

**ZE:**

SCHEER Heizsysteme & Produktionstechnik GmbH  
Chausseestraße 16  
25797 Wöhrden

**Förderkennzeichen:**

**03SX564A**

**Vorhabenbezeichnung:**

ThermoMarE: Fortschrittliche Thermoelemente-Technologie für hybride maritime Heizsysteme unter Einbeziehung elektrischer Batterietechnik

**TP 1: SCHEER:**

Fortschrittliche Thermoelemente-Technologie für hybride maritime Heizsysteme kombiniert mit elektrischer Batterietechnik, Teilprojekt „Systemintegration der Thermoelektrischen Generatoren“

**Laufzeit des Vorhabens:**

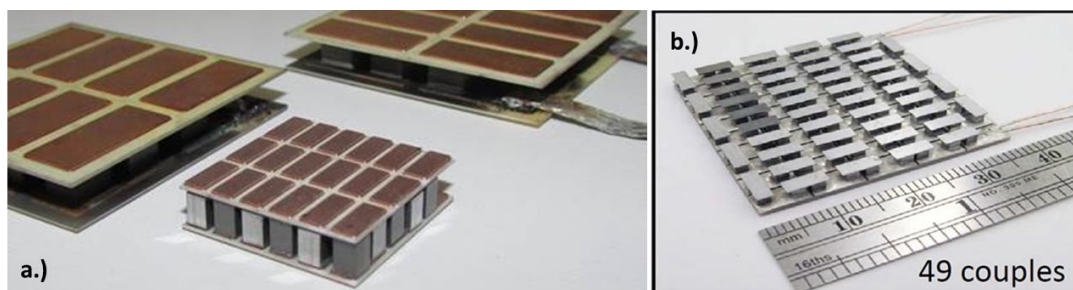
01.07.2022 bis 31.10.2025

## I. Einführung

### I.1 Aufgabenstellung und Voraussetzung des Vorhabens

**Energieeffiziente Systeme** in den Bereichen Energieerzeugung und Energieverbrauch sind von herausragender Bedeutung für die Erreichung der Energie- und Klimaziele (<http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/europaeische-energie-klimaziele>). Im maritimen Bereich werden gezielte Lösungen gefragt, die den besonderen Bedingungen der Branche in Deutschland gerecht werden.

**Thermoelektrische Generatoren (TEG)**, die aus **thermoelektrischen Modulen (TEM)** aufgebaut werden, wandeln durch den Seebeck-Effekt, einen Festkörpereffekt halbleitender Funktionsmaterialien, Wärme z.B. aus Verbrennungsvorgängen und Produktionsprozessen direkt in elektrische Leistung. Ohne den Umweg über mechanische Bewegung oder eine andere Energieform gelten TEG als praktisch wartungsfreie und damit als äußerst robuste Energiequellen. Die elektrische Leistung kann über geeignete Spannungsanpassungen oder Batterien einen oder mehrere Verbraucher direkt mit elektrischer Energie versorgen.



**Abbildung 1:** a.) Prototypische TEG-Module für den Hochtemperatureinsatz auf Basis von Skutterudit (DLR). b.) Thermoelektrisches Generatormodul bestehend aus 49 Doppelschenkeln [Venkatasubramanian2012].

**Maritime Heizsysteme** können elektrisch oder mit fossilen bzw. regenerativen Brennstoffen (flüssig oder gasförmig) betrieben bzw. hybrid aus beiden Quellen gespeist werden. Wegen der Mobilität ist **elektrische Energie an Bord** lediglich über Batterien **eingeschränkt oder mit hohen Energieverlusten** über Elektrogeneratoren (Hilfsmotoren) **verfügbar**. Die Nutzung der Abwärme von Verbrennungsmotoren zur Beheizung und Erwärmung von Frischwasser ist ökonomisch und ökologisch sinnvoll und wird bei einigen Schiffen an Bord praktiziert. Aufgrund der oftmals langen Hafentiegezeiten bei abgeschalteten Hauptantrieben ist dieser Weg der Beheizung jedoch nicht dauerhaft möglich. Elektrische Energie wird allerdings durchgehend zum Betrieb der Komponenten des Heizsystems (Luftgebläse, Ölpumpenmotor, Ölvorwärmer, Zündtrafo, Regelungselektronik usw.) und für den Betrieb von Komponenten der Hydraulik (z.B. Heizwasserpumpen usw.) benötigt. Die dafür erforderliche elektrische Energie wird je nach Betriebszustand von den Batterien des Schiffes, von E-Generatoren oder als Landstrom bereitgestellt. Batterien besitzen naturgemäß eine sehr begrenzte Kapazität, die E-Generatoren den Nachteil einer geringen Effizienz und Geräuschbelastung und der Landstrom ist räumlich (Standort) limitiert. In einigen Fällen wird der Landstrom – soweit dieser verfügbar ist – auch zur Beheizung genutzt. Dies ist allerdings kostspielig (bis zu 50 €-Cent pro kWh) und die Auslegung der Anschlüsse an den Pieren ist für hohe Leistungen meist nicht ausreichend.

Gerade bei Schiffen und Yachten ab einer Größe von ca. 10 m und wenn die Abwärme von laufenden Motoren nicht dauerhaft oder nicht ausreichend vorhanden ist, bzw. elektrische Hilfsmotoren nicht vorhanden sind, werden für die Beheizung Wasserheizgeräte mit flüssigen Brennstoffen (z.B. mit Diesel oder alternativen synthetischen Brennstoffen, wie GTL o.ä.) eingesetzt. Die **für den Betrieb der Heizsystemkomponenten erforderliche elektrische Energie** wird von der Batterie gespeist.

Bei Schiffen mit einer Länge von bis zu 30m, bei Binnenschiffen und bei Schiffen mit einem höheren Warm-Frischwasserbedarf (z.B. bei Fahrgastschiffen mit mehreren mit Duschen ausgestatteten Kabinen) sind mit flüssigen Brennstoffen betriebene Wasserheizsysteme stark verbreitet.

**Von elektrischer Energie unabhängige Heizsysteme sind in der maritimen Branche gefragt. Heizsysteme, ausgestattet mit einer thermoelektrischen on-board-Elektrizitätserzeugung sind somit sinnvoll und können die Abhängigkeit von Batterien, von E-Generatoren sowie vom Landstrom weitgehend reduzieren oder vollständig eliminieren.**

**Hauptzielgruppe des ThermoMarE-Projektes sind** insbesondere Spezialeinheiten, wie z.B. Arbeitsschiffe, Lotsenschiffe, Offshore-Versorger, Yachten und Segelschiffe, Solar- und Windschiffe u.v.a. Darüber hinaus sind Binnenschiffe eine weitere Zielgruppe des ThermoMarE-Projektes, bei denen derzeit etwa ein Viertel mit älteren und stark umweltbelastenden Heizsystemen betrieben wird, da an einigen Schiffsbereichen (z.B. von der Schiffsbrücke entfernten Bereichen) keine elektrische Versorgung zum Betrieb der elektrischen Komponenten der Diesel-Heizungen vorhanden ist.

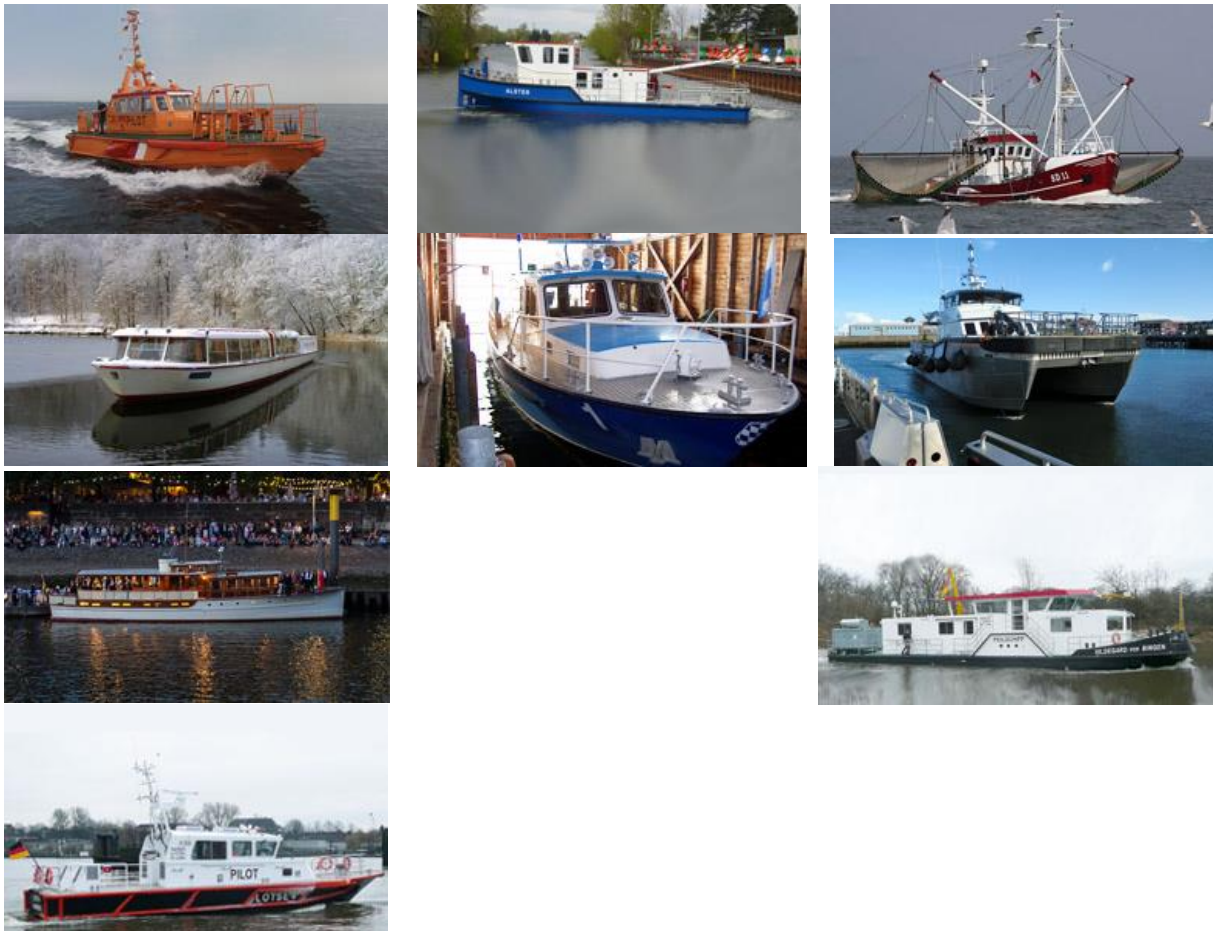


Abbildung 2: Darstellung verschiedener Schiffstypen, welche derzeit mit SCHEER-Heizsystemen des energieeffizienten Typs blue efficiency® ausgestattet sind und für die eine projektrelevante TEG-Integration zielführend ist.

Erforderlich sind somit **autarke Lösungen**, bei denen die elektrische Energieversorgung der Heizsysteme mit dem primären Nutzen der thermischen Leistungsabgabe zeitlich und technisch korreliert. **Überschüssige elektrische Energie soll in Batterien gespeichert** und später z.B. beim Start des Brenners genutzt werden. Durch TEG werden die verschiedenen Energiearten optimal aufeinander abgestimmt genutzt. Derartige Heizsysteme sind im Rahmen des ThermoMarE-Projektes zu entwickeln und in die maritime Betriebspraxis zu integrieren. Hauptziel des Vorhabens ist es, den elektrischen Energiebedarf des Heizsystems in einer Größenordnung 100 W durch einen thermoelektrischen Generator zu decken. Dafür sollen zu Beginn des Projektes verschiedene Einbaupositionen für den TEG untersucht und systemisch optimiert werden.

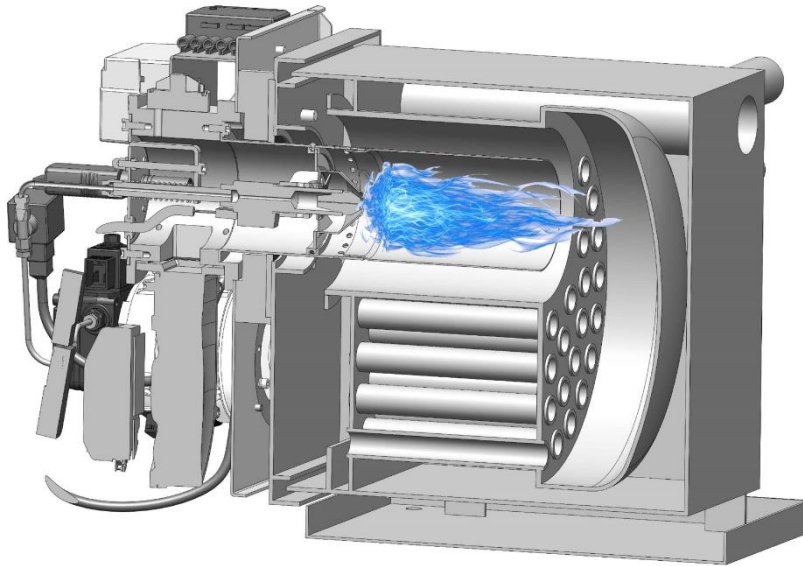


Abbildung 3: Schnittansicht durch Brenner und Kessel eines im maritimen Umfeld eingesetzten Heizgeräts.

Das Spektrum der im Heizkessel herrschenden Temperaturen ist sehr breit gefächert. Die am TEG wirkenden Temperaturen können je nach Einbauposition zwischen 250°C am Abgasausgang und 900°C an der ersten Abgasumlenkung betragen. Neben den Temperaturbedingungen sind allerdings auch das Platzangebot und der erforderliche Materialeinsatz zur Erzielung hoher thermischer Leistungsdichten entscheidende Auswahlkriterien für die Installationsorte von TEG. Zentrales Ziel ist die Erreichung der Heizsystemautarkie mittels eines wirtschaftlich tragfähigen Konzepts für die Implementierung der TEGs. Eine optimierte Systemauslegung für die Installation von TEGs könnte eine über die Leistungsanforderung des Heizsystems hinausgehende Leistungsabgabe des TEG um ca. 50 W bei 10 kW Heizleistung, zunehmend bei höherem Heizbedarf an Bord, ermöglichen. Dies wird im Rahmen der Optimierung des TEG-Designs und der Wärmetauscher-Auslegung innerhalb der zweiten Projektphase angestrebt.

## I.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt unterteilt sich in **8 Arbeitspakete** (AP), siehe Abbildung 14. AP1 und AP8 umfassen übergeordnete Aufgaben, welche sich im weitesten Sinne der Anforderungsanalyse zu Beginn des Projekts, dem fortlaufenden Projektmanagement, sowie der Ergebnissynthese zum Projektende hin widmen. Alle anderen Arbeitspakete werden wie folgt einzelnen Teilvorhaben zugeordnet:

- Projektbereich 1: Integration und Erprobung einer Technologie für thermoelektrische Generatoren (TEG) für hybride maritime Heizsysteme unter Einbeziehung von TEG (ThermoMarE - Heizsystem Demonstrator I) mit AP3.1, AP4.1, AP6.1
- Projektbereich 2: Optimierung des elektrischen Energiebedarfs des Heizsystems und Anpassung von Wechselrichter- und Batterie-Technologien für TEG unter

Betriebsbedingungen hybrider maritimer Heizsysteme (ThermoMarE - Elektrik) mit AP2

- Projektbereich 3 Bereitstellung fortschrittlicher und systemangepasster TEG-Technologie und Integration in maritimen Heizsystemen (ThermoMarE –TEG) mit AP4.2, AP5, AP6.2
- Projektbereich 4 Integration und Erprobung von TEG für maritime Heizsysteme (ThermoMarE – Heizsystem Demonstrator II) mit AP3.2, AP4.2, AP6.2

Die Vernetzung einzelner Arbeitspakete und zeitliche Darstellung kann dem Vernetzungsschema (Abschnitt V.1) sowie dem Arbeitsplan (Abschnitt III.3) entnommen werden. Nachfolgend werden einzelne AP detailliert beschrieben.



Abbildung 4: Überblick zu den Arbeitspaketen mit Darstellung des jeweils hauptverantwortlichen Partners und stichpunktartiger Inhaltsangabe.

### AP1 Anforderungen und Spezifikationen (SCHEER)

1. Projektphase
  - Definition Konstruktionsprinzipien Wärmetauscher und TEG (verschiedene Einbaupositionen im Heizsystem)

- Definition Lastenheft
- Thermische Ist-Analyse des Heizsystems durch CFD-/ FEM-Simulation

**AP2: Elektronik Heizsystem (SCHEER)**

1. Projektphase

- Konzipierung, Entwicklung und Erstellung eines Prototyps für die Regelung des gesamten Heizsystem inkl. der Fernüberwachung sowie des Monitorings der Ladevorgänge (Unterauftrag)
- Optimierung des el. Leistungsbedarfs des Heizsystems (zur Maximierung des TEG-Leistungsüberschusses in zweiter Demonstratorphase)
- Konzeption Leistungselektronik
- Regelung
- Sensorische Instrumentierung

**AP3: Teststand (SCHEER)**

- Projektphase
- Aufbau eines Heizsystems zur Modifikation des elektrischen Systems (AP2) als Teststand

Innerhalb der abschließenden 6 Monate von Projektphase I wird der Teststand erprobt. SCHEER führt Tests des Gesamtsystems unter maritimen Bedingungen insbesondere hinsichtlich Temperaturen, Start- und Stopp-Bedingungen durch. Darüber hinaus liegt der Schwerpunkt auf den Tests des Pakets WT+TEM unter Extrembedingungen, wie max. Temperatur oder schnelle Zyklisierung, um die Qualität der Kopplung und Funktion im System für Langzeitprognosen in Bezug auf Produktzuverlässigkeit zu untersuchen.

Ergebnis der ersten Projektphase: Der Teststand wird zu Demonstrator I mit bekannten Leistungskennlinien, Degradationsverhalten (Kurzzeit) und verbleibt bei SCHEER für Langzeittests (Degradationsverhalten Langzeit) und Ermittlung von lessons learned für den Aufbau des verbesserten Demonstrators II in Phase II.

**Bewertungskriterium am Ende von Phase 1 ist der Nachweis der Funktionalität des Demonstrators I unter maritimen Bedingungen (Meilenstein).**

AP3 wird in der zweiten Projektphase wiederholt durchgeführt in Bezug auf den WT- und elektrischen Arbeitsbereich, allerdings mit geänderter Zielsetzung der Entwicklung von WT II mit optimierten TEM. Der Ablauf erfolgt hier im gleichen Schema: 12 Monate Aufbau, 6 Monate Tests des dann finalen Gesamtsystems Demonstrator II.

**AP4: Wärmetauscher (SCHEER)**

1. Projektphase:

- Konstruktion des in AP1 beschlossenen Konzepts für WT I
- Montage aller Komponenten (Wasserführung, TEM-Integration, Wärmetauscher, Kopplung)
- Test der Teilkomponenten
- Konzeption der Wasserführung
- Konzept zur Kompensation der Wärmeübertrager-Ausdehnung aufgrund von Temperaturänderungen
- Entwicklung eines Systems zur Erzeugung eines konstanten Anpressdruckes der TEM
- Thermische Auslegung der Wärmeübertrager

2. Projektphase:

- Analoges Vorgehen zur 1. Projektphase für WT II

**AP5: TEM-Entwicklung (Isabellenhütte)**

1. Projektphase:

- Auslegung und Konstruktion der TEM für Teststand I und Demonstrator I anhand Lastenheft aus AP1
- Bereitstellung angepasster TEM für DLR Untersuchungen (Bestimmung Materialeigenschaften für Verbesserung der Isabellenhütte Modellparameter),
- Anpassung des TEM-Designs für WTII basierend auf AP6-Modellierung und Erfahrung aus Demonstrator I, Layoutentwicklung und Designfreeze
- Erprobung erster Muster mit angepasstem Design (Zielsetzung: mit Beginn der zweiten Phase stehen Funktionsmuster für die Umsetzung der dann startenden Arbeiten zu WTII (AP4), Modifikation des Teststands, und für weitergehende Untersuchungen am DLR zur Verfügung)
- Aufbau und Bereitstellung TEM Muster für Teststand und Demonstrator II

2. Projektphase:

- Musterbau - Aufbau von Qualifizierungsmustern
- Ggf. Redesign mit Erkenntnissen aus der Bauteilqualifizierung, finaler Designfreeze
- Musterbau - Aufbau von Qualifizierungsmustern B2-Mustern für Teststände und Demonstrator II Post Mortem Analyse

**AP6: Modultests, AVT, Simulation (DLR)**

1. Projektphase:

- DLR: Simulation der thermischen Verhältnisse im Heizsystem für Konstruktion des WTI und des WTII (Vorarbeit für zweite Projektphase und daran anzulehnende Design-Anpassung der weiteren TEM).
  - Abgleich der Randbedingungen mit experimenteller Bestimmung des Ist-Zustandes aus AP1 (SCHEER)
  - Isabellenhütte: Vorbereiten / anpassen von Simulationsmodellen (Performance und Thermomechanik)
  - Isabellenhütte: Simulation der Performance mit Schwerpunkt auf Effekten der Thermomechanik
  - TEM-Design Auslegung für TEM: Optimierte Schenkellängen und Füllgrade der TEM werden in Kooperation mit der Isabellenhütte ausgearbeitet. Die Eingangsdaten für die Modellierung des TEM-Designs stammen zunächst aus der Analyse des thermischen Ist-Zustandes (AP1) und werden im Fortgang des Projekts sukzessive durch experimentelle Datensätze der Teststände (AP3) erweitert. Simulationen des DLR konzentrieren sich auf Berechnungen der TEM-Leistung und des Wirkungsgrades für verschiedene Modulauslegungen unter Berücksichtigung der thermischen Verhältnisse und von Kontaktwiderständen (Breites Parameterfeld, Sensitivitäten in der Systemauslegung). Die Daten werden an die Isabellenhütte weitergegeben um das finale Layout-Design zu fixieren und über Simulationen letzte Anpassungen des TEM-Designs vor dem Hintergrund der fertigungstechnischen Randbedingungen vorzunehmen.
  - DLR: Die Prüfung der Stabilität von TEM in schnellen Zykliererperimenten (höhere Zyklenzahlen als Teststände I&II) zur Bewertung von TEM.
  - Isabellenhütte: Untersuchungen zur Technologiereife / Eignung im maritimen Umfeld (AVT, Degradation bei Thermoschock etc.)
  - Isabellenhütte: Anpassung der AVT (Modulankopplung etc.)
  - DLR: Prüfung von TEM unter variablen Belastungssituationen (Temp.- und Powercycling) sowie Präzisionsmessungen der TEM-Eigenschaften
  - DLR: Studien zur Modulankopplung (Eingangsdaten aus AP4) zur Bestimmung der Qualität und Stabilität der thermischen Modulkopplung für WTI.
  - Aufbau und Verbindungstechnik zur Kaltseitenanbindung der TEM an Wärmetauscher (Isabellenhütte) und thermische Tests an Verbänden (DLR)
2. Projektphase:
- DLR: Fortsetzung der Stabilitätsprüfung an Design-angepassten TEM (AP5) in schnellen Zykliererperimenten (höhere Zyklenzahlen als Teststände I&II).

- DLR: Untersuchungen an zyklerten TEM im vorher/ nachher Vergleich unter Einbeziehung von Sondenmessmethoden zur Ermittlung der elektrischen Übergangswiderstände und Verteilung des Seebeck-Koeffizienten.
- DLR: EDX Untersuchungen zur Elementverteilung an Schenkelgrenzflächen (Kontakte, Grenzflächen) zur Aufklärung des Degradationsprozesses bei beobachteten Eigenschaftsveränderungen und Interpretation von integral ermittelten Moduleigenschaften während der Charakterisierung von TEM
- DLR: Studien zur Modulankopplung (Eingangsdaten aus AP4) zur Bestimmung der Qualität und Stabilität der thermischen Modulkopplung für WTII.
- DLR/Isabellenhütte: Simulation der thermischen Verhältnisse und der TEM-Leistungsfähigkeit bei Einsatz Design-optimierter TEM. Ermittlung von Optimierungspotentialen und Tests unter variierenden Randbedingungen bei Berücksichtigung fertigungstechnischer Rahmenbedingungen.

**AP7:** Demonstratoren (SCHEER)

1. Projektphase

- Nach Entwicklung und Erprobung des Teststands erfolgt die Zusammenführung aller Systemupdates (Hardware, Elektrik, Software) in einem Demonstrator I bei SCHEER. Der Teststand wird zu Demonstrator I und durchläuft während der letzten Projektphase Langzeittests. Hierbei erfolgt ein Abgleich mit dem ermitteltem Degradationsverhalten aus der TEG-Charakterisierung (AP 6), Sammeln von Erfahrungswerten zur Modifikation der Komponenten für Aufbau Demonstrator II

2. Projektphase:

- Tests an Demonstrator I, wie oben beschrieben.
- AP7 sammelt somit die Ergebnisse/Aufbauten des Teststands aus AP3. Neben der Durchführung von weitergehenden Tests, sind hier jedoch keine wirklichen technischen „Arbeiten“ untergebracht. AP7 dient vielmehr der Projektstrukturierung und der Festlegung der Produktionsmethoden. Aufgrund dessen, dass SCHEER verantwortlich für das Gesamtsystem „Heizsystem“ ist, spiegelt dies auch die spätere „Zulieferer-Struktur“ von SCHEER und Isabellenhütte wider.

**AP8:** Controlling und Synthese (SCHEER)

- Projektkoordination (SCHEER): Kommunikation Projekt – Projektträger
- Sicherheitstechnische Untersuchung (Unterauftrag DEKRA) und Überprüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (Unterauftrag CeCert)
- Berichte und Verbreitung (alle): Zwischenberichte, Meetings, Konferenzen, Messen, Fachgremien, Publikationen
- Ergebnis-Synthese (alle): Zusammenstellung aller Systemdaten aus Tests und Messungen, Erstellung einer Systemdokumentation, Vorbereitung der Zulassung,

Erstellung Datenblatt und Produkt-Prospekte, Anmeldung Schutzrechte, Verträge mit Zulieferern und Partnern, etc.

- Erstellung einer Technologie-Roadmap: Ausgehend von Projektergebnissen, Identifikation benötigter Anslusstechologien, Darstellung der Systemsensitivitäten auf Basis von Projektdaten z.B. el. Ausgangsleistung vs. Gasdurchsatz, Leistung Heizsystem vs. Spezifikationen von TEM, WT & Leistungselektronik. Identifikation von Verbesserungspotenzial und benötigter Anslusstechologien. Beantragung von Folgeprojekten.

**Ergebnis zum Ende von Phase 2: Optimierter, gut untersuchter und dokumentierter Demonstrator II – Vermarktungsnah und marktorientiert entwickelt.**

### **I.3 Stand der Wissenschaft und Technik**

Folgende Aspekte des Standes der Wissenschaft und Technik werden im Vorhaben besonders berücksichtigt:

- Die Funktion von TEG wurde bislang im Temperaturbereich bis ca. 300 °C nur in einigen terrestrischen Produktanwendungen demonstriert. Für diesen Temperaturbereich sind Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>-basierte TEM am Markt erhältlich, liegen jedoch nicht mit einem an das System angepassten Design vor.
- Der Projektpartner Isabellenhütte hat ihr automatisierbares und keramikfreies TE Modulkonzept auf Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> übertragen und ist damit in der Lage technisch verbesserte Niedertemperatur Module auf Systembedingungen anzupassen, herzustellen und wirtschaftlich zu bewerten.
- Für den Hochtemperaturbereich (T ~ 600°C) stehen mit den Halb-Heusler Materialien erstmals industriell herstellbare Thermoelektrika zur Verfügung [VAC2020], [Isabellenhütte2018]
- Für den Hochtemperaturbereich (T ~ 600°C) erscheinen gegenwärtig erste Prototypen und Kleinstserien verschiedener Hersteller auf dem Markt, welche auf unterschiedlichen thermoelektrischen (TE) Materialsystemen basieren und sehr verschiedene technologische Reifegrade aufweisen. Die Isabellenhütte verwendet für ihre Hochtemperaturmodule die weltweit ersten und bisher einzigen mit industriellen Herstellungsverfahren produzierten Schenkel aus Halb-Heusler Material.

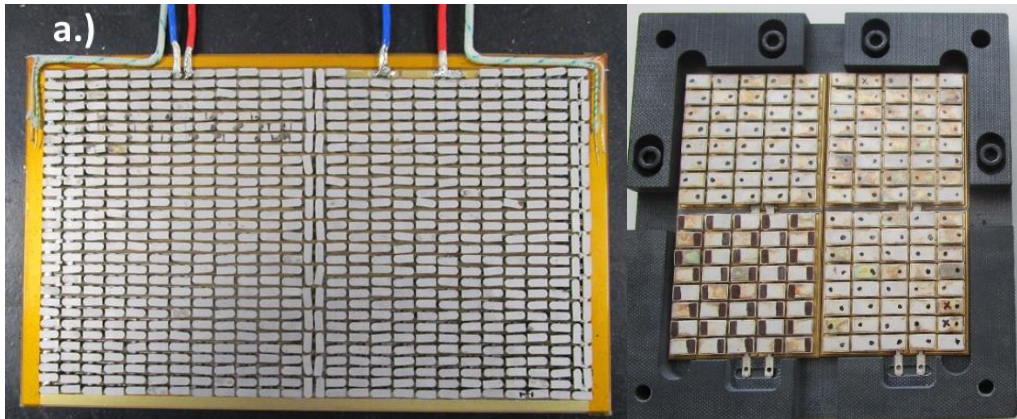


Abbildung 5: Thermoelektrische Hochtemperatur-Generatormodule auf Basis von Halb-Heusler Legierung. 750 Schenkelpaare auf 130 x 80 mm<sup>2</sup> (a), 380 Schenkelpaare auf 100 x 100 mm<sup>2</sup> (b) [Isabellenhütte 2020]

- Detaillierte Untersuchungen zur Lebensdauer von TEG-Modulen und zu relevanten Schädigungseffekten wurden bislang wenig durchgeführt bzw. sind nicht bekannt. Dies bezieht sich nicht nur auf Untersuchungen im speziellen Anwendungskontext maritimer Heizsysteme, sondern trifft im Allgemeinen für TEM für höhere Anwendungstemperaturen zu. Solche Untersuchungen sind jedoch unerlässlich zur Bewertung des Dauereinsatzes und des technisch-ökonomischen Potentials. In den Jahren 2021 bis 2024 werden im vom BMWI geförderten Projekt RecycleTEAM von der Isabellenhütte an kleinen Modellmodulen durchgeführt, dessen Erkenntnisse nunmehr für das ThermoMarE Projekt genutzt werden. Zu diesem Zweck werden im dortigen Projekt Prüfplatz-Kapazitäten geschaffen. Solche Lebensdauer-Untersuchungen müssen für jeden neuen Modultyp im Rahmen einer Designvalidierung oder Qualifizierung durchgeführt werden. Vorhandene Prüfplätze werden für das ThermoMarE-Projekt genutzt und so auf die spezifischen Eigenarten (Geometrie, elektrische Kenndaten, thermische Eigenschaften) eines jeden Modul Typ angepasst. Darüber hinaus werden im Projekt Thermomare Prüfungen unter spezifischen maritimen Beanspruchungen wie z.B. Chlorid-Ionen Einwirkung durchgeführt, um die Langlebigkeit der auf maritime Anforderungen angepassten TEM / TEG sicher zu stellen.
- Sowohl für den Niedertemperatur- wie auch Hochtemperaturbereich liegen mit wenigen Ausnahmen keine ausreichenden Informationen zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer von thermoelektrischen Komponenten und ihrer spezifischen Integrationslösungen vor. Diese Ausnahmen betreffen vor allem Lösungen zur Integration von TEM in der Raumfahrt- und Automobilindustrie, welche im Detail jedoch weder bekannt/verfügbar, noch für die maritimen Anwendungsfälle aufgrund abweichender technischer wie ökonomischer Randbedingungen anwendbar sind. Vielmehr müssen TEM und ihre

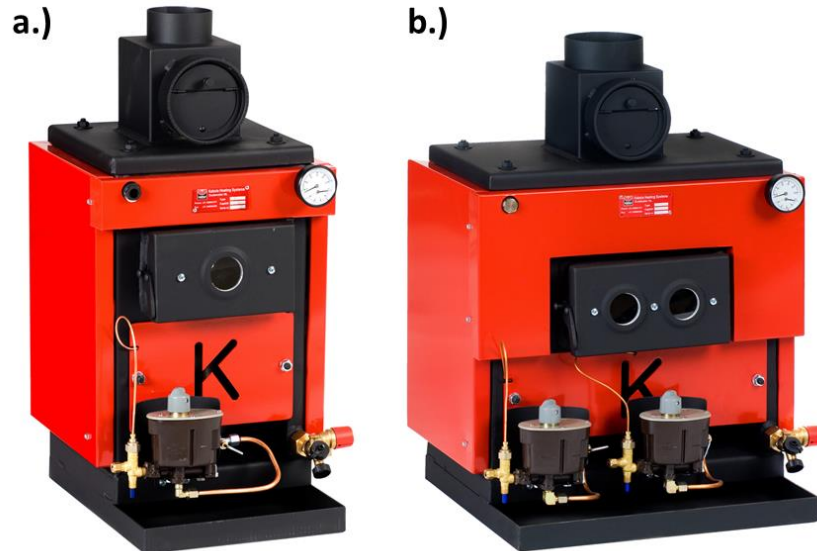
Integrationsweise weiterhin für die maritime Anwendung des heiztechnischen Bereiches individuell auf die gegebenen Randbedingungen angepasst werden. Dies betrifft das Design der TEM (Abmessungen, Anzahl Schenkelpaare, Schenkellänge- und Querschnitt, Füllgrad) und der verwendeten Materialien (E-Modul, Querkontraktionszahl, Oxidationsbeständigkeit, th. Leitfähigkeit, th. Ausdehnungskoeffizient) ebenso wie die Bauweise und die Systemintegration von Wärmetauschern (Durchgangswärmewiderstand, Verbindungstechnik, Beständigkeitstemperatur), TEM einschließlich ihrer thermischen und elektrischen Systemankopplung (Ausgangsspannung, Nennstrom, Leistungsniveau).

- In der wissenschaftlichen Literatur werden für Hochtemperatur-TEM verschiedene thermoelektrische Materialsysteme intensiv untersucht, welche über den Temperaturbereich von etablierten  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ -basierten TEM hinausgehend Anwendungen bis 500 °C und höher erschließen. Aus Sicht der technischen Anwendung erreichen Silizide, Skutterudite, Chalkogenide und Halb-Heusler-Verbindungen attraktive hohe Wirkungsgrade, weisen jedoch spezifische Unterschiede hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit (Temperatur des Leistungsmaximums, Temperaturobergrenzen, Stabilität in verschiedenen Betriebsatmosphären bzw. im Vakuum, thermomechanische Eigenschaften u.a.) und ihres technologischen Reifegrades sowie der praktischen Verfügbarkeit auf. Systementwicklungen, wie sie in dem ThermoMarE-Projekt geplant sind, können nur dann mit Blick auf eine zeitnahe kommerzielle Verwertung erfolgversprechend in prototypischen Demonstratoren umgesetzt werden, wenn die Zulieferung von stabilen TEM sowie deren Design-Anpassung für den maritimen Anwendungsfall der Heizsysteme durch Beteiligung entsprechender Akteure gesichert ist. Die Verfügbarkeit von Halb-Heusler-basierten und an den Anwendungsfall maritimer Heizsysteme angepassten TEM ist durch die Beteiligung des Projektpartners Isabellenhütte gesichert.

Während bei den heiztechnischen Applikationen im home-Bereich von einer ausreichenden Verfügbarkeit elektrischer Energie ausgegangen werden kann, weichen die Rahmenbedingungen im maritimen Bereich davon wesentlich ab. Strom an Bord ist ökologisch und ökonomisch „hochwertiger“ als an Land.

Gegenwärtig werden bei einigen seegehenden Schiffen und Yachten sowie in einem Teil der Binnenschifffahrt Heizsysteme mit einer auf Schwerkraft basierenden Einspeisung des Brenners betrieben (s. Abbildung 6). Derartige Systeme haben den Vorteil, dass die Zirkulation des Heizwassers allein durch die thermisch bedingten Dichteunterschiede und dem davon abhängigen Auftrieb erfolgt und keine Umwälzpumpe, sowie elektrische Energie für deren Versorgung notwendig ist. Dem gegenüber steht eine Reihe von Nachteilen, wie bspw. ein in der Regel geringer Förderdifferenzdruck und geringe Strömungsgeschwindigkeiten, weshalb Strömungswiderstände durch große Nennweiten der Rohrleitungen minimiert werden müssen. Dies führt zu einem gesteigerten Wasservolumen, Materialverbrauch und größeres Gewicht.

Der Wegfall der Zirkulationspumpe kann diese Nachteile bei Betrachtung der Energiebilanz für eine mobile Anwendung im maritimen Bereich nicht kompensieren. Neben einer relativ hohen Trägheit des Systems ist auch die Bereitstellung von Heizwasser mit einer definierten Temperatur bei Schwerkraftheizungen nicht möglich, da aufgrund der Bauweise keine nachgeschaltete Temperaturregelung mittels einen Mischventils möglich ist. Ferner weisen diese Heizsysteme im Allgemeinen einen äußerst geringen Wirkungsgrad von rund 50% auf, da die konvektive Zirkulation nur bei entsprechenden Dichteunterschieden aufrechterhalten werden kann, wozu hohe Systemtemperaturen benötigt werden und Wärmeverluste proportional ansteigen.



*Abbildung 6: Heizsysteme ohne elektrischen Anschluss Kabola E-Serie (a) und S-Serie (b), die auch heute wegen der Unabhängigkeit von der elektrischen Versorgung eingesetzt werden, deren Energieeffizienz allerdings gering ist*

Bei der Pumpen-basierten Heiztechnik wurde in der Vergangenheit die Rolle des elektrischen Energiebedarfs bei der Systemkonzeption unterschätzt. Mit dessen Einbeziehung in die gesamtheitliche Betrachtung im Rahmen des Öko-Designs (ErP-Energielabel-Richtlinie) gerät er zunehmend in den Fokus der Verbraucher und der Hersteller. Die Maßnahmen der EU und insbesondere von Deutschland zur Energieeffizienz betreffen sowohl Heizsysteme allgemein als auch die Einzelkomponenten wie Wasserpumpen, Lüfter/Gebälse usw.

So konnte der elektrische Energieverbrauch der Brenner in den letzten zehn Jahren bei Heizanlagen bis zu 100 kW um etwa 30% reduziert werden und liegt derzeit bei ca. 150 W in der Vorwärmzeit des flüssigen Brennstoffes, reduziert sich auf ca. 90 W während der Brennphase und verbleibt bei ca. 15 W, wenn keine Brenneranforderung besteht. Diese Verbrauchsreduktion konnte erreicht werden, obwohl die Leistungsanforderungen an die Komponenten (z.B. Steigerung der Pressung des Gebläses und der Brennstoffpumpe zur Verbesserung der Verbrennung) stetig erhöht wurden. Die Kombination eines TEG mit einer elektrischen Ausgangsleistung  $\geq 100$  W und einer Batterie zur Pufferung des durch den TEG generierten Leistungsüberschusses während der Brennphase ermöglicht einen voll-autarken Betrieb des Heizsystems in allen Brennerphasen.

Ausgehend von den aktuell erzielbaren Leistungsdichten von TEM der Fa. Isabellenhütte (siehe Abb. 8) und unter Berücksichtigung der abgeschätzten Temperaturen verschiedener infrage kommender Einbauorte des Heizsystems (siehe Abb. 3), werden bei Annahme einer realistischen Wärmestromdichte von  $40 \text{ W/cm}^2$  zur Erreichung der Vollautarkie des Heizsystems (el. Ausgangsleistung der TEG  $\geq 100$  W) Flächen von lediglich  $50 \text{ cm}^2$  (bei  $T \sim 550^\circ\text{C}$ ) bzw.  $110 \text{ cm}^2$  (bei  $T \sim 350^\circ\text{C}$ ) benötigt. Die damit über die TEG zu leitende

Wärmeleistung entspräche 2 kW bzw. 4.4 kW und läge damit bei lediglich 20% bzw. 44% der gesamten Systemleistung. Das Flächenangebot verschiedener Installationsorte innerhalb des Heizsystems übertrifft jedoch diese angegebenen Werte. So weist allein die Kesselwandung bereits eine Fläche von 625 cm<sup>2</sup> bei den Heizsystemen mit einer Heizleistung von 10kW auf, womit eine signifikant über die Leistungsanforderung des Heizsystems hinausgehende elektrische Ausgangsleistung der TEG erwartet wird.

## II. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Im Rahmen des ThermoMarE Projekts wurde eine SCHEER-Heizung mit 7kW Heizleistung zugrunde gelegt. Eine Skalierung auf größere Heizleistungen stellt keine besondere Herausforderung dar.

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 „Anforderungen und Spezifikation“ wurde zunächst der technisch sinnvollste Einbauort des TEG im Heizsystem festgelegt. Aufgrund der herrschenden Wärmeströme und Temperaturen im Heizsystem, mit dem Ziel eines höchstmöglichen  $\Delta T$  zwischen heißer und kalter Seite, fiel dabei die Auswahl auf die Rückwand der Brennkammer (s. Abbildung 7). Diese Entscheidung wurde auf der Basis der ermittelten Anforderungen, welche für die Anbringung eines TEG gegeben sein müssen, in enger Abstimmung zwischen den Projektpartnern getroffen. Die Fläche sollte dafür flach sein und die Möglichkeit bieten, einige thermoelektrische Module anzubringen. Darüber hinaus muss aufgrund des Wirkungsgrades der potenziellen TEGs ein Wärmeübergang von mind. 3kW zu ermöglichen (s. Abbildung 8). Dies ist an der Rückseite der Brennkammer, auch als „Klörperboden“ bezeichnet, erfüllt, da es sich um eine flache Fläche handelt und gleichzeitig an dieser Stelle ein Großteil der Wärmeenergie an das umgebende Heizwasser übergeben wird.

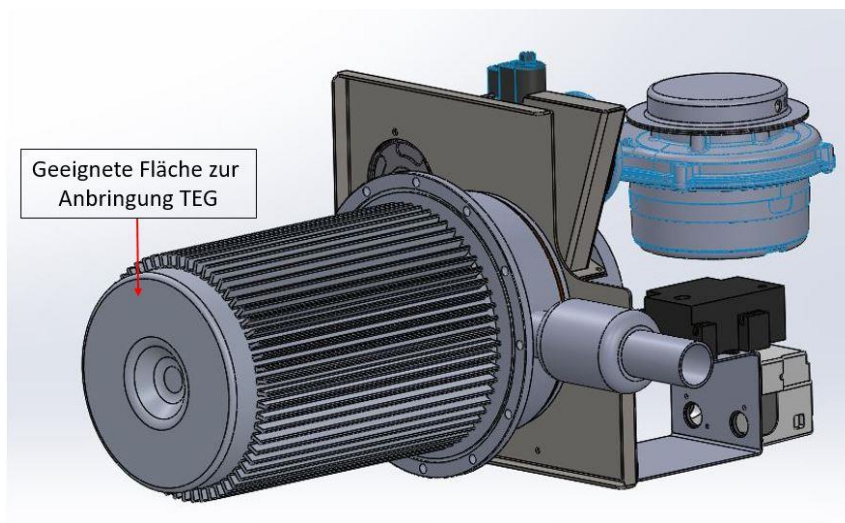


Abbildung 7: Brennkammer des Heizgeräts mit geeigneter, flacher Fläche an der Rückseite.

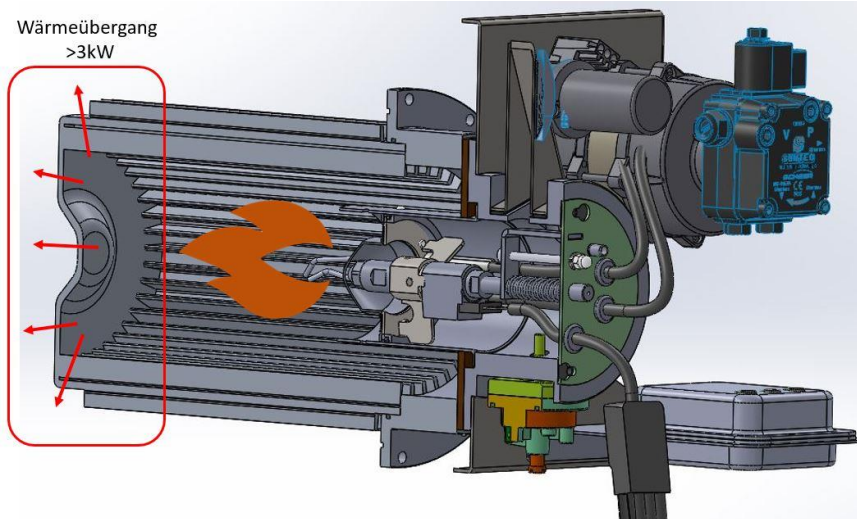


Abbildung 8: Wärmeübergang an der Rückseite der Brennkammer.

Aufgrund der Auswahl eines Anbringungsorts wurde die Ist-Analyse des Heizsystems begonnen. Da für die spätere Einbindung der TEG die Temperaturdifferenz an den gegenüberliegenden Oberflächen des TEG entscheidend ist, wurde zu Versuchszwecken ein modifizierter Klörperboden entworfen und hergestellt, welcher durch eine erhöhte Materialstärke eine differenzierte Messung der Oberflächentemperaturen ermöglicht. Um die Temperaturen aussagekräftig zu messen, werden in Kooperation mit dem Projektpartner DLR Lochsenkungen in dem Klörperboden erstellt und anschließend Thermoelemente mit dem Material verschweißt. So kann an den unterschiedlichen Punkten die Temperatur des Materials gemessen werden.

Parallel erfolgte eine erste Abstimmung zweier Grundkonzepte für TEGs in Kooperation mit dem Projektpartner ISA. Dabei wurden zwei mögliche Konzepte ins Auge gefasst, der sogenannte halbe Stapel sowie der sogenannte ganze Stapel (s. Abbildung 9). Bei dem halben Stapel wird der TEG flach auf einen modifizierten Klörperboden aufgebracht, sodass die Wärme weiterhin aus dem geschlossenen Behälter senkrecht nach hinten in das Heizwasser geleitet wird. Dabei durchläuft der Wärmefluss auch den TEG. Im zweiten Konzept des ganzen Stapels erfolgt die Konstruktion einer erweiterten Brennkammer-Rückwand. Das Abgas wird dadurch an parallel zur Verbrennungsrichtung, beidseitig angebrachten TEG geführt. Anschließend wird das Abgas um 180° umgelenkt und in die bestehende Abgasführung eingegliedert. Beide Konzepte bieten potenziell die Möglichkeit, die zu erzielende elektrische Leistung zu erzeugen.

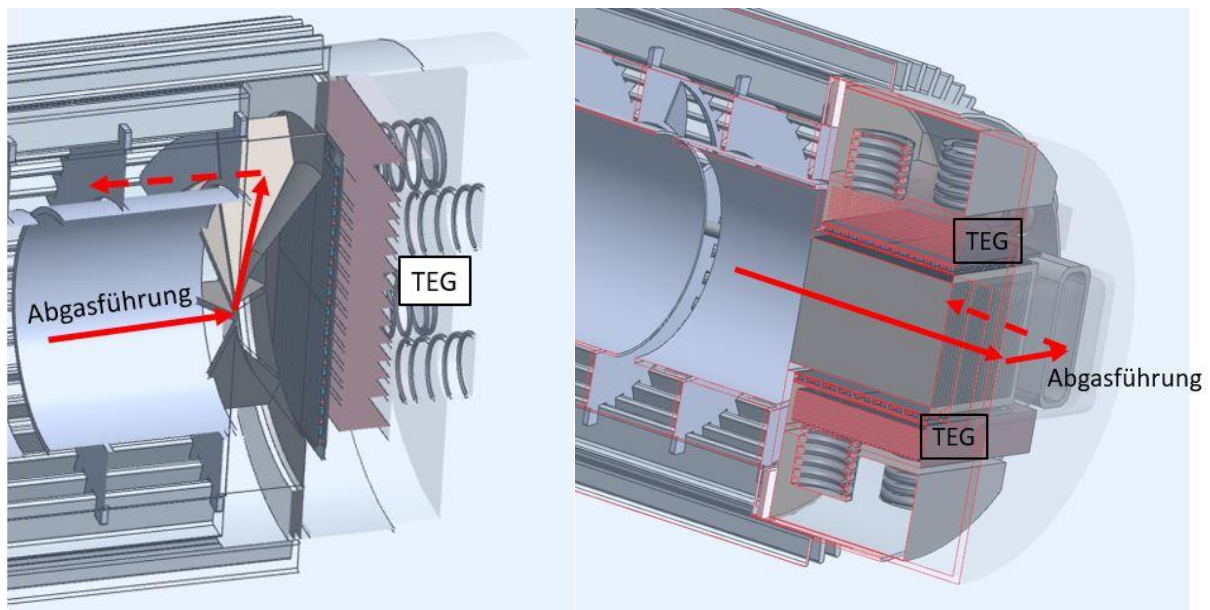


Abbildung 9: Abgasführung und Positionierung des TEGs in den zwei Integrationskonzepten „halber Stapel“ und „ganzer Stapel“.

Darüber hinaus wurde die thermische Ist-Analyse des Heizsystems durchgeführt. Hierfür wurde eine umfassende experimentelle Temperaturerfassung des Heizsystems absolviert. Ein Teststand (s. Abbildung 10), der über insgesamt 16 Sensoren verfügt diente dabei dazu, die Temperaturen im Klöpperboden sowie weitere Temperaturen im Kessel und im Abgasstrom zu erfassen.



Abbildung 10: Teststand zur Ermittlung verschiedener Temperaturen am Heizgerät. Ein einstellbarer Heizlüfter (links) sorgt für variable Wärmeabnahme, das Heizgerät (rechts) kann mit bis zu 20 Sensoren bestückt werden, um die verschiedenen auftretenden Temperaturen zu messen. Über ein Prantl-Rohr, welches vom Projektpartner ISA zur Verfügung gestellt wurde, können außerdem Geschwindigkeit und Temperatur des Abgases gemessen werden.

In enger Abstimmung mit dem Projektpartner DLR wurden fest definierte Prüfabläufe absolviert. Entscheidend hierbei waren stationären Bedingungen. Dafür wurde eine einstellbare Energiesenke in den Teststand integriert (Heizlüfter), um ein thermisches Gleichgewicht herzustellen und so die Kesseltemperatur auf einem gewünschten Wert zu halten. Insgesamt wurden 4 Messungen durchgeführt, die Kesseltemperaturen betragen jeweils 65°C, 75°C, 85°C und 95°C. Die Testergebnisse dienen zur numerischen Bestimmung der Gasströmungen und Temperaturübergänge im Inneren der Brennkammer. Dafür wurden die Ergebnisse an das DLR weitergegeben.

Darüber hinaus erfolgte eine großflächige Erfassung der Temperaturen innerhalb der Brennkammer mit Hilfe einer Messfarbe, welche die Oberflächentemperaturen auf ca. +/- 100°C genau widerspiegelt (s. Abbildung 11). Dies sollte dazu dienen, einen besseren Gesamtüberblick über die vorliegenden Temperaturen in der Brennkammer zu erhalten und so weitere Fakten zur Verifizierung der numerisch ermittelten Daten zu erhalten. Diese Verifizierung ist für die weitere Verwendung der numerischen Simulation der Brennkammer unerlässlich.



*Abbildung 11: Vorher (links) - Nachher (rechts) Gegenüberstellung der Komponenten in der Brennkammer nach dem Brennvorgang. Die Farbänderungen lassen auf die maximal vorliegenden Temperaturen schließen.*

Zuletzt wurden letzte Anforderungen an das System auf Basis der gewonnenen Informationen definiert und das System-Lastenheft somit abgeschlossen (s. Tabelle 1).

*Tabelle 1: Konstruktive Anforderungen an den zu entwickelnden Wärmetauscher am Klöpperboden.*

Anforderung	Wert
<b>Temperaturgradient Heiseiten-/Kaltseitenwrmetauscher</b>	Min. 400K
<b>Kaltseitentemperatur</b>	<100°C
<b>Anpressdruck</b>	2 MPa
<b>Parallelittstoleranz</b>	<0,1mm

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 „Elektronik Heizsystem“, wurde ein Lastenheft erstellt, welches die Anforderungen an die optimierte Regelung des Heizsystems umfasst. Auf Basis dieses Lastenhefts wurde die Entwicklung mit dem Lieferanten diskutiert, um ein Pflichtenheft zu erstellen. Im Zusammenhang mit der Erstellung des Lastenhefts wurden darüber hinaus die relevanten Punkte in Bezug auf notwendige Sensorik sowie die notwendigen System-Komponenten. Insgesamt erfolgte die Auswahl der Sensoren und Komponenten im Hinblick auf möglichst niedrigen Energieverbrauch. Darüber hinaus bildet die optimierte Steuerung alle Funktionalitäten des Heizsystems ab und bietet darüber hinaus weitere Stellausgnge für die spätere Funktionalität in Kombination mit dem TEG.

Die im Pflichtenheft festgelegten Anforderungen an die Steuerung ermöglichen es den Stromverbrauch des Heizsystems insgesamt um 25% zu senken. Ausschlaggebend hierfür ist vor allem die softwareseitig optimierte Ansteuerung der Brennerbauteile. Somit werden während des Heizbetriebs nur noch die notwendigen Aggregate betrieben. Gleichzeitig wurden die Betriebsparameter des Brenners auf maximale Effizienz angepasst.

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 „Heizsystem Prüfstände und Qualifizierung“ wurden zwei Prüfstände entwickelt, um die Temperaturen für AP 1 messen zu können sowie Vorversucher für das AP 4 durchführen zu können. Im Rahmen der Prüfstände wurde dabei eine einstellbare Energiesenke (einstellbarer Heizlüfter) verbaut, der eine variable Energieabnahme ermöglicht und so eine exakte Einstellung der Kesseltemperatur und somit der Bedingungen im Heizkessel möglich macht. Darüber hinaus erfolgte eine erste Konzeptionierung über eine Weiterentwicklung des Heizsystems basierend auf möglichen Änderungen durch die Integration des TEG. Es erfolgte dafür eine Umsetzung des speziell für den Einsatz der TEG konstruierten Klöpperbodens. Dieser ist zweiteilig ausgeführt, sodass Kaltseite und Heißseite getrennt sind und nur durch die TEGs Kontakt haben (s. Abbildung 12). Dieser Klöpperboden wurde mit Messpunkten ausgestattet und für erste Tests in den Teststand eingebaut. Diese verliefen positiv, da keine Beschädigungen am Klöpperboden auftraten und das Brennersystem ordnungsgemäß den Betrieb aufnahm. Ebenfalls wurden erste Versuche zur Kabelführung innerhalb des Hohlraums zwischen den beiden Teilen des Klöpperbodens durchgeführt, um eine zerstörungsfreie Integration zu ermöglichen.

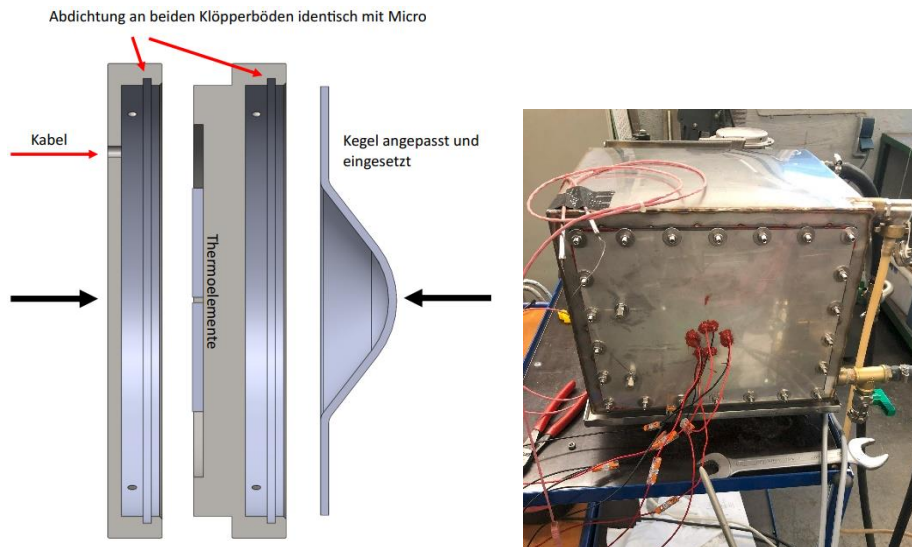


Abbildung 12: Schnittansicht des zweiteiligen Klöpperboden-Konzepts (links) und Zugangspunkt der Verkabelung am Teststand im eingebauten Zustand (rechts).

Ziel des ersten Prototyps ist es, die Temperaturen am Prototyp beim Einsatz mit TEG zu ermitteln, um so das System konstruktiv gezielt weiterzuentwickeln, sodass reale TEGs nicht durch zu hohe Temperaturen zerstört werden. Dafür wurden durch den Projektpartner DLR Dummies hergestellt, welche anstelle von TEM eingesetzt werden können. Diese Dummies bestehen aus INCONEL und verfügen über verschiedene Messpunkte zur Erhebung der Temperaturen auf Kalt- und Heißseite. Da die Anforderungen an den Einbau der TEG sehr anspruchsvoll sind, wurde die Konstruktion für den Einbau der Dummies bereits umfangreich optimiert. Entscheidend ist eine exakte Parallelität der Oberflächen sowie ein hoher Anpressdruck, um die Flächenpressung der Elemente mit der heißen und kalten Seite zu gewährleisten. Um dies zu gewährleisten wurden Vorversuche durchgeführt, welche den Anpressdruck und die Flächenpressung untersuchen.

Im Anschluss erfolgte eine weitere Optimierung des speziell für den Einsatz der TEG konstruierten Klöpperbodens. Dieser zweite Entwurf ist ebenfalls zweiteilig ausgeführt, sodass Kaltseite und Heißseite getrennt sind und nur durch die TEGs Kontakt haben (siehe Abbildung 13). Im Rahmen der Optimierung wurde auf Grundlage der Dummy-Versuche vor allem die Abfuhr der Wärme auf der kalten Seite des Klöpperbodens sowie die strikte thermische Trennung von warmer und kalter Seite des Klöpperbodens sowie des warmen Klöpperbodens und dem Rest der Brennkammer optimiert. Hierfür wurden Rippenstrukturen eingesetzt und der kaltseitige Klöpperboden in geringerer Materialstärke ausgeführt. Gleichzeitig erfolgte eine Versteifung des kaltseitigen Klöpperbodens, um den geforderten Anpressdruck ohne Verformung des Klöpperbodens erreichen zu können. Der zweischalige Klöpperboden wurde außerdem mit Messstellen für die Messung der Temperaturen ausgestattet und mit TEG-Dummies ausgestattet, sodass eine Bestimmung der thermischen Eigenschaften möglich ist.

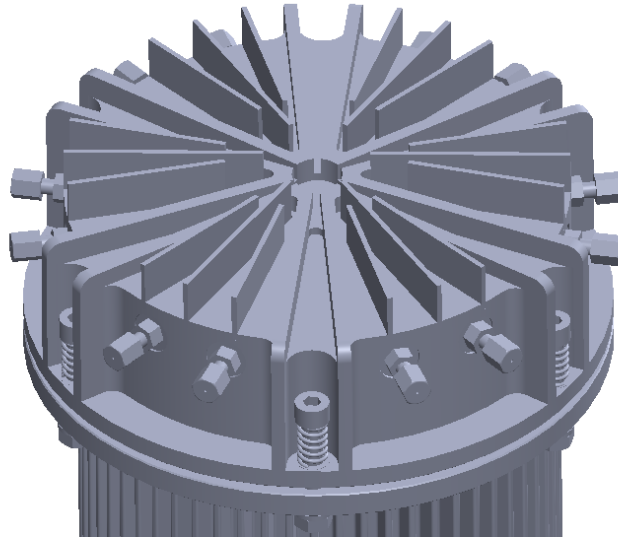


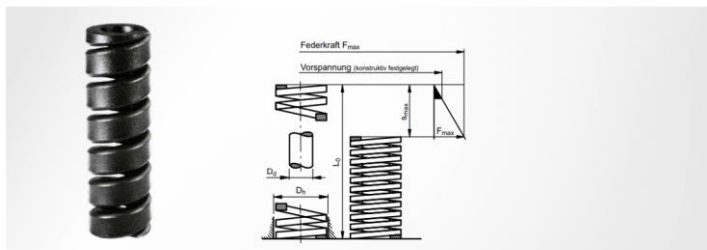
Abbildung 13: Ansicht des zweiteiligen Klöpperboden-Konzepts mit optimiertem Rippen-Design sowie konsequenter Entkopplung von Heiß- und Kaltseite.

Um den geforderten Anpressdruck während der Versuche auch bei wechselnden Umgebungsbedingungen zu halten, war der Prüfstand ursprünglich mit Tellerfedern ausgestattet, wodurch die Anpresskraft der beiden Klöpperböden jedoch nur schwer oder ungenau abgelesen und berechnet werden konnte. Diese Tellerfedern wurden durch speziell für extrem hohe Belastungen ausgelegte Schraubendruckfedern der Firma Steinel ersetzt. Die neuen Systemfedern sind nicht nur optimal für die mechanische Beanspruchung geeignet, sondern auch beständig gegenüber hoher thermischer Belastung. Durch den Einsatz dieser Federn konnte die Ablesegenauigkeit der wirkenden Kräfte deutlich verbessert werden. Eine weitere Optimierung betraf den Austausch der wärmeisolierenden Buchsen in den Schraubenverbindungen. Zuvor kamen Buchsen aus Teflon zum Einsatz, die den hohen thermischen Belastungen nicht standhielten. Derzeit werden stattdessen Buchsen aus der Keramik „Aluminiumoxid 92“ verwendet, die eine deutlich höhere Temperaturbeständigkeit aufweisen. In Abbildung 14 sind die eingesetzten Federn und die wärmeisolierenden Buchsen dargestellt. Diese Hülsen können somit sicherstellen, dass der heiße und kalte Klöpperboden keine direkte Verbindung zueinander haben.

SZ8047 Systemfeder



für extra starke Belastung, Kennfarbe schwarz



**Werkstoff**  
 Profilierter Ventulfederstahldraht (52SiCrNi5)

**Drahtquerschnitt**  
 rechteckig

**Federtyp**  
 Schraubendruckfeder

**Hinweis**  
 Feder ist gesetzt, angelegt und rechtwinklig parallel-  
 geschliffen

Abbildung 14: Schraubendruckfeder (links) Wärmeisolierende Buchse (rechts)

Im Rahmen des Arbeitspakets 4 „Wärmetauscher und TEG“, erfolgte eine erste Konzeptionierung der heißseitigen Wärmetausches durch Festlegung auf das Konzept „halber Stapel“. Ziel ist es dabei die Oberfläche am Klöpperboden innerhalb der Brennkammer so zu vergrößern, dass genügend Wärme abgeführt wird, um mit dem TEG die geforderten Leistungen zu erreichen. In diesem Rahmen wurden bereits Vorversuche durchgeführt, bei denen ein modifizierter Klöpperboden eingesetzt wurde, der mit Pins ausgestattet war (s. Abbildung 15), welche eine Annäherung an die spätere Geometrie des Klöpperbodens darstellt. Ziel der Versuche war es, zu evaluieren, ob ein solches Design negative Auswirkungen auf den Verbrennungsprozess hat und sich somit die Abgaswerte deutlich verschlechtern oder die Verbrennung möglicherweise gar nicht mehr stattfindet.

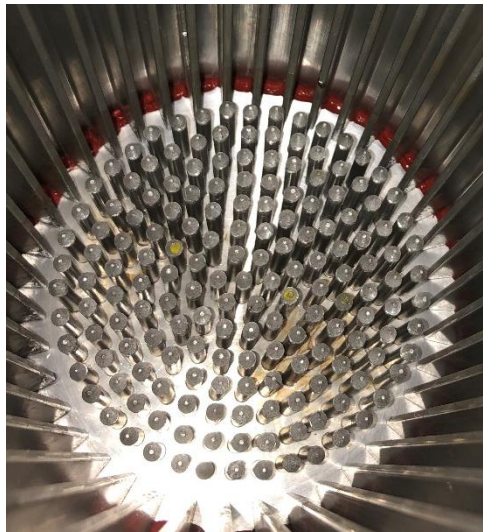


Abbildung 15: Klöpperboden mit angespitzten Pins, um eine spätere Klöpperbodengeometrie abzubilden.

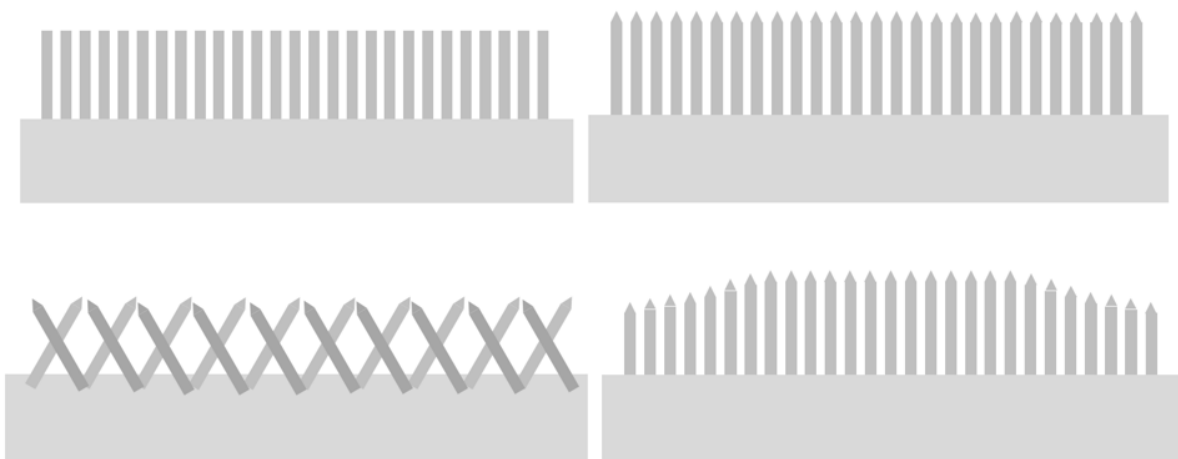


Abbildung 16: Schematische Darstellung der getesteten Pin Konfigurationen.

Es wurden insgesamt 4 Pin-Konfigurationen getestet (s. Abbildung 16), um Erfahrungen mit verschiedenen Konfigurationen zu sammeln und so bei der konstruktiven Entwicklung des Klöpperbodens als mögliches Gussteil Aussagen darüber treffen zu können, wie sich gewisse Designs auf die Verbrennung auswirken. Die Versuche haben gezeigt, dass sich zwar eine Veränderung in der Verbrennung einstellt, die Abgaswerte jedoch auch mit den Pins in jeder Konfiguration weit unterhalb gesetzlicher Grenzwerte liegen. Beispielphaft kann

hier der CO-Wert genannt werden, der im Mittel von ca. 7ppm (parts per million) auf etwa 50ppm anstieg, der gesetzliche Grenzwert liegt bei ca. 1188ppm. In Abstimmung mit dem Projektpartner DLR wurden einige Konfigurationen simuliert, um herauszufinden, welche konstruktive Umsetzung zielführend ist.

Im Anschluss erfolgte die Weiterentwicklung des zweiteiligen Klöpperbodens und dessen Fertigung mit dem Ziel erste Versuche mit TEG-Dummies durchzuführen. Wie oben beschrieben bedingen die hohen Anforderungen an den Einbau der TEG eine exakte Arbeitsweise und eine kleinschrittige wiederholte Anpassung der Konstruktion und der Fertigungsverfahren. Ergebnis der ersten Versuchsdurchführungen war eine Wärmeübertragung, die optimierungsbedürftig ist (s. Abbildung 17). Problematisch ist insbesondere die hohe Kaltseiten-Temperatur, welche den Einsatz von TEGs zerstörungsfrei unmöglich macht. Aus diesem Grund wurde der kaltseitige Klöpperboden in geringerer Stärke ausgeführt und mit Wärmeleitrippen versehen. Darüber hinaus erfolgte eine noch konsequentere thermische Entkopplung von warmer und kalter Seite. Dies geschah beispielsweise durch Integration von Isolierenden Hülssen für die Verschraubungen, sodass Wärme nicht über die Schraubverbindungen von heißer zu kalter Seite fließen konnte. Auf der warmen Seite fand vorerst keine Veränderung statt, da zunächst die Maßnahmen auf Eignung zur Verringerung der Kaltseitentemperatur hin überprüft werden. Ziel ist eine Kaltseitentemperatur unterhalb von 100°C, um den Einsatz von TEGs zu ermöglichen.

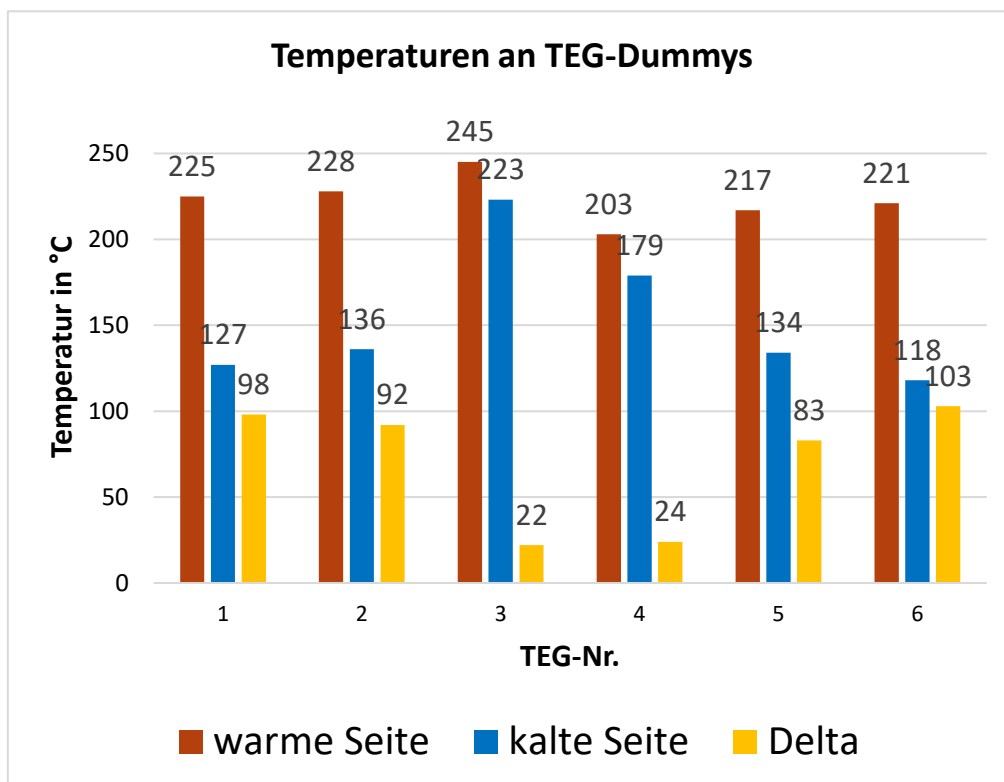


Abbildung 17: Erste Versuchsergebnisse am Laboraufbau mit Darstellung der Temperaturen auf der heißen und kalten Seite der TEG-Dummies sowie des entsprechenden Temperaturgradienten.

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen (V1-V4) am Laborversuchsstand mit einem 10 kW-Brenner und Kessel sowie mit TEM-Dummies durchgeführt. Hierbei wurden Anpressdruck und Dummies variiert und im letzten Versuch die Wassertemperatur im Kessel abgesenkt (s. Tabelle 2). Ziel war der Nachweis thermischer Bedingungen aus der Anforderungsanalyse,

insbesondere die Einhaltung der maximal zulässigen TEM-Kaltseitentemperatur (100°C) als Vorbereitung für Tests mit echten TEM.

*Tabelle 2: Übersicht Versuchsergebnisse am Laboraufbau mit verschiedenen Konfigurationen der Versuchsparameter.*

Versuch	Anpressdruck [MPa]	Wassertemperatur [°C]	Dicke Dummy [mm]	Heiseiten-temperatur [°C] Bereich / $\emptyset$	Kaltseiten-temperatur [°C] Bereich / $\emptyset$	Mittlere Temperatur-differenz [K]
V1	2	65	12,97	203-245 / 223	118-223 / 153	70
V2	0,8	65	12,97	136-231 / 196	93-146 / 119	77
V3	2	65	24,45	184-257 / 217	90-131 / 105	112
V4	2	20	24,45	163-236 / 196	59-101 / 75	121

V1 zeigte unerwartet niedrige Heiseitentemperaturen und zu hohe Kaltseitentemperaturen. In V2 wurde der Anpressdruck verringert, um einer Wölbung des Kaltseitenwrmetauschers als mögliche Ursache für die zu hohen Kaltseitentemperaturen entgegenzuwirken. Die Druckabsenkung verringerte die Temperaturen sämtlicher Messstellen auf der Kaltseite signifikant; jedoch nicht ausreichend. Im Mittel fielen die Temperaturen an der kalten Seite stärker als auf der heißen Seite (mittlere Temperaturdifferenz stieg gegenüber V1 um 10%). Zur weiteren Absenkung der Kaltseitentemperatur wurden in V3 dickere Dummies eingesetzt, deren hoherer Wärmewiderstand (geringerer Wärmestrom) zu einen reduzierten Temperatursprung an Kaltseitenkopplung und damit eine Annäherung der Kaltseitentemperaturen an die Wassertemperatur erwarten ließ. Die Kaltseitentemperaturen sanken gegenüber V2 nochmals ab. In V4 wurde aus diesem Grund die Wassertemperatur auf 20 °C gesenkt. Eine solche Kesseltemperatur ist im Heizbetrieb nicht üblich und sollte lediglich den Nachweis einer ausreichend niedrigen Kaltseitentemperatur erbringen, um folgende Tests mit echten TEM zu ermöglichen. Im Mittel konnte in V4 die Kaltseitentemperatur auf 75°C gesenkt werden. Einzelne Messstellen weisen jedoch immer noch zu hohe Temperaturen für den Einsatz von TEM auf.

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 „Modultests, Aufbau und Verbindungstechnik, Simulation“, wurden CAD-Daten als Grundlage für eine Strömungssimulation der Brennkammer erstellt und an das DLR übergeben. Darüber hinaus wurden verfügbare Daten über die Verbrennung, die Strömungssituation und Temperaturen an das DLR übergeben, um die Randbedingungen der Simulation festzulegen. Im weiteren Verlauf erfolgte eine enge Abstimmung zwischen den Projektpartnern SCHEER und DLR, um die Simulation auf die realen Randbedingungen anzupassen und so aussagekräftige Simulationsergebnisse zu erhalten. Insbesondere erfolgte in einem ersten Schritt eine experimentelle Validierung der Simulationsergebnisse am Ist-System. Hierfür wurde ein Klöpperboden modifiziert, um mit Temperatursensoren ausgestattet werden zu können. Anschließend wurde mit diesem Klöpperboden ein Versuch durchgeführt, bei dem die Kesseltemperatur statisch auf verschiedenen Niveaus gehalten wurde, um vergleichbare Werte für die Einordnung und Optimierung der Simulation zu erhalten. Im weiteren Verlauf erfolgte dann die Optimierung der Konstruktion gemäß den Anforderungen für die Integration der TEG. Auf Grundlagen der Simulationsergebnisse wurde die Konstruktion des Klöpperbodens bewertet und in einem weiteren Iterationsschritt optimiert.

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 „Demonstratoren“ wurde die Konzeptionierung des Demonstrators basierend auf dem Teststand fortgeführt. Insbesondere die komplexe Einbringung der TEG und deren elektrischem Anschluss, welcher durch den wassergefüllten

Kessel erfolgt, werden dabei als maßgebliche Anforderungen betrachtet. Der Demonstrator wird konstruktiv dem Teststand entsprechen, wird allerdings um die Möglichkeit der elektrischen Leistungsmessung ergänzt. Das Konzept des Demonstrators sieht vor, eine optimierte Version des zweischaligen Klöpperbodens einzusetzen, wobei die elektrischen Leitungen zum Abgreifen der gewonnenen elektrischen Energie mit wasserdichten Durchführungen durch den wassergefüllten Kessel nach außen geführt werden. Hier kann der Anschluss an eine Leistungselektronik erfolgen, welche die Energie nutzbar macht. Die Umströmung des Klöpperbodens auf der kalten Seite erfolgt durch eine im Gerät verbaute Zirkulationspumpe, welche mit ca. 10 Litern pro Minuten das Wasser im Heizkessel und damit entlang des Klöpperbodens umwälzt. Die thermische Energie wird dabei über ein Leitungssystem zu Verbrauchern geleitet, die diese zur Erwärmung eines oder mehrerer Räume nutzen.

### III. Ausblick und nächste Schritte

Insgesamt hat sich im Verlauf des Vorhabens gezeigt, dass die Zusammenarbeit aus Wissenschaft und Wirtschaft äußerst konstruktiv war. Insbesondere die tiefgreifenden Erkenntnisse aus der Simulationstechnik in Verbindung mit der Erfahrung über die Konstruktion der TEM sowie der maritimen Heizsysteme hat die Arbeiten im Rahmen des Vorhabens vorangebracht. Die durchaus schwierige Integration von TEM in einem komplexen, wasserumströmten Umfeld des maritimen Heizsystems konnte durch die öffentlich geförderte Kooperation entscheidend beeinflusst werden.

Die nächsten Schritte enthalten die weitere Optimierung der Konstruktion, insbesondere die Optimierung der Wärmetauscher auf heißer und kalter Seite und somit die thermische Anbindung der TEM sollen zum Aufbau eines praxisnahen Demonstrators führen. Ein intelligentes Batteriemangement soll dabei die Nutzung der elektrischen Energie an Bord steuern.

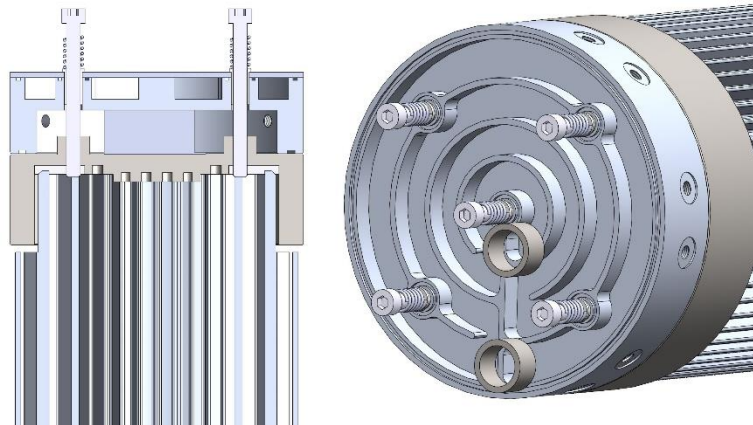


Abbildung 18: Weitere Optimierung der Wärmetauscher-Geometrie als nächster Schritt.