

**KANTHAL®**

Part of Sandvik Group



thyssenkrupp

Bericht Nr.: 3100.055

Abschlussbericht über ein Forschungsvorhaben  
gefördert unter dem Az: 34825-01 durch die Deut-  
sche Bundesstiftung Umwelt

# Untersuchung eines Strahlrohrs für die hybride Beheizung von Industrieöfen mit Brenngasen und elektrischem Strom, be- vorzugt aus erneuerbaren Energiequellen (HYBRIDSTRAHLROHR)

Von:

A. Queck, B. Stranzinger, BFI  
M. Mann, R. Miethe, Kanthal  
J. Schneider, J. Wünning, WS  
M. Peters, A. Westerfeld, tkSE

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

Düsseldorf, Januar 2021

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
GmbH





**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>34825/01</b>	Referat	<b>24/0</b>	Fördersumme	<b>101.150 €</b>
----	-----------------	---------	-------------	-------------	------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Untersuchung eines Strahlrohrs für die hybride Beheizung von Industrieöfen mit Brenngasen und elektrischem Strom, bevorzugt aus erneuerbaren Energiequellen (HYBRIDSTRAHLROHR)</b>
---------------------	---

<b>Stichworte</b>	hybride Beheizung, CO2-Einsparung, Sektorenkopplung
-------------------	---

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>18 Monate</b>	<b>01.05.2019</b>	<b>31.10.2020</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte

<b>Bewilligungsempfänger</b>	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH Sohnstraße 69 40237 Düsseldorf	Tel.: +49 211 98492-201 Fax: +49 211 98492-202
------------------------------	---	---

<b>Projektleitung</b>	Dr.-Ing. Andreas Queck
-----------------------	------------------------

<b>Bearbeiter</b>	Dr.-Ing. Andreas Queck
-------------------	------------------------

<b>Kooperationspartner</b>	Kanthal GmbH, Aschaffener Str. 7a, 64546 Mörfelden-Walldorf WS Wärmeprozessstechnik GmbH, Dornierstr. 14, 71272 Renningen thyssenkrupp Steel Europe AG, Kaiser-Wilhelm-Str. 100, 47166 Duisburg
----------------------------	---

### ***Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens***

Das Ziel dieses Vorhabens war es, die technische Machbarkeit eines neuartigen hybriden Strahlrohres zu untersuchen, um sowohl einen gas- als auch einen elektrisch beheizten Betrieb zu ermöglichen. Das Einbringen von elektrischer Heizleistung erlaubt die Verringerung der gasbefeuelten Beheizung. Es findet eine direkte Substituierung von Brenngas (z. B. aus fossilen Quellen) durch die Nutzung z. B. von elektrischen erneuerbaren Energien (EE) Überproduktionen statt. Stromnetze können so stabilisiert sowie der volatile EE-Strom vollständig und flexibel genutzt werden. Eine hybride Lösung bietet jedoch weiterhin die Möglichkeit der Nutzung von Brenngas, welches durch immer höhere Anteile von Komponenten aus erneuerbaren Energien (z.B. Power-to-Gas-Technologien) angereichert wird.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Zuerst wurden die Anforderungen für ein hybrides Strahlrohr aus betrieblicher Sicht definiert. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden die notwendigen Materialien für den gesamten Aufbau definiert, um z.B. Strahlrohr, Flammrohr und Heizleiter entsprechend der Anforderungen dimensionieren zu können. Ein erstes Konzept eines hybriden Strahlrohres wurde mittels CFD-Simulationen auf die Machbarkeit bzw. potenzielle Problemfälle hin untersucht. Es wurden sowohl Brenngas- als auch rein elektrischer Betrieb untersucht. Angelehnt an existierende und in der Praxis bewährte gasbefeuelte Strahlrohrbauten wurde ein erster Demonstrator des hybriden Strahlrohres konstruiert und im Technikumsmaßstab getestet.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Das im Projekt erarbeitete Konzept eines Hybridstrahlrohres hat seine technische Machbarkeit erfolgreich unter Beweis stellen können. In der begleitenden Recherche sind während des Projektzeitraumes keine ähnlichen oder vergleichbaren Entwicklungsarbeiten oder Produkte bekannt geworden. Sowohl die elektrische als auch die gasbefeuerte Beheizung konnten erfolgreich erprobt werden. Durch die Nutzung von bewährten Konzepten bisheriger Strahlrohrbauten, der Verwendung üblicher Komponenten und einem modularen Aufbau konnten die Erwartungen an eine spätere kosteneffiziente Fertigung erfüllt werden. Aufgrund des gegenwärtigen Charakters eines Demonstrators und noch zu erwartender Anpassungsarbeiten für die industrielle Erprobung kann noch keine Kostenabschätzung für ein späteres Produkt erstellt werden.

Auf der technischen Seite ist die Machbarkeit eines Hybridstrahlrohres erfolgreich gezeigt worden. Die Vorbereitungen für eine industrielle Erprobung sind sehr gut umgesetzt worden. Mit der Nutzung von weitestgehend marktüblich verfügbaren Komponenten (Strahlrohr, Brenner, Heizdraht etc.) ist eine Adaption an einen industriellen Einsatz möglich. Es sind noch Adaptionen für eine einfachere Montage erforderlich, Ansätze dafür wurden erarbeitet und dargestellt. Die Anpassung der Leistungsabgabe des Strahlrohres im betrieblichen Einsatz muss noch adaptiv umgesetzt werden. Es sind noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hierzu geplant.

Aus ökologischer Sicht konnte eine prinzipielle Kompensation eines bisher gasbefeuereten Heizbetriebes eines Teilaggregates der Thermoprozesstechnik erfolgreich dargestellt werden. Mit dem hier erarbeiteten Konzept eines Hybridstrahlrohres ist es möglich, die Nutzung von erneuerbarer elektrischer Energie in einem bisher nicht genutzten Bereich der Prozessindustrie zu ermöglichen. Neben einer Kopplung der Sektoren Energieerzeugung und produzierendem Gewerbe ist eine Umweltentlastung zu erwarten. Der rein elektrische Betrieb eines Hybridstrahlrohres wird zu einer Einsparung von CO<sub>2</sub> führen. Jeder eingesparte Kubikmeter Erdgas entspricht einer Masse von ca. 2 kg CO<sub>2</sub>, deren Ausstoß vermieden wird.

Der hybride Ansatz hat aus mehreren Gründen eine Berechtigung. Die Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen in der Prozessindustrie kann ausgeweitet werden. Wenn die Netzkapazitäten nicht ausreichen, um den insgesamt erzeugten Strom abzutransportieren, muss der Netzbetreiber die Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen abregeln. Allein im Jahr 2019 betrug die Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen bei Windkraftanlagen 6.272,5 GWh. Zu Zeiten, in denen am Markt ein Überangebot elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen vorliegt, können flexible Aggregate, z.B. hybride Strahlrohre, den Strom abnehmen und direkt zur Wärmeerzeugung nutzen. Das Potential hybrid beheizter und flexibel schaltbarer Technologien ist sehr groß.

Allerdings ist auch die Nutzung von Brenngas zur Beheizung von Thermoprozessanlagen weiterhin sinnvoll. Zum einen ist gegenwärtig der Preis je kWh bei Erdgas gegenüber elektrischer Energie für industrielle Nutzer wesentlich günstiger. Mit dem aktuellen Strommix in Deutschland hat die Gasbeheizung aufgrund des niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstosses (rd. 220 g je kWh bei Erdgas und 468 g je kWh bei Strom) auch ökologische Vorteile. Eine Nutzung konventionell erzeugter elektrischer Energie bei hybrid betreibbaren Aggregaten ist zu vermeiden.

Zum anderen ist der Ausbau der erneuerbaren Energien noch nicht so weit, dass dauerhaft ein Überangebot an elektrischer Energie zur Verfügung steht. Andererseits ist aber durch die Nutzung von Power-to-Gas-Technologien, wie in der Nationalen Wasserstoffstrategie verankert, der Anteil von erneuerbaren Energien im Brenngas steigend. Die Nutzung von Brenngas ist unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Zur Darstellung der Projektergebnisse und -arbeiten wurde das Projekt beim Fachworkshop „Zukünftige Beheizungstechnologien“ am 19. Juni 2020 (Web-Seminar) im Rahmen des Innovationsnetzwerks „Hybrid-Heating“ mit über 100 Teilnehmern vorgestellt ([www.hybrid-heating.de/veranstaltungen/workshop-zukuenftige-beheizungstechnologien](http://www.hybrid-heating.de/veranstaltungen/workshop-zukuenftige-beheizungstechnologien)). Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen geplant.

## **Fazit**

Zusammenfassend wird festgehalten, dass mit dem Einsatz des hybriden Strahlrohres bereits heute und auch in Zukunft flexibel auf den Energiemarkt reagiert werden kann. Es ist auch bei einem zeitlich schwankenden Energiemix stets die günstigste Beheizungsvariante im Hinblick auf den Preis und die CO<sub>2</sub>-Bilanz nutzbar.

Nach erfolgreichem Nachweis der technischen Machbarkeit führt das Projektkonsortium die Arbeiten zu einer industriellen Erprobung im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projektes Synergie (<https://synergie-projekt.de/>) durch.

# VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

40237 Düsseldorf, Sohnstraße 65

---

Forschungsvorhaben gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen: 34825-01

UNTERSUCHUNG EINES STRAHLROHRS FÜR DIE HYBRIDE BEHEIZUNG VON INDUSTRIEÖFEN MIT BRENNGASEN UND ELEKTRISCHEM STROM, BEVORZUGT AUS ERNEUERBAREN ENERGIEQUELLEN (HYBRIDSTRAHLROHR)

von

A. Queck, B. Stranzinger, BFI

M. Mann, R. Miethe, Kanthal

J. Schneider, J. Wünning, WS

M. Peters, A. Westerfeld, tkSE

## Schlussbericht

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

*Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.*

Laufzeit des Forschungsvorhabens: 1.5.2019 – 31.10.2020

Bericht Nr.: 3100.055

## Kurzfassung

Die Anforderungen der Energiewende erfordern es, neue Wege zur Beheizung von Thermoprozessanlagen in der Prozessindustrie zu finden. Ein Beitrag hierzu kann die Nutzung von hybrid beheizten Strahlrohren sein. Hybrid bedeutet hier die Nutzung von Brenngas oder elektrischer Beheizung, dies bevorzugt aus erneuerbaren Energiequellen. In diesem Projekt konnte gezeigt werden, dass die prinzipielle technische Machbarkeit eines solchen Hybridstrahlrohres gegeben ist.

Ausgehend von einer Bewertung der betrieblichen Anforderungen wurden die erforderlichen Materialeigenschaften für die Komponenten des Hybridstrahlrohres spezifiziert. Die umfasste auch die Auslegung der Leistung für den zusätzlichen Anwendungsfall rein elektrischer Beheizung. Darauf aufbauend wurde ein Umsetzungskonzept eines hybrid beheizten Strahlrohres erarbeitet. Als Basis wurde die bewährte Konstruktion eines gasbefeierten Strahlrohres genutzt, in das zusätzlich die elektrische Beheizung integriert wurde. Hierzu waren an unterschiedlichen Bauteilen Anpassungen erforderlich, um die Heizdrähte in den Aufbau einbringen zu können. Die Nutzung einer im 3D-Druckverfahren hergestellten Keramik als Flammrohr mit zusätzlichen Führungen zur Positionierung der Heizdrähte erwies sich als vielversprechender Lösungsansatz.

Es wurde ein Demonstrator angefertigt, der sowohl die elektrische als auch eine angepasste gasbefeuerte Beheizungstechnik in einem Hybridstrahlrohr integriert. Die Geometrie- und Leistungsparameter wurden identisch zu einem betrieblichen Anwendungsfall gewählt. Im Labormaßstab konnten sowohl die elektrische als auch die gasbefeuerte Beheizung erfolgreich erprobt werden.

Die technische Machbarkeit eines hybrid beheizten (Brenngas und Elektroenergie) Strahlrohres konnte erfolgreich unter Beweis gestellt werden. Die ökologische Bedeutung beim Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen ist erheblich, da eine bisher ausschließlich mit Brenngas betriebene Beheizungseinrichtung ersetzt werden kann. Weiterhin ist eine Nachrüstung in den Anlagenbestand langlebiger Thermoprozessanlagen möglich. In weiteren Forschungsvorhaben ist die industrielle Erprobung des Hybridstrahlrohres angestrebt.

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Kurzfassung	V
1. Einleitung	2
2. Erhebung der Anforderungen an hybride Strahlrohrsysteme	3
2.1 Betriebliche Anforderungen	3
2.2 Anforderungen an die Werkstoffe	3
3. Konzeption eines Hybridstrahlrohres	6
4. Simulative Untersuchungen	7
5. Untersuchungen zur elektrischen und gasbetriebenen Beheizung	11
6. Diskussion der Ergebnisse	19
Literaturverzeichnis	VI

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Abbildung 1: Beispielhafte Darstellung eines Banddurchlaufofens	2
Abbildung 2: Schema eines gasbefeuerten Strahlrohr [WS2014]	4
Abbildung 3: Schema des Hybridstrahlrohres	6
Abbildung 4: Zeichnung des Strahlrohrs ohne Heizdraht	7
Abbildung 5: Fotografie des Brenners inkl. Angabe der Leistungsdaten	8
Abbildung 6: Modell Hybrid-Strahlrohr	8
Abbildung 7: Strömungsgeschwindigkeiten im Strahlrohr	9
Abbildung 8: Berechnete Temperaturen im Schnittbild (X-Ansicht)	10
Abbildung 9: Temperatur auf der Strahlrohroberfläche in ISO-Ansicht	11
Abbildung 10: Fotografie des Flammrohrs mit Heizdraht	12
Abbildung 11: Fotografische Ansicht des Funktionstests der elektrischen Beheizung	13
Abbildung 12: Teilmontiertes Modul bestehend aus elektrischer Beheizung, Hybridflammrohr, Montagehilfe, Adapter und Abgasführungsrohr	14
Abbildung 13: Montiertes Hybridstrahlrohr inklusive Rekuperatorbrenner und Brennersteuerung	14
Abbildung 14: Verschiebung der Flammrohre auf dem teilmontierten Modul	15
Abbildung 15: Fotografie des am Prüfstand angeschlossenes Hybridstrahlrohrs	16
Abbildung 16: Fotografien der Temperaturmessstellen am Hybridstrahlrohr	17
Abbildung 17: Positionierung der Temperaturmessstelle T3 auf dem Hybridflammrohr	17



## 1. Einleitung

Die Anforderungen aus dem „European Green Deal“ [EU2019] und des Bundes-Klimaschutzgesetzes [KSG2019] zur Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses erfordern neue Wege bei der Beheizung von Thermoprozessanlagen. In der Prozessindustrie werden zur Herstellung von Nutzgütern mit höchsten Qualitätsanforderungen sehr unterschiedliche Thermoprozessanlagen eingesetzt. Ein wesentlicher Prozessschritt ist die Wärmebehandlung, die z. B. in Herdwagenöfen, Haubenöfen oder Banddurchlauföfen durchgeführt wird [Spe2014]. In **Abbildung 1** ist ein solcher Banddurchlaufofen der Stahlindustrie exemplarisch dargestellt. Die Beheizung des Ofens wird überwiegend mit Erdgasbrennern sichergestellt. Der Erdgasverbrauch eines solchen Ofens beträgt beispielsweise rd. 1.300 m<sup>3</sup>i.N./h und der Ofendurchsatz beträgt rd. 450.000 t/a.



**Abbildung 1:** Beispielhafte Darstellung eines Banddurchlaufofens

Das Stahlband wird in diesen Öfen mit Hilfe von Strahlrohren auf Temperaturwerte von 600 bis 1000 °C erwärmt. Ein Strahlrohr besteht aus einem keramischen oder metallischen Rohr, in das ein Gasbrenner eingebaut wird. Ist der Brenner in Betrieb, wird die entstehende Wärme an die Innenseite des Rohres, durch die Wand des Rohres und von der Außenseite des Rohres an die Ofenatmosphäre übertragen. Dies wird auch als indirekte Beheizung bezeichnet. Allein bei den 17 in Deutschland vorhandenen Bänderwärmungsanlagen der Stahlindustrie sind je Anlage ca. 80 Strahlrohrbrenner installiert.

Da der Wärmeeintrag zum Nutzgut indirekt erfolgt, bot sich die Untersuchung der Kombination von elektrischer und gasbefeuertem Beheizung an, ein Hybridstrahlrohr. An einer Bandanlage bei dem Projektpartner thyssenkrupp Steel Europe AG (tkSE) wurden die Anforderungen eines solchen Strahlrohres genauer untersucht. tkSE selbst betreibt insgesamt

fünf vergleichbare Anlagen, die Übertragbarkeit erhaltener Ergebnisse ist somit gegeben. Expertise auf dem Gebiet der Strahlrohrbrenner steuerte der Projektpartner WS Wärmeprozess-technik GmbH (WS) bei. Als weltweit agierender Projektpartner im Bereich elektrische Heizelemente wirkte Kanthal, Zweigniederlassung der Sandvik Materials Technology Deutschland GmbH (Kanthal), im Projekt mit. Die Koordination des Vorhabens lag beim VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI).

## 2. Erhebung der Anforderungen an hybride Strahlrohrsysteme

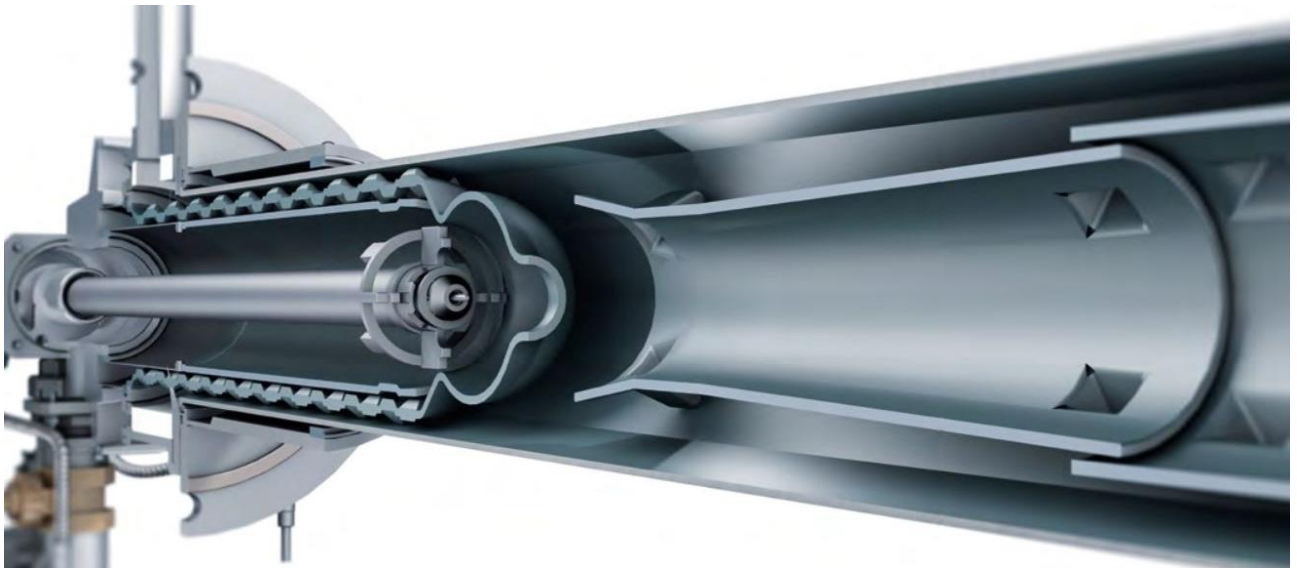
### 2.1 Betriebliche Anforderungen

Um in einem Produktionsbetrieb eingesetzt werden zu können, muss ein hybrides Strahlrohr die spezifischen Anforderungen des Prozesses erfüllen können. tkSE betreibt am Standort Duisburg einen Banddurchlaufofen in der Feuerbeschichtungsanlage 2. In diesem Ofen wird Stahlband nach spezifischen Vorgaben in unterschiedlichen Atmosphären wärmebehandelt. Ein Strahlrohr in diesem Ofen wurde als Beispiel für die Anforderungsspezifikation ausgewählt. Da die im Ofen eingesetzten Strahlrohre in den entsprechenden Ofenzonen identisch aufgebaut sind, ist eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse gewährleistet. Im entsprechenden Ofenbereich beträgt die Ofenraumtemperatur ca. 950 C. Weiterhin herrscht dort eine wasserstoffhaltige Stickstoffatmosphäre (mit ca. 5-6% Wasserstoff), auch als Schutzgasatmosphäre bezeichnet. Die eingesetzte Brennerleistung beträgt ca. 50 kW pro Brenner. Diese Wärmeleistung muss das hybride Strahlrohr in beiden Beheizungsmodi, elektrisch und gasbefeuert, aufbringen können.

Aus Sicht des Ofenbetreibers ist es sinnvoll, den Aufwand für die Installation an der Anlage möglichst gering zu halten. Es wurde daher im Projekt der Ansatz verfolgt, das hybride Strahlrohr nach Möglichkeit einfach gegen ein konventionelles austauschen zu können. Somit war die Außen-Geometrie vorgegeben. Zusätzlich müssen neben den bisher bereits vorhandenen Brenngas- und Brennluftleitungen noch die elektrischen Zuleitungen angeschlossen werden können.

### 2.2 Anforderungen an die Werkstoffe

Die Werkstoffe des hybriden Strahlrohres müssen den Prozessbedingungen analog zu einem konventionellen Strahlrohr standhalten können. In **Abbildung 2** ist ein gasbefeueres Strahlrohr schematisch dargestellt.



**Abbildung 2:** Schema eines gasbefeueren Strahlrohr [WS2014]

Für das mit der Ofenatmosphäre in Kontakt befindliche Strahlrohr sind neben der Wärmeleistung und der möglichen Oberflächenbelastung insbesondere die Beständigkeit gegen die wasserstoffhaltige Ofenraumatmosfera wesentlich, sowohl im Hinblick auf Verschleiß als auch Dichtheit. Für die im Inneren befindlichen Teile, speziell das Flammrohr und im Hybridstrahlrohr die Heizleiter, gelten weitere Anforderungen. Für das Flammrohr sind Geometrie und Formbarkeit wichtige Parameter. Die Heizleiter müssen für hohe Temperatur ausgelegt werden und eine Formbeständigkeit aufweisen. Zusätzlich ist eine geringe Oxidationsneigung wichtig.

Für das Hybridstrahlrohr wurde daher folgende Materialauswahl getroffen:

Strahlrohr:

- Variante 1: Keramische Ausführung aus technischer Keramik, SiSiC
- Variante 2: Metallische Ausführung aus hitzebeständigem Stahl (1.4841 oder 2.4851)

Flammrohr:

- Keramische Ausführung aus gedruckter technischer Keramik, SiSiC

Heizleiter:

- Pulvermetallurgisch hergestellte Eisen Chrom Aluminium Legierung (Kanthal APM\*)

In **Tabelle 1** sind die Materialeigenschaften für die ausgewählten Bauteile aufgeführt.

**Tabelle 1: Materialeigenschaften**

Bauteil	Material	Thermische Leitfähigkeit	Spezifische Wärme	Maximale Temperatur
Strahlrohr (keramische Version)	SiSiC	100°C: 160 W/ mK 1200°C: 24 W/ mK	25°C: 600 J/ kgK 1300°C: 1200 J/ kgK	1380°C
Strahlrohr (metallische Version)	1.4841	20°C: 15 W/ mK 500°C: 19 W/ mK	20°C: 500 J/ kgK	1150°C
Strahlrohr (metallische Version)	2.4851	20°C: 11,3 W/ mK 1100°C: 28,2 W/ mK	20°C: 472 J/ kgK 1100°C: 668 J/ kgK	1200°C
Flammrohr	SiSiC	100°C: 160 W/ mK 1200°C: 24 W/ mK	25°C: 600 J/ kgK 1300°C: 1200 J/ kgK	1380°C
Heizleiter	Kanthal APM	50°C: 11 W/ mK 1200°C: 27 W/ mK	20°C: 460 J/ kgK 1200°C: 740 J/ kgK	1425°C

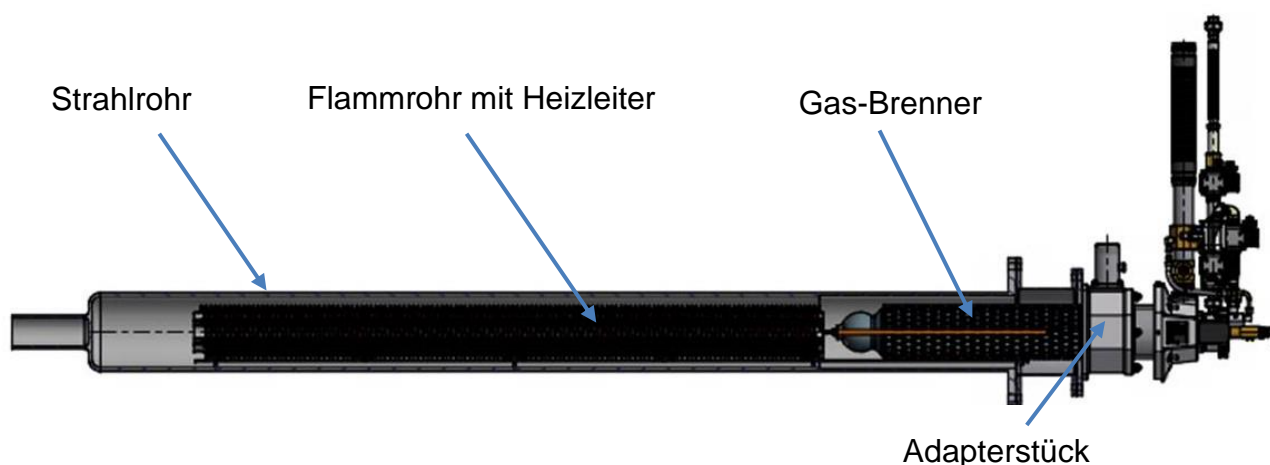
Das Strahlrohr kann für den betrachteten Anwendungsfall, je nach Einsatzbereich, aus metallischem oder keramischem Werkstoff gefertigt werden. Der Vorteil des keramischen Werkstoffs SiSiC sind die hohe Hitzebeständigkeit, Temperaturwechsel- und die chemische Beständigkeit. Metallische Strahlrohre zeichnen sich durch den geringeren Anschaffungspreis und die guten Möglichkeiten zur Bearbeitung des Materials aus.

Für das Flammrohr wurde eine technische Keramik vorgesehen, welche mit Hilfe eines additiv gefertigten (3D-Druck) Verfahrens hergestellt wird. Durch dieses Verfahren können im Gegensatz zu den üblichen Herstellungsverfahren für technische Keramiken weitaus komplexere Geometrien generiert werden. Besonders für Forschungsvorhaben ist das 3D-Druck Verfahren von Vorteil, da hier sehr flexibel auf Änderungen an Bauteilen reagiert werden kann. Da die elektrischen Heizleiter auf den Flammrohren platziert werden, ist eine Spezialausführung dieses für die Beheizung mit Strahlrohren verwendeten Standardbauteils notwendig.

Das für den Heizleiter verwendete Material APM (Kanthal Legierung) bildet unter Temperatur und Sauerstoffeinwirkung eine  $Al_2O_3$  Schutzschicht (keramisch), die vor weiterer Oxidation schützt und so zu langen Lebensdauern im normalerweise sehr korrosiven Hochtemperaturbereich führt. Eine weitere Besonderheit von APM ist die Kornstruktur, welche durch das Herstellungsverfahren (pulvermetallurgisches Hochdruckpressen) bedingt wird. Hierdurch hat der Werkstoff eine besonders hohe Kriechfestigkeit bei hohen Temperaturen.

### 3. Konzeption eines Hybridstrahlrohres

Basierend auf den ermittelten Anforderungen wurde ein Konzept eines Hybridstrahlrohres erarbeitet. Bei der konstruktiven Umsetzung war, neben der geometrischen Zusammenfügung beider Systeme, vor allem darauf zu achten, dass alle Komponenten den chemischen und temperaturtechnischen Bedingungen gewachsen sind. In **Abbildung 3** ist das erarbeitete Konzept des Demonstrators schematisch dargestellt.



**Abbildung 3:** Schema des Hybridstrahlrohres

Aufbauend auf einem bewährten Konzept für gasbeheizte Strahlrohre der WS Wärmeprozessstechnik GmbH wurde eine zusätzliche elektrische Beheizung integriert. Als Material des Strahlrohres wurde temperaturfester Stahl gewählt.

Die elektrische Beheizung wird mit einem Heizdraht umgesetzt, welcher innerhalb des Strahlrohres kreisförmig aufgewickelt ist. Er wird auf dem Flammrohr helixförmig angeordnet. Damit der Heizleiter im Betrieb in Form und Position bleibt, wird er von keramischen Kämmen gehalten. Diese werden formschlüssig auf dem ebenfalls keramischen Flammrohr aufgebracht. Zur Dimensionierung der elektrischen Beheizung, die in das Strahlrohr integriert wird, musste eine weitere Randbedingung beachtet werden. Die temperaturabhängige Oberflächenlast am Heizdraht darf nicht überschritten werden. Aus dem zur Verfügung stehenden Raum, der vorgesehenen Gesamtlast und der maximalen Oberflächenlast ergibt sich der Drahtdurchmesser und die Wicklungssteigung. Die Auslegung der Heizelemente führte zu den Parametern 400 V, 115 A und 46 kW bei einer maximalen Elementtemperatur von 1.425°C. Die Oberflächenlast im elektrischen Betrieb beträgt 6,46 W/cm<sup>2</sup>.

Im letzten konstruktiven Schritt müssen sowohl die elektrische als auch die gasbeheizte Variante in einem Strahlrohr miteinander vereint werden. Aufgrund der geänderten Innengeometrie mussten leichte Anpassungen an der Gasbeheizung vorgenommen werden. Um

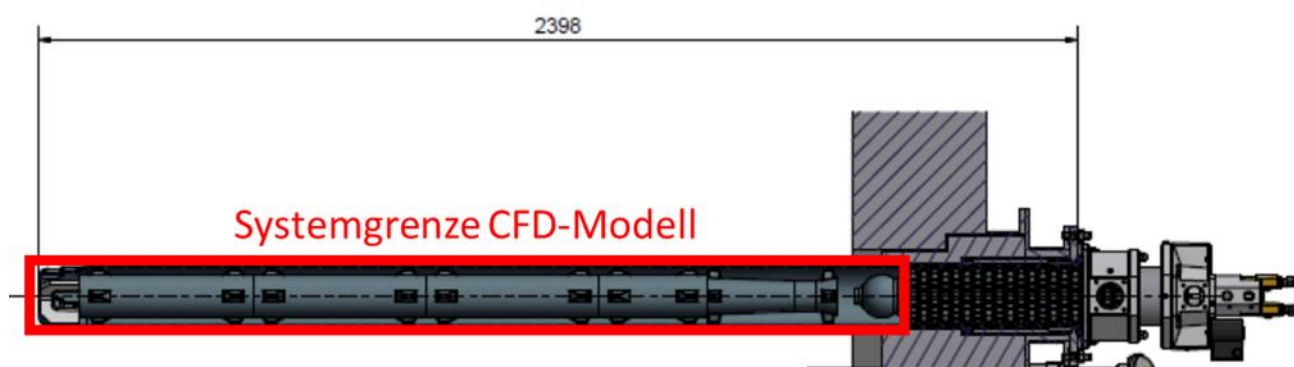


die Kombination mit der elektrischen Beheizung zu ermöglichen, musste ein zusätzliches Adapterstück im Demonstrator untergebracht werden. In diesem erfolgt die Ausleitung der Stromanschlüsse. Es ist flanschbar und somit gut in das vorhandene System zu integrieren.

Beide Systeme (Gas und Elektro) konnten mit überschaubarem Aufwand kombiniert werden. Dabei wurde weitestgehend auf bereits vorhandene Standards zurückgegriffen, was zu geringen Kosten beiträgt.

#### 4. Simulative Untersuchungen

Um das erarbeitete Konzept im Vorfeld zu überprüfen, wurde eine CFD-Simulation des Hybridstrahlrohres erstellt. Das CFD-Modell wurde aus der Zeichnung in **Abbildung 4** abgeleitet.



**Abbildung 4:** Zeichnung des Strahlrohrs ohne Heizdraht

Rot umrandet ist die Systemgrenze des CFD-Modells. Eine simulative Berechnung von dem das Strahlrohr umgebenden Ofenraum wurde nicht vorgenommen.

**Abbildung 5** zeigt den eingebauten Brenner und dessen Leistungsdaten.



### Keramischer Rekuperator-Brenner für Strahlrohre und direkte Beheizung

#### Leistung

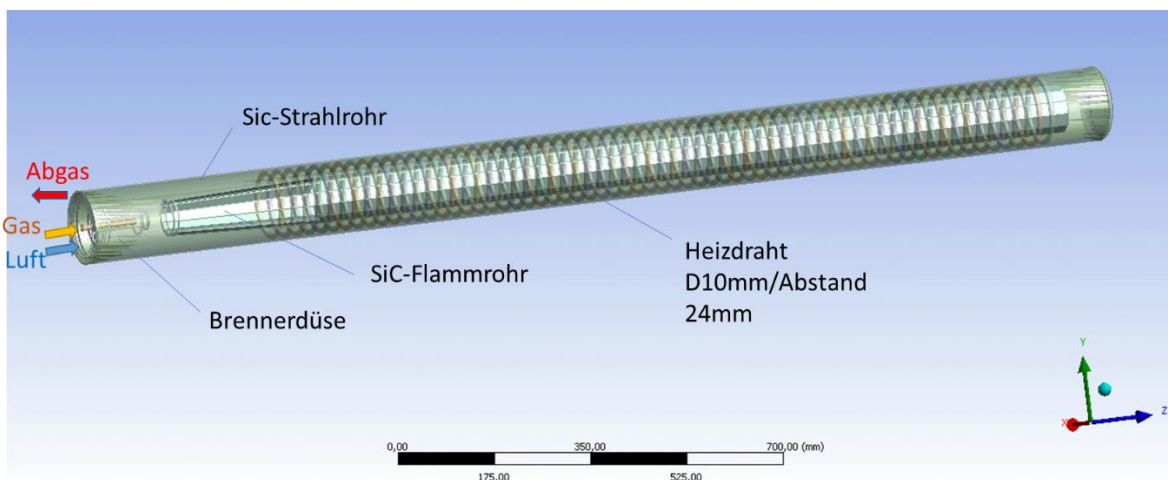
Nennleistung (Standard): 40 kW

min./max. Leistung (Opt.): 30 kW / 50 kW

**Abbildung 5:** Fotografie des Brenners inkl. Angabe der Leistungsdaten

Für das CFD-Modell wurde eine Leistung von 50 kW angenommen.

**Abbildung 6** zeigt das Modell des Hybrid-Strahlrohrs für die CFD-Simulation.



**Abbildung 6:** Modell Hybrid-Strahlrohr

Die Gesamtlänge des Strahlrohres beträgt ca. 2 m.

Zur Verringerung des Rechenaufwands wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Wärmeaustausch zwischen Abgas/Luft wurde nicht berücksichtigt (Luft tritt lt. Datenblatt mit 450 °C Vorwärmtemperatur ein),
- Vereinfachte Flammrohrgeometrie ohne Abstandshalter,

- Heizdraht nicht als Spirale, sondern als einzelne Ringe mit  $D = 10$  mm und Abstand von 24 mm untereinander.

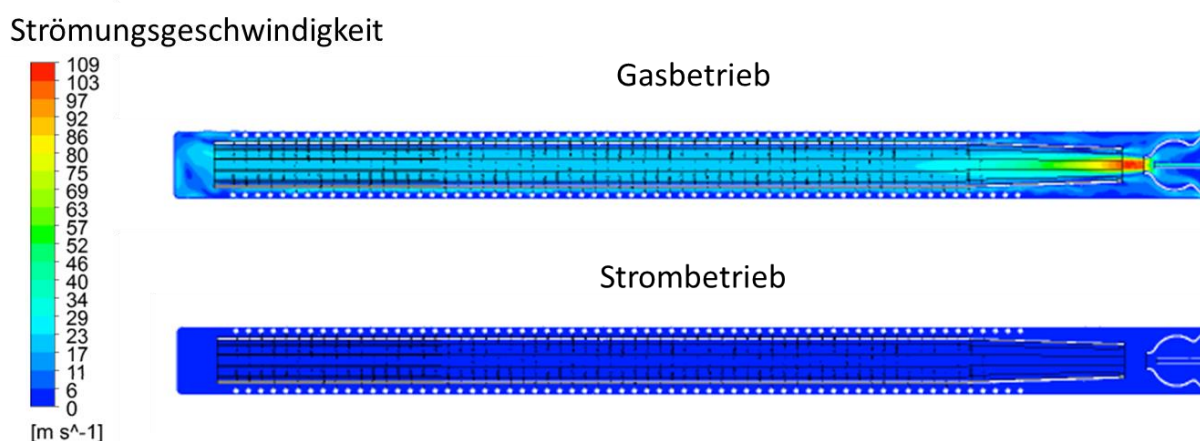
Mit den erwähnten Vereinfachungen konnte der Rechenaufwand auf ca. eine Woche pro Berechnung begrenzt werden. Als äußere Randbedingung an der Strahlrohroberfläche wurde ein Wärmeübergang zu einer Umgebung mit einer Temperatur von  $850$  °C (angenommene Wärmesenke) vorgegeben. Für den Strombetrieb wurde eine konstante Heizdrahttemperatur von  $1.100$  °C angenommen.

Die verwendeten CFD-Modelle in ANSYS Fluent © sind in **Tabelle 2** aufgelistet.

**Tabelle 2:** Verwendete Fluent-Modelle

Turbulenzmodell	k-Omega-SST-Modell
Verbrennungsmodell	Non-Premixed-Combustion PDF-Modell
Strahlungsmodell	Discrete-Ordinates 4x2

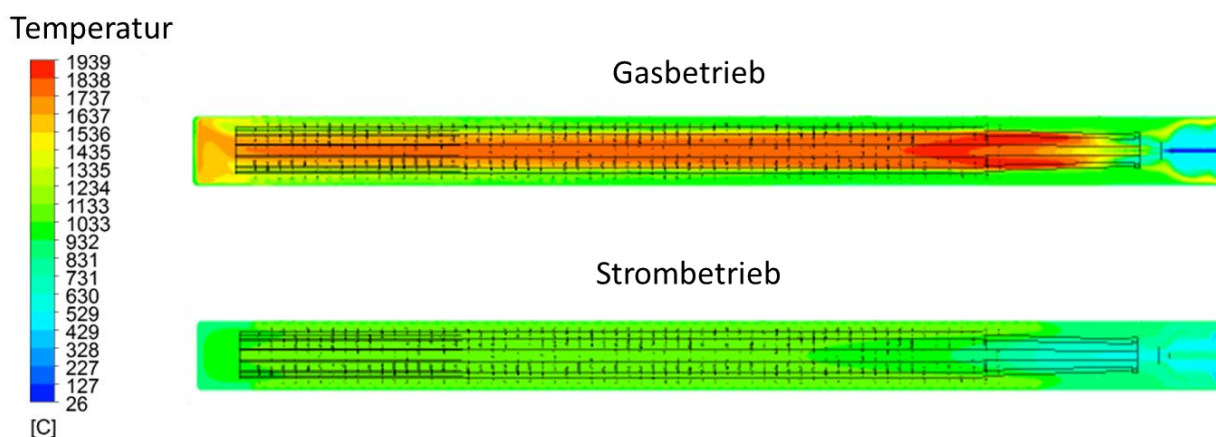
Mit den gewählten Parametern wurden sowohl für den rein elektrisch beheizten als auch für den gasbefeuerten Betrieb Simulationsrechnungen durchgeführt. Die erhaltenen Berechnungsergebnisse zu Strömungsgeschwindigkeit, Temperaturverteilung innerhalb sowie die Oberflächentemperatur des Strahlrohrs werden nachfolgend erläutert. **Abbildung 7** zeigt die Strömungsgeschwindigkeit im Halbschnitt des Strahlrohrs.



**Abbildung 7:** Strömungsgeschwindigkeiten im Strahlrohr



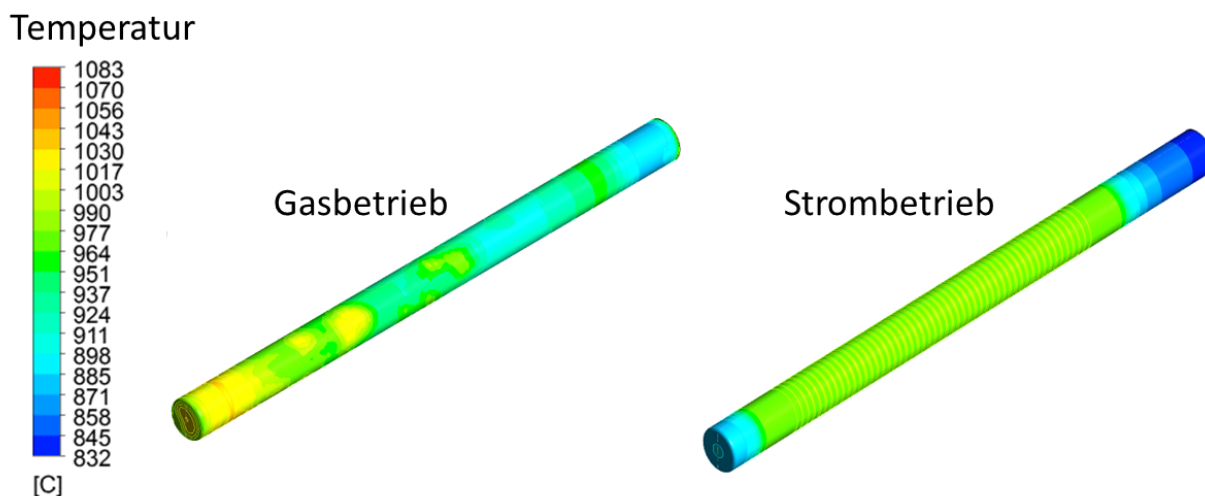
Der Eintritt von Brenngas und -luft ist in der Abbildung rechts. Aufgrund des hohen Austrittsimpulses des Gases sowie der Luft entstehen im Gasbetrieb Spitzen in der Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 110 m/s am Brennermund. Im Strombetrieb strömt lediglich ein Spülluftstrom von etwa 2 % des sonstigen Luftstroms und kein Gasstrom durch das Strahlrohr. Daher sind hier die Strömungsgeschwindigkeiten im Inneren des Strahlrohrs nahezu 0 m/s. **Abbildung 8** zeigt die berechneten Fluid- und Solidtemperaturen im Halbschnitt des Strahlrohrs.



**Abbildung 8:** Berechnete Temperaturen im Schnittbild (X-Ansicht)

Im Gasbetrieb wird aufgrund der Verbrennung des Brenngases eine Flamme berechnet. Dadurch liegt die höchste berechnete Temperatur bei 1.939 °C innerhalb des Flammrohrs. Die heiße Flamme strömt durch das SiSiC-Flammrohr zum Ende des Strahlrohrs hin und wird dort um 180° umgeleitet, die heißen Gase strömen an der Innenseite des Strahlrohrs entlang und mit etwa 1.100°C wieder zurück.

Im Strombetrieb stellt sich im Bereich der Heizdrähte eine homogene Temperaturverteilung mit einer Temperatur von etwa 1.100 °C (Heizdrahttemperatur) ein. **Abbildung 9** zeigt die berechnete Oberflächentemperaturen des Strahlrohrs für den Gas- und Strombetrieb.



**Abbildung 9:** Temperatur auf der Strahlrohroberfläche in ISO-Ansicht

Im simulierten Gasbetrieb wird das Strahlrohr an der Spitze bis über 1.000 °C heiß. Die Oberfläche des Strahlrohrs weist zur Strahlrohreinspannung hin niedrigere Temperaturen auf.

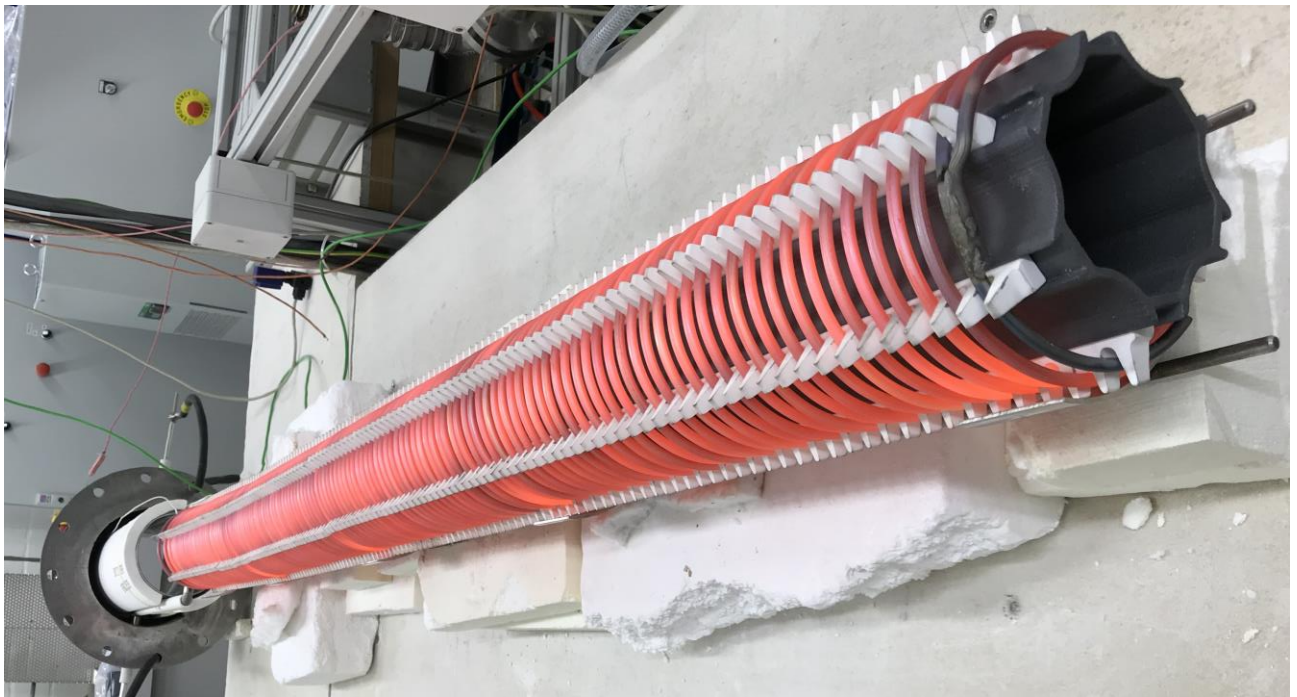
Im Strombetrieb kann man deutlich den Bereich der Heizdrähte identifizieren. In diesem Bereich liegen die Oberflächentemperaturen bei 970 – 1.020 °C. In den Bereichen ohne innenliegende Heizdrähte sind die Oberflächentemperaturen um etwa 70 – 100 K niedriger.

Die gemittelte Oberflächentemperatur beträgt beim Gasbetrieb 954 °C und beim Strombetrieb 952°C. Das Ziel die Strahlrohroberfläche auch auf ca. 950°C zu erwärmen, ist somit realistisch erreichbar. Die berechnete Temperaturverteilung sowohl für den Gas- als auch für den Strombetrieb lassen keine erheblichen Temperaturunterschiede für den Betrieb erwarten. Weiterhin sind aufgrund der erhaltenen Ergebnisse keine temperaturinduzierten Spannungen zu erwarten, das gewählte Konzept sollte umsetzbar sein.

## 5. Untersuchungen zur elektrischen und gasbetriebenen Beheizung

### Teilprüfung Funktion elektrische Beheizung:

Auf Basis des ausgearbeiteten Konzeptes wurde in mehreren Schritten ein Demonstrator aufgebaut und erprobt. Begonnen wurde mit einer Konstruktion eines angepassten Flammrohres. Dieses Flammrohr wurde aus SiSiC-Keramik im 3D-Druckverfahren von einem Hersteller von Industriekeramik angefertigt. Auf dieses Flammrohr wurden keramische Abstandshalter montiert, die als Führung und Positionierung für den elektrischen Heizdraht dienen. **Abbildung 10** zeigt den Aufbau des Flammrohres mit dem Heizdraht.



**Abbildung 10:** Fotografie des Flammrohrs mit Heizdraht

Das schwarze SiSiC-Flammrohr ist in der Abbildung rechts ersichtlich. Es weist über dem Umfang verteilt Nuten auf, in welche die weißen keramischen Abstandshalter eingebracht wurden. Um diese Abstandshalter auf dem Flammrohr wurde der Heizdraht aufgewickelt, so dass sich eine helixförmige Struktur ergibt. Das gesamte Flammrohr besteht aus mehreren einzelnen Segmenten. Dies ermöglicht es einerseits, künftige Anpassungen in der Länge des hybriden Strahlrohres vorzunehmen. Andererseits ist bei auftretenden Defekten ein kostengünstiger Teilaustausch möglich.

Dieser Aufbau wurde bei Kanthal einem elektrischen Funktionstest unterzogen. **Abbildung 11** zeigt eine fotografische Aufnahme mit aktiver Beheizung.



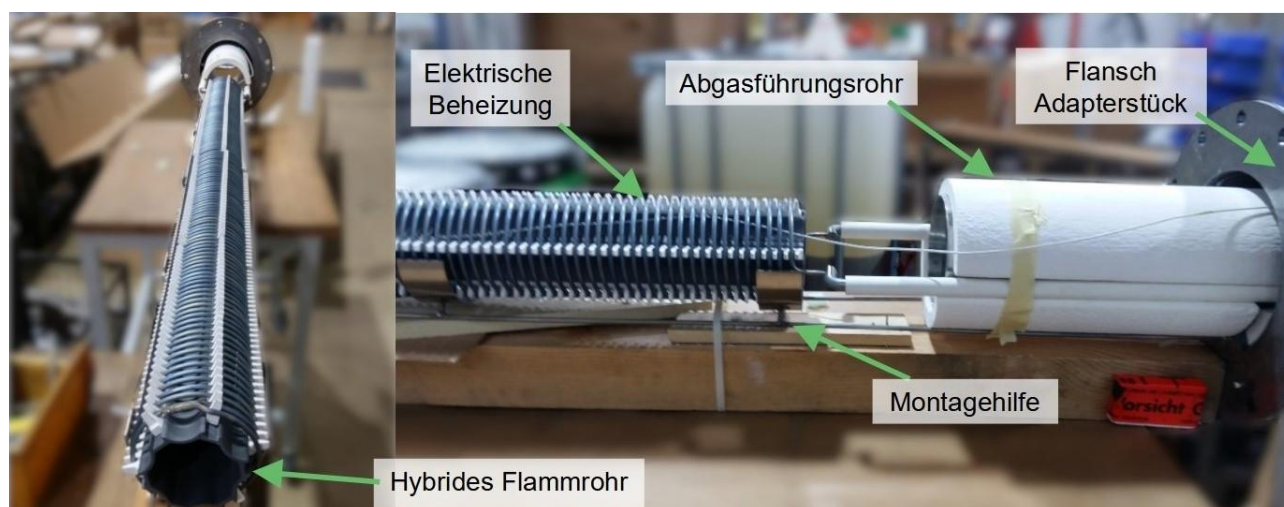
**Abbildung 11:** Fotografische Ansicht des Funktionstests der elektrischen Beheizung

Über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten wurde die elektrische Beheizung getestet. Die geschaltete Leistung betrug 46 kW, es wurde eine Überwachung der Heizdrahttemperatur vorgenommen. Bei der Erprobung traten keine Auffälligkeiten (z.B. lokale Überhitzung) oder Störungen auf. Der grundsätzliche Funktionstest der elektrischen Beheizung ist erfolgreich durchgeführt worden.

#### **Komplettierung des Versuchsaufbaus:**

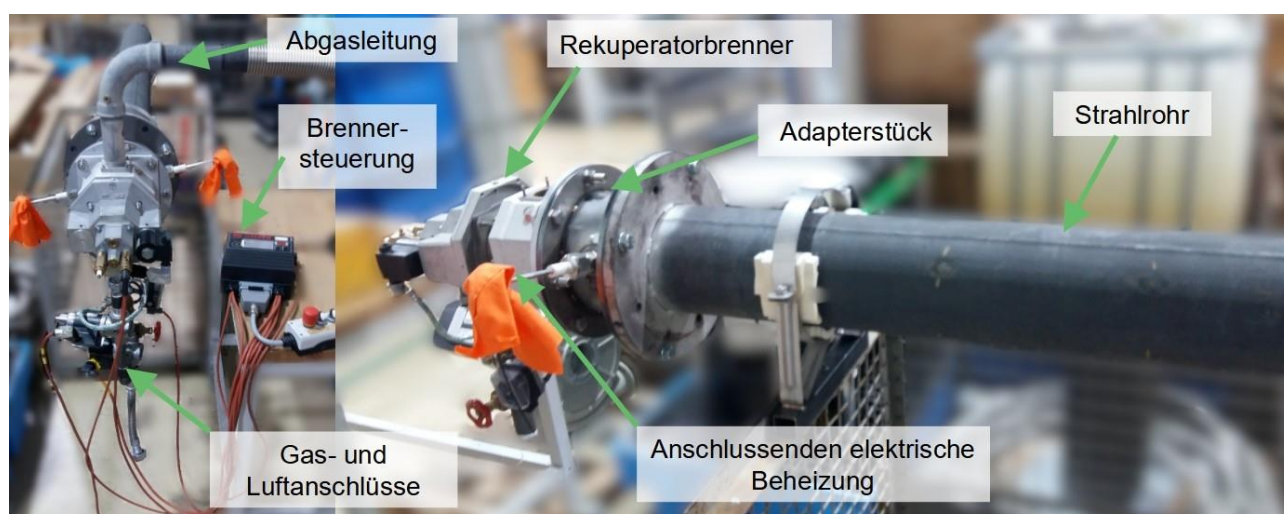
Im nächsten Schritt wurde das teilmontierte Modul, bestehend aus elektrischer Beheizung, Hybridflammrohren, Montagehilfe, Adapter und Abgasführungsrohr, in das Strahlrohr eingebaut. Nach Einbau des Gasbrenners ist das hybride Strahlrohr komplett montiert. **Abbildung 12** zeigt das teilmontierte Demonstratormodul.





**Abbildung 12:** Teilmontiertes Modul bestehend aus elektrischer Beheizung, Hybridflamrohr, Montagehilfe, Adapter und Abgasführungsrohr

**Abbildung 13** zeigt das montierte Hybridstrahlrohr inklusive Brenner und zugehöriger Brennersteuerung.

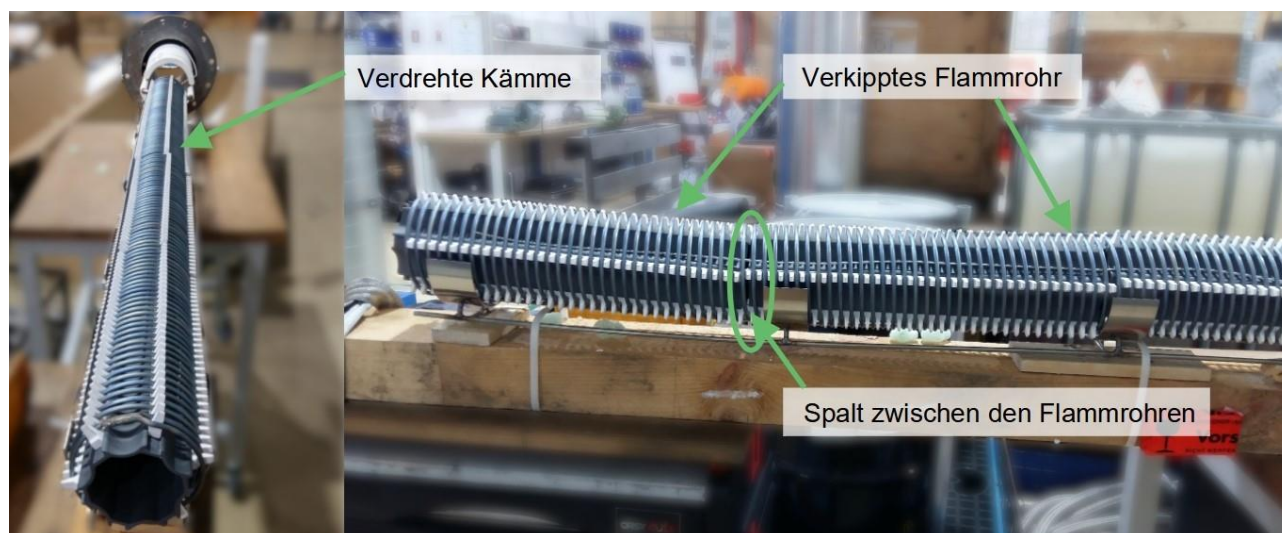


**Abbildung 13:** Montiertes Hybridstrahlrohr inklusive Rekuperatorbrenner und Brennersteuerung

### Optimierungsmöglichkeiten Montage:

Bezüglich der Montage des Hybridstrahlrohres zeigten sich Optimierungsmöglichkeiten für den Einbau des teilmontierten Moduls mit der elektrischen Beheizung in das Strahlrohr. Die Stabilität der Montagehilfe ist gegenwärtig nicht ausreichend, um die Flammrohre in der Waagerechten zu halten, weshalb das teilmontierte Modul beim Einbau in das Strahlrohr

über die komplette Länge zusätzlich unterstützt werden muss. Die Konstruktion der Montagehilfe sollte außerdem nochmals überarbeitet werden, weil sich mit der aktuellen Ausführung die Flammrohre untereinander verschieben, was zu Lücken zwischen den einzelnen Flammrohren führen kann. **Abbildung 14** zeigt die Verschiebung der Flammrohre des teilmontierten Moduls.



**Abbildung 14:** Verschiebung der Flammrohre auf dem teilmontierten Modul

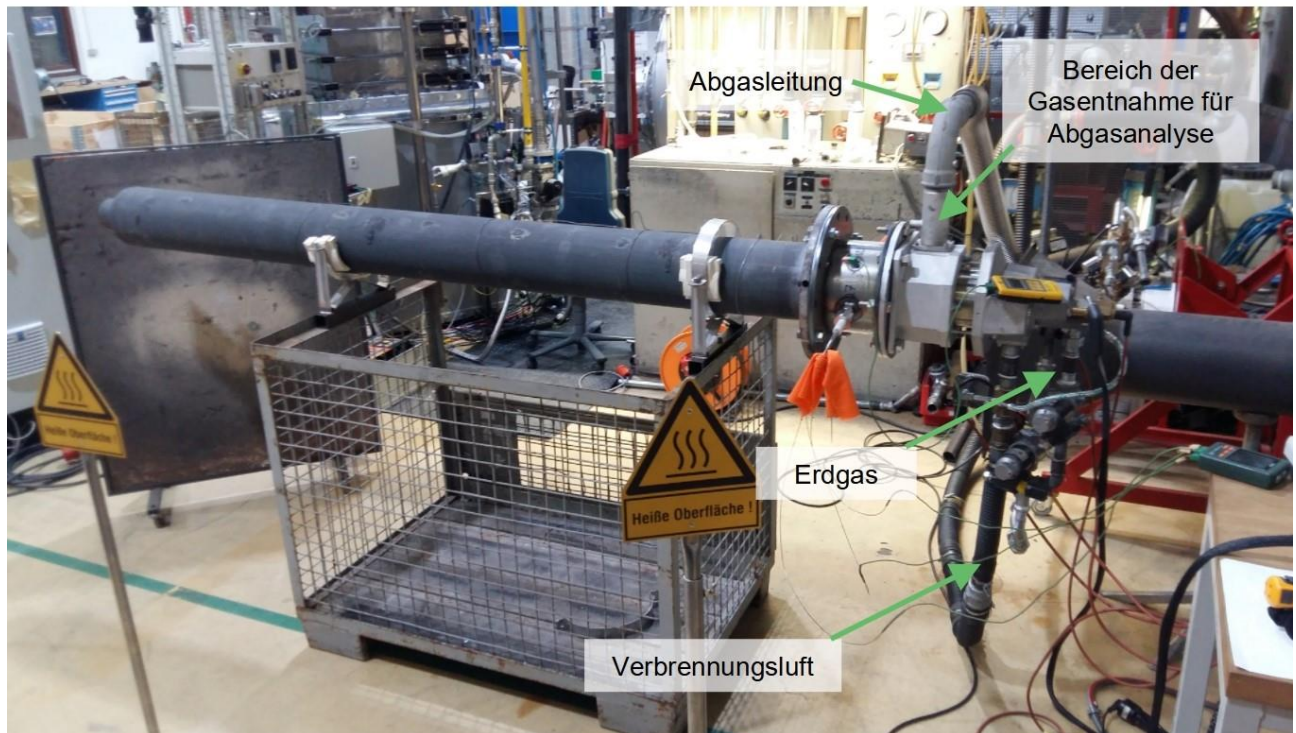
Ein geschlossenes Flammrohrpaket ist notwendig, um eine gleichmäßige Beheizung über das ganze Strahlrohr zu garantieren. Aus diesem Grund muss die Montagehilfe eine gleichmäßige Lagerung der Flammrohre ermöglichen. Durch einseitig absinkende Flammrohre und die hieraus resultierenden Spannungen sind vereinzelt keramische Kämmen bereits vor dem ersten Einbau leicht beschädigt worden. Diese Beschädigung sollte die Funktion der elektrischen Beheizung prinzipiell nicht beeinträchtigen.

Für spätere Anwendungen im industriellen Maßstab ist zu überlegen, wie ein Einbau und Austausch des elektrischen Moduls optimal durchgeführt werden kann, da hier das Platzangebot zum Einbau beschränkt sein kann.

#### **Teilprüfung Funktion Gasbeheizung:**

Für die Funktionsüberprüfung der Gasbeheizung des hybriden Strahlrohres wurde das Rohr freistehend beheizt. Die Gasbeheizung am komplett montierten Hybridstrahlrohr konnte erfolgreich betrieben werden. **Abbildung 15** zeigt das für den Funktionstest am Prüfstand angeschlossene Hybridstrahlrohr.





**Abbildung 15:** Fotografie des am Prüfstand angeschlossenes Hybridstrahlrohrs

Zur Funktionsüberprüfung wurden die folgenden relevanten Betriebsparameter ermittelt:

- Rohrtemperatur,
- Abgastemperatur,
- Emissionswerte (insbesondere  $\text{NO}_x$  und  $\text{CO}$ ).

Zur Ermittlung der Emissionswerte und der Abgasaustrittstemperatur nach dem Wärmeübertrager wurde ein Abgasanalysegerät (Firma: Eheim, Typ Visit 01 L) verwendet. Für alle weiteren gemessenen Temperaturen wurden Thermoelemente des Typ K eingesetzt. Folgende Temperaturmessstellen wurden für die Untersuchungen festgelegt:

- T1: Rohrtemperatur hinten,
- T2: Rohrtemperatur vorne,
- T3: Hybridflamrohrspitze,
- TAGE: Abgaseintrittstemperatur (vor Rekuperator),
- TAGA: Abgasaustrittstemperatur (nach Rekuperator).

**Abbildung 16** zeigt die Positionen für die verschiedenen Temperaturmessstellen.



**Abbildung 16:** Fotografien der Temperaturmessstellen am Hybridstrahlrohr

**Abbildung 17** zeigt die Platzierung des Thermoelementes der Messstelle T3 an der Oberfläche des Hybridflammrohres im Bereich des Rohrendes.



**Abbildung 17:** Positionierung der Temperaturmessstelle T3 auf dem Hybridflammrohr

Für die Funktionsüberprüfung wurden drei Leistungsstufen (30 kW, 40 kW und 49 kW - Maximale Leistung) des Hybridstrahlrohres untersucht. Die erhaltenen Ergebnisse sind in **Tabelle 3** dargestellt.



**Tabelle 3:** Ergebnisse der Funktionsüberprüfung am Hybridstrahlrohr

Leistung in kW	30	40	49
T <sub>AGA</sub> in °C	335	387	419
T <sub>AGE</sub> in °C	570	623	668
T1 in °C	363	406	446
T2 in °C	303	334	356
T3 in °C	624	693	750
O <sub>2</sub> in %	3,3	3,2	1,2
NO <sub>x</sub> in ppm bez auf 3 % O <sub>2</sub>	82	77	80
CO in ppm bez auf 3 % O <sub>2</sub>	1	0	6

Zur Ermittlung der Werte wurde der Brenner dauerhaft im Flammenbetrieb beheizt und die bei diesem Aufbau maximal zu erreichenden Temperaturen gemessen.

Die Messungen zeigen eine vollständige Verbrennung im Hybridstrahlrohr. Die geringen Kohlenstoffmonoxid-(CO) Konzentrationen < 10 ppm lassen darauf schließen, dass die Verbrennung vergleichbar zu bekannten Strahlrohrapplikationen stattfindet und das Brenngas im Strahlrohr vollständig mit der vorhandenen Verbrennungsluft reagiert. Die ermittelten Kohlenstoffmonoxid- und Stickoxid-(NO<sub>x</sub>) Konzentrationen zeigen weiterhin, dass die eingestellte Leistung im untersuchten Temperaturbereich keinen signifikanten Einfluss auf die Emissionswerte hat. Unter Einbeziehung des Sauerstoffgehaltes im Abgas lässt sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_f$  bei den untersuchten Randbedingungen aus der Abgasaustrittstemperatur für 30 kW mit  $\eta_f \approx 85 \%$ , für 40 kW mit  $\eta_f \approx 83 \%$  und für 49 kW mit  $\eta_f \approx 83 \%$  abschätzen.

Die Temperaturen innerhalb des Strahlrohres (Messpunkte T3 und T<sub>AGE</sub>) liegen im Bereich 570 - 624 °C für 30 kW und 668 - 750 °C für die Leistung von 40 kW. Für die

Strahlrohroberflächentemperaturen wurden an den zwei Messstellen (T1 und T2) Temperaturen von 303 - 363 °C für die 30 kW Leistung und 356 - 446 °C für die 40 kW Leistung gemessen.

Die gegenüber der Simulation niedrigere Oberflächentemperatur des Strahlrohres ist durch die Umgebungsbedingungen des Prüfstands bedingt. In einem Bandofen ist das Hybridstrahlrohr in einer definierten Umgebung in einem Verbund eingesetzt. Eine Vielzahl von Strahlrohren heizt dort den Ofenraum und das Stahlband auf, der Ofenraum ist gegen die Umgebung mit einem wärmegeprägten Wandaufbau abgeschirmt. Im Prüfstand hingegen strahlt das Strahlrohr seine Wärme frei an die rd. 20°C warme Umgebung ab, die erhaltenen Messdaten sind daher nicht repräsentativ für den Einsatz in einem Bandofen, zum Erkenntnisgewinn allerdings hinreichend.

Der grundsätzliche Funktionstest der Gasbeheizung des hybriden Strahlrohres ist erfolgreich durchgeführt worden.

## **6. Diskussion der Ergebnisse**

Das im Projekt erarbeitete Konzept eines Hybridstrahlrohres hat seine technische Machbarkeit erfolgreich unter Beweis stellen können. In der begleitenden Recherche sind während des Projektzeitraumes keine ähnlichen oder vergleichbaren Entwicklungsarbeiten oder Produkte bekannt geworden. Sowohl die elektrische als auch die gasbefeuerte Beheizung konnten erfolgreich erprobt werden. Durch die Nutzung von bewährten Konzepten bisheriger Strahlrohrbauten, der Verwendung üblicher Komponenten und einem modularen Aufbau konnten die Erwartungen an eine spätere kosteneffiziente Fertigung erfüllt werden. Aufgrund des gegenwärtigen Charakters eines Demonstrators und noch zu erwartender Anpassungsarbeiten für die industrielle Erprobung kann noch keine Kostenabschätzung für ein späteres Produkt erstellt werden.

Auf der technischen Seite ist die Machbarkeit eines Hybridstrahlrohres erfolgreich gezeigt worden. Die Vorbereitungen für eine industrielle Erprobung sind sehr gut umgesetzt worden. Mit der Nutzung von weitestgehend marktüblich verfügbaren Komponenten (Strahlrohr, Brenner, Heizdraht etc.) ist eine Adaption an einen industriellen Einsatz möglich. Es sind noch Adaptionen für eine einfachere Montage erforderlich, Ansätze dafür wurden erarbeitet und dargestellt. Die Anpassung der Leistungsabgabe des Strahlrohres im betrieblichen Einsatz muss noch adaptiv umgesetzt werden. Es sind noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hierzu geplant.

Aus ökologischer Sicht konnte eine prinzipielle Kompensation eines bisher gasbefeuerten Heizbetriebes eines Teilaggregates der Thermoprozesstechnik erfolgreich dargestellt werden. Mit dem hier erarbeiteten Konzept eines Hybridstrahlrohres ist es möglich, die Nutzung von erneuerbarer elektrischer Energie in einem bisher nicht genutzten Bereich der Prozessindustrie zu ermöglichen. Neben einer Kopplung der Sektoren Energieerzeugung und produzierendem Gewerbe ist eine Umweltentlastung zu erwarten. Der rein elektrische Betrieb eines Hybridstrahlrohres wird zu einer Einsparung von CO<sub>2</sub> führen. Jeder eingesparte Kubikmeter Erdgas entspricht einer Masse von ca. 2 kg CO<sub>2</sub>, deren Ausstoß vermieden wird.

Der hybride Ansatz hat aus mehreren Gründen eine Berechtigung. Die Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Energiequellen in der Prozessindustrie kann ausgeweitet werden. Wenn die Netzkapazitäten nicht ausreichen, um den insgesamt erzeugten Strom abzutransportieren, muss der Netzbetreiber die Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen abregeln. Allein im Jahr 2019 betrug die Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen bei Windkraftanlagen 6.272,5 GWh [BNetz2020]. Zu Zeiten, in denen am Markt ein Überangebot elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen vorliegt, können flexible Aggregate, z.B. hybride Strahlrohre, den Strom abnehmen und direkt zur Wärmezeugung nutzen. Das Potential hybrid beheizter und flexibel schaltbarer Technologien ist sehr groß.

Allerdings ist auch die Nutzung von Brenngas zur Beheizung von Thermoprozessanlagen weiterhin sinnvoll. Zum einen ist gegenwärtig der Preis je kWh bei Erdgas gegenüber elektrischer Energie für industrielle Nutzer wesentlich günstiger [BMWi2020]. Mit dem aktuellen Strommix in Deutschland hat die Gasbeheizung aufgrund des niedrigeren spezifischen CO<sub>2</sub>-Ausstosses (rd. 220 g je kWh bei Erdgas und 468 g je kWh bei Strom [UBA2020]) auch ökologische Vorteile. Eine Nutzung konventionell erzeugter elektrischer Energie bei hybrid betreibbaren Aggregaten ist zu vermeiden.

Zum anderen ist der Ausbau der erneuerbaren Energien noch nicht so weit, dass dauerhaft ein Überangebot an elektrischer Energie zur Verfügung steht. Andererseits ist aber durch die Nutzung von Power-to-Gas-Technologien, wie in der Nationalen Wasserstoffstrategie [BMBF2020] verankert, der Anteil von erneuerbaren Energien im Brenngas steigend. Die Nutzung von Brenngas ist unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass mit dem Einsatz des hybriden Strahlrohres bereits heute und auch in Zukunft flexibel auf den Energiemarkt reagiert werden kann. Es ist auch bei einem zeitlich schwankenden Energiemix stets die günstigste Beheizungsvariante

---

im Hinblick auf den Preis und die CO<sub>2</sub>-Bilanz nutzbar. Weiterhin ist eine Nachrüstung in den Anlagenbestand langlebiger Thermoprozessanlagen möglich.

Zur Darstellung der Projektergebnisse und -arbeiten wurde das Projekt beim Fachworkshop „Zukünftige Beheizungstechnologien“ am 19. Juni 2020 (Web-Seminar) im Rahmen des Innovationsnetzwerks „Hybrid-Heating“ mit über 100 Teilnehmern vorgestellt (<https://www.hybrid-heating.de/veranstaltungen/workshop-zukuenftige-beheizungstechnologien/>). Darüber hinaus sind weitere Veröffentlichungen geplant.

## Literaturverzeichnis

- [BMWi2020] Internationaler Energiepreisvergleich für Industrie, Erdgas und Elektrizität, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/Energiepreise-und-Energiekosten/energiedaten-energiepreise-4-xls.xlsx>, Abruf am 21.01.2021
- [BMBF2020] Die Nationale Wasserstoffstrategie, <https://www.bmbf.de/files/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>, Abruf am 21.01.2021
- [BNetz2020] Bundesnetzagentur, Monitoringbericht 2020, [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht\\_Energie2020.pdf](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Monitoringbericht_Energie2020.pdf), Ausfallarbeit durch Einspeisemanagementmaßnahmen , S 148, Abruf am 28.1.2021
- [EU2019] The European Green Deal, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>, Abruf am 21.01.2021
- [KSG2019] Bundes-Klimaschutzgesetz, <https://www.bmu.de/gesetz/bundes-klimaschutz-gesetz>, Abruf am 21.01.2021
- [Spe2014] Specht, E.: Wärme- und Stoffübergang in der Thermoprozesstechnik, Vulkan Verlag, 2014
- [UBA2020] Umweltbundesamt, Wie viel CO2 verursacht eine Kilowattstunde Strom im deutschen Strommix?, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen?sprungmarke=Strommix#Strommix>, Abruf 28.1.2021
- [WS2014] WS Wärmeprozestechnik GmbH, Firmenprospekt 2014, [https://flox.com/documents/de\\_WS\\_Image.pdf](https://flox.com/documents/de_WS_Image.pdf), Abruf am 21.01.2021

**Bericht Nr.: 3100.055 / U.-Nr.: 80.380**

Alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Ohne ausdrückliche Genehmigung des BFI ist es auch nicht gestattet, diesen Bericht  
oder Teile daraus auf photomechanischem oder anderem Wege zu vervielfältigen.