

„Nano-BHKW-Teststand – Untersuchungen zur Realisierbarkeit eines Blockheizkraftwerkes im Kleinstmaßstab auf Basis thermoelektrischer Generatoren für die Anwendung als stromproduzierende Heizung in Einfamilienhäusern“

M.Sc. Arne Stumpf

Fakultät Verfahrenstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr.-Ing Thomas Metz

Fakultät Verfahrenstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele:

Mit Blockheizkraftwerken (BHKW) im Kleinstmaßstab (Nano-BHKW) können Besitzer von Einfamilienhäusern den Effizienzvorteil der Kraft-Wärme-Kopplung nutzen. Aktuelle Nano-BHKW-Systeme mit Gasmotor, Dampfmotor, Stirlingmotor oder Brennstoffzelle sind relativ kosten- und wartungsintensiv. Das Forschungsprojekt untersucht eine mögliche Alternative zu den bisherigen Systemen: Ein Nano-BHKW auf Basis thermoelektrischer Generatoren (TEG). Im Rahmen des Projektes werden die Vorteile dieses Systems gegenüber den bisher kommerziellen Systemen untersucht. Hierzu werden aktuell verfügbare TEG eingesetzt und eine Versuchsanlage in kommerziellem Maßstab mit einer elektrischen Leistung von ca. 300 Watt_{el} und einer Heizleistung von ca. 6 kW_{th} errichtet. Darüber hinaus soll auch das Potential in Entwicklung befindlicher TEG-Materialien und Herstellungsmethoden für diese Anwendung auf theoretischer Basis geprüft werden. Während die Versuchsanlage mit Propan als Brennstoff betrieben wird, kann diese Technik auch für andere Brennstoffe wie Erdgas, Biogas, Heizöl oder Holzbrennstoffe verwendet werden. Bei positivem Projektergebnis wird eine Entwicklung bis zur Marktreife in Kooperation mit der Industrie angestrebt.

Diese Seite bleibt aus drucktechnischen Gründen leer.

Bitte tragen Sie auf der nächsten Seite in der linken und rechten Kopfzeile den Kurztitel Ihres Forschungsprojekts ein und füllen dann die Punkte 1 bis 5 aus. Bitte nutzen Sie die vorgegebenen Formatierungen wie Überschrift, Aufzählung etc.

Bitte fügen Sie bei Punkt 4 auch ein Bild oder eine Grafik ein.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	12 Monate
Fakultät /Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät für Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Thomas Metz
Kontaktdaten	E-Mail: thomas.metz@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Grundsätzlich ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – die gemeinsame Erzeugung von Strom und Wärme – effizienter als die separate Erzeugung. Der Grund hierfür ist der höhere Wirkungsgrad der KWK-Kraftwerke durch die Nutzung der Abwärme, die im Falle der separaten Stromerzeugung als Verlustenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird [1].

Üblicherweise wird die Wärme aus KWK-Anlagen in Ballungsgebieten über Nah- und Fernwärmenetze den lokalen Nutzern zu Verfügung gestellt. Hiervon können sowohl Industrie als auch Privatpersonen profitieren. Nachteile der Wärmenetze sind Leitungsverluste und die hohen Kosten für Bau und Wartung. Diese machen Fernwärmenetze in Regionen mit einer geringen Anschlussdichte unrentabel. Insbesondere in ländlichen Regionen ist die Versorgung von Wohngebieten mit Fernwärme wirtschaftlich schwierig. Die Nutzung von Heizwerken zur lokalen Wärmeversorgung mittels gemeindebetriebener Wärmenetze lässt den Vorteil des hohen Wirkungsgrades bei der KWK oftmals ungenutzt.

Um auch in ländlichen Regionen den Vorteil der KWK effizient nutzen zu können, wurden Nano-Blockheizkraftwerke (BHKW) entwickelt. Diese decken einen Leistungsbereich von $< 2,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ ab und generieren sowohl Wärme als auch Strom. Der Einsatz der Nano-BHKW in Ein-/Zweifamilienhäusern ist bisher aus verschiedenen Gründen problematisch:

Zum einen liefern die meisten Nano-BHKW auf dem Markt eine elektrische Leistung von 1 kW_{el} und höher. Dies ist für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser stark überdimensioniert. Der jährliche Durchschnittsverbrauch eines 4-Personen-Haushaltes liegt nur bei ca. $340 \text{ W}_{\text{el}}$. In ländlichen Regionen überwiegt dabei der Einfamilienhausanteil. 80% dieser Häuser wurden vor 1995 gebaut und weisen dementsprechend einen durchschnittlichen Heizwärmebedarf von 6 kW_{th} auf [2]. Zum anderen übersteigen die Stromgestehungskosten der erhältlichen Nano-BHKW die Strombezugskosten der Energieversorger. Dies liegt sowohl an den hohen Anschaffungskosten, wie auch den zum Teil hohen Betriebs-/Instandhaltungskosten und führte dazu, dass aktuell eine Fokussierung auf die Brennstoffzelle stattfindet. Derzeit werden Brennstoffzellensysteme in Deutschland intensiv gefördert [3]. Trotzdem ist ein wirtschaftlicher Betrieb oftmals nicht erzielbar. Ob sich für Brennstoffzellen über den Förderungszeitraum hinaus ein stabiler Markt entwickeln kann, bleibt deshalb aktuell fraglich.

Um die BHKW-Technologie für Einfamilienhäuser in der Breite nutzbar machen zu können, sollten kostengünstige Alternativen gesucht und entwickelt werden. Dabei ist es wichtig, dass unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt werden können und dass eine Wirtschaftlichkeit möglichst ohne Förderung erzielbar ist.

Ein Nano-BHKW mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) ist bei der Stromproduktion vom Brennstoff unabhängig, da die TEG mit allen bekannten Verbrennungssystemen kombinierbar sind. Der elektrische Leistungsbereich kann über die von den TEG genutzte Fläche auf das geforderte Niveau angepasst werden. Damit ist eine elektrische Leistung von $340 \text{ W}_{\text{el}}$ gut darstellbar. Die Nutzung in Einfamilienhäusern wäre damit unproblematisch, da der Strom so selbst genutzt werden kann und keine nennenswerte Netzbelastung durch eine Vielzahl unregelmäßiger Stromeinspeiser entsteht.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Projektziel ist die Entwicklung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) für die Anwendung im Einfamilienhaus. Das Grundprinzip zeigt Abbildung 1. Anstatt Wasser wie in herkömmlichen Heizgeräten direkt über heißes Rauchgas in einem Wärmeübertrager zu erwärmen, werden TEG zwischen heißer und kalter Seite in den Wärmeübertrager integriert. Hierdurch wird ein Teil des Wärmestroms in el. Leistung umgewandelt.



Abbildung 1: Prinzipskizze eines Wärmeübertragers in einer normalen Heizung (links) und einer Heizung mit TEG (rechts)

Wesentlicher Kern des Projektes ist es, hierzu einen Teststand in kommerziellem Maßstab zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Der Teststand dient der Überprüfung der theoretischen Modelle und soll verifizierte Aussagen über die Machbarkeit und die wirtschaftlich-technischen Vorteile gegenüber anderen Systemen, wie z.B. Brennstoffzellen-BHKW oder Motor-BHKW ermöglichen.

Als konkrete Ziele sind zu nennen:

- die Ermittlung des konstruktiven Konzepts des Nano-BHKWs
- die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Anlage
- der Vergleich mit anderen Systemen
- die Bestimmung des realen Wirkungsgrades und der Maximalleistung
- die Bestimmung der Hürden bis zur Markteinführung eines solchen Systems
- der Wissenstransfer zwischen Forschung, Lehre und Industrie

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Vorfeld des Vorlaufforschungsprojektes wurden bereits eine Literatur- und Marktrecherche durchgeführt und im Rahmen eines Projektkurses durch eine Gruppe Studierender mögliche Konzepte entwickelt. Außerdem wurde eine Bachelorarbeit mit dem Titel „Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“ durchgeführt. Die Verfeinerung und Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt im Rahmen des vorliegenden Vorlaufforschungsprojektes und eines weiteren drittmittel-Projektes, gefördert durch die Firma STAEDLER. Kern der Arbeiten ist es, eine fundierte Basis für künftige Projekte zu dieser Thematik zu schaffen.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden die theoretischen Grundlagen erarbeitet und eine Konstruktion des Wärmeübertragers mit TEG erstellt. Die Arbeit geht dabei von einer Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ aus. Diese Leistung entspricht in etwa dem Durchschnittsbedarf eines Vierpersonenhaushaltes im Einfamilienhaus während der Heizperiode (Winter) in Deutschland. Dem erstellten theoretischen Modell nach kann aus der Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ eine elektrische Leistung von ca. $230 \text{ W}_{\text{el}}$ generiert werden; das entspricht einem Gesamtwirkungsgrad von $101,7\%$ (bezogen auf den unteren Heizwert H_i des Brennstoffs).

Tabelle 1: theoretische Wirkungsgrade der Versuchsanlage

Wirkungsgrade η :	
$\eta_{\text{elektrisch}}$	3,5 %
$\eta_{\text{thermisch}}$	98,3 %
$\eta_{\text{gesamt, } H_i}$	101,7 %

Aufgrund von konservativen Annahmen im theoretischen Modell ist es dabei möglich, dass auch höhere elektrische Wirkungsgrade erzielt werden. Ein weiteres Steigerungspotential besteht mit TEG, welche sich momentan noch in Entwicklung befinden. Generell wird jedoch deutlich, dass es sich bei der Nano-BHKW-Technik mit TEG nur um stromproduzierende Heizgeräte handeln kann und eine alleinige Stromproduktion ohne Wärmenutzung nicht sinnvoll ist. Die Abmessungen des Wärmeübertragers mit TEG betragen etwa $1 \text{ m} \times 0,35 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ [4]. Dies zeigt eine vergleichsweise kompakte Bauform, was für den Einsatz in Heizungskellern durchaus attraktiv ist.

Im weiteren Verlauf des Vorlaufforschungsprojekts wurde auf Basis der Bachelorarbeit die Konstruktion des Wärmeübertragers verfeinert. Abbildung 2 zeigt das Konstruktionsergebnis der Bachelorarbeit sowie die verfeinerte Version und ein Foto des realisierten Wärmeübertragers. Die Kernidee besteht darin, am oberen Ende des Wärmeübertragers den Gasbrenner zu platzieren, das erzeugte heiße Rauchgas vertikal nach unten über Rippen

strömen zu lassen und die Wärme aus dem Rauchgas seitlich nach außen über TEG an den Wasserkreislauf abzuführen.

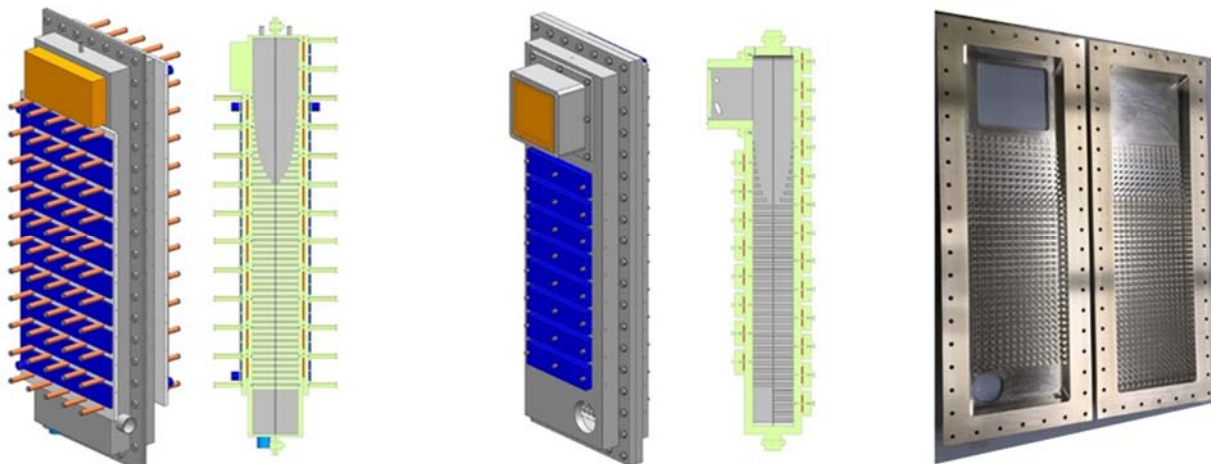


Abbildung 2: Entwurf und Schnittdarstellung des Wärmeüberträgers der Bachelorarbeit (links) [4], Modell des gebauten Wärmeüberträgers (Mitte) und Innenansicht des realen Wärmeüberträgers (rechts)

Üblicherweise werden Wärmeüberträger für Brennwertthermen aus einem Aluminium-Silicium-Sandguss gefertigt. Aus Kostengründen wurde der vorliegende Wärmeüberträger als Sonderanfertigung dagegen aus Vollmaterial gefräst. Dies beeinflusste sowohl die Werkstoffwahl als auch einige konstruktive Details. Des Weiteren wurde für die Peripherie der Anlage (Brenner, Steuerung, Pumpe, etc.) ein kommerzielles Gasbrennwertgerät beschafft. Auch die TEG sind kommerziell verfügbare Elemente. Damit kommt das Gesamtkonzept der Testanlage einer möglichen kommerziellen Ausführung bereits sehr nahe. Die Schnittstellen des Wärmeüberträgers wurden dementsprechend an die Gegebenheiten der angrenzenden Komponenten (Brenner, Abgasrohr, Kondensatablauf, TEG) angepasst.

Dem Modell nach wird die Dauertemperatur des Wärmeübertragers bis zu 250°C betragen. Diese liegt deutlich über den gewöhnlichen Temperaturen für Wärmeüberträger in kommerziellen Brennwertthermen. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl warmfester Aluminiumlegierungen. Aufgrund der Festigkeit, der chemischen Beständigkeit und der Spanbarkeit wurde der Werkstoff EN AW 5083 ausgewählt.

Tabelle 2: typische Festigkeitswerte einiger Aluminium Knetwerkstoffe im Kurzzeitversuch; Vorglühen 10.000 h bei Prüftemperatur (Quelle: ThyssenKrupp)

Werkstoff nach DIN EN 573.3 EN AW-	Zustand DIN EN 485.2	Prüftemperatur			
		200°C		260°C	
		R _m N/mm ²	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	R _{p0.2} N/mm ²
1100 - Al99,0Cu	O/H111	40	25	30	20
3003 - AlMn1Cu	O/H111	60	30	40	25
3004 - AlMn1Mg	O/H111	95	65	70	50
5052 - AlMg2,5	O/H111	115	75	85	50
5454 - AlMg3Mn	H112	150	105	115	75
5083 - AlMg4,5Mn0,7	O/H111	150	115	115	75

Die Temperatur von 250°C in der Wärmeüberträgerwand entsteht wie im Folgenden beschrieben. Die elektrische Leistung eines TEG hängt direkt von der über den TEG anliegenden Temperaturdifferenz ab. Bei einem großen Wärmestrom durch den TEG wird mehr Strom generiert, als bei einem geringen Wärmestrom [5]. Jeder TEG besitzt eine werkstofflimitierte maximale Betriebstemperatur. Um die maximale elektrische Leistung mit einem TEG zu erreichen, muss eine möglichst große Temperaturdifferenz am TEG anliegen. Für die verwendeten TEG (TEG-127-230-32 der Firma thermalforce.de) liegt die maximale Betriebstemperatur bei 230°C. Nach Herstellerangaben wird bei Anliegen einer Temperaturdifferenz von 200 K (von 220°C auf 20°C) eine elektrische Leistung von ca. 13 W pro TEG erzeugt.

Der Temperaturverlauf zwischen Rauchgas und Wasser ist exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt. Neben dem Wärmeleitwiderstand der TEG bestimmen eine Reihe weiterer Widerstände den gesamten Temperaturabfall zwischen Rauchgas und Wasser. Der größte Temperaturabfall besteht aufgrund des mäßigen Wärmeübergangs

zwischen Rauchgas und Wand. Weitere wesentliche Temperaturabfälle treten an den Kontaktflächen zwischen TEG und Wärmeübertrager bzw. Kühler und zwischen Wasser und Kühleroberfläche auf. Die Wärmeleitung in Wärmeübertrager und Kühler ist bei Verwendung von Aluminium sehr gut und verursacht daher nur sehr kleine Temperaturabfälle. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die optimale Gestaltung der einzelnen Wärmeübergänge von zentraler Bedeutung für das Gesamtsystem ist.

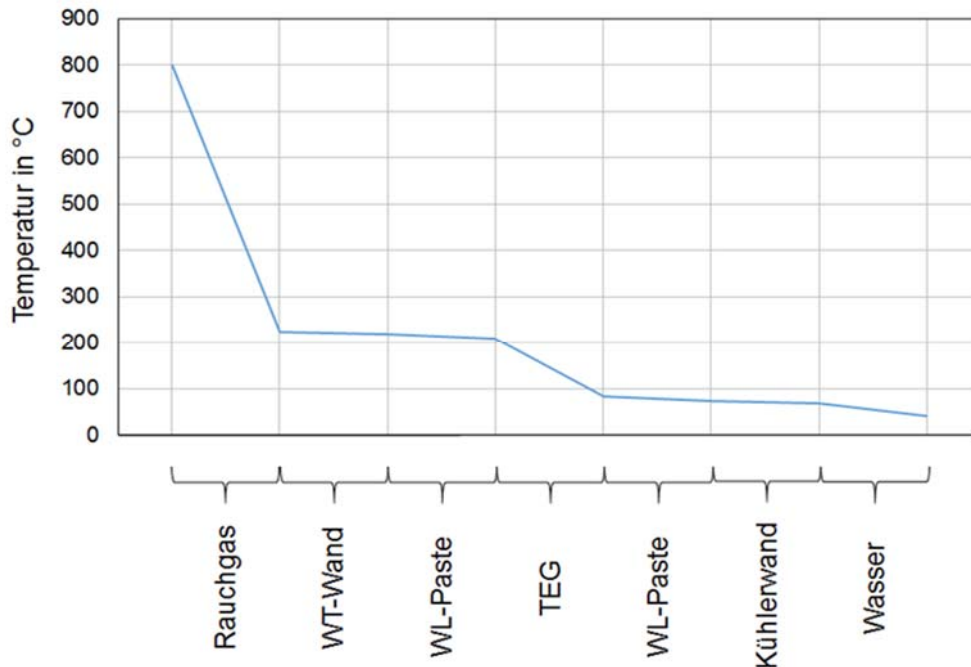


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wärmedurchgangs nach der Modellrechnung (1-dimensional) zwischen Rauchgas und Wasser

Aus der ermittelten Temperaturdifferenz über die TEG lässt sich die elektrisch erzeugte Leistung an jeder Stelle im Apparat ermitteln. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4. Hierbei wird die erzeugte elektrische Leistungsdichte in Zusammenhang mit der Rauchgasabkühlung über der Fläche des Wärmeüberträgers dargestellt. Demnach wird die maximale elektrische Leistung in der Nähe des Brenners (links im Diagramm) erzeugt. Sobald die Rauchgastemperatur unter etwa 500°C abfällt, sinkt auch die Temperaturdifferenz über die TEG und damit die erzeugte elektrische Leistung. Da Temperaturdifferenz und elektrische Leistung nicht linear voneinander abhängen, wird ab etwa 0,5m kaum noch verwertbare elektrische Leistung erzeugt. Daraus wird ersichtlich, dass der Einsatz von TEG nur bei hohen Rauchgastemperaturen sinnvoll ist und bei geringeren Rauchgastemperaturen darauf verzichtet werden kann. Dies ist ein wesentlicher Punkt für die Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Damit wird auch der Gesamtwirkungsgrad gegenüber Brennerthermen ohne Stromproduktion nicht geschmälert, da die Abgastemperatur nicht erhöht wird.

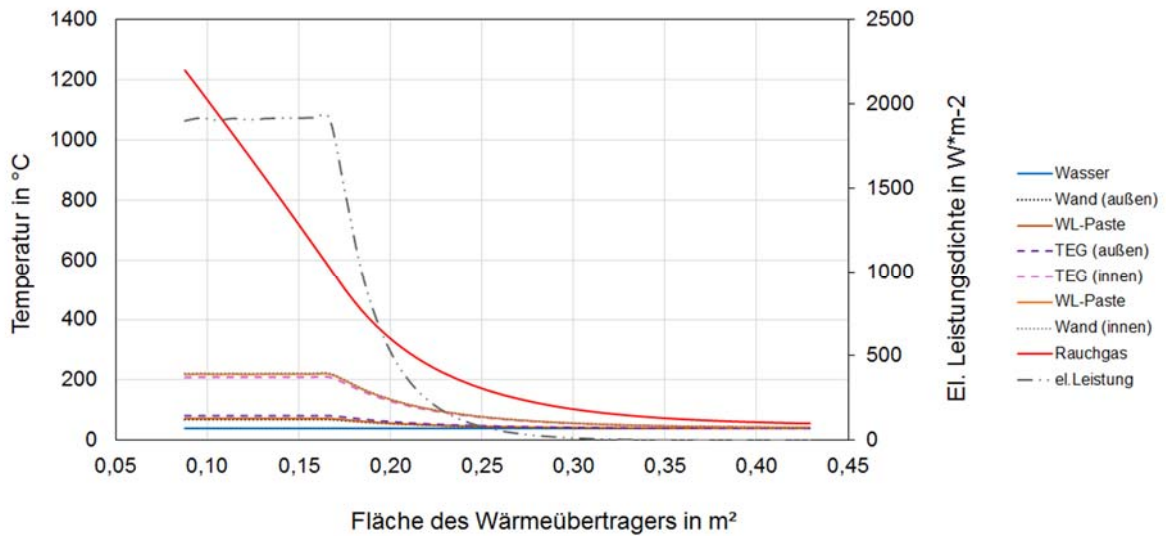


Abbildung 4: Temperaturverlauf zwischen Rauchgas und Wasser sowie generierte elektrische Leistungsdichte aufgetragen über der Fläche des Rauchgaspfad im Konvektionsteil des Wärmeübertragers

In Abbildung 5 ist ein Übersichts-Fließbild der Versuchsanlage dargestellt. Das Gas wird über eine Gasregelstrecke mit Luft gemischt und dem Brenner zugeführt. Dieser befindet sich am Kopf des Wärmeübertragers. Der primäre Kühlwasserkreislauf gibt die im Nano-BHKW freigesetzte Wärme über einen Plattenwärmeübertrager (W01) an einen Sekundärkreislauf im Labor ab (anstelle von Heizkörpern in einem Wohnhaus). Beide Kreisläufe sind mit Wasser befüllt. Der Primärkreislauf wird mittels Durchflusssensoren und Temperatursensoren überwacht. Die Wandtemperaturen im Wärmeübertrager werden ebenfalls gemessen.

Die elektrische Verschaltung der TEG ist eine Mischung aus Reihen- und Parallelschaltung. Je vier bis acht TEG werden in Reihe geschaltet. Diese Reihen werden wiederum parallelgeschaltet. Diese Art der Verschaltung soll zum einen zu hohe Spannungen und Stromstärken vermeiden, zum anderen sollen nur die TEG in Reihe geschaltet werden, die in etwa die gleiche Leistung liefern, um sich gegenseitig nicht negativ zu beeinflussen. Die generierte elektrische Leistung wird an elektronische Lasten abgegeben und dabei exakt gemessen. Die Messdaten werden automatisiert erfasst und ausgewertet.

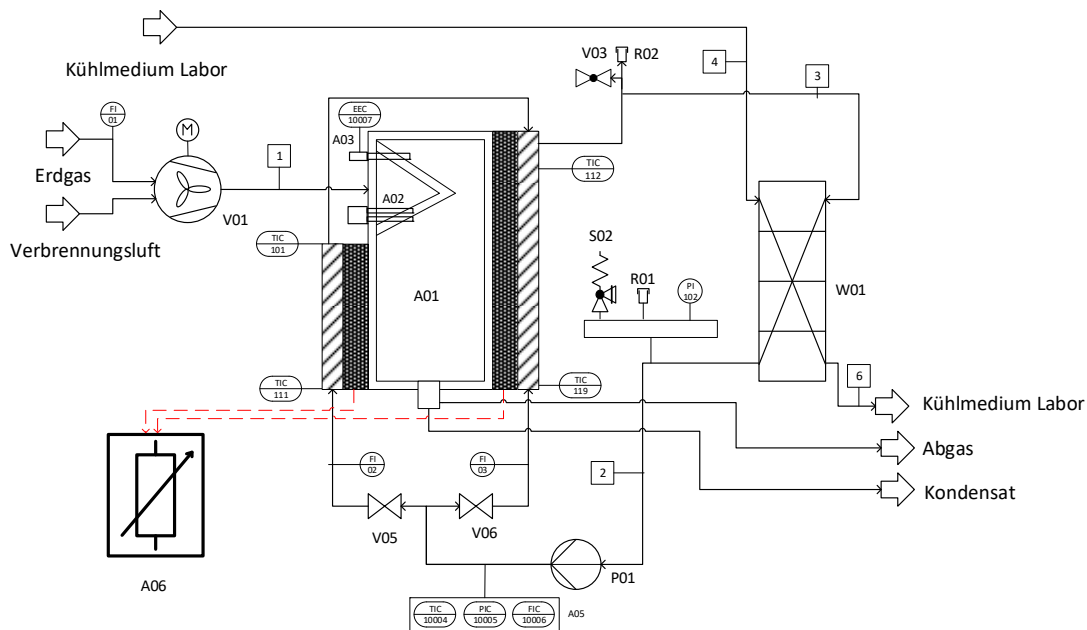


Abbildung 5: Übersichts-Fließbild der Versuchsanlage

Die Versuchsanlage befindet sich aktuell in der Fertigstellung und wird in Kürze in Betrieb genommen.

Abbildung 6 zeigt Fotos der Testanlage im aktuellen Zustand.

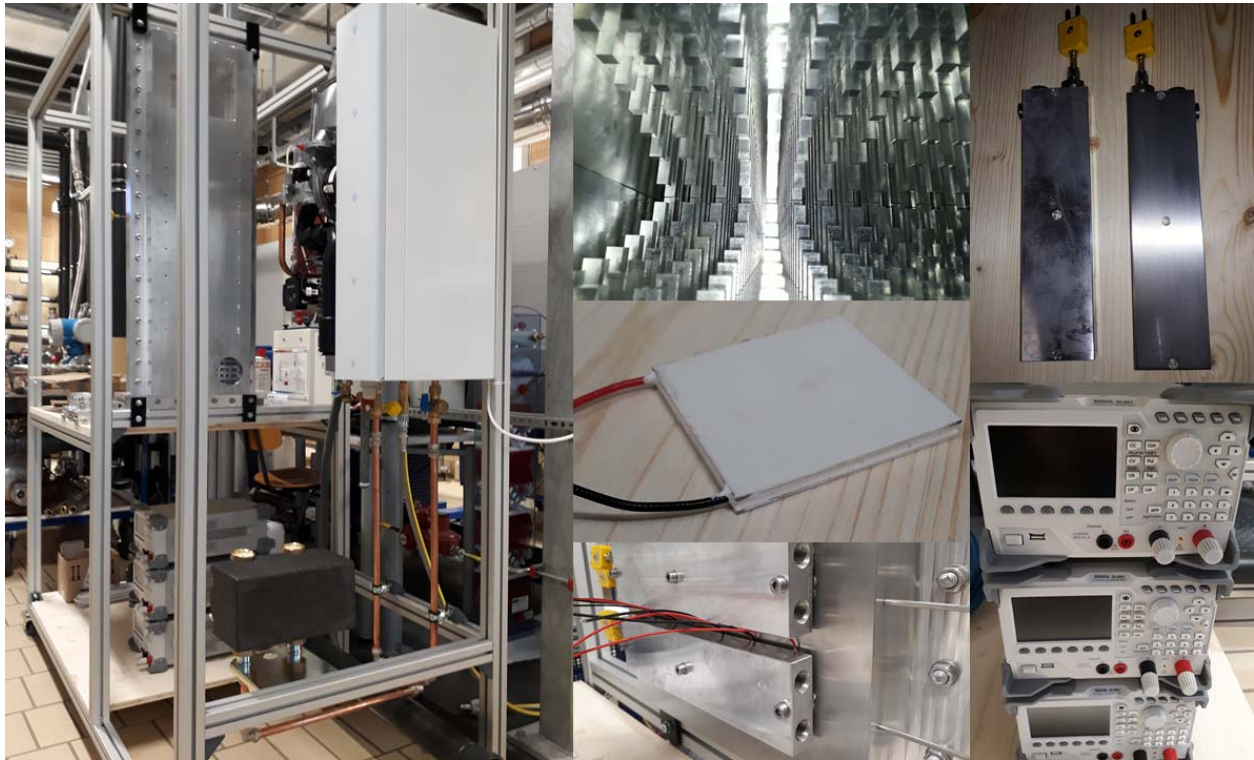


Abbildung 6: Bild der Versuchsanlage während der Montage (links), Detailansicht der Rippen im Wärmeübertrager (Mitte oben), Kühler mit eingebautem Thermoelement (rechts oben); TEG (Mitte); Kühler im eingebauten Zustand mit TEG (Mitte unten); elektronische Lasten (rechts unten)

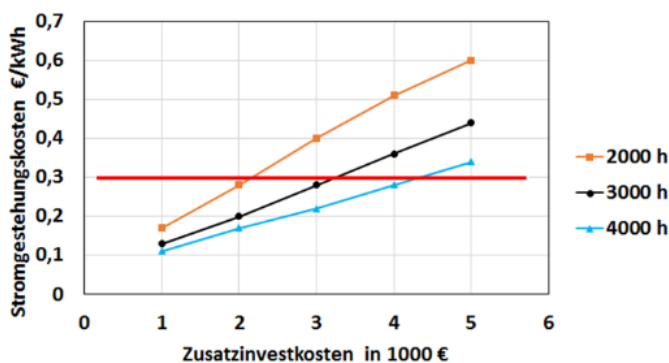


Abbildung 7: Stromgestehungskosten der modifizierten Brennwärthe

Abbildung 7 zeigt eine Sensibilitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit sind die Jahres-Betriebsstunden und die Zusatzinvestitionskosten einer Brennwärthe mit TEG-Technik gegenüber einer herkömmlichen Brennwärthe ohne TEG-Technik. Liegen die Stromgestehungskosten unterhalb üblicher Strombezugskosten im Privatkundenbereich von ca. 30 ct/kWh, ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich (Bereich unterhalb der roten Linie im Diagramm). D.h. um wirtschaftlich zu sein, darf eine Anlage bei 3000 Betriebsstunden im Jahr, nicht mehr als 3000 € Zusatzinvestitionen verursachen. Nach aktuellem Kenntnisstand kann

diese Ziel erreicht werden. Eine erste Hochrechnung der Wirtschaftlichkeit für eine Serienfertigung ergibt, dass sich eine Anlage nach ca. 10 Jahren amortisiert hat. Der Berechnung werden dabei 3000 Betriebsstunden pro Jahr und ein Strompreis von $29 \text{ ct} \cdot \text{kWh}^{-1}$ zugrunde gelegt. Der generierte Strom wird dabei zu 100% selbst verbraucht.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Wie bereits erwähnt, wurde im Rahmen des Projekts eine Bachelorarbeit („Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“) abgeschlossen, die eine grundsätzliche technische Machbarkeit eines Nano-BHKWs mit einem theoretischen Modell bestätigt.

Die aktuell in der Fertigstellung befindliche Versuchsanlage dient der Verifizierung der theoretischen Aussagen. Parallel dazu sind weitere Bachelorarbeiten im Rahmen des Themenkomplexes in Arbeit. In einer Bachelorarbeit wird die Verifizierung der Abhängigkeit der elektrischen Leistung eines TEGs von bestimmten äußeren Faktoren

untersucht. Im Anschluss an diese Bachelorarbeit soll ein Praktikumsversuch für die Studierenden der Fakultät Verfahrenstechnik erarbeitet werden, um ihnen das Themenfeld und die Funktionsweise der Thermoelektrizität während des Studiums näherzubringen. In einer weiteren Bachelorarbeit wird in Kooperation mit einem externen Partner die Strömung und der Wärmedurchgang im Wärmeüberträger des Nano-BHKWs 3-dimensional simuliert.

Ein studienbegleitender Projektkurs bearbeitet zusätzlich gewisse Teilbereiche des Themenkomplexes „Nano-BHKW mit TEG“. Die Studenten erarbeiten unter anderem Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Recyclingkonzepte für TEG und mögliche Optimierungen des theoretischen Modells wie auch der Versuchsanlage.

Im September 2018 wurden die bisherigen Ergebnisse der Forschungsarbeit hinsichtlich der Entwicklung „Nano-BHKW mit TEG“ auf dem 2. Netzwerktreffen des Bayerischen Wissenschaftsforums in Waischenfeld vorgestellt und diskutiert.

Aktuell ist ein wissenschaftlicher Mitarbeiter bis April 2019 mit der Bearbeitung und Entwicklung des Themas beschäftigt. Hierbei wird der Fokus auf die Inbetriebnahme der Versuchsanlage und die Verifizierung und Anpassung des theoretischen Modells für die Versuchsanlage gelegt. Zum Ende der Projektlaufzeit ist eine entsprechende Veröffentlichung geplant.

Eine weitere Finanzierung über den genannten Zeitraum hinaus ist bislang nicht gesichert. Kontakte zu Firmen aus dem Bereich der Brenner- und Heizungstechnologie bestehen und sollen in künftigen Projekten ausgebaut werden. Ziel der gesamten Forschungstätigkeiten ist es, die Technik bis zur kommerziellen Reife zu entwickeln.

6. References

- [1] W. Suttor, M. Johler, and D. Weisenberger, *Das Mini-Blockheizkraftwerk: Eine Heizung die auch Strom erzeugt ; mit neuen Gesetzen und Fördermaßnahmen ab 1.1.2009*, 5th ed. Heidelberg, 2009.
- [2] J. Seifert, J. Hartan, and A. Meinzenbach, *Mikro-BHKW-Systeme für den Gebäudebereich*. Berlin [u.a.], 2013.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende,”
- [4] A. Dilling, “Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren,” vol. 2018.
- [5] Dr. Christian Stiewe and Prof. Dr. Eckard Müller, “Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen Chancen für NRW,” *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)*, 2013.