

Mini-BHKWs könnten künftig Heizkessel ersetzen

Dezentrale Energielösungen auf Basis von Otto- und Stirlingmotor-BHKWs bieten Alternativen auch für Handwerksbetriebe

Von Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas*, Reutlingen

Steigende Strompreise auf der einen Seite und die Förderung durch Einspeisevergütungen auf der anderen Seite machen die eigene Erzeugung von elektrischer Energie auch in kleinstem Maßstab interessant, vor allem, wenn ohnehin selbst Wärme erzeugt wird. Dies könnte zu einer Verdrängung des klassischen Kessels durch Blockheizkraftwerke führen. Eine Analyse der Unternehmensberatung Frost & Sullivan prognostiziert die Entstehung eines Massenmarktes bereits in naher Zukunft. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über die Ergebnisse eines Forschungsprojektes, in dem die in Deutschland verbreitetsten Mini-BHKWs verglichen werden. Alle Lösungen eignen sich auch für kleinere Gewerbebetriebe.

Das die Kraft-Wärme-Kopplung einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung und damit sowohl zur Ressourcenschonung als auch zur Verringerung der CO₂-Emissionen leistet, ist mittlerweile unstrittig. Um die Technologie jedoch flächendeckend verbreiten zu können, also auch in Gebieten, in denen die nachträgliche Einbringung eines Wärmeverteilungsnetzes nicht wirtschaftlich ist, müssen kleine, dezentrale Einheiten eingesetzt werden. Führt man diesen Gedanken konsequent weiter, so kommt man zu sehr kleinen Anlagen, die nur noch so viel Wärme produzieren wie im Wohngebäude bzw. in der Werkstatt selbst verbraucht wird, so dass die Notwendigkeit eines Wärmeverteilnetzes gänzlich entfallen kann.

Man spricht hier von Kleinst-KWK oder, bei einer elektrischen Leistung der Aggregate unter 15 kW, sogar von Mikro- oder Mini-KWK [1]. Entsprechend werden die BHKW's in diesem Leistungsbereich als Mini-Blockheizkraftwerke bezeichnet. Diese Geräte werden im Gebäude wie ein Heizkessel installiert und betrieben – mit dem Zusatzeffekt, dass bei der Wärmeerzeugung gleichzeitig elektrische Energie

zwei der vier untersuchten Geräte den jeweiligen Typen zuzuordnen sind.

Messergebnisse

In Abbildung 1 ist der gemessene elektrische Wirkungsgrad der vier untersuchten Aggregate über der Vorlauftemperatur aufgetragen. Der elektrische Wirkungsgrad ist dabei als Verhältnis der ins Netz eingespeisten elektrischen Leistung zum mit dem Erdgas zugeführten und auf den unteren Heizwert bezogenen Energiestrom definiert. Die Rücklauftemperatur wurde bei den Versuchen auf 30 °C eingestellt mit Ausnahme des BHKW's „Dachs“, das mit einer Rücklauftemperatur von 35 °C versorgt wurde. Es ist zu erkennen, dass das BHKW „Dachs“ einen konstant hohen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 27 % aufweist, gefolgt von „Solo Stirling“, das einen mit der Vorlauftemperatur von 26,7 auf 24,4 % abnehmenden Wirkungsgrad zeigt. Der elektrische Wirkungsgrad des Gerätes „ecopower“ ist mit etwa 23,5 % wiederum in etwa konstant, während der Wirkungsgrad der DTU-Anlage mit zunehmender Vorlauftemperatur von 21,1 auf 18,7 % fällt.

Untersuchte Mini-BHKWs

Anlage

Beschreibung

Mini-BHKW „Dachs“ von Sener-Tec



Untersucht wurde die Standardanlage für Erdgasbetrieb „Dachs HKA G 5.5“. Herzstück des BHKW's ist ein Einzylinder 4-Takt-Gas-Ottomotor mit einem Hubraum von 580 cm³. Der Motor läuft mit einer konstanten Drehzahl und ist über ein einstufiges Getriebe an einen wassergekühlten zweipoligen Asynchrongenerator gekoppelt, mit dem die elektrische Leistung von etwa 5,5 kW erzeugt und direkt in das öffentliche Netz gespeist wird. Das Aggregat ist nur für Vollastbetrieb ausgelegt und die Heizleistung beträgt nominal 12,5 kW. Mithilfe eines nachgeschalteten Abgaswärmetauschers, dem so genannten „Kondensator“, der als Zubehör erhältlich ist, kann das Abgas, das die Anlage ansonsten mit etwa 150 °C verlässt, bis unter den Kondensationspunkt gekühlt werden. Auf diese Weise ist ein zusätzlicher Wärmegehalt von bis zu 2 kW möglich. Durch einen Oxidationskatalysator wird das Abgas von CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen gereinigt; eine nachträgliche Entfernung von Stickoxiden aus dem Rauchgas erfolgt nicht.

„Mini-BHKW 161“ von Solo Stirling



Das Aggregat wird von einem 2-Zylinder Stirlingmotor in V-Anordnung angetrieben. Der Hubraum des Motors beträgt 160 cm³, und als Arbeitsgas wird Helium bei einem mittleren Druck zwischen 35 und 150 bar verwendet. Durch die Variation des Mitteldrucks, die von der Maschine automatisch vorgenommen wird, kann die elektrische Leistung zwischen 1,5 und 9 kW und die Heizleistung korrespondierend zwischen 6 und 25 kW eingestellt werden. Der Stirling-Motor ist direkt mit einem zweipoligen Asynchrongenerator verbunden, sodass die Drehzahl etwas oberhalb von 1500 Upm liegt. Das Gerät ist regulär mit einem Kondensationswärmetauscher für das Abgas ausgerüstet. Eine nachträgliche Reinigung der Abgase durch Katalysatoren ist nicht erforderlich, da durch das eingesetzte FLOX-Verbrennungsprinzip nur wenig Schadgase entstehen.

Mini-BHKW ecopower



Das Mini-BHKW ist auf der Basis eines Gas-Ottomotors aufgebaut. Es handelt sich um einen Einzylinder-4-Takt-Gas-Ottomotor mit einem Hubraum von 272 cm³. Im Gegensatz zu den beiden vorher beschriebenen Geräten wird hier ein Synchrongenerator zur Erzeugung der elektrischen Leistung verwendet. Diese Art ist kompakter und leichter als ein Asynchrongenerator vergleichbarer Leistung. Allerdings erfordert ein Synchrongenerator einen Frequenzumrichter, um die elektrische Leistung in das öffentliche Netz einspeisen zu können. Dieser Umstand wird bei dem Gerät „ecopower“ zur Variation der Drehzahl genutzt. Auf diese Weise ist eine Leistungsmodulation zwischen 2 und 4,7 kW_e entsprechend einer Drehzahlvariation von 1700 bis 3600 Upm möglich. Die Heizleistung variiert dabei zwischen 6 und 12,5 kW. Das Gerät ist ebenfalls mit einem Kondensationswärmetauscher für das Abgas sowie einem geregelten 3-Wege-Katalysator zur Reduktion der Schadgasemissionen ausgerüstet.

Stirling-BHKW der Dänischen Technischen Universität (DTU)



Das Stirling-BHKW wurde von Prof. Carlsen für den Einsatz von Biogas entwickelt. Während der Untersuchungen am Prüfstand wurde das Gerät allerdings mit Erdgas betrieben; zu diesem Zweck ist eine entsprechend veränderte Düse am Brenner eingesetzt worden. Bei dem Stirlingmotor handelt es sich um eine hermetisch gekapselte Einzylindermaschine in sogenannter beta-Anordnung mit einem Zylinderdurchmesser von 114 mm und einem Arbeitskolbenhub von 54 mm. Als Arbeitsgas wird analog zur Maschine von Solo Helium verwendet, das hier unter einem konstanten Mitteldruck von 80 bar gehalten wird. Der Stirlingmotor ist mit einem speziellen Getriebe direkt mit einem dreipoligen Asynchrongenerator verbunden, sodass die Drehzahl der Maschine konstant bei etwa 1020 Upm liegt. Es ist ein zusätzlicher Abgaswärmetauscher integriert, der aber keine Kondensation zulässt. Die Vermeidung von Kondensation ist dabei gewollt, da durch die im Biogas enthaltenen Schwefelverbindungen ansonsten Korrosion unvermeidlich wäre. So verlassen die Abgase die Anlage je nach Betriebszustand mit einer Temperatur zwischen 150 und 210 °C. Eine nachträgliche Reinigung des Rauchgases in Form von Katalysatoren ist nicht vorgesehen, da die Schadgasemissionen beim Betrieb mit Biogas deutlich unter den dafür gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten liegen.

werden im Gebäude wie ein Heizkessel installiert und betrieben – mit dem Zusatzeffekt, dass bei der Wärmeerzeugung gleichzeitig elektrische Energie produziert wird, die entweder selbst genutzt oder in das öffentliche Netz eingespeist werden kann und vergütet wird.

Der letztgenannte Aspekt ist insbesondere vor dem Hintergrund steigender Energiepreise für die Betreiber der Geräte attraktiv, und nicht zuletzt aus diesem Grund wird den Mini-BHKW's eine weitere Verbreitung attestiert, die mittelfristig sogar zu einer Verdrängung des Heizkessels führen könnte. Eine Analyse der Unternehmensberatung Frost & Sullivan prognostiziert die Entstehung eines Massenmarktes bereits in naher Zukunft [2].

Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit bereits existierender und am Markt erhältlicher Geräte dieser Art sind im Rahmen eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes** an der Hochschule Reutlingen an einem eigens zu diesem Zweck errichteten Prüfstand Mini-Blockheizkraftwerke experimentell untersucht worden. Im einzelnen wurde das Gerät „Dachs“ der Firma Sener-Tec [3], ein BHKW von Solo Stirling [4], das Gerät „ecopower“ der Firma Power Plus Technologies [5] sowie ein für den Einsatz von Biogas konzipiertes Stirling-Aggregat der Dänischen Technischen Universität Lyngby (DTU) [6] vermessen (vgl. Tabelle).

Mit den drei Erstgenannten waren die in Deutschland bekanntesten und auch am meisten verkauften Geräte zum Einsatz in Wohn- und Geschäftsgebäuden auf dem Prüfstand. Als Nebeneffekt kann aufgrund der Ergebnisse ein Vergleich zwischen Otto- und Stirlingmotor-BHKW's angestellt werden, da je

etwa konstant, während der Wirkungsgrad der DTU-Anlage mit zunehmender Vorlauftemperatur von 21,1 auf 18,7 % fällt.

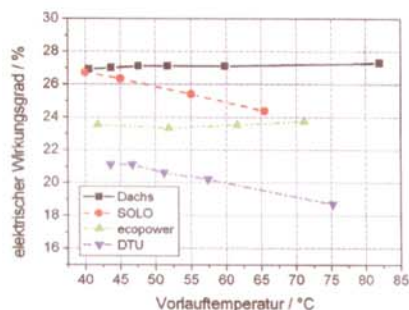


Abbildung 1 Elektrischer Wirkungsgrad als Funktion der Vorlauftemperatur; Rücklauftemperatur = 30 °C (Solo, Ecopower, DTU) und 35 °C (Dachs)

Offensichtlich hängt der prinzipielle Verlauf der Kurven von der Art des BHKW's ab. Bei den Ottomotor-BHKW's ist der elektrische Wirkungsgrad nahezu konstant während er bei den Stirlingmotor-BHKW's mit zunehmender Vorlauftemperatur kleiner wird. Die Ursache für dieses Phänomen ist in der hydraulischen Einbindung der Geräte zu suchen. Die Stirlingmotor-BHKW's werden direkt in den Heizkreis eingebunden; daraus folgt, dass der thermodynamische Prozess auf der Wärmeabgabeseite in etwa mit der mittleren Heizkreistemperatur beaufschlagt ist, was, entsprechend dem Carnot-Gesetz, einen mit größer werdender Wärmeabgabetemperatur abnehmenden Wirkungsgrad zur Folge hat.

Die Ottomotor-BHKW's sind im Gegensatz dazu nicht direkt sondern im Parallelstrang eingebunden. So ent-



gase die Anlage je nach Betriebszustand mit einer Temperatur zwischen 150 und 210 °C. Eine nachträgliche Reinigung des Rauchgases in Form von Katalysatoren ist nicht vorgesehen, da die Schadgasemissionen beim Betrieb mit Biogas deutlich unter den dafür gesetzlich vorgegebenen Grenzwerten liegen.

nimmt beim BHKW „Dachs“ eine interne Pumpe dem Hauptstrang eine festgelegte Menge Kreislaufwasser (etwa 0,24 m³/h) und erwärmt diese in Kondensator und BHKW immer konstant auf etwa 80 bis 85 °C. Das erwärmte Medium gelangt dann zurück in den Hauptstrang, sodass sich eine Mischungstemperatur einstellt. Dieses Prinzip ist als Rücklauftemperaturerhöhung bekannt.

Aufgrund der hydraulischen Einbindung im Nebenstrang, die bei der Anlage „ecopower“ ähnlich ist, sind die Leistungsdaten des BHKW's nur wenig von den Temperaturen und dem Volumenstrom im Hauptstrang abhängig. Dieses hydraulische Schema ist speziell auf Ottomotoren zugeschnitten, die eine derartig erhöhte Betriebstemperatur sowohl zur Herabsetzung der Reibungsverluste wie auch zur Anhebung des inneren Wirkungsgrades und zur Verringerung der Emissionswerte benötigen. Mit Ausnahme des bei der Anlage „Dachs“ vorgeschalteten Kondensators können auf diese Weise allerdings nicht die thermodynamischen Vorteile niedriger Heizkreistemperaturen ausgeschöpft werden, wie dieses bei den Stirlingmotor-BHKW's der Fall ist. Dennoch erreicht das Ottomotor-BHKW „Dachs“ die höchsten elektrischen Wirkungsgrade (vgl. nach Abbildung 1).

Abbildung 2 zeigt die gemessenen Gesamtwirkungsgrade als Funktion der Vorlauftemperatur. Als Gesamtwirkungsgrad bezeichnet man das Verhältnis aus Nutzleistung zu dem auf den unteren Heizwert bezogenen Energiestrom, der durch das Erdgas einbracht wird. Als Nutzleistung wird dabei die Summe aus eingespeister elektrischer Leistung und der abgegebenen Heizleistung bezeichnet. Auch bei dieser Versuchsreihe wurde die Rücklauftemperatur auf 30 °C eingestellt. Nur beim BHKW „Dachs“ betrug die Rücklauftemperatur 35 °C.

Die Auftragung zeigt, dass das BHKW „Solo Stirling“ die höchsten Gesamtwirkungsgrade erreicht. Bei einer

Vorlauftemperatur von 40 °C beträgt der Wert 100,9 %. Die beiden Ottomotor-BHKW's zeigen bei geringen Vorlauftemperaturen ungefähr gleiche Gesamtwirkungsgrade im Bereich von 94 bis 96 %. Zu höheren Vorlauftemperaturen fällt der Wirkungsgrad der Anlage „Dachs“ nur wenig auf etwa 92 % bei 82 °C. Beim Gerät „ecopower“ ist der Abfall des Gesamtwirkungsgrades mit zunehmender Vorlauftemperatur gravierender, wie das Diagramm zeigt. Ursache für dieses ungleiche Verhalten ist eine unterschiedliche hydraulische Ein-

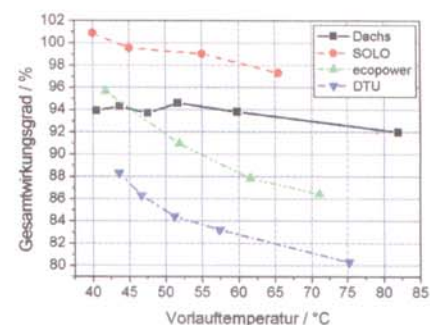


Abbildung 2 Gesamtwirkungsgrad als Funktion der Vorlauftemperatur; Rücklauftemperatur = 30 °C (Solo, ecopower, DTU) und 35 °C (Dachs)

bindung des Kondensationswärmetauschers für das Abgas. Während dieser Wärmetauscher beim „Dachs“ vor das BHKW geschaltet ist und somit immer mit der niedrigsten Kreislaufumtemperatur angefahren wird, befindet sich der Abgaswärmetauscher bei der Anlage „Ecopower“ „im Inneren“ des BHKW's, d. h. er wird mit der angehobenen Rücklauftemperatur versorgt und kann deshalb nicht so effektiv arbeiten wie beim „Dachs“. Das BHKW der DTU zeigt die geringsten Gesamtwirkungsgrade, was auf die zuvor beschriebene Vermeidung von Abgaskondensation infolge der Konzeption als Biogas-Anlage zurückzuführen ist. Dennoch liegen die Werte über 80 % und damit deutlich über der

Schwelle von 70 %, die nach EEG für die Gewährung des KWK-Bonus von 2 Cent/kWh_{el} zu übertreffen ist [8].

Die Abbildungen 3 und 4 veranschaulichen die CO- und NO_x-Emissionen der vier untersuchten BHKW's im stationären Betrieb bei Voll- und 50 %-Teillast, soweit die Geräte teillastfähig waren. Die Emissionswerte sind jeweils auf 5 % Restsauerstoff im Abgas bezogen.

Aus Abbildung 3 ist ersichtlich, dass das BHKW „Dachs“ kein CO emittiert. Während der Startphase wurde ein kurzzeitiger Anstieg der CO-Emissionen auf etwa 350 mg/Nm³ beobachtet, aber nach einigen Minuten fiel der Wert unter die Nachweisgrenze des verwendeten Rauchgasanalysegerätes. Hier zeigt sich die gute Wirkung des Oxidationskatalysators der Anlage, die mit einem entsprechend hohen Luftverhältnis von etwa 1,55 arbeitet.

Beim Gerät „ecopower“ sind die CO-Emissionen bei Vollast ebenfalls nahezu Null, während sie im Teillastbetrieb auf etwa 50 mg/Nm³ ansteigen. Auch hier wird CO in einem Katalysator zu CO₂ aufoxidiert, allerdings findet hier ein geregelter 3-Wege-Katalysator Anwendung. Bei den beiden Stirling-Aggregaten liegen die CO-Emissionen etwas über den Werten der Ottomotor-BHKW's. Allerdings wird hier kein Katalysator benötigt, und die Werte liegen jeweils deutlich unter dem Grenzwert nach der Richtlinie für die Vergabe des Umweltzeichens „Der Blaue Engel“ [7].

Betrachtet man die NO_x-Emissionen in Abbildung 4, so wird deutlich, dass die BHKW's „Dachs“ und DTU nicht den Grenzwert nach „Blauem Engel“ erreichen. Bei beiden Geräten werden die Stickoxide nur durch verbrennungstechnische Maßnahmen, wie ein hoher Luftüberschuss beim „Dachs“, begrenzt, nicht jedoch durch einen Katalysator nachträglich gesenkt.

Es sei erwähnt, dass die Firma Sener

* Prof. Dr.-Ing. Bernd Thomas lehrt im Studienbereich Maschinenbau der FH Reutlingen die Gebiete Technische Thermodynamik, Wärmetechnisches Labor und Wärmeübertragung.

** Alle in dem Projekt erzielten Ergebnisse werden in ausführlicher Form in einem Buch veröffentlicht, das voraussichtlich gegen Ende des Jahres erscheinen wird.

Danksagung

Der Autor bedankt sich beim BMBF für die Gewährung der Mittel zur Durchführung des Projektes sowie den Geräteherstellern Sener-Tec, Solo Stirling, Power Plus Technologies und Prof. Carlsen von der DTU für die kostenlose Überlassung der Geräte während der Untersuchungen sowie die gewährte Unterstützung.

Mini-BHKWs könnten künftig Heizkessel ersetzen

Fortsetzung von Seite 941

Tec das BHKW „Dachs“ auch als so genannte „Low NO_x“-Variante anbietet. Hier wird durch Absenkung der Motorleistung nach Herstellerangaben eine Verringerung der NO_x-Emissionen um etwa die Hälfte erreicht. Die Anlage liefert dann allerdings nur eine elektrische Leistung von 5 anstatt 5,5 kW.

In Abbildung 4 ist weiterhin die gute Wirkung des 3-Wege-Katalysators der Anlage „ecopower“ zu erkennen, die im stationären Betrieb NO_x-Emissionen von nur etwa 10 mg/Nm³ zeigt und damit die niedrigsten Werte unter den getesteten Geräten aufweist. Beim BHKW „Solo Stirling“ sind die NO_x-Emissionen zwar im Vergleich zum Gerät „ecopower“ höher; es wird aber kein Katalysator zur Reduktion benötigt und der Grenzwert für das Umweltzeichen „Der Blaue Engel“ wird immer noch deutlich unterschritten.

Fazit

Während der Testphase, die sich für jedes Gerät auf etwa 150 bis 250 Betriebsstunden erstreckte, wurden eine Vielzahl Daten und Erfahrungen gesammelt. Dabei ist offenkundig geworden, dass die bereits im Markt befindlichen Geräte „Dachs“, „Solo Stirling“ und „ecopower“ technisch ausgereift sind. Sie erfüllen die technischen Richt-

linien von TÜV, DVGW und VDEW und besitzen die CE-Zertifizierung. Sie sind schwingungsgedämpft, schallge-kapselt und auf eine hohe Lebensdauer ausgelegt. Damit steht dem Einsatz in Wohn- und Geschäftsgebäuden anstelle des herkömmlichen Heizkessels technisch nichts im Wege.

Vergleicht man die Geräte untereinander, so haben die vorab dargestellten Ergebnisse gezeigt, dass keine pauschale Abstufung möglich ist, da die spezifischen Vor- und Nachteile in jeweils unterschiedlichen Bereichen liegen.

Nimmt man die Vorgaben für die Erteilung des Umweltzeichens „Der Blaue Engel“ als Vergleichskriterium, so ist einzig das BHKW „Solo Stirling“ in der Lage, alle Forderungen zu erfüllen, und es ist dem entsprechend mit dem „Blauen Engel“ ausgezeichnet worden.

Bezogen auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen müssen zurzeit noch zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Zum einen sollte die erzeugte elektrische Leistung nach Möglichkeit selbst genutzt werden, da auf diese Weise der höhere Zukaufpreis für elektrische Energie an Stelle der geringeren Einspeisevergütung angesetzt werden kann. Zum anderen sollte die Anlage eine möglichst hohe jährliche Laufzeit aufweisen, um die höheren Investitionskosten im Vergleich zum Heizkessel auszugleichen.

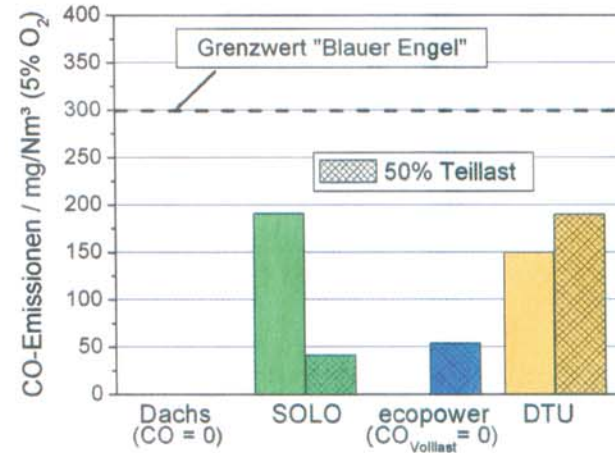


Abbildung 3 CO-Emissionen der vier Geräte bei stationärem Voll- und 50%-Teillastbetrieb

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit zum Betrieb der Anlage auch außerhalb der reinen Heizperiode, was wiederum zur Folge hat, dass derzeit ein wirtschaftlicher Betrieb nur bei kleinen Gewerbebetrieben mit ganzjährigem Wärmebedarf, größeren Einfamilienhäusern mit erhöhtem Wärmebedarf im Sommer, beispielsweise zur Beheizung eines Schwimmbades, oder Mehrfamilienhäusern, Reihenhauszeilen oder dergleichen mit ausreichendem, ganzjährigem Warmwasserbedarf möglich ist. Letztendlich müssen jedoch die zukünftig steigenden Energiepreise in die Be-

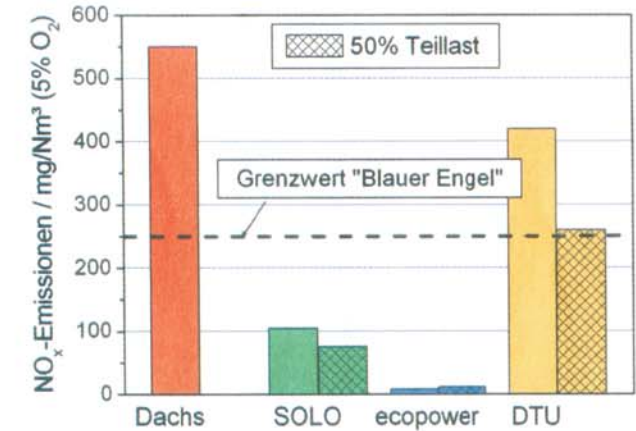


Abbildung 4 NO_x-Emissionen der vier Geräte bei stationärem Voll- und 50%-Teillastbetrieb

rechnungen einbezogen werden, was in absehbarer Zeit den wirtschaftlichen Einsatz von Mini-BHKWs auch in Einfamilienhäusern und damit den Ersatz des konventionellen Heizkessels ermöglichen wird.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Informationsschrift: „Kleine Kraft-Wärme-Kopplung für den Klimaschutz - jeder kann Energie doppelt nutzen“ in Zusammenarbeit mit IZES (Institut für ZukunftsEnergieSysteme), Berlin, 2005, www.bmu.de

- [2] Frost & Sullivan Report 3890, www.power.frost.com, 2001
- [3] Fa. SenerTec, Schweinfurt, www.senertec.de
- [4] Fa. SOLO Stirling, Sindelfingen, www.stirling-engine.de
- [5] Fa. PowerPlus Technologies, Gera, www.ecopower.de
- [6] Fa. Stirling.dk, Lygby, Dänemark, www.stirling.dk
- [7] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., www.blauer-engel.de, Vergabegrundlage für Umweltzeichen „Klein-BHKW-Module für gasförmige Brennstoffe“, RAL-UZ 108, Juni 2004
- [8] EEG, Erneuerbare Energien Gesetz, www.bmu.de/gesetze/verordnungen/doc/2676.php