



TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM



STAEDTLER
S T I F T U N G

Fakultät Verfahrenstechnik



Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

„Energy Harvesting im Wohngebäude – Vorentwicklung eines Nano-BHKWs“

gefördert durch die STAEDTLER Stiftung,

Laufzeit 1. Oktober 2017 bis 31. März 2019

M.Sc. Arne Stumpf

Fakultät Verfahrenstechnik

Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr.-Ing Thomas Metz

Fakultät Verfahrenstechnik

Technische Hochschule Nürnberg

1	MOTIVATION	3
2	ZIELE UND HERANGEHENSWEISE	4
2.1	ZIELE.....	4
2.2	HERANGEHENSWEISE.....	4
3	ERGEBNISSE	5
3.1	THEORETISCHE ERGEBNISSE	5
3.1.1	<i>Wärmeübertragerauslegung.....</i>	5
3.1.2	<i>CFD-Simulation.....</i>	8
3.1.3	<i>Anlagenfließbild</i>	10
3.2	EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE	11
3.2.1	<i>Messreihe 1 – Variation der Feuerungswärmeleistung.....</i>	11
3.2.2	<i>Messreihe 2 – Variation der Kühlwasser-Rücklauftemperatur.....</i>	14
3.2.3	<i>Vergleich der Messdaten mit theoretischem Rechenmodell.....</i>	16
4	WIRTSCHAFTLICHKEIT	18
5	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	18
6	LITERATUR	20

1 Motivation

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. Die Nachteile der Wärmenetze liegen in den Leitungsverlusten und den 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 Wirkungsgrads 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 mehr. Dies ist für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser stark überdimensioniert. Der jährliche Durchschnittsverbrauch eines Vierpersonenhaushaltes 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. Das liegt sowohl an den hohen Anschaffungskosten, als auch an den zum Teil hohen Betriebs-/Instandhaltungskosten und führt 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.

Daher sollte, um die BHKW-Technologie für Einfamilienhäuser nutzbar machen zu können, eine Alternative zur Brennstoffzelle gesucht und entwickelt werden. Die Alternative sollte vom Brennstoff unabhängig und möglichst ohne Förderung wirtschaftlich konkurrenzfähig sein.

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.

2 Ziele und Herangehensweise

2.1 Ziele

Das Projektziel ist die Vorentwicklung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) für die Anwendung im Einfamilienhaus. Das Grundprinzip zeigt Abbildung 1. Anstatt das 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 elektrische Leistung umgewandelt.

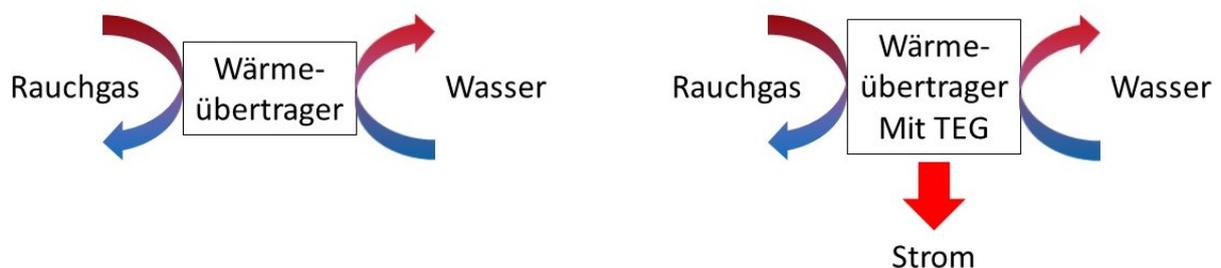


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Wärmeübertragers in einer normalen Heizung (links) und einer Heizung mit TEG (rechts)

Als konkrete Ziele sind zu nennen:

- Bestimmung der tatsächlich erzielbaren elektrischen Leistung und des Gesamtwirkungsgrads
- Entwicklung des konstruktiven Konzepts eines Nano-BHKWs mit TEG
- Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems
- Bestimmung der bestehenden Hürden bis zur Markteinführung eines solchen Systems
- Wissenstransfer zwischen Forschung, Lehre und Industrie

Hierzu wurde ein Teststand errichtet und in Betrieb genommen. Der Teststand dient der Überprüfung der theoretischen Modelle und ermöglicht verifizierte Aussagen über die Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit eines Nano-BHKW mit TEG.

2.2 Herangehensweise

Im Vorfeld des Projekts 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“ [4] durchgeführt. Die Verfeinerung und Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt im Rahmen des

vorliegenden Projektes – gefördert durch die STAEDLER Stiftung – und eines weiteren Drittmittelprojektes. Das Projekt wird durch Projektkurse und weitere Abschlussarbeiten begleitet.

3 Ergebnisse

3.1 Theoretische Ergebnisse

3.1.1 Wärmeübertragerauslegung

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“ [4] 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. Diesem Modell nach können bei einer Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ ca. $230 \text{ W}_{\text{el}}$ elektrisch generiert werden.

Tabelle 1: Theoretische Wirkungsgrade der Versuchsanlage

Wirkungsgrade η :	
$\eta_{\text{elektrisch}}$	2,55 %
$\eta_{\text{thermisch}}$	98,25 %
$\eta_{\text{gesamt,Hi}}$	100,80 %

Steigerungspotential besteht bei den TEG, die sich aktuell 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 $1,0 \text{ m} \times 0,35 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ [4]. Dies zeigt eine vergleichsweise kompakte Bauform, was für den Einsatz in Heizungskellern durchaus attraktiv ist. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde auf der 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.

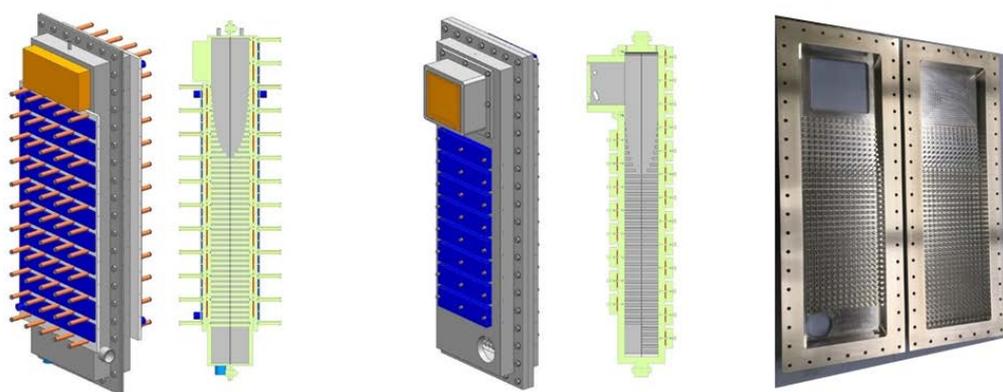


Abbildung 2: Entwurf und Schnittdarstellung des Wärmeübertragers der Bachelorarbeit (links) [4], Modell des gebauten Wärmeübertragers (mitte) und Innenansicht des realen Wärmeübertragers (rechts)

Üblicherweise werden Wärmeübertrager für Brennwertthermen aus einem Aluminium-Silicium-Sandguss gefertigt. Aus Kostengründen wurde der vorliegende Wärmeübertrager als Sonderanfertigung dagegen aus Vollmaterial gefräst. Dies beeinflusste sowohl die Werkstoffwahl als auch einige konstruktive Details. Des Weiteren wurden für die Peripherie der Anlage (Brenner, Steuerung, Pumpe, etc.) Komponenten eines kommerziellen Gasbrennwertgeräts beschafft. Auch die TEG sind kommerziell verfügbare Elemente. Die Schnittstellen des Wärmeübertragers wurden dementsprechend an die Gegebenheiten der angrenzenden Komponenten (Brenner, Abgasrohr, Kondensatablauf, TEG) angepasst.

Dem Modell nach wird die Dauertemperatur des Wärmetauschers bis zu 250 °C betragen. Diese liegt deutlich über den gewöhnlichen Temperaturen für Wärmeübertrager 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 (von ThyssenKrupp zu Verfügung gestellt)

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 Wärmeübertragerwand 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, BiTe-basierten TEG 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. 9,6 W_{el} 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 Kühloberfläche 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.

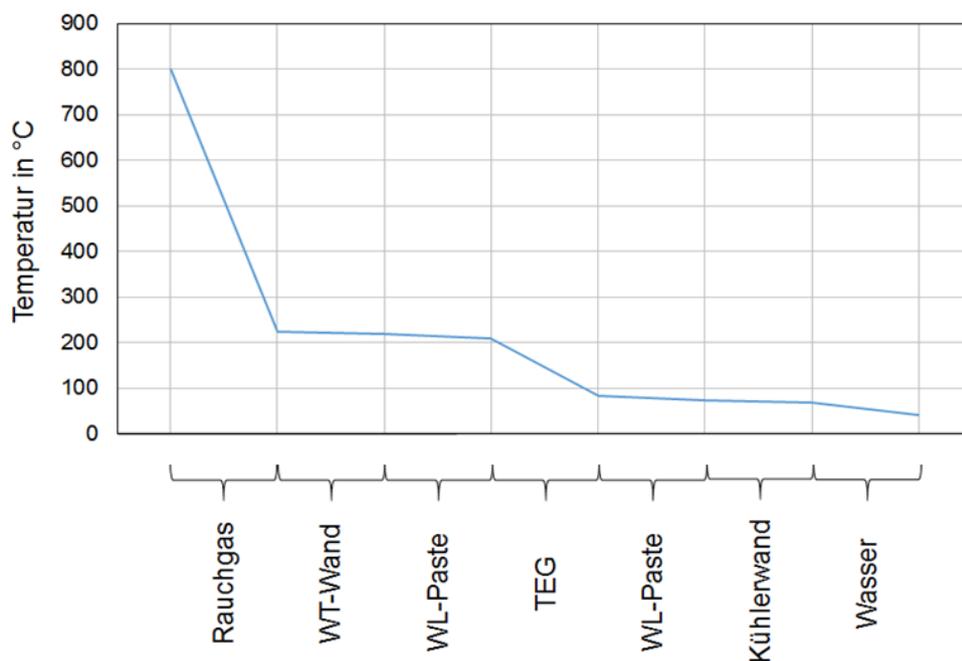


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wärmedurchgangs nach der Modellrechnung (1-dimensional) zwischen Rauchgas und Wasser

Aus der ermittelten Temperaturdifferenz über die TEG lässt sich die elektrisch erzeugte Leistung an jeder Stelle im Apparat ermitteln. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4. Zu sehen ist die erzeugte elektrische Leistungsdichte in Zusammenhang mit der Rauchgasabkühlung über der Fläche des Wärmeübertragers. 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 die Temperaturdifferenz und elektrische Leistung nicht linear voneinander abhängen, wird ab ca. $0,25 \text{ m}^2$ praktisch 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.

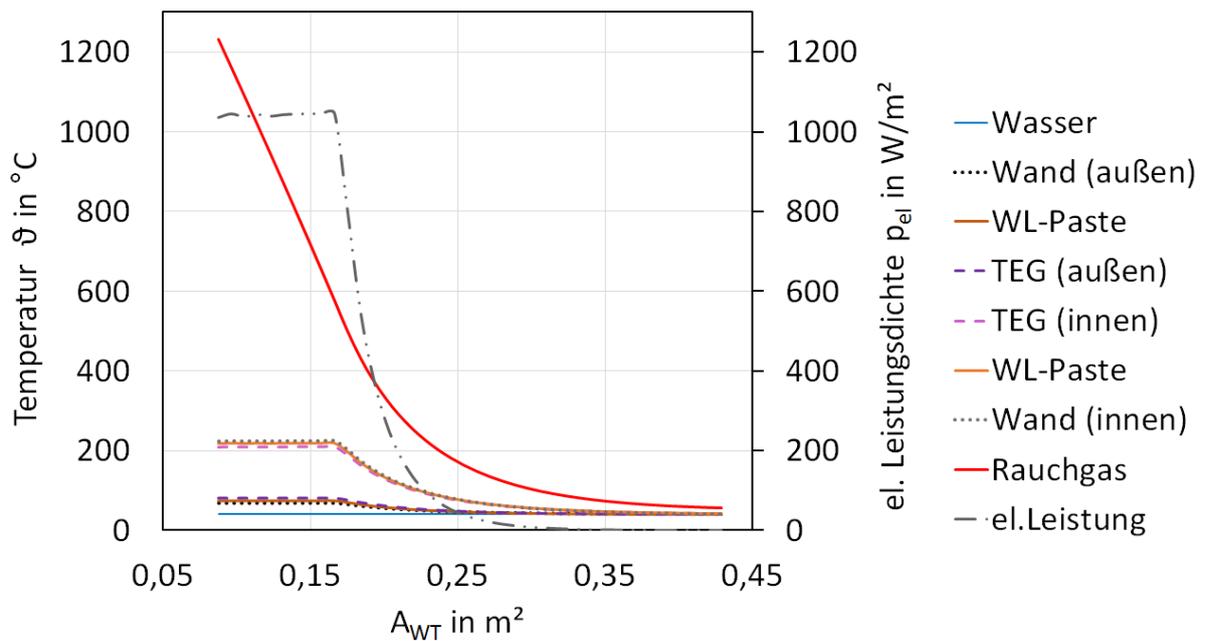


Abbildung 4: Temperaturverlauf zwischen Rauchgas und Wasser sowie generierte elektrische Leistungsdichte aufgetragen über die Fläche des Rauchgaspfades im Konvektionsteil des Wärmeübertragers

3.1.2 CFD-Simulation

Im Rahmen der Bachelorarbeit "Numerische Simulation der Rauchgasströmung und der Wärmeleitung in einem gasbefeuerten Wärmeübertrager" [6] wurde eine CFD-Simulation der vorliegenden Wärmeübertragergeometrie durchgeführt, um eine Übersicht über die Temperaturverteilung und die Strömungsgeschwindigkeiten des Rauchgases im Inneren des Wärmeübertragers zu erhalten und die Auslegung zu überprüfen.

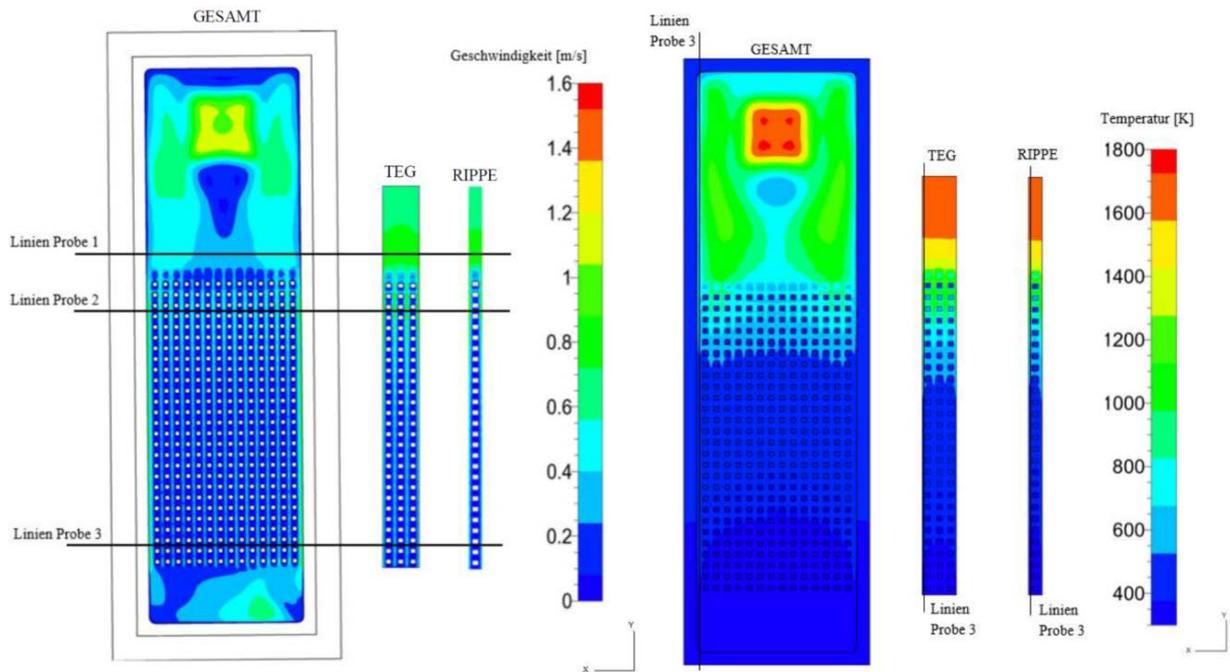


Abbildung 5: 2D-Schnittansicht der Geschwindigkeit in z-Normalenrichtung an der Symmetriewand (links), 2D-Schnittansicht der Temperatur in z-Normalenrichtung an der Symmetriewand (rechts) [6]

Aus der Simulation tritt zum einen deutlich der Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und hohen Temperaturen in Folge guter Wärmeübertragung durch Konvektion hervor, zum anderen werden die großen Temperaturunterschiede innerhalb des Wärmeübertragers deutlich.

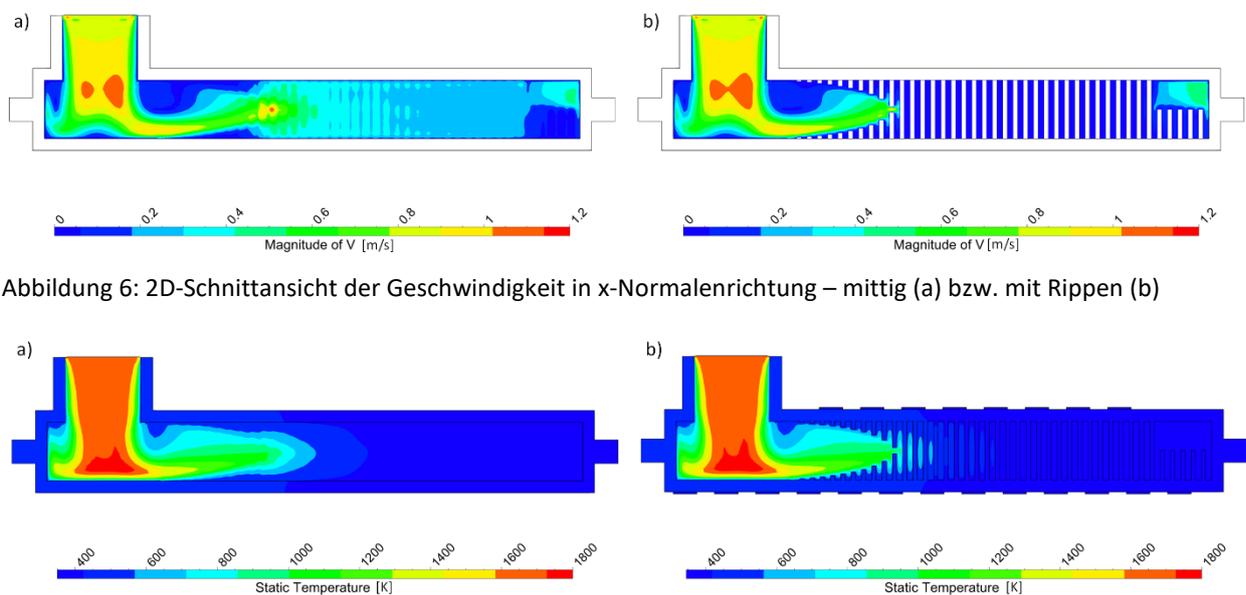


Abbildung 6: 2D-Schnittansicht der Geschwindigkeit in x-Normalenrichtung – mittig (a) bzw. mit Rippen (b)

Abbildung 7: 2D-Schnittansicht der Temperatur in x-Normalenrichtung – mittig (a) bzw. mit Rippen (b)

Abbildung 6 und Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass insbesondere die TEG und Kühlerreihen in Brennernähe mit hohen Temperaturen beaufschlagt werden können. Diese Aussagen stimmen mit der Wärmeübertragerauslegung überein.

3.1.3 Anlagenfließbild

In Abbildung 8 ist ein Fließbild der Versuchsanlage dargestellt, welche im Rahmen des vorliegenden Projektes aufgebaut wurde. 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. Abbildung 9 zeigt ein Foto der Testanlage.

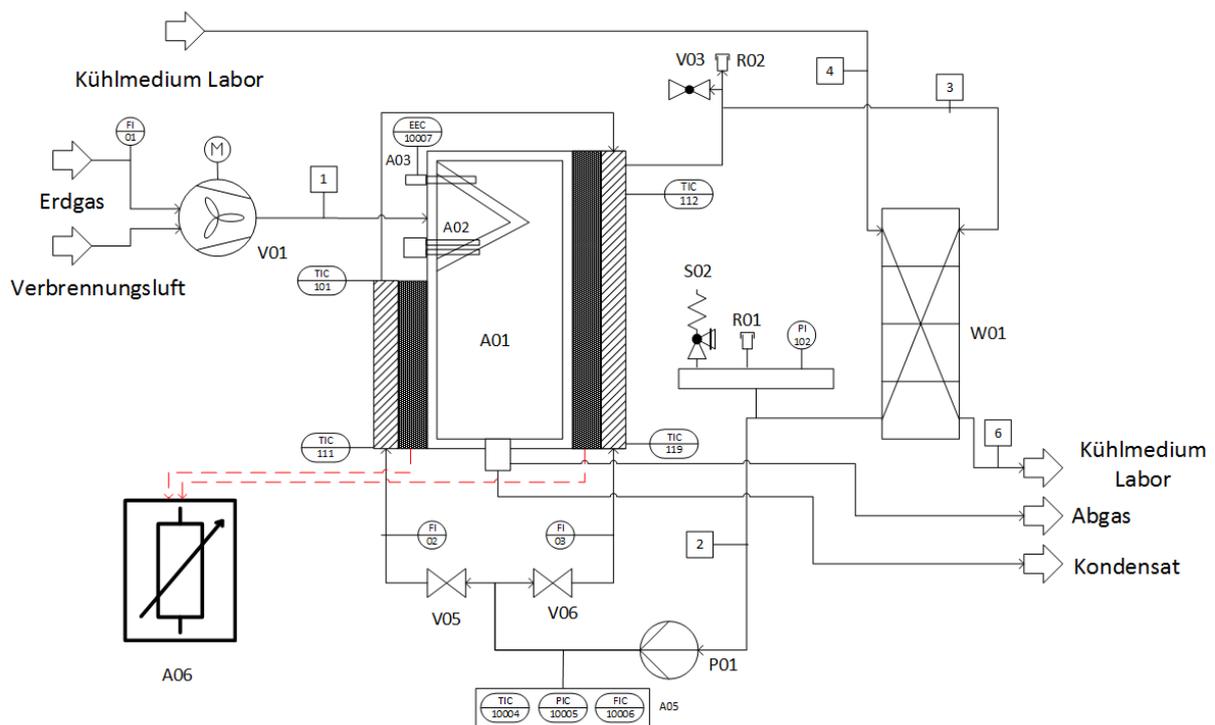


Abbildung 8: vereinfachtes Fließbild der Anlage

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 9: Kühler mit Thermoelementen und Verkabelung der TEG (links), elektronische Lasten mit darüber liegendem Wärmeübertrager (Mitte), Brenner mit Gebläse (rechts)

3.2 Experimentelle Ergebnisse

3.2.1 Messreihe 1 – Variation der Feuerungswärmeleistung

Nach der Inbetriebnahme wurde zunächst die Feuerungswärmeleistung (Brenngas Propan, Basis Heizwert H_i) variiert, während die Wassertemperatur bei 12 °C konstant gehalten wurde. In Tabelle 3 und Abbildung 10 sind die entsprechenden Wirkungsgrade der Messreihe dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Variation der Brennerleistung

\dot{Q}_{FWL} in kW _{FWL}	\dot{Q}_{Wasser} in kW	P_{el} in W _{el}	η_{ges} in %	η_{el} in %
4,2	2,09	9,27	50,4	0,2
4,7	3,54	28,07	75,6	0,6
5,5	4,44	51,46	81,2	0,9
7,2	5,39	75,89	75,5	1,0
9,2	6,76	117,36	75,2	1,3

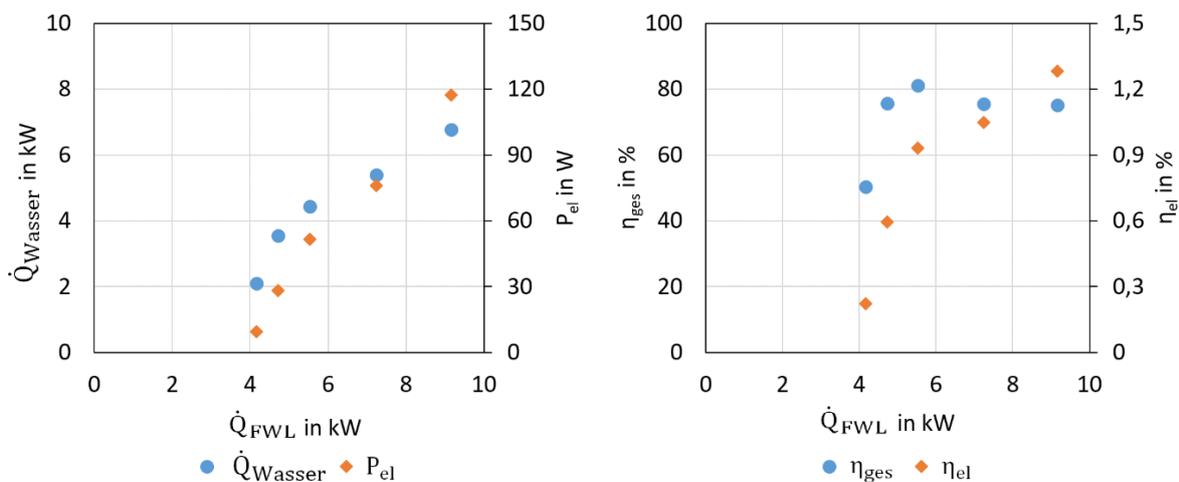


Abbildung 10: An das Wasser übertragener Wärmestrom und erzeugte elektrische Leistung in Abhängigkeit der Feuerungswärmeleistung (links) mit den daraus resultierenden Wirkungsgraden (rechts)

Mit steigender Feuerungswärmeleistung nehmen die elektrische Leistung (P_{el}), der elektrische Wirkungsgrad (η_{el}) und der an das Wasser übertragende Wärmestrom (\dot{Q}_{Wasser}) zu. Der Gesamtwirkungsgrad (η_{ges}) ist dabei nahezu unabhängig von der Feuerungswärmeleistung. Insgesamt decken sich die Verläufe qualitativ mit den Erwartungen. Quantitativ sind jedoch sowohl der Gesamtwirkungsgrad von etwa 80 % als auch der elektrische Wirkungsgrad von etwa 1 % noch deutlich zu gering. Der geringe Gesamtwirkungsgrad resultiert aus der Tatsache, dass bei dieser Versuchskampagne die Anlage noch ohne Isolierung betrieben wurde und entsprechend hohe Wärmeverluste an die Anlagenumgebung vorhanden waren.

Der geringe elektrische Wirkungsgrad dagegen ergibt sich durch die mäßige Temperaturdifferenz über die TEG, s. Abbildung 11. Die Ursache hierfür liegt darin, dass bei dieser Versuchskampagne Bereiche in der Nähe der Flammenzone des Brenners gekühlt wurden, um lokale Materialüberhitzungen zu vermeiden. Dies ist in Abbildung 11 auch am sprunghaften Anstieg der Wassertemperaturen in Brennernähe ($A_{WT} \approx 0 \text{ m}^2$) zu erkennen. Für diese Kühlaufgabe wurden keine TEG verwendet, so dass bei dieser Versuchskampagne ein wesentlicher Teil des Wärmestroms für die Stromerzeugung mittels TEG ungenutzt blieb. Dadurch trat das Rauchgas mit deutlich geringeren Temperaturen in den Wärmeübertrager ein als berechnet. Es ist vorgesehen, in künftigen Versuchskampagnen sowohl den el. Wirkungsgrad als auch den Gesamtwirkungsgrad durch konstruktive Anlagenanpassungen auf die angestrebten Designwerte, s. Tabelle 1, anzuheben.

Abbildung 11 zeigt die Wandtemperaturen auf der heißen Seite der TEG, die Wassertemperaturen auf der kalten Seite der TEG, sowie die erzeugte elektrische Leistungsdichte – aufgetragen jeweils über die Wärmeübertragerfläche von oben nach unten (im Diagramm von links nach rechts). Die Fläche beschreibt gleichermaßen die Länge des Wärmeübertragers (950 mm), da die Breite (250 mm) konstant ist.

Es ist erkennbar, dass die Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertragerwand und Wasserkreislauf mit steigender Feuerungsleistung (\dot{Q}_{FWL}) wächst. Da die generierte elektrische Leistung direkt von der Temperaturdifferenz über die TEG abhängig ist, nimmt damit auch die elektrische Leistung zu.

Der Verlauf der Temperaturen wie auch der elektrischen Leistung korreliert vor allem mit der Abnahme der Rauchgastemperatur und dem rauchgasseitigen Wärmübergangskoeffizienten (beides nicht gemessen bzw. dargestellt) sowie der Rippengeometrie. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich ist, wurden gegenüber dem Brenner keine Rippen vorgesehen, da hier aufgrund von Flammenstrahlung eine ausreichend hohe Wärmestromdichte erwartet wird. Der Brenner befindet sich im Bereich $0 - 0,05 \text{ m}^2$. Die Wandtemperaturen nehmen in diesem Bereich von oben nach unten (in Abbildung 11 von links nach rechts) aufgrund der Rauchgasabkühlung kontinuierlich ab. Im Bereich $0,05 - 0,18 \text{ m}^2$ nimmt die Wandtemperatur aufgrund zunehmender Rippenlänge trotz weiterhin abnehmender Rauchgastemperatur nur geringfügig ab. Im anschließenden Bereich ab $0,18 \text{ m}^2$ haben die Rippen ihre

maximale Länge erreicht, so dass der Rauchgasquerschnitt vollständig mit Rippen durchsetzt ist. Dadurch nehmen die Wandtemperaturen sowie die erzeugte elektrische Leistung durch die fortschreitende Rauchgasabkühlung kontinuierlich ab.

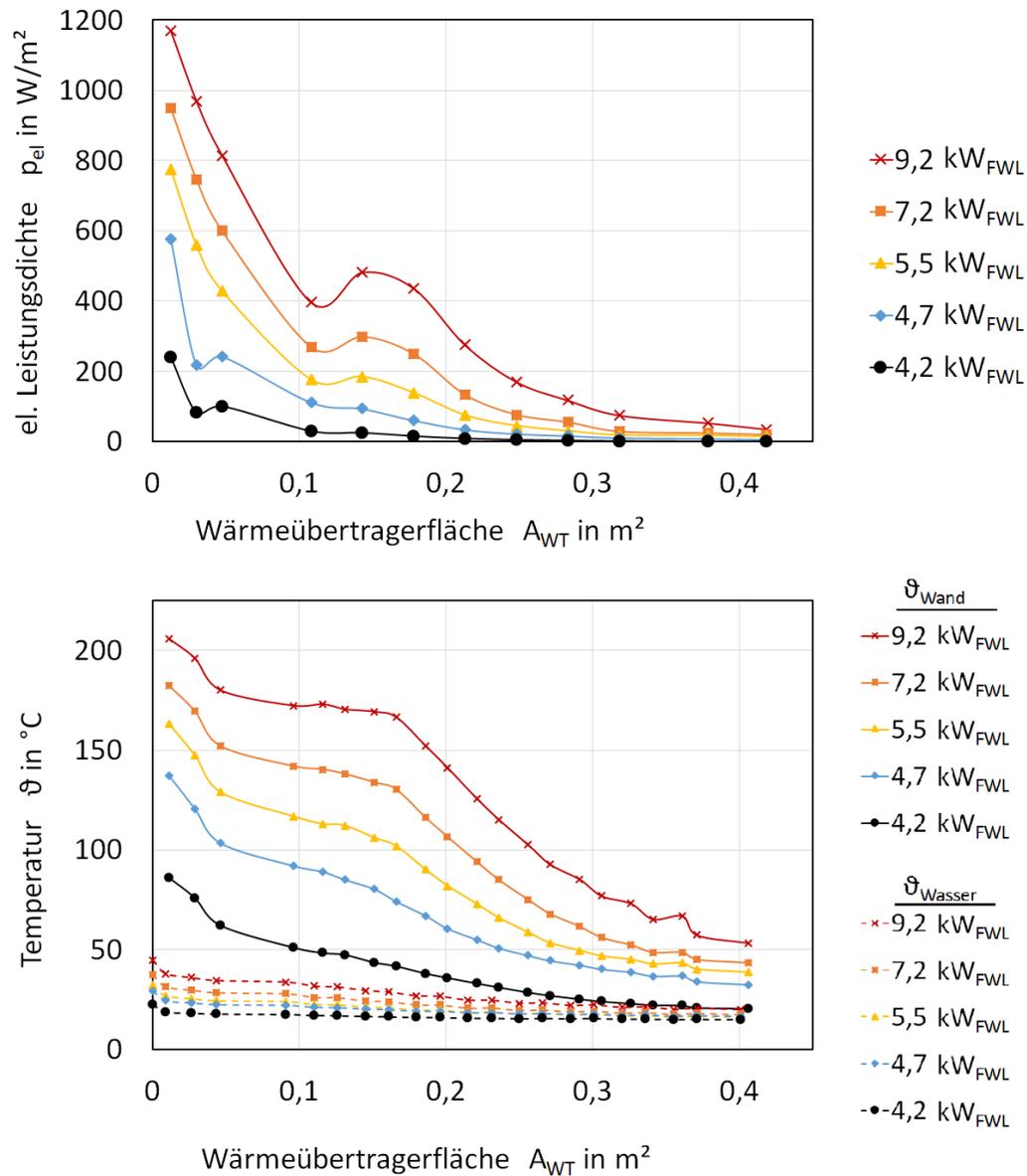


Abbildung 11: Erzeugte elektrische Leistungsdichte (oben), Wandtemperaturen auf der heißen Seite der TEG und Wassertemperaturen auf der kalten Seite der TEG (unten) – aufgetragen über die Wärmeübertragerfläche

Zu erkennen ist hierbei, dass die elektrische Leistung stärker abnimmt als die Wandtemperatur. Dies liegt am Zusammenhang zwischen treibender Temperaturdifferenz und erzeugter elektrischer Leistung der TEG, welcher in Abbildung 12 dargestellt ist. Zu beachten ist hierbei, dass nicht die tatsächlich am TEG anliegende Temperaturdifferenz (messtechnisch schwer erfassbar), sondern die Differenz zwischen Wandtemperatur des Aluminiumwärmeübertragers auf der heißen Seite der TEG und der Wassertemperatur in den Aluminiumkühlern auf der kalten Seite der TEG dargestellt ist (vgl. hierzu Abbildung 3). Es ist deutlich der aus der Thermoelektrik-Theorie bekannte quadratische Zusammenhang zwischen elektrischer Leistung und Temperaturdifferenz erkennbar.

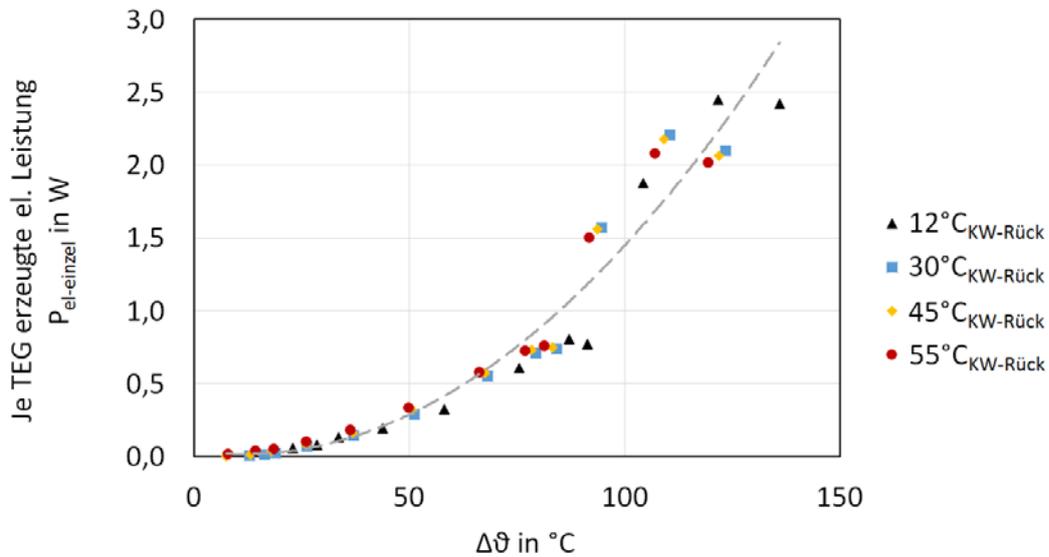


Abbildung 12: Erzeugte elektrische Leistung je TEG aufgetragen über die jeweilige Temperaturdifferenz bei Variation der Kühlwassertemperatur

3.2.2 Messreihe 2 – Variation der Kühlwasser-Rücklauf Temperatur

In einer zweiten Messreihe wurde die Kühlwasser-Rücklauf Temperatur – welche quasi die Rücklauf Temperatur des Heizkreislaufes in einem Wohngebäude simuliert - zwischen 12 °C und 55 °C variiert, während die Feuerungswärmeleistung nun bei ca. 5,6 kW_{FWL} konstant gehalten wurde, s. Tabelle 4.

Tabelle 4: Ergebnisse bei Variation der Kühlwassertemperatur

θ _{Kühlwasser} in °C	Q̇ _{FWL} in kW _{FWL}	Q̇ _{Wasser} in kW	P _{el} in W	η _{ges} in %	η _{el} in %
12	5,53	4,44	51,46	81,20	0,93
30	5,9	4,45	44,03	76,10	0,75
45	5,41	4,67	44,75	87,10	0,83
55	5,68	4,87	44,52	86,40	0,78

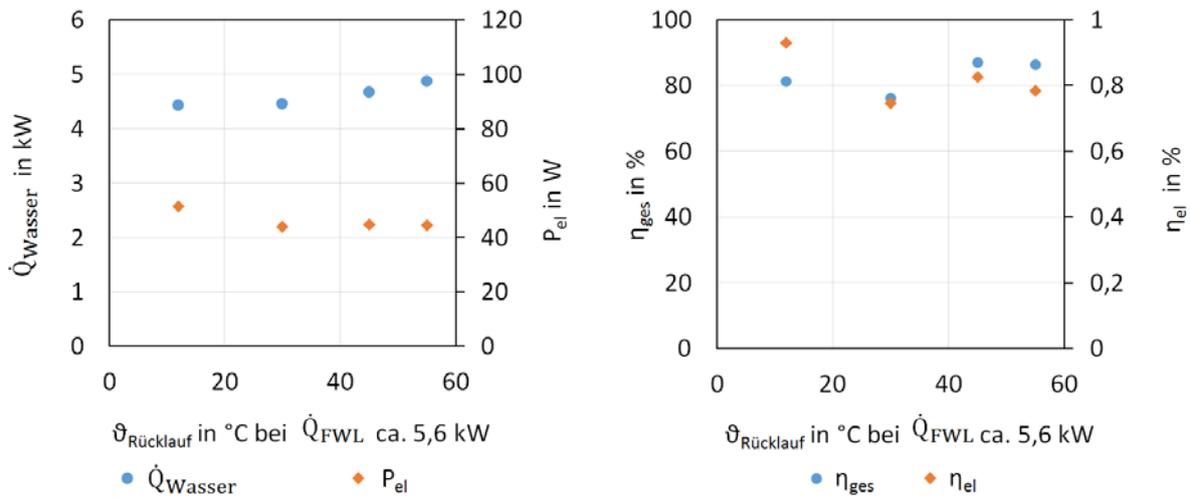


Abbildung 13: Vom Kühlwasser aufgenommener Wärmestrom (links), elektrischer Wirkungsgrad und Gesamtwirkungsgrad (rechts) – jeweils in Abhängigkeit der Kühlwasser-Rücklauftemperatur

Sowohl die elektrische Leistung, als auch der vom Wasser aufgenommene Wärmestrom, sowie die entsprechenden Wirkungsgrade zeigen eine nur schwache Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur des Kühlwassers. Ursachen für die Streuung der Messergebnisse liegen vor allem in einer leichten Streuung der tatsächlichen Feuerungswärmeleistung und des Pumpenvolumenstromes, sowie zunehmenden Schwankungen der Kühlwasserrücklauftemperatur aufgrund der im Versuch eingesetzten Regelungstechnik. Abbildung 14 zeigt dazu analog zu Abbildung 11 die generierte elektrische Leistungsdichte und den Temperaturverlauf aufgetragen über die Wärmeübertragerfläche. Qualitativ stimmen die Verläufe der beiden Abbildungen miteinander überein. Auffallend ist jedoch in Abbildung 14, dass die elektrische Leistungsdichte nahezu unabhängig von der Kühlwasserrücklauftemperatur ist. Dies lässt sich dadurch begründen, dass eine Änderung der Kühlwassertemperatur in nahezu gleichem Maße auch eine Änderung der Wandtemperatur auf der heißen TEG-Seite zur Folge hat und sich die treibende Temperaturdifferenz am TEG dadurch kaum ändert. Daraus könnte der Schluss gezogen werden, dass die Heizungsrücklauftemperatur im für ein Heizsystem relevanten Temperaturbereich, keinen signifikanten Einfluss auf die Leistung des Systems hat. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass dies nur gilt, solange die maximal zulässige TEG-Temperatur auf der heißen Seite noch nicht erreicht ist. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist es jedoch erforderlich die TEG in der Nähe der Maximaltemperatur zu betreiben, weshalb dann auch ein Einfluss der Rücklauftemperatur auf die elektrische Leistung zu erwarten ist.

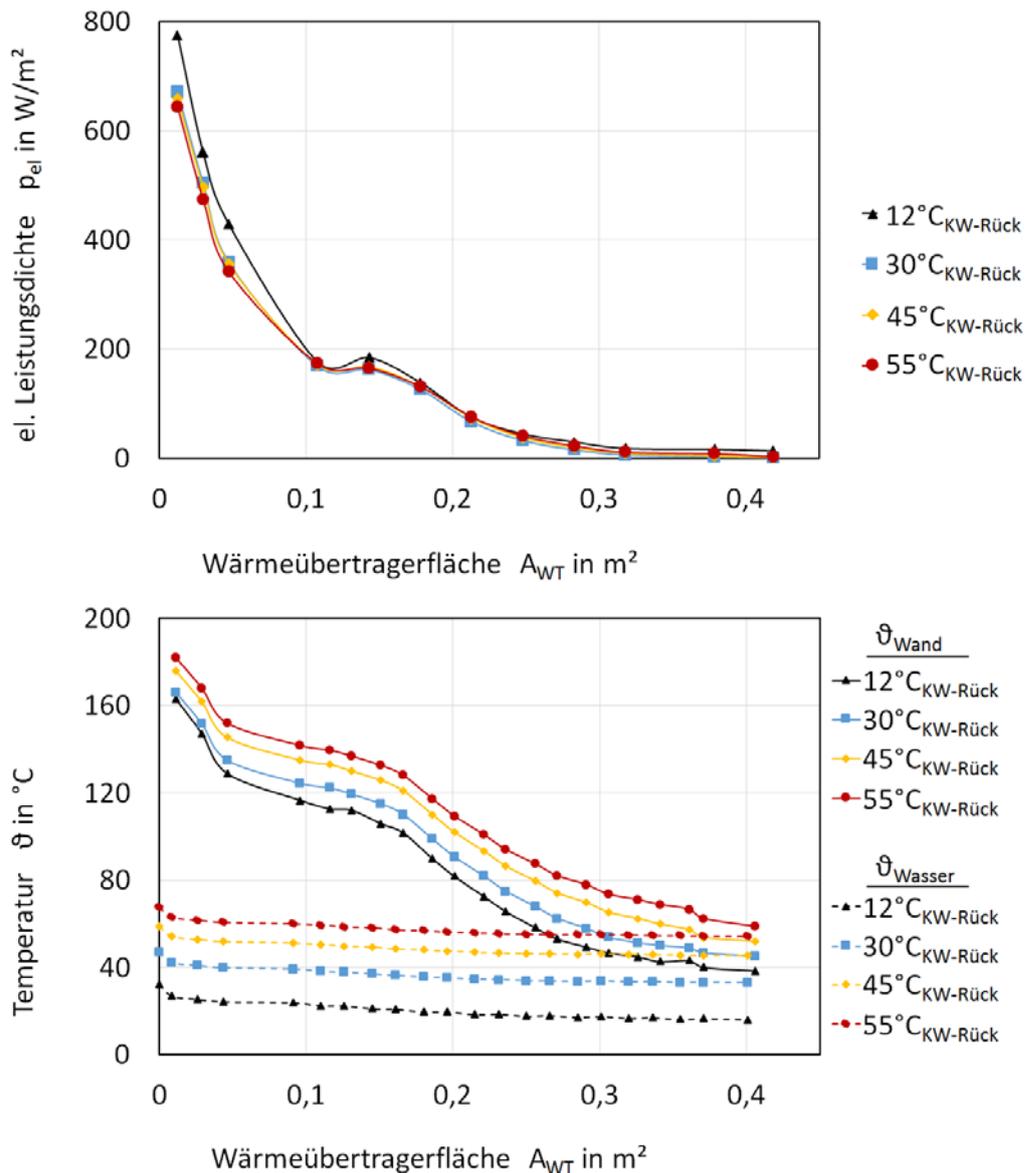


Abbildung 14: Darstellung der el. Leistungsdichte und des Temperaturverlaufs über die Wärmeübertragerfläche von oben nach unten bei Variation der Kühlwassertemperatur

3.2.3 Vergleich der Messdaten mit theoretischem Rechenmodell

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“ [4] wurde auf theoretischer Grundlage [7] ein Rechenmodell erstellt, mit welchem die Auslegung der Versuchsanlage erfolgte. Abbildung 15 zeigt nun einen Vergleich der Messdaten mit dem theoretischen Rechenmodell. Man erkennt im Bereich niedriger Temperaturen ab ca. $0,2 m^2$ eine gute Übereinstimmung, im oberen Bereich des Wärmeübertragers hingegen (im Diagramm links), weichen die gemessenen Wandtemperaturen auf der heißen Seite der TEG um bis zu 80 K vom Modell ab. Dies ist einerseits auf die bereits oben erwähnte Brennerkühlung zurückzuführen, andererseits lässt der Temperaturverlauf auf eine gewisse Abweichung zwischen berechnetem und realem konvektivem Wärmeübergangskoeffizienten auf der Rauchgasseite schließen. Insgesamt wurden bei ca. $5,6 kW_{FWL}$ Feuerungswärmeleistung lediglich 50

W_{el} elektrische Leistung statt der in [4] berechneten 230 W_{el} erzielt. Für diese große Diskrepanz sind im Wesentlichen drei Ursachen zu nennen:

- 1) Die treibende Temperaturdifferenz ist im Versuch deutlich geringer als in der Berechnung. Ursache hierfür sind hauptsächlich die oben erwähnte Brennerkühlung und zum Teil die Abweichungen bzgl. des rauchgasseitigen Wärmeübergangskoeffizienten.
- 2) Die in der Versuchsanlage verbauten TEG unterscheiden sich von den in der Berechnung [4] verwendeten TEG.
- 3) Die im Modell angenommene maximale Leistung auf Basis von TEG-Lieferantenangaben konnte durch separate eigene Einzelmessungen bisher noch nicht bestätigt werden. Hierzu wird auf die Bachelorarbeit [7] verwiesen: S. Sokoliuk, "Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Teststandes zur Durchführung von Messungen an thermoelektrischen Generatoren".

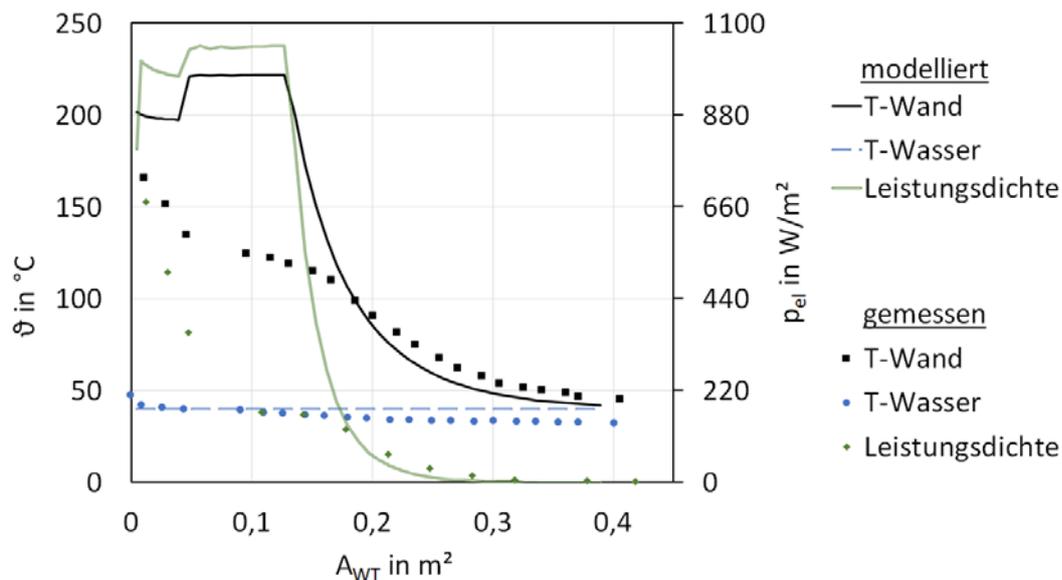


Abbildung 15: Vergleich der gemessenen Ergebnisse (5,6 kW_{FWL} , 30 $^{\circ}\text{C}$ Kühlwassertemperatur) mit dem Berechnungsmodell

Alle genannten Unterschiede sind Gegenstand weiterer Untersuchungen im Rahmen von Folgeprojekten.

4 Wirtschaftlichkeit

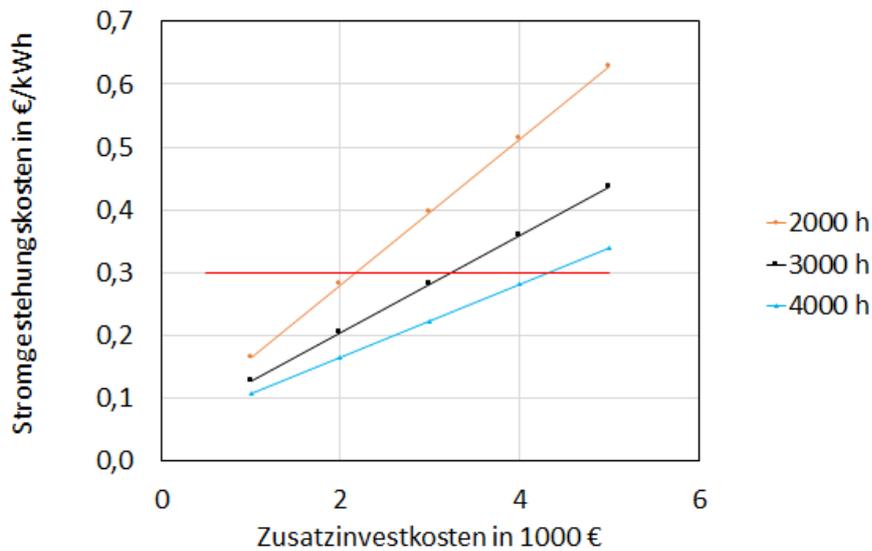


Abbildung 16: Stromgestehungskosten des Nano-BHKWs

Abbildung 16 zeigt eine Sensibilitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit sind die Jahres-Betriebsstunden und die Zusatzinvestitionskosten einer Brennwerttherme mit TEG-Technik gegenüber einer herkömmlichen Brennwerttherme ohne TEG-Technik. Liegen die Stromgestehungskosten unterhalb der üblichen 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 € Zusatzinvestkosten verursachen. Nach aktuellem Kenntnisstand kann dieses Ziel erreicht werden.

5 Zusammenfassung und Fazit

Der vorliegende Bericht zeigt die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Energy Harvesting im Wohngebäude – Vorentwicklung eines Nano-BHKWs“ mit einer Laufzeit von 1,5 Jahren. Fokus dieser Untersuchungen war es, grundlegende Zusammenhänge und Konzepte für den Einsatz von TEG in Nano-BHKW zu erarbeiten. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die Idee, in Nano-BHKWs mit TEG elektrischen Strom zu erzeugen, technisch grundsätzlich funktioniert und eine interessante Technik für die praktische Anwendung darstellt, zugleich jedoch bis hin zu einer Marktreife noch einige Hürden und Unwägbarkeiten zu überwinden sind.

Die dargestellten Messergebnisse sind die ersten, welche nach dem Aufbau und der Inbetriebnahme mit dieser Versuchsanlage erzielt worden sind. Theoretisch sollten bei einer Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ etwa 230 Watt elektrische Leistung erzielbar sein. Mit der Versuchsanlage wurden in einer ersten Messkampagne nach der Inbetriebnahme bei einer Feuerungswärmeleistung von $5,6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$

eine elektrische Leistung von 50 Watt erzeugt, bei 9,2 kW_{FWL} wurden 117 Watt elektrische Leistung erzeugt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen Berechnung und Messung sind:

- eine bisher thermisch nicht isolierte Versuchsanlage
- eine intensiv wassergekühlte Brennerbefestigung
- ein etwas geringerer rauchgasseitiger Wärmeübergangskoeffizient im Versuch gegenüber der Berechnung
- Unterschiede zwischen den eingesetzten TEG in der Versuchsanlage gegenüber den in der Berechnung angenommenen TEG
- Unterschiede zwischen Herstellerangaben und eigener Vermessung einzelner TEG

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit hat ergeben, dass ein wirtschaftlicher Betrieb eines Nano-BHKWs mit TEG-Technik gegeben ist, wenn die Zusatzinvestitionskosten für die TEG-Technik bei einem 6-kW-Heizgerät etwa 2000 € bis 4000 € - abhängig von der jährlichen Volllastbetriebsstundenzahl – nicht übersteigen. Aus heutiger Sicht erscheint dies als erreichbar, was jedoch durch weiterführende Betrachtungen zu prüfen ist.

Themen für die weitere Entwicklung dieser Technik werden u.a. sein:

- Auswahl und Entwicklung von TEG
- Thermische Kontaktierung von TEG und Wärmeübertrager
- Entwicklung von Berechnungsmodellen und Wärmeübertragern
- Entwicklung des Gesamtsystems

Um einen relevanten Beitrag zum Klimaschutz (CO₂-Emissionsminderung) zu leisten, ist es erforderlich, effiziente Nano-BHKW in großer Stückzahl zu etablieren, was bisher an mangelnder Wirtschaftlichkeit gescheitert ist. TEG haben das Potential, hierbei eine Schlüsseltechnik darzustellen, worauf auch die vorliegenden Untersuchungen hindeuten. TEG arbeiten geräuschlos, ohne bewegliche Teile und sind wartungsfrei. Sie sind unabhängig vom eingesetzten Brennstoff und können somit für gas-, öl- oder biomassebefeuerte Heizgeräte eingesetzt werden. Anvisiertes Ziel ist es, im Rahmen weiterer Forschungsprojekte die aufgezeigten Unterschiede von Theorie und Praxis zu minimieren und die Technik mit Industriepartnern bis hin zur Serienreife zu entwickeln.

Das Projekt wurde von der STAEDLER Stiftung gefördert. An dieser Stelle sei dafür besonderer Dank ausgesprochen.

6 Literatur

- [1] W. Suttor, M. Jöhler, 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. Meitzenbach, *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," Technische Hochschule Georg-Simon-Ohm Nürnberg, Nürnberg, 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.
- [6] T. Gazzola, "Numerische Simulation der Rauchgasströmung und der Wärmeleitung in einem gasbefeuelten Wärmeübertrager," Bachelorarbeit, Technische Hochschule Georg-Simon-Ohm Nürnberg, Nürnberg, 2019.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure, *VDI-Wärmeatlas*, 11th ed. Berlin, Heidelberg, 2013.