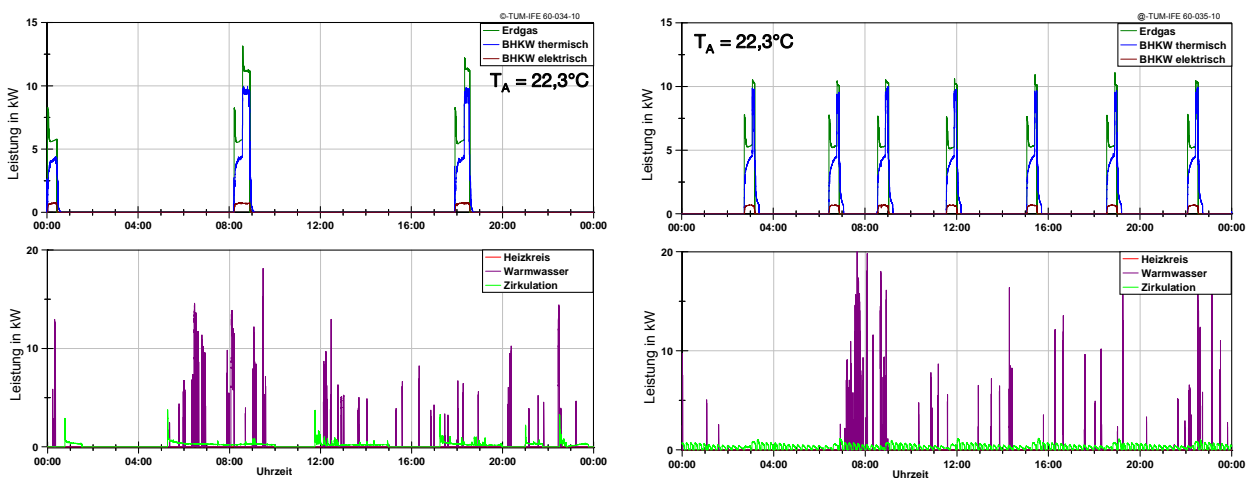


Abbildung 7: Sommertag Bruckmühl - Oberau

5. Jahresbetrachtung

Tabelle 3 zeigt die Laufzeit, den Gasverbrauch und die Stromerzeugung inkl. der Stromnutzung der vier Anlagen im Jahr 2010. Da die Anlagen in Pfaffenhofen und Hohenlinden am Anfang bzw. Ende des Jahres, also in der Winterzeit nicht in Betrieb waren, liegen die Laufzeiten der beiden Anlagen deutlich unter denen aus Bruckmühl und Oberau. Die erreichbare Stromerzeugung liegt um 3.000 kWh, in Oberau bei knapp 4.000 kWh.

Die, neben der BHKW-Laufzeit, für den wirtschaftlichen Ertrag wichtigste Größe, der Anteil des im Haus verbrauchten Stroms, also das Verhältnis aus Stromeigennutzung und Stromerzeugung variiert sehr stark innerhalb der Standorte. In Hohenlinden beträgt der Anteil der Stromeigennutzung 35 %, in Pfaffenhofen ca. 77 %.

Tabelle 3: Jahreswerte

		Pfaffenhofen ¹	Hohenlinden ²	Bruckmühl	Oberau
Laufzeit	h	2.116	2.888	4.149	5.118
Gasverbrauch	m ³	3.100	3.000	3.100	4.000
Stromerzeugung	kWh	1.620	2.710	3.380	3.900
Stromeigennutzung	kWh	1.250	950	nicht messbar ³	2.420
Stromeinspeisung	kWh	370	1.760	nicht messbar ³	1.480

1) nicht in Betrieb 01.01. bis 30.03.2010

2) nicht in Betrieb 18.10. bis 09.12.2010

3) erforderlicher Zweiwirkrichtungszähler wurde vom Netzbetreiber zu spät eingebaut

Abbildung 8 zeigt eine stundengenaue Analyse der Stromproduktion in Pfaffenhofen. Der in hellgrün aufgetragene Nettostrom (Stromerzeugung minus BHKW-Eigenverbrauch) wird hauptsächlich morgens, aufgrund der Heizungsanforderung, zwischen 4.00 Uhr und 6.00 Uhr erzeugt. In diesen zwei Stunden wird aber auch ein Großteil des erzeugten Stroms aufgrund mangelnder Gebäudestromnachfrage in das öffentliche Netz eingespeist (> 50 %).

Die prozentuale Stromeigenerzeugung steigt dagegen von 4.00 Uhr morgens nahezu kontinuierlich bis ca. 22 Uhr wenn die Gebäudebewohner schlafen gehen. In den restlichen Nachtstunden (23.00 Uhr bis 4.00 Uhr) ist die Stromproduktion, bei relativ geringer Stromeigennutzung, kleiner als am Rest des Tages. Wirtschaftlich optimal wäre zu dieser Zeit eine komplette

Versorgung des Heizkreises über den Kombispeicher. Dieser könnte dann zu einem späteren Zeitpunkt, bei höherem Gebäudestrombedarf, vom BHKW wieder geladen werden.

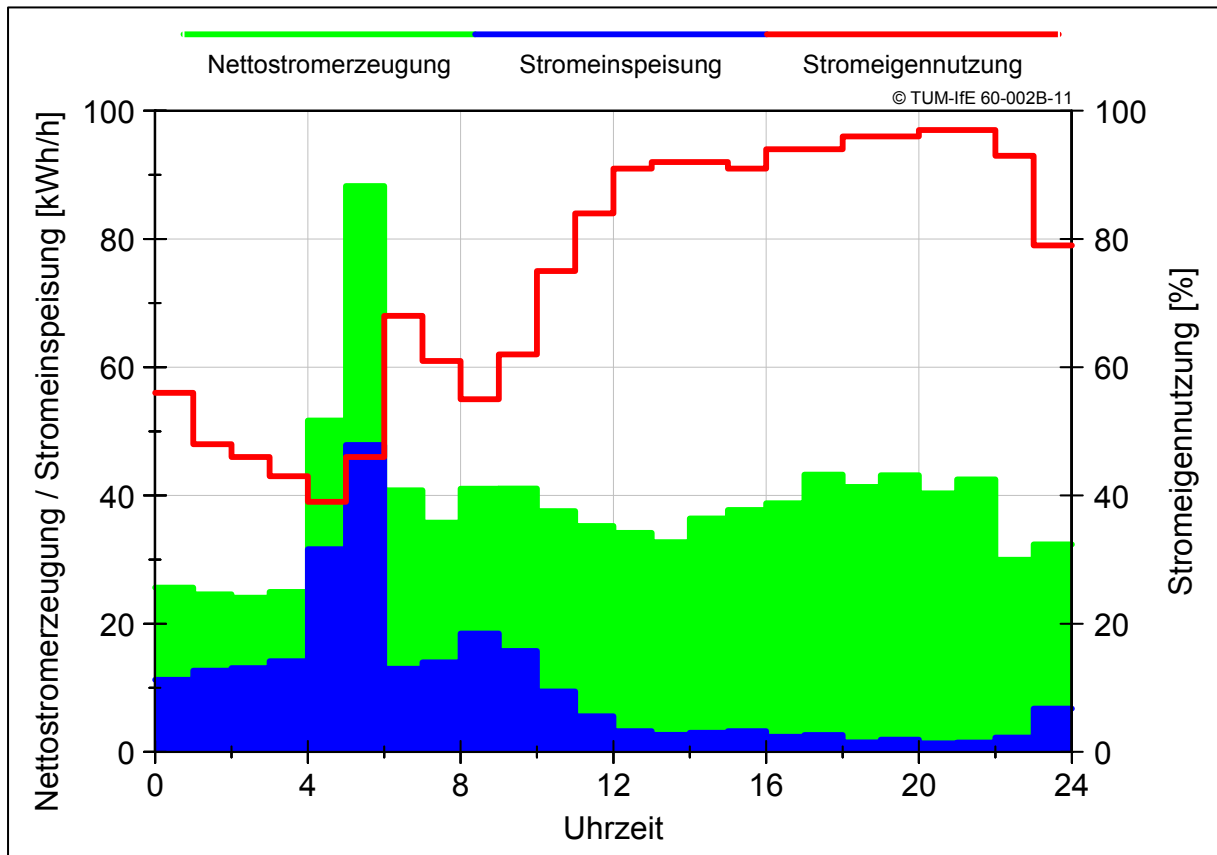


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Stromproduktion und -Nutzung

6. Primärenergie- und CO₂-Einsparung

Die folgenden Abbildungen zeigen den Primärenergieeinsatz (**Abbildung 9**) und die entstandenen CO₂-Emissionen (**Abbildung 10**) für die Standorte Bruckmühl, Hohenlinden und Pfaffenhofen. Diese werden mit einer getrennten Erzeugung aus Niedertemperatur (80 % Nutzungsgrad) bzw. Brennwärkessel (95 % Nutzungsgrad) und Strombezug aus dem öffentlichen Netz (Primärenergiefaktor Strom: 2,6 kWh_{PE}/kWh_{el}) verglichen.

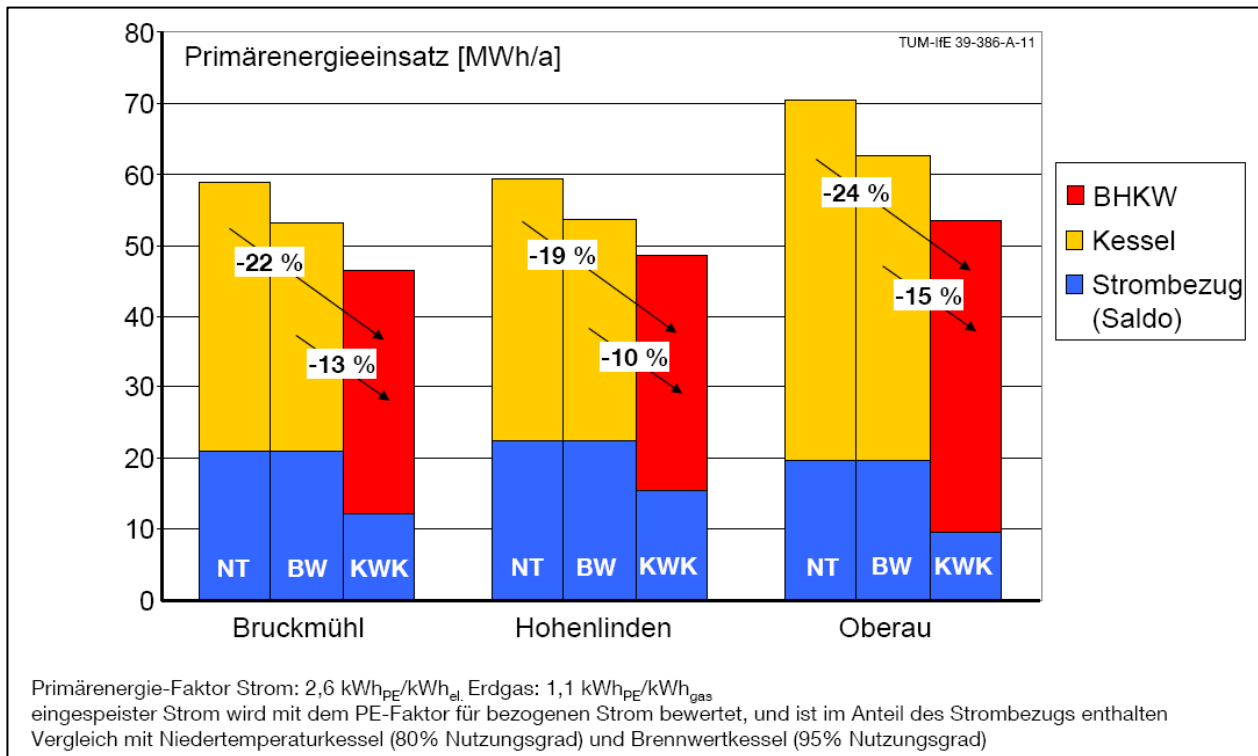
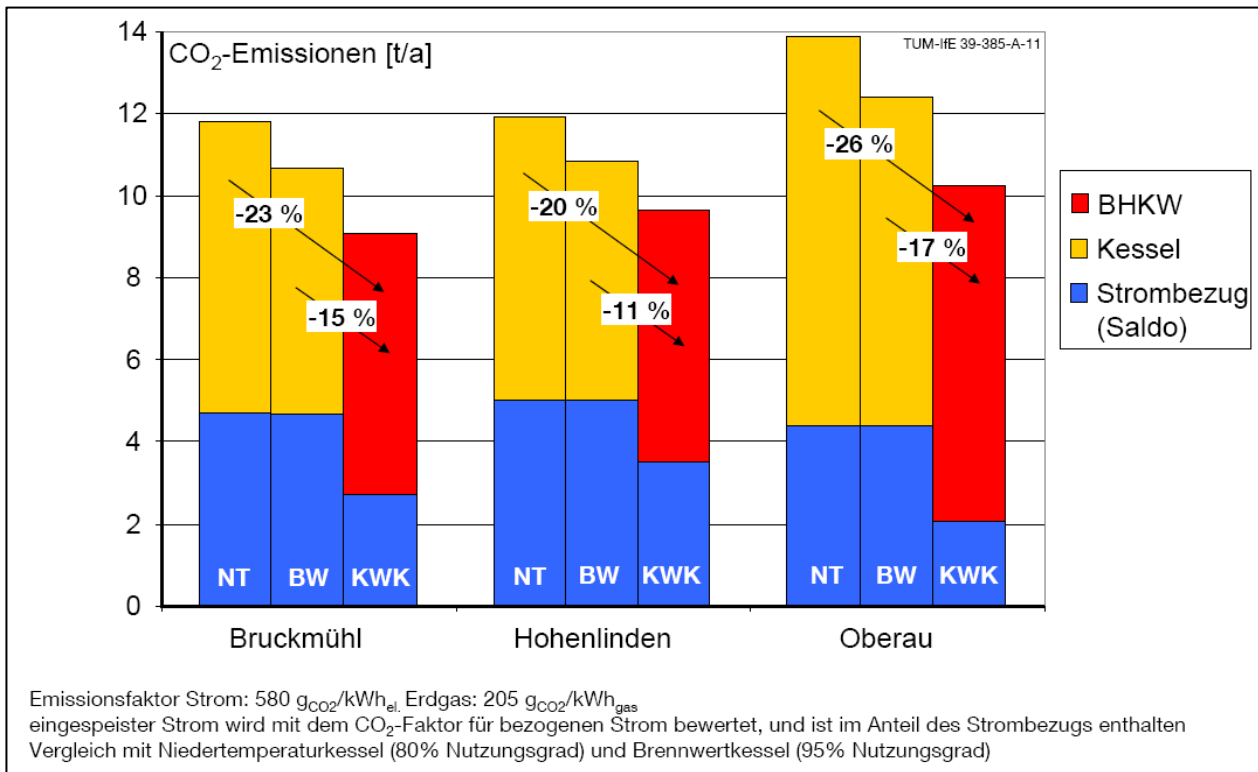


Abbildung 9: Primärenergieeinsatz

Abbildung 9 zeigt, dass der Primärenergieeinsatz bei der Referenzvariante Niedertemperaturkessel um 19 % (Hohenlinden) bis 24 % (Oberau) bzw. 10 % bis 15 % für Brennwertkessel sinkt. Gegenüber den vorher installierten Wärmeerzeugern werden im Durchschnitt 12.000 kWh Primärenergie jährlich eingespart.

Bei der Betrachtung der CO₂ Emissionen (Abbildung 10) werden Emissionsfaktoren von 580 g_{CO₂}/kWh für den Strom und 205 g_{CO₂}/kWh für Erdgas angesetzt. Ergebnis dabei sind CO₂ Einsparungen von 20 % bis 26 % für den Niedertemperaturkesselvergleich bzw. 11 % bis 17 % für die Brennwertkesselvariante.

Dies bedeutet, dass durch den Einsatz von Stirling Mikro-BHKW sowohl Primärenergie als auch CO₂ in erheblichem Maße, auch gegenüber den aktuell besten Wärmeerzeugern eingespart wird.

Abbildung 10: CO₂ Emissionen

7. Zusammenfassung

Die Jahresanalyse 2010 der vier installierten eVita Stirling Mikro-BHKW hat gezeigt, dass BHKW der Leistungsklasse um 1 kW elektrisch sinnvoll in bestehende Heizsysteme integriert werden können. Die thermische Leistung von 5 kW reicht, mit Ausnahme der Tage mit einer mittleren Temperatur von unter 3°C, aus, um Gebäude monovalent mit Wärme zu versorgen. Der Einsatz des Zusatzbrenners hängt neben der Außentemperatur maßgeblich vom Gebäude, dem Heizkreistyp und dem Vorhandensein eines Kombispeichers ab.

Die BHKW Laufzeiten der eingesetzten Geräte lagen zwischen 2.100 und über 5.000 Stunden im Jahr 2010. Durch bereits erfolgte Weiterentwicklung des Herstellers, gegenüber der in den Gebäuden eingesetzten Geräte und bei kürzeren Reaktionszeiten auf Störungen, die die Stillstandszeiten verringern, sollten bei allen vier Gebäuden Laufzeiten über 3.500 h/a erreicht werden können.

Eine weitere Erhöhung der Laufzeiten ließe sich durch optimale Anpassung der BHKW Einstellungen an das Versorgungsobjekt, eine bessere BHKW Regelung und eine sinnvollere Integration der Speicher erreichen.

Die Stromerzeugungsanalyse zeigte deutliche Unterschiede an den vier untersuchten Gebäuden. Sind die Bewohner tagsüber aus dem Haus, fällt der Anteil der Eigenstromnutzung unter einen Wert von 40 %. Ist der Gebäudestromverbrauch hoch und die Bewohner öfters tagsüber daheim wird die Stromeinspeisung auf ein Minimum reduziert und die Wirtschaftlichkeit der Mikro-BHKW deutlich erhöht.

Die Betrachtung der Energieeffizienz der Geräte fällt eindeutig positiv aus. Je nach Referenzszenario beträgt die Primärenergieeinsparung bis zu 24 % und die CO₂ Einsparung bis zu 26 %. Im schlechtesten Fall (Hohenlinden) betrug die CO₂ Einsparung gegenüber dem besten Referenzszenario immer noch 11 %.