

Abschlussbericht

für den

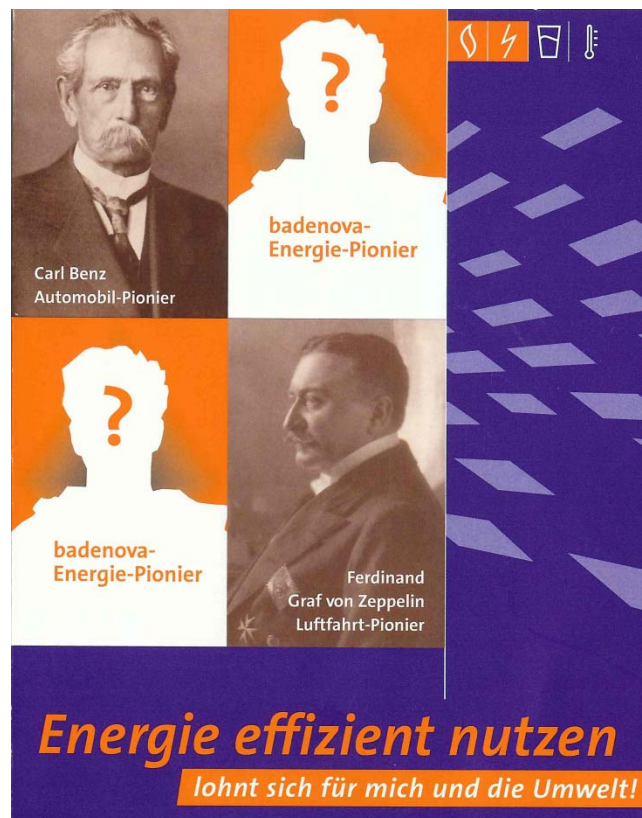
Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz badenova AG & Co. KG

für das Projekt

Feldtest Kraft-Wärme-Kopplung

Projektteam

Kay Ludwig
Isabel Asmus



--- gefördert durch den Innovationsfonds

Inhaltsverzeichnis

1. Feldtest Mikro-BHKW	3
1.1. Einleitung.....	3
1.2. Feldtest.....	3
1.3. Im Feldtest eingesetzte Motorentypen.....	4
1.3.1 Stirlingmotor.....	4
1.3.2 Dampfmotor.....	7
2. Technisch-wissenschaftliche Begleitung des Feldtests	10
2.1. Messtechnischer Aufbau.....	10
2.2. Messwerterfassung und -übertragung.....	12
2.3. Messdatenauswertung.....	13
3. Aufgetretene Probleme bei der Inbetriebnahme und Störungen im Betrieb	14
3.1. Anlagenbedingte Störungen.....	14
3.2. Messtechnische Störungen	15
4. Ergebnisse des Feldtests/ der Anlagen-Messungen.....	16
4.1. Definition Anlagenkennzahlen.....	16
4.1.1 Definition Nutzungsgrade.....	16
4.1.2 Definition Stromkennzahl	16
4.2. Ergebnisdarstellung.....	17
4.3. Ergebnisse WhisperGen-Anlagen	18
4.3.1 Gesamtnutzungsgrade WhisperGen-Anlagen	18
4.3.2 Elektrischer Nutzungsgrad WhisperGen-Anlagen	20
4.3.3 Vergleich WhisperGen-Anlagen	27
4.4. Ergebnisse Lion-Anlagen	32
4.4.1 Gesamtnutzungsgrade Lion-Anlagen	32
4.4.2 Elektrischer Nutzungsgrad Lion-Anlagen	34
4.4.3 Vergleich Lion-Anlagen	36
5. Primärenergetische Betrachtung.....	41
6. Schlussfolgerungen	44
6.1. Fazit Feldtest.....	44
6.2. Primärenergetisches Fazit.....	44
Referenzen/References und Anlage	46

1. Feldtest Mikro-BHKW

1.1. Einleitung

Die effiziente Nutzung der vorhandenen Energieträger, die Einführung neuer umwelt-schonender und energiesparender Technologien sowie neue Formen der Energieerzeugung und -verteilung werden aufgrund des steigenden Energieverbrauches, knapper werdender Ressourcen und Gründen des Klimaschutzes immer wichtiger. Eine wichtige Option für höhere Energieeffizienz ist die dezentrale Stromerzeugung mit Blockheizkraftwerken (BHKW) im Ein- und Zweifamilienhausbereich.

1.2. Feldtest

Gefördert durch den Innovationsfonds begann Anfang 2008 die Planungsphase für einen Feldtests des Energieversorgers badenova AG & Co. KG, in dem 20 Mikro-BHKW auf Basis von Stirling- und Dampfmotoren unterschiedlicher Hersteller über einen Zeitraum von zwei Jahren auf ihre Praxistauglichkeit unter realen Betriebsbedingungen getestet wurden. Es wurden WhisperGen-Stirlingmotoren der Firma WhisperTech und Lion-Dampfmaschinen der Firma OTAG eingesetzt.

Unter den Objekten, die von der badenova für den Feldtest ausgesucht wurden, sind Ein- und Zweifamilienhäuser sowie auch Geschäftsräume und kommunale Einrichtungen. Das Ziel des Feldtests ist es, Erfahrungen unter Betriebsbedingungen zu sammeln, die Marktauglichkeit zu testen sowie zu prüfen, welche Objekte sich für den Einbau mit einem Mikro BHKW zur dezentralen Stromerzeugung eignen. Mitte 2008 erhielt die Forschungsgruppe net - nachhaltige energietechnik - der Hochschule Offenburg den Auftrag für die technisch-wissenschaftliche Begleitung des Feldtest „Energiepioniere“.



Abb. 1: Grob-skizze der Anlagenstandorte in Baden-Württemberg

1.3. Im Feldtest eingesetzte Motorentypen

Auf dem „Prüfstand“ im Feldtest sind der Stirlingmotor WhisperGen des Herstellers WhisperTech und der Freikolben-Dampfmotor Lion-Powerblock der Firma OTAG (Lion).

1.3.1 Stirlingmotor

Das Grundprinzip des Stirlingmotor ist schon lange bekannt. Erfunden wurde der Motor bereits 1816 vom schottischen Geistlichen Robert Stirling, lange vor der Erfindung des Otto- und des Diesel-Motors.

Aufgrund seiner Trägheit beim Lastwechsel hat sich der Stirlingmotor unter anderem in der Vergangenheit nur in Nischenmärkten etabliert. Mit der Kraft-Wärme-Kopplung steht nun möglicherweise ein Einsatzbereich zur Verfügung, in dem die Vorteile der Stirlingtechnologie gegenüber dem Gas-Otto-BHKW genutzt werden können.

Als ein Vorteil sei hier die äußere Wärmezufuhr des Stirlingmotors genannt. Sie bietet die Möglichkeit den Stirlingmotor mit den unterschiedlichsten Brennstoffen anzutreiben. Neben gasförmigen Brennstoffen wie Erdgas, Biogas oder Klärgas können auch feste Brennstoffe, wie beispielsweise Hackschnitzel oder Pellets, für die Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Eine weitere Option stellt die Einbindung von Solarenergie als Wärmequelle dar. Die äußere Wärmezufuhr hat den weiteren Vorteil, dass der Verbrennungsraum des Motors nicht durch Verbrennungsrückstände verschmutzt wird. Dies führt zu längeren Wartungsintervallen und somit zu geringeren Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Freikolben-Stirlingmotore arbeiten ohne Kurbeltrieb, wodurch die Reibungskräfte gegenüber dem Stirlingmotor mit Kurbeltrieb reduziert werden. Sie kommen gänzlich ohne Wartung aus.

Der Stirlingmotor basiert physikalisch auf einem geschlossenen thermodynamischen Kreisprozess. Dieser 4-phasige Kraftmaschinenprozess besteht aus einem periodischen Ablauf temperaturbedingter Expansion und Kompression eines unter Druck stehenden Arbeitsgases. Dieses Arbeitsgas ist zwischen zwei Kolben eingeschlossen, welche die auf sie ausgeübte Kraft über Pleuelstangen auf eine Rotationswelle übertragen. Grundlegende Elemente dieses Volumenänderungsprozesses sind der erhitzte Arbeitszylinder, der gekühlte Kompressionszylinder und ein Regenerator, der zur Energiewischenspeicherung dient (Abbildung 2); somit werden annähernd isotherme Zustandsänderungen ermöglicht.

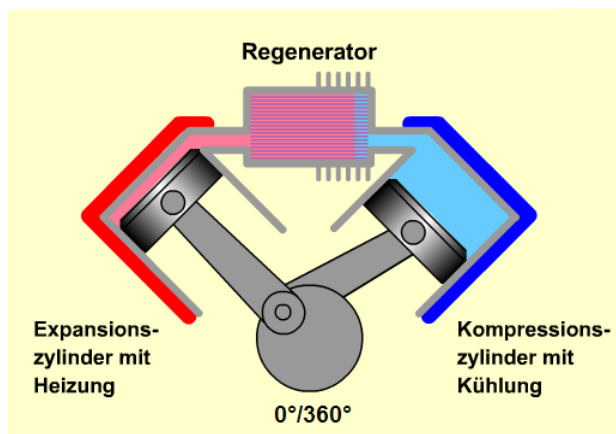


Abb. 2: Schematische Darstellung der grundlegenden Elemente des Stirlingprozesses

Der Stirlingmotor WhisperGen Typ MkVb der Fa. WhisperTech ist ein voll-automatischer Heizkessel, mit einer Standardwärmeleistung von 7 kW (mit Zusatzbrenner bis 12 kW) und einer elektrischen Leistung von 1 kW. Der Motor ist für die Anwendung in Ein- und Mehrfamilienhäusern sowie im Kleingewerbe konzipiert.

Technische Daten WhisperGen



Abb. 3: WhisperGen-Anlage MS01

doppeltwirkender Vierzylindermotor mit außenliegender Verbrennung	
Standardwärmeleistung	7 kW
mit Zusatzbrenner	12 kW
elektrische Leistung	1 kW
Arbeitsmedium	Stickstoff
Drehzahlbereich	1.200 – 3.200 Umdreh./Min.
Abmessungen (BxHxT)	49,0 x 85,0 x 55,5 cm
Gewicht	137 kg
Geräuschniveau	56 dB (A)

...

Das WhisperGen-Gerät arbeitet mit einem doppelwirkenden Vierzylinder-Motor mit außenliegender Verbrennung (Stirlingmotor). Das heißt im Falle des WhisperGen wird in vier Zylindern unter Druck gesetztes Stickstoffgas erhitzt und abgekühlt. Die dadurch verursachte Änderung des Drucks bewirkt, dass sich die Kolben auf und ab bewegen. Die geradlinige Kolbenbewegung wird von einer Taumelscheibe (Wobble Yoke) in eine Kreisbewegung umgewandelt. Mit dieser Bewegung wird ein 4-poliger Induktions-Wechselstromgenerator angetrieben und erzeugt 230V 50 Hz AC. Der Generator dient auch als Motorstarter. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des WhisperGen im Schnittmodell.



Abbildung: Schnittmodell Typ MK Vb, Bj. 2006, Quelle: WhisperTech.

Abb. 4: Schnittmodell des WhisperGen [2]

- Durch die Hohlkammern des Motors (D Schnittmodell Abbildung 4) und des Abgas-Wärmeübertragers (B Schnittmodell Abbildung 4) wird Wasser gepumpt. Das so erwärmte Wasser wird für die Zentralheizung und die Warmwasseraufbereitung genutzt.
- Der Hauptbrenner ist als drallstabilisierter Rekuperativbrenner (Saugzugbrenner) mit Einzeldüse ausgeführt. Die Gaszufuhr erfolgt über ein Mehrfunktionsventil zum Regulieren des Luft-Brennstoff-Gemisches. Der Zusatz- bzw. Hilfsbrenner, der bei höherer Wärmelast zugeschaltet wird, ist ein zylindrischer Gasbrenner mit Vormischung.
- Zwei automatische Brenner-Regler kontrollieren die Gasmenge und die Zündung des Haupt- und Hilfsbrenners.
- Die Steuerung erfolgt selbständig über ein Mikroprozessor-System.

1.3.2 Dampfmotor

Der Vorteil des in Dampfmotoren zum Einsatz kommenden Dampfkraftprozesses ist der Phasenwechsel des Arbeitsmediums von flüssig zu gasförmig. Auf diese Weise kann die Druckerhöhung im Arbeitsmedium im flüssigen Zustand erfolgen, was zu einem vergleichsweise geringem Energieeinsatz führt. Dies ist der Grund dafür, dass der überwiegende Anteil der Entspannungsarbeit zur externen Nutzung zur Verfügung steht.

Bei einem durchgängig gasförmigen Arbeitsmedium, wie im Falle der Mikrogasturbine, muss ein Teil der geleisteten Entspannungsarbeit zur Verdichtung des eintretenden Arbeitsgases eingesetzt werden. Aus diesem Grund sind mit Dampfkraftwerken trotz geringerer Prozesstemperatur höhere Wirkungsgrade (bis 45%) im Vergleich zu Gasturbinenkraftwerken (mit etwa 38%) erreichbar.

Mit Dampfmotor-BHKW ist eine hohe Energieausnutzung möglich, da die Dampfkondensation und die Abkühlung des Abgases theoretisch bei Rücklauf-temperatur erfolgen können. So wird für den lion-Powerblock ein Gesamtwirkungsgrad von über 98% angegeben.

Bezüglich der erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade liegen Dampfmotor-BHKW im kleinen Leistungsbereich jedoch unterhalb von 20%. Hauptgrund hierfür sind die im Vergleich zum Großkraftwerk niedrigen Dampfparameter von 350°C und 25 bar. Wie auch beim Stirlingmotor bietet die äußere Wärmezufuhr auch beim lion-Powerblock den Vorteil, dass unterschiedliche, auch regenerative Brennstoffe, eingesetzt werden können. Aufgrund der äußeren kontinuierlichen Verbrennung emittieren die Motoren wenige Schadstoffe und benötigen weder Katalysator noch nachträgliche Abgasreinigung.

Beim Motor lion-Powerblock der Firma OTAG handelt es sich um einen Dampfmotor. Das physikalische Prinzip des Dampfmotors ist der Dampfkraftprozess. Bei diesem thermodynamischen Prozess wird das Arbeitsmedium Wasser als erster Schritt im flüssigen Zustand verdichtet (Abbildung 5: 1 - 2). Danach wird das Medium bei hohem Druck und unter äußerer Wärmezufuhr erwärmt, verdampft und überhitzt (2 - 3a - 3b - 3). Danach wird das Medium bei hohem Druck und unter äußerer Wärmezufuhr erwärmt, verdampft und überhitzt (2 - 3a - 3b - 3).

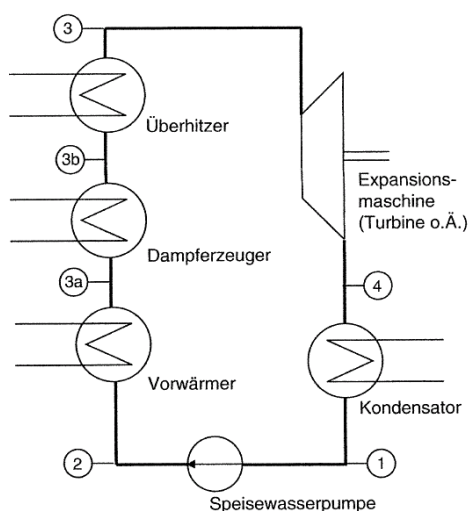


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau des Dampfkraftprozesses [1]

...

Es schließt sich nun die Entspannung des heißen Dampfes in der Expansionsmaschine an (3 – 4). Mit der Kühlung des Niederdruckdampfes, der dabei kondensiert, erreicht der Prozess wieder seinen Ausgangspunkt.

Der **Dampfmotor lion-Powerblock** der Firma OTAG ist aktuell das einzige Mini-BHKW auf der Basis einer Dampfkraftmaschine. Mit einer thermischen Leistung von ca. 3 kW bis 16 kW und einer elektrischen Leistung von ca. 0,3 kW bis 2,0 kW ist der Motor für die Anwendung in Ein- bis Dreifamilienhäusern, sowie im Kleingewerbe konzipiert.

Technische Daten lion-Powerblock



Abb. 6: lion- Powerblock MS04

Freikolben-Dampfmotor	
Standardwärmeleistung	3 -16 kW
elektrische Leistung	ca. 0,3 – 2 kW
Arbeitsmedium	Prozessdampf ca. 350 °C
Hubzahl	2.400 – 4.500 Hübe/Min.
Abmessungen (BxHxT)	62 x 126 x 83 cm
Gewicht	195 kg
Geräuschniveau	48 - 54 dB (A)

Beim lion-Powerblock handelt es sich um einen Freikolben-Dampfmotor. Der Motor arbeitet mit einem prozessdampfbetriebenen Doppelfreikolben und realisiert damit das Konzept, vollständig auf drehende Teile zu verzichten – daher der Name Linator (Lineargenerator). Die Frequenz der Schwingungen wird als Hubzahl angegeben. Die Hubzahl beträgt beim Powerblock 40 – 75 Hz, das heißt ca. 2.400 bis 4.500 Hübe pro Minute. Abbildung 7 zeigt ein vereinfachtes Funktionsschema des lion-Powerblocks.

Der Gasbrenner (5) erhitzt Wasser in einem Rohrverdampfer (4) zu Prozessdampf von ca. 350 °C mit 25-30 bar Druck. Der Dampf tritt wechselweise in den linken (10) und rechten Arbeitszylinder (3) des Linators ein und expandiert.

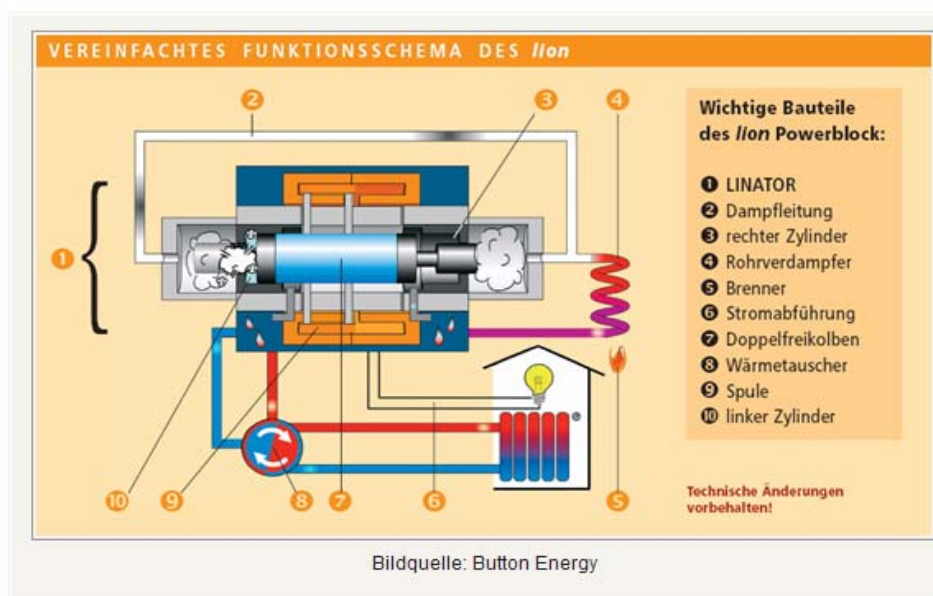


Abb. 7: Vereinfachtes Funktionsschema des lion-Powerblocks [3]

Die mit dem Doppelkolben fest verbundene Ankerspule (9) wird bei jedem Expansionsvorgang durch ein starkes Dauermagnetfeld getrieben und erzeugt so einen Induktionsstrom. Der in der Spule erzeugte Gleichstrom wird über einen Wechselrichter in Wechselstrom gewandelt.

Im Kühlkreislauf des Linators wird über einen Plattenwärmeübertrager (8) die Wärme aus dem Linator abgeführt und an den Heizungs- und Brauchwarmwasserkreislauf übergeben.

2. Technisch-wissenschaftliche Begleitung des Feldtests

Die technisch-wissenschaftliche Begleitung des Feldtests durch die Hochschule Offenburg beinhaltet das Erstellen des Messkonzeptes und die Erarbeitung eines Konzepts der Datenerfassung und -übertragung. Nach Einbau der Motoren inkl. Messtechnik durch die Heizungsinstallateure erfolgte eine Funktionsprüfung der eingebauten Sensoren an jeder Pionieranlage durch die HSO. Im Rahmen des Monitorings wurden die Messdaten qualifiziert ausgewertet und mittels geeigneter Auswerteprogramme analysiert. Die Ergebnisse wurden regelmäßig bewertet und in monatlichen Berichten zusammengefasst.

2.1. Messtechnischer Aufbau

Mit dem im Folgenden vorgestellten messtechnischen Aufbau ist es gelungen, eine günstige messtechnische Lösung für die Kleinanlagen zu realisieren und trotzdem eine hohe Messgenauigkeit beizubehalten.

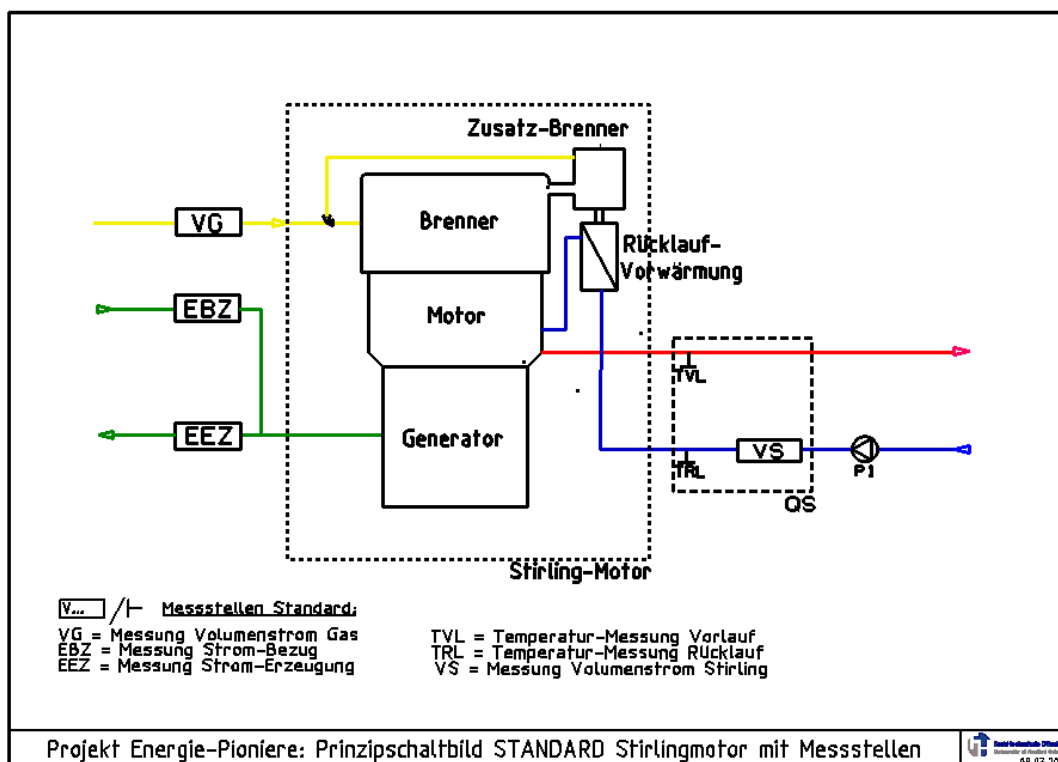


Abb. 8: Prinzipschaltbild des Messaufbaus für den Mikro-BHKW-Feldtest mit den Messstellen

Das Prinzipschaltbild in Abbildung 8 zeigt schematisch die Messstellen mit denen die einzelnen Energiepionieranlagen ausgerüstet wurden. Der gewählte messtechnische Aufbau ermöglicht es für jede Kombianlage eine Energiebilanz von Energie-Input und Energie-Output zu erstellen. Als zugeführte Energie wird der Brennstoff Erdgas (VG) und der aus dem Stromnetz bezogene Strom (EBZ) gemessen. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde auf kostspielige Brennwertmessungen verzichtet; für die Umrechnung des eingesetzten Erdgases wurden je Pionieranlage die von der badenova übermittelten monatlichen Heizwerte angesetzt. Die vom Motor erzeugte Energie fällt in Form von Wärme und Strom an und wird vor Ort erfasst.

Überblick



Abb. 9: Messtechnikschaltschrank mit Wärmemengen-Rechenwerk der WhisperGen-Anlage MS03_W



Abb. 10: Messtechnikschaltschrank mit Antenne der Lion-Anlage MS06_L



Abb. 12: Flügelradzähler und Temperaturfühler der WhisperGen-Anlage MS03_W

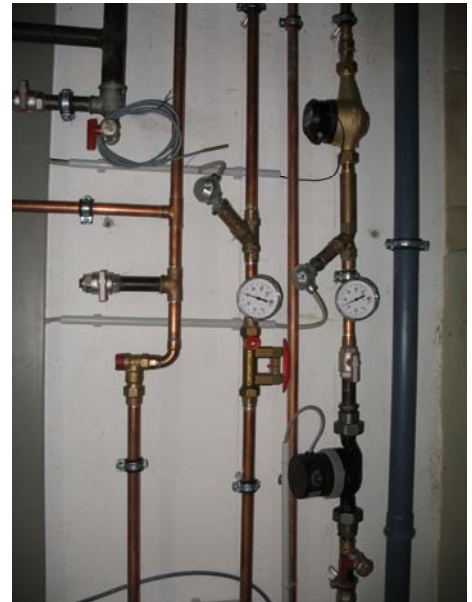


Abb. 11: Temperaturfühler und Flügelradzähler (unisoliert) der WhisperGen-Anlage MS10_W



Abb. 13: Erdgaszähler mit Impulsnehmer WhisperGen-Anlage MS13_W

Messwerterfassung und -Übertragung

Für die Doppelfunktion der Datenerfassung und -übertragung wird ein üblicherweise als Alarmmodem genutztes Tixi-GSM-Modem eingesetzt. Als intelligenter Kommunikationscomputer verfügt das Dual-Band-Modem über eine 32-Bit-Power-CPU und einen 2MB großen stromausfallsicheren Datenspeicher (Flash-Memory). Das Modem kann mit den Steuerungen vieler Hersteller direkt über SPS-Protokoll kommunizieren und unterstützt verschiedene Bussysteme. Die Konfiguration des Modems mit den gewünschten Funktionen erfolgt über ein Softwareprogramm auf Basis von XML-Dateien. Tixi-Modems können automatisch unterschiedliche Funktionen ausführen: Sie können beispielsweise Alarm- und Statusmeldungen per SMS, E-Mail oder Fax versenden, Daten einer angeschlossenen Steuerung oder Anlage versenden sowie Daten mit Datum- und Zeitstempel in frei konfigurierbaren Abfragezyklen loggen. Der Versand der aufgezeichneten Daten erfolgt als Fax oder E-Mail zyklisch und ereignisgesteuert als XML-Textnachricht oder als beliebig formatierbarer Datensatz, z. B. im Excel-kompatiblen CSV-Format. Die Modems können darüber hinaus Schaltkommandos per SMS oder E-Mail empfangen und an eine SPS weitergeben oder als ganz „normales“ Modem für den Fernzugriff auf Steuerungen oder Anlagen genutzt werden.

Das im Feldtest eingesetzte GSM-Modem verfügt als Besonderheit über einen M-Bus-Master für Zähler und zwei Digitaleingänge. Es greift die gewünschten Anlagendaten alle fünf Minuten per M-Bus an den Messstellen ab, speichert sie im Datenspeicher und sendet sie per GSM jede Nacht zu einer definierten Zeit an die Hochschule Offenburg. Ist ein Pionier-Motor gestört, sendet das Modem zeitnah eine SMS und zeitverzögert ein Fax an die dafür vorgesehene Störungsstelle der badenova. Über eine RS 232-Schnittstelle kann vor Ort ein PC angeschlossen werden.

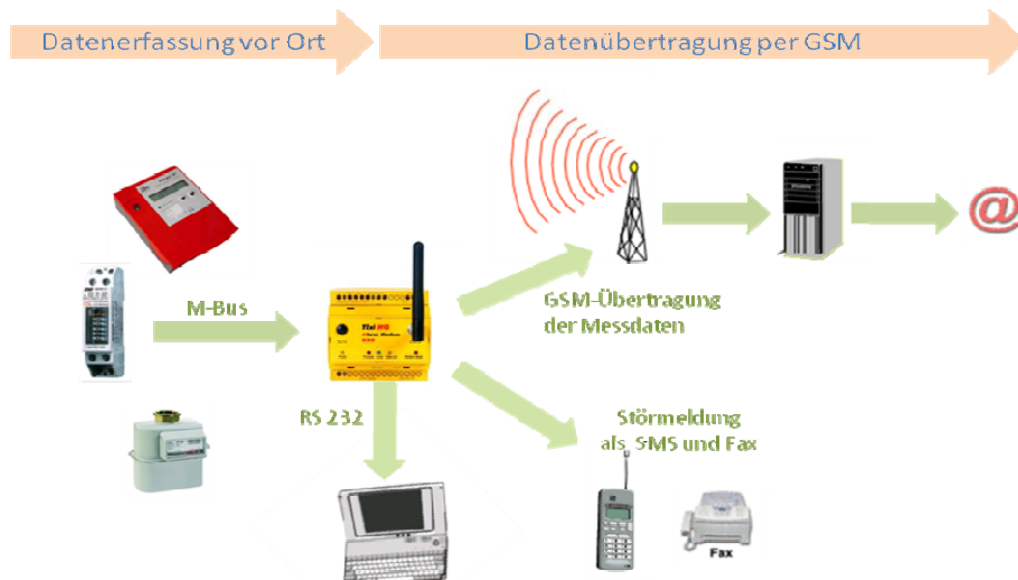


Abb. 14: Prinzipdarstellung der Datenerfassung und -übertragung

Bei einigen Pionieranlagen gab es anfangs Übertragungsprobleme aufgrund von Schwankungen der GSM-Empfangsstärke. Die Behebung des Problems gelang durch den Einbau eines Kompensators, der die Leitungsverluste zwischen Modem und Antenne reduziert.

2.2. Messdatenauswertung

Die an der Hochschule per Mail täglich ankommenden Messdaten wurden geprüft und in eine SQL-Datenbank geschrieben. Datenanalysen und Auswertungen erfolgten mittels speziell hierfür programmierter LabView-Programme. In die Auswertungs-Programme ist die entsprechende Messdatenumrechnung eingeflossen. Die Ergebnisse der monatlichen Messdatenauswertungen wurden übersichtlich in Berichten dargestellt.

3. Aufgetretene Probleme bei der Inbetriebnahme und Störungen im Betrieb

Verschiedene anlagenbedingte und messtechnische Störungen haben in der Projektanfangsphase zu Verzögerungen der Anlageninbetriebnahmen durch die Servicetechniker der Motorenhersteller und Heizungsinstallateure geführt. Daher wurden die vergleichbaren Werte nur für den Zeitraum von 16 Monaten festgehalten. Die vollständigen messtechnischen Inbetriebnahmen durch die HSO konnten erst im Anschluss an die erfolgreiche Anlageninbetriebnahme und den fehlerfreien Einbau der Messtechnik durch die Heizungsinstallateure erfolgen. Eine Anlage in einem Neubau konnte nicht wie geplant errichtet werden.

3.1. Anlagenbedingte Störungen

Im Folgenden werden die wesentlichen aufgetretenen Anlagenstörungen aufgeführt:

- Ausfall der Stromproduktion der Lion-Anlagen wegen Defekt des Linators (5 Anlagen)
- Falsche Verkabelung der Messtechnik durch Installateure (3 Anlagen)
- Ausfall des Motorbetriebes (1 Anlage)
- Keine Wärmeabnahme bzw. Anlagenbetrieb wegen hydraulischer Einbindung der Anlage in Warmwasserkreislauf und kein Bedarf an Warmwasser (1 Anlage)
- Durch den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers kam es zu erheblichen Regelungsproblemen an der Anlage (1 Anlage)
- Anlage wurde zeitweise ausgeschaltet wegen Urlaub der Energiepioniere (1 Anlage)
- Energiepionier war längere Zeit nicht erreichbar, so dass sich die Störungsbeseitigung verzögert hat (1 Anlage)
- Undichtigkeiten am Sterlingmotor

3.2. Messtechnische Störungen

Nachfolgend werden die wichtigsten messtechnischen Störungen aufgelistet:

- Zeitweise Störung der Datenübertragung aufgrund von Schwankungen der GSM-Empfangsstärke (4 Anlagen)
- Änderung der IP-Adressen bei Verkauf des Netzanbieters, plötzlich keine Datenübertragung mehr (alle Anlagen)
- Erdgaszähler mit falscher Impulswertigkeit eingebaut (4 Anlagen)
- Kein Impulsabnehmer am Erdgaszähler installiert (3 Anlagen)
- Kein GSM-Empfang möglich (2 Anlagen)
- Ausfall der Datenübertragung des Erdgaszählers (2 Anlagen)
- Wärmemengenzähler mit Rechenwerk nicht vorhanden (1 Anlage)
- Störung des GSM-Empfangs durch Einbau einer Stahltür (1 Anlage)
- Messtechnikschrank verschwunden (1 Anlage)
- Flügelradzähler defekt (1 Anlage)
- Verzögerung der Installation der Antenne (1 Anlage)
- Messtechnikschrank und Messtechnik nicht installiert (1 Anlage)

4. Ergebnisse des Feldtests/ der Anlagen-Messungen

4.1. Definition Anlagenkennzahlen

4.1.1 Definition Nutzungsgrade

Gesamtnutzungsgrad N_{ges}

$$N_{ges} = \frac{W_{el(erzeugt)} - W_{el(bezogen)} + Q_{thermisch}}{Q_{Brennstoff}} \times 100$$

N_{ges}	=	Gesamtnutzungsgrad in %
$W_{el(erzeugt)}$	=	vom Stirlingmotor erzeugter Strom (gemessen an der Stromauspeisung des Motors) in kWh
$W_{el(bezogen)}$	=	vom Stirlingmotor bezogener Strom in kWh
$Q_{thermisch}$	=	vom Stirlingmotor erzeugte Wärmemenge in kWh
$Q_{Brennstoff}$	=	vom Stirlingmotor verbrauchte Erdgasmenge (errechnet mit Heizwert) in kWh

Elektrischer Nutzungsgrad N_{el} :

$$N_{el} = \frac{W_{el(erzeugt)} - W_{el(bezogen)}}{Q_{Brennstoff}} \times 100$$

Thermischer Nutzungsgrad N_{th} :

$$N_{th} = \frac{Q_{thermisch}}{Q_{Brennstoff}} \times 100$$

4.1.2 Definition Stromkennzahl

Stromkennzahl (Nutz) $S_{(nutz)}$:

$S_{(nutz)}$ = Strom-Nutzwärme-Relation

$S_{(nutz)}$ = $N_{el} : N_{th}$

4.2. Ergebnisdarstellung

Zu jeder Anlage wurden ab Anlagen-Inbetriebnahme bzw. ab dem Vorliegen eines vollständigen Monats plausibler Anlagen-Messdaten Monatsberichte erstellt. In Tabelle 1, Kap. 3 ist aufgeführt, ab welchem Monat Berichte erstellt werden konnten, da die Voraussetzungen für die Berichterstellung erfüllt waren.

Berichtsform und -inhalte wurden im Vorfeld zwischen der badenova und der FHO abgestimmt (siehe exemplarischer Bericht im Anhang).

Neben den Anlagenkennzahlen wird in den Monatsberichten die Energiebilanz in Form eines Sankey-Diagramms abgebildet. Die Tageswerte „eingesetztes Erdgas“, „erzeugter Strom“ und „erzeugte Wärme der Energiepionier-Anlagen werden in einem Balkendiagramm gezeigt. In Abb. 15 und Abb. 16 sind exemplarisch ein Sankey-Diagramm und ein Balkendiagramm der Pionier-Anlage MS16 des Monats November 2009 dargestellt.

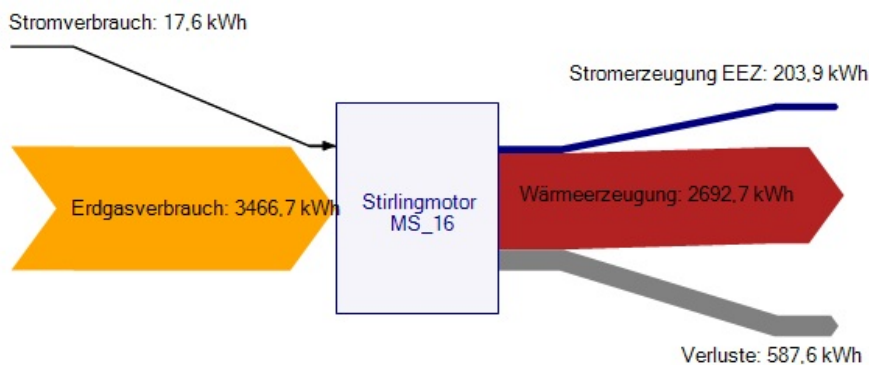


Abb. 15: Sankey-Diagramm zu Energiepionier-Anlage MS16_W, Nov. 2009

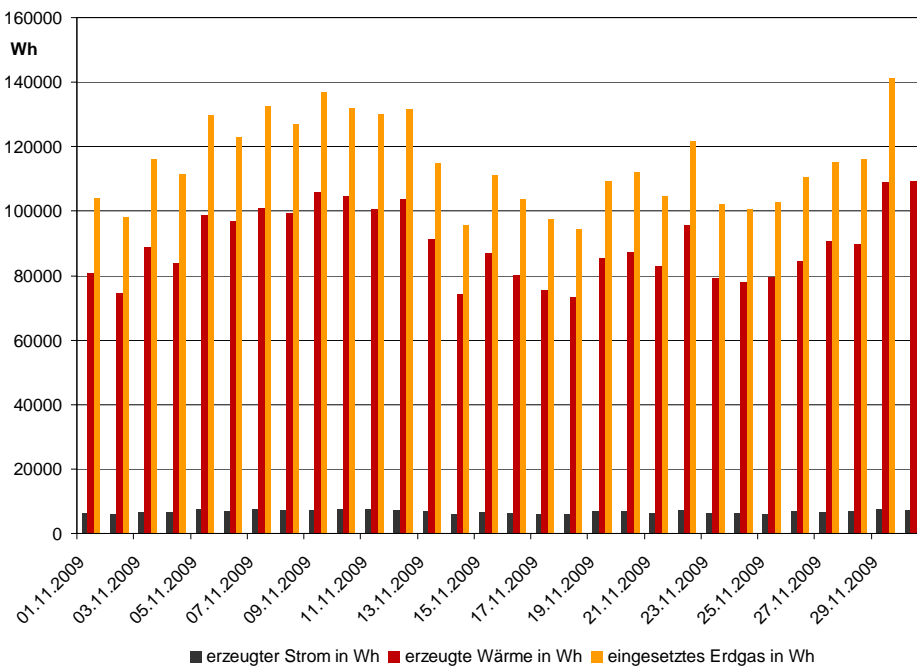


Abb. 16: Tageswerte „eingesetztes Erdgas“, „erzeugter Strom“ und „erzeugte Wärme der Energiepionier-Anlage MS16_W im November 2009.

4.3. Ergebnisse WhisperGen-Anlagen

Die Ergebnisse der WhisperGen-Anlagen werden in den folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt.

4.3.1 Gesamtnutzungsgrade WhisperGen-Anlagen

Die Bandbreite der Gesamtnutzungsgrade über den gesamten Zeitraum des Feldtests ist hier in Abbildung 17 dargestellt.

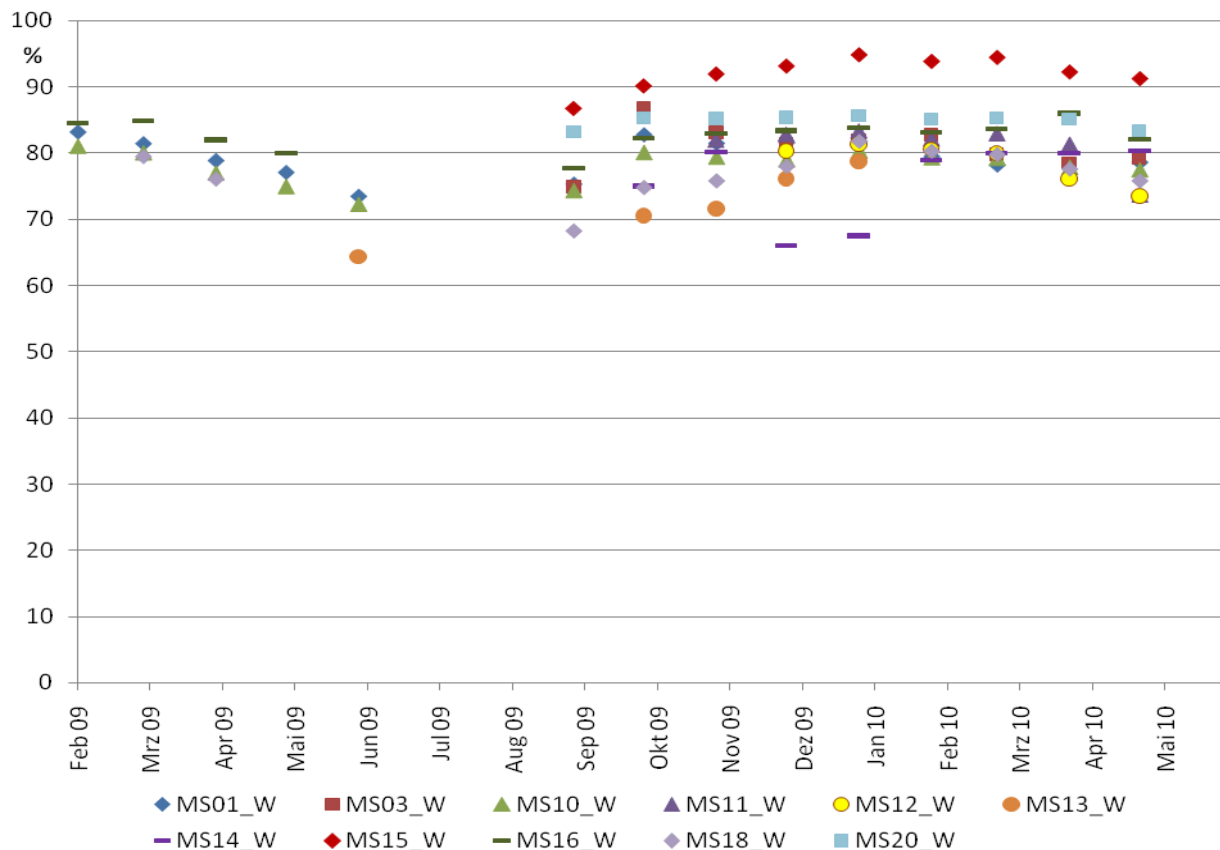


Abb. 17: Monatliche Gesamtnutzungsgrade der WhisperGen-Anlagen über den Zeitraum des Feldtests von Febr. 2009 bis Mai 2010. Die Werte werden ab Vorliegen eines vollständigen Monats plausibler Messdaten dargestellt (vgl. Kap.3, Tabelle 2). Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeerzeugung verzichtet.

Die Gesamtnutzungsgrade liegen bei den WhisperGen-Anlagen zwischen 65% und 95%. In den Monaten Februar 2009 bis Juni 2009 ist bei allen betriebenen WhisperGen-Anlagen ein Absinken der Gesamtnutzungsgrade um ca. 10% zu erkennen. Dies ist im Wesentlichen auf den sinkenden Wärmebedarf und die damit verbundene Reduktion der Wärmeerzeugung zurückzuführen.

...

Exemplarisch wird dieser Zusammenhang von Gesamtnutzungsgrad und Wärmeerzeugung in Abbildung 18 an der WhisperGen-Anlage MS01 von Februar 2009 bis Mai 2010 verdeutlicht.

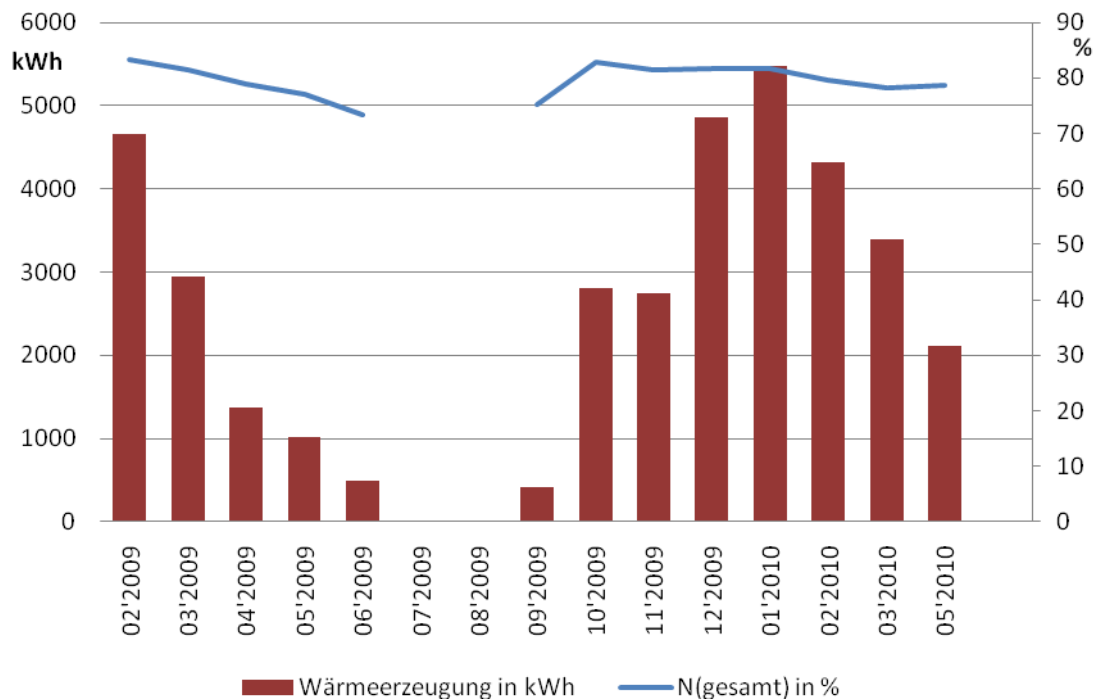


Abb. 18: Monatlich erzeugte Wärmemenge (rote Balken, linke Skala) und der monatliche Gesamtnutzungsgrade (blaue Linie, rechte Skala) der WhisperGen-Anlage MS01. Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeerzeugung verzichtet.

Die roten Balken zeigen die Wärmeerzeugung, über denen als blaue Linie der entsprechende Gesamtnutzungsgrad aufgetragen ist. Es ist zu sehen, dass bei sinkender Wärmeerzeugung auch der Gesamtnutzungsgrad stark sinkt (Februar 2009 bis Juni 2009). Bei großer Wärmeerzeugung (Dezember 2009 und Januar 2010) ist der Gesamtnutzungsgrad hoch. Da in den Sommermonaten Juli und August 2009 nur ein sehr geringer Wärmebedarf besteht, wurde in diesen Monaten auf die Berechnung der Nutzungsgrade verzichtet.

...

Im folgenden Diagramm sind die durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrade je WhisperGen-Anlage über deren Laufzeit dargestellt. Die roten Rauten zeigen die Anzahl der vollständigen Monate, in denen von den Anlagen Strom und Wärme erzeugt wurde.

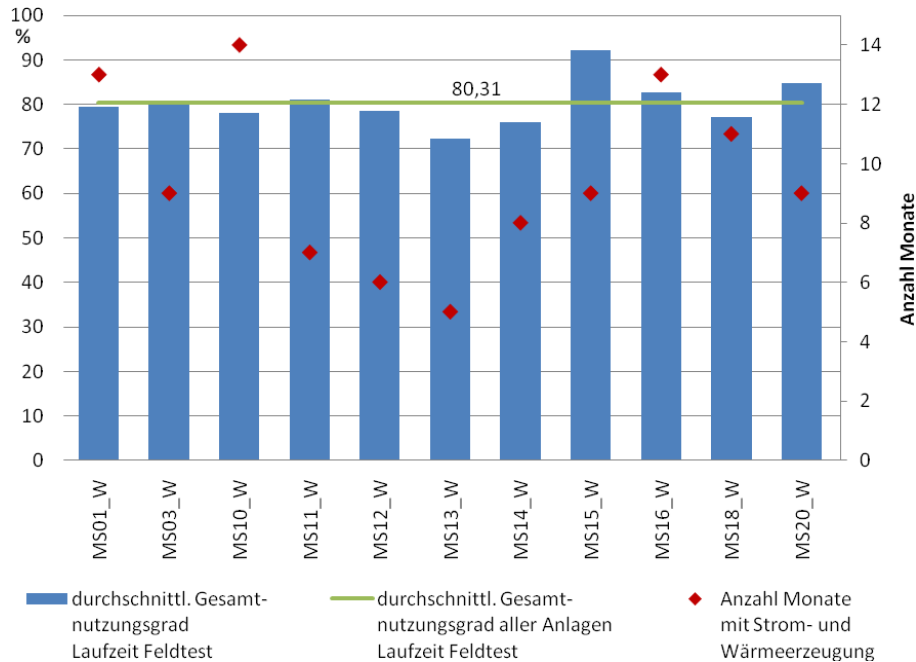


Abb. 19: Durchschnittliche Gesamtnutzungsgrade je WhisperGen-Anlage

Der aus den monatlichen Gesamtnutzungsgraden aller WhisperGen-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche Gesamtnutzungsgrad liegt bei 80,31% und ist in Abbildung 19 als grüne Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

4.3.2 Elektrischer Nutzungsgrad WhisperGen-Anlagen

Für die primärenergetische und wirtschaftliche Anlagen-Bewertung einer Mikro-KWK-Anlage ist der elektrische Nutzungsgrad von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wird er im folgenden Kapitel für die WhisperGen-Anlagen detailliert betrachtet.

Die Bandbreite der elektrischen Nutzungsgrade über den gesamten Zeitraum des Feldtests zeigt Abbildung 20.

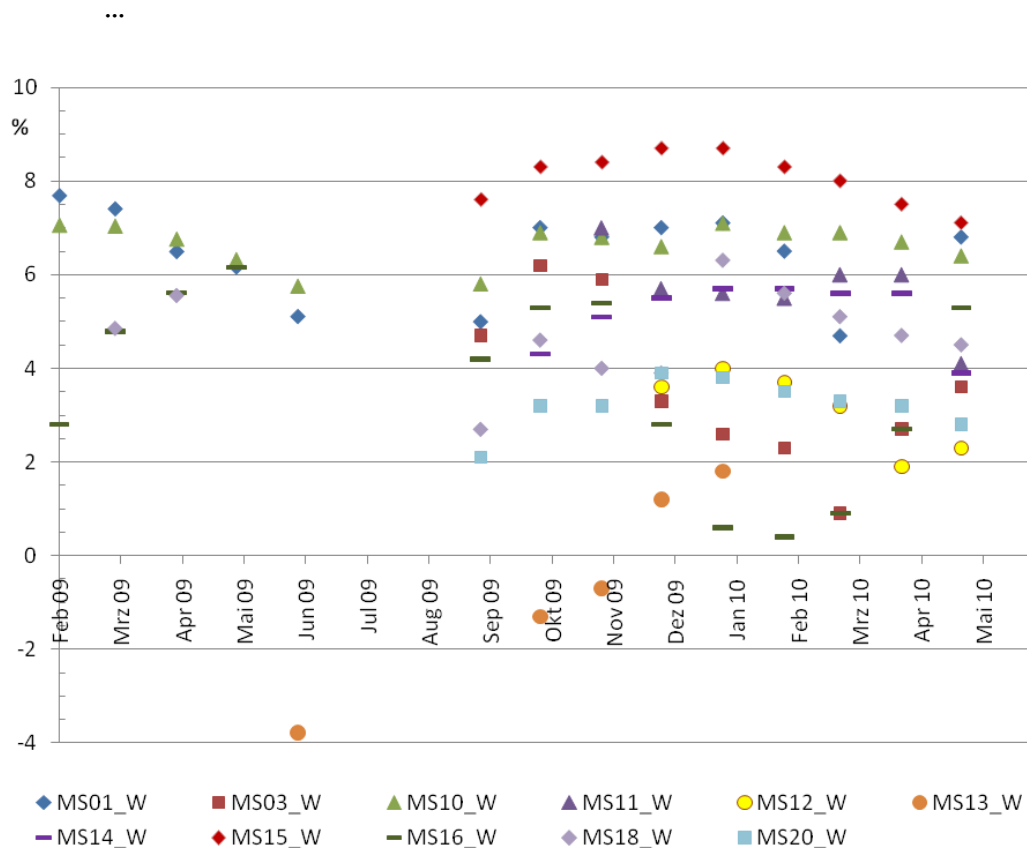


Abb. 20: Monatliche elektrische Nutzungsgrade der WhisperGen-Anlagen über den Zeitraum des Feldtests von Febr. 2009 bis Mai 2010. Die Werte werden ab Vorliegen eines vollständigen Monats plausibler Messdaten dargestellt (vgl. Kap.3, Tabelle 1). Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeerzeugung verzichtet.

Die elektrischen Nutzungsgrade streuen bei den WhisperGen-Anlagen stark zwischen -3,78% und 8,7%. Der negative elektrische Nutzungsgrad der Anlage MS13_W ist auf den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers zurückzuführen. Als Konsequenz hatte die Anlage regelungstechnische Probleme, die zu einem höheren Stromverbrauch führten als Strom von der Anlage erzeugt wurde.

Ein Zusammenhang zwischen dem elektrischen Nutzungsgrad und der Wärmeerzeugung besteht bei den Anlagen MS01_W und MS10_W. Bei diesen sinkt N_{el} in den Monaten Februar 2009 bis Juni 2009 um ca. 2%. Bei den Anlagen MS16_W und MS18_W hingegen steigt N_{el} im gleichen Zeitraum bei sinkender Wärmeerzeugung. Exemplarisch wird dies in Abbildung 21 und 22 an den WhisperGen-Anlage MS01_W und MS16_W detailliert im Zeitraum Februar 2009 bis Mai 2010 gezeigt.

Die roten Balken in Abbildung 21 und 22 zeigen die Wärmeerzeugung, über denen als gelbe Linie der entsprechende elektrische Nutzungsgrad aufgetragen ist. Bei der Anlage MS01_W (Abbildung 21) sinkt der elektrische Nutzungsgrad bei sinkender Wärmeerzeugung von Februar 2009 bis Juni 2009 um ca. 2,5%. Die Abhängigkeit des elektrischen Nutzungsgrades von der Wärmeerzeugung ist bei dieser Anlage schwächer als die Abhängigkeit des Gesamtnutzungsgrades. Abbildung 22 zeigt den Zusammenhang von N_{el} und Wärmeerzeugung der Anlage MS16_W. Bei dieser Anlage steigt der elektrische Nutzungsgrad in den Monaten Februar 2009 bis Mai 2009 von 2,8% auf 6,16% um 4,36% obwohl die Wärmeabnahme stark sinkt. Die Ursachen für die unterschiedlichen Messergebnisse der Anlagen MS01_W, MS10_W, MS16_W

werden - beispielhaft für die im Projekt eingesetzten Methoden zur Detailanalyse - anhand einer besonderen Datenauswertemethode, dem Carpetplot, analysiert und erläutert:

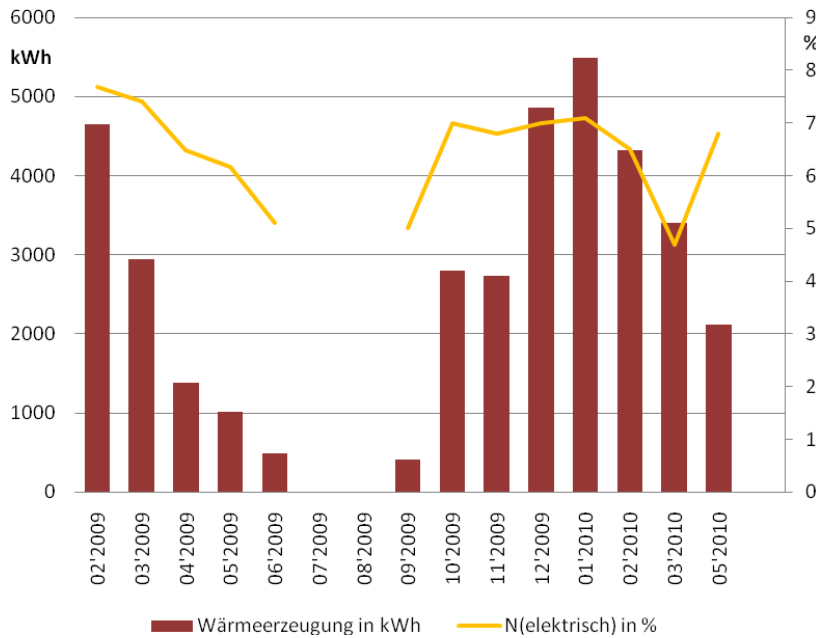


Abb. 21: Monatlich erzeugte Wärmemenge (rote Balken, linke Skala) und der monatliche elektrische Nutzungsgrad (gelbe Linie, rechte Skala) der WhisperGen-Anlage MS01. Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeproduktion verzichtet.

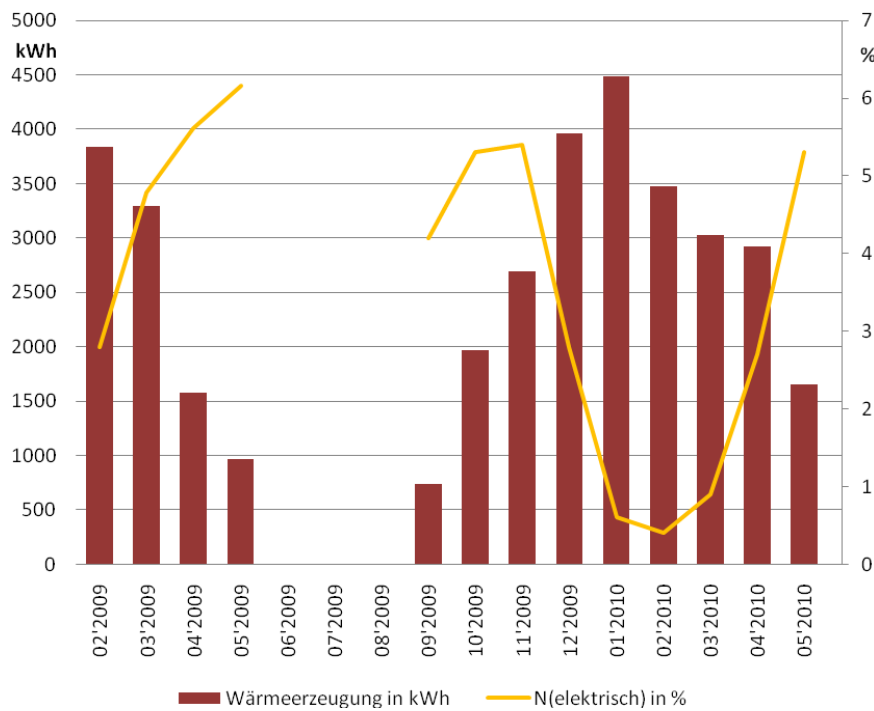


Abb. 22: Monatlich erzeugte Wärmemenge (rote Balken, linke Skala) und der monatliche elektrische Nutzungsgrad (gelbe Linie, rechte Skala) der WhisperGen-Anlage MS16. Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeproduktion verzichtet.

Die Darstellung in Carpetplots ist wichtig, da bei hoher Messdatenauflösung große Datenmengen analysiert werden müssen. Die herkömmlichen Darstellungsmethoden wie Balken- und Liniendiagramme stoßen bei großen Datenmengen an ihre Grenzen; sie eignen sich zur anschaulichen Darstellung von im Vorfeld verdichteten Daten. Eine detaillierte Messdatenanalyse ist mit ihnen nur sehr begrenzt möglich.

Im Feldtest Energiepioniere wurde eine Messdatenauflösung in 5-Minuten-Intervallen gewählt. Bei dieser Auflösung erhält man an einem Tag 288 Messdatensätze mit 20 Messwerten, in einem Monat von 30 Tagen 8640 Datensätze, in einem Vierteljahr 26208 Datensätze.

Der Vorteil der Carpetplots ist, dass mit ihm große Datenmengen über lange Zeitintervalle differenziert betrachtet und verglichen werden können. Das Prinzip des Carpetplots wird am Beispiel der Abbildung 23 erläutert. Die Abbildung zeigt einen Carpetplot der Anlage MS01_W. Auf der horizontalen Achse ist der Zeitraum von 01.02.2009 bis 01.07.2009 dargestellt über den der Messwert aufgetragen wird. Auf der linken vertikalen Achse ist die Tageszeit in Stunden angegeben. Die Farbskala auf der rechten vertikalen Achse gibt an, welche Höhe der Messwert bei einer bestimmten Farbe hat. In dem Beispiel von Abb. 23 ist der dargestellte Messwert die elektrische Leistung des WhisperGen-Motors MS01_W; in diesem Carpetplot wird beispielsweise die elektrische Leistung von 805 W rot dargestellt, die Leistung von 447 W ist gelb und die Leistung von 268 W ist grün.

Jeder Tag ist eine vertikale Farbsäule von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr. Die Farbsäule ist aufgebaut aus 288 Linien, die in den entsprechenden Farben der Farbskala die 5-Min-Messwerte abbilden. Es entsteht ein „Farbteppich mit Mustern“, die hervorragend zur Datenanalyse genutzt werden können.

Man sieht beispielsweise in Abb. 23 an der linken Farbsäule den Verlauf der elektrischen Leistung vom 01.02.2009. Die Anlage läuft mit einer Leistung von ca. 900 W ohne längere Stillstandsphasen von 0.00 Uhr bis kurz vor 6.00 Uhr; zu diesem Zeitpunkt gibt es ein kurzes Absinken der elektrischen Leistung, das sich um kurz vor 12.00 Uhr, um ca. 17.00 Uhr und um kurz nach 20.00 Uhr wiederholt. Am Beispiel der Abb. 23 erkennt man das Takten der Anlage ab April 2009.

Anhand der Datenauswertemethode Carpetplot werden im folgenden Abschnitt die Anlage MS01_W, MS10_W und Anlage MS16_W betrachtet und deren Betriebsverhalten analysiert, verglichen und erläutert. ...

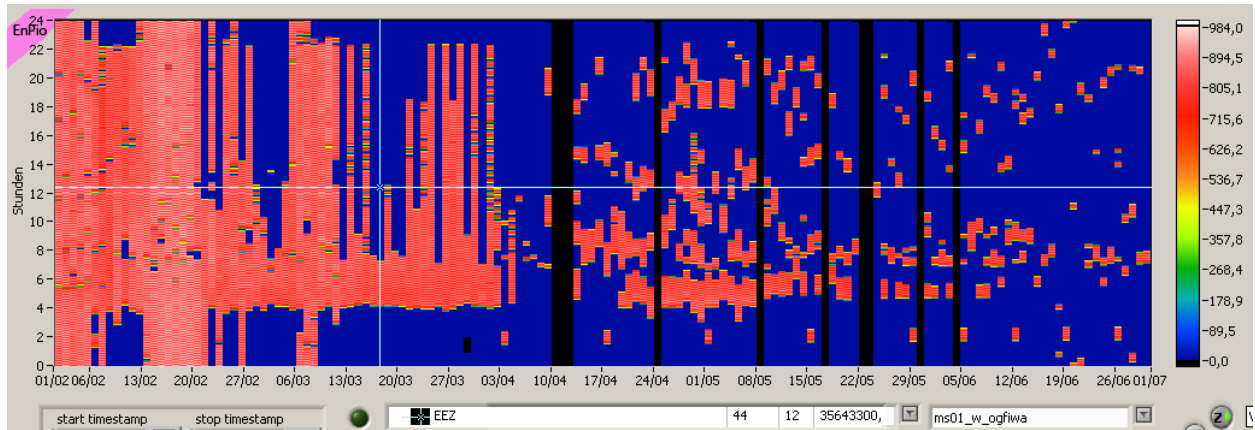


Abb. 23: Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS01_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.02.2009 bis 01.07.2009. Linke Skala: Uhrzeit; rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

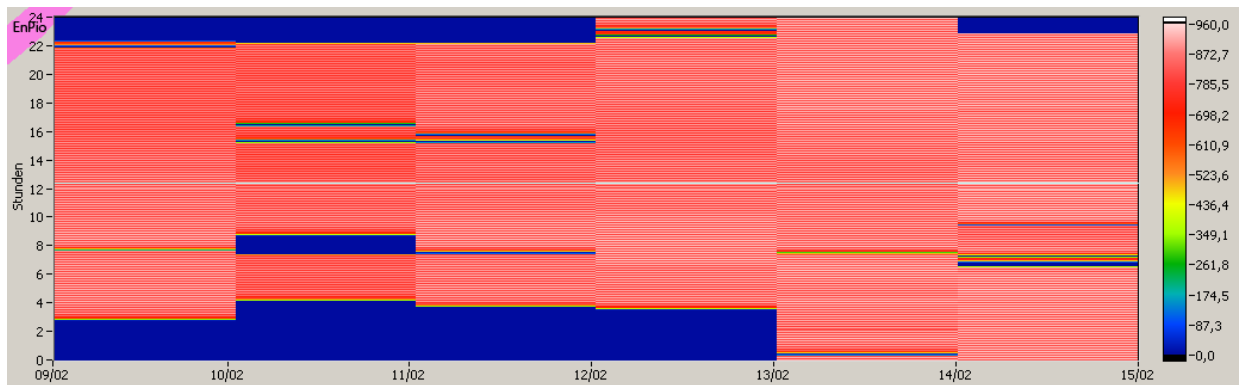


Abb. 24: Detail-Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS01_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 09.02.2009 bis 14.02.2009. Linke Skala: Tageszeit, rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

Der Carpetplot Abb. 23 zeigt, dass die Anlage MS01_W in den Wintermonaten Februar 2009 und März 2009 tägliche eine lange Betriebsphase mit hoher Stromerzeugung von ca. 900 W hat, wobei ein mehrfaches kurzes Absinken der elektrischen Leistung auftritt. In Abb. 24 ist diese Betriebsweise detailliert über 6 Tage dargestellt. Ab April 2009 taktet die Anlage 3 – 4-mal täglich. Da der Stirlingmotor bei jedem Start eine Aufheizphase hat, bei der Energie benötigt wird, wirkt sich das Takten der Anlage negativ auf den elektrischen Nutzungsgrad aus.

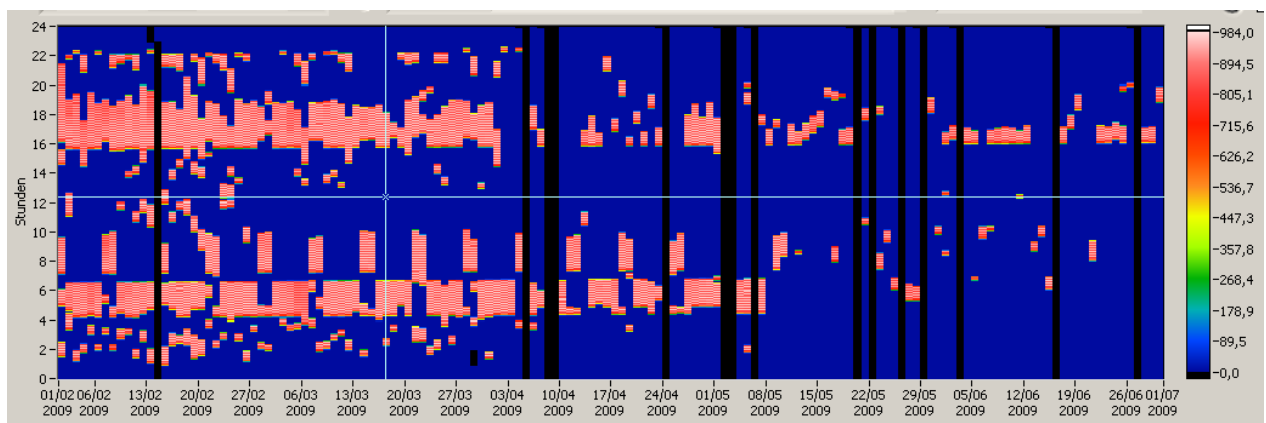


Abb. 25: Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS10_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.02.2009 bis 01.07.2009. Linke Skala: Tageszeit, rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

Das Betriebsverhalten der Anlage MS10_W unterscheidet sich in den Wintermonaten wenig von den Monaten der Übergangszeit. Die Anlage taktet in den Wintermonaten 4 – 6-mal täglich. Über den Tag verteilt, dauert die relativ kurze Betriebsphase 1 – 3 Stunden, mit einer maximalen elektrischen Leistung von ca. 950 W. In der Übergangszeit reduziert sich die Takthäufigkeit auf 2-3-mal täglich.

Vergleicht man den durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrad der Anlagen MS01_W und MS10_W, stellt man fest, dass N_{el} der Anlage MS10_W sogar etwas höher ist als von MS01_W (Abb. 28). Allerdings ist die erzeugte Strommenge der Anlage MS01_W deutlich höher als die der Anlage MS10_W (Kap. 4.3.3, Abb. 30). Bei beiden Anlagen sinkt der elektrische Nutzungsgrad mit sinkender Wärmeerzeugung. Im Vergleich dazu steigt der elektrische Nutzungsgrad der Anlage MS16_W mit sinkender Wärmeerzeugung. Abb. 26 zeigt den Carpetplot der Anlage MS16_W über den Zeitraum von 01.02.2009 bis 01.07.2009. Es fällt auf, dass die Anlage über den gesamten betrachteten Zeitraum 5 - 6-mal täglich taktet. Das Betriebsverhalten der Anlage zeichnet sich im Februar durch 1 - 2-stündige Betriebsphasen mit hoher elektrischer Leistung von ca. 900 W aus, denen lange Phasen von bis zu 10-stündigem Teillastbetrieb im unteren Leistungsbereich mit ca. 180 W folgen. Die langen Betriebsphasen im Teillastbereich sind in Abb. 27 detailliert vom 09.02.2009 bis 15.02.2009 dargestellt. Die Laufzeiten im Teillastbereich werden gegen Ende Februar 2009 weniger und verschwinden ab April 2009. Wendet man auf das beschriebene Betriebsverhalten der Reduktion der Teillastbereiche die Definition des elektrischen Nutzungsgrades an,

$$N_{el} = \frac{W_{el(erzeugt)} - W_{el(bezogen)}}{Q_{Brennstoff}} \times 100$$

so kann man daran den steigenden elektrischen Nutzungsgrad der Anlage MS16_W bei sinkender Wärmeerzeugung erklären. Die Anzahl der Anlagenstarts bleibt über den betrachteten Zeitraum konstant, so dass auch der von der Anlage verbrauchte Strom ($W_{el(bezogen)}$) annähernd gleich bleibt, unabhängig ob die Anlage in Teillastbetrieb oder unter Volllast läuft. Selbst wenn das Verhältnis von Brennstoffverbrauch ($Q_{Brennstoff}$) zu erzeugtem Strom ($W_{el(erzeugt)}$) im Teillastbetrieb konstant bleibt, reduziert sich der elektrische Nutzungsgrad (N_{el}), da der verbrauchte Anlagenstrom ($W_{el(bezogen)}$) gleich hoch bleibt, d.h. $W_{el(bezogen)}$ steigt spezifisch bezogen auf die erzeugte Strommenge $W_{el(erzeugt)}$.

Somit erklärt die Reduktion der Betriebsphasen im Teillastbereich den steigenden elektrischen Nutzungsgrad der Anlage MS16_W trotz sinkender Wärmeerzeugung.

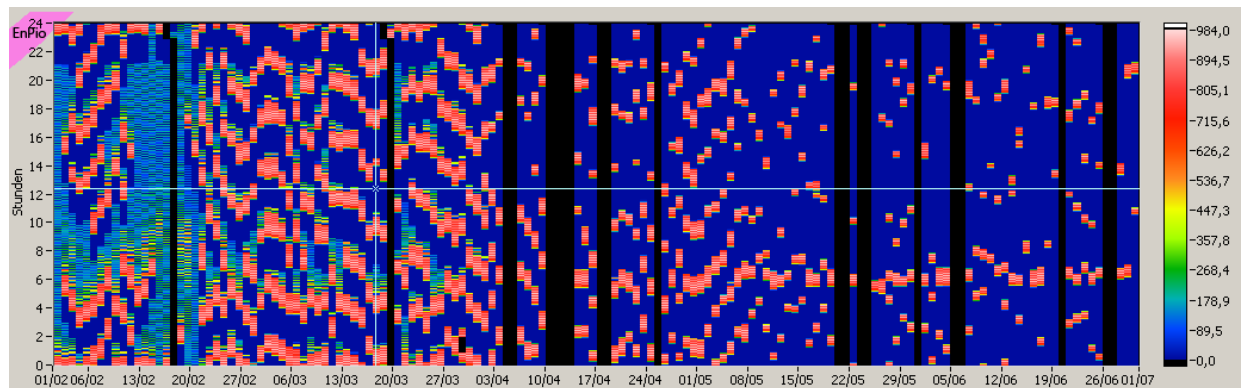


Abb. 26: Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS16_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.02.2009 bis 01.07.2009. Linke Skala: Tageszeit, rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

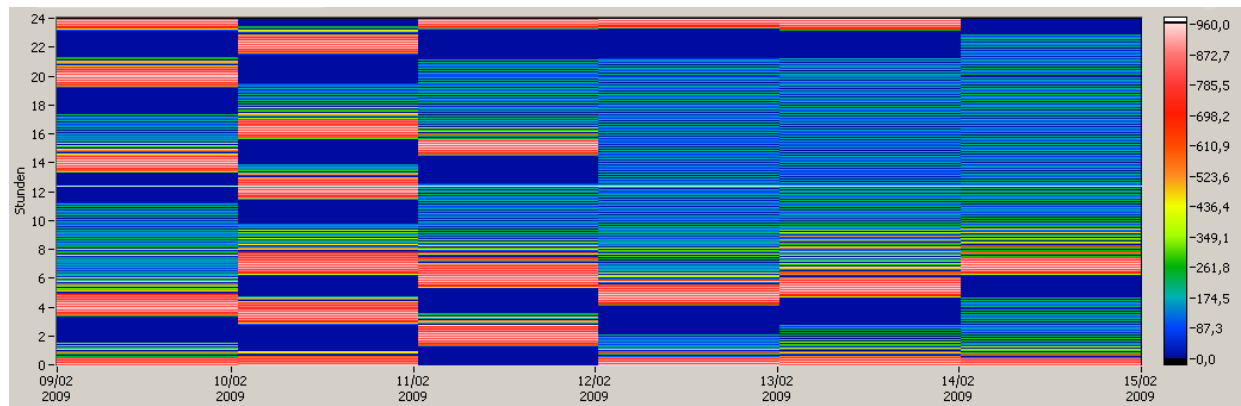


Abb. 27: Detail-Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS16_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 09.02.2009 bis 14.02.2009. Linke Skala: Tageszeit, rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

Die durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage über deren Laufzeit sind im folgenden Diagramm dargestellt (Abb. 28). Die roten Rauten zeigen die Anzahl der Monate, in denen von den Anlagen täglich Strom und Wärme erzeugt wurde...

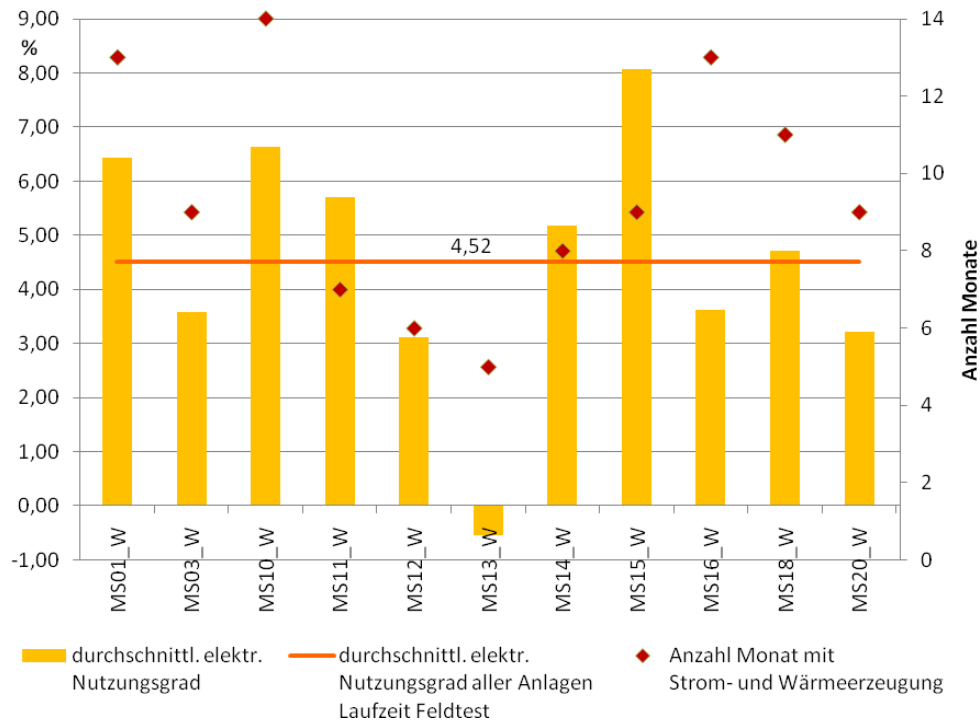


Abb. 28: Durchschnittliche elektrische Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage

Der aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden aller WhisperGen-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche elektrische Nutzungsgrad liegt bei 4,52% und ist in Abbildung 28 als orange Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Monatswerte der Anlagen herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

4.3.3 Vergleich WhisperGen-Anlagen

Da die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Abhängigkeit der Nutzungsgrade von der Höhe der Wärmeabnahme bzw. Wärmeerzeugung besteht, ist es wichtig beim Anlagenvergleich die gleichen Zeiträume zu betrachten.

Alle WhisperGen-Anlagen wurden von Oktober 2009 bis Mai 2010 betrieben und können deshalb auch in diesem Zeitraum direkt miteinander verglichen werden.

In Abbildung 29 sind die durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrade über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010 je WhisperGen-Anlage als blaue Balken dargestellt; als rote Rauten sind die Monate dargestellt, in denen von der jeweiligen Anlage täglich Strom und Wärme erzeugt wurde (rechte Skala). Die grüne Linie markiert den über alle WhisperGen-Anlagen errechneten durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrad im Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010.

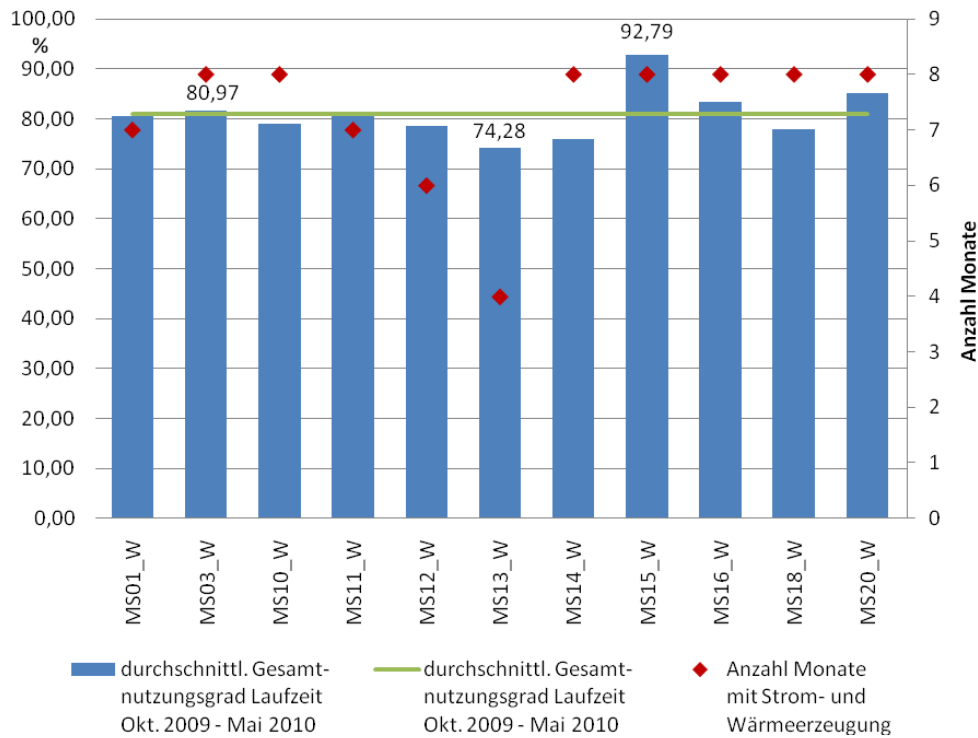


Abb. 29: Durchschnittliche Gesamtnutzungsgrade je WhisperGen-Anlage

In Abbildung 29 lässt sich gut erkennen, dass der Großteil der WhisperGen-Anlagen nahe bei dem Durchschnittswert des Gesamtnutzungsgrades von 80,97% liegt. Den höchsten Gesamtnutzungsgrad erreicht die Anlage MS15_W mit 92,79% und liegt damit als einzige Anlage über 90%. Der niedrigste Gesamtnutzungsgrad liegt mit 74,28% bei der Anlage MS13_W. Wie schon zu Beginn des Kapitels „elektrischer Nutzungsgrad“ erwähnt, lag bei der Anlage MS13_W eine Anlagenstörung vor, die durch den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers verursacht wurde. Als Konsequenz hatte die Anlage regelungstechnische Probleme.

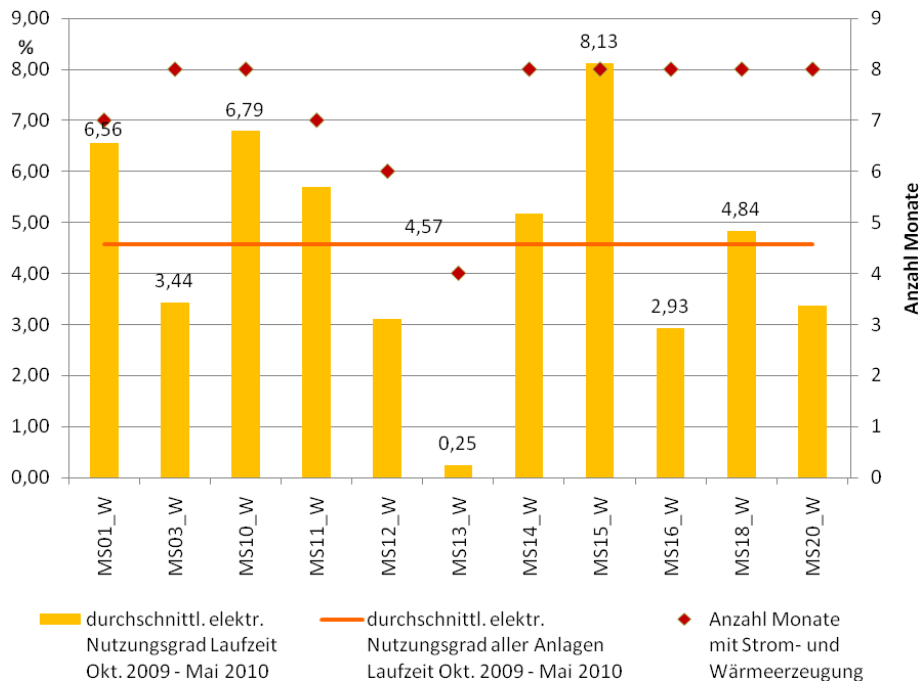


Abb. 30: Durchschnittliche elektrische Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage

Die durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrade je WhisperGen-Anlage über den Vergleichszeitraum von Oktober 2009 bis Mai 2010 sind in Diagramm Abb. 30 dargestellt. Die roten Rauten zeigen die Anzahl der Monate, in denen von den Anlagen täglich Strom und Wärme erzeugt wurde.

Der aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden aller WhisperGen-Anlagen über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Mai 2010 errechnete durchschnittliche elektrische Nutzungsgrad liegt bei 4,57% und ist in Abbildung 30 als orange Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

Die Durchschnittswerte des elektrischen Nutzungsgrades streuen im Vergleichszeitraum stark zwischen 0,25% und 8,13%. Den höchsten durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrad erreicht die Anlage MS15_W mit 8,13% und liegt damit als einzige Anlage über 7%. Der niedrigste durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrad liegt mit 0,25% bei der Anlage MS13_W vor. Wie schon zu Beginn des Kapitels elektrischer Nutzungsgrad erwähnt wurde, lag durch den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers bei der Anlage MS13_W eine Anlagenstörung vor. Als Konsequenz hatte die Anlage regelungstechnische Probleme, die über die gesamte Dauer des Feldtests nicht behoben wurden.

Für eine Anlagenbewertung sind neben den Nutzungsgraden auch die erzeugte Strommenge und die erzeugte Wärmemenge von Bedeutung. Abbildung 31 zeigt die erzeugte Wärmemenge der WhisperGen-Anlagen im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010 als rote Balken; die blaue Linie markiert die über alle WhisperGen-Anlagen errechnete durchschnittlich erzeugte Wärmemenge im Vergleichszeitraum.

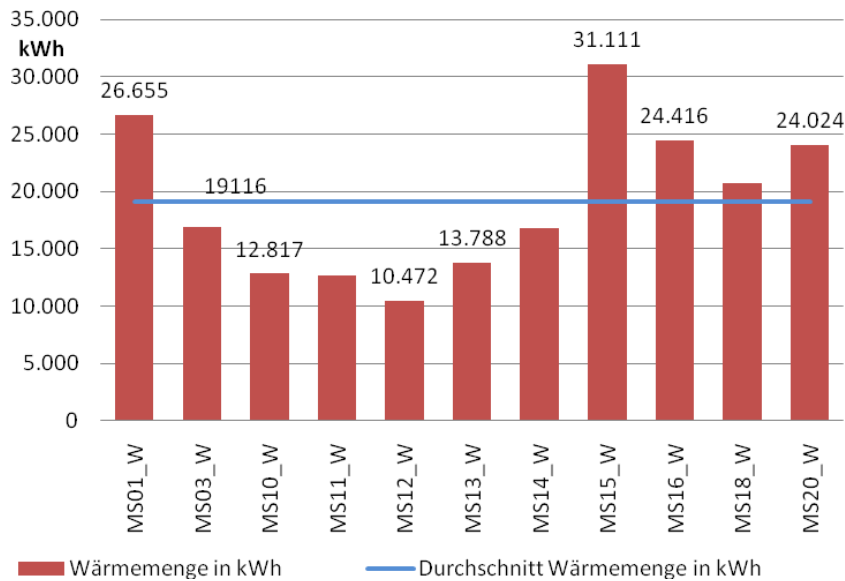


Abb. 31: Erzeugte Wärmemenge je WhisperGen-Anlage im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010

Die erzeugte Wärmemenge der Whispergen-Anlagen im Vergleichszeitraum liegt zwischen 10.472 kWh und 31.111 kWh. Die größte Wärmemenge wird von Anlage MS15_W mit 31.111 kWh erzeugt. Die niedrigste Wärmemenge liegt mit 10.472 kWh bei der Anlage MS12_W vor.

Die Stromerzeugung im gleichen Zeitraum ist in Abbildung 32 als gelbe Balken dargestellt. Die orange Linie stellt die über alle WhisperGen-Anlagen errechnete durchschnittliche Stromerzeugung im Vergleichszeitraum dar.

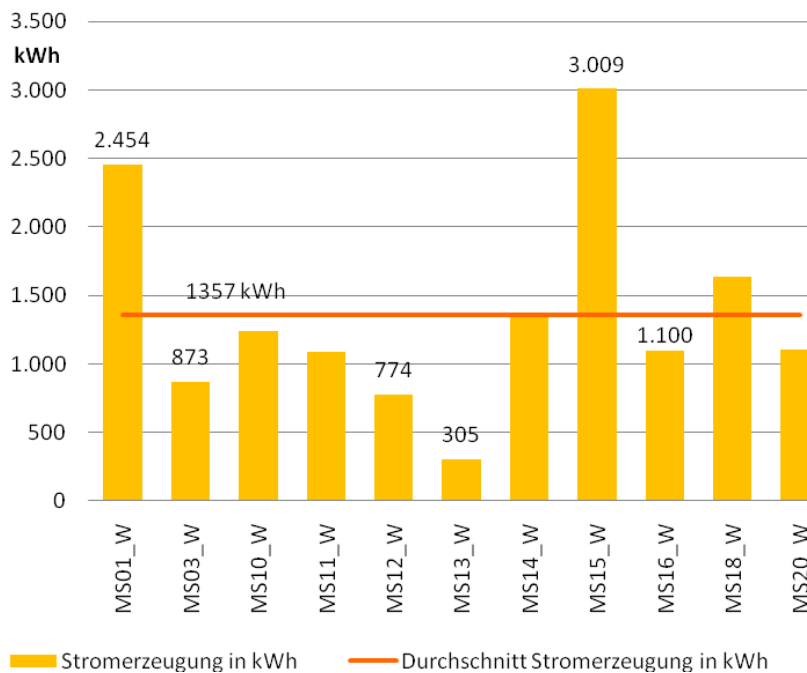


Abb. 32: Stromerzeugung je WhisperGen-Anlage im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010. Die orange Linie zeigt die aus allen WhisperGen-Anlagen errechnete durchschnittliche Stromerzeugung im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010.

Die Stromerzeugung der Whispergen-Anlagen variiert im Vergleichszeitraum stark zwischen 305 kWh und 3.009 kWh. Mit 3.009 kWh erzeugt die Anlage MS15_W das zehnfache der Anlage MS13_W mit 305 kWh Stromerzeugung. Wie schon zu Beginn des Kapitels elektrischer Nutzungsgrad erwähnt wurde, lag durch den Einbau eines falschen Außentemperaturfühlers bei der Anlage MS13_W eine Anlagenstörung vor. Als Konsequenz hatte die Anlage regelungstechnische Probleme, die dazu führten, dass die Anlage über lange Betriebszeiträume mehr Strom bezogen als erzeugt hat.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Anlagen mit hoher erzeugter Wärmemenge und damit hoher Auslastung eine Tendenz zu hohen elektrischen Nutzungsgraden und Gesamtnutzungsgraden besteht. Die Anlage MS15_W liegt sowohl bei den Nutzungsgraden wie auch bei der erzeugten Wärme- und Stromerzeugung deutlich über dem Durchschnitt der übrigen WhisperGen-Anlagen des Feldtests und wird im Folgenden als Best-Practise-Anlage bezeichnet. Die Ergebnisse der Anlage MS01_W liegen unter den Ergebnissen der Anlage MS15_W. Die Anlage MS01_W liefert jedoch im Vergleich zu den anderen Stirlingmotoren Betriebsergebnisse, die über dem Anlagendurchschnitt liegen; beim Gesamt-nutzungsgrad erreicht die Anlage jedoch nur knapp den Durchschnitt.

Der Grund für die guten Betriebsergebnisse der Anlage MS15_W wird in Abbildung 33 deutlich. Die zwei Carpetplots zeigen die elektrische Leistung der Anlagen im Monat Dezember 2009. Im oberen Carpetplot ist die Anlage MS01_W mit einer maximal erreichten elektrischen Leistung von 900 W dargestellt. Gut zu erkennen ist die täglich wechselnde Betriebsweise der Anlage MS01_W mit unterschiedlichen Startzeiten, mit Stillstandphasen und unsymmetrischem Taktverhalten. Im Vergleich dazu zeigt die Anlage MS15_W im unteren Carpetplot nahezu gleichbleibende tägliche Betriebszeiten über den gesamten Monat ohne Betriebsunterbrechungen und einer elektrischen Leistung von maximal 978 W mit geringen Schwankungen.

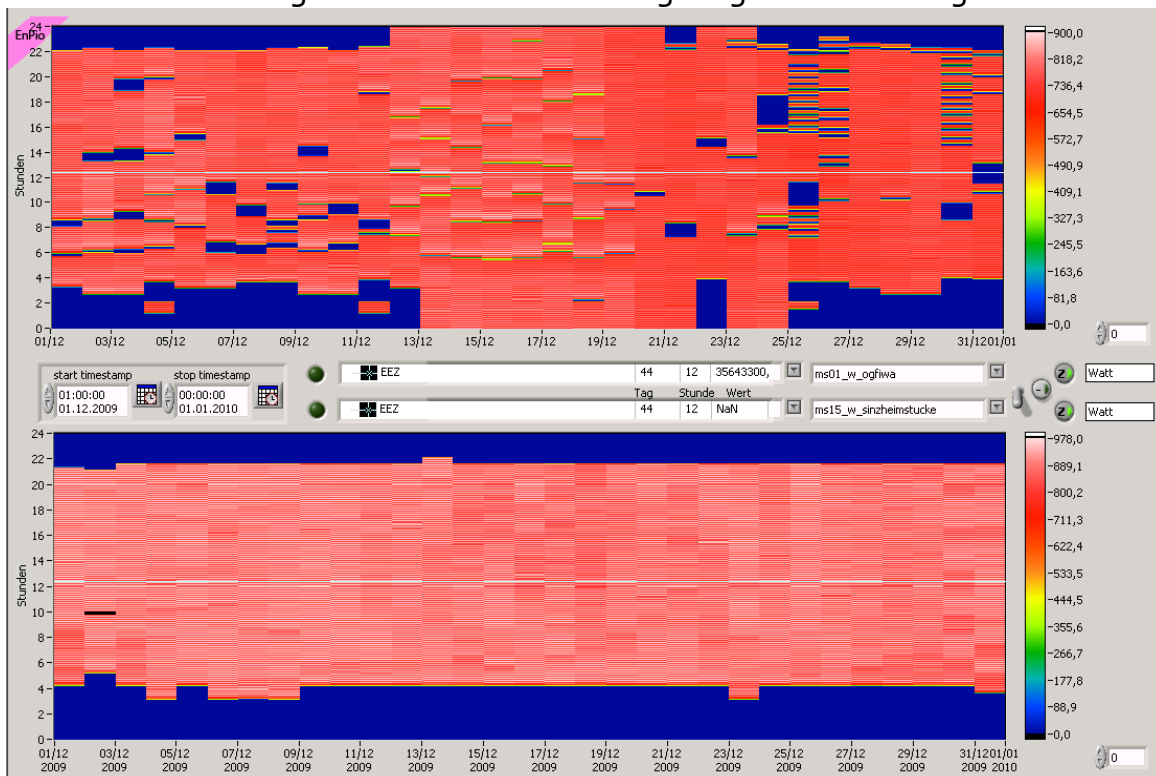


Abb. 33: Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS01_W und MS15_W

4.4. Ergebnisse Lion-Anlagen

Die Ergebnisse der acht Lion-Anlagen werden in den folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt. Bei der Lion-Anlage MS04_L war es trotz Einbau einer Kompensation der Leitungsverluste und dem Test anderer Netzbetreiber nicht möglich, den GSM-Empfang herzustellen. Von einer kompletten Umrüstung der Datenübertragung auf Festnetz wurde aus Kostengründen abgesehen.

Aus diesem Grund lagen im Feldtest für sieben Lion-Motoren auswertbare Messdaten vor.

4.4.1 Gesamtnutzungsgrade Lion-Anlagen

Die Bandbreite der Gesamtnutzungsgrade über den gesamten Zeitraum des Feldtests ist in Abbildung 34 dargestellt.

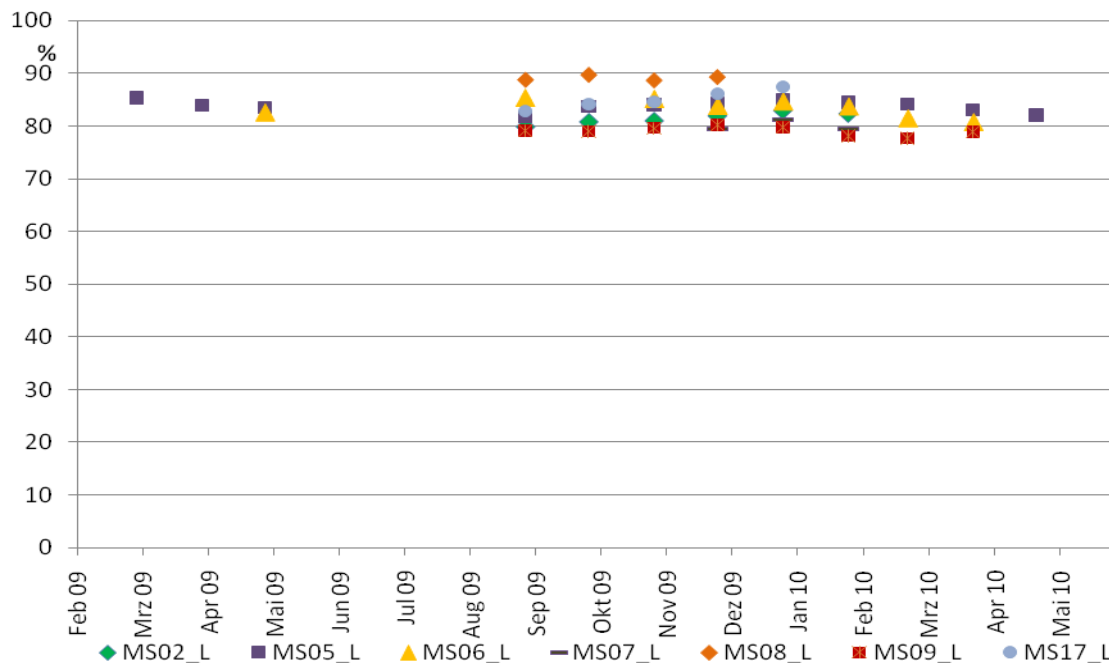


Abb. 34: Monatliche Gesamtnutzungsgrade der Lion-Anlagen über den Zeitraum des Feldtests von Febr. 2009 bis Mai 2010. Die Werte werden ab Vorliegen eines vollständigen Monats plausibler Messdaten dargestellt (vgl. Kap.3, Tabelle 1). Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeerzeugung verzichtet.

Die Gesamtnutzungsgrade liegen bei den Lion-Anlagen zwischen 80% und 90% und streuen mit einer Bandbreite von 10% weniger als die Gesamtnutzungsgrade der Whispergen-Anlagen. Der Zusammenhang zwischen Gesamtnutzungsgrade und sinkendem Wärmebedarf ist ebenfalls vorhanden. Er fällt jedoch schwächer aus und ist somit in Abbildung 35 nahezu nicht mehr zu erkennen.

In Abbildung 35 wird der Zusammenhang von Gesamtnutzungsgrad und Wärmeerzeugung an der Lion-Anlage MS05 von März 2009 bis Mai 2010 verdeutlicht.

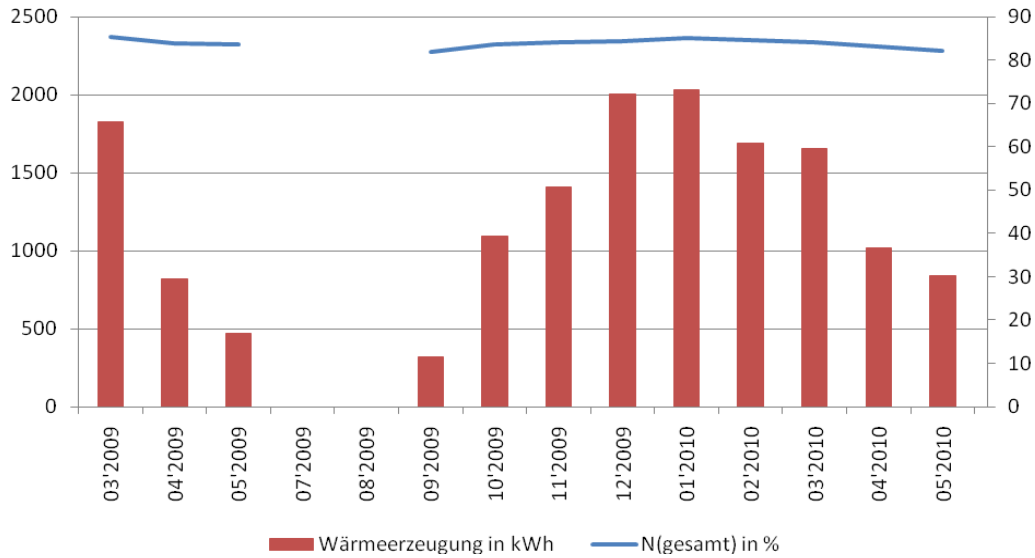
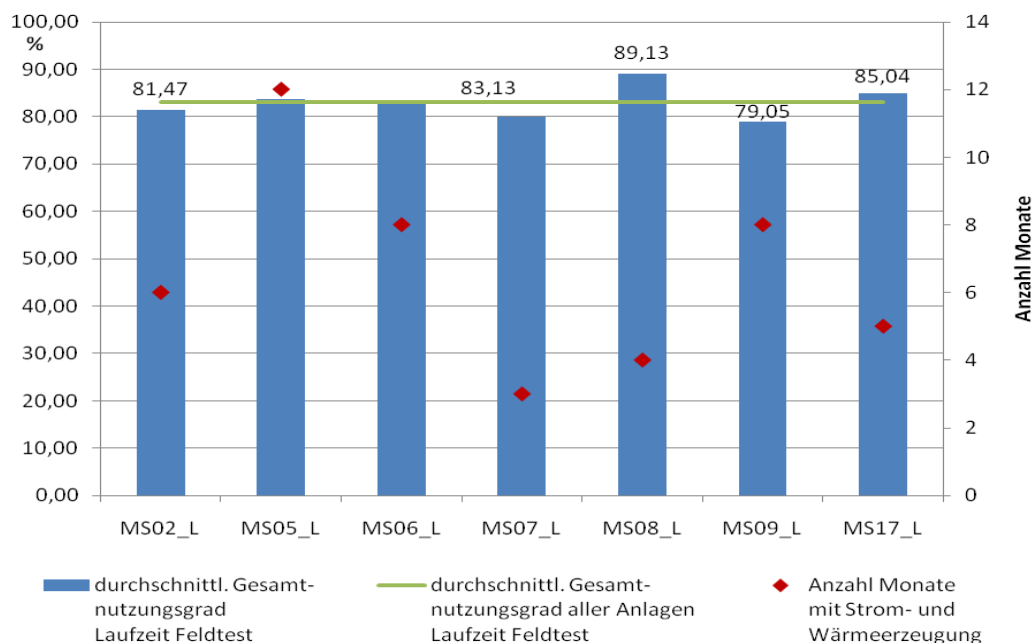


Abb. 35: Monatlich erzeugte Wärmemenge und der monatliche Gesamtnutzungsgrade der Lion-Anlage MS05.

Die roten Balken zeigen die Wärmeerzeugung, über denen als blaue Linie der entsprechende Gesamtnutzungsgrad aufgetragen ist. Dieser verändert sich nur wenig über den Betrachtungszeitraum. Da in den Sommermonaten Juli und August 2009 nur ein sehr geringer Wärmebedarf besteht, wurde in diesen Monaten auf die Berechnung der Nutzungsgrade verzichtet.

In Abbildung 36 sind die durchschnittlichen Gesamtnutzungsgrade je Lion-Anlage über deren Laufzeit dargestellt. Die roten Rauten zeigen die Anzahl der vollständigen Monate, in denen von den Anlagen Strom und Wärme erzeugt wurde. Der aus den monatlichen Gesamtnutzungsgraden aller Lion-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche Gesamtnutzungsgrad liegt bei 83,13% und ist in Abbildung 36 als grüne Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.



4.4.2 Elektrischer Nutzungsgrad Lion-Anlagen

Für die primärenergetische und wirtschaftliche Anlagen-Bewertung einer Mikro-KWK-Anlage ist der elektrische Nutzungsgrad von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wird er im folgenden Kapitel für die Lion-Anlagen detailliert betrachtet.

Die Bandbreite der elektrischen Nutzungsgrade über den gesamten Zeitraum des Feldtests zeigt Abbildung 37.

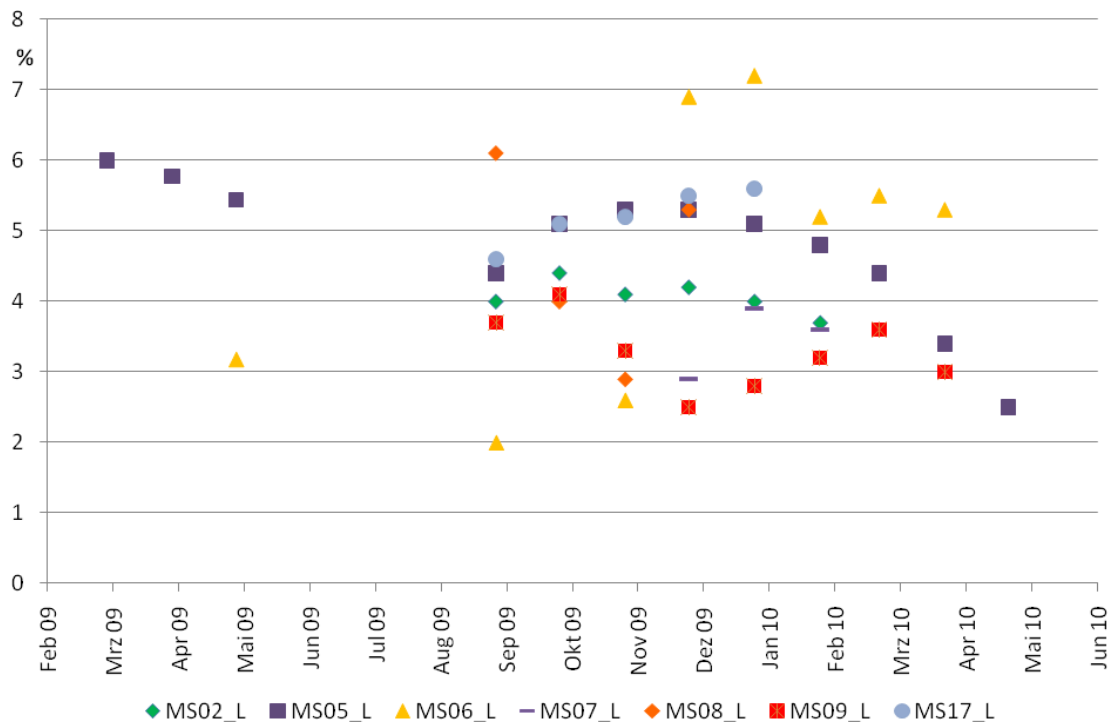


Abb. 37: Monatliche elektrische Nutzungsgrade der Lion-Anlagen über den Zeitraum des Feldtests von Febr. 2009 bis Mai 2010. Die Werte werden ab Vorliegen eines vollständigen Monats plausibler Messdaten dargestellt (vgl. Kap.3, Tabelle 2). Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeerzeugung verzichtet.

Die elektrischen Nutzungsgrade streuen bei den Lion-Anlagen stark zwischen 2% und 7,2%. Ein Zusammenhang zwischen dem elektrischen Nutzungsgrad und der Wärmeerzeugung besteht bei der Lion-Anlage MS05_L. Bei dieser sinkt N_{el} in den Monaten März 2009 bis Mai 2009 um ca. 1,5% und von Februar 2010 bis Mai 2010 um ca 2%.

Exemplarisch wird dies in Abbildung 38 an der Lion-Anlage MS05_L detailliert im Zeitraum März 2009 bis Mai 2010 gezeigt. Die roten Balken in Abbildung 38 zeigen die Wärmeerzeugung, über denen als gelbe Linie der entsprechende elektrische Nutzungsgrad aufgetragen ist.

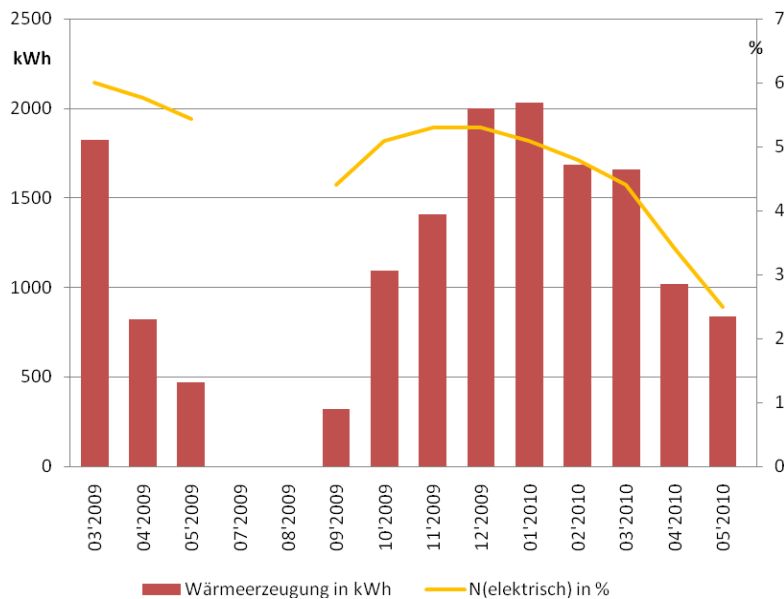


Abb. 38: Monatlich erzeugte Wärmemenge (rote Balken, linke Skala) und der monatliche elektrische Nutzungsgrad (gelbe Linie, rechte Skala) der Lion-Anlage MS05. Auf die Berechnung der Nutzungsgrade wurde in den Sommermonaten Juli 2009 und August 2009 wegen geringer Wärmeproduktion verzichtet.

Die durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrade je Lion-Anlage über deren Laufzeit sind im folgenden Diagramm dargestellt (Abb. 39). Die roten Rauten zeigen die Anzahl der Monate, in denen von den Anlagen täglich Strom und Wärme erzeugt wurde.

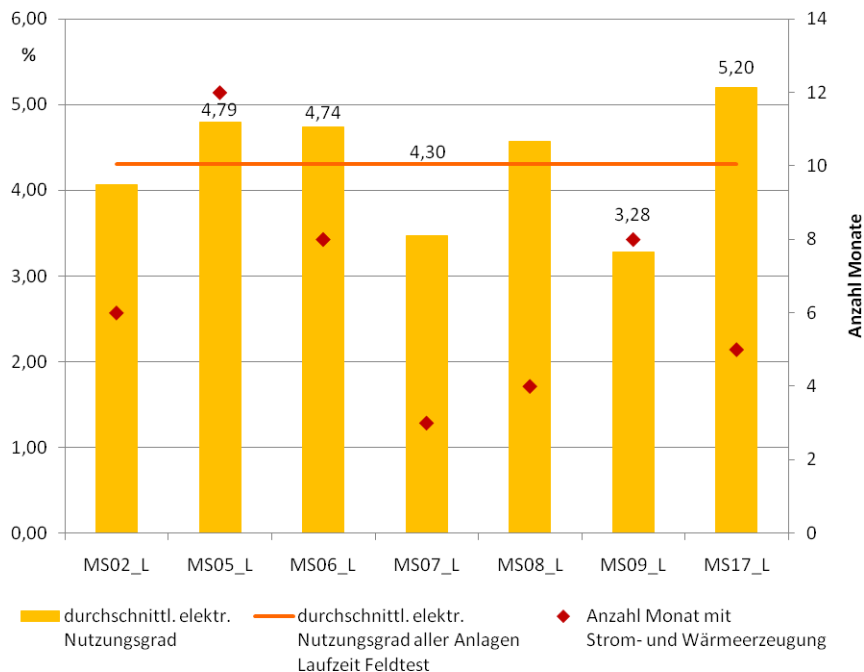


Abb. 39: Durchschnittliche elektrische Nutzungsgrade je Lion-Anlage (gelbe Balken, linke Skala) und Anzahl der Monate, in denen von der Anlage täglich Strom und Wärme erzeugt wurde (rote Rauten, rechte Skala) über die Zeitdauer des gesamten Feldtests von Februar 2009 bis Mai 2010. Die orange Linie zeigt den von allen Lion-Anlagen errechneten durchschnittlichen elektrischen Nutzungsgrad über die Zeitdauer des gesamten Feldtests.

Der aus den monatlichen elektrischen Nutzungsgraden aller Lion-Anlagen über die gesamte Zeitdauer des Feldtests errechnete durchschnittliche elektrische Nutzungsgrad liegt bei 4,3% und ist in Abbildung 39 als orange Linie dargestellt. Als Basis für die Berechnung der durchschnittlichen Nutzungsgrade werden die Anlagen-Monatswerte herangezogen. Dies ist erforderlich, um die unterschiedlichen Heizwerte der Pionieranlagen und die monatlichen Heizwertschwankungen des verbrauchten Erdgases zu berücksichtigen.

4.4.3 Vergleich Lion-Anlagen

Da die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene Abhängigkeit der Nutzungsgrade von der Höhe der Wärmeabnahme bzw. Wärmeerzeugung besteht, ist es wichtig beim Anlagenvergleich die gleichen Zeiträume zu betrachten.

Bei allen Lion-Anlagen gab es Ausfälle in der Stromerzeugung durch den Defekt des Linators. Die einzige Ausnahme stellt die Lion-Anlage MS05_L dar. Diese Anlage erzeugte über 12 von 13 Monaten Strom und Wärme. Die Betriebsprobleme der Lion-Motoren konnten während der gesamten Dauer des Feldtests durch den Hersteller nicht behoben werden. Als Konsequenz liegt nur ein Monat vor (Dezember 2009), in dem von allen 7 Lion-Anlagen Strom und Wärme produziert wurde. Ein Vergleich der Anlagen-Nutzungsgrade über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010 ist aus diesem Grund nicht sinnvoll.

Es können die absoluten Messergebnisse über den Vergleichszeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010 verglichen werden.

Abbildung 40 zeigt die erzeugte Wärmemenge der Lion-Anlagen im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010 als rote Balken; die blaue Linie markiert die über alle Lion-Anlagen errechnete durchschnittlich erzeugte Wärmemenge im Vergleichszeitraum.

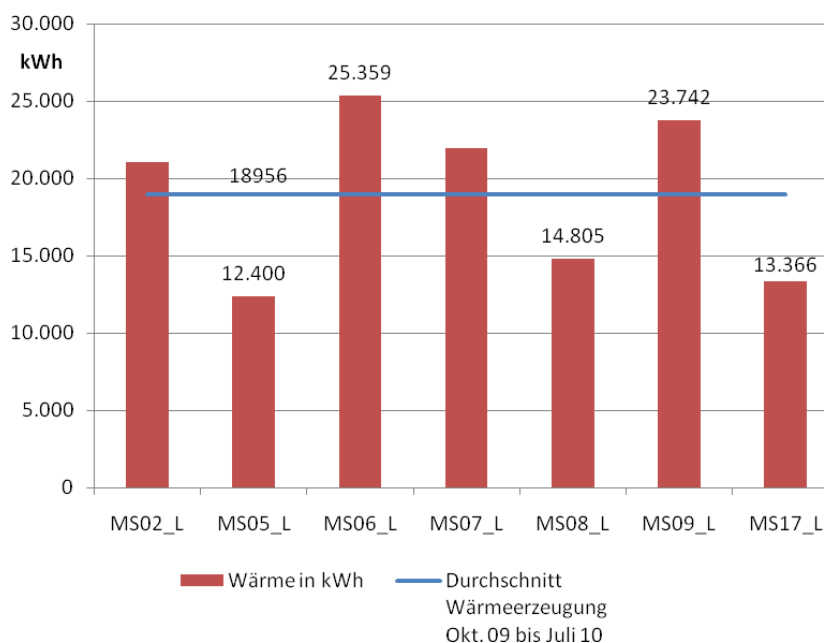


Abb. 40: Erzeugte Wärmemenge je Lion-Anlage im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010. Die blaue Linie zeigt die aus allen Lion-Anlagen errechnete durchschnittliche Wärmemenge im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010.

Die erzeugte Wärmemenge der Lion-Anlagen im Vergleichszeitraum liegt zwischen 12.400 kWh und 25.359 kWh. Die größte Wärmemenge wird von Anlage MS06_L mit 25.359 kWh erzeugt. Die niedrigste Wärmemenge liegt mit 12.400 kWh bei der Anlage MS05_L vor.

Die Stromerzeugung im gleichen Zeitraum ist in Abbildung 41 als gelbe Balken dargestellt. Die orange Linie stellt mit 881 kWh die über alle Lion-Anlagen errechnete durchschnittliche Stromerzeugung im Vergleichszeitraum dar.

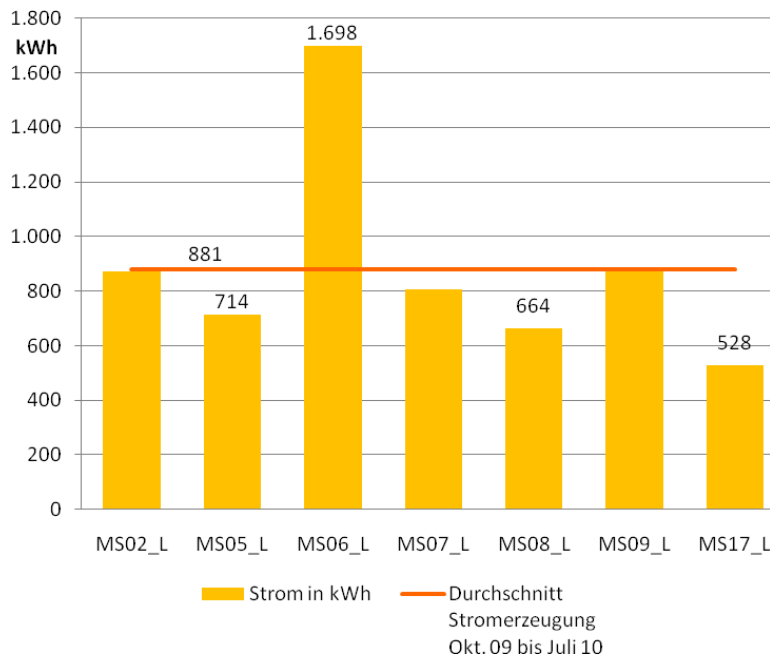


Abb. 41: Stromerzeugung je Lion-Anlage im Zeitraum Oktober 2009 bis Juli 2010.

Die Stromerzeugung der Lion-Anlagen streut im Vergleichszeitraum stark zwischen 528 kWh und 1.698 kWh. Nur eine Anlage liegt über dem Durchschnittswert, die Anlage MS06_L. Mit 1.698 kWh erzeugt die Lion-Anlage MS06_L die doppelte Strommenge wie der Durchschnitt der Lion-Anlagen.

Erstaunlich ist, dass die Lion-Anlage MS05_L, die als einziger Dampfmotor im Feldtest ohne längere Betriebsstörung und Defekt der Stromerzeugung betrieben wurde, im Vergleichszeitraum wenig Wärme (12.400 kWh) und Strom (714 kWh) erzeugt hat.

Die Ursachen für die unterschiedlichen Messergebnisse der Anlagen MS06_L und MS05_L werden - beispielhaft für die im Projekt eingesetzten Methoden zur Detailanalyse - anhand einer besonderen Datenauswertungsmethode, dem Carpetplot, im Folgenden analysiert und erläutert.

Die Darstellung in Carpetplots ist wichtig, da bei hoher Messdatenaufösung große Datenmengen analysiert werden müssen. Die herkömmlichen Darstellungsmethoden, wie Balken- und Liniendiagramme stoßen bei großen Datenmengen an ihre Grenzen;

sie eignen sich zur anschaulichen Darstellung von im Vorfeld verdichteten Daten. Eine detaillierte Messdatenanalyse ist mit ihnen nur sehr begrenzt möglich.

Im Feldtest Energiepioniere wurde eine Messdatenauflösung in 5-Minuten-Intervallen gewählt. Bei dieser Auflösung erhält man an einem Tag 288 Messdatensätze mit jeweils 20 Messwerten, in einem Monat von 30 Tagen 8.640 Datensätze, in einem Vierteljahr 26.208 Datensätze.

Der Vorteil der Carpetplots ist, dass mit ihnen große Datenmengen über lange Zeitintervalle differenziert betrachtet und verglichen werden können. Das Prinzip des Carpetplots wird am Beispiel der Abbildung 23 erläutert. Die Abbildung zeigt einen Carpetplot der Anlage MS01_W. Auf der horizontalen Achse ist der Zeitraum 01.02.2009 bis 01.07.2009, über den der Messwert dargestellt wird. Auf der linken vertikalen Achse ist die Tageszeit in Stunden angegeben. Die Farbskala auf der rechten vertikalen Achse gibt an, welche Höhe der Messwert bei einer bestimmten Farbe hat. In dem Beispiel von Abb. 23 ist der dargestellte Messwert die elektrische Leistung des WhisperGen-Motors; in diesem Carpetplot wird beispielsweise die elektrische Leistung von 805 W in rot dargestellt, die Leistung von 447 W ist gelb und die Leistung von 268 W ist grün.

Jeder Tag ist eine vertikale Farbsäule von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr. Die Farbsäule ist aufgebaut aus 288 Linien, die in den entsprechenden Farben der Farbskala die 5-Min-Messwerte abbilden. Es entsteht ein „Farbteppich mit Mustern“, die hervorragend zur Datenanalyse genutzt werden können.

Man sieht beispielsweise in Abb. 23 an der linken Farbsäule den Verlauf der elektrischen Leistung vom 01.02.2009. Die Anlage läuft mit einer Leistung von ca. 900 W ohne längere Stillstandsphasen von 0:00 Uhr bis kurz vor 6:00 Uhr; zu diesem Zeitpunkt gibt es ein kurzes Absinken der elektrischen Leistung, das sich um kurz vor 12:00 Uhr, um ca. 17 Uhr und um kurz nach 20:00 Uhr wiederholt. am Beispiel der Abb. 23 MS01 erkennt man das Takten der Anlage ab April 2009.

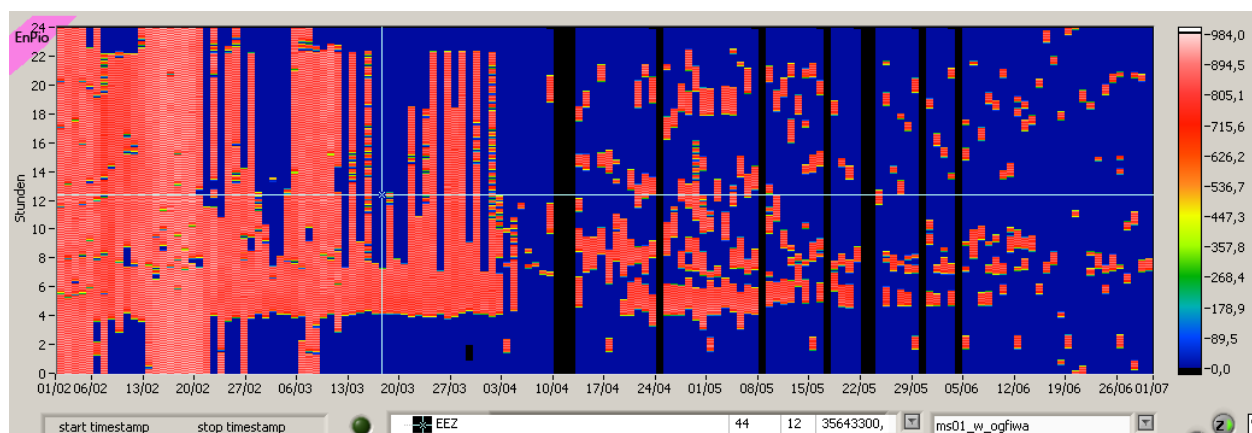


Abb. 23: Carpetplot der WhisperGen-Anlage MS01_W: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.02.2009 bis 01.07.2009. Linke Skala: Uhrzeit; rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

Anhand der Datenauswertemethode Carpetplot werden im folgenden Abschnitt die Anlage Anlagen MS06_L und MS05_L betrachtet und deren Betriebsverhalten analysiert, verglichen und erläutert.

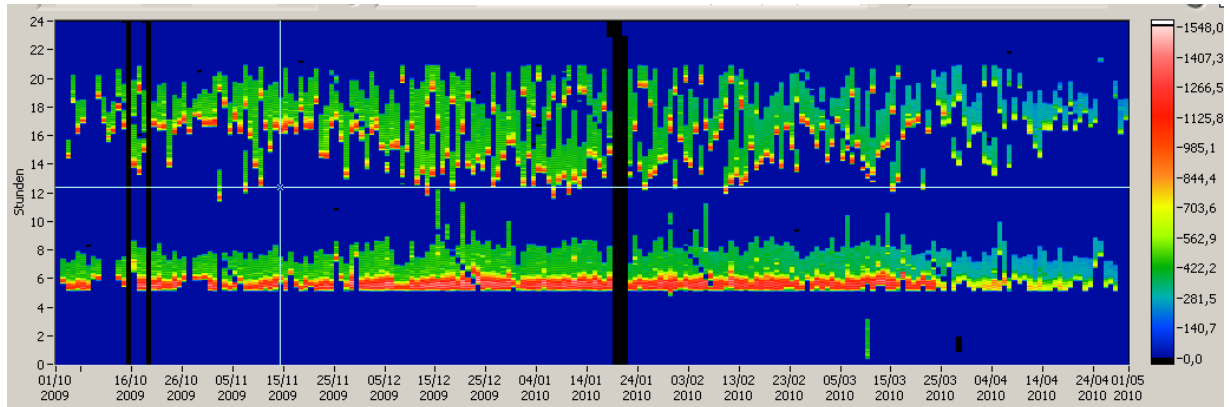


Abb. 42: Carpetplot der Lion-Anlage MS05_L: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.10.2009 bis 01.05.2010. Linke Skala: Uhrzeit; rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

In Abbildung 42 ist das Betriebsverhalten der Lion-Anlage MS05_L vom 01.10.2009 bis 01.05.2010 als Carpetplot dargestellt. Auf dem Carpetplot ist deutlich zu sehen, dass die Anlage ein gleichmäßiges Betriebsverhalten zeigt. Die Lion-Anlage MS05_L startet täglich zwischen 5.00 Uhr und 6.00 Uhr das erste Mal. Dann läuft sie ca. 30 Minuten mit einer hohen elektrischen Leistung von 1.400 W – 1.500 W und reduziert danach für ca. 1,5 bis 2 Stunden die elektrische Leistung auf Teillastbetrieb von ca. 500 W. Eine ähnliche Betriebsphase startet täglich nach 12.00 Uhr und reduziert die elektrische Leistung nach einer kurzen Phase im Volllastbetrieb auf mehrere Stunden Teillastbetrieb. Ab Ende März erreicht die Anlage auch am Betriebsanfang nicht mehr die maximale Leistung.

Wie schon bei den WhisperGen-Anlagen beschrieben, führt der Betrieb der Anlagen im Teillastbetrieb zu einem Sinken der Anlagen-Nutzungsgrade. Wendet man die Definition des elektrischen Nutzungsgrades auf eine Anlage im Volllast- und Teillastbetrieb an,

$$N_{el} = \frac{W_{el(erzeugt)} - W_{el(bezogen)}}{Q_{Brennstoff}} \times 100$$

so kann man erklären, dass der elektrische Nutzungsgrad der Anlage im Teillastbetrieb sinkt. Bei gleicher Anzahl von Anlagenstarts über einen betrachteten Zeitraum verbraucht eine Anlage, unabhängig ob die Anlage in Teillastbetrieb oder unter Volllast läuft, annähernd die gleiche Menge Strom ($W_{el(bezogen)}$). Selbst wenn das Verhältnis von Brennstoffverbrauch ($Q_{Brennstoff}$) zu erzeugtem Strom ($W_{el(erzeugt)}$) im Teillastbetrieb das gleiche ist, wie im Volllastbetrieb, reduziert sich der elektrische Nutzungsgrad (N_{el}), da $W_{el(bezogen)}$ bezogen auf die erzeugte Strommenge $W_{el(erzeugt)}$ spezifisch steigt; d.h. der verbrauchte Anlagenstrom ($W_{el(bezogen)}$) bleibt konstant, während sich die erzeugte Strommenge reduziert.

Somit sind die langen Teillastphasen der Anlage MS05_L eine Erklärung für den geringen elektrischen Nutzungsgrad der Anlage.

Das Betriebsverhalten der Anlage MS06_L (Abb. 43) unterscheidet sich durch eine lange tägliche Volllast-Betriebsphase. Von Ende November 2009 bis Mitte Februar

2010 startet sie zwischen 4 Uhr und 5 Uhr mit einer 12 bis 14-stündigen Volllastphase von ca. 1.300 W, der sich eine mehrstündige Teillastphase von ca. 700 W anschließt.

Die lange Volllastphase erklärt die deutlich höhere Strom- und Wärmeenergieerzeugung der Anlage MS06_L im Vergleich zu Anlage MS05_L. Im Carpetplot blau zu erkennen, sind die Zeiten, in denen die Anlage MS06_L keinen Strom erzeugt hat. Man sieht die mehrmaligen Ausfallzeiten der Stromerzeugung im Oktober 2009, November 2009 und Februar/ März 2010.

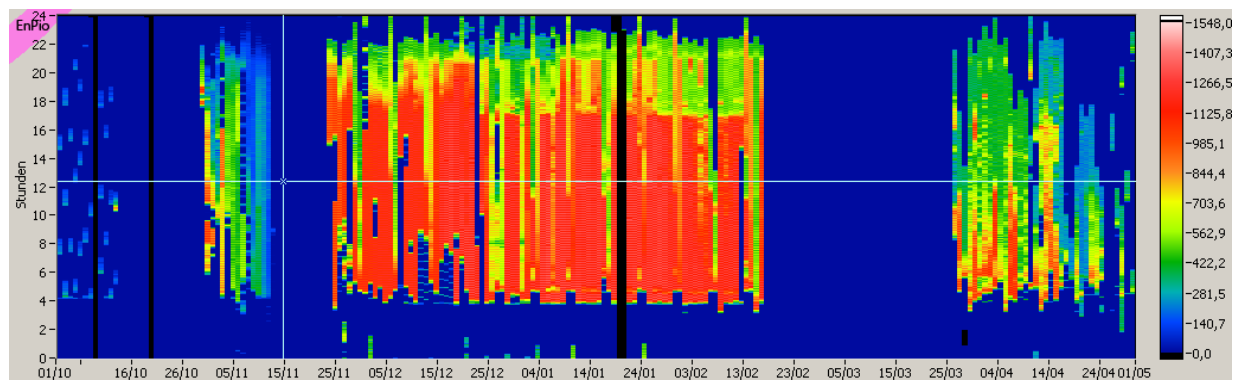


Abb. 43: Carpetplot der Lion-Anlage MS06_L: Leistung erzeugter Strom im Zeitraum 01.10.2009 bis 01.05.2010. Linke Skala: Uhrzeit; rechte Skala: Leistung erzeugter Strom in Watt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass keine der Lion-Anlagen im Feldtest die Herstellerangaben erreicht hat. Mit einem elektrischen Nutzungsgrad von maximal 5,2% ist die Stromerzeugung für ein Mikro-BHKW gering. Die einzige Anlage MS05_L, die ohne nennenswerte Stromausfälle stabil betrieben werden konnte, liefert mit einem elektrischen Nutzungsgrad von 4,79% und geringer Strom- und Wärmeenergieproduktion unbefriedigende Betriebsergebnisse.

5. Primärenergetische Betrachtung

Um den energetischen Nutzen bzw. die Effizienz der im Feldtest eingesetzten Mikro-KWK-Motoren zu beurteilen, ist eine primärenergetische Analyse erforderlich. Hierbei wird die gekoppelte Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie verglichen mit der zurzeit praktizierten getrennten Erzeugung von Wärme im Heizkessel und elektrischer Energie im Großkraftwerk. Das Ergebnis der primärenergetischen Betrachtung ist stark von den angenommenen Nutzungsgraden abhängig.

Die folgende Effizienzbetrachtung geht vom Einsatz der Geräte in Heizsystemen mit höheren Rücklauftemperaturen aus, wie sie häufig im Sanierungsfall auftreten. Die Betrachtung des Modernisierungsfalls ist nicht zwingend; sie erscheint jedoch im Projekt Energiepioniere sinnvoll, da der Großteil der im Feldtest installierten Geräte als Heizungssanierung eingebaut wurden. Darüber hinaus überwiegt die Heizungssanierung mit ca. 75 % in Deutschland gegenüber der Neuinstallation von Heizungen. Eine Ausnahme hiervon bildet die WhisperGen-Anlage MS20_W; sie wurde in einem neugebauten Einfamilienhaus installiert.

Setzt man den im Stirlingmotor eingesetzten Brennstoff auf 100% bzw. 100 Einheiten n , so können die erzeugte elektrische Energie und die Wärme anhand der Nutzungsgrade des Motors ermittelt werden.

Der Gesamtnutzungsgrad schließt auch den Verbrauch an elektrischer Hilfsenergie mit ein und berücksichtigt thermische Systemverluste.

Zunächst wird der im Januar 2010 maximale Gesamtnutzungsgrad N_{ges} von 94,9% der best-practise-Anlage MS15_W betrachtet, der im badenova-Feldtest mit folgenden Werten erreicht wurde:

$$N_{elektr} = 8,7 \%$$

$$N_{therm} = 86,2\%$$

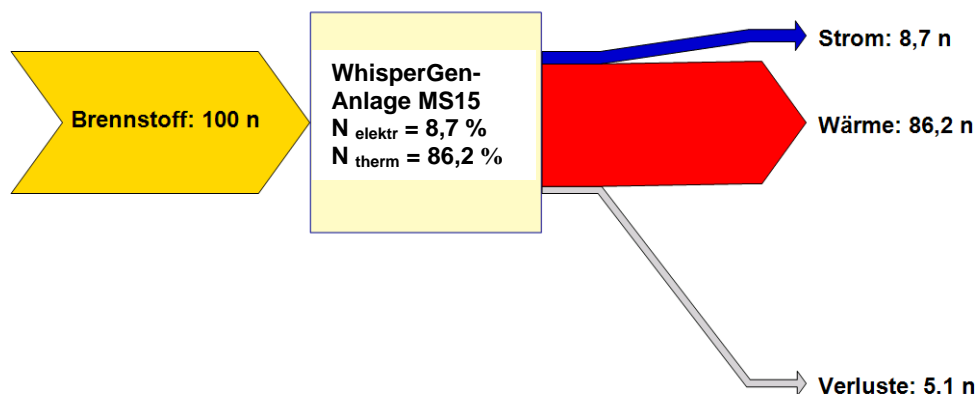


Abb. 44: Sankey-Diagramm unter Annahme der im Feldtest ermittelten maximalen Nutzungsgrade der best-practise-Anlage MS15_W

Bei den übrigen im Feldtest betriebenen und vermessenen Anlagen lagen die Gesamtnutzungsgrade unter den an der Anlage MS15_W gemessenen Werten.

Durchschnittlich wurde ein Gesamt-Nutzungsgrad N_{gesamt} von 81% ermittelt, wobei

$$N_{elektr} = 4,6 \%$$

$$N_{therm} = 76,4\%$$

Als Vergleichssystem wurde die getrennte Wärmeerzeugung in einem Brennwertkessel gewählt und die Erzeugung der elektrischen Energie im Großkraftwerk auf Kohlebasis.

Gasbrennwertkessel erreichen heute Normnutzungsgrade von 109% (bezogen auf den Heizwert des Brenngases). Dieser Nutzungsgrad stellt sich jedoch nur bei Heizsystemen mit Vor- und Rücklauftemperaturen von 40°C und 30°C ein, wie sie heute häufig mit Fußbodenheizungen in Neubauten erreicht werden.

Im Sanierungsfall liegen die Vor- und Rücklauftemperaturen eher bei 75°C und 60°C, was zu niedrigeren Nutzungsgraden führt. Aus diesem Grund wurde ein Nutzungsgrad des Brennwertkessels von 102% angesetzt.

Berücksichtigt man für die Stromerzeugung im Großkraftwerk den aktuellen Status quo, so kann man einen durchschnittlichen elektrischen Nettowirkungsgrad von 38% ansetzen.

Legt man den Berechnungen der primärenergetischen Betrachtung die maximal erreichten Nutzungsgrade der best-practise-Anlage MS15_W zu Grunde, ergibt sich für das Vergleichssystem der in Abbildung 45 dargestellte Energiefluss.

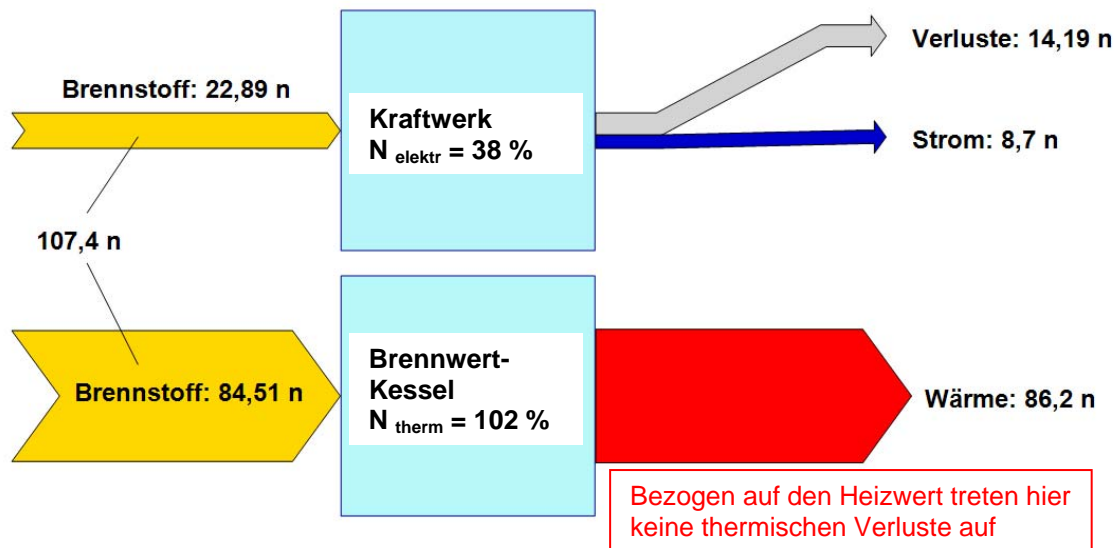


Abb. 45: Sankey-Diagramm Vergleichssystem unter Annahme der im Feldtest maximalen erreichten Nutzungsgrade der best-practise-Anlage MS15_W

Das Sankeydiagramm Abbildung 45 verdeutlicht, dass unter Annahme der maximalen im Feldtest erreichten Nutzungsgrade im Vergleichssystem Brennwertkessel mit Stromerzeugung im Kraftwerk 107 Anteile Brennstoff benötigt, um die gleichen Anteile Nutzenergie zu erzeugen, wie die best-practise-Anlage aus 100 Anteilen Brennstoff (Abb. 44).

Das heißt: Bei der best-practise-Anlage MS15 des Feldtests ist die dezentrale Erzeugung der Nutzenergie unter den aktuellen Rahmenbedingungen um 7% effizienter als die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom.

Anmerkung: Um die Stirlingtechnologie einer kritischen Betrachtung zu unterziehen, wurde für die Brennwerttechnologie mit $N_{\text{therm}} = 102\%$ ein optimistischer Ansatz gewählt.

Da für die Lion-Anlagen kein repräsentativer Nutzungsgrad ermittelt werden konnte, wird auf eine primärenergetische Betrachtung der Lion-Motoren verzichtet.

6. Schlussfolgerungen

Der Feldtest Energiepioniere liefert interessante Ergebnisse aus der Praxis und hat deutlich gemacht, wie wichtig die Erprobung von technischen Pilotanlagen unter realen Betriebsbedingungen ist. Diese Erkenntnisse führten zu Optimierungen und weiteren Verbesserungen vor Beginn der Serienproduktion der WhisperGen-Anlagen.

6.1. Fazit Feldtest

Alle im Feldtest begleiteten Lion-Dampfmotoren haben in der Praxis die Erwartungen an den Betrieb und die Betriebsergebnisse nicht erreicht. Die getesteten Lion-Anlagen – bis auf die Anlage MS05_L – waren störungsanfällig und hatten starke Probleme mit der Stromerzeugung. Die Schwierigkeiten mit der Stromproduktion konnten im Zeitraum des Feldtests nicht behoben werden. Zusammenfassend haben sich die Lion-Anlagen im Feldtest Energiepioniere unter realen Betriebsbedingungen nicht bewährt.

Die WhisperGen-Anlagen haben sich im Feldtest-Betrieb als zuverlässige und wenig störungsanfällige Anlagen erwiesen, die jedoch durch die bewusst mannigfache Einbindung ein sehr unterschiedliches Betriebsverhalten aufweisen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Takthäufigkeit der Anlagen. Auch das Auftreten von Teillastbetrieb wirkt sich negativ auf die Anlagen-Nutzungsgrade aus. Als Ergebnisse resultieren erhebliche Differenzen der Nutzungsgrade. Der Feldtest zeigt, dass ein optimales Betriebsmanagement die Basis für den effizienten Anlagenbetrieb ist.

Nur eine WhisperGen-Anlage, die best-practise-Anlage MS15_W, erreicht unter Realbedingungen im Feldtest die vom Hersteller angegebenen Nutzungsgrade. Bei allen anderen 10 WhisperGen-Anlagen lag sowohl der Gesamt-Nutzungsgrad als auch der elektrische Nutzungsgrad deutlich unter den Herstellerangaben.

Als weitere Erkenntnis des Feldtests hat sich die GSM-Übertragung der Messdaten nicht als zuverlässiges Übertragungsmedium bewährt. Schwankungen der GSM-Empfangsstärke haben mehrfach zur zeitweisen Störung der Datenübertragung geführt; als Alternative würde hier in Zukunft der gleiche Modemtyp jedoch mit Festnetzanschluss bevorzugt.

6.2. Primärenergetisches Fazit

Bei der best-practise-Anlage MS15_W des Feldtests ist die dezentrale Erzeugung der Nutzenergie unter den aktuellen Rahmenbedingungen um 7% effizienter als die getrennte Erzeugung von Wärme und Strom des Vergleichssystems. Obwohl die Anlage den vom Hersteller angegebenen elektrischen Nutzungsgrad von 8,7% erreicht, erklärt sich der geringe Effizienzunterschied zum konventionellen Vergleichssystem wesentlich aus dem niedrigen elektrischen Nutzungsgrad des WhisperGen-Motors, der den energetisch positiven Effekt der dezentralen gekoppelten Erzeugung von Wärme und Strom wieder aufhebt.

Schon bei einem elektrischen Nutzungsgrad der WhisperGen-Motoren von 13% wäre die dezentrale Energieerzeugung um ca. 10% effizienter als die Strom-Erzeugung im Großkraftwerk.

Aus diesem Grund wird es für die Stirlingtechnologie in Zukunft wichtig sein, den elektrischen Nutzungsgrad der Motoren deutlich zu erhöhen, um eine klimaschonende Alternative beispielsweise gegenüber der Brennwerttechnologie darzustellen.

6.3 WhisperGen EU1

Der Baubeginn des neuen Serienproduktes WhisperGen EU1 startete im März 2010. Durch die Erkenntnisse im Feldtest-Betrieb wurden zur Verbesserung des Wirkungsgrades folgende Optimierungsmaßnahmen durchgeführt:

- Änderung der Brennerfunktionen in ein Fullpremix Strahlungsbrenner
- kompletter Austausch des Steuerungssystems/Regelung
- Lagerung des Motors

Nach den durchgeführten Optimierungen gehen aus dem neuen Produktdatenblatt folgende Wirkungsgrade hervor:

Thermisch bei 30 / 40 °C:	> 95%
Elektrisch bei 30 / 40 °C:	10,0 – 11,0 %
Gesamtwirkungsgrad bei 30 / 40 °C:	> 105 %
Thermisch bei 60 / 80 °C:	> 85%
Elektrisch bei 60 / 80 °C:	10,0 – 11,0 %
Gesamtwirkungsgrad bei 60 / 80 °C:	> 95 %

Referenzen/References

- [1] Bernd Thomas: “Mini-Blockheizkraftwerke”, ISBN 978-3-8343-3069-7, 1. Auflage 2007
- [2] WhisperTech: “Technische Spezifikation und Benutzerhandbuch für Modell PPS24-ACLG-5 WhisperGen”, 2007
- [3] OTAG: “Gebrauchsanweisung lion-Powerblock“, 18.03.2008
- [4] Auswertung / Bericht Hochschule Offenburg, Eva Scheck