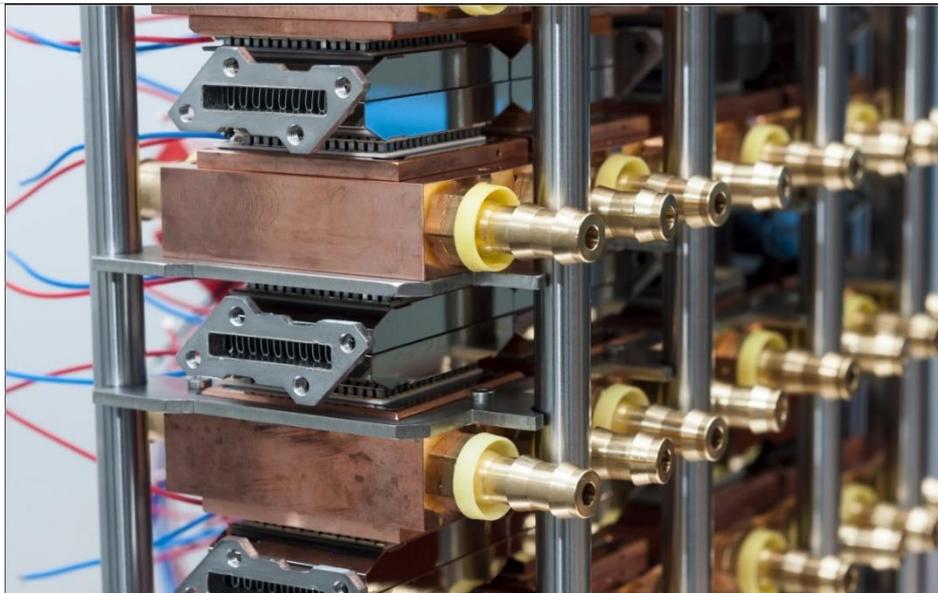


Projekt 2014-07

TeWaB - Wirkungsgradsteigerung eines BHKW mittels thermoelektrischem Wärmetauscher

Abschlussbericht



**David Bach, Uwe Vetter, Jan König,
Olaf Schäfer-Welsen**

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik
IPM in Freiburg

Daniel Schlegel

BadenovaWÄRMEPLUS in Freiburg

Projektnummer: 2014-07

08.06.2020

Abschlussbericht

TeWaB – Wirkungsgradsteigerung eines BHKW mittels thermoelektrischem Wärmetauscher

PROJEKT 2014-07

Bewilligungszeitraum und Berichtszeitraum: 01.05.2014 - 31.12.2019

Projektkoordinator:

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
Thermische Energiewandler (TE)
Heidenhofstr. 8
79110 Freiburg

Ansprechpartner:

Dr. Jan D. König
Tel. 0761/8857-329
Fax 0761/8857-224
E-Mail: jan.koenig@ipm.fraunhofer.de

Dr. David Bach
Tel. 0761/8857-213
Fax 0761/8857-224
E-Mail: david.bach@ipm.fraunhofer.de

Freiburg, den 08.06.2020



Dr. J. König



Dr. D. Bach

Inhalt

1	Projektüberblick	6
1.1	Ausgangslage	6
1.2	Wissenschaftliche und technische Ziele	7
1.3	Herausforderungen/Chancen und Risiken des Vorhabens	8
2	Projektbeschreibung	10
2.1	Projekttablauf	10
2.1.1	Projektidee	10
2.1.2	Terminplan	10
2.2	Projektplanung	10
2.2.1	Ausführungsplanung	10
2.2.2	Übersicht Meilensteine und Projektziele nach Arbeitspaketen	13
2.3	Projektdurchführung	14
2.3.1	Auslegung und Entwicklung des thermoelektrischen Generators	14
2.3.2	Fertigung und Bau des thermoelektrischen Generators (TEG)	16
2.3.3	Erprobung TEG auf dem Heißluftprüfstand	18
2.3.4	Konzept zur Integration des TEG in den Abgasstrang des BHKW	22
2.4	Tests am 50 kW _e BHKW (badenovaWÄRMEPLUS)	22
2.4.1	Integration und Inbetriebnahme des thermoelektrischen Generators am BHKW	22
2.4.2	Ergebnisse Tests am BHKW	24
2.4.3	Aufgetretene Störungen	29
3	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit/Ökologischer Nutzen	29
4	Übertragbarkeit der Projektergebnisse	30
5	Öffentlichkeitsarbeit	31
6	Zusammenfassung/Fazit	32
7	Anlage: Projekterkenntnisse	34

1 Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

Blockheizkraftwerke (BHKW) leisten einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Energieeffizienz auf Seiten der Erzeuger und stellen im Kontext der Energie- bzw. Wärmewende eine wichtige Technologie dar. Durch die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung - KWK) kann gegenüber der getrennten Erzeugung ein größerer Teil der eingesetzten Primärenergie in Nutzenergie umgewandelt werden. Darüber hinaus entlasten dezentrale BHKW das Stromnetz und gleichen die teils fluktuierende Stromerzeugung erneuerbarer Energien aus. Dabei ist für den wirtschaftlichen Betrieb eines BHKW neben der Gesamteffizienz insbesondere die elektrische Effizienz entscheidend, da Strom im Vergleich zu Wärme vielseitiger genutzt werden kann.

Die Thermoelektrik stellt im Zusammenhang mit der KWK eine Technologie mit großem Potential dar. Mit Hilfe thermoelektrischer Generatoren (TEG) kann Wärme/Abwärme direkt in elektrische Energie gewandelt werden. Somit kann z.B. in Kombination mit einem Gasmotor-BHKW durch anteilige Verstromung der im Abgasstrom enthaltenen Wärme eine Steigerung der elektrischen Leistung realisiert werden. Die TEG bestehen aus Wärmeübertragern für heiße und kalte Medien sowie dazwischen eingebauten thermoelektrischen Modulen (TEM). Diese basieren auf Halbleitermaterialien, die Wärmeströme zwischen einer warmen und einer kalten Seite in elektrische Ströme umwandeln können (Abbildung 1). Trotz vergleichsweise geringer Wirkungsgrade der TEM, bieten TEG Vorteile gegenüber anderen Verstromungstechnologien: Sie sind passive Bauelemente, die nahezu wartungsfrei sind und aufgrund ihrer Kompaktheit in bestehende Systeme integriert werden können. Seit mehreren Jahrzehnten nutzt die Raumfahrttechnik TEM bei Raumsonden (z.B. der Voyager 1 und 2) zur Stromerzeugung in sogenannten RTG (radioisotope thermoelectric generator), in denen sie seit Jahrzehnten fehler- und wartungsfrei funktionieren.

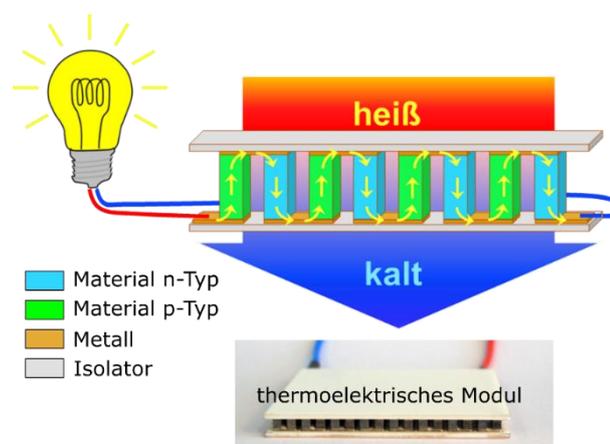


Abbildung 1: Abwärme verstromen durch Thermoelektrik. Thermoelektrische Module nutzen die Eigenschaften spezieller Materialien (sog. Thermoelektrika), um einen Wärmestrom zwischen einer warmen und kalten Seite direkt in elektrischen Strom umzuwandeln.

Das Anwendungsspektrum der Thermoelektrik in der Abwärmeverstromung ist breit. Es reicht von der Energierückgewinnung im PKW/NKW Abgasstrang über den Kraftwerksbereich bis hin zu Industrieprozessen oder der Zentralheizung im Eigenheim. Im Bereich der Automobilindustrie wird dabei beispielsweise eine Treibstoffersparnis und damit verbundene Reduzierung der CO₂-Emission angestrebt.

In diesem Projekt war es das Ziel, erstmals thermoelektrische Module (TE-Module) auf Basis von Hochtemperaturmaterialien in den Abgasstrang eines BHKW zu integrieren und einen Testversuch am BHKW durchzuführen.

Förderprogramme in Deutschland und auf europäischer Ebene trieben zum Zeitpunkt der Antragstellung die Entwicklung kostengünstiger und effizienter thermoelektrischer Materialien, Module und Systeme voran. Im Rahmen eines dieser Projekte hat Fraunhofer IPM gemeinsam mit Partnern als weltweit erstes Konsortium thermoelektrische Hochtemperaturmodule aus Halb-Heusler-Verbindungen mit einem Einsatzbereich bis 550 °C und einer Leistungsdichte von >1 W/cm² in größerer Stückzahl für Prototypensysteme gefertigt.

Während bei den anderen Entwicklungsprojekten insbesondere neuartige, effizientere thermoelektrische Module auf Basis von Hochtemperaturmaterialien für den Einsatz in PKW im Fokus standen, soll hier die gleiche Technologie dazu eingesetzt werden, den Wirkungsgrad von Blockheizkraftwerken hinsichtlich der Ausbeute an elektrischer Energie zu steigern.

Hinweis: Im Folgenden Text werden die Begriffe thermoelektrischer Generator und thermoelektrischer Wärmetauscher synonym verwendet.

1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Ziel dieses Projektes ist die Integration von neuartigen thermoelektrischen Modulen in den Wärmetauscher eines BHKW zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades.

Durch den Einsatz neuartiger Hochtemperatur-TEM auf Basis von Halb-Heusler-Verbindungen in Kombination mit kommerziell verfügbaren TEM mit einem Einsatzbereich bis zu ca. 300 °C kann in einem BHKW je nach Betriebsparametern eine **Steigerung der elektrischen Leistung von bis zu 3 %** bei gleichbleibendem Gesamtwirkungsgrad des BHKW erreicht werden (auf Basis theoretischer Abschätzungen). Ziel ist es eine solche Steigerung mit einem geeigneten Demonstrator-System an einem ausgewählten BHKW zu zeigen.

Der im Projekt zu entwickelnde, innovative thermoelektrische Wärmetauscher soll die Abgaswärme des Blockheizkraftwerkes nicht nur zur Erwärmung des Brauchwassers verwenden, sondern zusätzlich elektrische Energie erzeugen (Abbildung 2). Innerhalb des Projektes soll die Leistungsfähigkeit eines TEG an einem Mini-BHKW der Fa. Schleif Automation (Schleif Automation, GS50E Erdgas) am Standort Landwasser der badenovaWÄRMEPLUS gezeigt werden (Nennleistung 50 kW_{el}, thermische Leistung 80 kW_{th}, Abgaswärmetauscher ca. 31 kW_{th}, Abgasmassenstrom 192 kg/h, Abgastemperatur 620 °C).

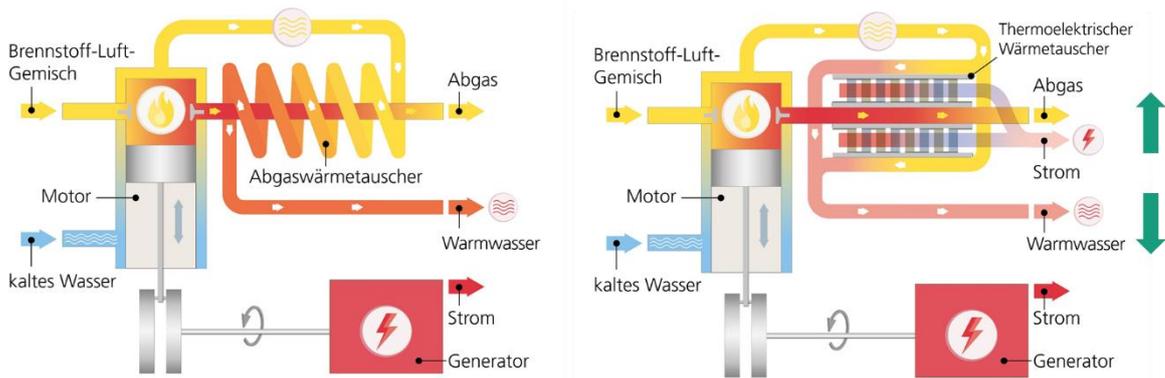


Abbildung 2: Vergleich eines konventionellen Abgaswärmetauschers eines BHKW (links) mit einem thermoelektrischen Wärmetauscher (rechts). Durch die Integration des thermoelektrischen Generators wird ein Teil der Wärme des Abgasstroms in Strom gewandelt, was die elektrische Leistung des BHKW erhöht. Gleichzeitig wird weiter Warmwasser bereitgestellt. (Quelle: Abschlussbericht POWERSTEP <http://powerstep.eu/system/files/generated/files/resource/d3-3-heat2electricity-wwtp.pdf>)

In diesem Projekt soll ein Demonstrator aufgebaut werden, der für einen Teilmassenstrom des BHKW konzipiert ist. Dieser Ansatz wird verfolgt, um den Aufwand bei gleichem Nutzen hinsichtlich der zu erzielenden Aussagen zu minimieren. Dabei ist für den TEG die in Abbildung 3 gezeigte Integration geplant. Die Parallelschaltung zum installierten Wärmetauscher verringert die Systemkomplexität und den Arbeitsaufwand. Im Vordergrund steht, die Auslegung und Entwicklung eines TEG für den Einsatz im Abgasstrang von BHKW zu etablieren und aufzuzeigen, welcher thermoelektrische Umwandlungsgrad im System erreicht werden kann und wie bzw. ob sich das BHKW-System durch den Einbau eines TEG verändert.

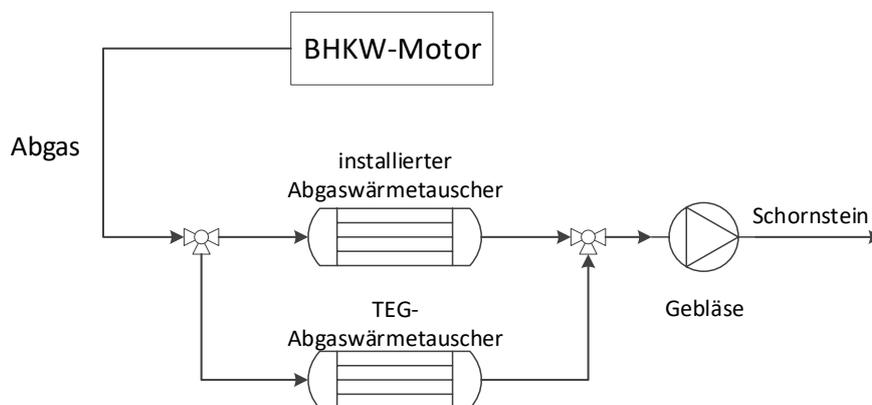


Abbildung 3: Integrationsschema des thermoelektrischen Wärmetauschers in den Abgasstrang des BHKW.

1.3 Herausforderungen/Chancen und Risiken des Vorhabens

Die Entwicklung eines Wärmetauschers mit integrierten thermoelektrischen Modulen für ein BHKW sowie der Bau darauf angepasster, neuartiger thermoelektrischer Module für den Hochtemperatureinsatz stellen hohe Anforderungen an die technischen Randbedingungen sowie an die Wirtschaftlichkeit einer künftigen Fertigung. So besteht großer Entwicklungsbedarf bei der

Konzeptionierung des neuen Wärmetauschers und der Integration der verschiedenen thermoelektrischen Module in das System.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung und Integration eines thermoelektrischen Wärmetauschers in ein BHKW ist die thermisch optimierte Anpassung der thermoelektrischen Module an den Wärmetauscher. Hierbei muss der Wärmetauscher einen **maximalen Wärmeübergangskoeffizienten bei gleichzeitig minimalem Abgasgegendruck** generieren und eine homogene Temperaturverteilung auf der Heißseite der thermoelektrischen Module gewährleisten. Gleichzeitig müssen die thermoelektrischen Module durch Anpassung ihrer Geometrie optimal in den Wärmetauscher integriert werden, um eine maximale elektrische Leistungsausbeute generieren zu können.

Des Weiteren ist die Untersuchung der **Stabilität** des Systems **unter realen Betriebsbedingungen** (Vibrationen, Temperaturzyklen, etc.), sowie die Untersuchung **des Einflusses der Integration** des neuen Wärmetauschers **auf die Funktionsweise des BHKW** eine Kernaufgabe dieses Projektes.

Ein besonderer Kostenpunkt und damit ein Risiko besteht in der Fertigung der neuartigen Hochtemperaturmodule. Da die individuelle Fertigung dieser Module noch **sehr teuer** ist, wäre die Umsetzung dieser Entwicklung ohne eine finanzielle Förderung nicht durchführbar.

Sollte es gelingen, ein hohes Technologie-Readiness-Level (TRL) von thermoelektrischen Modulen zur Abwärmeverstromung in der Anwendung nachzuweisen, so kann durch den Einsatz von thermoelektrischen Modulen das Verhältnis von generiertem Strom zu CO₂-Emissionen verbessert werden. Zudem kann dies den Betrieb von BHKW wirtschaftlicher machen und Verkaufsvorteile solcher BHKW mit TEG für den Hersteller bedeuten.

2 Projektbeschreibung

2.1 Projektablauf

2.1.1 Projektidee

Die Idee dieses Projektes ist die Integration von neuartigen thermoelektrischen Modulen in den Abgaswärmetauscher eines BHKWs zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades. Dieses Ziel sollte durch die Zusammenarbeit von drei Partnern umgesetzt werden:

Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Heidenhofstraße 8, 79110 Freiburg
badenovaWÄRMEPLUS GmbH & Co.KG, Tullastraße 61, 79108 Freiburg
Schleif Automation GmbH & Co.KG, Victoria Boulevard D100, 77836 Rheinmünster

Die Hauptentwicklungsarbeit und Koordination im Vorhaben wurde von Fraunhofer IPM übernommen. Die badenovaWÄRMEPLUS GmbH & Co.KG war als Anlagenbetreiber/Endanwender und die Firma Schleif Automation GmbH & Co.KG als Anlagenhersteller Teil des Konsortiums.

2.1.2 Terminplan

Aufgrund mehrerer Herausforderungen innerhalb des Projektes und besonders durch die Insolvenz der Fa. Schleif während des Projektes ergaben sich mehrere Projektverzögerungen, so dass das Projekt bis Ende Dezember 2019 verlängert werden musste, um die geplanten Arbeiten und Ziele zu erreichen.

2.2 Projektplanung

2.2.1 Ausführungsplanung

Wie bereits beschrieben, liegt die wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung und Integration eines thermoelektrischen Generators in ein BHKW in der thermisch optimierten Auslegung der thermoelektrischen Module und der Heiß- und Kaltseitenwärmeübertrager. Hierbei muss der Heißseitenwärmeübertrager einen maximalen Wärmeübergangskoeffizienten bei gleichzeitig minimalem Abgasgedruck generieren und eine homogene Temperaturverteilung auf die thermoelektrischen Module gewährleisten.

Der ursprüngliche Ausführungsplan konnte vor allem aufgrund der Insolvenz des Projektpartners Schleif nicht eingehalten werden. Alle gemeinsamen Arbeiten bezüglich der TEG Integration in Landwasser wurden dadurch verzögert und die Aufgaben mussten neu verteilt, bzw. neu beauftragt werden. Die offenen Aufgaben wurden durch die badenovaWÄRMEPLUS und das Fraunhofer IPM bearbeitet.

Die Durchführung des Projektes war in sieben Arbeitspakete aufgeteilt. Die Arbeitspakete waren wie folgt strukturiert:

AP0: Projektleitung und Öffentlichkeitsarbeit

AP0.1: Projektleitung

Die Gesamtprojektleitung wurde von Fraunhofer IPM geleistet.

AP0.2: Öffentlichkeitsarbeit

Die Projektergebnisse sind für eine öffentlichkeitswirksame Darstellung in entsprechenden Fachzeitschriften und als Konferenzbeiträge zu nutzen.

AP1: Vorarbeiten

AP1.1: Konzeption für Verwertung des thermoelektrisch erzeugten Stromes

- Analyse zur Verwertung des erzeugten Stromes

Ergebnis: Konzept für Verwertung des elektrischen Stromes erstellt, mögliche Schnittstellen am BHKW können im Vorfeld mit eingeplant werden

AP1.2: Vorkehrungen für Umrüsten eines BHKWs:

- Analyse der geeigneten Position des Bypasses sowie des Kühlwasseranschlusses in Absprache mit IPM
- Installation des Bypasses sowie der Regelventile
- Anpassung des Regelsystems
- Anpassung der Software zur Überwachung/ Aufzeichnung der erfassten Daten
- Erstellung der benötigten Schnittstelle zur Verwertung des generierten Stromes

Ergebnis: Notwendige Vorarbeiten zur Installation des thermoelektrischen Wärmetauschers sowie der Überwachung und Auswertung der aufgezeichneten Parameter im Regelsystem des BHKW.

AP2: Charakterisierung des BHKW

- Charakterisierung des unmodifizierten BHKWs bezüglich Temperaturverläufe und Wärmeströme im Abgasstrom und Wärmetauscher durch die Firma Schleif. Diese Resultate fließen in das Design des thermoelektrischen Wärmetauschers für das BHKW und in die Simulation ein (AP3).

Ergebnis: Temperaturverteilungen, Massen- und Wärmeströme im Abgasstrom und Wärmetauscher bestimmt.

AP3: Beschaffung, Bau und Charakterisierung thermoelektrischer Module:

AP3.1: Auswahl und Beschaffung kommerzieller thermoelektrischer Module für den Temperaturbereich bis 200 °C (IPM):

- Recherche und begleitende Testmessungen von kommerziellen thermoelektrischen Generatoren im Modulmessplatz des Fraunhofer IPM
- Auswahl und Bestellung der am besten geeigneten Module in ausreichender Stückzahl für die Integration in den Wärmetauscher. Wichtige Kriterien dabei: Effizienz, Leistungsdichte und Langzeitstabilität der thermoelektrischen Module.

Ergebnis: Geeignete thermoelektrische Module für den Temperaturbereich bis 200 °C für die Integration in den Wärmetauscher vorhanden.

AP3.2: Fertigung Hochtemperatur-Module für den Temperaturbereich bis 500 °C:

- Herstellung und Charakterisierung von für die Integration in den Wärmetauscher optimierten Hochtemperatur-Modulen.

Ergebnis: Hochtemperatur-Module für die Integration in den Wärmetauscher in ausreichender Stückzahl vorhanden.

AP4: Konzeption, Simulation und Tests der thermoelektrischen Wärmetauschereinheiten

AP4.1: Konzeption und Simulation des thermoelektrischen Wärmetauschers:

- Entwurf des thermoelektrischen Wärmetauschers auf Basis der Ergebnisse von AP2 und AP3
- Optimierung des Designs der Wärmetauschereinheiten im Hinblick auf Maximierung der elektrischen Leistungsausbeute mit Hilfe von Simulationen.

AP4.2: Bau und Charakterisierung einzelner Wärmetauschereinheiten:

- Fertigung einzelner Wärmetauschereinheiten
- Experimentelle Charakterisierung der Wärmetauschereinheiten an einem Heißgasprüfstand
- Vergleich der experimentellen Daten und mit den Simulationsergebnissen aus AP4.1
- Die experimentellen Daten fließen zur weiteren Optimierung des Designs wieder in die Simulationen mit ein.

Ergebnis: experimentell validiertes Konzept des thermoelektrischen Wärmetauschers mit maximaler elektrischer Leistungsausbeute entwickelt.

AP5: Fertigung des thermoelektrischen Wärmetauschers

AP5.1 Konstruktive Umsetzung des CAD-Modells

- Auswahl geeigneter Materialien für den WT
- Fertigung des Wärmetauschers

Ergebnis: kompletter thermoelektrischer Wärmetauscher gefertigt

AP6: Integration des thermoelektrischen Wärmetauschers in BHKW

AP6.1: Einbau des thermoelektrischen Wärmetauschers in das BHKW

- Integration des thermoelektrischen Wärmetauschers in den Abgasstrang sowie des Kühlkreislaufes des BHKW

AP6.2: Integration der anfallenden Daten in die BHKW-Steuerungssoftware

- Softwareanpassung zur Erfassung, Darstellung und Auswertung der Messergebnisse des thermoelektrischen Wärmetauschers
- Überwachung, Regelung und Übermittlung aller sicherheitsrelevanter Parameter

AP6.3: Inbetriebnahme und Testlauf

- Vergleichsmessungen zum Heißgasprüfstand bezüglich Temperaturverteilung, Massenströme, Gegendruck, erzeugter Energie, Nutzwassererwärmung, Effizienz

Ergebnis: thermoelektrischer Wärmetauscher in Betrieb genommen.

AP7: Systemtest

AP7.1: Betrieb und Langzeittests des BHKWs bei badenovaWÄRMEPLUS

- Ermittlung der zusätzlichen Stromerzeugung durch thermoelektrische Generatoren
- Untersuchung des Einflusses des thermoelektrischen Wärmetauschers auf das BHKW
- Charakterisierung über längeren Betriebszeitraum

2.2.2 Übersicht Meilensteine und Projektziele nach Arbeitspaketen

Tabelle 1 zeigt die Meilensteine des Projektes und die Erreichung dieser im Projektverlauf.

Tabelle 1: Übersicht Meilensteine und Projektziele für die einzelnen Arbeitspakete

Meilenstein	AP	Beschreibung	Erreichung
1	1.1/1.2	Fertigstellung der notwendigen Vorarbeiten zur Installation des thermoelektrischen Wärmetauschers	05/2019
2	2	Erstellung der Leistungsdaten des unmodifizierten BHKWs	08/2014
3	3.1/3.2	Hochtemperatur-Module für die Integration in den Wärmetauscher sind in ausreichender Stückzahl vorhanden	10/2016
4	4.1/4.2	Experimentell validiertes Konzept des thermoelektrischen Wärmetauschers mit maximaler elektrischer Leistungsausbeute entwickelt	04/2017 11/2017
5	5.1	Kompletter thermoelektrischer Wärmetauscher gefertigt	10/2016
6	6.1/6.2/6.3	Thermoelektrischer Wärmetauscher in Betrieb genommen. Generation 1/Generation 2	12/2018 10/2019

7	7.1	Evaluierung der Leistungssteigerung des BHKW mit thermoelektrischen Wärmetauscher Generation 2	07/2019 - Projektende
---	-----	--	-----------------------

2.3 Projektdurchführung

2.3.1 Auslegung und Entwicklung des thermoelektrischen Generators

Um den elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW mit Hilfe thermoelektrischer Module zu steigern und die hohen Anforderungen an die technischen Randbedingungen sowie an die Wirtschaftlichkeit einer künftigen Fertigung zu erfüllen, war es notwendig auf die Herstellungskosten des im Projekt zu fertigenden Wärmetauschers zu achten. Daher wurde der Ansatz eines mehrstufigen Aufbaus gewählt, wobei pro Stufe zwei thermoelektrische Module auf einem Heißgaswärmeübertrager platziert werden können. Der TEG besteht aus mehreren dieser TEG-Einheiten. Da sich das Abgas beim Durchströmen der seriell hintereinander geschalteten Stufen immer mehr abkühlt, ergab sich aus den ersten vereinfachten Simulationen ein vierstufiges Konzept. Die Gasaustrittstemperatur der vierten Stufe ist thermoelektrisch nicht mehr wirtschaftlich nutzbar. An dieser Stelle wäre es jedoch möglich, eine reine Wärmeübertragerstufe vorzusehen, um das Abgas weiter abzukühlen und die Wärme auf den Wasserkreislauf zu übertragen. Um die entsprechend notwendigen Volumenströme bei geringem Abgasgegendruck ausnutzen zu können, wurde ein Modell mit insgesamt fünf parallel angeströmten Heißgassträngen konzipiert (dieser Aufbau wird als TEG Generation 1 bezeichnet) (Abbildung 4).

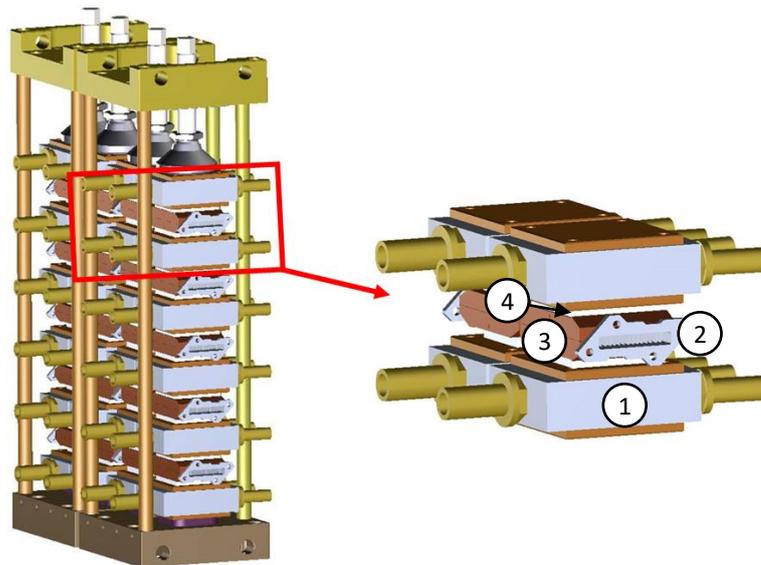


Abbildung 4: CAD-Modell des thermoelektrischen Generators (Generation 1) mit 5 Heißgassträngen. Je Heißgasstrang sind vier thermoelektrische Stufen enthalten. Pro Heißgasrohr sind zwei thermoelektrische Stufen mit je vier thermoelektrischen Generatoren konzipiert (kleines Bild, rechts; 1: Wasserkühler mit Anschlussstutzen, 2: Heißgasrohr, 3: Heißeitenwärmespreizer, 4: thermoelektrisches Modul)

Um den hohen Gaseintrittstemperaturen von über 600 °C (Datenblatt BHKW) der 1. Stufe Rechnung zu tragen, kamen im Projekt erstmals sogenannte Hochtemperatur-Thermoelektrik-Module (TEM) im BHKW zum Einsatz. Spezifisch für das Projekt wurde ein eigenes Moduldesign entwickelt, das an die thermischen und geometrischen Gegebenheiten besonders angepasst ist. Die technischen Daten sind wie folgt:

Grundfläche x Höhe: 32 x 32 x 3,6 mm³
 Leistung: 14,8 W bei $\Delta T = 530$ K; $T_k = 19$ °C

Insgesamt wurden im Projekt mehr als 70 Module dieses Typs aufgebaut. Abbildung 5 zeigt ein gefertigtes Hochtemperaturmodul sowie das Ergebnis der Charakterisierung vom Modulmessplatz des Fraunhofer IPM.

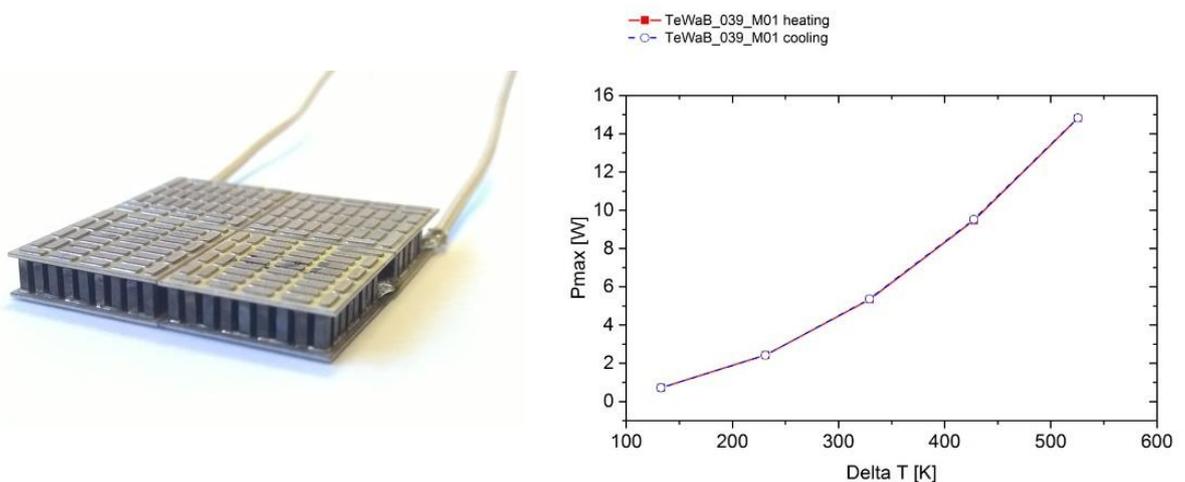


Abbildung 5: Hochtemperaturmodul (links) und Messergebnis (rechts) bezogen auf eine Kaltseitentemperatur von ~20 °C (Modulmessplatz Fraunhofer IPM) (2015)

Für den TEG wurde eine Simulation hinsichtlich erzielbarer Heiseitentemperaturen sowie der sich daraus ergebenden Leistungsausbeute für einen vierstufigen Heigasstrang durchgeführt. Hierauf wird im Abschnitt 2.3.3 beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Heiluftprfstandmessung näher eingegangen.

Unter Verwendung der IPM-eigenen thermoelektrischen Hochtemperaturmodule aus Halb-Heusler-Verbindungen, aber auch unter Einsatz von kommerziellen (Bi_2Te_3) Modulen wurde das 4 stufige Design mit insgesamt 5 parallel angeströmten Heißgassträngen aufgebaut (siehe 2.3.2). Die Aufteilung der Stufen war speziell an die Temperaturen des Heigasstroms angepasst und ergab sich wie folgt:

Stufe 1: Halb-Heusler-Module („HH“)

Stufe 2: bis 330°C stabile Bi_2Te_3 -Module („BiTe 2“)

Stufe 3: bis 230°C stabile Bi_2Te_3 -Module mit geringem Wärmeleitwert („BiTe 3“)

Stufe 4: bis 230°C stabile Bi_2Te_3 -Module mit hohem Wärmeleitwert („BiTe 4“)

2.3.2 Fertigung und Bau des thermoelektrischen Generators (TEG)

Mit dem Ziel einen Teilmassenstrom des BHKW durch den TEG zu leiten wurde ein Demonstrator bestehend aus fünf Strängen aufgebaut. D.h. der Abgaswärmestrom wird über einen Verteiler auf fünf parallel verlaufende Stränge aufgeteilt. Um möglichst die Abgaswärme effizient in Strom zu wandeln besteht jeder Strang aus vier thermoelektrischen Stufen (Vgl. Abschnitt 2.3.1)

In Abbildung 6 ist der fertiggestellte thermoelektrischen Wärmetauscher mit seinen Einzelkomponenten zu sehen.

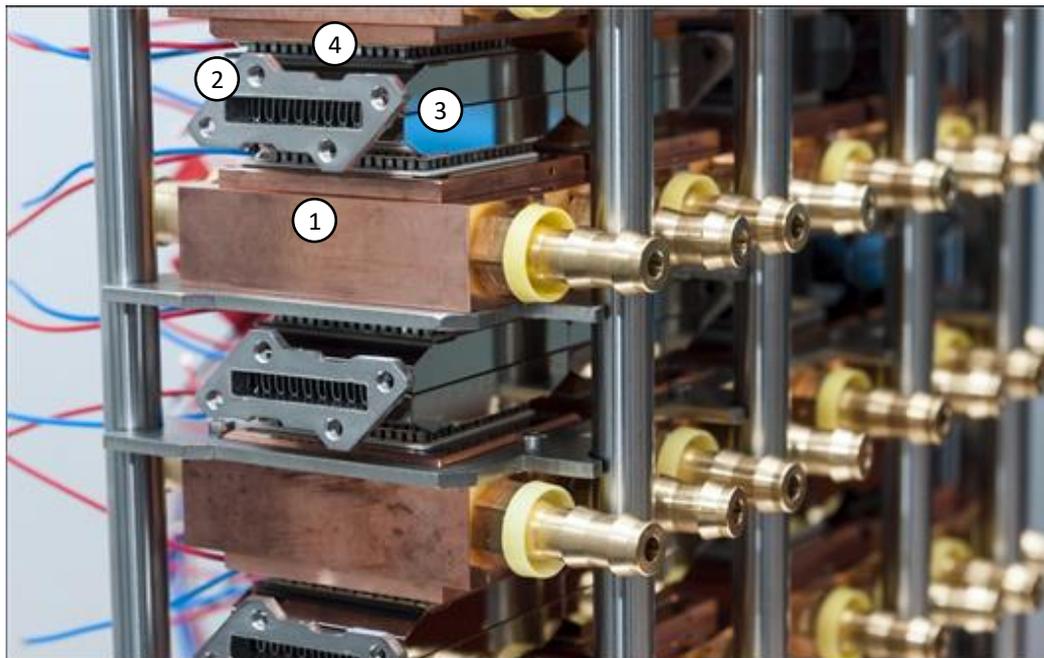


Abbildung 6: TEG Anordnung. Vertikal: Stränge, Horizontal: Stufen 1-4 (1: Wasserkühler (Kupfer) mit Anschlussstutzen, 2: Heißgasrohr (Edelstahl), 3: Heißseitenwärmespreizer (Kupfer vernickelt), 4: thermoelektrisches Modul))

Abbildung 7 zeigt eine vergrößerte Ansicht eines Heißgasstranges, der hinsichtlich der Temperaturabnahme im Wärmetauscher aus vier verschiedenen Generatorstufen besteht. Die Thermoelemente zur Bestimmung der Heißseitentemperaturen an den thermoelektrischen Generatoren sind in den Heißseitenwärmespreizern angebracht

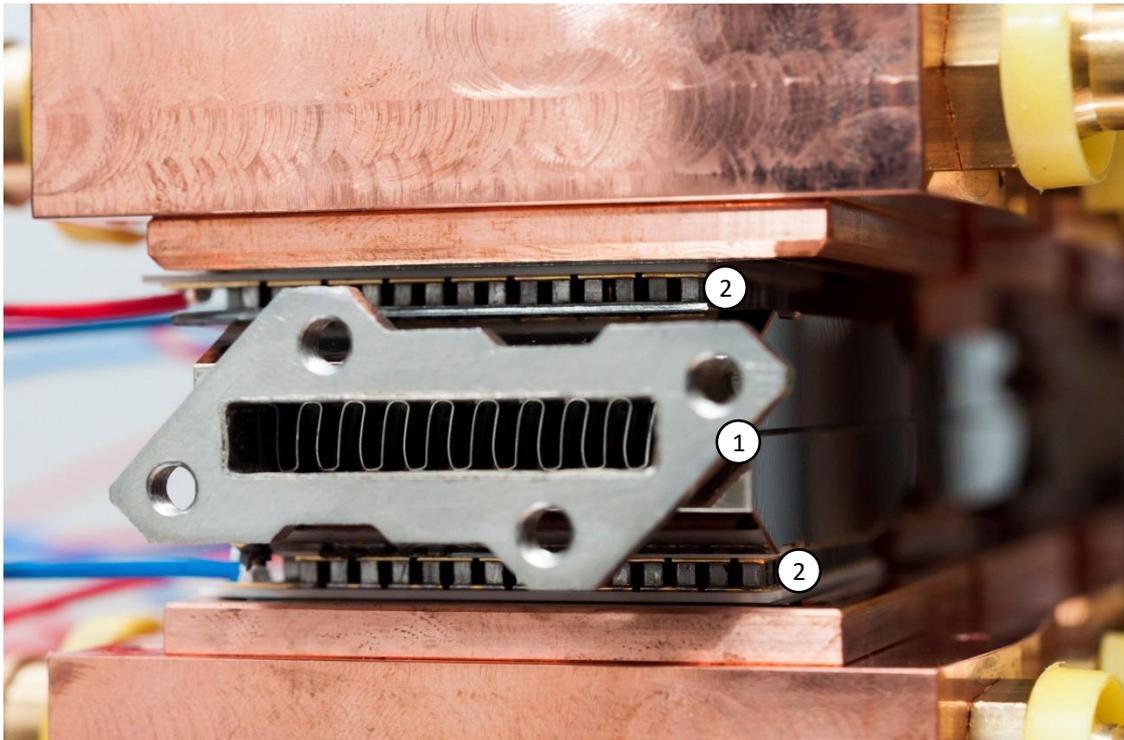


Abbildung 7: Vergrößerte Darstellung der Stufe eines Heißgasstranges (1, Heißgasrohr mit Heißeitenwärmespreizer) mit zwei angekoppelten thermoelektrischen Modulen (2)

Abbildung 8 zeigt den fertiggestellten thermoelektrischen Wärmetauscher von oben. Hier sind die 5 Heißgasstränge mit den einzeln ausgeführten Einlasstrichtern erkennbar. Der gesamte Aufbau wurde an unterschiedlichen Stellen mit Thermoelementen bestückt, um im Betrieb die Heißeiten- und Kaltseitentemperaturen der eingesetzten TEM überwachen zu können.

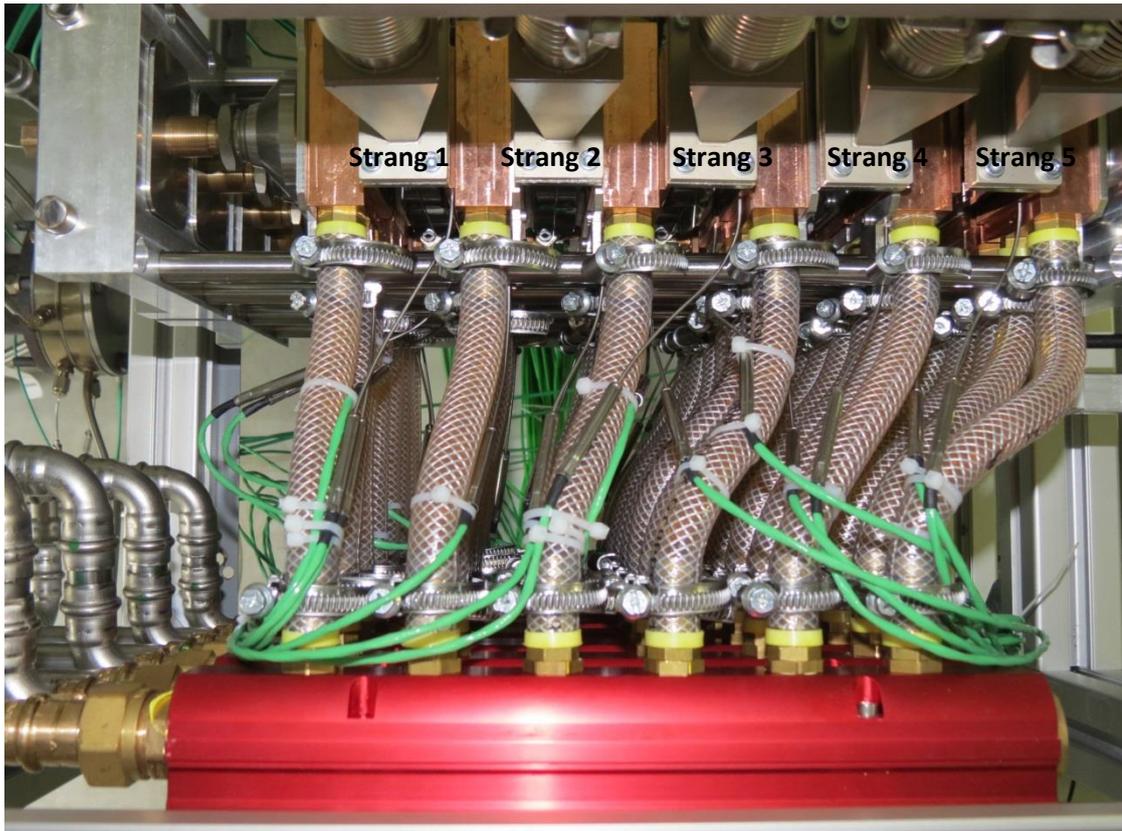


Abbildung 8: Thermoelektrischer Wärmetauscher bestehend aus 5 Heißgassträngen mit entsprechend angeordneten Thermoelementen zur Bestimmung der Temperaturen an den thermoelektrischen Modulen (TEM).

2.3.3 Erprobung TEG auf dem Heißluftprüfstand

Wie im Projektplan vorgesehen, wurde der 5-strängige thermoelektrische Wärmetauscher am Heißluftprüfstand des Fraunhofer IPM integriert (Abbildung 9) und charakterisiert. Mit dem am IPM entwickelten Prüfstand ist es möglich, einen Heißluftwärmestrom mit definierter Lufttemperatur und definiertem Massenstrom durch den TEG zu leiten. Zudem können die Ein- und Ausgangstemperaturen, der Differenzdruck über den TEG, sowie der Kühlwasserwärmestrom bilanziert werden.

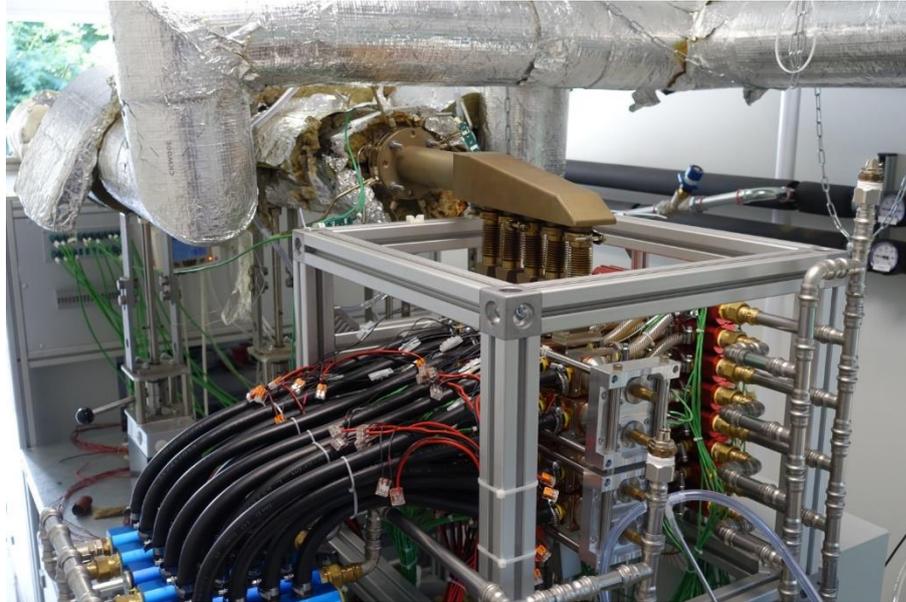


Abbildung 9: Integration des 5-strängigen TEG-Aufbaus am Heißluft-Prüfstand des Fraunhofer IPM (2016)

Nach der Charakterisierung des Wärmetauschers am Heißluftprüfstand des Fraunhofer IPM wurden die Ergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Die für die Simulation implementierte Geometrie beinhaltet ein Heißgasrohr mit Rippen bzw. Finnen, zwei Kupferwärmespreizer, die das Heißgasrohr umschließen, sowie zwei thermoelektrische Module (kurz TEM, Abbildung 10). Diese Geometrie entspricht jeweils einer thermoelektrischen Stufe der Wärmetauschereinheit wie in Abbildung 7. Beim vierstufigen Aufbau wurden vier solcher Geometrie-Einheiten hintereinander kombiniert.

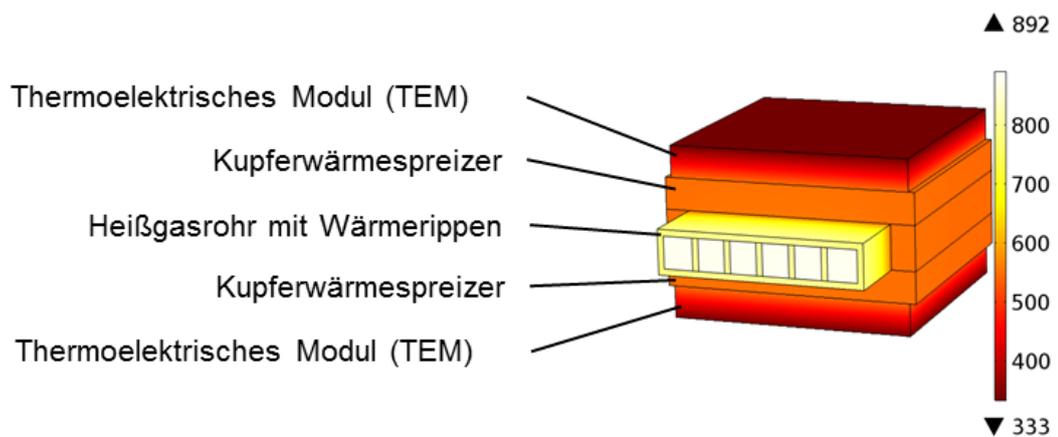


Abbildung 10: Exemplarische Temperaturverteilung aus 3D-FEM Rechnung mit COMSOL Multiphysics® über die berechnete Geometrie (Temperaturen sind in Kelvin angegeben).

Auf diese Geometrie wurde ein Wärmeflussmodell angewendet, wobei Temperatur und Massenstrom des eingehenden Abgases, sowie der Wärmeleitwert der TEM als Eingangsparameter dienen. Als Ausgangsdaten/Ergebnis erhält man Temperatur- und Wärmeflussverteilung über

die einzelnen Komponenten. Für die Simulation wurde ein Massenstrom von 1 g/s bei einer Gas-temperatur T_{in} von 873 K als Eingangsbedingung in Stufe 1 verwendet. Daraus ergibt sich die Heisseitentemperatur am TEM sowie die Gasaustrittstemperatur T_{out} . Diese wird dann wieder-um als T_{in} für die zweite Stufe verwendet, womit anschließend die zweite Stufe mit einem wei-teren thermoelektrischen Niedertemperatur-Material wie beispielsweise Bi2Te3 berechnet werden kann. Diese Vorgehensweise wird auf alle 4 Stufen angewandt.

Die für die Simulation erforderlichen Wärmeleitwerte der TEM wurden am Modulmessplatz des Fraunhofer IPM ermittelt. So ergaben sich für die verwendeten TEM folgende Werte:

Tabelle 2: Berechnete TEM-Wärmeleitwerte K_{th} aus den Messergebnissen des Modulmessplatzes des Fraunhofer IPM für die unterschiedlichen TEM der vier Stufen bezogen auf eine Kaltseitentemperatur von 70 °C

Stufe	TEM-Material	Wärme- strom Q [W]	Temperatur- differenz dT [K]	TEM-Fläche A [mm ²]	TEM-Wärmeleitwert (berechnet) K_{th} [W/(m ² *K)]
1	Halb- Heusler	69	228	1024	295
2	Bi2Te3	88	128	1600	430
3	Bi2Te3	38	105	1600	227
4	Bi2Te3	35	79	1600	275

Abbildung 11 zeigt die aus der Simulation berechneten Heisseitentemperaturen der einzelnen thermoelektrischen Stufen im Vergleich zu den Messergebnissen vom Prfstandtest bei einem Massenstrom je Heigasstrang von ca. 1 g/s und einer Heigastemperatur von 600 °C. Die Kühl-wassereingangstemperatur betrug ca. 70 °C.

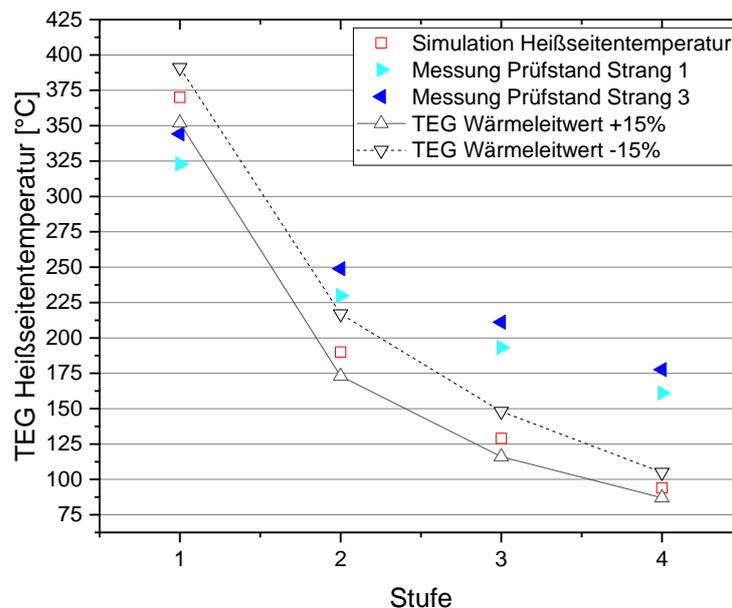


Abbildung 11: Simulierte und am Prüfstand gemessene TEM Heisseitentemperaturen der einzelnen Stufen für zwei unterschiedliche Heigasstrnge des fnfstrngigen Wärmetauschers (Strang 1: Randbe-reich des Wärmetauschers, Strang 3: Mitte des Wärmetauschers). Berechneter Einfluss auf die TEM Heisseitentemperatur bei Verwendung von TEM mit 15 % erhöhtem sowie 15 % geringerem Wärme-leitwert.

Um Aussagen über den Einfluss der Wärmeleitwerte der TEM im thermoelektrischen Wärmetauscher machen zu können, wurde jede TEG-Stufe mit 15 % erhöhtem sowie 15 % geringerem Wärmeleitwert berechnet (siehe Abbildung 11).

Der Einfluss des Wärmeleitwerts der TEM im thermoelektrischen Wärmetauscher wird deutlich ersichtlich. Ein TEM mit geringerem Leitwert führt weniger Wärme ab, woraus sich eine höhere Heiseitentemperatur ergibt. So wird verständlich, dass der Wärmeleitwert eines TEM massiv die Leistungsausbeute und die Effizienz des thermoelektrischen Wärmetauschers bestimmt.

Während die erzielten Ergebnisse am Heißluftprüfstand für die erste Stufe mit den Simulationsergebnissen vergleichbar waren, ergaben sich bei den folgenden Stufen größerer Abweichungen, die u.a. auf den Aufbau des Simulationsmodells zurückzuführen sind. Trotz der aufgetretenen Abweichungen konnte durch die Versuche am Heißluftprüfstand gezeigt werden, dass der TEG für einen Einsatz im BHKW geeignet ist und die Hochtemperatur TEM ordnungsgemäß im System funktionieren. Das mit Hilfe des Simulationsmodells abgeleitete mehrstufige Design erwies sich dabei als sehr zielführend. Hierdurch war es möglich über die Länge des TEG unterschiedliche TE-Module einzusetzen, die speziell für den vorliegenden Temperaturbereich optimiert sind.

Die generierte elektrische Leistung der einzelnen Generatorstufen sowie die maximal im Heigasstrang gemessenen Heiseitentemperaturen sind in der folgenden Tabelle dargestellt (Tabelle 3). Zudem sind die mittleren Heiseitentemperaturen der fünf Stränge aufgeführt.

Tabelle 3: Erreichte Heiseitentemperaturen der thermoelektrischen Module in den einzelnen Generatorstufen sowie die entsprechend generierte elektrische Leistung.

Stufe	TEM-Material	el. generierte Leistung P_{el} [W]	max. Heiseiten-Temp. der 5 Stränge [°C]	mittlere Heiseiten-Temp. der 5 Stränge [°C]
1	Halb-Heusler	23	347	333
2	Bi2Te3	25	259	238
3	Bi2Te3	15	223	200
4	Bi2Te3	13	178	165

In Summe ergab sich eine elektrisch generierte Gesamtleistung des thermoelektrischen Generators von ca. 78 W.

Während der Testphase im BHKW soll der Einfluss eines erhöhten Abgasgedrucks von bis zu 150 mbar untersucht werden. Um diese Bedingungen im thermoelektrischen Wärmetauscher untersuchen zu können, wurden die TEM der Stufe 3 im vierstufigen thermoelektrischen Wärmetauscher gegen TEM mit höherer zulässiger Heiseitentemperatur ausgetauscht.

Bei den Messungen am Heißluftprüfstand des Fraunhofer IPM bei hohem Gegendruck (85 mbar) und Gaseintrittstemperaturen von ca. 630 °C an den thermoelektrischen Generatoren konnten Heiseitentemperaturen nahe den max. Herstellerangaben erreicht werden (siehe Tabelle 1). Die Khlwassereingangstemperatur betrug ca. 60 °C.

Tabelle 4: Erreichte Heiseitentemperaturen der thermoelektrischen Generatoren in den einzelnen Generatorstufen sowie die entsprechende max. Heiseitentemperatur lt. Hersteller

Stufe	TEM-Material	Heiseiten-Temp.	Max. Heiseiten-Temp. (lt. Hersteller)
1	Halb- Heusler	410 °C	550 °C
2	BiTe 2	330 °C	330 °C
3	BiTe 3	250 °C	330 °C
4	BiTe 4	210 °C	200 °C (kurzzeitig 230 °C)

In Summe konnte im Versuch am Heißluftprüfstand eine elektrische Gesamtleitung des thermoelektrischen Generators von ca. 110 W abgegriffen werden.

Trotz Abweichungen zwischen den Simulations- und Messergebnissen zeigten die Prüfstandsversuche auf, dass der TEG für die Integration ins BHKW geeignet ist und die Funktionsstabilitt unter Realbedingungen getestet werden kann.

2.3.4 Konzept zur Integration des TEG in den Abgasstrang des BHKW

In Zusammenarbeit mit der badenovaWäRMEPLUS wurde ein Konzept für die mechanische und elektrische Einbindung des TEG in das BHKW erarbeitet. Ziel war es dabei, den BHKW-Betrieb durch den Einsatz des TEG möglichst wenig zu beeinflussen. Daher wurde abgasseitig geplant, den TEG parallel zum Abgaswärmetauscher (AWT) einzubauen (Abbildung 12). Regelbare Klappen ermöglichen es den Massenstrom durch beide Einheiten gezielt einzustellen und mittels einer geeigneten Regelung auf bestimmte Heiseitentemperaturen zu regeln. Zur Vereinfachung des Systems wurde eine Abgasregelklappe nach dem AWT und eine manuelle Klappe nach dem TEG eingebaut. Die Abgasregelklappe wurde dazu verwendet, den Abgasstrom des BHKW anteilig durch den konventionellen AWT und den TEG leiten zu können.

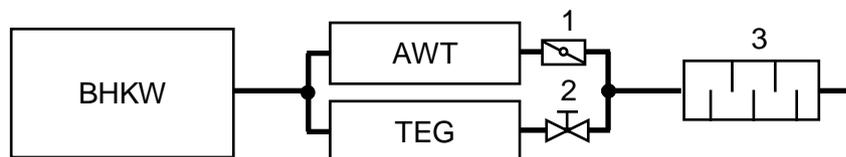


Abbildung 12: Schemazeichnung der Integration des thermoelektrischen Generators (TEG) in den Abgasstrang des BHKW. Der TEG wird parallel zum konventionellen Abgaswärmetauscher (AWT) eingebaut, was ein Betreiben des BHKW ohne Durchströmung des TEG ermöglicht. Zu diesem Zweck wird die regelbare Abgasklappe (1) nach dem AWT vollständig geöffnet und die handbediente Absperrklappe (2) nach dem TEG geschlossen. Die Abgasleitungen vom AWT und TEG laufen vor dem Schalldämpfer (3) wieder zusammen. Bei geöffneter Absperrklappe (2) lässt sich der Massenstrom durch den TEG und AWT über die regelbare Abgasklappe einstellen

2.4 Tests am 50 kW_{el} BHKW (badenovaWäRMEPLUS)

2.4.1 Integration und Inbetriebnahme des thermoelektrischen Generators am BHKW

Um das BHKW parallel zum konventionellen Abgaswärmetauscher zu betreiben, wurde die Abgasanlage nach dem BHKW entsprechend dem dargestellten Konzept in 2.3.4 angepasst bzw. erweitert. Abbildung 13 zeigt das BHKW zusammen mit dem integrierten TEG. Der konventionelle Abgaswärmetauscher befindet sich unterhalb des Motors innerhalb der Schallschutzbox.

Um die thermoelektrischen Module auf der Kaltseite zu kühlen, wurde der TEG in den Motor-kühlkreislauf eingebunden.



Abbildung 13: TEG nach fertiger Integration in den Abgasstrang des BHKW in Landwasser

Um Vergleichsmessungen zum Heißluftprüfstand bezüglich Temperaturverteilung, Massenströme, Gegendruck, erzeugter Energie, Nutzwassererwärmung sowie Effizienz durchführen zu können, wurden folgende Messstellen im BHKW zur Bilanzierung integriert (vgl. Abbildung 14):

- Ringmessstellen zur Aufnahme des Gegendrucks
- Ringmessstellen zur Messung der Abgastemperaturen vor und nach dem Wärmetauscher
- Temperaturmessstellen für Kühlwasser vor und nach dem Wärmetauscher
- Wärmemengenzähler im Kühlwasserkreis
- Erfassung der generierten Leistung pro Generatorstufe

Diese Daten konnten über eine Netzwerkverbindung aus der Ferne direkt ausgelesen und verarbeitet werden.

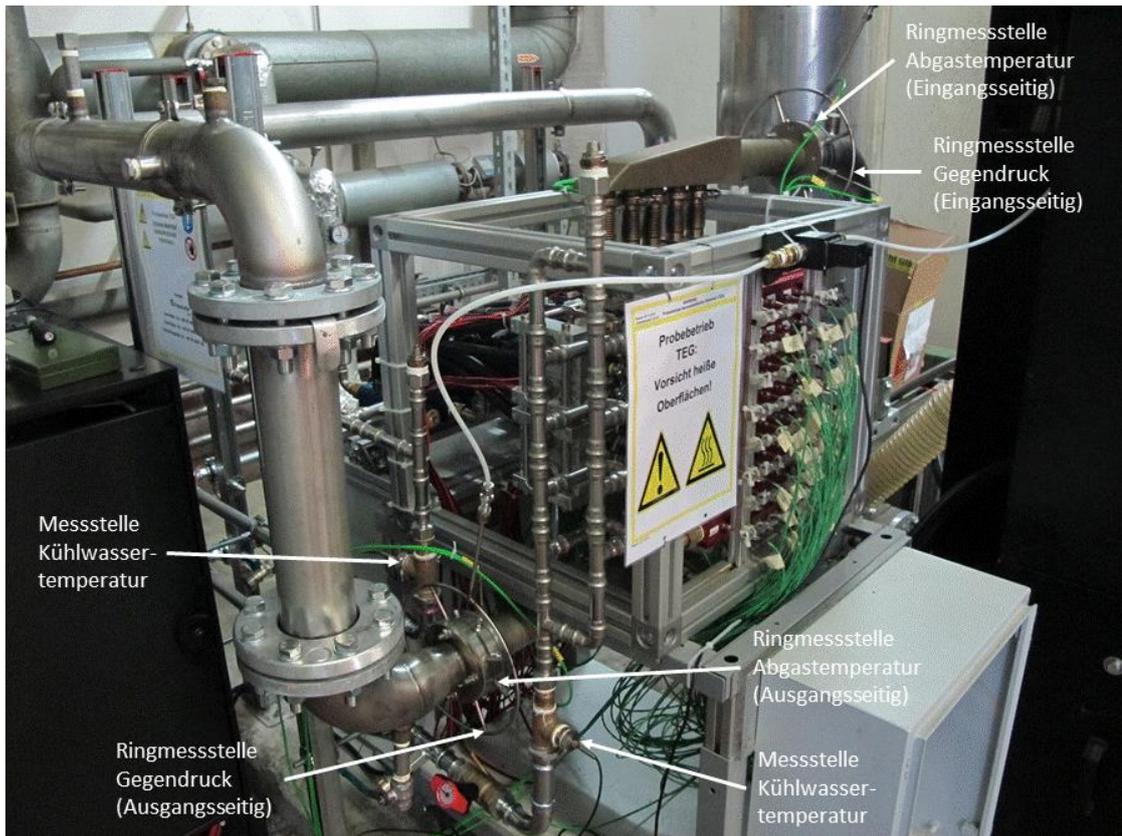


Abbildung 14: Integrierter thermoelektrischer Wärmetauscher mit Ringmessstellen für Gegendruck und Abgastemperaturen sowie der Kühlwassertemperaturen

Ziel war es die Ergebnisse aus dem Prüfstandversuch in der realen Anwendung zu reproduzieren (2.3.3). Bei der durchgeführten Inbetriebnahme wurden dazu schrittweise die Abgasklappe nach dem Abgaswärmetauscher geschlossen und dadurch der Abgasmassenstrom durch den TEG erhöht. Parallel dazu wurde der Anstieg der Heiseitentemperaturen am TEG überwacht. Die Heiseitentemperatur der letzten Stufe sollte dabei ca. 210 °C betragen. Während des Versuchs wurden die Eingangs- und Ausgangstemperaturen des Abgases, die Heiseitentemperaturen an den TEM und der Druckabfall über den TEG erfasst und ausgewertet. Die beschriebene Klappenregelung (2.3.4) wurde für zwei Regelarten getestet und parametrisiert. Diese Regelarten umfassen die Regelung auf eine bestimmte Druckdifferenz über den TEG oder auf eine bestimmte Heiseitentemperatur des TEG.

2.4.2 Ergebnisse Tests am BHKW

Abweichend zum Versuch am Heißluftprüfstand, bei dem für den Zielbetriebspunkt eine Luft-eintrittstemperatur von ca. 630 °C eingestellt wurde, ergaben sich bei der Inbetriebnahme am BHKW mittlere Abgastemperaturen von bis zu ca. 500 bis 510 °C am Eintritt des TEG (Abbildung 15). Zum einen ist dies auf eine geringere Abgastemperatur des Motors und auf Wärmeverluste entlang der Abgasleitung zurückzuführen.

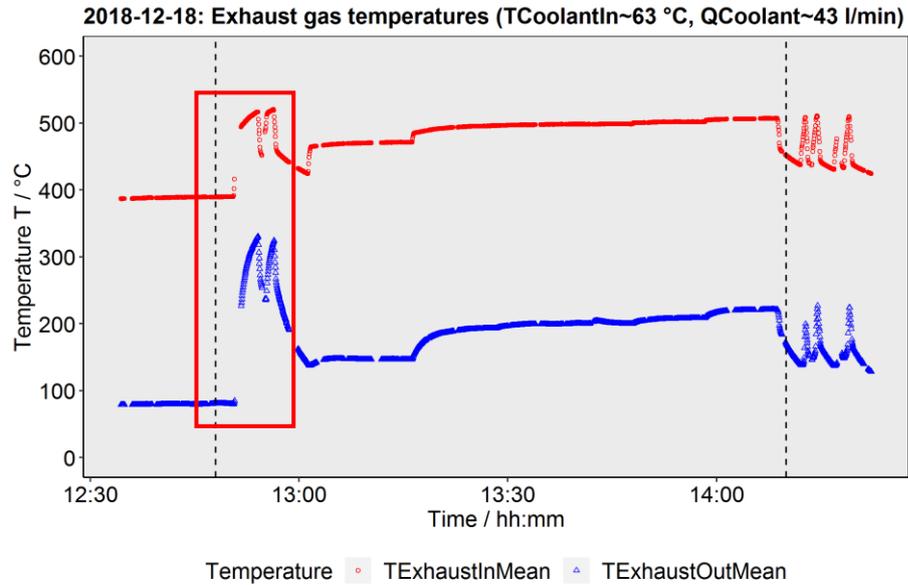


Abbildung 15: Abgastemperaturen am Eingang und Ausgang des TEG der ersten Generation während der Inbetriebnahme. Die gestrichelten Linien schließen den Zeitraum ein, in dem die Klappe hinter dem Abgaswärmetauscher gezielt schrittweise geöffnet wurde, um damit einen definierten Massenstrom durch den TEG zu leiten. Die rote Box markiert den Beginn der thermischen Einschwingphase des TEG.

Die Abgastemperatur des Motors lag bei der Inbetriebnahme bei ca. 580 °C und damit ca. 40 K unterhalb der im Datenblatt angebenen Abgastemperatur des Motors von 620 °C unter Vollast (Abbildung 16). Dennoch konnte die Grenztemperatur der Heißeite der letzten Stufe (ca. 210 °C) erreicht werden.

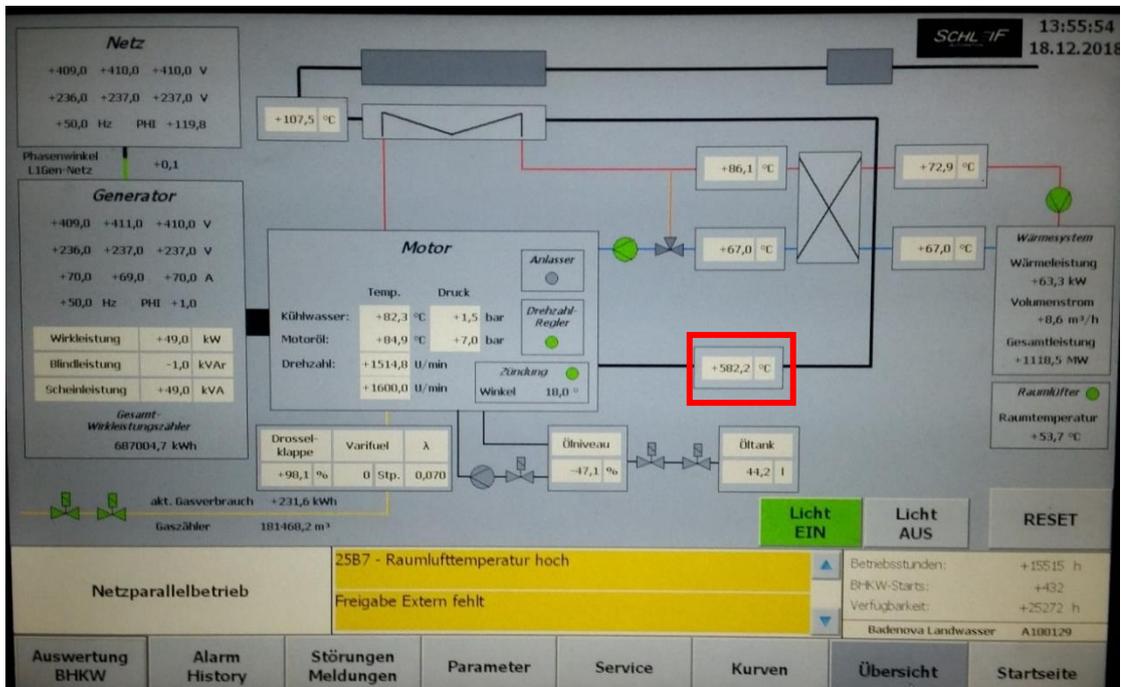


Abbildung 16: Aufnahme vom Benutzerbildschirm des BHKW während der Inbetriebnahme mit Angaben zur elektrischen Ausgangsleistung des BHKW-Generators und den Kühlwasser- und Abgastemperaturen. Die Abgastemperatur des Motors ist mit einem roten Kasten hervorgehoben.

Der abgasseitige Differenzdruck über den TEG betrug bei der Messung im Teilmassenstrom ca. 94 mbar. Im Vergleich dazu hat der konventionelle Abgaswärmetauscher einen Druckverlust von ca. 7 mbar im Nennlastpunkt des Motors (Quelle: Datenblatt APROVIS N-02-150/1500-1H-1SC-P). Die gemessenen Heiseitentemperaturen der thermoelektrischen Module sind in Tabelle 5 aufgeführt. Im Vergleich zu den Prfstandergebnissen stellten sich bei Tests in der realen Anwendung abweichende Heiseitentemperaturen ein, was auf die geringere Eintrittstemperatur und einen abweichenden Massenstrom zurückzuführen ist.

Tabelle 5: Heiseitentemperaturen der thermoelektrischen Module in den einzelnen Generatorstufen beim Funktionstest am Heißluftprüfstand und bei der Inbetriebnahme am BHKW. Zusätzlich dazu sind die entsprechende max. Heiseitentemperatur der thermoelektrischen Module laut Hersteller angegeben.

		Heiseitentemperaturen thermoelektrische Module		
Stufe	TEM-Klasse	Heißluftprüfstand IPM <i>TLuftEin ca. 630 °C, deltaPTEG ca. 85 mbar TKhlungEin ca. 60 °C</i>	TEG integriert in BHKW <i>TGasEin ca. 500 °C, deltaPTEG ca. 94 mbar TKhlungEin ca. 62 °C</i>	Maximale zulässige Werte (lt. Hersteller)
1	HH	410 °C	367 °C	550 °C
2	BiTe 2	330 °C	293 °C	330 °C
3	BiTe 3	250 °C	241 °C	330 °C
4	BiTe 4	210 °C	210 °C	200 °C (kurzzeitig 230 °C)

Die Betrachtung des Wärmestromes zur Ermittlung des thermoelektrischen Wirkungsgrads ergab unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten an die Umgebung durch Konvektion und Abstrahlung folgende Ergebnisse:

ber den Wärmemengenzähler im Kühlkreislauf des TEG wurde beim dargestellten Betriebspunkt (Tabelle 5) ein Wärmestrom von ca. 4,6 kW_{th} erfasst. Die erzielte thermoelektrische Leistung betrug ca. 100 W_{el} (Abbildung 17). Der Gesamtwirkungsgrad des TEG lag somit bei ca. 2,1 % und war damit vergleichbar zum erreichten Wert bei der Prfstandmessung. Die Prfstandergebnisse konnten somit in der realen Anwendung reproduziert werden.

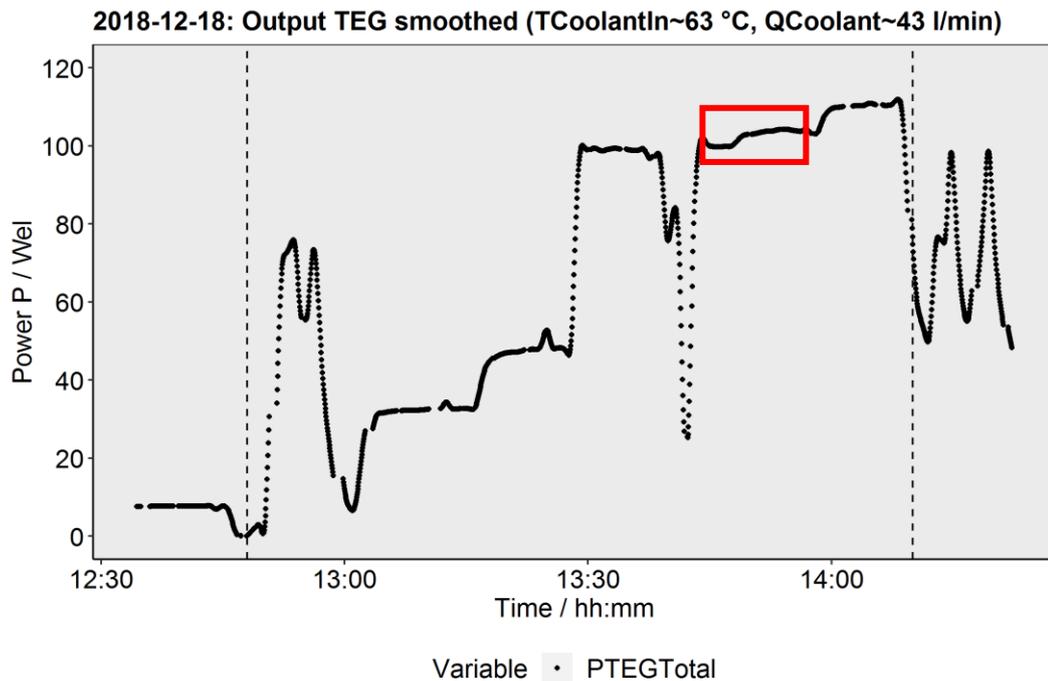


Abbildung 17: Elektrische Leistung des TEG der ersten Generation während der Inbetriebnahme (Kurve geglättet). Bei Erreichung der Soll-Heißseitentemperatur der letzten TEG-Stufe (ca. 210 °C) betrug die generierte Leistung ca. 100 W_{el} (siehe rote Box). Die gestrichelten Linien schließen den Zeitraum ein, in dem die Klappe hinter dem Abgaswärmetauscher gezielt schrittweise geöffnet wurde, um damit einen definierten Massenstrom durch den TEG zu leiten. Ab ca. 14:10 Uhr wurde die Klappe weiter getestet und parametrisiert.

Es wurde bei der Inbetriebnahme überdies eine Grenzwertabschaltung umgesetzt, die verhindern soll, dass Temperaturen am TEG auftreten, die zu einer Beschädigung des TEG führen könnten. Hierdurch ist ein teilüberwachter Dauerbetrieb ermöglicht worden.

Versuche mit einem optimierten TEG (Generation 2)

Wie zuvor erwähnt war der TEG der Generation 1 dafür ausgelegt, nur einen Teilmassenstrom des BHKW zu nutzen. Im Folgeprojekt TE-BHKW wurde ein optimierter TEG (Generation 2) entwickelt, der den Gesamtabgasstrom des Motors nutzen kann. Bei der Entwicklung flossen die gewonnenen Erkenntnisse aus diesem Projekt mit ein. Im Folgenden sind die Ergebnisse seiner Integration in Ladwasser beschrieben.

Der TEG der Generation 2 basiert auf einem vereinfachten Design und ähnelt in seinem Grundkonzept der Generation 1. Er verfügt über vier parallele Stränge mit jeweils vier Generatorstufen, die mit unterschiedlichen thermoelektrischen Materialien bestückt sind. Eine Generatorstufe oder TEG-Einheit setzt sich zusammen aus einem Wärmerohr, thermoelektrischen Modulen und Kühlern. Er besteht aus thermoelektrischen Modulen auf Basis von Halb-Heusler (HH) Legierungen für die Hochtemperaturstufe 1 und kommerziellen Niedertemperatur-Modulen für die Stufen 2, 3 und 4. Der TEG wurde so konzipiert, dass ein Anschluss an die vorhandene Abgas- und Wasserleitung am BHKW in Landwasser mit geringem Änderungsaufwand möglich war.

Die Auslegung des Generators der Generation 2 erfolgte auf Basis von Datenblattwerten der Anlage. Um eine möglichst gute Anpassung des TEG an die Betriebsparameter des BHKW zu erzielen, wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt.

Der TEG der 2. Generation wurde am 15.10.2019 in Betrieb genommen und hat bis zum 06.12.2019 mehr als 1000 Betriebsstunden erfolgreich absolviert. Die elektrische Leistung betrug im Auswertzeitraum (abhängig vom elektrischen Lastzustand) bis zu $550 W_{el}$ und im Mittel ca. $455 W_{el}$. Die Abgastemperatur am Eingang des TEG lag bei der maximal gemessenen Leistung bei ca. 540 °C und die Kaltwassertemperatur am Eingang des TEG bei ca. 65 °C . Bei diesem Betriebspunkt wurde ein Wärmestrom von ca. 19 kW_{th} in die Kühlung des TEG übertragen. Daraus ergibt sich eine mittlere Wandlungseffizienz der TEM im System von ca. 3 %. Bezogen auf die elektrische Leistung des BHKW (ca. 49 kW am Versuchstag) entspricht dies einer elektrischen Leistungssteigerung von ca. 1,1 %. Im Vergleich zum konventionellen Abgaswärmetauscher wurde dem Abgas ein um ca. 40 % geringerer Wärmestrom entzogen (etwa 19 kW_{th} gegenüber 31 kW_{th}). Durch die Nachschaltung einer zusätzlichen Wärmeübertragerstufe ohne TEM ließe sich dies jedoch ausgleichen, so dass der Gesamtnutzungsgrad des BHKW nicht negativ beeinflusst werden würde. Aus Kostengründen wurde darauf jedoch im Rahmen des Projektes verzichtet.

Wie bereits beim TEG der ersten Generation lag die Abgastemperatur des Motors mit 580 °C ca. 40 K unterhalb des Datenblattwertes und des Auslegungspunkts des TEG (die niedrigere Temperatur am Eingang des TEG resultiert aus Wärmeverlusten über die Abgasleitungen). Aufgrund der Abweichung in der Abgastemperatur wurde der Designbetriebspunkt bzw. nennbetriebspunkt des TEG nicht erreicht. Dies führte zum einen zu Leistungsverlusten bei der Powerelektronik und zum anderen zu Einbußen bei den TEM, da niedrigere Heißeitentemperaturen erreicht wurden. Aus Simulationsergebnissen lässt sich abschätzen, welche Leistung der TEG erreichen könnte, wenn am Eingang die Abgastemperatur tatsächlich 620 °C betragen würde (Datenblattwert BHKW bei Vollast). **Unter der Annahme, dass der TEG direkt hinter dem Katalysator eingebaut wird (höchste Abgastemperatur), lässt sich für den TEG der Generation 2 für diesen Betriebspunkt eine elektrische Leistung von ca. $800 W_{el}$ abschätzen. Dies entspräche einer elektrischen Leistungserhöhung von ca. 1,6 %.**

Der gemessene Gegendruck des TEG-Systems (mit Eingangskrümmen und Ausgangstrichter) war im Rahmen der Messgenauigkeit sehr konstant und betrug etwa 15 mbar. Dies ist ein Hinweis darauf, dass es innerhalb der Kanäle des Heißeitenwärmeübertragers während der Betriebszeit nicht zu einer ausgeprägten Versottung gekommen ist. **Eine Alterung der Module und ein damit verbundener Abfall der elektrischen Leistung war ebenfalls nicht erkennbar.** Abweichungen bei der Leistung sind auf schwankende Betriebsparameter des Motors zurückzuführen.

Der Betrieb des BHKW wurde während der Dauerversuchstestphase (Oktober – Dezember) durch den Einsatz des TEG nicht negativ beeinflusst.

2.4.3 Aufgetretene Störungen

Nach dem Einbau des TEG der 1. Generation und der ersten Inbetriebnahme des BHKW in Verbindung mit der regelbaren Abgasklappe wurde Ende Februar 2019 eine Leckage am Eingangstrichter des TEG festgestellt. Diese war zum Teil auf den vergleichsweise hohen Gegendruck des TEG zurückzuführen. Nach eingehender Prüfung zeigte sich, dass eine Behebung der Leckage nicht ohne erhöhten Aufwand möglich ist. Daraufhin wurde ein Blindstopfen in den Abgasstrang vor den TEG eingebaut (März 2019). In Folge konnte das BHKW weiter normal betrieben werden bis der TEG der 2. Generation in Betrieb genommen wurde.

Auch beim TEG der 2. Generation sind nach der Erstinbetriebnahme im Zeitraum August/September 2019 Probleme durch Abgasleckagen (außerhalb des TEG-Systems) aufgetreten. Die Ursache hierfür war eine vorangehende Übertemperatur des Motors, bei der sich das Abgas auf über 710°C erwärmte (31.07.2019).

3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit/Ökologischer Nutzen

Mit dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten und gebauten thermoelektrischen Generators konnte erfolgreich die Umwandlung von Wärmeenergie in Strom in einer Gasmotor-BHKW Anwendung demonstriert werden. Erstmals wurden dabei in der realen Anwendung hochtemperaturtaugliche TEM auf Basis von Halb-Heusler-Legierungen eingesetzt.

Um möglichst viele Gleichteile verwenden zu können und auch eine potentielle Anpassbarkeit des Designs an andere BHKW möglich zu machen, wurde ein modulares Konzept basierend auf TEG-Einheiten entwickelt. Die TEG-Einheiten bestehend aus einem Heißgasrohr (ggf. mit zusätzlichen Heißeitenwärmespreizer), TEM und Kühlern lassen sich in reihe- und parallelschalten, um eine möglichst gute Anpassung an den Massenstrom und die Abgastemperaturen eines BHKW zu erreichen. Ziel des Projektes war es auch den Entwicklungsprozess eines TEG für ein BHKW zu verbessern und durch Simulationsmodelle ein besseres Systemverständnis und Auslegungskompetenz aufzubauen. Hierfür waren die zusätzlich eingebrachten Temperatursensoren auf der Heiß- und Kaltseite der TEM von großer Wichtigkeit. Dies hat jedoch auch dazu beigetragen, dass der Demonstrator im Vergleich eine hohe Komplexität aufwies. Insbesondere aufgrund des Wegfalls des insolventen Projektpartners Schleif, der als Hersteller des TEG-Systems vorgesehen war, ist eine Kostenabschätzung schwierig. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des im Projekt entwickelten Demonstrators (Generation 1) wird daher als nicht zielführend erachtet.

Der ökologische Nutzen hängt direkt zusammen mit der erhöhten elektrischen Leistung. Wie beschrieben, konnte gezeigt werden, dass sich durch den Einsatz eines TEG die elektrische Leistung des BHKW um ca. 1,1 % steigern lässt. Bei entsprechender Ausführung des TEG mit einer zusätzlich nachgeschalteten Wärmeübertragerstufe bleibt der Gesamtnutzungsgrad des BHKW nahezu unbeeinflusst, da dem Abgas die gleiche Wärmemenge wie mit einem konventionellen Wärmetauscher entzogen werden kann. Bezogen auf die Feuerungsleistung wird, durch Einsatz des TEGs, jedoch anteilig mehr Energie in Strom gewandelt, so dass im Vergleich der CO₂-Ausstoß für die Bereitstellung einer kWh Strom entsprechend reduziert wird.

4 Übertragbarkeit der Projektergebnisse

Die Erkenntnisse aus dem diesem Projekt haben noch während der Laufzeit erfolgreich Anwendung im Folgeprojekt TE-BHKW gefunden. So konnte das Konzept des mehrstufigen/mehrflutigen Designs übernommen und weiter verbessert werden. Zudem trugen die verwendeten Simulationsmodelle und Abgleiche zum besseren Systemverständnis bei und es konnte auf den Erfahrungen aufgebaut werden. So ließ sich das System gezielt vereinfachen und der Druckverlust des Systems konnte deutlich reduziert werden.

Die Projektergebnisse wurden und werden für eine öffentlichkeitswirksame Darstellung in entsprechenden Fachzeitschriften und als Konferenzbeiträge veröffentlicht. Die außerordentlich gute Einbindung des Fraunhofer IPM in Netzwerke aus Forschungseinrichtungen und Partnern aus der Industrie trägt zudem zum Ergebnistransfer bei. Fraunhofer IPM wird die Projektergebnisse nutzen, um industrielle Anschlussprojekte zu generieren und die Technologie thermoelektrische Generatoren für die Verstromung von Abwärme zu verwenden und weiter voranzutreiben.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Die gesammelten Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden bei verschiedenen Fachtagungen vorgestellt:

- [1] Kilian Bartholomé, Vortrag: Thermoelectric modules built with new high-temperature materials, IAV Tagung: 4th Thermoelectrics Conference Utilizing Waste Heat in Transport and Industry, 10.–12. Dezember **2014** in Berlin.
- [2] J. Horzella, K. R. Tarantik, J. König, K. Bartholomé, J. Heuer, *Waste heat recovery in stationary systems: cogeneration power plant*, auf der Internationalen & Europäischen Thermoelektrik Konferenz ICT & ECT 2015 im Juli **2015** in Dresden
- [3] Karina Tarantik, Martin Kluge, Kilian Bartholomé, Eugen Geczi, Uwe Vetter, Marc Vergez, Ulrike Nussel, Katrin Schnürle, Jan König; Vortrag: *Reproducibility and Reliability in Manufacturing Thermoelectric Modules based on half-Heusler Compounds*, 35th International Conference & 1st Asian Conference on Thermoelectrics (ICT/ACT 2016) vom 29. Mai bis 2. Juni **2016** in Wuhan, China,.
- [4] Karina Tarantik, Kilian Bartholomé, Jana Heuer, Jan Horzella, Martin Jäggle, Martin Kluge, Jan König; Vortrag: *Survey of thermoelectric modules for waste heat recovery and opportunities due to thermoelectric downsizing*, Int. Workshop „Thermoelectrics riding the waves: A voyage from fundamentals to applications“ vom 12. bis 16. September **2016** in Norwegen.
- [5] Martin Kluge, Karina Tarantik, Kilian Bartholomé, Jana Heuer, Jan Horzella, Martin Jäggle, Jan König; Vortrag: *Reproducibility and Reliability in Manufacturing New High-Temperature Thermoelectric Modules*, 1. ETA-Tagung zu „Energie- und Thermomanagement, Klimatisierung, Abwärmenutzung“ vom 1. bis 2. Dezember **2016** in Berlin.
- [6] Jan König, Martin Kluge, Kilian Bartholomé, Jana Heuer, Jan Horzella, Uwe Vetter, Marc Vergez, Karina Tarantik; Vortrag: *Thermoelectrics on the way to mass production*, VDI Tagung „Thermische Rekuperation in Fahrzeugen“ vom 26. bis 27. Januar **2017** in Sindelfingen.
- [7] Jan König, Uwe Vetter, Marc Vergez, Eugen Geczi, Martin Briem, Karina Tarantik, Martin Kluge, Kilian Bartholomé: *Semi-automated fabrication of thermoelectric high-temperature modules*, 36th International Conference on Thermoelectrics (ICT2017) vom 31. Juli bis 3. August **2017** in Pasadena, USA.
- [8] Jan König, Uwe Vetter, Marc Vergez, Eugen Geczi, Martin Briem, Karina Tarantik, Martin Kluge, Kilian Bartholomé: *Half-Heusler Modules Produced By Lab-Scale Fabrication*, Second Stuttgart Workshop on Thermoelectrics SWT 2017 am 8. August **2017** in Stuttgart.
- [9] Jan König, David Bach, Kilian Bartholomé, Martin Briem, Eugen Geczi, Martin Kluge, Patrick Ringwald, Karina Tarantik, Uwe Vetter, Marc Vergez, Markus Winkler, Olaf Schäfer-Welsen: *Strom aus (Ab-)Wärme: Anwendungen und Perspektiven der Thermoelektrik*; Symposium: LaMa meets Industry - Aus dem Labor in die Industrie, am 28. Februar **2018** in Gießen.
- [10] Jan König, Vortrag: *Strom aus Abwärme*, VDI-Workshop am 26. April **2018** in Freiburg.
- [11] Jan König, David Bach, Martin Kluge, Karina Tarantik, Uwe Vetter, Patrick Ringwald, Eugen Geczi, Martin Briem, Manuel Näher, Marc Vergez, Kilian Bartholomé, Olaf Schäfer-Welsen: *Thermoelectric waste heat recovery, 5th Int. Conference Low Temperature and Waste Heat Use in Communal and Industrial Energy Supply Systems with a special session “Waste Heat Recovery Systems on Ships”* vom 25. bis 26. Oktober **2018** in Bremen.
- [12] Jan König, Vortrag „*Thermoelectric waste heat recovery*“ auf der 2. ETA-Tagung zu „Energie- und Thermomanagement, Klimatisierung, Abwärmenutzung“ vom 22. bis 23. November **2018** in Berlin.
- [13] David Bach, Vortrag „*Strom aus Abwärme – thermoelektrische Generatoren für energieeffizientere Blockheizkraftwerke*“ auf dem bioenergie-Kongress am 29.03.**2019** in Offenburg.

- [14] Jan König, Vortrag „Recent developments on half-Heusler based thermoelectric modules for waste heat recovery “auf der Tagung der European Materials Research Society im April **2019** in Nice, Frankreich.
- [15] Jan König, Vortrag „Effizienzsteigerung von BHKWs durch thermoelektrische Stromerzeugung“ auf der Jahreshauptversammlung der Deutschen Thermoelektrik Gesellschaft e.V. am 28. November **2019** in Stuttgart

Führungen:

Am 12.10.18 wurde in FR-Landwasser das Projekt im Rahmen einer Führung für das Gremium des Badenova Innovationsfonds vorgestellt. Hierbei wurden die aktuellen Ergebnisse und der in den Abgasstrang des BHKW integrierte TEG gezeigt.

23.10.18: Vorstellung des Projektes im Rahmen einer Veranstaltung mit der Handwerkskammer Freiburg – Energietour am Fraunhofer IPM

20./21.03.19: Vorstellung des Projektes im Rahmen des Industrie-Workshop Thermoelektrik 2019 am Fraunhofer IPM

6 Zusammenfassung/Fazit

Im Rahmen dieses Projektes wurde erstmalig erfolgreich der Einsatz von Hochtemperaturtauglichen thermoelektrischen Modulen auf Basis von Halb-Heusler-Legierungen im Abgasstrang eines BHKW demonstriert. Die eigens vom IPM entwickelten Module wurden in einem neuartigen thermoelektrischen Generator (TEG) eingesetzt, der sich besonderes durch seinen modularen Aufbau auszeichnet. Es wurde ein Design entwickelt, bei dem mehrere thermoelektrische Generatorstufen zum Einsatz kommen, die wiederum in mehreren Strängen parallelgeschaltet werden. Dies ermöglicht eine gute Anpassung an die Massen- und Abgaswärmeströme eines BHKW. Dabei stand im Vordergrund, einen möglichst großen Anteil der vorhandenen Abgasenergie durch die thermischen Module zu leiten und in elektrischen Strom zu wandeln. Um eine optimale Anpassung der thermoelektrischen Module an die Heißeitentemperaturen bzw. Abgastemperaturen zu erreichen, wurden für die insgesamt vier Stufen des TEG unterschiedliche thermoelektrische Materialien eingesetzt, um eine möglichst hohe Wandlungseffizienz zu erreichen. Um diese auszulegen, wurden geeignete Simulationsmodelle aufgebaut, welche mit Prüfstandsversuchen verglichen wurden.

Der Generator der ersten Generation wurde dafür konzipiert einen Teilmassenstrom des Abgasstroms zu nutzen und war mit einer Vielzahl von Temperaturmessstellen ausgestattet. Dies ermöglichte es, einen guten Abgleich zu den erstellten Simulationsmodellen zu schaffen und so die Systemauslegekompetenz zu verbessern. Es konnte gezeigt werden, dass die am Heißluftprüfstand am Fraunhofer IPM generierte Leistung in der realen Anwendung reproduziert werden konnte. Es wurde beim Betrieb im Teilmassenstrom ein Wärmestrom von ca. $4,6 \text{ kW}_{\text{th}}$ in das Kühlsystem des TEG geleitet. Die erzielte thermoelektrische Leistung betrug dabei ca. $100 \text{ W}_{\text{el}}$. Der thermoelektrische Wirkungsgrad im System lag somit bei ca. 2,1 %.

Mit Hilfe der in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurde ein optimierter TEG der zweiten Generation innerhalb des Projektes TE-BHKW entwickelt, gebaut und am BHKW in Landwasser getestet. Unter den vorherrschenden, nicht optimalen Betriebsbedingungen (Volllast Motor, Abgastemperatur am Eingang des TEG ca. 540 °C, Kühlwassertemperatur am Eingang ca. 65 °C) konnte eine elektrische Leistung von etwa 550 W_{el} erreicht werden. Gegenüber dem TEG der ersten Generation konnte die mittlere thermoelektrische Wandlungseffizienz im System auf etwa 3 % gesteigert werden. Die elektrische Leistungssteigerung des BHKW betrug ca. 1,1 %. Da die Abgastemperatur des Motors ca. 40 K unterhalb der spezifizierten Temperatur von 620 °C lag, konnte das volle Potential des TEG in dieser Anwendung nicht ausgeschöpft werden. Simulationsergebnisse lassen den Schluss zu, dass unter diesen Auslegungsbedingungen eine Leistungssteigerung im Bereich von etwa 1,6 % möglich wäre.

Der durchgeführte Langzeittest zeigte, dass der TEG der zweiten Generation über einen Zeitraum von mehr als 1000 Betriebsstunden keine Leistungsreduktion aufweist und die TEM somit keine nennenswerte Alterung erfuhren. Somit konnte die Technologie erfolgreich in der realen Anwendung demonstriert werden. Gleichzeitig ergab sich nach erfolgreicher Inbetriebnahme abgesehen von Routineprüfungen kein Wartungsaufwand am TEG-System. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Betrieb des BHKW durch die Integration eines TEG-System nicht negativ beeinflusst wird. Im Falle des Demonstrators bleibt jedoch anzumerken, dass im Vergleich zum konventionellen Abgaswärmetauscher ein größerer Anteil nutzbarer Wärmeenergie im Abgasstrom enthalten blieb. Dies lässt sich jedoch durch die Nachschaltung einer zusätzlichen Wärmeübertragerstufe ohne TEM vermeiden. Eine zusätzliche thermoelektrische Stufe nachzuschalten, ist aus wirtschaftlicher Sicht nicht zielführend, da aufgrund der niedrigen Abgastemperaturen von etwa 200 °C nur eine geringe Umwandlungseffizienz aus physikalischen Gründen möglich sind.

Bei den im Bericht beschriebenen TEG handelt es sich um Demonstratoren, die bezogen auf die Zielkosten für den Einsatz im BHKW noch nicht wettbewerbsfähig sind bzw. in diesem Entwicklungsstadium nicht wirtschaftlich eingesetzt werden können. Aufgrund von Skalierungseffekten (Stückzahlenerhöhung) und Optimierungen von Fertigungsschritten bestehen jedoch noch große Kostenreduktionspotentiale.

Mit der Integration von neuartigen thermoelektrischen Modulen in den Wärmetauscher eines BHKW konnte der elektrische Wirkungsgrad gesteigert werden und damit das zentrale Ziel des Projektes erreicht werden.

7 Anlage: Projekterkenntnisse

Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.

(Je Punkt maximal 300 Zeichen.)

1.	Thermoelektrische Module zur Abwärmeverstromung sind verfügbar und einsatzbereit für Anwendungen
2.	Thermoelektrische Module haben ein hohes TRL-Level erreicht und es waren während des Testbetriebs in der realen Anwendung keine Alterungseffekte ersichtlich. Ein Betrieb über 1000 h konnte ohne technische Probleme und ohne Leistungsreduktion nachgewiesen werden.
3.	Systemintegrationskonzept von thermoelektrischen Modulen in Anwendungen ist entscheidend für Wirkungsgrad und Rol.