

Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades
eines Blockheizkraftwerks durch Abwärmever-
wertung in einem nachgeschalteten
Wasser-Dampf-Kreislauf



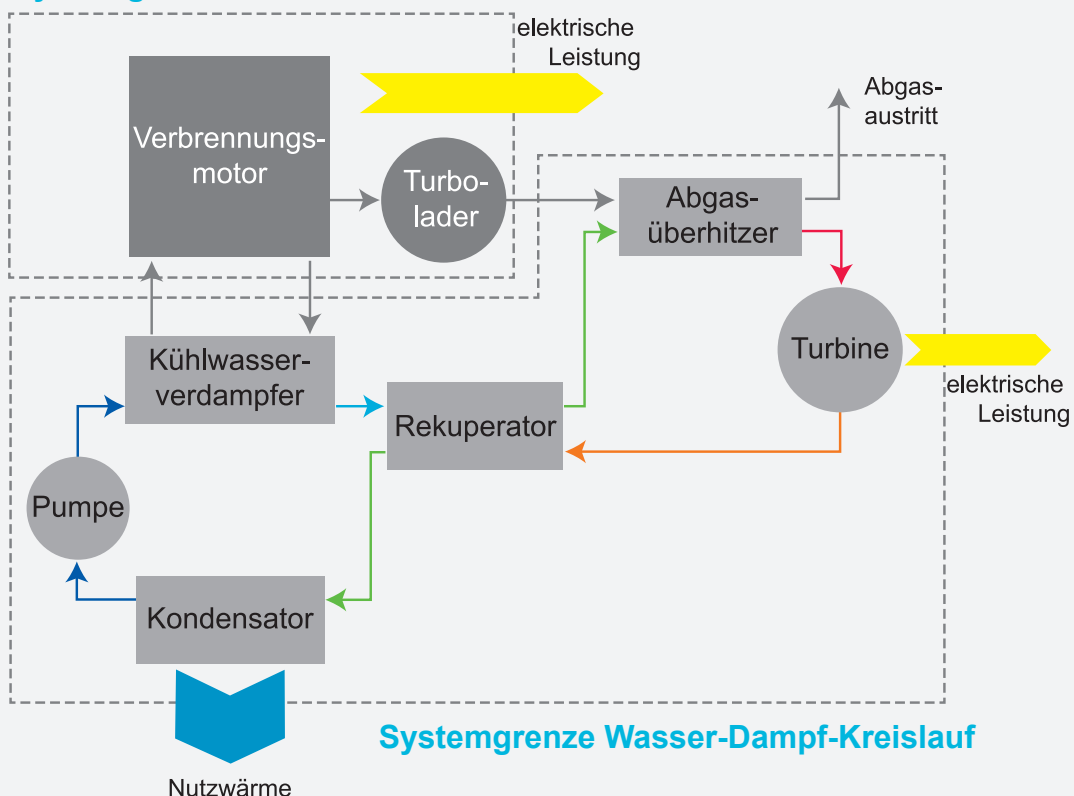
PROJEKT BESCHREIBUNG

In den letzten Jahren haben kompakte Blockheizkraftwerke (BHKWs) zunehmend Verbreitung gefunden. Einen großen Teil machen dabei motorbetriebene BHKWs aus, z.T. mit nachgeschalteter Abgas-Wärmeverwertung.

Ziel dieses Projektes ist die Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades eines Blockheizkraftwerks mit Hilfe eines

Wasser-Dampf-Kreislaufs, der mit Kühlmittel- und Abgaswärme eines Verbrennungsmotors betrieben wird. Mit dem Vorhaben soll nun der elektrische Wirkungsgrad mit und ohne die vorgeschlagene Abwärmenutzung ermittelt werden. Zudem soll der Dampfkreislauf in Bezug auf technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit untersucht werden. Im Folgenden

Systemgrenze BHKW

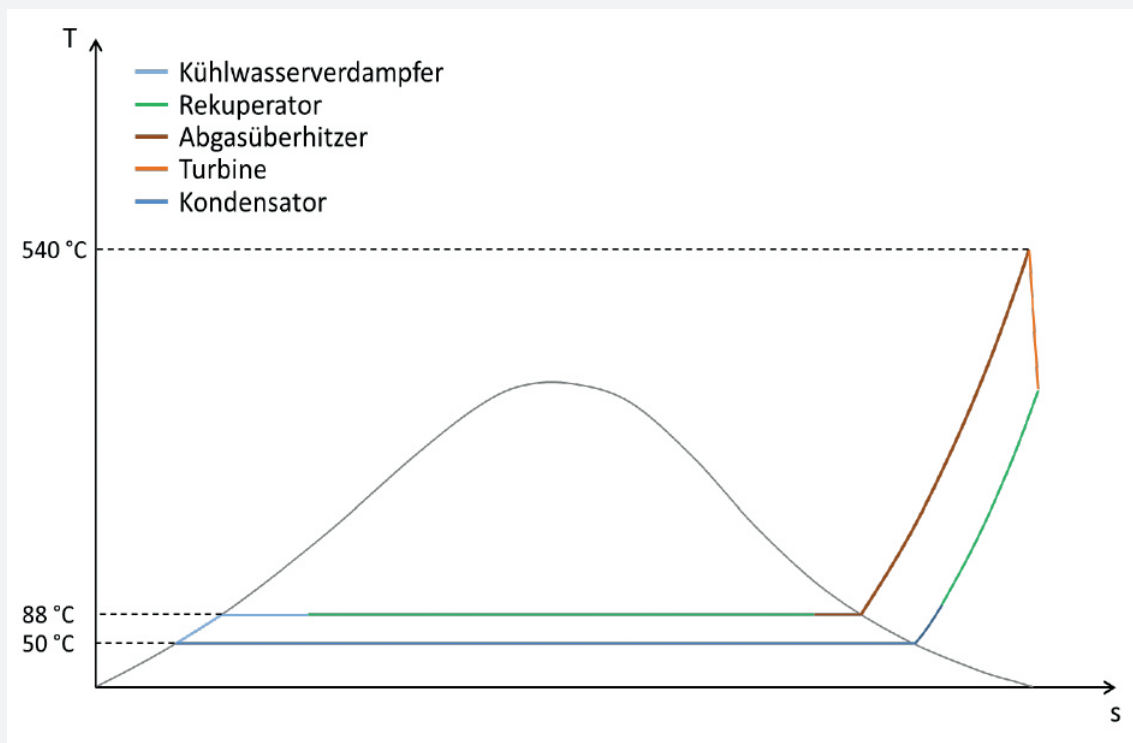


wird der Dampfkreislauf näher erläutert. Die Pumpe bringt das Wasser auf den benötigten Siededruck. Im Kühlwasser-Verdampfer wird ein Teil des Wassers verdampft. Die restliche Verdampfung findet im Rekuperator statt, wo die Restwärme

des Dampfes nach der Turbine genutzt wird. Im Abgasüberhitzer wird der Dampf auf 540°C überhitzt und in der Turbine entspannt. Im Kondensator wird der Dampf kondensiert und die Nutzwärme entnommen.

Die Besonderheiten des Dampfkreislaufs werden anhand des im Folgenden dargestellten t-s-Diagramms schnell ersichtlich. Der Dampfkreislauf wird auf einem niedrigen Druckniveau betrieben. Dadurch liegen Verdampfungsdruck und Kondensationsdruck sehr nahe beieinander

(Druckverhältnis ca. 2,5). Außerdem wird der Dampf sehr stark überhitzt. Durch die starke Überhitzung kann im Vergleich zu einer geringeren Überhitzung mehr elektrische Energie bei gleichem Druckverhältnis innerhalb der Turbine generiert werden.



Mit dem Bau eines Prototypen soll in einem Folgeprojekt die technische Realisierbarkeit nachgewiesen werden. Hierfür wurde

ein Gas-BHKW mit einer elektrischen Leistung von 50 kW_{el} ausgewählt.

PROJEKTVERLAUF/ ZEITPLAN

**Hochschulinterne
Forschungsförderung (HiFF)**
31.03.2012 – 31.08.2012

- Simulation des Dampfkreislaufs mit Epsilon
- erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit

**BMBF Programm „Forschung an
Fachhochschulen“
Förderlinie Ingenieurnachwuchs**
31.08.2012 – 31.08.2015

- Modellierung und Parameterstudie
- Auslegung Einzelkomponenten
- Konzeptvergleich

**Folgeprojekt
voraussichtlich**
31.08.2015 – 31.08.2018

- Bau eines Prototypen
- Validierung der Simulationsergebnisse

POTENZIAL

Anhand eines Prototypen soll die technische Realisierbarkeit des Dampfkreislaufs nachgewiesen werden. Ein Gasmotor soll hierbei als Wärmequelle dienen.

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Randbedingungen des Dampfkreislaufs zusammengefasst.

Randbedingungen des Dampfkessels		
Randbedingung	Einheit	Wert
elektrische Leistung Gasmotor	kwel	50
Verdampfungsdruck	bar	0,90
Kondensationsdruck	bar	0,35
Druckverhältnis Turbine	–	2,57
Dampftemperatur nach Überhitzung	°C	540
Kondensationstemperatur	°C	70
elektrische Leistung Dampfkreislauf	kWel	5,9

Unter diesen Randbedingungen lässt sich eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades der Gesamtanlage von 35,5% auf

39,9% realisieren. Dies entspricht einer Steigerung der elektrischen Leistung von 12,3%.

FAQS

1. Worin bestehen die Vorteile bei Verwendung von Wasser als Arbeitsmedium?
 - ungiftig und nicht entflammbar
 - Fluideigenschaften sehr gut bekannt
 - hohe Überhitzung bei niedrigen Drücken möglich ($> 500^{\circ}\text{C}$)
2. Welche Vorteile hat das niedrige Druckniveau?
 - Verdampfung mit Motorabwärme möglich (meist zwischen $90 - 100^{\circ}\text{C}$)
 - geringeres Gefahrenpotenzial
3. Verringert das niedrige Druckniveau das Enthalpiegefälle innerhalb der Turbine?
 - Ja, aber dies wird durch die starke Überhitzung des Dampfes kompensiert
4. Wirkt sich das niedrige Druckniveau negativ auf die Baugröße und damit die Kosten für die Wärmeübertrager aus?
 - ja aber der begrenzende Faktor bei der Wärmeübertragerauslegung ist hier nicht durch die Dampfparameter sondern durch die Nutzung der Motorabwärme gegeben
 - aufgrund der geringen Temperaturdifferenz von Verdampfungstemperatur und Kühlwassertemperatur wird der Verdampfer sehr groß
5. Könnten die hohen Dampftemperaturen in der Turbine zu Problemen führen?
 - nein, da bei gängigen Abgasturbinen auch Abgasströme mit Temperaturen von mehr als 500°C genutzt werden
 - auch in ORC-Turbinen ist nicht das Rotormaterial der begrenzende Faktor für die Temperatur, sondern die Stabilität des ORC-Mediums, welches sich bei zu hohen Temperaturen zersetzt



6. Warum wird der Dampf in der Turbine nicht noch weiter entspannt?

- Bei einem Druckverhältnis von 2,5 ist eine einstufige Bauweise der Turbine nach theoretischer Auslegung noch gerade möglich
- Wird zu tief entspannt ist die Kondensationstemperatur zu gering um Brauchwasser auf 60°C zu erwärmen.



7. Welche Anlagenkonzepte stehen in direkter Konkurrenz zu dem hier geplanten Dampfkreislauf?

- ORC-Kreisläufe



8. Ist die Verwendung eines Dampfmotors statt einer Turbine sinnvoll?

- Teilweise werden bei vergleichbaren Anlagenkonzepten Dampfmotoren eingesetzt
- Vorteil des Dampfmotors ist der gute Wirkungsgrad im Teillastbereich und die hohe Druckdifferenz
- Dampfmotoren machen aber nur bei sehr großen Druckverhältnissen Sinn, da bei kleinen Druckverhältnissen der Wirkungsgrad stark abnimmt
- dies spiegelt sich in vergleichbaren Anlagenkonzepten wieder, wo nur die Abgaswärme in einem Hochdruck-Prozess genutzt wird



9. Wie teuer darf der Dampfkreislauf schätzungsweise werden, damit ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist?

- nach aktuellem Kenntnisstand darf der Dampfkreislauf ca. 2000 – 3000 € pro kW elektrischer Leistung des Dampfkreislaufs kosten



VERGLEICH VON DAMPF-/ ORC-KREISLAUF

Dampfkreislauf	ORC-Kreislauf
kostengünstiges und leicht zu beschaffendes Arbeitsmedium	Organische Fluide teils teuer und schwer zu beschaffen
Dampf ist ungiftig und nicht entflammbar	Arbeitsmedien teils giftig und entflammbar
kleines Druckverhältnis innerhalb der Turbine. (ca. 2,5)	meist sehr großes Druckverhältnis innerhalb der Turbine (>100)
Turbine einstufig realisierbar	Turbinen teils mehrstufig und daher teurer
große Wärmeübertrager	kleinere Wärmeübertrager als in Dampfkreislauf möglich aufgrund höherer Drücke
Überhitzung auf über 500°C möglich	Überhitzung auf max. 450°C begrenzt
geringes Druckniveau	höheres Druckniveau
Verwendung eines Niederdruckkreislauf	bei Nutzung von Kühlwasser- und Abgaswärme Versendung eines Niederdruck- und eines Hochdruckkreislauf
darf bei Abwärmenutzung eines Gas-BHKW nicht mehr als 3000 €/kWh _{el} kosten	Anschaffungskosten für realisierte ORC-Anlagen liegen zwischen 4000 – 8000 €/kWh _{el}

WIRTSCHAFTLICHKEIT DES DAMPFKREISLAUFS

Um die Wirtschaftlichkeit der Anlage bei dem jetzigen Bearbeitungsstand beurteilen zu können müssen einige Annahmen getroffen werden. Im Folgenden soll nun anhand einer Sensitivitätsanalyse eine realistische

Abschätzung getroffen werden, wie teuer der Dampfkreislauf sein darf, damit ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Folgende Werte wurden als Fixwerte festgelegt.

Randbedingung	Einheit	Wert
Strompreis (Industriekunden)	€-Cent/kWh _{el}	0,150
Einspeisevergütung	€-Cent/kWh _{el}	0,090
Wärmegestehungskosten	€-Cent/kWh _{el}	0,063
Nutzungsdauer	a	10
Betriebsstunden	h/a	7000

Folgende Werte wurden in der Sensitivitätsanalyse variiert:

- spezifische Wartungskosten (1 % - 2 % von Investitionskosten)
- spezifische Anlagenkosten (3000 €/kW_{el} - 5000 €/kW_{el})
- Stromeigennutzung (50 % bis 100 %)

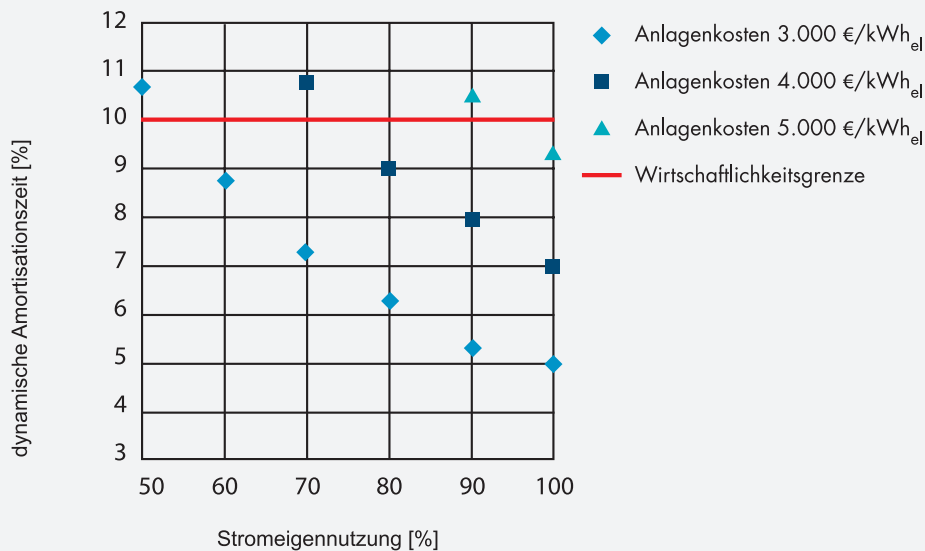
Wie man anhand der Diagramme (Seite 10) erkennen kann, darf der Dampfkreislauf maximal 5000 €/kW_{el} kosten um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten – ausgehend von einer Stromeigennutzung von 100% und spezifischen Wartungskosten von 2% bezogen auf die Investitionskosten. Bei einer elektrischen Leistung des Dampfkreislaufs von 5,9 kW_{el} dürfen die Anlagenkosten daher ca. 30.000 kW_{el} und die

Wartungskosten ca. 600 €/a nicht übersteigen. Es ist zu prüfen, ob diese Kosten in der Serienproduktion erreicht werden können.

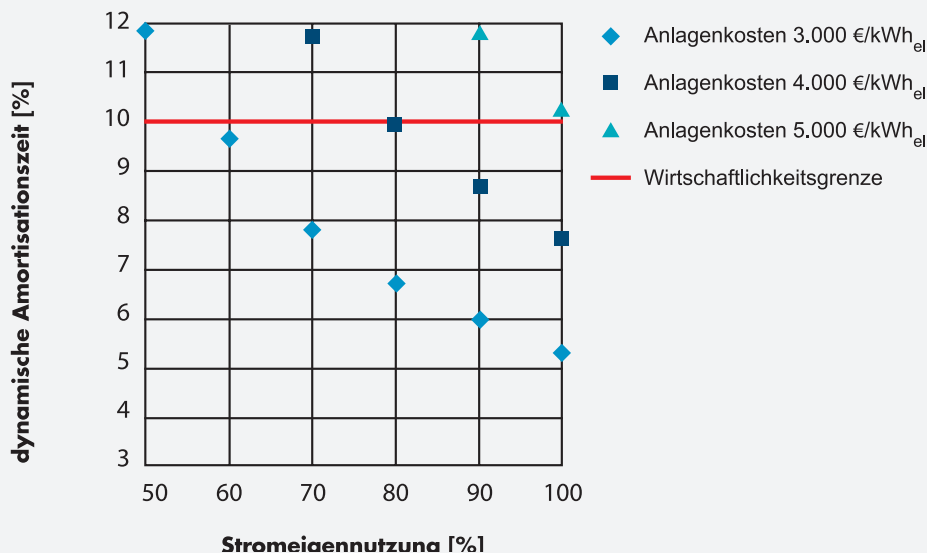
Die Diagramme zeigen zudem, dass eine hohe Stromeigennutzung (> 70%) Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb ist, da bei einem Gas-BHKW die Wärmegestehungskosten und die Einspeisevergütung sehr nahe beieinander liegen.

WIRTSCHAFTLICHKEIT SENSITIVITÄTSANALYSE

**Amortisationszeiten mit spezifischen Wartungskosten
von 1% bezogen auf Investitionskosten**



**Amortisationszeiten mit spezifischen Wartungskosten
von 2% bezogen auf Investitionskosten**



WERDEN SIE PROJEKTPARTNER!

Nutzen für den Partner

- Entwicklung von Produktideen
- Hochschulkooperation Wissenstransfer Industrie > Hochschule
- Beteiligung an Forschungsvorhaben
- Beteiligung an Programmen zur Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung

Möglicher Beitrag des Partners

- fachliches Know-how, z.B.
 - Wärmeübertrager
 - Turbinentechnik
 - Steuerungstechnik
 - BHKW Technik
- Bereitstellung von Komponenten für einen Prototypen, z. B. durch
 - Auslegung
 - Fertigung
 - Finanzierung

der folgenden Bauteile:

- BHKW
- Wärmeübertrager
- Turbine
- Generator + Einspeiseeinheit

PROJEKTFÖRDERUNG:

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Förderkennzeichen: 03FH00612
Laufzeit: 31.08.2012 – 31.08.2015

HOCHSCHULE DÜSSELDORF

Prof. Dr.-Ing. Matthias Neef
Josef-Gockeln-Straße 9
40474 Düsseldorf
Raum L 1.9

Christoph Laux M.Sc.
Josef-Gockeln-Straße 9
40474 Düsseldorf
Raum L 1.6

KOOPERATIONSPARTNER

Gofficient GbR

Dr.-Ing. Andreas Gotter
Wilhelm-Grasmehr-Str. 6-8
52078 Aachen

