



# SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:

Teilprojekt I.7: Hybride Beheizung in der Stahlindustrie  
(„HyBeSt“) Förderkennzeichen: 03SFK3P0-2

01.11.2019 – 30.06.2023

- Öffentlicher Teil -

GEFÖRDERT VOM

**KOPERNIKUS**  
**SynErgie >> PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Autoren:

A. Queck<sup>1</sup>, B. Stranzinger<sup>1</sup>,  
S. Lindtner<sup>2</sup>, M. Mann<sup>2</sup>,  
S. Bullert<sup>3</sup>, J.G. Wünning<sup>3</sup>,  
M. Keller<sup>4</sup>, A. Westerfeld<sup>4</sup>

<sup>1</sup> VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH,

<sup>2</sup> Kanthal GmbH,

<sup>3</sup> WS Wärmeprozesstechnik GmbH,

<sup>4</sup> thyssenkrupp Steel Europe AG



Teil I: Kurze Darstellung .....	3
1 Aufgabenstellung .....	3
2 Voraussetzungen .....	3
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	4
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	5
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	7
Literatur .....	7



## Teil I: Kurze Darstellung

### 1 Aufgabenstellung

Das Teilprojekt „HyBeSt“ hatte das Ziel, Wege für die hybride Beheizung in der Stahlindustrie zu erforschen, bestehende Herausforderungen zu adressieren und danach eine Beispielanwendung betrieblich umzusetzen. Hierfür sollte erforscht werden, ob eine bisher rein verbrennungstechnische Lösung mit dem fossilen Energieträger Erdgas zur Beheizung eines Prozesses durch eine hybride (Brenngas und elektrische Energie) Lösung ersetzt werden kann. Dies kann Potenziale zur Erschließung von neuen, variabel nutzbaren elektrischen Lasten in der Prozessindustrie generieren. Gleichzeitig trägt das Vorhaben zur Sektorenkopplung zwischen Strom-Sektor (erneuerbaren Energien) und Wärme-Sektor (Prozessindustrie) bei. Die Partner sollten eine hybride Beheizungstechnologie in der Stahlindustrie gemeinsam erforschen, entwickeln und einsetzen. Für eine bisher mit sogenannten Strahlrohren, unter Einsatz von Brenngas, beheizte Banderwärmungsanlage in der Stahlindustrie sollte ein hybrides Strahlheizrohr entwickelt, getestet und ersten betrieblichen Erprobungen unterzogen werden. Hiermit sollte eine neue, aufgrund vom Hybridbetrieb flexibilisierbare, elektrische Last in einem Schlüsselbereich der Prozessindustrie geschaffen werden.

### 2 Voraussetzungen

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH

Die gemeinnützige VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI) ist in mehreren Kooperationen gemeinsam mit Forschungseinrichtungen und Unternehmen der Eisen- und Stahlindustrie im Bereich der effizienten Anwendung und Nutzung von Energie zur Herstellung hochwertiger Stahlprodukte tätig. Der Schwerpunkt der für dieses Vorhaben relevanten Forschungsvorhaben liegt im Bereich der Verbesserung der Energieeffizienz und in Optimierungen von Beheizungstechnologien.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz hat das BFI unter anderem folgende Themen bearbeitet:

- Verbundvorhaben ReflexRolle: Reduzierung der Kühlverluste und Erhöhung der Lebensdauer von Ofenrollen durch eine anti-adhäsive und reflexionssteigernde Beschichtung [1];
- Verbundvorhaben VEIK: Verbesserung der Wärmebehandlung und Erwärmung in Industrieöfen durch Einsatz neuer innovativer keramischer Heißgasventilatoren [2];
- Verbundvorhaben HyPro: Hybride Prozessführung durch Integration modellbasierter, datenbasierter und wissensbasierter Techniken zur Energieeinsparung in komplexen Prozessen [3].

Weiterhin arbeitet das BFI an mehreren Themen, die sich mit der Ressourcen- und Energieeffizienz, der Dekarbonisierung, und auch dem Ersatz von fossilen Energieträgern durch elektrische Energie in der Stahlindustrie befassen.

Im laufenden Forschungsvorhaben „H<sub>2</sub>-HotRoll - Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Stahlindustrie durch Einsatz von H<sub>2</sub> an kontinuierlich betriebenen Thermoprozessanlagen am

Beispiel von Wiedererwärmungsöfen“ [4] arbeitet das BFI mit Partnern aus der Stahlindustrie an Lösungen zur Dekarbonisierung.

Ferner wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes in dem Vorhaben „Abwärmennutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie“ detailliert die Abwärmeströme bei der Stahlerzeugung und -bearbeitung in integrierten Hüttenwerken und deren potenzielle Nutzungsmöglichkeiten betrachtet [5].

#### Kanthal GmbH

Die Kanthal GmbH ist die deutsche Vertretung der Kanthal AB, die weltweit führende Marke für Produkte und Dienstleistungen im Bereich industrieller Heiztechnik und Widerstandsmaterialien. Nachhaltigkeit ist ein wesentlicher Bestandteil der Unternehmens-Philosophie, um jetzt und in Zukunft wettbewerbsfähige und verantwortungsbewusste Beheizungslösungen anzubieten zu können. Seit rund 100 Jahren entwickelt Kanthal unterschiedliche elektrische Beheizungslösungen für eine Vielzahl von Anwendungen. Stetige Weiterentwicklungen der eigenen Produkte sind essenziell für das Bestehen am Weltmarkt.

#### thyssenkrupp Steel Europe AG

Die thyssenkrupp Steel Europe AG (tkSE) ist weltweit tätig und einer der größten Flachstahlhersteller in Europa. Die stetige Verbesserung der Produkte und Prozesse sowie Forschung und Entwicklung sind wichtige Teile der Geschäftstätigkeit, um im internationalen Markt bestehen zu können. Hierzu initiiert tkSE eigene Forschungsprojekte und arbeitet mit einer Vielzahl von Hochschulen, Forschungsinstituten und anderen Unternehmen zusammen.

#### WS Wärmeprozesstechnik GmbH

Die WS Wärmeprozesstechnik GmbH (WS) ist ein mittelständisches inhabergeführtes Unternehmen, welches sich auf energiesparende und schadstoffarme Brennersysteme für Industrieöfen spezialisiert hat. Die Aktivitäten umfassen Entwicklung, Konstruktion, Herstellung, Vertrieb sowie Service im In- und Ausland. WS ist in eine Reihe von erfolgreich abgeschlossenen und laufenden Forschungsvorhaben involviert. Ein Beispiel für die äußerst erfolgreiche Tätigkeit von WS ist der an die Geschäftsführer J.A. Wünning und J.G. Wünning 2011 verliehene Deutsche Umweltpreis [6].

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt „HyBest“ wurde als Teilprojekt I.7 im Cluster I (Industrieprozesse) des Synergie-Verbundprojekts durchgeführt und in Kooperation von den Projektpartnern BFI, Kanthal, tkSE und WS bearbeitet. Ziel des Projekts war es, eine hybride Beheizungstechnologie in der Stahlindustrie gemeinsam zu entwickeln und zu erproben.

Das Vorhaben wurde in sechs Arbeitspakete unterteilt:

- Arbeitspaket I.7.0: Datenerhebung für Cluster III, IV, V
- Arbeitspaket I.7.1: Auswahl der Materialien für Kombinationsanwendung
- Arbeitspaket I.7.2: Entwicklung eines hybriden Beheizungskonzeptes



- Arbeitspaket I.7.3: Entwicklung angepasster Schaltungstechnik
- Arbeitspaket I.7.4: Konstruktion eines Versuchsstrahlrohres
- Arbeitspaket I.7.5: Betriebsnahe Untersuchungen im Technikum mit Optimierung des Gesamtsystems
- Arbeitspaket I.7.6: Betriebliche Erprobung im Produktionsbetrieb

Der geplante Zeitablauf des Vorhabens ist in Abbildung 1 dargestellt.

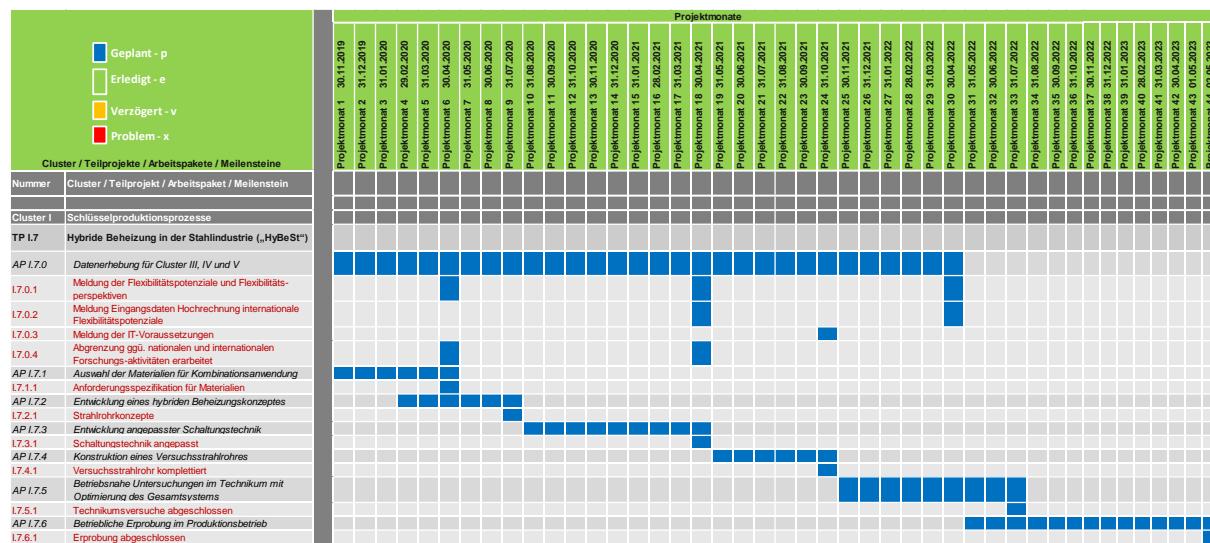


Abbildung 1: Zeitplan des Teilprojektes I.7

Im Rahmen des Projektes wurde ein Konzept für ein hybrid beheiztes Strahlrohr entwickelt, ein Demonstrator konstruiert und betriebsnah sowie betrieblich erprobt.

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens zusammen und stellt dar, in welcher Weise das Forschungsziel erreicht werden konnte.

## 4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Als Folge der Energiewende und zur Erfüllung der Zielsetzungen im Umweltschutz sind bedeutsame Initiativen für einen tiefgreifenden Umbau der Energiesysteme eingeleitet worden. Innerhalb des Kopernikus-Forschungsprojekts werden die damit verknüpften Forschungsthemen systematisch bearbeitet. Die energieintensive Industrie verfügt dabei über vielfältige Potentiale, ihren Energiebedarf zukünftig flexibler auf eine fluktuierende Energieversorgung ausrichten zu können.

Perspektiven zur Schaffung von Flexibilität wurden als Ergebnis der 1. Projektphase von Synergie in [7] dargestellt. Dabei wurde auch auf die Möglichkeiten der Hybridisierung eingegangen.

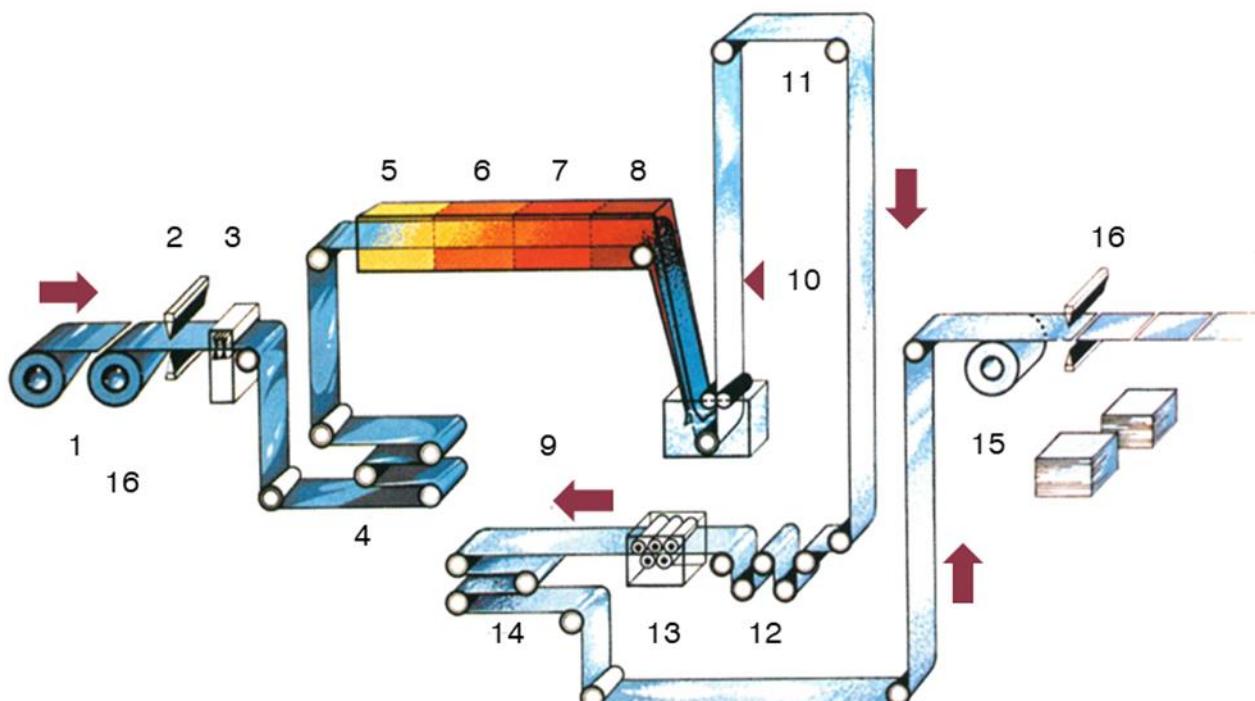
Durch Hybridisierung kann elektrische Energie beispielsweise auch zur Vorwärmung von Medien wie Verbrennungsluft genutzt werden [8]. In diesem Anwendungsfall soll erneuerbare elektrische Energie zur Vorwärmung von Brennmedien in einem Industrieofen genutzt werden und trägt somit zur Einsparung von Brennstoffen bei. Eine weitere Flexibilisierungsperspektive

Schlussbericht HyBeSt - Förderkennzeichen: 03SFK3P0-2



ist z. B. die induktive Einkopplung elektrischer Energie zur Erwärmung von Stahl in einzelnen Temperaturbereichen des Umformprozesses. Diese Technologie ermöglicht es ebenfalls, thermische Energie teilweise durch Stromeinkopplung zu substituieren. Die induktive Erwärmung mit Strom wird heute bereits in der Prozessführung genutzt, jedoch nicht mit dem Ziel der Bereitstellung einer Flexibilität, sondern als dauerhafte Elektrifizierung bestimmter Prozessabschnitte.

In der Stahlindustrie wird eine Vielzahl von oftmals gasbeheizten Thermoprozessanlagen betrieben. Einen Teil davon stellen Anlagen zur Wärmebehandlung von Stahlband dar, z. B. die in Abbildung 2 dargestellte Feuerverzinkungsanlage.



- |     |  |    |  |
|-----|--|----|--|
| 1   | Bandabwicklung   | 11 | Kühlstrecke                                  |
| 2   | Bandendenvorbereitung  | 12 | Richten und Strecken                         |
| 3   | Verschweißen der Bandenden                                     | 13 | Chromatierung (Schutz gegen Weißfleckigkeit) |
| 4   | Bandausgleichswagen (Bandspeicher)                             | 14 | Bandausgleichswagen (Bandspeicher)           |
| 5-8 | Ofen: Vorwärmzone, Reduktionszone, Ausgleichszone              | 15 | Aufwickler                                   |
| 9   | Zinkband   | 16 | Quertailanlage                               |
| 10  | Beeinflussung der Oberfläche (kleine Zinkblume für Lackierung) |    |  |

Abbildung 2: Schema einer Feuerverzinkungsanlage, [9]

Stahlband ist Teil der Produkt-Kategorie Flachstahl, wovon nach Angabe des Branchenverbandes allein in Deutschland im Jahr 2018 23,9 Mio. t hergestellt wurden [10]. Im Rahmen des SynErgie-Projektes wurde untersucht, ob und wie die Bereitstellung von Prozesswärme an solchen Anlagen durch elektrische Energie, bevorzugt aus erneuerbaren



Quellen, umgesetzt werden kann. Die dafür untersuchte hybride Beheizungslösung ist neuartig und eine vergleichbare Lösung bisher weder in der nationalen noch internationalen Literatur erwähnt.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Berichtszeitraum haben die Partner im Rahmen des Verbundvorhabens und bezogen auf die Thematik des Teilprojekts I.7 vor allem mit den beteiligten Partnern des Cluster I (Industrieprozesse) zusammengearbeitet. Ein besonderer Erfahrungsaustausch fand auch mit den Unternehmen und Instituten der Cluster III und IV statt. Ferner fand zur Erfassung der Flexibilitätspotentiale und zur Beurteilung der Forschungsthemen anderer Vorhaben eine gemeinsame Datenerhebung und Abstimmung mit den in Cluster V beteiligten Projektpartnern von Synergie zur Aktualisierung der Potentialbewertung von Flexibilitätspotentialen statt.

Weiterhin wurde im Innovationsnetzwerk „Hybrid-Heating“ über die durchgeführten Arbeiten berichtet [11] und die dortigen Aktivitäten begleitet. Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse einem breiten Kreis von Anlagenbetreibern und Anlagenaustrütern bzw. -herstellern vorgestellt [12-14].

## Literatur

- [1] Verbundvorhaben ReflexRolle: Reduzierung der Kühlverluste und Erhöhung der Lebensdauer von Ofenrollen durch eine anti-adhäsive und reflexionssteigernde Beschichtung; Förderkennzeichen: 03ET1637A
- [2] Verbundvorhaben VEIK: Verbesserung der Wärmebehandlung und Erwärmung in Industriöfen durch Einsatz neuer innovativer keramischer Heißgasventilatoren; Förderkennzeichen: 03ET1520A
- [3] Verbundvorhaben HyPro: Hybride Prozessführung durch Integration modellbasierter, datenbasierter und wissensbasierter Techniken zur Energieeinsparung in komplexen Prozessen; Förderkennzeichen: 03ET1524A
- [4] H<sub>2</sub>-HotRoll - Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Stahlindustrie durch Einsatz von H<sub>2</sub> an kontinuierlich betriebenen Thermoprozessanlagen am Beispiel von Wiederwärmungsöfen; Förderkennzeichen: 03EN2091B
- [5] SPRECHER, M., H.B. LÜNGEN, B. STRANZINGER, H. ROSEMAN und W. ADLER, November 2018; Abwärmenutzungspotenziale in Anlagen integrierter Hüttenwerke der Stahlindustrie; Umweltbundesamt, [Zugriff am: 11.11.2023], Verfügbar unter: [www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)
- [6] DEUTSCHE BUNDESSTIFTUNG UMWELT, 2011. Deutscher Umweltpreis 2011; Mit weniger Energie und weniger Emissionen zum Technologieführer [Zugriff am: 17. 11.2023]; Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/news/mit-weniger-energie-und-weniger-emissionen-zum-technologiefuehrer/>
- [7] Sauer, A., Abele, E. und H. U. Buhl, 2019: Energieflexibilität in der Deutschen Industrie, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, ISBN 978-3-8396-1479-2

- [8] Bender, W. et.al.: Hybride Rekuperatoren als flexible Verbraucher: Einbindungsmöglichkeiten, Innovationsforum „Hybrid-Heating“ Aachen, 12.04.2019, [Zugriff am: 17. 11.2023]; [https://www.hybrid-heating.de/download/20190412\\_1025\\_Vortrag\\_Bender.pdf](https://www.hybrid-heating.de/download/20190412_1025_Vortrag_Bender.pdf)
- [9] Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.), Stahlfibel, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, S. 125
- [10] WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL (WV), 2021: Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2020 | 2021. Düsseldorf.
- [11] Fachworkshop „Zukünftige Beheizungstechnologien“ im Rahmen des Innovationsnetzwerks „Hybrid-Heating“, [Zugriff am: 17. 11.2023], [www.hybrid-heating.de/veranstaltungen/workshop-zukuenftige-beiheizungstechnologien](http://www.hybrid-heating.de/veranstaltungen/workshop-zukuenftige-beiheizungstechnologien)
- [12] Queck, A.; Stranzinger, B.; Mann, M.; Miethe, R.; Schneider, J.; Wünning, J.; Peters, M.; Westerfeld, A.: Hybride Beheizung in der Stahlindustrie; in 3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium; S. 149-154; 2021; ISBN: 978-3-96463-021-6
- [13] B. Stranzinger; A. Queck; M. Peters; M. Mann; S. Schwinn; J. Wünning; A. Westerfeld, IN4CLIMATE.NRW, 9. Sitzung der Arbeitsgruppe „Industrielle Prozesswärme“, Hybridisierung von Thermoprozessanlagen am Beispiel einer Bandbeschichtungsanlage, 08.09.2022
- [14] Queck, A.; Stranzinger, B.; Mann, M.; Schwinn, S.; Wünning, J.; Westerfeld, A.; Schneider, J.: Hybrid Radiant Tube in the Steel Industry; 6th Conference on Clean Technologies in the Steel Industry; 17-21.10.2022 Aachen, Germany



# SynErgie

*Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung  
von Industrieprozessen auf eine fluktuierende  
Energieversorgung*

Schlussbericht Teilvorhaben:

Teilprojekt I.7: Hybride Beheizung in der Stahlindustrie  
(„HyBeSt“) Förderkennzeichen: 03SFK3P0-2

01.11.2019 – 30.06.2023

- Öffentlicher Teil -

GEFÖRDERT VOM

**KOPERNIKUS**  
**SynErgie** >> **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Autoren:

A. Queck<sup>1</sup>, B. Stranzinger<sup>1</sup>,  
S. Lindtner<sup>2</sup>, M. Mann<sup>2</sup>,  
S. Bullert<sup>3</sup>, J.G. Wünning<sup>3</sup>,  
M. Keller<sup>4</sup>, A. Westerfeld<sup>4</sup>

<sup>1</sup> VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH,

<sup>2</sup> Kanthal GmbH,

<sup>3</sup> WS Wärmeprozesstechnik GmbH,

<sup>4</sup> thyssenkrupp Steel Europe AG

Teil II: Eingehende Darstellung.....	3
1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse.....	3
1.1 Cluster I: Schlüsselproduktionsprozesse / Teilprojekt I.7: Hybride Beheizung in der Stahlindustrie.....	3
1.1.1 Einleitung .....	3
1.1.2 Arbeitspaket I.7.0 – Datenerhebung für Cluster III, IV und V .....	4
1.1.3 Arbeitspaket I.7.1: Auswahl der Materialien für Kombinationsanwendung .....	5
1.1.4 Arbeitspaket I.7.2: Entwicklung eines hybriden Beheizungskonzeptes .....	7
1.1.5 Arbeitspaket I.7.3: Entwicklung angepasster Schaltungstechnik .....	8
1.1.6 Arbeitspaket I.7.4: Konstruktion eines Versuchsstrahlrohres .....	9
1.1.7 Arbeitspaket I.7.5: Betriebsnahe Untersuchungen im Technikum mit Optimierung des Gesamtsystems.....	12
1.1.8 Arbeitspaket I.7.6: Betriebliche Erprobung im Produktionsbetrieb .....	15
1.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick.....	18
2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen .....	19
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	19
4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses.....	20
5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	21
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses.....	21
7 Literaturverzeichnis.....	21

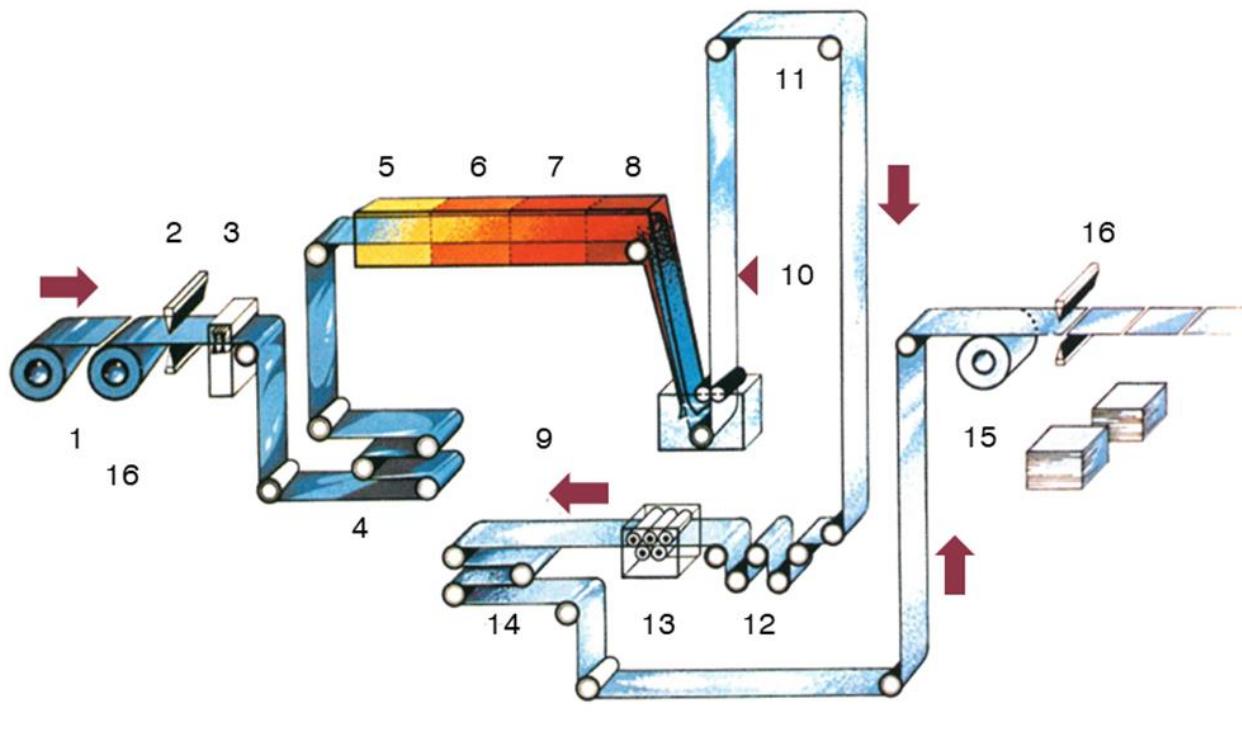
## Teil II: Eingehende Darstellung

### 1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

#### 1.1 Cluster I: Schlüsselproduktionsprozesse / Teilprojekt I.7: Hybride Beheizung in der Stahlindustrie

##### 1.1.1 Einleitung

In der deutschen Stahlindustrie wird eine Vielzahl von oftmals gasbeheizten Thermoprozessanlagen betrieben. Einen Teil davon stellen Anlagen zur Wärmebehandlung von Stahlband dar, z. B. die in Abbildung 1 dargestellte Feuerverzinkungsanlage.



- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 1 Bandabwicklung                                       | 10 Beeinflussung der Oberfläche       |
| 2 Bandendenvorbereitung                                | 11 Kühlstrecke                        |
| 3 Verschweißen der Bandenden                           | 12 Richten und Strecken               |
| 4 Bandausgleichswagen (Bandspeicher)                   | 13 Chromatierung                      |
| 5-8 Ofen: Vorwärmzone, Reduktionszone, Ausgleichszonen | 14 Bandausgleichswagen (Bandspeicher) |
| 9 Zinkband   | 15 Aufwickler                         |
|  | 16 Querteilanlage                     |

Abbildung 1: Schema einer Feuerverzinkungsanlage [1]

Stahlband ist Teil der Produkt-Kategorie Flachstahl, wovon nach Angabe des Branchenverbandes allein in Deutschland im Jahr 2018 23,9 Mio. t hergestellt wurden [2]. Im Rahmen des SynErgie-Projektes wurde untersucht, ob und wie die Bereitstellung von Prozesswärme an solchen Anlagen durch elektrische Energie, bevorzugt aus erneuerbaren



Quellen, umgesetzt werden kann. Die dafür untersuchte hybride Beheizungslösung ist neuartig. Eine vergleichbare Lösung wurde bisher weder in der nationalen noch internationalen Literatur erwähnt.

### 1.1.2 Arbeitspaket I.7.0 – Datenerhebung für Cluster III, IV und V

Im Arbeitspaket I.8.0 wurden folgende Aufgaben erledigt:

- Erhebung und Meldung der Flexibilitätspotentiale / -perspektiven an Cluster V,
- Entwicklung einer Methodik zur Hochrechnung der erhobenen Flexibilitätspotentiale,
- Unterstützung bei der Ermittlung der internationalen Flexibilitätspotentiale und
- Abgrenzung der Arbeiten gegenüber nationalen/internationalen Forschungsaktivitäten.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend zusammengefasst.

Während der Projektlaufzeit waren in Deutschland 15 Feuerbeschichtungsanlagen in Betrieb (tkSE 9, ArcelorMittal 4 und Salzgitter Flachstahl 2). Davon sind ca. 50 % Horizontalanlagen, in denen der in diesem Projekt betrachtete Strahlrohrtyp im Einsatz ist. Sehr konservativ abgeschätzt können ca. 10 - 12 Strahlrohre je Anlage durch die neue Lösung ersetzt werden. Ein solches Strahlrohr weist eine mittlere Leistung von ca. 50 kW auf. Die Flexibilitätsperspektive allein bei Horizontalanlagen des Partners tkSE beträgt zwischen 2,5 – 3 MW bei einer kompletten Umrüstung auf das neuartige hybride Strahlheizrohr. Die anderen Hersteller haben bei vergleichbaren Anlagen weitere 1,5 - 1,8 MW Flexibilitätsperspektive. Aufgrund der Ähnlichkeit der Anlagen ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht nur erwünscht, sondern im Erfolgsfall auch sehr wahrscheinlich. In der deutschen Stahlindustrie (Wirtschaftszweigebene 24.31) ist insgesamt eine Flexibilitätsperspektive von mindestens 4,0 - 4,8 MW vorhanden.

Der betrachtete Strahlrohrtyp wird auch noch in anderen Öfen (z.B. Schutzgasöfen, Nicht-Eisen-Industrie) eingesetzt. Trotz intensiver Recherche konnten für diese Einsatzfälle keine belastbaren Zahlen ermittelt werden. Die gesamte Flexibilitätsperspektive in der deutschen Industrie liegt daher höher.

Für die internationale Flexibilitätsperspektive wurden aufgrund der Datenverfügbarkeit nur Feerverzinkungsanlagen (hot dip coating lines) der Stahlindustrie betrachtet. Weltweit existieren mehr als 600 Feuerbeschichtungsanlagen [2]. Geht man konservativ davon aus, dass ca. 50 % davon über den austauschbaren Strahlrohrtyp verfügen, ergibt sich bei 10 Strahlrohren je Anlage mit 50 kW Leistung eine Flexibilitätsperspektive von 150 GW weltweit. Da die Anlagen auf nahezu allen Kontinenten betrieben werden, wird die Flexibilität nicht gleichzeitig zur Verfügung stehen (z.B. kein Überangebot an erneuerbaren Energien lokal in den Nachtstunden). Der internationale Beitrag zur Erhöhung der Flexibilität ist erheblich. Zur Abgrenzung gegenüber nationalen und internationalen Forschungsaktivitäten wurden Literatur- und Patentrecherchen durchgeführt. Dabei wurden keine ähnlichen Arbeiten oder Produkte erkannt.

Die Partner WS Thermoprozesstechnik und Kanthal sind beide jeweils auf Teilgebieten (gasbefeuerte Strahlrohre und elektrische Beheizung) in verschiedenen Industriebereichen weltweit aktiv und konnten keine vergleichbaren Produkte entdecken. Die Teilnahme an Veranstaltungen des Innovationsnetzwerks „Hybrid-Heating - Hybride Beheizungstechnologien

für Industrieöfen als Beitrag zur Energiewende“ [3] dienten zum Informationsaustausch auf nationaler Ebene, führten aber zu keinen neuen Erkenntnissen, dass bereits bestehende Lösungen existieren.

### 1.1.3 Arbeitspaket I.7.1: Auswahl der Materialien für Kombinationsanwendung

Die Anforderungen für das Strahlrohr und die Halbleiter ergeben sich aus den definierten Anwendungsfällen. Die verwendeten Materialien müssen in Hinblick auf die Geometrie, Leistungsabgabe, chemische und thermische Eigenschaften sowie Standzeit geeignet sein. Für die Materialspezifikation der Komponenten des hybriden Strahlheizrohres wurden die Rahmenbedingungen des industriellen Anwenders tkSE angefragt, sowie die Herstellererfahrungen von WS (für die Komponenten der Gasbeheizung) und von Kanthal (für die elektrische Beheizung) herangezogen.

Relevante Parameter für den betrachteten Anwendungsfall der hybriden Beheizung:

- Ofenraumtemperatur: ca. 950 °C und
- Atmosphäre: Wasserstoffhaltige Stickstoffatmosphäre (mit ca. 5 - 6 Vol.-% Wasserstoff).

Relevante Parameter für die Strahl- und Flammrohre:

- Wärmeleistung, mögliche Oberflächenbelastung,
- ggf. chemische Beständigkeit gegen Ofenraumatmosphäre und
- Geometrie.

Relevante Parameter für die Heizleiter:

- Hohe Temperatur und Formbeständigkeit,
- Geringe Oxidationsneigung und
- Temperaturwechselbeständigkeit im Hochtemperaturbereich.

Für die Kombinationsanwendung wurde eine Auswahl der Materialien für die folgenden Bauteile getroffen, siehe auch Tabelle 1:

- Strahlrohr,
- Metallische Ausführung aus hitzebeständigem Stahlblech (1.4841 oder 2.4851),
- Flammrohre,
- Keramische Ausführung aus gedruckter technischer Keramik (SiSiC),
- Heizleiter und
- Pulvermetallurgisch hergestellte Eisen Chrom Aluminium Legierung (Kanthal APM\*).



Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Materialien

Bauteil	Material	Thermische Leitfähigkeit in W/mK	Spezifische Wärme in J/kgK	Maximale Temperatur in °C	Dichte in g/cm³
Strahlrohr (metallische Version)	1.4841	20 °C: 15 500 °C: 19	20 °C: 500	1150	7,90
Flammrohr	SiSiC	100 °C: 160 1200 °C: 24	25 °C: 600 1300 °C: 1200	1380	3,05
Heizleiter	Kanthal-APM	50 °C: 11 1200 °C: 27	20 °C: 460 1200 °C: 740	1425	7,10

Für alle relevanten Bauteile des Hybridstrahlrohres konnten geeignete Materialien definiert und ausgewählt werden.

Das für den Heizleiter verwendete Material APM (Kanthal Legierung) bildet unter Temperatur und Sauerstoffeinwirkung eine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  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.

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

Für die Flammrohre wird eine technische Keramik vorgesehen, welche mit Hilfe eines 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 mit Änderungen an Bauteilen agiert werden kann. Da die elektrischen Heizleiter auf den Flammrohren platziert werden, ist eine Spezialausführung dieses für die Beheizung mit Strahlrohren verwendeten Standardbauteils notwendig.

Als alternatives Material sind nitritgebundene technische Keramiken zu nennen. Flammrohre aus diesem Material weisen den Vorteil einer noch höheren thermischen Beständigkeit auf. Da Flammrohre aus diesem Material allerdings aktuell nicht mit dem 3D-Druck-Verfahren hergestellt werden und auch für den zu untersuchenden Anwendungsfall keine kritischen Temperaturen zu erwarten sind, wurde für das Hybridstrahlrohr nicht auf dieses Material zurückgegriffen. Für zukünftige Anwendungen in extremeren Temperaturbereichen ist es jedoch denkbar, auch Flammrohre aus nitritgebundener Keramik zu verwenden.

Von Vorteil für das Forschungsprojekt war, dass für die signifikanten Bauteile des Strahlrohres für Beheizungskonzepte im Hochtemperaturbereich standardmäßig genutzte Materialien verwendet werden können. Hierdurch konnte im Projektkonsortium auf eine Vielzahl von

Erfahrungswerten zurückgegriffen werden. Es war nicht zu erwarten, dass aufgrund der verwendeten Materialien Probleme mit dem Strahlrohr im Rahmen des Forschungsvorhabens auftreten werden.

#### 1.1.4 Arbeitspaket I.7.2: Entwicklung eines hybriden Beheizungskonzeptes

Basierend auf den in Arbeitspaket I.7.1 ermittelten Anforderungen wurde ein Konzept für die konstruktive Umsetzung eines hybriden Strahlheizrohres erstellt. Hierbei wurde neben allgemeinen konstruktiven Bedingungen wie Lagerung und Montierbarkeit besonderes Augenmerk auf die wärmetechnische und elektrische Auslegung der Heizleiter gerichtet. Weiterhin mussten Abstimmung und Kombination zwischen dem elektrischen und dem gasbeheizten Konzept erfolgen. Der Aufbau orientierte sich an einem bewährten Konzept für gasbeheizte Strahlrohre mit einer zusätzlichen elektrischen Beheizung. In Abbildung 2 ist das Konzept-Schema dargestellt.

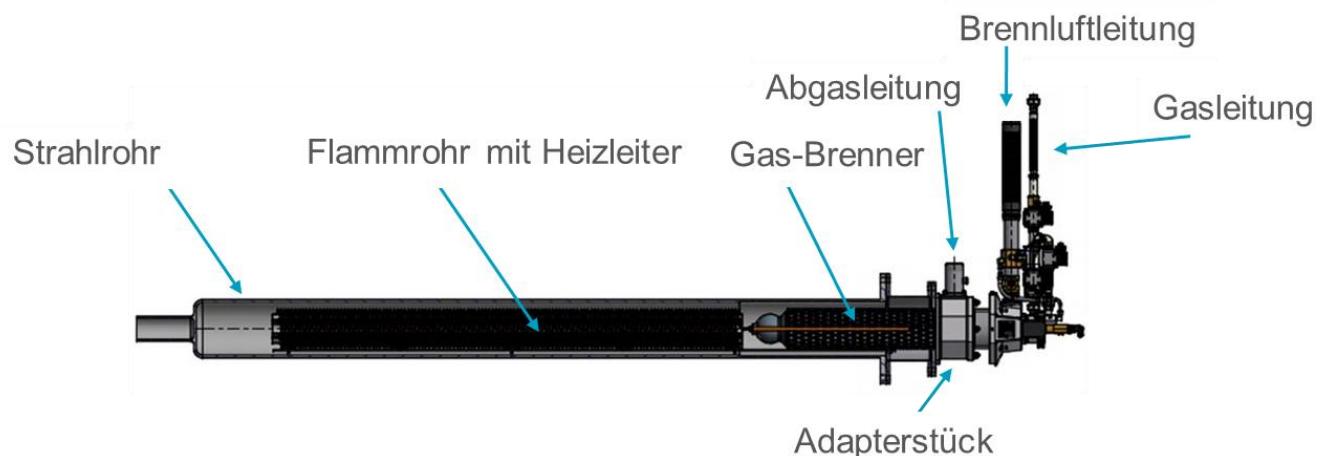


Abbildung 2: Schema des hybriden Strahlheizrohres

Nachdem die äußenen geometrischen Bedingungen (Durchmesser, Länge, Befestigungsvorrichtungen) definiert wurden (das Strahlrohr sollte in einen bereits existierenden Ofen von tkSE integriert werden), wurde mit der Auslegung der Heizleiter begonnen. Der Heizdraht sollte Helix-förmig auf dem Flammrohr angeordnet werden und wurde nach den Gestaltungsrichtlinien von Kanthal ausgelegt. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass eine temperaturabhängige Oberflächenlast am Heizdraht nicht überschritten wird. Als Leistungsparameter war die Vorgabe, dass die elektrische Beheizung äquivalent zur Brenngasbeheizung (rd. 50 kW) sein musste. Aus dem zur Verfügung stehenden Raum, der vorgesehenen Gesamtlast und der maximalen Oberflächenlast ergeben sich dann der Drahtdurchmesser und die Wicklungssteigung. Zur Führung des Heizleiters wurde ein System von keramischen Kämmen genutzt. Diese wurden formschlüssig auf einem keramisch gedruckten Flammrohr angebracht.

Im letzten konstruktiven Schritt mussten sowohl die elektrische als auch die gasbeheizte Variante in einem Strahlrohr miteinander kombiniert werden. Um die elektrische Beheizung einzubringen, musste an einem üblicherweise gasbeheizten Strahlrohr ein Adapterstück untergebracht werden. In diesem erfolgte die Ausleitung der Stromanschlüsse. Damit wurde ein Konzept für ein hybrid beheiztes Strahlrohr erarbeitet. Beide Energieträger (Brenngas und elektrische Energie) konnten mit überschaubarem Aufwand kombiniert werden und jeweils die benötigte Wärmeleistung bereitstellen.

### 1.1.5 Arbeitspaket I.7.3: Entwicklung angepasster Schaltungstechnik

Zur Steuerung der elektrischen Beheizung mussten die Anforderungen an die Schaltungselektronik ermittelt werden. Hierbei sollte der Betrieb bei den verschiedenen Projektpartnern unter verschiedenen Rahmenbedingungen erfolgen. Zur Validierung des Demonstrators im BFI sollte ein Temperaturregelbetrieb stattfinden. tkSE nutzt an der industriellen Anlage eine analoge Stellgradvorgabe für die Endanwendung der Heizung. Mit dem realisierten Schaltschrank lassen sich beide Anwendungsfälle abdecken. Zudem bietet er die Möglichkeit der Messdatenauswertung.

Zur Abklärung der Anforderungen an die Schaltungselektronik war eine enge Abstimmung aller Projektpartner erforderlich. Die Elektronik musste so ausgelegt werden, dass sie einerseits eine Temperaturvorgabe (und -überwachung) im Versuchsbetrieb ermöglicht. Andererseits musste bei tkSE die Integration in eine bestehende Schaltanlage (betriebliches Leitsystem) umgesetzt werden. Das erforderte die Ansteuerung der Heizung über einen analog (4 - 20 mA Signal) vorgegebenen Stellgrad.

Neben der Umsetzung des Temperaturregelbetriebs der Heizung musste auch die Funktionalität einer Sicherheitstemperaturbegrenzung berücksichtigt werden. Diese dient zur Vermeidung der Überhitzung des Heizdrahtes. Da sowohl an der BFI-Versuchsanlage als auch an der Produktionsanlage bei tkSE Regelungen für die Gasbeheizung vorhanden waren, musste diese nicht in die neu erstellte Schaltungselektronik integriert werden. Bei der Erstellung des Schaltschranks wurde auf eine Flexibilität geachtet. Der Messdatenschreiber kann unterschiedliche analoge Messsignale verarbeiten. Somit besteht die Möglichkeit der zusätzlichen Auswertung von noch nicht geplanten Messsignalen. Bereits festgelegt ist der Anschluss mehrerer Temperaturmessstellen). Auch die Leistungselektronik wurde für die Elektroheizung geringfügig überdimensioniert, sollte eine Erhöhung der Leistung erforderlich werden. In Abbildung 3 ist ein Foto des Schaltschranks bei einer Erprobung dargestellt.



Abbildung 3: Schaltschrank bei der Erprobung

Der einsatzfähige Schaltschrank bietet noch Umrüstmöglichkeiten für eventuelle zukünftige Anforderungen.

#### 1.1.6 Arbeitspaket I.7.4: Konstruktion eines Versuchsstrahlrohres

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde ein voll funktionsfähiger Demonstrator des hybriden Strahlheizrohres konstruiert, gebaut und montiert. Dieser Demonstrator sollte sowohl den Anforderungen der betrieblichen Anwendung bei tkSE als auch dem Testbetrieb im Technikum des BFI entsprechen. Für die Konstruktion des Demonstrators wurden die Rahmenbedingungen des industriellen Anwenders tkSE als Grundlage verwendet, sowie die Herstellervorgaben von WS (Gasbeheizung) und von Kanthal (elektrische Beheizung) eingearbeitet.

Das aus gedruckter technischer Keramik gefertigte Flammrohr bestand aus mehreren Segmenten. Auf dieses Flammrohr wurden keramische Kämme aufgebracht, die als Führung (und elektrischer Isolation) des Heizleiters dienten.

Der Heizleiter bestand aus pulvermetallurgisch hergestellter Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung, Kanthal ® APM. Der Heizleiter wurde Helix-förmig um das Flammrohr gewickelt. Abbildung 4 zeigt den Aufbau des elektrischen Beheizungsteils bei der Erprobung im Technikum.



Abbildung 4: Aufgewickelter Heizleiter bei der Erprobung

Das Flammrohr ist im Bild schwarz, die keramischen Kämme weiß und der Heizleiter im Funktionstest glüht rötlich. Der Heizleiter wird über einen Adapterflansch aus dem Strahlrohr geleitet. Im Betrieb darf die Sicherheitstemperatur von 1300°C für den Heizdraht nicht überschritten werden, weshalb ein Überwachungsthermoelement in der Nähe des Heizdrahtes vorgesehen wurde.

Für den konventionellen Teil des Strahlrohres sollten die Änderungen aufgrund des elektrischen Beheizungsteils möglichst wenig störende Einflüsse verursachen. Aufgrund des zusätzlichen Heizleiters im Strahlrohr musste geprüft werden, ob sich bezüglich der Strömungen (Druckverlust aufgrund von Querschnittsverringerung) negative Effekte einstellten.

Der komplette Demonstrator des hybriden Strahlheizrohres besteht aus:

- Metallischem Strahlrohr aus hitzebeständigem Stahl,
- Flammrohr mit Aufnahme für die elektrische Heizwendel,
- Elektrischem Heizwendel Helix-förmig um die Flammrohre gewickelt und über einen Adapterflansch aus dem Strahlrohr geleitet und
- Rekuperativem Gasbrenner.

Funktionsprüfung der elektrischen Beheizung sowie der Gasbeheizung

Der Funktionstest der elektrischen Beheizung im Technikum (siehe Abbildung 4) zeigte eine gleichmäßige Erwärmung der Heizwendel. Es traten keine Überhitzungen etc. auf. Auch die thermische Längenausdehnung zeigte, dass mit der Lösung der keramischen Kämme ausreichende Dehnungsreserven vorlagen. Die Funktionsprüfung der elektrischen Beheizung wurde erfolgreich mit einer Leistung von 46 kW durchgeführt.



Für den Funktionstest der Gasbeheizung wurde der elektrische Beheizungsteil in das Strahlrohr aus hitzebeständigem Stahlblech eingebracht. Dann wurde der Gasbrenner eingebaut, angeschlossen und erprobt. Abbildung 5 zeigt den komplett montierten Demonstrator auf dem Prüfstand.

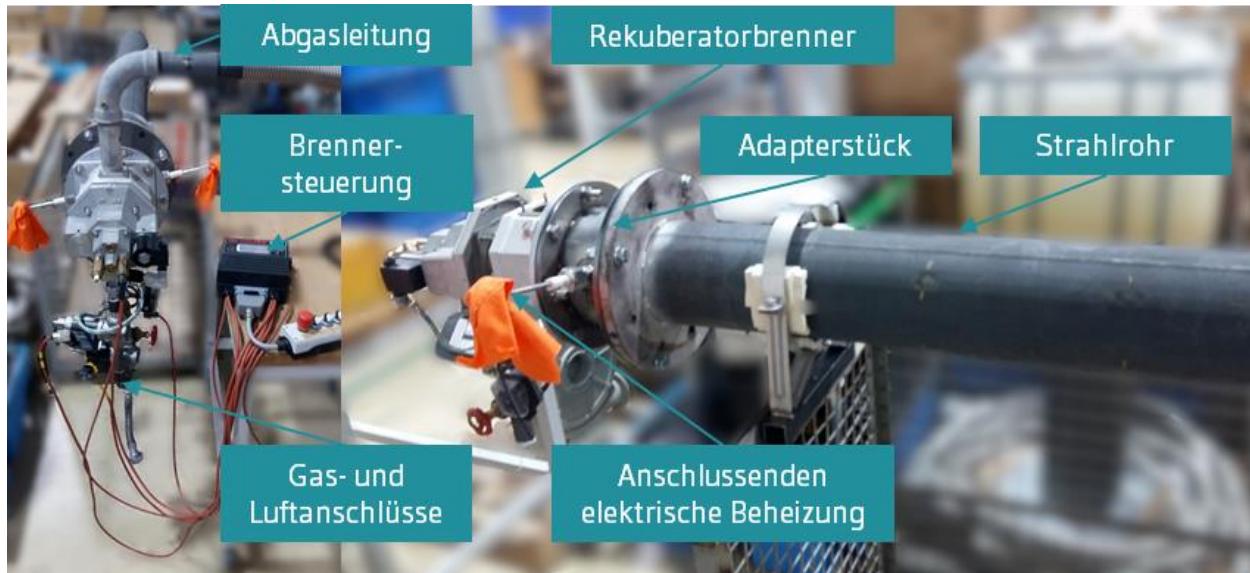


Abbildung 5: Hybrides Strahlrohr mit Rekuperatorbrenner und Steuerung am Prüfstand

Das hybride Strahlheizrohr wurde zur Prüfstandserprobung mit zusätzlicher Messtechnik (Abgasanalyse, mehrere Temperaturmessstellen auf der Rohraußenseite) ausgestattet. Die Gasbeheizung wurde mit drei unterschiedlichen Leistungsstufen des Brenners (30, 40 und 49 kW) erfolgreich getestet. Abbildung 6 zeigt die Temperaturmessstellen am Hybridstrahlrohr.



Abbildung 6: Hybrides Strahlheizrohr mit Temperaturmesstechnik



Zur Ermittlung der Temperaturwerte wurden Thermoelemente des Typs K eingesetzt. Folgende Temperaturmessstellen wurden für die Untersuchungen festgelegt:

- T1: Rohrtemperatur stirnseitig,
- T2: Rohrtemperatur brennerseitig,
- T3: Hybridflammrohr im Strahlrohrinneren,
- TAGE: Abgaseintrittstemperatur (vor Rekuperator) und
- TAGA: Abgasaustrittstemperatur (nach Rekuperator).

Der im Abgasvolumenstrom gemessene O<sub>2</sub>-Gehalt lag jeweils bei <= 3 Vol.-%, der erzielte feuerungstechnische Wirkungsgrad zwischen 83 und 85 %. Die gemessenen Temperaturwerte der Prüfstandsuntersuchungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

*Tabelle 2: Messergebnisse der Prüfstandserprobung*

Leistung in kW	30	40	49
T <sub>AGA</sub> in °C	335	387	419
T <sub>AGE</sub> in °C	570	623	668
T <sub>1</sub> in °C	363	406	446
T <sub>2</sub> in °C	303	334	356
T <sub>3</sub> in °C	624	693	750

Die Funktionsprüfung des rekuperativen Gasbrenners wurde erfolgreich durchgeführt.

### 1.1.7 Arbeitspaket I.7.5: Betriebsnahe Untersuchungen im Technikum mit Optimierung des Gesamtsystems

An der Versuchsanlage des BFIs wurde der komplette Demonstrator erprobt. Hierzu wurde dieser mit Unterstützung der Partner in eine Brennkammer eingebaut, die beiden Energieträger Brenngas und elektrische Energie angeschlossen. In Abbildung 7 ist der komplette Aufbau in der BFI-Versuchsanlage gezeigt.

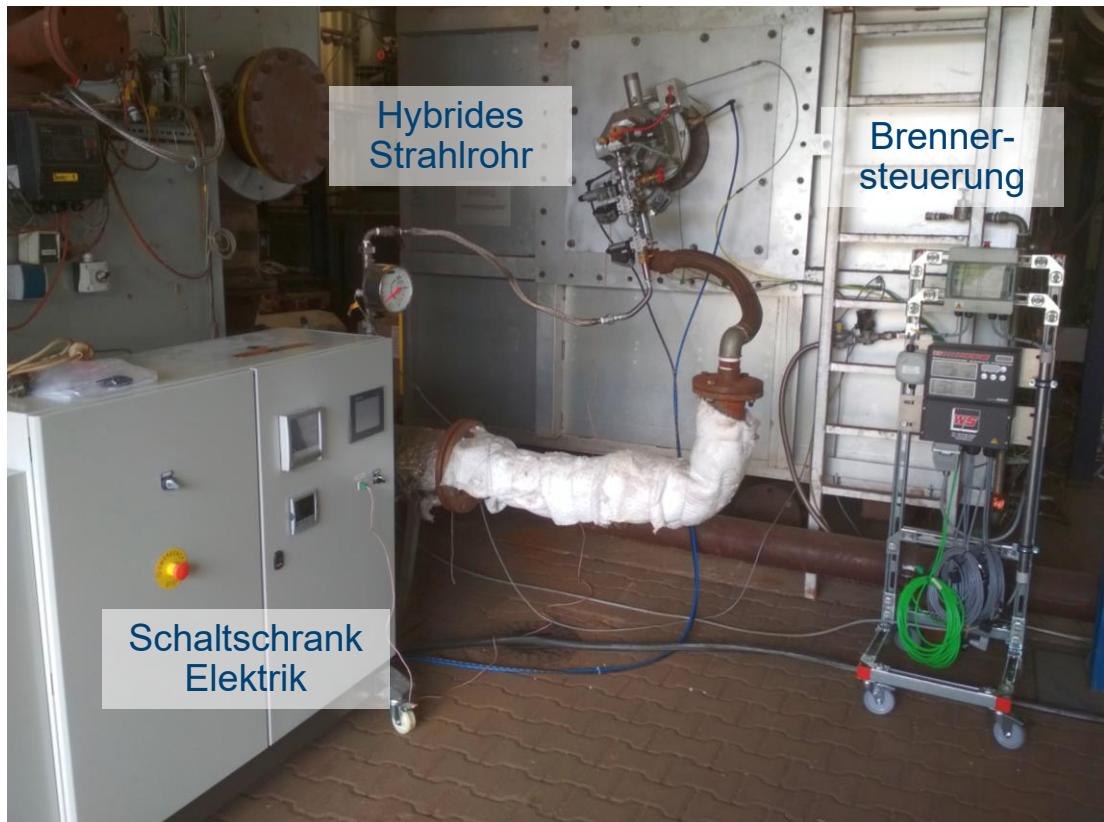


Abbildung 7: Betriebsnahe Untersuchung

Im Versuchsbetrieb wurde jede Wärmequelle separat genutzt. Begonnen wurde mit der Aufheizung im Brenngasbetrieb bis zum stationären Zustand, d.h. die gemessenen Oberflächentemperaturen des Strahlrohres änderten sich nicht mehr. Dann erfolgte der Wechsel auf die elektrische Beheizung, die Brenngasbefeuierung wurde abgeschaltet. In Abbildung 8 sind die Messdaten aufgeführt, die bei den Versuchen aufgezeichnet wurden.

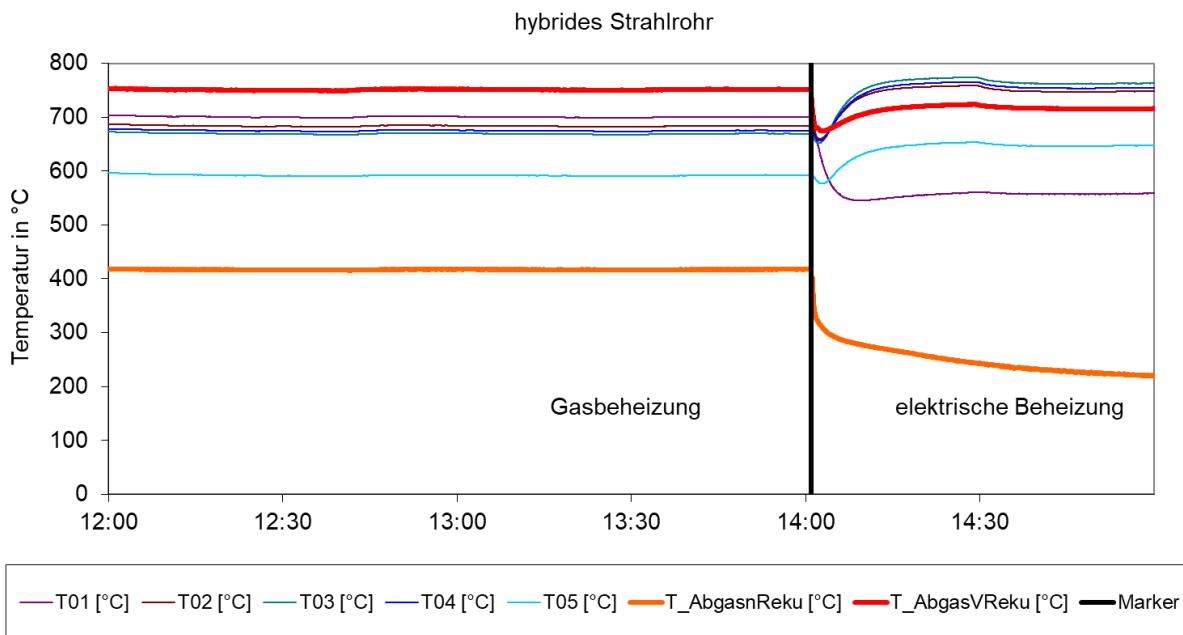


Abbildung 8: Gemessener Temperaturverlauf bei der ersten betriebsnahen Erprobung

Auf der Strahlrohroberfläche wurden in unterschiedlichen Abständen, gemessen von der Ofenwand aus, Thermoelemente platziert. In Abbildung 8 ist der gemessene Temperaturverlauf dargestellt, zuerst bei der Beheizung mit Brenngas, ab ca. 14:00 Uhr mit der elektrischen Beheizung. Die gemessenen Oberflächentemperaturen lagen im Brenngasbetrieb sehr eng beieinander. Die Messstellen T1 und T5 lagen außerhalb des elektrisch beheizten Bereiches, erwartungsgemäß sanken die Messwerte an diesen beiden Stellen während des elektrischen Heizbetriebes.

Während der Erprobung wurden Optimierungsmöglichkeiten am Demonstrator erkannt. Daraufhin wurde u.a. das Montagekonzept überarbeitet. Beispielsweise wurden Verbesserungen der Verzahnung der Flammrohre untereinander sowie des Aufbaus der Montagehilfe erarbeitet. Weiterhin konnte die Optimierung der internen Temperaturüberwachung sowie die Führung des Thermoelementes in einem überarbeiteten Demonstrator einfließen. Dieser wurde ebenfalls in der BFI-Versuchsanlage erprobt, siehe Abbildung 9.

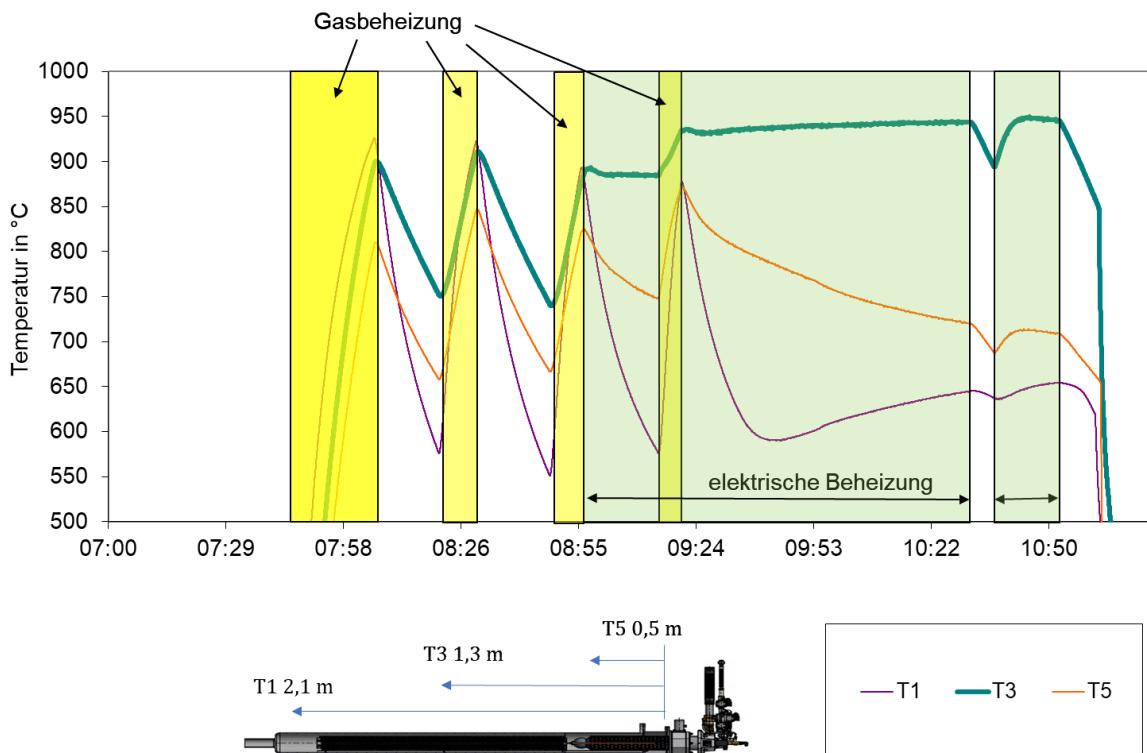


Abbildung 9: Messergebnisse des überarbeiteten Demonstrators

Auch der überarbeitete Demonstrator konnte seine Funktionsfähigkeit erfolgreich unter Beweis stellen. Als Fazit der betriebsnahen Erprobung konnte eine hohe Temperaturgleichmäßigkeit im beheizten Bereich festgestellt werden. Die Umschaltung zwischen den unterschiedlichen Energieträgern verlief problemlos.

#### 1.1.8 Arbeitspaket I.7.6: Betriebliche Erprobung im Produktionsbetrieb

Zur Erprobung im industriellen Umfeld mussten viele zusätzliche Anforderungen berücksichtigt werden. Für den Einbau im Ofen der Feuerbeschichtungsanlage war die Wahl der Einbauposition wesentlich. Neben Fragen der Zugänglichkeit für den Einbau, der Überwachung und dem Betrieb des hybriden Strahlrohres waren sowohl die Lage als auch die Anzahl der Strahlrohrbrenner in der betrachteten Zone für die Auswahl relevant. Die Einbaulage wurde so gewählt, dass bei einem - zwar unwahrscheinlichen – Defekt kein Kontakt des Strahlrohres mit dem Stahlband auftreten konnte. Die Nutzung eines Rekubrenners mit Brenngas-, Brennluft- sowie Abgas-Leitungen auf der gleichen Seite schränkte die Anzahl der möglichen Einbaupositionen weiter ein. Weiterhin musste die Zone über genügend Strahlrohre verfügen, um die erforderliche Wärmeleistung auch bei einem möglichen Kompletausfall des entwickelten hybriden Strahlrohres weiterhin bereitstellen zu können.

Strahlrohrgeometrie und Brennerleistung waren zwar bereits bei Konzeptfindung an die betrieblichen Anforderungen angepasst worden, die Umsetzung der Einbindung ins betriebliche Leitsystem erforderte jedoch weitere Arbeiten. Die Zonenregelung wird im Betrieb vom Leitstand vorgenommen, indem die Zieltemperatur in der Ofenzone überwacht wird. Die

notwendige Brenngasmenge für alle Strahlrohrbrenner der Zone wird über ein gemeinsames Leistungsanforderungssignal vorgegeben. Hierzu wurde ein im Betrieb vorhandener Feuerungsautomat für das hybride Strahlrohr verwendet.

Die Nutzung einer elektrischen Beheizung in einem bisher nicht dafür vorgesehenen Anlagenabschnitt stellte weitere Herausforderungen an den Betrieb. Für den elektrischen Anschluss musste die erforderliche Leistung sichergestellt werden. Die entsprechend dimensionierten Leitungen inkl. Schutzleiter wurden in einem extra installierten Kabelkanal untergebracht. Die elektrischen Anschlüsse wurden zusätzlich isoliert und mit einem Berührungsschutz versehen. Für die Umschaltung zwischen Brenngas- und elektrischem Heizbetrieb wurde das Leitsystem der Anlage angepasst, um den Einzelbrenner in sowie außer Betrieb nehmen zu können. Vom Leitstand wurde eine Signalleitung zum elektrischen Schaltschrank des hybriden Strahlrohres verlegt, um das Leistungsanforderungssignal, analog zur Brenngasbefeuерung, auch für den elektrischen Heizbetrieb nutzbar zu machen. Nach Abschluss der zeit- und zum Teil auch personalaufwendigen Installationsvorbereitungen musste zum Einbau des hybriden Strahlrohres noch ein Stillstand der Anlage abgewartet werden, da eine Installation in einer heißen Zone nicht während der Produktion möglich ist. Abbildung 10 zeigt das fertig installierte hybride Strahlrohr an der Produktionsanlage.

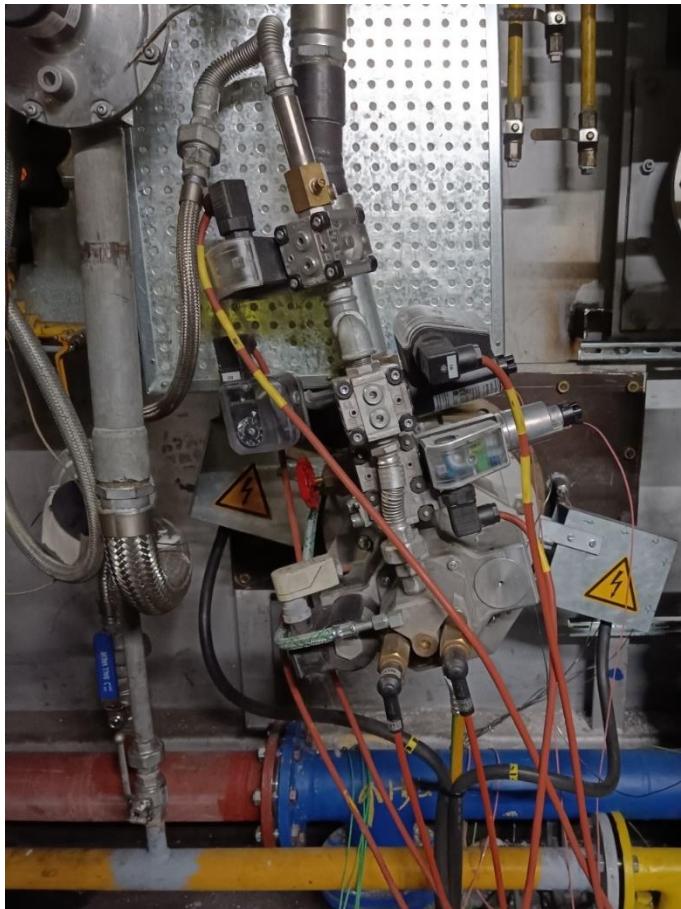


Abbildung 10: Am Ofen installiertes hybrides Strahlrohr

Der Berührungsschutz ist zusätzlich noch mit den gelb-schwarzen Warnschildern „Warnung vor gefährlicher elektrischer Spannung“ versehen.

In Abbildung 11 ist exemplarisch die Anzeige des Schaltschrankes beim Inbetriebnahmetest dargestellt.



Abbildung 11: Anzeige des Schaltschrankes beim Inbetriebnahmetest

Die Inbetriebnahmetests an der Feuerverzinkungsanlage verliefen erfolgreich.

Für die betriebliche Erprobung wurde ein Versuchsplan erstellt. Dieser sah einen abwechselnden Betrieb der unterschiedlichen Energieträger des hybriden Strahlrohres vor. Eine Woche wurde im normalen Produktionsablauf zuerst nur die Brenngasbefeuierung genutzt. Bei der Erprobung mit Brenngas traten keine Auffälligkeiten auf, alle unterschiedlichen Anforderungen aus dem Produktionsverlauf wurden seitens der Brenngasbeheizung umgesetzt. Die Auswertung der Zonentemperatur zeigte keine Auffälligkeiten. Nach dieser Woche Brenngasbetrieb wurde dann auf die elektrische Beheizung umgeschaltet.

Im elektrischen Betrieb trat nach rd. 2 h Beheizungsdauer ein Defekt am Heizleiter auf, der zum Abbruch der Erprobung führte. Bei einem Wartungsstillstand des Ofens wurde das hybride Strahlrohr demontiert, um einen Überblick über den aufgetretenen Defekt zu erhalten.

Abbildung 12 zeigt den Defekt am ausgebauten Heizleiter.



Abbildung 12: Defekt des Heizdrahtes

In der Abbildung 12 ist ersichtlich, dass der Heizleiter an mehreren Positionen gebrochen ist. Die Position ist hierbei jeweils sehr nah an den keramischen Isolatoren. Die Schadensursache wird gegenwärtig noch analysiert, der Verdacht auf möglicherweise aufgetretene Scherspannungen liegt nahe.

Eine Analyse der aufgezeichneten Parameter der elektrischen Steuerung zeigte, dass im elektrischen Heizbetrieb die Anforderungen der Leistungsregelung der Zone korrekt umgesetzt wurden.

Der Verlauf der Spannungsmessung korrespondierte mit den betrieblichen Lastanforderungen der Zone, die im betrachteten Zeitfenster ausgehend von rd. 100 % auf Werte von rd. 75 % abgesenkt und dann wieder angehoben wurden.

### 1.1.9 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Die technische Machbarkeit eines hybriden Strahlheizrohres konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Beide Energieträger (elektrische Energie und Brenngas) wurden im Demonstrator abwechselnd genutzt und die benötigte Wärmeleistung erreicht. Die Kombination von bewährten Konzepten existierender Strahlrohrsysteme sowie dem modularen Aufbau lassen bei einer erwarteten Weiterentwicklung zu einem höheren TRL eine kosteneffiziente Fertigung eines Gesamtsystems erwarten. Für die dauerhafte Erprobung im industriellen Einsatz sind noch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dringend erforderlich. Insbesondere weisen die bisherigen Konzepte zur Montage und zum Einbau noch Optimierungsmöglichkeiten auf.



Auch aus ökologischer Sicht sind die erzielten Projektergebnisse vielversprechend. Es konnte die mögliche Kompensation eines bisher gasbefeuerten Beheizungskonzeptes eines Industrieofens erfolgreich dargestellt werden. Es ist mit dem erarbeiteten Konzept eines hybriden Strahlheizrohres möglich, die Nutzung von erneuerbarer elektrischer Energie in einem bisher nicht genutzten Bereich der Prozessindustrie zu ermöglichen. Die Möglichkeit zum Wechsel des Energieträgers ermöglicht zusätzliche Flexibilität im Energiesektor. Zusätzlich ist durch die angestrebte Nutzung von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen eine Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses möglich.

Die Nutzung eines hybriden Systems weist eine Reihe von Vorteilen auf. Einerseits kann somit zukünftig die Nutzung von erneuerbarer elektrischer Energie in der Prozessindustrie ausgeweitet werden. Die Einsparung von (fossilen) Brennstoffen sowie die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses sind klare Vorteile der elektrischen Beheizung.

Jedoch kann zukünftig auch die Nutzung von Brenngas zur Beheizung von Industrieöfen weiterhin sinnvoll sein. Je nach Marktsituation ist häufig der Preis je kWh bei Erdgas gegenüber elektrischer Energie für industrielle Nutzer wesentlich günstiger. Künftig wird durch die Nutzung von Power-to-Gas-Technologien der Anteil von erneuerbaren Energien im Brenngas steigend (Biomethan, Wasserstoff). Die Nutzung von Brenngas zur Beheizung von Thermoprozessanlagen kann daher auch ökonomisch sinnvoll und ökologisch angemessen sein.

Entscheidender Vorteil des Einsatzes eines hybriden Strahlrohres ist die Flexibilität im Hinblick auf den Energiemarkt. Es kann auch bei einem zeitlich schwankenden Energiemix stets die günstigste Beheizungsvariante im Hinblick auf den Preis und die CO<sub>2</sub>-Bilanz genutzt werden. Aufgrund des modularen Konzeptes basierend auf den Abmessungen eines existierenden Systems ist eine Nachrüstung bestehender Industrieöfen möglich.

Die begleitende Recherche während des Projektzeitraumes konnte keine ähnlichen oder vergleichbaren Entwicklungsarbeiten oder existierende Produkte aufzeigen.

## 2 Zahlenmäßiger Nachweis: wichtigste Positionen

Die Projektpartner rechnen die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erhaltenen Fördermittel und ihre Selbstkosten für das Projekt im Rahmen einer separaten Berichterstattung einzeln mit dem Projektträger Jülich ab. Die finanzielle Berichterstattung wird deshalb nicht in den vorliegenden öffentlichen Sachbericht übernommen.

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Arbeit der Partner wurde eine öffentliche Förderung benötigt. Das BFI ist ein gemeinnütziges, privat geführtes Forschungsinstitut, das zur Durchführung derartiger Forschungsvorhaben auf öffentliche Förderung angewiesen ist.

Die thyssenkrupp Steel Europe AG verfolgt eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten parallel. Im Projekt war jedoch ungewiss, ob sich wirtschaftliche Einsparungen erzielen lassen. Um tkSE als möglichen Erstanwender der neuartigen Technologie hybrides Strahlrohr mit in das Projekt einzubeziehen, war eine Bereitstellung von Schlussbericht HyBeSt - Förderkennzeichen: 03SFK3P0-2



öffentlichen Mitteln erforderlich. Auf diese Weise konnten von Beginn an die Anforderungen des betrieblichen Anwenders in die Forschung einfließen. Die spätere Akzeptanz einer Einführung der neuen Technologie bei weiteren Anwendern wird gesteigert. Weiterhin betreibt tkSE mehrere ähnliche Anlagen in Deutschland, bei erfolgreicher Umsetzung sind Multiplikatoreffekte sehr wahrscheinlich. Ohne Förderung würde sich tkSE nicht im geplanten Umfang an den Forschungsarbeiten beteiligen, sondern die eigenen Ressourcen auf andere Projekte konzentrieren.

Eine öffentliche Förderung erlaubte es Kanthal, Forschungsarbeiten in bisher nicht verfolgten potenziellen Anwendungsfällen zu starten. Da es auf dem Markt keine hybride Beheizungslösung für Strahlrohre gibt, war eine Einbeziehung eines Partners mit umfangreichem Knowhow in der elektrothermischen Beheizungstechnologie erforderlich. Die Kanthal Deutschland GmbH führt eigene Forschungsarbeiten nur in bereits etablierten Marktbereichen durch. Durch die Förderung konnten Forschungsaktivitäten auf bisher nicht berücksichtigte Gebiete ausgeweitet werden.

Die WS WärmeProzessTechnik GmbH ist ein mittelständisches Unternehmen, welches sich mit intensiven Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Markt etabliert hat. Um weitere zukunftsweisende Produkte im Markt etablieren zu können, benötigt WS eine Förderung von Forschungsprojekten. Dadurch kann die Produktion in Deutschland erhalten und möglicherweise ausgebaut werden.

Die aufgeführten Arbeiten waren zur Erreichung des Forschungsziels notwendig und angemessen. Die Projektbearbeitung folgte dem beantragten und genehmigten Arbeitsplan. Der Projektfortschritt wurde kontinuierlich durch Berichte an den Steuerungskreis, die Clusterleitung sowie den Projektträger transparent dargelegt, Abweichungen aufgezeigt und korrigierende Maßnahmen begründet.

## 4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das BFI strebt an, die im Projekt erarbeiteten Erkenntnisse in zukünftigen Dienstleistungen und Forschungsarbeiten zu verwerten. Es wird erwartet, dass auch andere Stahlwerke im Zuge der Dekarbonisierung der Prozesse einen entsprechenden Bedarf an Lösungen zum Ersatz von brenngasbetriebenen Beheizungseinrichtungen aufweisen. Das BFI geht davon aus, mit den Ergebnissen aus diesem Projekt künftig weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Steigerung der Energieflexibilität in der Stahlindustrie begleiten zu können. Die bislang erzielten Forschungsergebnisse können folglich in den möglichen Folgeprojekten angewandt und verwertet werden.

Kanthal erhofft sich durch die in diesem Projekt angestrebte Lösung eines hybriden Strahlheizrohres die Schaffung eines zusätzlichen Geschäftsfeldes. Die gemeinsame Vermarktung und der Vertrieb der neuartigen hybriden Strahlheizrohre werden angestrebt. Durch die vielfältigen geschäftlichen Beziehungen von Kanthal mit Industriebetrieben wird angestrebt, die neue Technologie in andere Industriebereiche jenseits der Stahl- und Eisenindustrie zu überführen.

Die thyssenkrupp Steel Europe AG (tkSE) ist als weltweit operierendes Unternehmen im Bereich der Stahlherstellung einem hohen Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Kontinuierliche Bemühungen zur Effizienzverbesserung der vorhandenen Prozesse und Anlagentechnik sind integraler Bestandteil der Unternehmenskultur. Das Projekt soll dazu beitragen, dass mittelfristig bei tkSE spezifische Energiekosten sinken, basierend auf dem Weg, mittels hybrider Beheizungsmöglichkeiten kosteneffizient die Prozesse zu betreiben. Weiterhin ist die erarbeitete Lösung ein möglicher Beitrag zur Dekarbonisierung der Stahlindustrie. WS wird mit diesem Projekt seine bisherigen Geschäftsfelder stärken und ausbauen. Die Expertise im Bereich von umweltschonenden Brennersystemen wird mit dem hybriden Strahlheizrohr weiter ergänzt.

## 5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Projektlaufzeit sind keine vergleichbaren Aktivitäten von anderen Stellen bekannt geworden. Die entwickelte Lösung eines hybrid beheizten (Brenngas und elektrische Energie) Strahlrohres ist weiterhin eine innovative Entwicklung ohne äquivalente Produkte auf dem Markt oder in der Entwicklung.

## 6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Bereits während der Bearbeitung des Projektes wurden die erzielten Zwischenergebnisse publiziert. Im Innovationsnetzwerk „Hybrid-Heating“ 2020 wurde über das Projekt berichtet [4]. Einer großen Zahl von Anlagenbetreibern und -herstellern wurde das hybride Strahlheizrohr bei zwei Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquien in den Jahren 2021 und 2023 vorgestellt [5], [6]. Einem internationalen Publikum der Stahl- und Anlagenbau-Industrie wurden die Projektergebnisse im Rahmen einer Konferenz präsentiert [7]. Weiterhin wurde branchenübergreifend im Bereich der Verfahrenstechnik berichtet [8]. Darüber hinaus sind die erzielten Ergebnisse zusammengefasst im SynErgie-Fachbuch veröffentlicht worden [9].

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Stahlfibel, Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2002.
- [2] Wirtschaftsvereinigung Stahl, Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2020/2021, Düsseldorf, 2021.
- [3] VDEh, VDEh-Datenbank Plantfacts, Hot Dip Metal Coating Lines, 01.10.2018.
- [4] A. Queck, „Hybride Strahlheizrohre,“ in *Innovationsnetzwerk „Hybrid-Heating“, Fachworkshop „Zukünftige Beheizungstechnologien“*, Aachen, online, 2020.
- [5] A. Queck, B. Stranzinger, M. Mann, R. Miethe, J. Schneider, J. G. Wünning, M. Peters und A. Westerfeld, „Hybride Beheizung in der Stahlindustrie,“ in *3. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium*, ISBN: 978-3-96463-021-6, 2021, pp. S. 149-154.



- [6] A. Queck, B. Stranzinger, M. Mann, S. Lindtner, S. Bullert, J. Wünning, M. Keller und A. Westerfeld, „Betriebserfahrungen mit einem hybrid beheizten Strahlrohr,“ in *4. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquium*, ISBN: 978-3-96463-034-6, 2023, pp. S. 295-305.
- [7] A. Queck, B. Stranzinger, M. Mann, S. Schwinn, J. Wünning, A. Westerfeld und J. Schneider, „Hybrid Radiant Tube in the Steel Industry,“ in *6th Conference on Clean Technologies in the Steel Industry*, Aachen, 2022.
- [8] B. Stranzinger, A. Queck, M. Mann, R. Miethe, J. Schneider, J. Wünning, M. Peters und A. Westerfeld, „Energieflexible Wärmebereitstellung mittels Brenngas und Strom kombiniert in einem neuartigen hybriden Strahlrohr,“ in *Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Abfallbehandlung und Wertstoffrückgewinnung, Energieverfahrenstechnik, Gasreinigung, Hochtemperaturtechnik, Rohstoffe*, Bamberg/online, 2022.
- [9] A. Sauer, H. Buhl, A. Mitsos und M. Weigold, **ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE**; Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und Technologien energieflexibler Fabriken; Stuttgart, ISBN 978-3-8396-1778-6: Fraunhofer Verlag, 2022.