

Analyse und Optimierung von wassergekühlten Transportrollen in Vorwärmöfen von Bandverzinkungsanlagen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Wirt.-Ing. Carsten Rein
geb. am 09.08.1986 in Hachenburg

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission:

- Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau (Vorsitz)
- Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht (Gutachter)
- Prof. Dr.-Ing. Fabian Herz (Gutachter)
- Dr.-Ing. Wolfgang Adler (Gutachter)

eingereicht am: 28.04.2017

Promotionskolloquium am: 19.07.2017

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde im Zuge meiner Tätigkeit als Projektleiter am VDEh-Betriebsforschungsinstitut in Düsseldorf und am Lehrstuhl für Thermodynamik und Verbrennung der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Specht angefertigt. Meinen zahlreichen Unterstützern möchte ich an dieser Stelle meinen Dank ausrichten.

Mein besonderer Dank gilt vornehmlich meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Specht, dem Leiter des Instituts für Strömungstechnik und Thermodynamik an der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg, Herrn Prof. Dr.-Ing. Fabian Herz, dem Professor für Apparate- und Anlagentechnik an der Hochschule Anhalt in Köthen und meinem langjährigen Kollegen am VDEh-Betriebsforschungsinstitut Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Adler, die mir diese Arbeit ermöglicht haben und mit fachlichen Hinweisen zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Wichtige Teile der vorliegenden Arbeit sind innerhalb eines durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Forschungsvorhabens (Förderkennzeichen 03ET1043 A-D) entstanden. Dafür sei an dieser Stelle gedankt.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Kollegen und ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Rigo Giese, Dipl.-Ing. Marc Velten, Dipl.-Ing. Emanuel Thienpont, Dipl.-Ing. Bernhart Stranzinger und meiner Kollegin Dr.-Ing. Sylvia Otto bedanken, die mir jederzeit mit Ratschlägen zur Seite standen.

Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Frau Leonie Rein für die aufopferungsvolle Unterstützung, Ihre Liebe und die liebevolle Betreuung unserer Kinder, ohne die der Erfolg der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ganz herzlich möchte ich meinen Eltern Anette und Friedhelm Rein für die gegebene Möglichkeit des eingeschlagenen Bildungsweges und die moralische Unterstützung bei der Fertigstellung dieser Arbeit danken.

Meinen ganz speziellen Dank richte ich an meine Schwiegereltern Gerd und Brigitte Meyer für die tatkräftige Unterstützung in allen Lebenslagen und das Interesse an meiner Arbeit.

Kurzfassung

Bei der Bandverzinkung von Stahl werden im Vorwärm- und Glühofen Rollen zum Transport des Bandes eingesetzt. Speziell im Vorwärmofen, in dem das Band sehr schnell erwärmt wird, liegen die Ofenraumtemperaturen bei über 1.300 °C. Die eingesetzten Ofenrollen sind hierbei einer sehr hohen thermischen und mechanischen Beanspruchung ausgesetzt. Um den Beanspruchungen standzuhalten werden wassergekühlte Stahlrollen eingesetzt, die aufgrund der Kühlung dem Ofen Wärme entziehen und dadurch den energetischen Wirkungsgrad des Ofens verringern. Der Einsatz ungekühlter keramischer Ofenrollen ist aufgrund der immer wieder entstehenden schlagartigen Belastungen durch das Band oder speziell beim Einfädeln des Bandes nicht möglich. Auch beim Einsatz neuer hitzebeständiger Stahllegierungen ist weiterhin eine Kühlung aufgrund der hohen Ofenraumtemperaturen und mechanischen Belastungen erforderlich. Zur Verringerung der Kühlverluste wurde im Rahmen dieser Arbeit die Wärmeübertragung zwischen Ofen, Band und Rolle untersucht. Neben theoretischen Betrachtungen wurden Messungen im Betrieb und im Technikum zur genauen Bestimmung der Randbedingungen und Kühlverluste durchgeführt. Auf Basis der theoretischen Gleichungen und messtechnischen Ergebnisse wurden analytische und numerische Modelle zur Berechnung der Ofenrollenmaterialtemperatur und der entstehenden thermischen Spannungen entwickelt und verifiziert. Anhand dieser Modelle wurden verschiedene Ofenrollenkonzepte und deren Einfluss auf die Kühlleistung und die thermischen Spannungen im Bauteil untersucht. Auf diese Weise konnten unter Berücksichtigung thermischer Spannungen Konzepte zur Reduzierung der Kühlleistung entwickelt werden. Das erfolgversprechendste Ofenrollenkonzept basiert auf der Senkung des Oberflächenemissionsgrads der Ofenrolle. Damit konnten in den Technikumsversuchen sowohl die Kühlleistung als auch die thermischen Spannungen deutlich reduziert werden. Speziell die Kühlleistung konnte im Technikum um bis zu 67 % reduziert werden. Aufgrund des nahezu volljährigen Betriebs der Ofenrollen, liegt das Erdgaseinsparpotenzial dieses Ofenrollenkonzeptes bei bis zu 6,3 Mio. kWh/a pro Vorwärmofen.

Abstract

In the preheating process of hot dip galvanized strip, furnace rollers are used to transport the strip. These preheating furnaces operate at temperatures between 1.200 and 1.400 °C. The used furnace rollers have to withstand a high thermal and mechanical load. Therefore, in most cases, water-cooled rollers are used. The high cooling rates of the furnace rollers present a heat loss in the furnace and the energy efficiency of the furnace is reduced. Tests of ceramic furnace rollers failed because of sudden loads due to the strip. Also the use of new heat resistant steel alloys requires a cooling method because of the high furnace temperatures and mechanical loads. In this study, the heat transfer between furnace, roller and strip and the heat losses of the roller were researched and new furnace roller designs were investigated to reduce these losses. Beside theoretical considerations, measurements during operation and in laboratory were performed to determine the boundary conditions and the heat losses of the actual state furnace rollers. On that basis analytical and numerical models were developed to calculate material temperatures and thermal stresses in the furnace rollers. In this way new furnace roller designs to reduce the heat loss under consideration of thermal stresses could be developed. The most promising design is based on the effect of a low emissivity on the roller surface. In laboratory the heat loss and the thermal stresses could be reduced simultaneously. Especially the heat loss could be reduced up to 67 % in laboratory. Due to the continuous operation of the furnace rollers, the design has a natural gas saving potential of up to 6,3 million kWh/a per preheating furnace.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Vorwort | III |
| Kurzfassung..... | V |
| Abstract | VI |
| Inhaltsverzeichnis | VII |
| Verzeichnis von Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen..... | X |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Bandverzinkung..... | 1 |
| 1.2 Ofenrollen in Vorwärmöfen von Bandverzinkungsanlagen | 4 |
| 1.3 Ziel und Arbeitspunkte der Arbeit | 9 |
| 2 Stand des Wissens..... | 10 |
| 2.1 Rollenöfen | 10 |
| 2.2 Ofenrollen..... | 11 |
| 2.3 Wärmeübertragung im betrachteten Vorwärmofen..... | 14 |
| 2.3.1 Wärmeübertragung zwischen Ofen, Band und Ofenrolle | 15 |
| 2.3.2 Wärmeübertragung zwischen Ofenrolle und Gut | 23 |
| 2.3.3 Wärmeübertragung und Temperaturverlauf in der Ofenrolle..... | 25 |
| 2.4 Thermo-mechanische Beanspruchung von Ofenrollen..... | 30 |
| 2.4.1 Mechanische Belastung | 30 |
| 2.4.2 Thermische Spannungen und thermische Ermüdung | 33 |
| 2.4.3 Kriechen..... | 35 |
| 2.5 Heißgaskorrosion | 36 |
| 2.6 Beschichtungen..... | 37 |
| 2.7 Berechnungsmethoden | 38 |
| 2.7.1 1-Weg-Fluid-Struktur-Kopplung (Fluid-Structure-Interaction)..... | 39 |
| 2.7.2 Bi-lineares Materialmodell..... | 40 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.8 | Zwischenfazit..... | 42 |
| 3 | Messtechnische und numerische Voruntersuchungen | 44 |
| 3.1 | Bestimmung der Randbedingungen der Ofenrollen..... | 44 |
| 3.2 | Bestimmung der Kühlverluste der Ofenrollen im Vorwärmofen | 48 |
| 3.3 | Heißgaskorrosionsversuche | 50 |
| 3.4 | Untersuchungen der IST-Ofenrollen am Versuchsofen der Technikumsanlage des BFI..... | 53 |
| 3.5 | Untersuchung des Einflusses des Oberflächenemissionsgrads | 58 |
| 3.6 | Gekoppelte FSI-Berechnung einer Ofenrolle..... | 60 |
| 3.6.1 | CFD-Berechnung eines Ofensegments mit gekühlter Ofenrolle..... | 61 |
| 3.6.2 | FEM-Berechnung der Ofenrolle | 66 |
| 3.6.3 | Fazit FSI-Berechnung | 71 |
| 3.7 | Energieeinsparpotenziale | 71 |
| 3.8 | Zusammenfassung der Voruntersuchungen..... | 73 |
| 4 | Analytische und numerische Untersuchung zur Entwicklung von Ofenrollenkonzepten | 75 |
| 4.1 | Analytisches Modell zur Berechnung des Wärmeeintrags in die Ofenrolle und der Materialtemperaturen im Rollenmantel | 75 |
| 4.2 | Entwicklung eines thermisch-statischen FEM-Modells..... | 80 |
| 4.3 | Entwicklung von Ofenrollenkonzepten anhand der analytischen und numerischen Modelle | 83 |
| 4.3.1 | Anhebung der Ofenrollen-Oberflächentemperatur | 84 |
| 4.3.2 | Reduzierung des Ofenrollen-Emissionsgrads | 90 |
| 4.3.3 | Fazit zu den entwickelten Ofenrollenkonzepten..... | 92 |
| 5 | Entwickelte Prototypen und Technikumsversuche | 93 |
| 5.1 | Zweischalige Ofenrolle mit erhöhter Oberflächentemperatur | 93 |
| 5.2 | Beschichtete Ofenrollen mit reduziertem Emissionsgrad der Ofenrollenoberfläche..... | 96 |

| | | |
|-----|--|-------|
| 5.3 | Zusammenfassung der Versuchsergebnisse | 103 |
| 6 | Schlussfolgerung | 105 |
| 7 | Ausblick | 108 |
| | Literaturverzeichnis | XIII |
| | Anhang | XVIII |

Verzeichnis von Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

| Zeichen | Bedeutung | Einheit |
|---------------------------|---|----------------|
| A | Fläche | m ² |
| a | Temperaturleitfähigkeit | K/m |
| b | Breite | m |
| c _p | Wärmekapazität | J/(kg K) |
| D | Durchmesser | mm |
| d _h | Hydraulischer Durchmesser | mm |
| d _K | Mittlerer Korndurchmesser | µm |
| E | Elastizitäts-Modul | MPa |
| E _T | Tangentialmodul | MPa |
| L | Länge | m |
| N _{B, isotherm} | Bruchlastspielzahl bei isothermen Bedingungen | - |
| Nu | Nusselt-Zahl | - |
| Pr | Prandtl-Zahl | - |
| Q̇ | Wärmestrom | kW |
| r | Radius | mm |
| R _a | Oberflächenrauigkeit | µm |
| Re | Reynolds-Zahl | - |
| Re | Streckgrenze | MPa |
| R _{m,t/θ} | Zeitstandsfestigkeit | MPa |
| R _m | Zugfestigkeit | MPa |
| R _{p0,2} | 0,2-% Dehngrenze | MPa |
| R _{p1.0,10.000h} | 1-%-Dehngrenze nach 10.000h Betriebsstunden | MPa |
| s | Wandstärke | mm |
| T | Temperatur | °C |

| | | |
|--------------------------------|--|--------------------------------------|
| ΔT | Temperaturgefälle | - |
| \dot{T} | Temperaturänderungsgeschwindigkeit | K/s |
| T_s | Schmelztemperatur | °C |
| v | Strömungsgeschwindigkeit | m/s |
| x_{con} | Breite des Kontaktbereichs zwischen Rolle und Gut | mm |
| α | Wärmeübergangskoeffizient | W/m ² |
| α_{th} | Ausdehnungskoeffizient | 1/K |
| $\Delta\alpha_{th}$ | Differenz zwischen der thermischen Ausdehnung zweier Werkstoffe bspw. bei Verbundwerkstoffen oder Beschichtungen | - |
| ε | Emissionsgrad | - |
| $\varepsilon_F, \varepsilon_B$ | Fließ-, Bruchdehnung | % |
| ε_{th} | Thermische Längenausdehnung | mm |
| $\dot{\varepsilon}$ | Kriechgeschwindigkeit | mm/s |
| ε_p | Duktilität | - |
| λ | Wärmeleitfähigkeit | W/(m K) |
| ν | Querkontraktionszahl | - |
| ρ | Dichte | Kg/m ³ |
| σ | Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \cdot 10^{-8}$ | = W/(m ² K ⁴) |
| σ | Spannung | MPa |
| σ_F, σ_B | Fließ-, Bruchspannung | MPa |
| σ_y | Tangentialspannung | MPa |
| ν | Kinematische Viskosität | m ² /s |
| φ | Einstrahlzahl | - |

Indizes

| Index | Bedeutung |
|-------|-----------|
| a | außen |

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Aus | austretend |
| B | Band |
| BK | Brennkammer |
| BR (analog für WR, RW, WB etc...) | Von Band an Rolle |
| EIN | eintretend |
| G | Gas (Ofenabgas) |
| i | innen |
| m | gemittelt |
| max | maximal |
| min | minimal |
| O | Ofen |
| R | Rolle (Ofenrolle) |
| T | Temperatur |
| th | thermisch |
| W | Wand (Ofenwand) |
| W | Wasser |

Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|-----------|--------------------------------------|
| BFI | VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| FEM | Finite Elemente Methode |

1 Einleitung

1.1 Bandverzinkung

Zum Korrosionsschutz wird Stahl einer Oberflächenveredelung unterzogen. Dazu wird eine Schutzschicht, die aus einer oder mehreren Lagen besteht, auf den Stahl aufgebracht. Es werden Korrosionsschutzschichten zum vorübergehenden und Schichten zum langfristig wirkenden Schutz unterschieden. Zu den temporären Schichten zählen organische Beschichtungen wie Öle, Wachse und Klarlacke, die nur für einen kurzen Zeitraum, z. B. den Transport eines Werkstücks, wirksam sind. Langzeitig wirkende Schutzschichten haben eine Schutzdauer, die der Nutz- bzw. Lebensdauer des Werkstücks entsprechen muss. Hierzu zählen organische Überzüge wie Kunststoffüberzüge, anorganische Überzüge wie Keramikbeschichtungen und metallische Überzüge (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2002). Das Feuerverzinken stellt eine Form der metallischen Überzüge/Schutzschichten dar. Metallische Schutzschichten können gegenüber dem Stahl „edler“ oder „unedler“ sein. „Edlere“ Metalle schützen das Werkstück allein durch die Bildung der Schutzschicht. Wird diese beschädigt, wird in Gegenwart von Feuchtigkeit das „unedlere“ Metall, also der Stahl, angegriffen. Schutzschichten aus „unedleren“ Metallen wirken in zweifacher Hinsicht. Zum einen durch das Ausbilden der Schutzschicht und zum anderen dadurch, dass bei Undichtigkeiten in der Schutzschicht nicht der Stahl, sondern die „unedlere“ Schutzschicht angegriffen wird („kathodischer Schutz“). Zu den „unedleren“ Metallen gehören Cadmium, Aluminium und auch Zink, das ca. 30-mal langsamer korrodiert als Stahl (Verein Deutscher Eisenhüttenleute, 2002), (Subramanian, 1994). Es gibt verschiedene Verfahren zum Aufbringen metallischer Überzüge. Hierzu zählen u. a. Diffusion, elektrolytische Beschichtung, Plattieren und Schmelztauchveredeln. Das Feuerverzinken zählt zur Schmelztauchveredelung. Beim Feuerverzinken unterscheidet man diskontinuierliche Verfahren wie Stückverzinken, bei dem einzelne Werkstücke verzinkt werden, und kontinuierliche Verfahren wie Bandverzinken, bei dem ein Endlosstahlband verzinkt wird, indem es durch ein Zinkbad gezogen wird.

Im Folgenden wird das kontinuierliche Bandverzinken näher betrachtet. Die Verfahren zum kontinuierlichen Feuerverzinken unterscheiden sich im Wesentlichen

in der Vorbehandlung bzw. Reinigung sowie der Wärmebehandlung des zu verzinkenden Guts. Zum einen ist es möglich, die Bandoberfläche chemisch durch Entfettungs- und Beizbäder von Ölen, Fetten, Rost und Zunder zu befreien (konventionelles Verfahren), zum anderen können die genannten Verunreinigungen auch thermisch in Durchlauföfen entfernt werden (Sharma, 1994). Je nach geforderter Produktqualität können auch beide Reinigungsverfahren zum Einsatz kommen (Ottersbach, 1994). Beim kontinuierlichen Bandverzinken wird zumeist die thermische Oberflächenreinigung angewendet (Maaß & Peißker, 1993). Nach dem Reinigen wird das Band in einem direkt oder indirekt beheizten Durchlaufofen wärmebehandelt, sofern dieses nicht schon nach dem Walzen geschehen ist. Anschließend wird es einer raschen Abkühlung auf Zinkbadtemperatur, durch ein schmelzflüssiges Zinkbad geführt. Das Zinkbad hat einen Temperaturwert von ca. 450°C. Die Dicke der gewünschten Zinkschicht wird nach dem Düsenabstreifverfahren (Meyer, 1999) geregelt. Der eigentlichen Verzinkung schließen sich, je nach geforderter Produktqualität, Nachbehandlungen an wie Galvanisierung, Richten, Dressieren oder chemische Nachbehandlung. In **Abbildung 1-1** ist eine Verfahrenslinie zum kontinuierlichen Bandverzinken schematisch dargestellt.

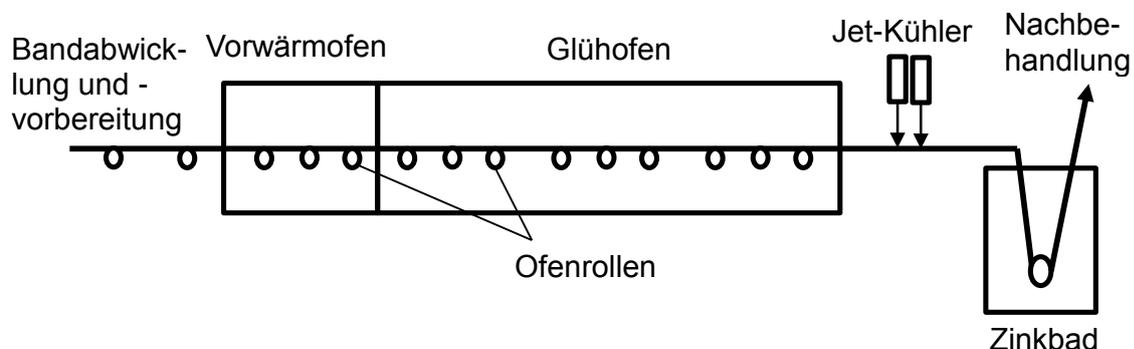


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung einer kontinuierlichen Band-erwärmungsanlage zur Bandverzinkung

In **Abbildung 1-2** ist der Durchlauf des Bandes durch die Zonen Vorwärm- und Glühofen, Jet-Kühler und Zinkbad mit entsprechenden Temperaturbereichen (grau hinterlegte Balken) schematisch dargestellt.

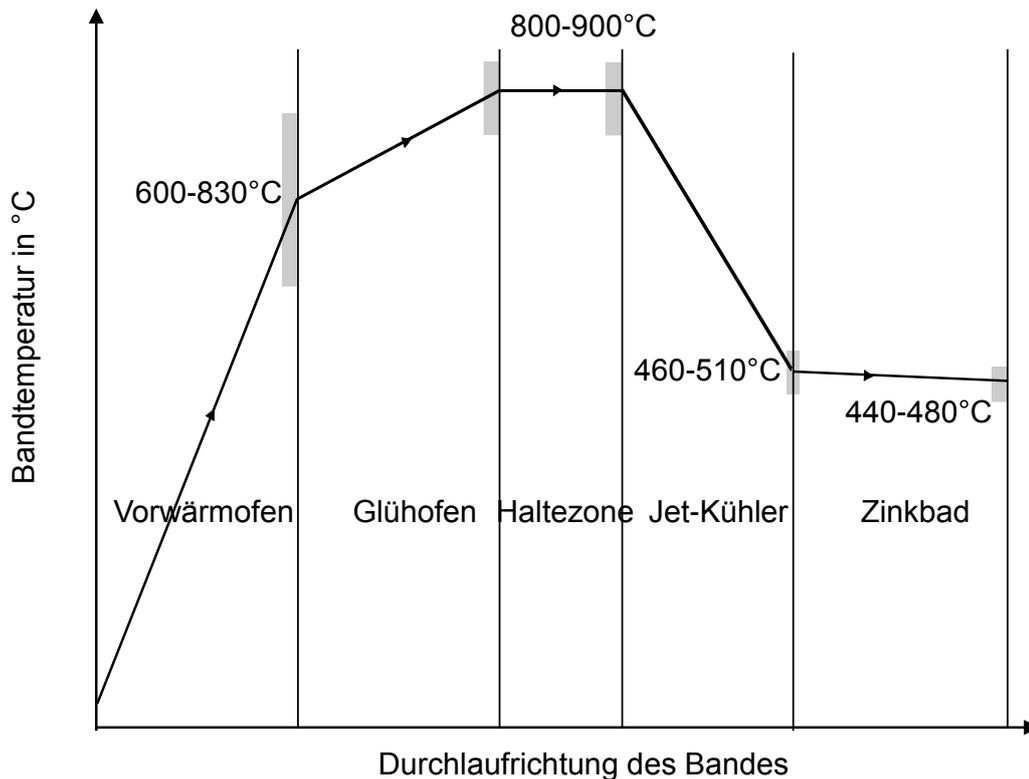


Abbildung 1-2: Verschiedene Zonen und Zonenendtemperaturen des Bandes in den jeweiligen Zonen beim kontinuierlichen Feuerverzinken

In dieser Arbeit werden ausschließlich der Vorwärmofen bzw. die im Vorwärmofen verwendeten Ofenrollen untersucht. Die angestrebten Bandendtemperaturwerte nach Durchlaufen des Vorwärmofens liegen je nach Art und chemischer Zusammensetzung des Bandes zwischen 600 und 830°C. Beim gezeigten Bandverzinkungsverfahren liegt in der Bandeinlaufzone des Ofens eine oxidierende Atmosphäre vor, während in den nachfolgenden Zonen durch die weitere Aufheizung mittels unterstöchiometrischer Verbrennung von Erdgas eine reduzierende Atmosphäre herrscht. Der Ofen wird direkt beheizt.

Die während der Banderwärmung ablaufenden Vorgänge sind im Einzelnen:

- 1) Gefügeveränderung durch die Erwärmung des Bandes auf Glühtemperatur,
- 2) Reinigung der Bandoberfläche durch Abbrand sowie
- 3) Oxidation und anschließende Reduktion der Bandoberfläche.

Durch die Erwärmung des Stahls erfährt dieser eine Gefügeveränderung. Es beginnen die Auflösung des sehr harten aber spröden Zementits, die Rekristallisation

des Gefüges und ein Kornwachstum innerhalb des Gefüges. Je nach Legierungsbestandteilen im Stahl beginnen die genannten Vorgänge bei verschiedenen Temperaturwerten und ziehen sich über einen längeren Zeitraum hin, so dass sie erst im Glühofen ihren Abschluss finden.

Durch die oxidierende Atmosphäre in der Bandeinlaufzone und hohe Gastemperaturwerte von über 1.000°C werden evtl. noch an der Bandoberfläche haftende Öle und Fette verbrannt.

In der Bandeinlaufzone des Vorwärmofens kommt es zur Bildung einer dünnen Oxidschicht auf der Bandoberfläche, da diese Zone durch die überstöchiometrische Nachverbrennung von Brenngasen mit Sauerstoffüberschuss und bei Gastemperaturwerten von über 1.000°C gefahren wird. In den anschließenden Zonen findet die weitere Aufheizung durch understöchiometrische Verbrennung von Erdgas oder indirekte Beheizung unter Schutzgas statt, so dass eine reduzierende Atmosphäre vorliegt. Dadurch beginnt in diesem Bereich bereits die Reduktion der Oxidschicht auf der Bandoberfläche durch Reaktion mit dem in der Heißgasatmosphäre enthaltenem CO und H₂ (Sharma, 1994). Hier liegt die Ofenraumtemperatur im Bereich von 1.250 – 1.400 °C, je nach Vorwärmofen.

1.2 Ofenrollen in Vorwärmöfen von Bandverzinkungsanlagen

Bei kontinuierlichen Feuerverzinkungsanlagen wird das Band mit Hilfe von wassergekühlten Ofenrollen mit hoher Geschwindigkeit durch die Banderwärmungsanlagen geführt. Ofenrollen sind zur Bandbeförderung in Wärm- und Wärmebehandlungsöfen im Vergleich zu Schienen oder Hubbalken das beste Transportsystem, da sie energieeffizienter sind und die hohen Oberflächenqualitätsanforderungen erfüllen können (Behrens, 1997). Ein wichtiges Kriterium für die weitere Verarbeitung des feuerverzinkten Bandes ist die Oberflächenqualität. Einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenqualität des Bandes haben die Ofenrollen, speziell im Bereich der sehr heißen understöchiometrischen Vorwärmzonen. Hier erreicht das Band Temperaturwerte von bis zu 830°C. Ablagerungen sowie Unebenheiten an den Rollen führen direkt zu Oberflächenfehlern auf dem Band und damit zur Abwertung bis hin zur Verschrottung des Produktes. Bei Ofendurchsatzraten von ca. 450.000 t/a, einer Banddurchlauf-

geschwindigkeit von bis zu 3 m/s, einer notwendigen nahezu sauerstofffreien Ofenatmosphäre und Ofentemperaturwerten von ca. 1.300°C sind die Anforderungen an die Rollen extrem hoch. Um Anlagenstillstände mit Produktionsausfällen durch ein Versagen der Ofenrollen im Ofen zu vermeiden, werden die metallischen Rollen mit Wasser gekühlt. Mit Hilfe der Wasserkühlung wird die eingetragene Wärme abgeführt, so dass die eingesetzten Materialien die hohen Betriebsanforderungen erfüllen können. Je nach Ausführungsform werden derartigen Öfen 0,5 - 3 MW entzogen. Der Wasserbedarf beläuft sich auf 170.000 – 200.000 m³/a. **Abbildung 1-3** zeigt eine wassergekühlte Ofenrolle im Ofenbetrieb bei einer Zonentemperatur von ca. 1.100°C. Die dunkle Färbung der Ofenrolle zeigt, dass sie wesentlich kühler als das Band ist. Zudem ist die Oberfläche durch die wechselnden Bandregime, mechanischen Belastungen durch das Band und Temperaturänderungen deutlich in Mitleidenschaft gezogen und weist Verschmutzungen/Anhaftungen auf. Diese Anhaftungen führen je nach Ausprägung zu Kratzern auf der Bandunterseite und damit zu Qualitätseinbußen.

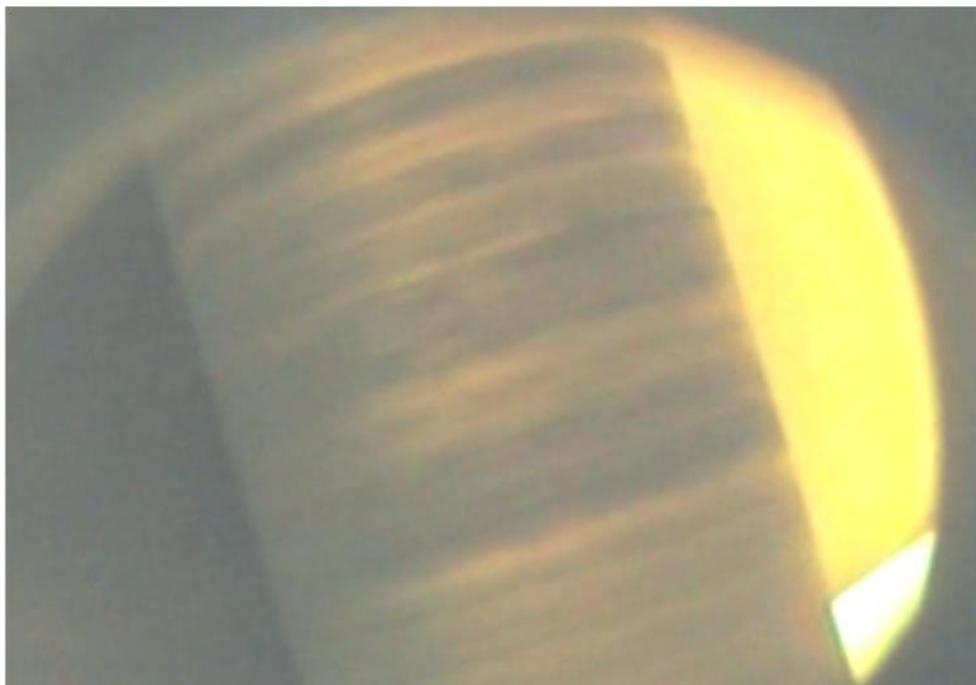


Abbildung 1-3: Fotografische Ansicht einer wassergekühlten Ofenrolle direkt in der heißen Ofenzone

Durch die innere Wasserkühlung der Ofenrollen und das im Ofen zu erwärmende Band entsteht ein extremes Temperaturprofil auf der Oberfläche der Rolle. Dieses führt zu thermischen Spannungen im Material und zu einer ungleichmäßigen

Temperaturverteilung auf dem Band und im Ofen. In **Abbildung 1-4** sind die exemplarischen Berechnungsergebnisse der Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer in dieser Arbeit betrachteten Ofenrolle beispielhaft dargestellt. Die Rolle befindet sich im Einlaufbereich eines Vorwärmofens. Das Kühlwasser strömt von links durch die Rolle, wird am rechten Ende um 180° umgelenkt und verlässt die Rolle ebenfalls auf der linken Seite. Die Strömung des Wassers ist zur Veranschaulichung schematisch dargestellt. Aufgrund der hohen Zonentemperatur von ca. 1.300°C erwärmt sich die Rolle trotz Wasserkühlung auf 200 – 400 °C an der Oberfläche. Das Band schattet die Rolle lokal gegen die heißere Wärmestrahlung des Ofens ab. Dadurch ergibt sich das in Abbildung 1-4 gezeigte Temperaturprofil auf der Rollenoberfläche.

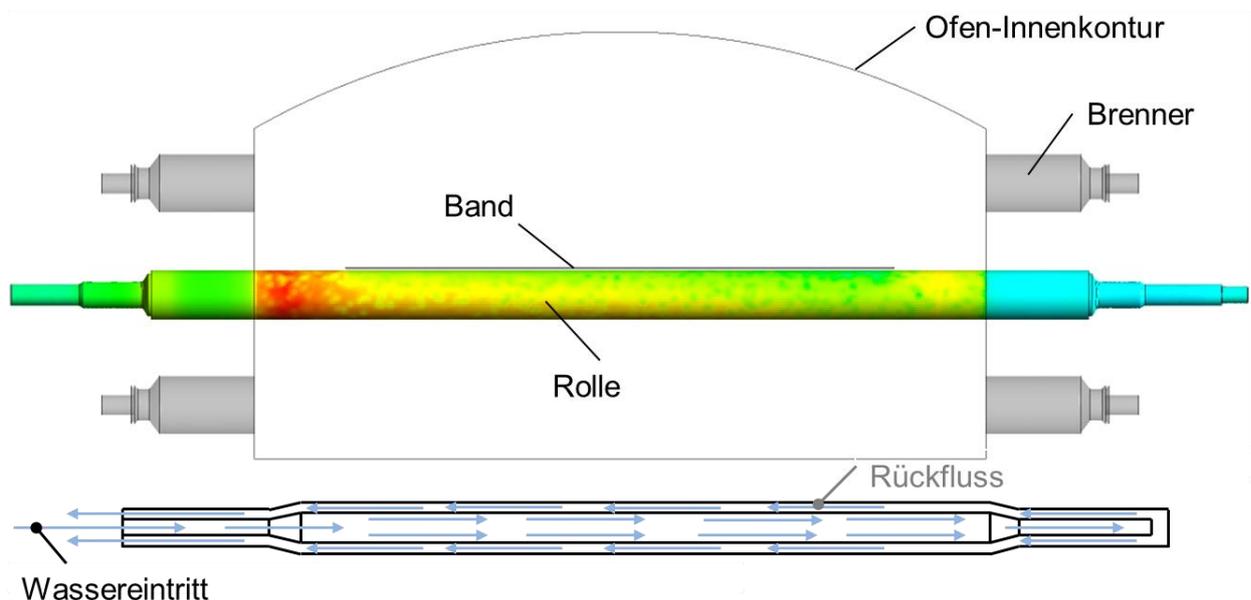


Abbildung 1-4: Exemplarische Berechnungsergebnisse der Temperaturverteilung auf der Oberfläche einer wassergekühlten Ofenrolle mit Band im betrachteten Vorwärmofen und schematische Darstellung des Kühlkonzeptes (unten)

Unabhängig von der Position der Rolle im Ofen wird durch das unterschiedliche Temperaturniveau von Rolle und Band ein Temperaturgradient über der Länge und dem Umfang der Rolle verursacht. Als Alternative wurde in derartigen Vorwärmöfen der Einsatz vollkeramischer, ungekühlter Ofenrollen untersucht. Diese keramischen Rollen konnten allerdings den im Vorwärmofen vorliegenden mechanischen

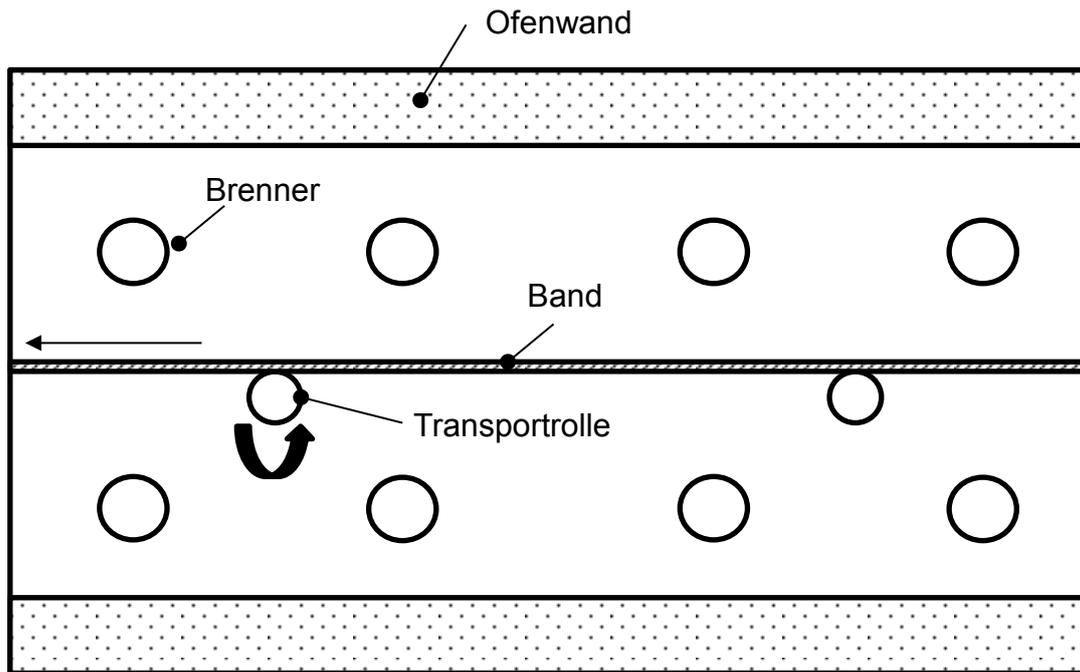


Abbildung 1-6: Schematischer Längsschnitt durch den betrachteten Vorwärmofen

Der Kühlleitung ist mit einer Drehverbindung einseitig an die Ofenrollen angeschlossen. Der Antrieb befindet sich jeweils auf der entgegengesetzten Seite des Ofens.

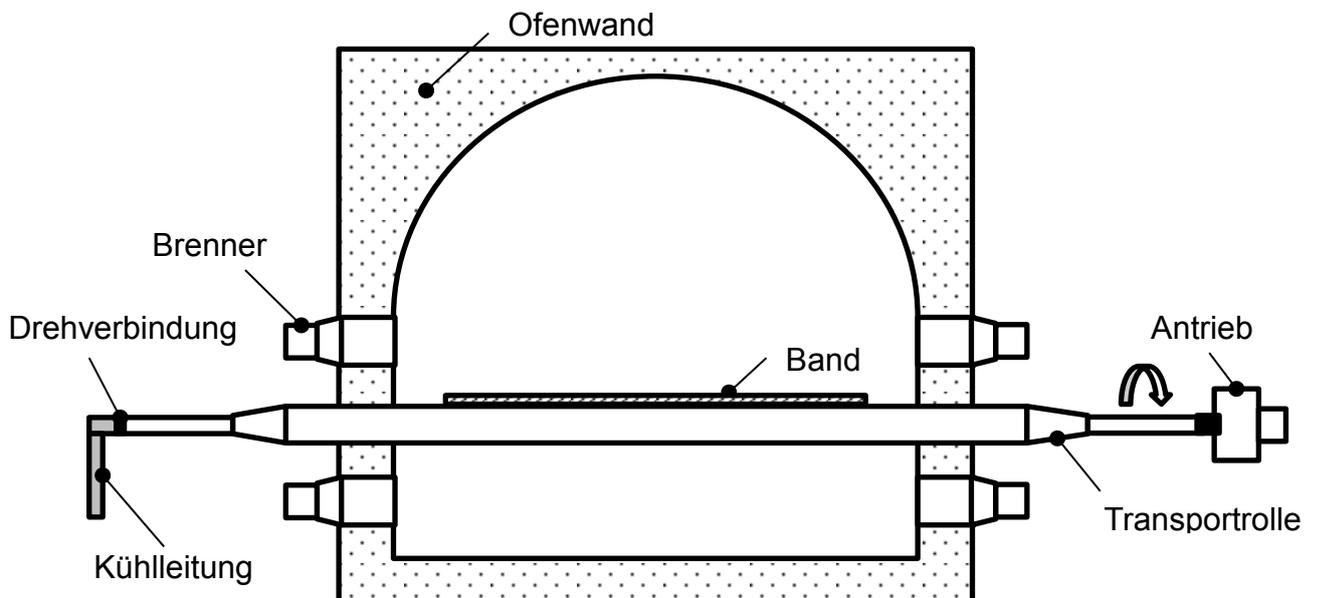


Abbildung 1-7: Querschnitt durch den betrachteten Vorwärmofen und schematische Darstellung der Ofenrollenkühlung

1.3 Ziel und Arbeitspunkte der Arbeit

Eine Verringerung der Abstrahlverluste über die Ofenrolle ist erforderlich, um Wärmeverluste und die eingesetzte Energie für die Kühlung zu reduzieren und die Wärmeaustauschbedingungen zu vergleichsmäßigen. Ziel dieser Arbeit ist es den Einfluss der Kühlung von Ofenrollen auf die Bänderwärmung und Wärmeübertragung in dem betrachteten Vorwärmofen einer Feuerverzinkungsanlage zu bestimmen und unter Berücksichtigung werkstoffabhängiger Kenndaten neue Ofenrollenkonzepte zu entwickeln.

Folgende Arbeitspunkte wurden dazu durchgeführt:

- Messtechnische Bestimmung der Randbedingungen für die Ofenrollen
- Erarbeitung der theoretischen Grundlagen zu den in Vorwärmöfen von Bandverzinkungsanlagen eingesetzten Ofenrollen sowie den Wärmeübertragungsmechanismen zwischen Rolle, Band und Ofen
- Erarbeitung verschiedener Konzepte zum energieeffizienten Betrieb von Ofenrollen anhand von analytischen Modellen und numerischen Berechnungen
- Auswahl von Ofenrollenkonzepten sowie rechnergestützte Optimierung und Anpassung dieser für die Fertigung von Testrollen
- Fertigung/Anpassung und Test von Ofenrollen in einer Versuchsanlage zur Validierung der analytischen und numerischen Ergebnisse und Bewertung der Einsetzbarkeit in dem betrachteten Vorwärmofen.

Das Band tritt der sog. Bandeintritts- oder auch Konvektionszone in den Ofen ein. In dieser Zone wird das Band, vorwiegend konvektiv (daher Konvektivzone), durch die entgegen strömenden heißen Abgase erwärmt. Der gesamte Vorwärmofen wird direkt beheizt. In den Zonen 1-4 wird das Erdgas unterstöchiometrisch mit Brennluft verbrannt, sodass hier eine reduzierende Ofenatmosphäre entsteht. Zwischen Zone 1 und der Konvektionszone findet die Nachverbrennung der in den Zonen 1-4 entstandenen unverbrannten Bestandteile (CO und H_2) im Ofenabgas statt, sodass in der Bandeintritts- bzw. Konvektionszone eine oxidierende Atmosphäre herrscht. Der Abstand zwischen den Ofenrollen liegt in solchen Anlagen zwischen 3-6 m und die Bandgeschwindigkeit beträgt bis zu 3 m/s. Die Ofenrollen bzw. Ofenrollenposition in den Zonen 1-4 sind mit 1-6 nummeriert. Die Ofenrollen 1, 3 und 5 wurden nachträglich ausgebaut.

2.2 Ofenrollen

Ofenrollen für Rollenöfen bestehen hauptsächlich aus Stahl, SiC, Quarz oder Mullit. Anwendung finden auch plasmabeschichtete Stahlrollen. Hierbei wird eine Stahlrolle mit Keramik (bspw. Aluminiumoxid oder Zirkonoxid) beschichtet. In Vorwärmöfen von Feuerverzinkungsanlagen kommen hauptsächlich gekühlte Stahlrollen zur Anwendung (Divjak & Gohres, 2005), (Friedrich, 2003), (Friedrich, 2006), (Figer-Schlangen, 2001), (Hoffmann, 1996). Mullit-keramische Rollen kommen aufgrund der rauen Einsatzbedingung und ihrer mangelnden Duktilität und Temperaturwechselbeständigkeit in solchen Vorwärmöfen meist nicht in Frage. Auch SiC oder Quarz-Rollen stoßen hier an ihre Einsatzgrenzen, da die Schlagbelastung durch das Band und vor allem beim Einfädeln des Bandes zu hoch ist (Gosemann, et al., 2011). Weiterhin bildet sich in direkt beheizten Öfen aufgrund einer chemischen Reaktion des SiC mit Sauerstoff und Wasserdampf eine Deckschicht aus SiO_2 , welches wiederum mit dem sich bildenden FeO auf der Stahlbandoberfläche reagiert und dadurch chemisch zerstört wird (Otto, Walter, & Krause, 2002). Weiterhin sind ungekühlte beschichtete Ofenrollen bekannt. Hier dient eine Beschichtung aus Oxidkeramik oder einem korrosionsbeständigerem Metall zum Schutz und/oder zur Wärmedämmung der Ofenrolle (Jarosinski, 2009). Aufgrund der in Industrieöfen vorkommenden Temperaturwechsel muss eine solche Beschichtung eine möglichst

geringe Differenz in der thermischen Ausdehnung zum Grundwerkstoff besitzen (Bürgel, 1998). In Vorwärmöfen sind die teilweise raschen und großen Temperaturwechsel meist ein Ausschlusskriterium für solche Beschichtungen. Seit einiger Zeit kommt es in Vorwärmöfen von Warmwalzwerke zum Einsatz ungekühlter metallischer Ofenrollen (Miller, Pankiw, & Echlin, 2002). Allerdings liegen hier die Temperaturen meist unter 1.200°C, die Rollendurchmesser sind mehr als doppelt so groß, die Drehzahl deutlich geringer und die Ofenatmosphäre oxidierend. Die Werkstoffe Centralloy® 60 HT R sowie Nicrofer 6025 HT finden ebenfalls vermehrt Einsatz in Ofenrollen und können laut Datenblatt bis 1.250 °C eingesetzt werden. Es sind Erfahrungswerte aus Normalisierungsöfen bei einer Betriebstemperatur von 1.000°C bekannt (Neubert, 2014). Die Umdrehungsgeschwindigkeit und die Rollenteilung der Ofenrollen ist hier im Vergleich zum Vorwärmofen einer Bandverzinkungsanlage allerdings wesentlich geringer, was die Belastung pro Ofenrolle entsprechend verringert.

Ein weiterer Weg den Wärmeverlust der Ofenrollen zu reduzieren ist die Kühlung metallischer Ofenrollen mit Luft. Hierzu ist allerdings bisher nur ein Patent bekannt (Holler, 2006). Hierin soll die durch die Ofenrolle geleitete Luft als Verbrennungsluft für die Brenner verwendet werden. Eine technische Umsetzung oder Erprobung des im Patent beschriebenen Verfahrens ist bisher nicht bekannt. In einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben (Gosemann, et al., 2011) wurde im betrachteten Ofen eine luftgekühlte metallische Ofenrolle aus dem hochtemperaturfesten Nicrofer 6025 HT betrieblich erprobt. Die Ofenrolle wurde bei einer Ofenraumtemperatur von 1.100 °C mit bis zu 3.600 m³/h Luft gekühlt. Die Rollenmaterialtemperaturen, welche mit Ni-Cr-Ni-Thermoelementen gemessen wurden, lagen bei über 1.000°C. Das Zusammenspiel aus Temperatur und der mit der großen Länge der Ofenrolle einhergehende wechselnden Biegebeanspruchung haben hier zu einer nicht tolerierbaren Durchbiegung der Ofenrolle nach nur kurzer Betriebsdauer geführt. Weiterhin konnten bei Ausbau der Ofenrolle Anhaftungen an der Rollenoberfläche festgestellt werden, siehe **Abbildung 2-2**. Diese Anhaftungen können im schlimmsten Fall die Qualität des Bandes verringern und sollten daher unbedingt vermieden werden.



Abbildung 2-2: Anhaftungen auf der Oberfläche einer getesteten luftgekühlten Ofenrolle aus Nicrofer 6025 HT

Man spricht hier allgemein vom „Pick-up-Effekt“ bei Ofenrollen (Zeichner, 2013). Dieser Effekt hängt von zahlreichen Faktoren ab, beispielsweise von der Porosität und Rauigkeit der Rollenoberfläche. Bei Stahlrollen handelt es sich meist um Oxidablagerungen. Diese werden in der Wärmebehandlung von Glas durch eine Beschichtung aus Bornitrid-haltigem Al_2O_3 -Sols vermieden (Gorman & Plocki, 1981). Ein großes Problem stellen solche Anhaftungen auch in Rollenherdöfen mit vollkeramischen Ofenrollen aus Quarz dar (Zeichner, 2013). Hier wird ebenfalls mit Sol-Gel-Komposit-Beschichtungen versucht den Pick-up-Effekt einzudämmen (Zeichner, 2013). Bei den wassergekühlten Ofenrollen konnten bisher keine bzw. nur geringfügige Anhaftungen festgestellt werden, was wahrscheinlich auf die niedrige Oberflächentemperatur der Ofenrollen und die unterstöchiometrische Ofenatmosphäre zurückzuführen ist (Gosemann, et al., 2011). Beides dämmt eine mögliche Oxidbildung ein.

Die aktuell im betrachteten Vorwärmofen eingesetzten Rollen wurden bereits schematisch in Abbildung 1-7 dargestellt. Einige charakteristische Größen der betrachteten Ofenrollen zeigt **Abbildung 2-3**. Der Rollenaußendurchmesser beträgt etwa 150 mm und die Länge der Rollen liegt zwischen 3500 und 4000 mm. Je nach Position der Rollen im Ofen, werden sie mit 15 -30 m^3 Wasser pro Stunde gekühlt. Im Inneren der Transportrolle dient ein sogenanntes Torpedorohr zur Strömungsführung des Wassers. Das durchströmende Wasser strömt auf der linken Seite zentral in den Torpedo ein, wird dann am rechten Ende der Ofenrolle 180° umgelenkt und strömt dann in einem Ringspalt zwischen Torpedorohr und Zapfen bzw. Rollenmantel zurück.

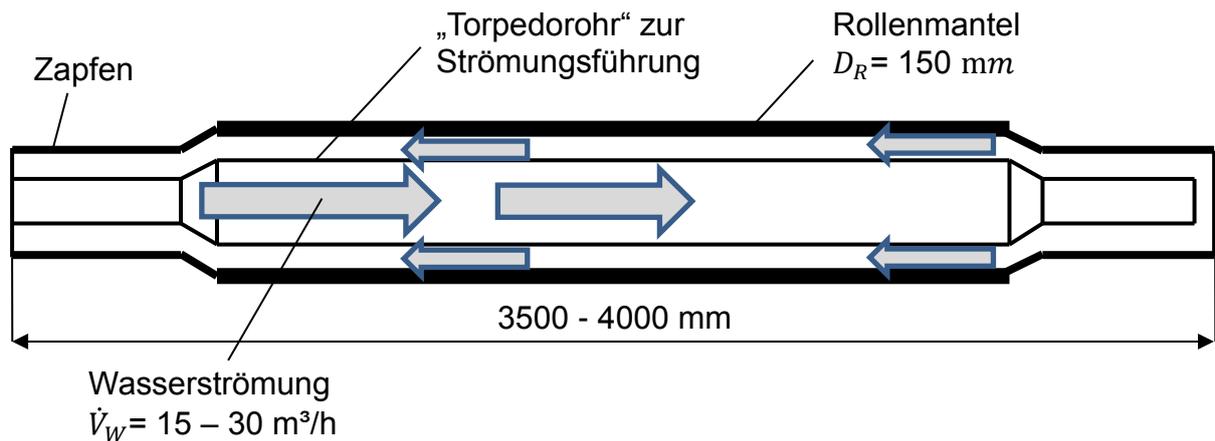


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Ofenrolle des ausgewählten Vorwärmofens

Eine weitere Bauform der Ofenrolle wird in **Abbildung 2-4** dargestellt. Hierbei wird die Strömung von einem zum anderen Ende der Ofenrolle geführt, wiederum in einem Ringspalt am Rollenmantel entlang. Dieser Ringspalt wird durch einen Verdrängerkörper eingestellt. Wesentliche Parameter entsprechen denen der Ofenrolle aus **Abbildung 2-3**.



Abbildung 2-4: Exemplarische Darstellung einer Ofenrollebauform mit Wassereinlass linksseitig und Wasserauslass rechtsseitig

Im Folgenden wird von Bauform 1 (**Abbildung 2-3**) und Bauform 2 (**Abbildung 2-4**) gesprochen.

2.3 Wärmeübertragung im betrachteten Vorwärmofen

Die theoretischen Grundlagen des Wärmetransports sind in ausführlicher Darstellung in Standardwerken enthalten. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Beschreibung der physikalischen Grundgesetze der Strahlung von Festkörpern oder Gasen bzw. um den Strahlungswärmeaustausch zwischen denselben

(Specht, 2014), (Mahan, 2002), (Siegel, Howell, & Lohrengel, 1991), (Long, 1999), (Kostowski, Jeschar, & Alt, 1999), (Baehr & Stephan, 1994), (Höfner, Samos, & Vägt, 1992), (Siegel & Howell, 2001), (Glück, 1981). Die Literatur zur Beschreibung des Wärmeaustauschs in den industriellen Ofenanlagen ist auch sehr umfangreich (Pfeifer, 2007), (Von Stark & Mühlbauer, 2004), (Dietz, 1992), (Solka, 1988), (Paul, 1987). In dieser Literatur wurden verschiedene Modelle zur Ermittlung des Wärmeübergangs durch Strahlung und Konvektion in den Ofenräumen der verschiedenen Industrieofenarten beschrieben.

Im Folgenden werden die verwendeten Berechnungsgrundlagen und Näherungsberechnungen für Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung beschrieben. Hierbei liegt der Fokus auf der Wärmeübertragung zwischen Ofenrolle und Ofen, Gut sowie dem Kühlmedium.

2.3.1 Wärmeübertragung zwischen Ofen, Band und Ofenrolle

Strahlung

In Rollenöfen dominiert der Wärmeübergang durch Strahlung, da die Temperaturen hoch und die Strömungsgeschwindigkeiten im Ofenraum relativ gering sind. Die Wände können meist näherungsweise als adiabat angenommen werden, da diese in der Regel sehr gut wärmegeämmt sind, (Specht, 2014). Eine einfache Berechnung der Wärmeübertragung durch Strahlung im Ofenraum kann anhand des effektiven Emissionsgrads bzw. Gesamtemissionsgrads durchgeführt werden (Schupe & Jeschar, 1975), (Specht, 2014). In Bezug auf die Wärmeübertragung an die Ofenrolle ergibt sich hier ein Sonderfall, da diese mit dem Ofenraum und dem Nutzgut im Strahlungsaustausch steht und zudem gekühlt wird. Es kommt zu einem Strahlungsaustausch zwischen drei Flächen unterschiedlicher Temperatur (Ofenwand (W), Band (B) und Ofenrolle (R)). **Abbildung 2-5** zeigt eine schematische Darstellung der Wärmeströme durch Strahlung an die Ofenrolle im betrachteten Vorwärmofen.

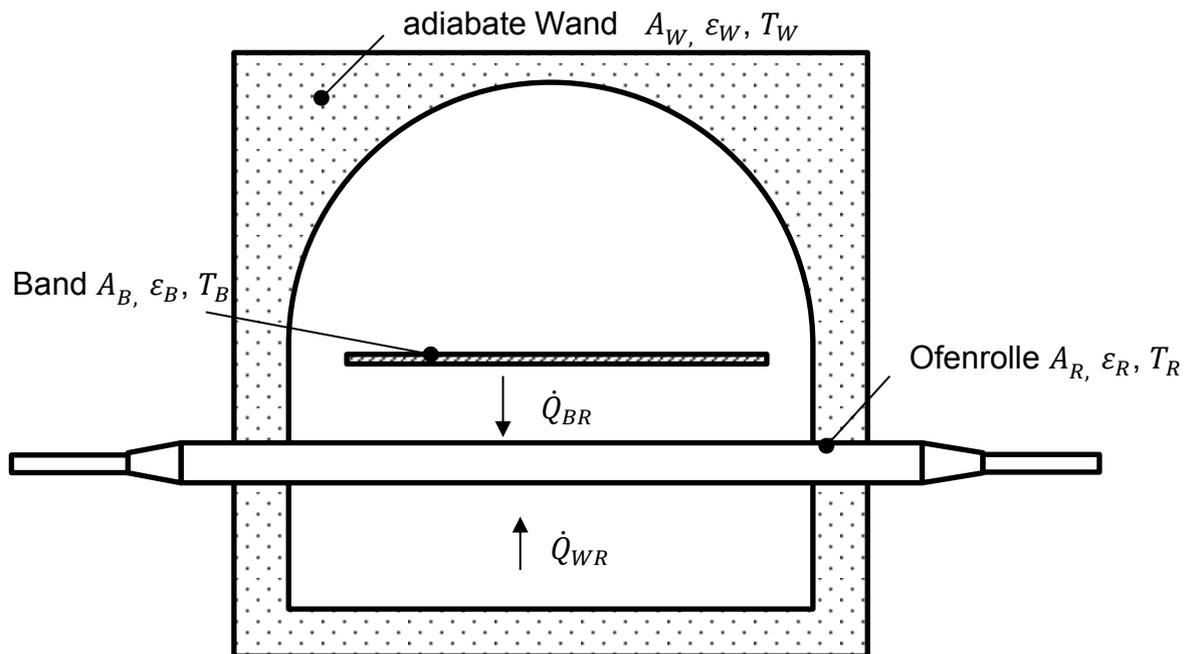


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung Wärmeströme an die Ofenrolle im Vorwärmofen

Das Band schirmt hierbei die Ofenrolle zum Teil von der Strahlung des Ofenraums ab. Weiterhin sind auch die Schichtdicken der Gasräume, speziell zwischen Rollenunterseite und Boden sowie zwischen Ofenrolle und Decke verglichen mit anderen Rollenöfen klein, vgl. Abbildung 1-5. Durch das auf den Ofenrollen transportierte Band ist die Schichtdicke des Gasraums zwischen Band und Ofenrolle nahezu Null. Aus diesen Gründen wird näherungsweise der Wärmestrom zwischen den Flächen von Ofenwand, Band und Ofenrolle betrachtet. Unter Vernachlässigung wechselseitiger Reflexion sowie der Absorption und Emission durch das Gas, ergeben sich die beiden Wärmeströme \dot{Q}_{BR} und \dot{Q}_{WR} wie folgt:

$$\dot{Q}_{BR} = \varphi_{BR} \cdot \varepsilon_B \cdot \varepsilon_R \cdot \sigma \cdot (T_B^4 - T_R^4) \cdot A_B \quad \mathbf{2-1}$$

$$\dot{Q}_{WR} = \varphi_{WR} \cdot \varepsilon_W \cdot \varepsilon_R \cdot \sigma \cdot (T_W^4 - T_R^4) \cdot A_W. \quad \mathbf{2-2}$$

Da die Ofenraum- und damit auch die Ofenwandtemperatur deutlich höher sind als die des Bandes, ist der Wärmestrom durch die Ofenrolle an das Kühlwasser weitgehend abhängig von \dot{Q}_{WR} .

Zur Berechnung der Wärmeströme ist zum einen die Kenntnis bzw. Abschätzung der Emissionsgrade der Oberflächen und zum anderen die Beschaffung der

Einstrahlzahlen notwendig. Angaben zu Emissionsgraden technischer Oberflächen finden sich in der Literatur (Siegel & Howell, 2001), (Specht, 2014). Eines der Hauptprobleme bei der Berechnung des Strahlungsaustauschs ist allerdings die Herleitung der Einstrahlzahlen φ . **Abbildung 2-6** zeigt schematisch die im betrachteten Fall vorkommenden Einstrahlzahlen.

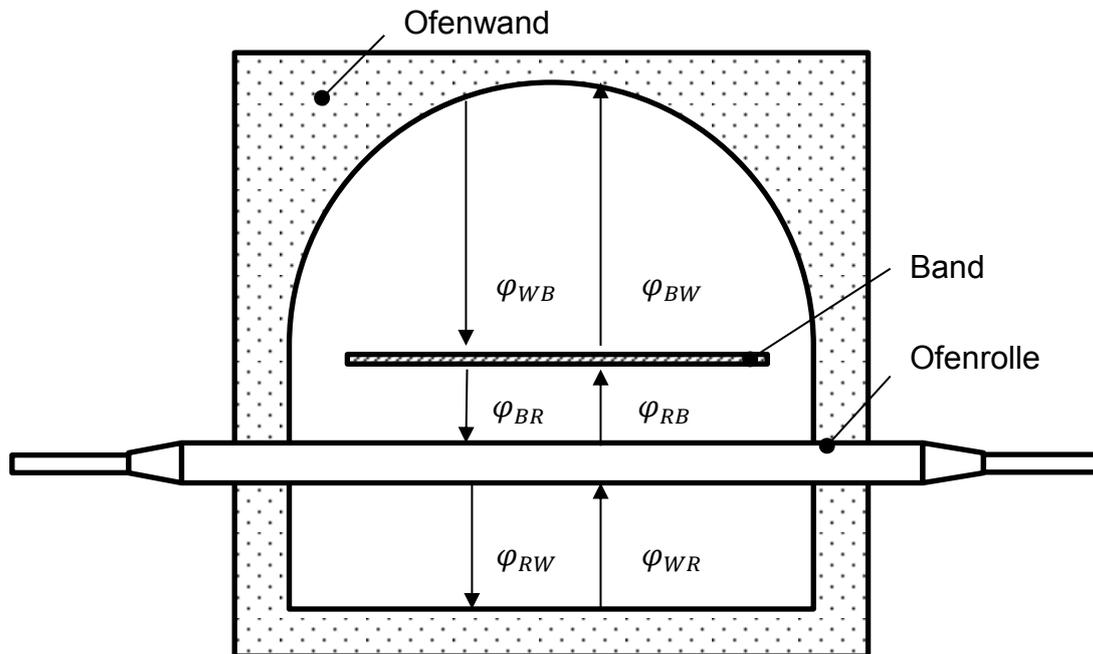


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Einstrahlzahlen im Vorwärmofen

Wäre kein Band im Ofen, gilt $\varphi_{RW, \text{ohne Band}} = 1$ und $\varphi_{WR} = \frac{A_R}{A_W} \varphi_{RW}$. Dieser Wert für φ_{RW} kann näherungsweise für den Bereich der Ofenrolle eingesetzt werden, der nicht durch das Band abgeschirmt wird. Zur Bestimmung der Einstrahlzahl für den vom Band abgeschirmten Teil der Ofenrolle kann hier die Einstrahlzahl zwischen Zylinder und paralleler, sehr langer Platte angenommen werden, vgl. **Abbildung 2-7** ($\varphi_{RB} = \varphi_{12}$).

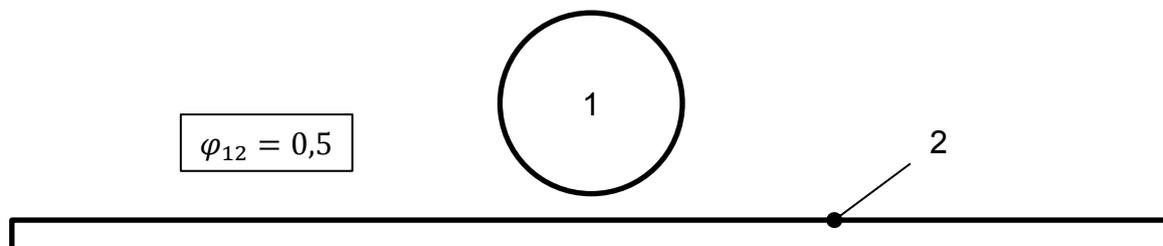


Abbildung 2-7: Einstrahlzahl zwischen langem Zylinder und sehr breiter Platte (Marek & Nitsche, 2015)

Aus der Summenbeziehung für die Einstrahlzahlen folgt:

$$\varphi_{RW, \text{unter Band}} = 1 - \varphi_{RB} = 0,5 \quad 2-3$$

Als Näherungslösung für die Einstrahlzahl zwischen Ofenrolle und Ofenwand (**Abbildung 2-8**) kann nun folgende Gleichung aufgestellt werden:

$$\varphi_{RW} = \frac{b_B \cdot \varphi_{RW, \text{unter Band}} + (b_O - b_B) \cdot \varphi_{RW, \text{ohne Band}}}{b_O} \quad 2-4$$

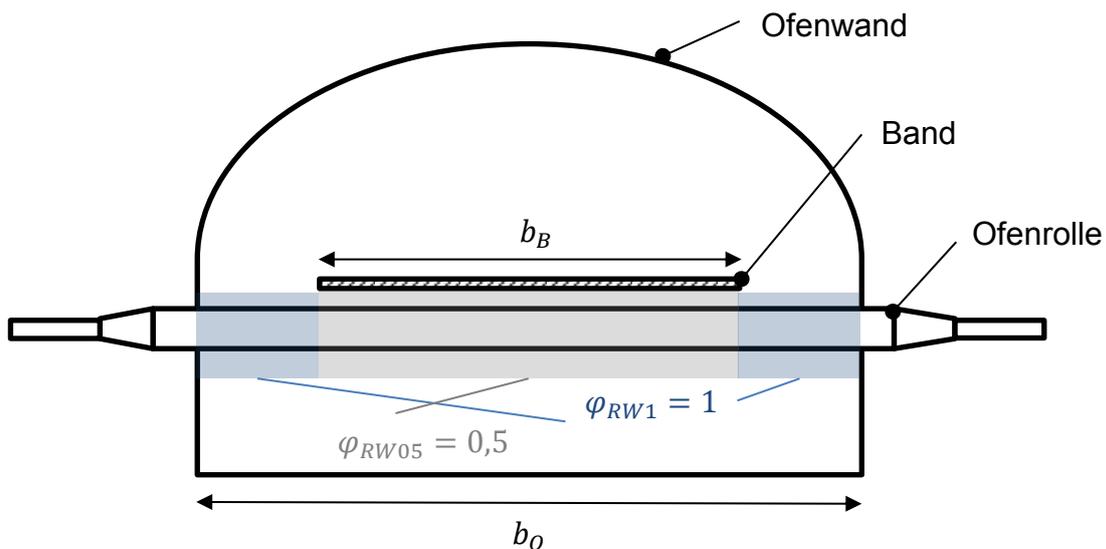


Abbildung 2-8: Darstellung der Parameter für eine Näherungslösung der Einstrahlzahl zwischen Ofenrolle und Ofenwand

Es ergibt sich der in **Abbildung 2-9** dargestellte Zusammenhang zwischen der Einstrahlzahl von Ofenwand auf Ofenrolle und der Bandbreite.

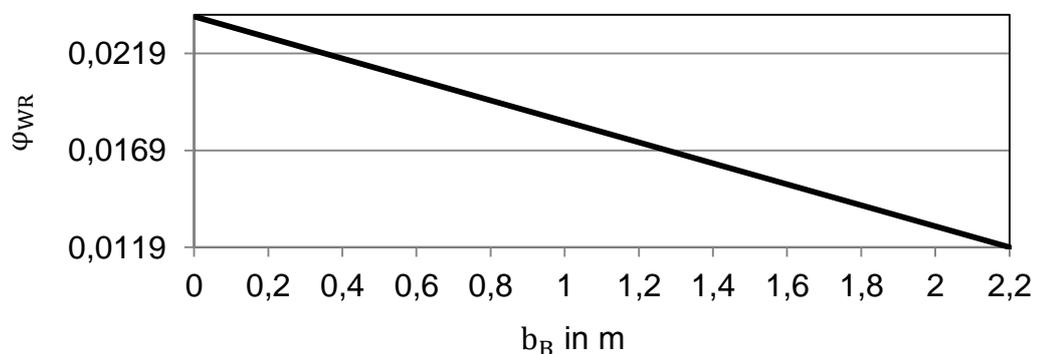


Abbildung 2-9: Einstrahlzahl zwischen Ofenwänden und Rolle über der Bandbreite (Randbedingungen: $A_W = 42\text{m}^2$, $A_R = 1\text{m}^2$)

Hierbei wird angenommen, dass der Teil der Rolle, der nicht durch das Band abgeschirmt wird, voll mit der Ofenwand im Strahlungsaustausch steht. Es zeigt sich, dass die Einstrahlzahl zwischen Ofenwand und Ofenrolle mit steigender Bandbreite sinkt. Wird kein Band durch den Ofen transportiert steigt die Einstrahlzahl auf einen theoretischen Maximalwert von $\frac{A_R}{A_W}$, dem Flächenverhältnis zwischen Ofenrolle und Ofenwand. **Abbildung 2-10** zeigt inwiefern sich die Rollenteilung auf die Einstrahlzahl φ_{WR} auswirkt. Mit steigender Rollenteilung sinkt das Flächenverhältnis zwischen Ofenrollen und Ofenwand weiter, wodurch deren Einstrahlzahl entsprechend sinkt.

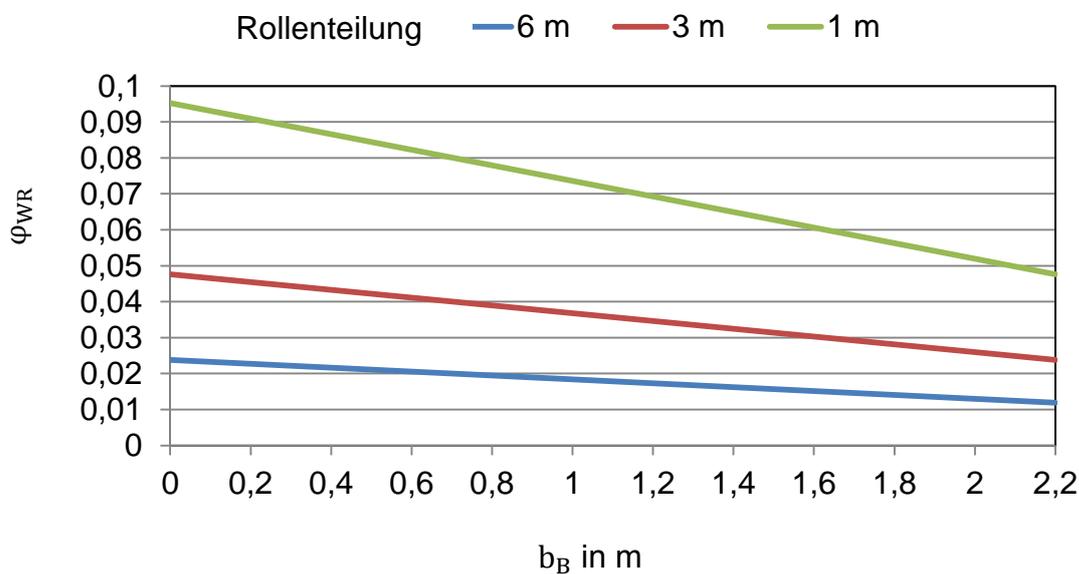


Abbildung 2-10: Einstrahlzahl zwischen Ofenwänden und Rolle über der Bandbreite bei verschiedenen Rollenteilungen

Es kann hieraus hergeleitet werden, dass eine steigende Bandbreite und Rollenteilung den dominierenden Wärmestrom von Ofenwand an die Ofenrolle und damit die Kühlverlustleistung verringern. Allerdings stellen diese Parameter betriebliche Randbedingungen dar, die nicht ohne weiteres veränderbar sind. Die Bandbreite ist auftragsabhängig und kann somit nicht definiert verändert werden. Für eine größere Rollenteilung müsste der Einfluss auf den Banddurchlauf näher betrachtet werden und es wäre große Umbaumaßnahmen verbunden mit hohen Investitionskosten notwendig.

Betrachtet man Gleichung 2-2 näher, stellt man fest, dass hierin nur 2 Parameter direkt durch ein neues Ofenrollenkonzept bei gleichbleibenden Abmaßen der Konstruktion veränderbar sind. Dies ist zum einen die Oberflächentemperatur der Ofenrolle T_R und zum anderen der Emissionsgrad der Ofenrolle ε_R . Für Ofenrollen aus legiertem temperaturfestem Stahl finden sich in der Literatur Werte zwischen 0,05 (poliert) und 0,95 (rau/stark oxidiert) (Verein Deutscher Ingenieure, 2002). Aufgrund der rauen und oxidierten Rollenoberfläche der aktuellen Ofenrollen (siehe Abbildung 1-3) im betrachteten Ofen, kann man hier von hohen Werten zwischen 0,8 und 0,95 ausgehen. Für fest zugestellte Ofenwände (Ziegel, Feuerfestbeton) werden Werte von 0,8 bis 0,9 angegeben. **Abbildung 2-11** zeigt den Zusammenhang zwischen Ofenrollenoberflächentemperatur und –emissionsgrad. Der Emissionsgrad der Ofenwände und Ofenrolle beträgt in der Darstellung 0,85 und 0,9 und die Ofenwandtemperatur 1320 °C. Die Betrachtung erfolgt hier ohne Band, also mit

$$\varphi_{WR} = \frac{A_R}{A_W}$$

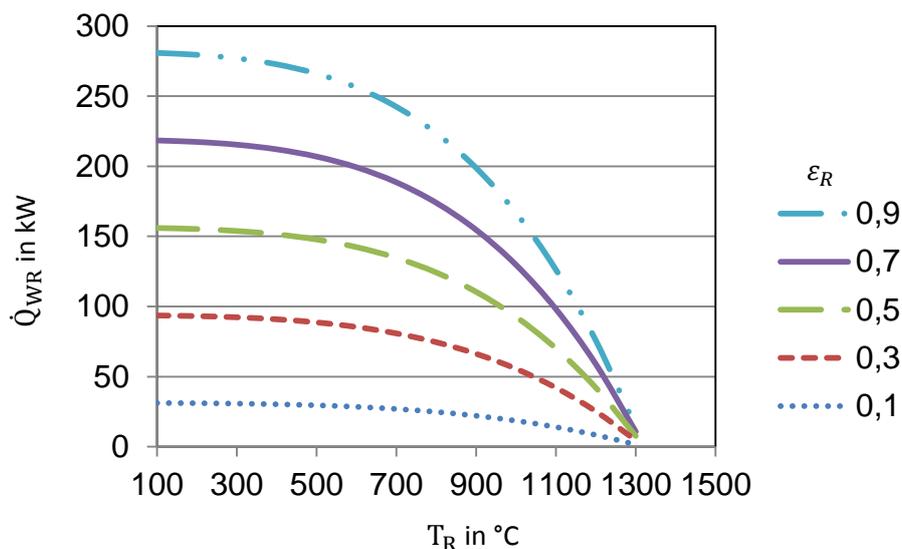


Abbildung 2-11: Berechneter Wärmeeintrag \dot{Q}_{WR} in die Ofenrolle über der Oberflächentemperatur bei verschiedenen Ofenrollenemissionsgraden

Man kann aus Abbildung 2-11 herleiten, dass der Ofenrollenemissionsgrad den größten Einfluss auf den Strahlungswärmestrom \dot{Q}_{WR} ausübt. Durch eine beispielhafte Senkung des Ofenrollenemissionsgrads von 0,9 auf 0,1 ergibt sich ein

um nahezu 90% geringerer Wärmestrom. Der Einfluss der Oberflächentemperatur der Ofenrolle macht sich erst ab Temperaturen oberhalb von 600°C bemerkbar. Je näher die Oberflächentemperatur sich der Ofenraumtemperatur bzw. Ofenwandtemperatur annähert, desto geringer wird der Wärmestrom in die Ofenrolle. Allerdings wird hier erst oberhalb von 1.000 °C Oberflächentemperatur der Wärmestrom um mehr als 40% verringert. **Abbildung 2-12** zeigt den Strahlungswärmestrom \dot{Q}_{WR} bei $\varepsilon_R = 0,9$ und verschiedenen Bandbreiten. Der Einfluss des Bandes auf den Strahlungswärmestrom ist mit diesen Randbedingungen im Bereich von 20 – 50 %, wobei Reflexion des Bandes in der Realität diesen Einfluss vermindern wird.

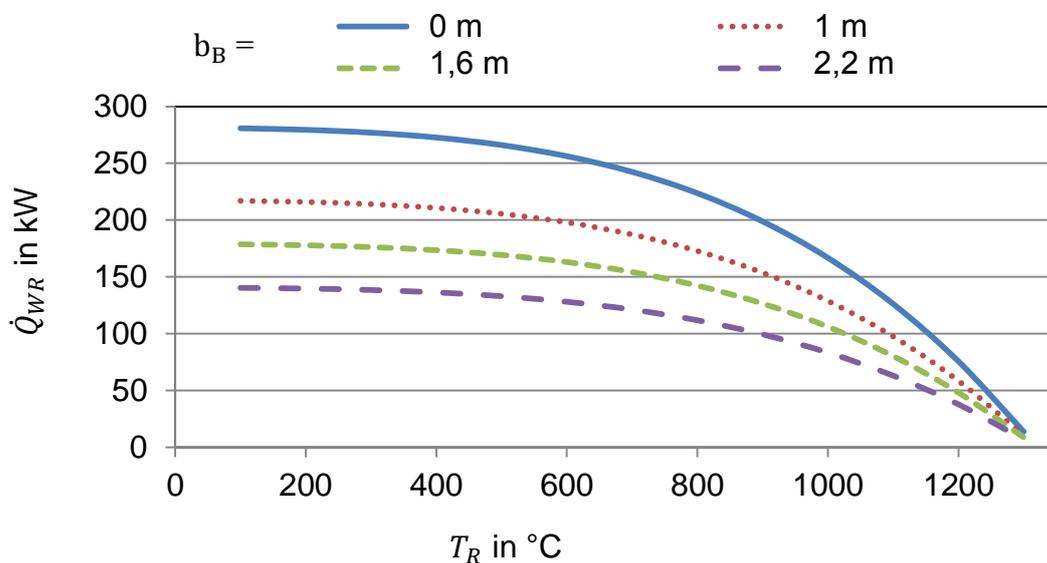


Abbildung 2-12: Berechneter Wärmeeintrag \dot{Q}_{WR} in die Ofenrolle über der Oberflächentemperatur bei verschiedenen Bandbreiten und $\varepsilon_R=0,9$

Zur Vervollständigung wird in **Abbildung 2-13** der Wärmestrom \dot{Q}_{BR} vom Band an die Ofenrolle analog zu Abbildung 2-11 dargestellt. Die Bandtemperatur beträgt in der Darstellung 830 °C, was die maximal mögliche Bandtemperatur im betrachteten Vorwärmofen darstellt. Für gewalztes, blankes Stahlband finden sich Werte für den Emissionsgrad zwischen 0,1 und 0,65.

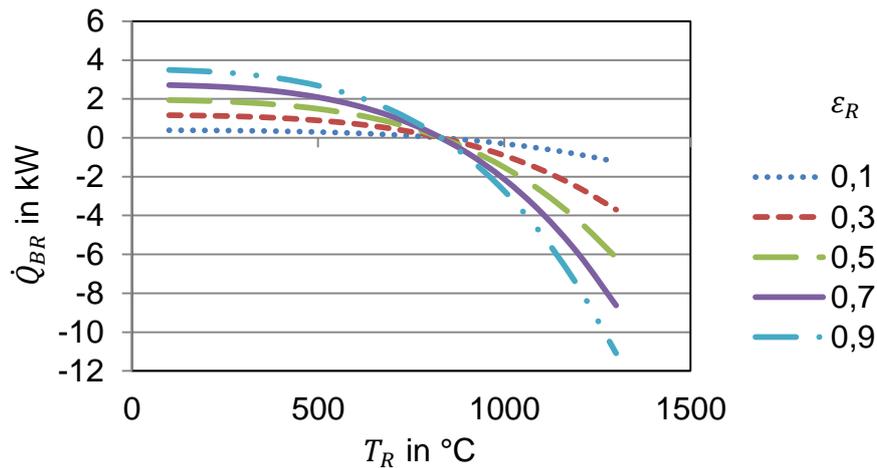


Abbildung 2-13: Berechneter Wärmeeintrag \dot{Q}_{BR} in die Ofenrolle über der Oberflächentemperatur bei verschiedenen Ofenrollenemissionsgraden

In der gezeigten Abbildung wurde ein Wert von 0,45 verwendet. Die Darstellung macht deutlich, dass der Wärmestrom vom Band an die Ofenrolle mit 1-5 kW nur geringfügig zum Wärmeeintrag in die Ofenrolle beiträgt. Ab einer Ofenrollenoberflächentemperatur, die höher ist als die des Bandes, kommt es zu einem entgegengesetzten Wärmestrom von Ofenrolle an das Band. Zur spezifischen Beschreibung des Wärmeeintrags durch Strahlung an die Ofenrolle kann man den Strahlungswärmeübertragungskoeffizient verwenden

$$\alpha_{\epsilon,R} = \frac{\dot{Q}_{WR}}{A_R(T_W - T_R)} + \frac{\dot{Q}_{BR}}{A_R(T_B - T_R)} \quad 2-5$$

Konvektion

Zusätzlich zum dominierenden Strahlungswärmestrom kommt es zu einem konvektiven Wärmestrom vom Heizgas an die Rolle. Die Rolle stellt einen querüberströmten, rotierenden Zylinder dar. Die Rotation führt auf der Seite, an der die Rotation des Zylinders und Strömungsrichtung in die gleiche Richtung zeigen, zu einer erhöhten und auf der anderen Seite zu einer verringerten Strömungsgeschwindigkeit (Böswirth & Bschorer, 2014). Es kommt daher zu einer ungleichen Wärmeübertragung zwischen Unter- und Oberseite der Rolle. Diese wird aber an dieser Stelle, aufgrund der untergeordneten Bedeutung der Konvektion für

die Wärmeübertragung an die Ofenrolle vernachlässigt. Vereinfacht kann der konvektive Wärmestrom vom Heizgas an die Ofenrolle wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{GR} = \alpha_{GR} \cdot (T_{G,m} - T_{R,m}) \cdot A_R \quad \mathbf{2-6}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von Nusselt-Zahl, Wärmeleitfähigkeit des Gases und der charakteristischen Länge

$$\alpha_{GR} = \frac{Nu \cdot \lambda_G}{L} \quad \mathbf{2-7}$$

Für den hier vorliegenden Fall eines quer überströmten Zylinders ist die charakteristische Länge L der Durchmesser. Über die Definition der Reynolds-, Prandtl- und Nusselt-Zahl lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient α_{GR} herleiten, siehe nachfolgende Gleichungen (Verein Deutscher Ingenieure, 2002).

$$Re = \frac{v_G \cdot L}{\nu} \quad \mathbf{2-8}$$

$$Pr = \frac{v \cdot c_p \cdot \rho}{\lambda} \quad \mathbf{2-9}$$

$$Nu_{Zylinder,quer} = 0,35 + 0,48 \cdot \sqrt{Re} \cdot Pr^{0,33} + 0,0012 \cdot Re \cdot Pr^{0,67} \quad \mathbf{2-10}$$

Für eine angenommen mittlere Rollentemperatur von 300 °C, eine Ofenraumtemperatur bzw. Gastemperatur von 1320 °C und eine mittlere Gasgeschwindigkeit von 3 m/s, ergibt sich ein konvektiver Wärmestrom von ca. 30kW bei einem Wärmeübergangskoeffizient von etwa 30 kW/m². Diese kurz erläuterte Beispielrechnung zeigt, dass die Konvektion einen ungefähren Anteil von 10% an der Wärmeübertragung an die Ofenrolle hat.

Der gesamte Wärmeeintrag in die Ofenrolle kann zusammenfassend als Summe der Einzelwärmeströme beschrieben werden.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{WR} + \dot{Q}_{BR} + \dot{Q}_{GR} \quad \mathbf{2-11}$$

2.3.2 Wärmeübertragung zwischen Ofenrolle und Gut

Die Wärmeübertragung in Rollenöfen, der Einfluss der Ofenrollen und speziell die Wärmeübertragung zwischen Ofenrolle und Gut wurde in (Specht & Holzapfel, 1999), (Sokolova & Pötke, 1999), (Holzapfel, 2000), (Specht & Holzapfel, 2002), (Specht &

Chmielowski, 2003), (Chmielowski, 2005) untersucht. Die genannten Autoren entwickelten mathematische Verfahren, mit dessen Hilfe die Erwärmung der Unterseite eines auf Rollen laufenden Gutes berechnet werden kann. Mit diesen Verfahren ist es möglich der Erwärmungsverlauf des Gutes in Abhängigkeit von Parametern wie Rollendurchmesser und Gutgeschwindigkeit zu ermitteln. E. Specht (Specht & Chmielowski, 2003), (Specht & Holzapfel, 1999) stellt fest, dass die Wärme im Kontaktbereich von Gut und Ofenrolle im Wesentlichen durch Wärmeleitung in der die Feststoffe trennenden Gasschicht übertragen wird. Weitere denkbare Mechanismen wären die Übertragung durch direkten Festkörperkontakt oder durch die Festkörperstrahlung. Dabei liegen für Luft in dem Gasspalt zwischen Gut und Rolle die maximalen Wärmeübergangskoeffizienten bei 25000 W/(m² K). Die Dicke des Gasspalts bei einer Erdgasverbrennung kann beträgt laut K.-U. Holzapfel im Mittel 1 µm. Die Breite des Gasspalts kann nach E. Specht mit Hilfe der Gleichung 2-12.

$$\frac{x_{\text{con}}}{D_R} = \sqrt{\frac{\lambda_G}{\alpha_{\varepsilon,R} \cdot D_R}} \quad \text{2-12}$$

ermittelt werden. K. U. Holzapfel folgerte für ungekühlte Rollen, dass mehrere Rollen mit kleinem Durchmesser mehr Wärme übertragen als wenige mit größerem Durchmesser. Weiterhin entwickelte Chmielowski ein Modell zur Beschreibung des indirekten Wärmeaustauschs in einem Ofen mit Strahlrohren. In den Arbeiten wurden ungekühlte Rollen aus Stahl, SiC und Mullit untersucht. Es wurde nur ein sehr enger Abstand zwischen den einzelnen Rollen betrachtet. Dadurch haben die Rollen einen größeren Einfluss auf die Nutzguterwärmung als bspw. in Vorwärmöfen von Feuerverzinkungsanlagen, wo die Rollenabstände wesentlich größer sind. Dennoch sind die Ergebnisse von Interesse auch für Vorwärmöfen von Feuerverzinkungsanlagen. Mit ungekühlten Ofenrollen wird eine bessere Nutzguterwärmung erreicht als ohne, da ein höherer Wärmeübergang an der Kontaktstelle auftritt. Bei gekühlten Rollen, bei denen somit die Temperatur der Rollen unterhalb der Bandtemperatur liegt, ist der Einfluss auf das Nutzgut entsprechend negativ. Das Rollenmaterial SiC führt zur besten Erwärmung des Nutzgutes, Edelstahl ist etwas schlechter, Mullit am schlechtesten. Der Grund dafür ist die gute Wärmeleitfähigkeit von SiC, wodurch der Wärmetransport an die Kontaktstelle sehr hoch ist. Bei Mullit ist dieser am schlechtesten, es tritt eine große

Temperaturdifferenz über der Rolle auf. Mit steigender Transportgeschwindigkeit bildet sich eine Temperaturdifferenz zwischen inneren und äußeren Bereichen der Rolle aus. Nur die äußere Schicht nimmt dann am Wärmeaustausch mit dem Nutzgut teil. Bei Mullit tritt dies schon bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten auf, bei SiC erst bei hohen. Bei sehr hohen Geschwindigkeiten (ab ca. 40 mm/s) praktisch kein Unterschied mehr zwischen den Rollenmaterialien (Sokolova & Pötke, 1999). In den zitierten Arbeiten wurden Transportgeschwindigkeiten von 0,03 bis 0,13 m/s und Rollenteilungen von 0,03 bis 0,15 m untersucht. In dem in dieser Arbeit betrachteten Vorwärmofen einer Feuerverzinkungsanlage wird das Band mit bis zu 3 m/s transportiert und die Rollenteilung beträgt 6 m. Aufgrund der vergleichsweise sehr hohen Transportgeschwindigkeit und der relativ großen Rollenteilung wird der Einfluss auf die Nutzguterwärmung durch Kontaktwärmeübertragung vernachlässigt.

2.3.3 Wärmeübertragung und Temperaturverlauf in der Ofenrolle

Die Wärmeübertragung durch die Ofenrolle an das Kühlwasser wird schematisch in **Abbildung 2-14** dargestellt.

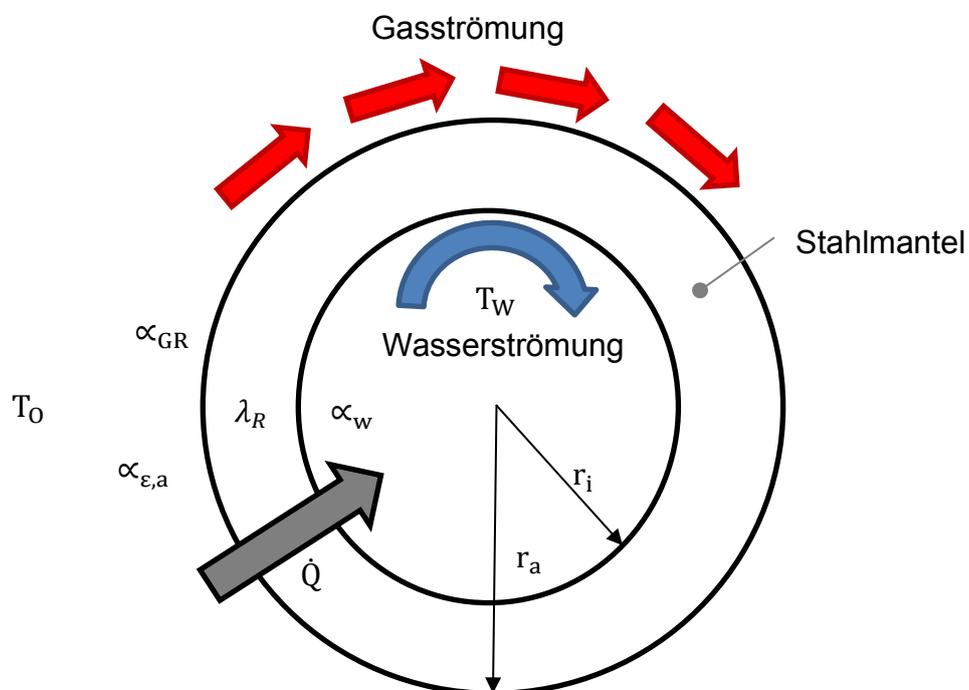


Abbildung 2-14: Schematische Darstellung der Wärmeübertragung durch die Ofenrolle an das Kühlwasser

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben wird diese an die äußere Rollenoberfläche überwiegend durch Strahlung und zu einem geringen Teil konvektiv übertragen. Im sogenannten Rollenmantel wird die Wärme durch Leitung und an der Rolleninenseite konvektiv an das Kühlwasser übertragen. Der Wärmestrom durch die Ofenrolle kann wie folgt beschrieben werden

$$\dot{Q} = k \cdot A_R \cdot (T_O - T_W) . \quad \mathbf{2-13}$$

Im Fall der Ofenrolle handelt es sich um einen Hohlzylinder, wofür sich der Wärmedurchgangskoeffizient k wie folgt berechnet:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{r_i \cdot \alpha_w} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{r_a \cdot (\alpha_{GR} + \alpha_{\epsilon,a})}} \cdot \frac{1}{r} \quad \mathbf{2-14}$$

Als Radius r ist der Innen- oder Außenradius einzusetzen, je nachdem ob die Innen- oder Außenfläche zur Berechnung verwendet wird. Als einfache Näherung kann der mittlere Wert des Wärmeleitkoeffizienten zur Berechnung verwendet werden.

Wärmeübergangskoeffizient an das Kühlwasser

Das Kühlwasser in der Ofenrolle strömt innerhalb eines Ringspalts am Rollenmantel entlang. Es nimmt die vom Ofen an die Ofenrolle übertragende Wärme auf und führt diese in nachgelagerte Kühlbecken ab. Bereits in Abbildung 2-3 wurde die Strömung des Kühlwassers innerhalb der Ofenrolle dargestellt. Unter Vernachlässigung der Rotation handelt es sich hierbei näherungsweise um eine Wärmeübertragung im konzentrischen Ringspalt. **Abbildung 2-15** zeigt schematisch einen Schnitt durch eine Ofenrolle inklusive der den Ringspalt definierenden Durchmesser.

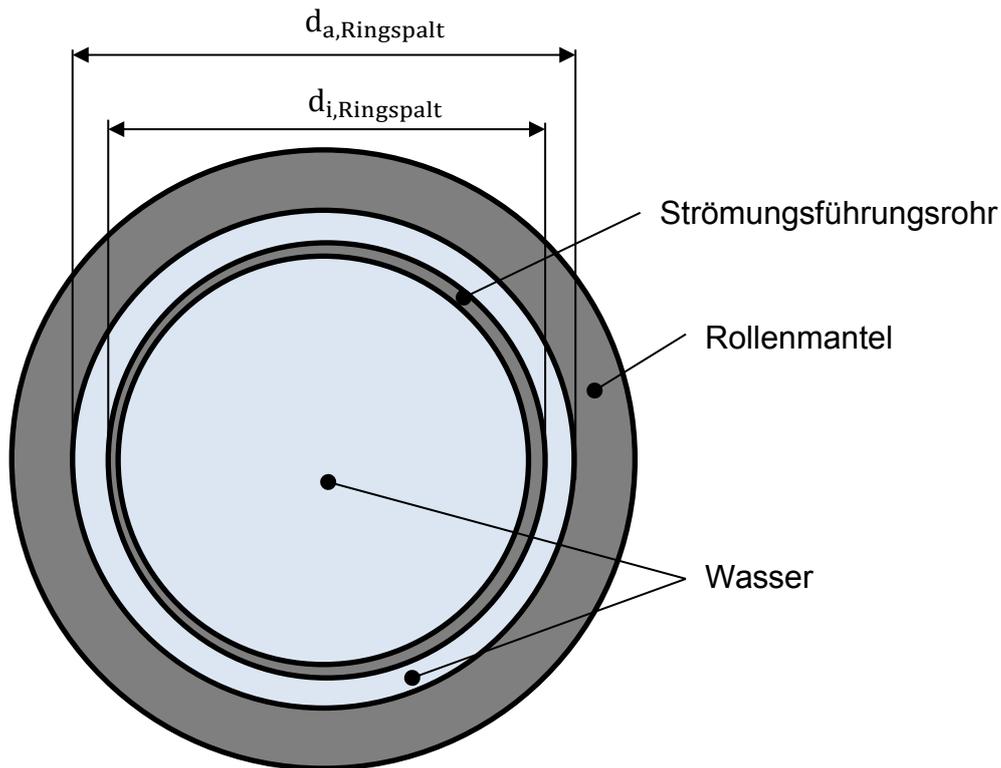


Abbildung 2-15: Schematische Schnittdarstellung einer Ofenrolle

Die kennzeichnende charakteristische Länge bei Ringspalten ist der hydraulische Durchmesser

$$d_h = d_{a,Ringspalt} - d_{i,Ringspalt} \cdot$$

2-15

Die allgemeinen dimensionslosen Kenngrößen sind wie folgt definiert:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda} \quad \text{und} \quad Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu}$$

Die Stoffwerte können aufgrund der geringen Temperaturdifferenz im Wasser auf mittlere Werte bezogen werden. Im vorliegenden Fall kommt es zur Wärmeübertragung am Außenrohr (am Außendurchmesser des Ringspalt). In diesem Fall handelt es sich um die Randbedingung 2 (Verein Deutscher Ingenieure, 2002, S. Gb2). Bei turbulenten Strömungsverhältnisse wird die Nusselt-Zahl für Ringspalte über eine modifizierte Form, der für die turbulente Rohrströmung gültigen Gleichungen wiedergegeben (Verein Deutscher Ingenieure, 2002, S. Gb3). Die Nusselt-Zahl für die Wärmeübertragung vom Ofenrollenmantel an das im Ringspalt strömende Wasser kann somit wie folgt berechnet werden:

$$\frac{Nu}{Nu_{Rohr}} = f\left(\frac{d_i}{d_a}\right) = 1 - 0,14 \left(\frac{d_a}{d_i}\right)^{0,6} \quad 2-16$$

Für Nu_{Rohr} gilt nach (Verein Deutscher Ingenieure, 2002, S. Ga):

$$Nu_{Rohr} = \frac{\frac{(1,8 \log_{10} Re - 1,5)^{-2}}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{(1,8 \log_{10} Re - 1,5)^{-2}}{8}} (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \cdot \left(1 + \left(\frac{d_h}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad 2-17$$

Hiermit kann schließlich die Nusselt-Zahl am Außendurchmesser und nachfolgend der Wärmeübergangskoeffizient α_w aus Abbildung 2-14 berechnet werden.

$$\alpha_w = \frac{Nu}{d_h} \cdot \lambda_w \quad 2-18$$

Tabelle 2-1 zeigt exemplarisch berechnete Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten im Inneren der Ofenrollen (Außendurchmesser des Ringspalts).

Tabelle 2-1: Berechneter minimaler Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Wasserdurchfluss (Annahme: Wassertemperatur 26°C, Temperatur Innenfläche Rolle 60°C, hydraulischer Durchmesser des Ringspalts 11 mm)

| Volumenstrom Kühlwasser in m³/h | α_w in W/(m² K) |
|------------------------------------|------------------------|
| 10 | 5.800 |
| 20 | 10.900 |
| 30 | 15.600 |

Temperaturverlauf in der Ofenrolle

Der Temperaturverlauf der Ofenrolle kann analog zu dem eines Hohlzylinders unter Verwendung temperaturgemittelter Stoffwerte wie folgt berechnet werden:

$$\frac{T - T_i}{T_R - T_i} = \frac{\ln \frac{r_R}{r_{i,R}}}{\ln \frac{r_a,R}{r_{i,R}}} \quad 2-19$$

$$T_i = \frac{\dot{Q}}{\alpha_w \cdot A_i} + T_W \quad 2-20$$

$$T_R = \frac{\dot{Q} \cdot \ln \frac{r_{a,R}}{r_{i,R}}}{\lambda_R \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_R} + T_i .$$

2-21

Eine beispielhafte Berechnung für die in dieser Arbeit betrachtete Ofenrolle wird in **Abbildung 2-16** gezeigt (lineare Darstellung). Abhängig vom Wärmestrom durch die Ofenrolle ergibt sich das Temperaturgefälle zwischen Innen- und Außenseite der Rolle. Da diese innen wassergekühlt ist (großes α_w), ändert sich die Innenwandtemperatur mit steigendem Wärmestrom kaum, wohingegen der Einfluss auf die Außenwandtemperatur hoch ist. Die in der Berechnung verwendete gemittelte Wärmeleitfähigkeit wurde für eine Ofenrolle aus 1.4857 iterativ bestimmt und liegt bei 14,5 W/(m K). An der Rolleninnenseite wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von 15.000 W/(m²K) verwendet.

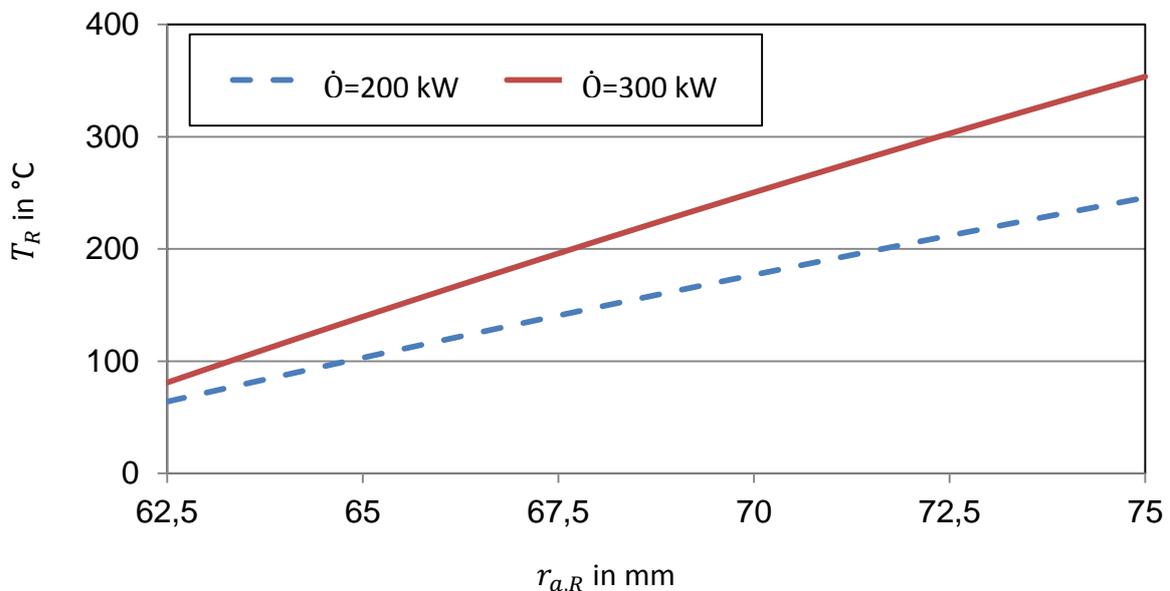


Abbildung 2-16: Berechneter Temperaturverlauf in der Ofenrolle

Die Verwendung einer temperaturgemittelten Wärmeleitfähigkeit verfälscht das Temperaturgefälle. Im realen Fall nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit der Temperatur im Stahl zu. Da das Temperaturgefälle vom Reziprokwert der Wärmeleitfähigkeit abhängig ist, nimmt der das Temperaturgefälle zur kalten Seite hin zu ($\Delta T \sim \frac{1}{\lambda}$). Zur Veranschaulichung zeigt **Abbildung 2-17** den berechneten linearen und den realen Temperaturverlauf schematisch. Wärmetechnisch ist der Unterschied zwischen realem und linearen Temperaturverlauf von untergeordneter Bedeutung. Auf die

entstehenden Wärmespannungen übt dies allerdings einen großen Einfluss aus. Dies wird in folgenden Kapiteln näher beschrieben.

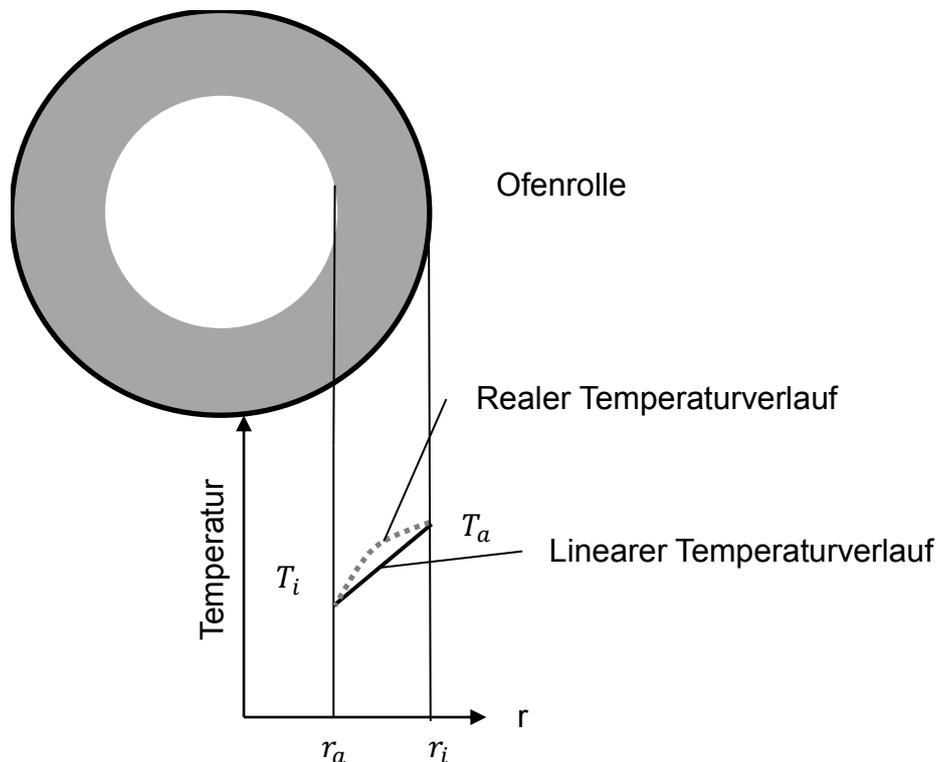


Abbildung 2-17: Linearer und realer Temperaturverlauf in der Ofenrolle

2.4 Thermo-mechanische Beanspruchung von Ofenrollen

Bei den Ofenrollen kommt zu einer Überlagerung von mechanischer und thermischer Belastung. Thermisch bei Anfahr- und Abschaltvorgängen (Aufheizen und Abkühlen) sowie durch den Temperaturgradient innerhalb der Rolle und mechanisch durch das Eigengewicht, die Rotation, und das Bandgewicht. Zusätzlich belastet die Hochtemperaturkorrosion die Rollen.

2.4.1 Mechanische Belastung

Die Ofenrollen sind durch ein Fest- und Loslager gelagert. Letzteres nimmt die axialen Bewegungen durch Wärmedehnung auf. Die Gewichtsbelastung und Flächenpressung variieren mit der Bandbreite. Je breiter das Band, desto höher ist

hier prinzipiell die Gewichtsbelastung und lokale Flächenpressung. Das Eigengewicht der Rolle, des Wassers und des Bandes führen zu einer Biegebeanspruchung, d.h. axialen Zug- und Druckspannungen, die aufgrund der Rotation ständig wechseln, **Abbildung 2-18**.

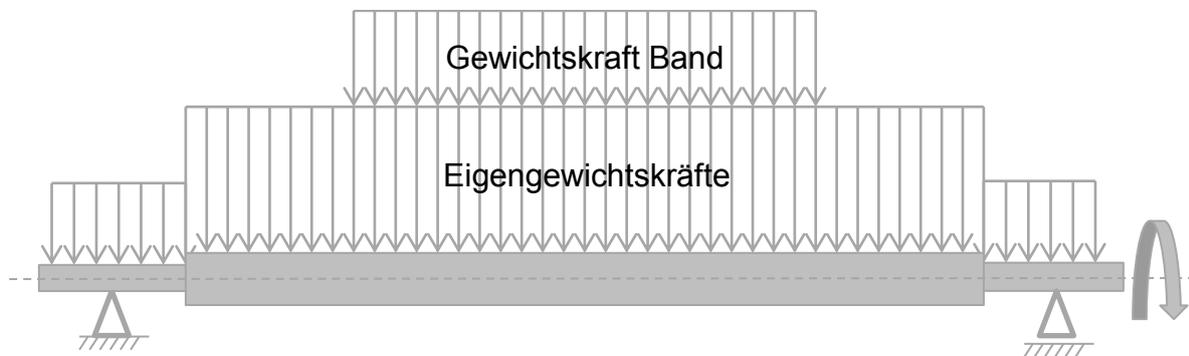


Abbildung 2-18: Schematische Darstellung der mechanischen Belastung der Ofenrollen

Die Rollen werden ständig gedreht, da sich Stillstände bei hoher Temperatur tendenziell negativ auf die Lebensdauer der Rollen auswirkt (Steinkusch, 1987). Die Biegenbeanspruchung variiert demnach zwischen Leerlauf und verschiedenen Bandbelastungen. Speziell im betrachteten Vorwärmofen kommt es zu häufigen Bandwechseln und Einfädelvorgängen, wodurch ständig anderen Beanspruchungen auf die Ofenrollen einwirken. Anders als bei Blechen und stangenförmigen Gut, ist auch die Drehzahl bei der Banderwärmung und –wärmebehandlung deutlich höher. Die Drehfrequenz liegt im betrachteten Vorwärmofen bei bis zu 6,4 Hz, wohingegen Ofenrollen zur Beförderung von Blechen, Brammen und Stangen mit ca. 0,005 – 0,05 Hz laufen. Daher ist auch Lebensdauer der aktuell aus hitzebeständigem, hochlegiertem Stahl gefertigten Rollen mit 1- 2 Jahren deutlich geringer als in anderen Rollenöfen, wo teilweise ungekühlte Rollen 5 bis 7 Jahre lang in Betrieb sind (Neubert, 2014). In einem abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurden im betrachteten Ofen auch der Einsatz vollkeramischer Ofenrollen untersucht und getestet (Gosemann, et al., 2011). Aufgrund der mangelnden Duktilität wurden diese allerdings durch die auftretenden Schlagbelastungen durch das Band vollständig zerstört. Gekühlte Stahl-Rollen werden standardmäßig anhand der 1%-10.000h-Zeitdehngrenze ausgelegt. Diese gibt die Belastung an, bei der sich die Rolle nach

10.000h um 1% dehnt. **Abbildung 2-19** zeigt den temperaturabhängigen Verlauf dieser Zeit-Dehngrenze für 5 hitzebeständige Stahl- und Gusslegierungen, die bereits bei Ofenrollen und ähnlich belasteten Bauteilen eingesetzt werden. Hierunter befindet sich auch der bereits erwähnte Nicrofer 6025 HT mit der Werkstoffnummer 2.4633 und der ebenfalls bei Ofenrollen verwendete 2.4879. Alle Werte wurden an Luft ermittelt.

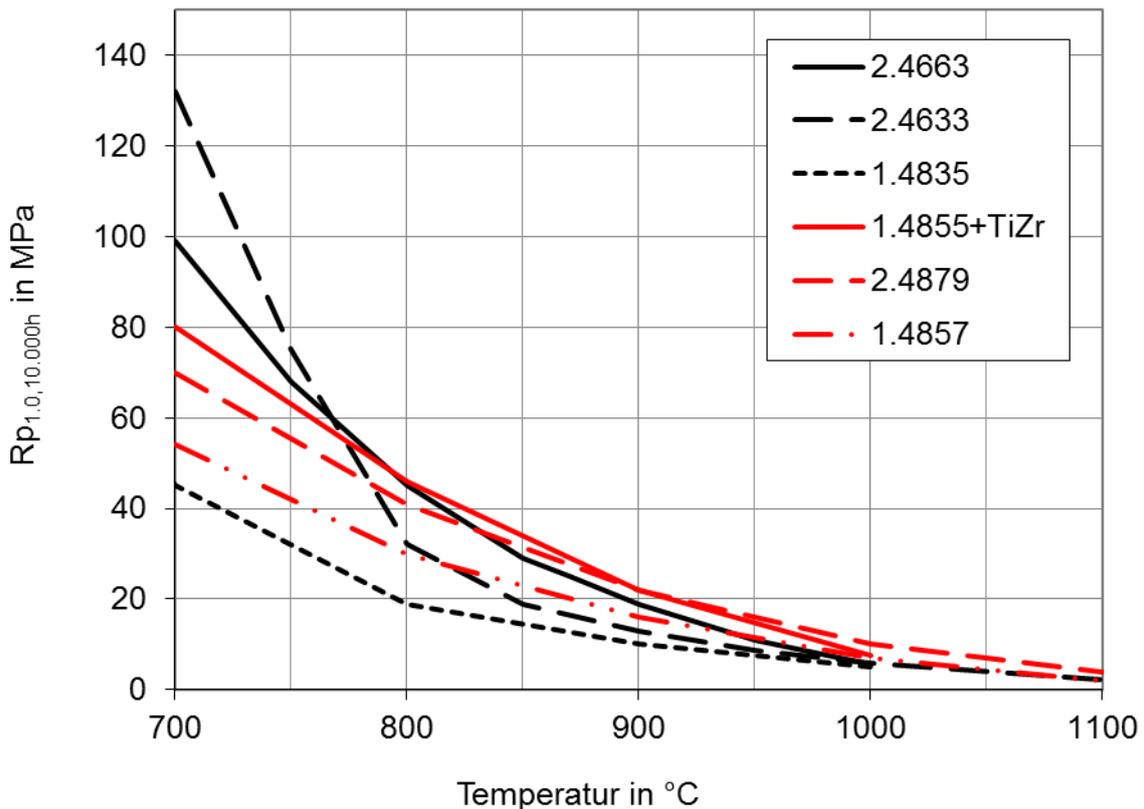


Abbildung 2-19: Temperaturabhängige Zeit-Dehngrenze hitzebeständiger Stahl- (schwarz) und Gusslegierungen (rot)

Der Werkstoff 2.4633 besitzt mit sehr hohen Dehngrenzen bis 700 °C, fällt dann aber überproportional stark ab gegenüber den weiteren Werkstoffen. Bei 800 °C besitzt beispielsweise der Werkstoff 2.4879 noch eine um 11 MPa höhere Dehngrenze als der 2.4633. Ab 800°C liegt der Wert unter 50 MPa bei jeder Legierung. Bis 900°C halbiert er sich wiederum. Ab 1.000 °C sind bereits Spannungen über 10 MPa kritisch. Die wirkenden Spannungen lassen sich durch einfache Berechnungen der Technischen Mechanik berechnen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Festigkeitsberechnungen für die betrachteten Ofenrollen durchgeführt,

die im Anhang A1 zu finden sind. Es wurde eine maximale Biegespannung (bei der maximalen Bandbreite von 1,65 m) von etwa 20 MPa ermittelt. Diese Spannung ist etwa doppelt so hoch wie bei Ofenrollen zur Beförderung von Glühgut, wo typische Werte zwischen 6 und 10 MPa liegen. Hier ist allerdings von globalen Spannungen die Rede, welche von den lokalen Spannungen durch Bandauflegepunkt bzw. –flächen noch um das bis zu dreifachen übertroffen werden können (Neubert, 2014). Die 1%-Zeitdehngrenze unterschreitet 20 MPa bei allen Legierungen ab etwa 900°C. Ofenrollentemperaturen über 900°C würden also zu einem deutlich schnelleren Versagen der Ofenrollen führen. Bei den im betrachteten Ofen verwendeten wassergekühlten Ofenrollen werden diese hohen Temperaturen nicht erreicht. In Abbildung 2-16 wurden zwei berechnete Temperaturgefälle in der Ofenrolle dargestellt. Die Materialtemperaturen liegen hier unterhalb von 400 °C. Über den Ausbau der Ofenrollen entscheidet erfahrungsgemäß die Exzentrizität der Ofenrollen, die im Werk anhand unrund laufender Zapfen „visuell“ bewertet wird. Im Anhang A2 ist ein kleiner Teil der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Dehnungsmessungen an verschiedenen Rollenlagern gezeigt. Es konnten hiermit die Unwuchten von verschieden alten Rollen bewertet werden. Da die Rollen nicht ideal rund sind, besteht immer eine geringfügige Unwucht. Diese erhöht sich mit fortschreitendem Betrieb und stellt im betrachteten Ofen ein Kriterium zum Rollenaustausch dar. Durch die Exzentrizität entsteht bei der Rotation eine zusätzlich Beanspruchung in die Richtung der Exzentrizität. Diese Belastung steigt mit der Rotationsgeschwindigkeit und der Betriebsdauer der Rollen an und führt letztendlich zum Ausbau der Rollen. Es ist daher in der Realität von einer höheren Belastung als der berechneten auszugehen, was die Temperatureinsatzgrenze des Werkstoffs weiter senkt.

2.4.2 Thermische Spannungen und thermische Ermüdung

Im Fokus dieser Untersuchungen und Entwicklung stehen die thermischen Spannungen und der Einfluss von konstruktiven oder materialtechnischen Einflüssen. Wärmespannungen stellen eine weitere Belastung in Abhängigkeit der Temperatur bzw. des Temperaturgefälles dar. Bei Feststoffen kommt es infolge von Temperaturänderungen zu thermisch bedingte Dehnung.

$$\varepsilon_{th} = \alpha_l \cdot \Delta T$$

2-22

Wird die thermische Dehnung behindert, bspw. durch Einspannungen/Lagerungen, entsteht eine zusätzliche Wärmespannung. Man spricht in diesem Fall von erzwungener Wärmedehnungsbehinderung. Im Fall der Ofenrolle wird durch die Lagerkonstruktion keine bzw. eine zu vernachlässigende Wärmedehnungsbehinderung in axialer Richtung hervorgerufen. Das Loslager dient hier zur Aufnahme axialer Dehnungen. Allerdings kommt es aufgrund des Temperaturgefälles in der Ofenrolle zu einer sog. zweiaxialen nicht erzwungenen Wärmedehnungsbehinderung, **Abbildung 2-20** (Bürgel, 1998).

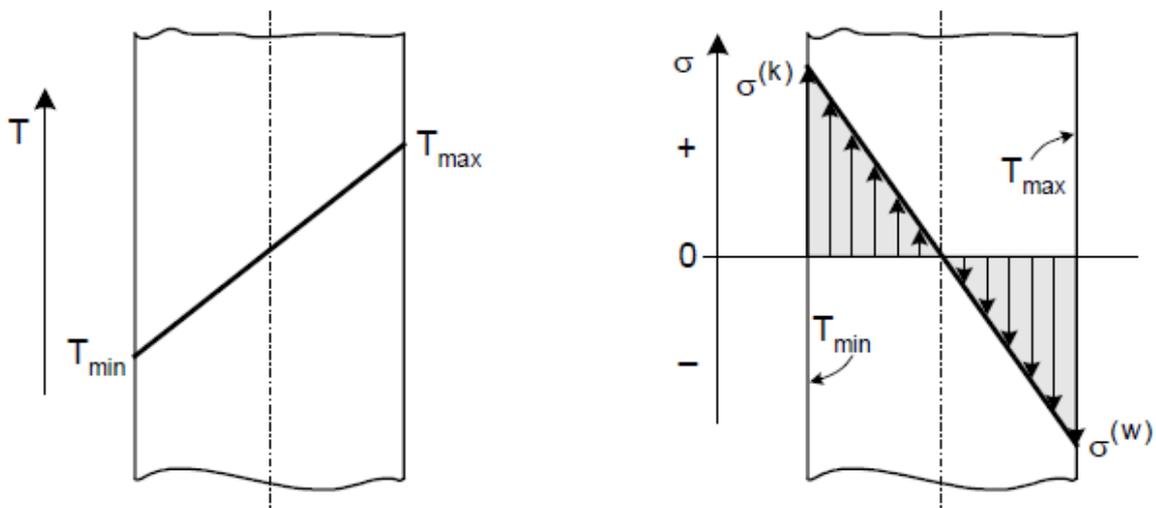


Abbildung 2-20: Verlauf der Temperatur und Spannung über der Wand bei einem Temperaturgefälle (Annahmen: rein elastische Verformungen; Wärmeleitfähigkeit und E-Modul im betrachteten Temperaturintervall konstant)

Die Wärmespannungen berechnen sich in diesem Fall wie folgt:

$$\sigma_{th} = \sigma^{(k)} = -\sigma^{(w)} = \frac{E \cdot \alpha_l}{(1-\nu)} \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad 2-23$$

Im Fall der Ofenrollen können das E-Modul und auch die Wärmeleitfähigkeit nicht als konstant angenommen werden, da es hier zu großen Temperaturdifferenzen kommt. Das E-Modul ist dadurch an der Innenseite bei T_{min} wesentlich größer und das Temperaturgefälle ($\Delta T \sim \frac{1}{\lambda}$) ist aufgrund der auf der kalten Seite kleineren Wärmeleitfähigkeit ebenfalls größer als an der Außenseite. Es kommt also zu einer

wesentlich höheren thermisch hervorgerufenen Spannung an der Innenseite der Rolle. Da allerdings die Zeitstandsfestigkeit bei höheren Temperaturen überproportional abnimmt, ist trotzdem im Bereich der verhältnismäßig kleineren Spannung an der Außenseite mit kritischen Spannungen zu rechnen. Wird die innere kritische Spannung (Streckgrenze) überschritten kann es zu Gefügeveränderung (Verfestigung) oder Heißrissen im Material kommen (Bürgel, 1998).

2.4.3 Kriechen

Beim Kriechen spricht man von einer temperatur- und zeitabhängigen plastischen Verformung, die unter technischen Bedingungen langsam abläuft. Prinzipiell spricht man vom Kriechen, wenn eine Spannung an einem Bauteil bei einer Temperatur oberhalb von $0,4 T_S$ anliegt. Bei Ni-Basislegierung liegt diese Grenze oberhalb von 500 °C . Unterhalb dieser Temperaturen finden allerdings auch durchaus zeitabhängige Verformung statt, die aber vernachlässigt werden können (Bürgel, 1998). **Tabelle 2-2** vergleicht die Merkmale statischer Verformung bei tiefen und hohen Temperaturen.

Tabelle 2-2: Vergleiche der Merkmale statischer Verformung bei tiefen und bei hohen Temperaturen (**Bürgel, 1998**)

| Temperaturen < ca. $0,4 T_S$ | Temperaturen > ca. $0,4 T_S$ |
|--|--|
| Die Festigkeitswerte sind zeitunabhängig (Streckgrenze, Zugfestigkeit). | Die Festigkeitswerte sind zeitabhängig (Zeitdehngrenze, Zeitstandsfestigkeit). |
| Plastische Verformung findet nur oberhalb einer Mindestspannung statt. | Kriechverformung bei alle Spannungen möglich. |
| Der Verformungsbetrag bei konstanter Spannung stellt sich praktisch spontan ein. | Der Verformungsbetrag stellt sich zeitabhängig ein. |
| Weitere Verformung ist nur bei Spannungssteigerung möglich. | Bei konstanter Spannung findet stetige Verformung statt. |

Bezieht man sich auf die aktuell wassergekühlten Ofenrollen und das Temperaturgefälle aus Abbildung 2-16, stellt man fest, dass hier eine Kriechbeanspruchung weitgehend unterbunden wird. Wählt man Konstruktionen, bei denen die Außentemperaturen der Rolle weiter steigen (größere Wanddicken und Durchmesser) kommt man allerdings sehr schnell in den Temperaturbereich $> 0,4 T_S$,

was unweigerlich zu verstärkter Kriechbeanspruchung führt. Die Kriechbeanspruchung ist hier allerdings aufgrund ihres relativ langsamen Fortschreitens eher zweitrangig, da die mechanischen und thermischen Belastungen, die Belastungen durch Unwucht und auch die Belastung durch Heißgaskorrosion wesentlich schneller zum Versagen der Ofenrollen führen.

2.5 Heißgaskorrosion

Unter Hochtemperatur- oder Heißgaskorrosion versteht man alle Formen der Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebungsatmosphäre bei erhöhten Temperaturen. Man spricht hierbei von einer Metall/Gas-Reaktion, die proportional zur Umgebungstemperatur ansteigt (Bürgel, 1998).

Bei den Ofenrollen kommt es vorwiegend zu Aufkohlung und Oxidation. Aufkohlung aufgrund der mit CO angereicherten Ofenatmosphäre und Oxidation aufgrund einer zeitweise vorliegenden Sauerstoffkonzentration im Heißgas. Die Hochtemperaturkorrosion beeinflusst die mechanischen Hochtemperatureigenschaften der Werkstoffe in starkem Maße. Die Bauteilslebensdauer ist dann nicht allein mechanisch, sondern mechanisch-korrosiv festgelegt. Die Festigkeitsauslegung auf Basis der mechanischen Werkstoffprüfung bei hohen Temperaturen birgt einige Komplikationen. Meistens werden die Versuche an Luft durchgeführt. Versuche unter mechanischer Belastung und der in der Endanwendung vorliegenden Gasatmosphäre sind kaum möglich. Eine sinnvolle Übertragung der beispielweise in Abbildung 2-19 dargestellten Zeit-Dehngrenzen ist dann möglicherweise nicht gegeben. Um hier auf der sicheren Seite zu sein, sollte man tendenziell einen negativen Korrosionseinfluss auf die Werkstoffeigenschaften voraussetzen (Bürgel, 1998). **Abbildung 2-21** zeigt die Einflussgrößen auf die Thermoermüdungsfestigkeit von Werkstoffen bzw. Konstruktionen.

| | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------|------------|------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----|-------|
| ↑ | $N_{B_{\text{isoth.}}}$ | $R_{m \ t/\vartheta}$ | R_e | ε_p | λ | a | Korrosions- beständigkeit | | | | |
| alle werkstoffbedingt | | | | | | | | | | | |
| Parameter sollten möglichst groß sein | | | | | | | | | | | |
| ↓ | ΔT | T_{max} | $ \dot{T} $ | s | Δs | R_z | α_{th} | $\Delta\alpha_{\text{th}}$ | $\dot{\varepsilon}_{\text{min}}$ | E | d_K |
| vorwiegend betriebsbedingt, auch konstruktions- und werkstoffbedingt | | | konstruktions- bedingt | | | werkstoffbedingt | | | | | |
| Parameter sollten möglichst klein sein | | | | | | | | | | | |

Abbildung 2-21: Übersicht über die Einflussgrößen auf die Thermoermüdungsfestigkeit (**Bürgel, 1998**)

Festigkeitskennwerte, wie beispielsweise die Bruchlastspielzahl, die Zeitstandfestigkeit und die Zugfestigkeit, sollten möglichst groß sein. Weiterhin sollten neben der Korrosionsbeständigkeit zudem auch die Duktilität, die Wärme- und die Temperaturleitfähigkeit möglichst groß sein. Wie in Abbildung 2-20 bereits erläutert, sollte das Temperaturgefälle (an erster Stelle) wie auch die Maximaltemperatur möglichst klein sein. Wanddicke, Wandickenübergänge und die Oberflächenrauigkeit sollten ebenfalls klein sein. Weitere werkstoffbedingte Einflussfaktoren, die die Haltbarkeit der Konstruktion bei erhöhten Temperaturen schützen, sind eine kleine thermische Ausdehnung und eine minimale Kriechgeschwindigkeit.

2.6 Beschichtungen

Ofenrollen werden je nach Anforderung und Einsatzgebiet mit Beschichtungen versehen. Solche Beschichtungen erfüllen bisher eine oder mehrere der folgenden Funktionen:

- Korrosionsschutz
- Wärmedämmung
- Verschleißschutz.

Zum Korrosion- und Verschleißschutz werden meist metallische Überzüge verwendet. Zur Wärmedämmung meist keramische. Man spricht hier auch von Schutzschichten, da sie den Grundwerkstoff vor einer bestimmten Einwirkung von außen schützen, aber keine optische oder elektrische Funktion erfüllen. Bei Hochtemperaturbeschichtungen handelt es sich ausschließlich um Dickschichten in Abgrenzung zu Dünnschichten, wobei der Übergang bei etwa $1-5 \mu\text{m}$ Schichtdicke liegt. Die wichtigsten Anforderungen an eine Beschichtung sind ausführlich in der Literatur (Bürgel, 1998) (Bobzin, 2013) beschrieben. Im Fall der Ofenrollen ist vor allem die Thermowechselbeständigkeit, die Haftung zum Grundwerkstoff, eine zum Grundwerkstoff ähnliche thermische Ausdehnung und die Korrosionsbeständigkeit wichtig (Bobzin, 2013). Ungekühlte, beschichtete Ofenrollen müssten bspw. den vollen Temperaturzyklen des Ofens standhalten. Dies kann bei großen Temperaturwechseln zum Abplatzen der Beschichtung aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Beschichtung und Grundwerkstoff führen. Im gekühlten Zustand ist die Temperatur der Ofenrollen konstanter. Zur Reduzierung der Kühlverluste kann ein verringerter Emissionsgrad der Oberfläche beitragen. Dieser hat, wie in Abbildung 2-11 dargestellt einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmeeintrag in die Ofenrolle. Die optischen Eigenschaften werden bei Hochtemperaturbeschichtungen bzw. Schutzschichten derzeit meist vernachlässigt, da es hauptsächlich um den Schutz des Bauteils geht. Optische Beschichtungen findet man für andere Anwendungsgebiete, wie bspw. bei optischen Spiegeln, in der Sensortechnik oder für Schweißvisiere. Aufgrund der Temperaturwechsel und teilweise schlagartigen Belastungen muss eine Beschichtung für Ofenrollen eine ausreichende Duktilität aufweisen (siehe auch Abbildung 2-21) und im besten Fall verbesserte optische Eigenschaften besitzen. Eine ausführliche Tabelle von Emissionsgraden verschiedener Materialien findet sich im Anhang A3.

2.7 Berechnungsmethoden

Zur detaillierteren Abschätzung von Temperatur- und Spannungsverteilung in den Ofenrollen wurden die bekannten numerischen Berechnungsmethoden CFD und FEM verwendet und miteinander kombiniert. Auf eine ausführliche Beschreibung dieser numerischen Berechnungsmethoden wird an dieser Stelle verzichtet und auf

Fachbücher verwiesen (Ferziger, 2013) (Klein, 2010). Die verwendete 1-Weg-Fluid-Struktur-Kopplungsstrategie (FSI) wird nachfolgend kurz erläutert. In den Spannungsberechnungen wurde wiederum das Materialverhalten anhand eines bi-linearen Materialmodells idealisiert. Dieses bi-lineare Materialmodell wird ebenfalls nachfolgend kurz beschrieben.

2.7.1 1-Weg-Fluid-Struktur-Kopplung (Fluid-Structure-Interaction)

Um detailliert die Belastungen der Ofenrollen betrachten zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell geschaffen, welches eine Reihe von Einflüssen auf die Ofenrollen mitberücksichtigt. Im ersten Schritt wurde ein CFD-Modell erstellt, womit die Strömung in der Ofenrolle und die Strömung, Verbrennung und Strahlung im Ofensegment in der Nähe der Ofenrolle berechnet werden können. Die Ofenrolle selbst wird hierbei als rotierende Solid-Zone mitberechnet. Ein Ergebnis dieser Berechnung ist die Materialtemperaturverteilung in der Ofenrolle, welche wiederum als Randbedingung in der nachfolgenden FEM-Berechnung verwendet wird. Die Kopplungsstrategie ist in **Abbildung 2-22** schematisch dargestellt. Man spricht hier von einer 1-Weg-Strategie, da man hierbei keine Rückkopplung der FEM-Ergebnisse vornimmt. D.h. man vernachlässigt hierbei den Einfluss einer möglichen Verformung der Ofenrolle auf die vorangegangene Strömungssimulation. Dieser Einfluss ist aufgrund der zu erwartenden geringfügigen Verformungen sehr gering.

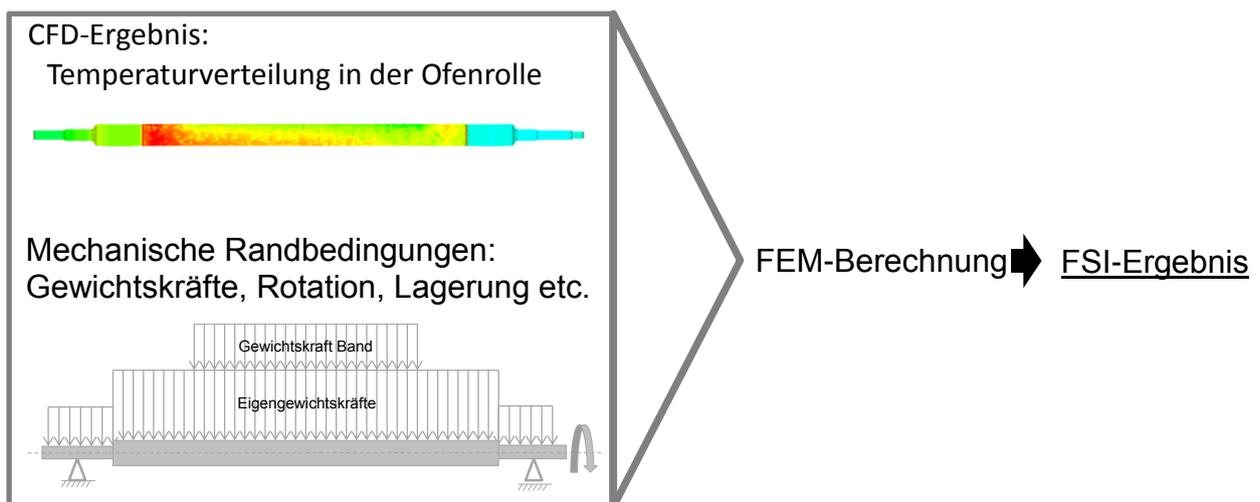


Abbildung 2-22: Schema zur verwendeten 1-Weg-Fluid-Struktur-Kopplungsstrategie

2.7.2 Bi-lineares Materialmodell

Folgende Inhalte und Bilder basieren auf den Grundlagen aus dem Handbuch der Umformtechnik (Doege & Behrens, 1996). Bei der Spannungsberechnung hochbelasteter Bauteile wie z.B. Ofenrollen kommt es relativ schnell zu einer plastischen Verformung. Zur Berechnung dieses Verhaltens muss in numerischen Berechnungen zwangsweise ein Materialmodell eingepflegt werden. Ein typischer Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in Abbildung 2-23 dargestellt. Solche Diagramme werden mittels Zugversuchen ermittelt.

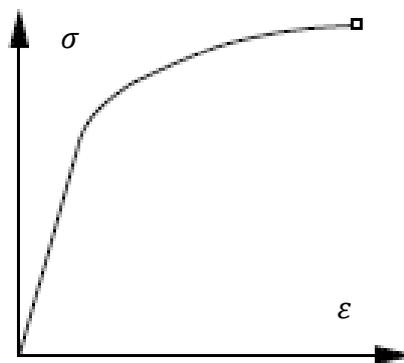


Abbildung 2-23: Exemplarisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Da diese Versuche meist Schwankungen unterliegen und die Daten nicht für jede Stahllegierung verfügbar sind, bedient man sich idealisierter Spannungs-Dehnungs-Verläufe (**Abbildung 2-24**).

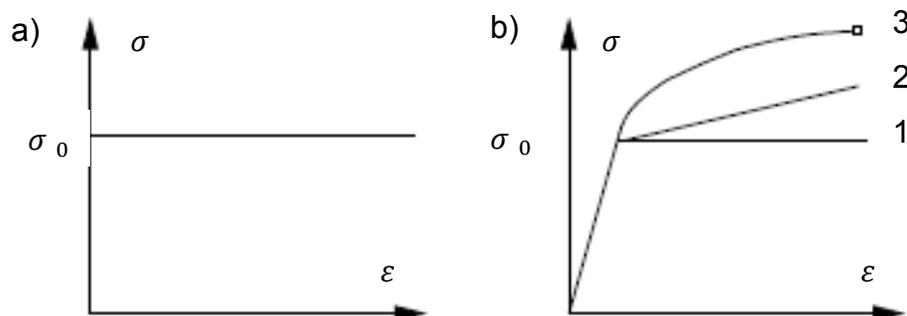


Abbildung 2-24: Idealisierte Materialverhalten

Die größte Vereinfachung ist das starr-idealplastische Verhalten, das bei sehr großen Umformgraden und bei Materialien mit geringfügiger Verfestigung durchaus seine Berechtigung hat (Abbildung 2-24a). Werden elastische Dehnungsanteile mit berücksichtigt, nennt man das Verhalten elastisch-idealplastisch. Dieses Modell reicht als Ersatz für das Verhalten von Baustählen vollkommen aus (Abbildung 2-24b-1). Eine Verfeinerung ist das Ersetzen eines Spannungs-Dehnungsverlaufs durch zwei Geraden. Eine für den elastischen eine für den plastischen Teil der Kurve. Dieses Verfahren bietet sich für alle Materialien an, die verfestigen und wird daher als lineare Verfestigung bezeichnet (Abbildung 2-24b-2). Diese Idealisierung wird auch bi-lineares Modell genannt. Modelle, die dem realen Materialverhalten möglichst nahekommen wollen, werden unter dem Begriff nicht-lineare Verfestigung zusammengefasst (Abbildung 2-24b-3). In dieser Arbeit wurde das bi-lineare Modell (**Abbildung 2-25**) zur Abschätzung der auftretenden Spannungen und Bereiche der plastische Verformung verwendet. Hierbei wird zwischen Fließspannung und Bruchspannung eine Gerade gezogen. Die Steigung dieser Gerade wird Tangentialmodul E_T genannt. Dieses wird wie folgt berechnet:

$$E_T = \frac{\sigma_B - \sigma_F}{\varepsilon_B - \varepsilon_F} = \frac{\sigma_B - \sigma_F}{\varepsilon_B - \frac{\sigma_F}{E}}$$

2-24

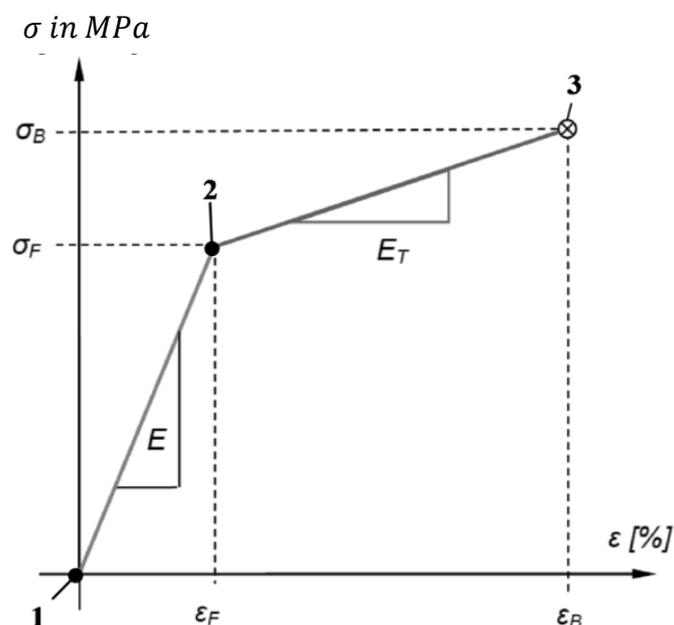


Abbildung 2-25: Diagramm zum bi-linearen Materialmodell

Dieses Modell bietet die Möglichkeit abzuschätzen inwieweit und wo Spannungen auftreten, die zu plastischen Verformungen bzw. die zu einer Verfestigung des Werkstoffs oder zu Materialrissen führen könnten. Es wird benutzt um verschiedenen Rollenkonstruktionen miteinander zu vergleichen.

2.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden der Vorwärmofen, die verwendeten Ofenrollen, die Wärmeübertragungsmechanismen im Ofen und in der Ofenrolle sowie die thermomechanischen Belastungen der Ofenrollen beschrieben. Zudem wurden Beschichtungen allgemein und das verwendete Materialmodell für weiterführende Untersuchungen vorgestellt. Aufgrund der hohen Belastungen durch das Band und die hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten der Ofenrollen konnten bereits ungekühlte vollkeramische Ofenrollen als Lösungsansatz ausgeschlossen werden. Dies zeigen auch Versuche aus einem Forschungsvorhaben (Gosemann, et al., 2011). Auch eine luftgekühlte Ofenrolle ist keine geeignete Lösung. Tests mit hohen Luftvolumenströmen zur Ofenrollen-Kühlung ließen im betrachteten Vorwärmofen bereits bei moderater Ofenraumtemperatur auf ein schnelles Versagen der Ofenrolle schließen (Gosemann, et al., 2011). Anhand der theoretischen Betrachtung der Einflussgrößen auf den Wärmestrom kann man schlussfolgern, dass es zwei (Beibehaltung der Abmaße der Ofenrolle vorausgesetzt) Möglichkeiten zur Verringerung des Wärmestroms in die Ofenrollen gibt. Zum einen eine Verringerung des Emissionsgrads der Rollenoberfläche und/oder eine Erhöhung der Oberflächentemperatur der Ofenrolle. In beiden Fällen ist der Einsatz neuer Werkstoffe erforderlich. Die theoretischen Betrachtungen der thermischen, mechanischen und korrosiven Einflüsse zeigten die hohen Belastungen der Ofenrollen auf. Kein aktueller Stahl- oder Gusswerkstoff besitzt eine ausreichend hohe Zeit-Dehngrenze oberhalb von 900 °C Einsatztemperatur, um der entstehenden Biegespannung längere Zeit standzuhalten. Zudem kommt ein negativer Einfluss der Ofenatmosphäre bzw. durch Heißgaskorrosion bei Ofenraumtemperaturen von über 1.300 °C hinzu. Die Einsatztemperatur ist daher im Stahl auf unter 900°C zu begrenzen. Die Bedingungen in solchen Vorwärmöfen sind als äußerst anspruchsvoll einzustufen und erfordern daher ein spezielles Ofenrollenkonzept. Ungekühlte

Ofenrollen können aufgrund der genannten Belastungen und der Ofenraumtemperaturen über 1.300 °C ausgeschlossen werden. Eine Verringerung der thermischen Belastung könnte mit Hilfe von Beschichtungen realisiert werden. Diese beeinflussen zum einen die optischen Eigenschaften sowie das Korrosionsverhalten der Rollenerfläche. Bekannt sind bisher beschichtete ungekühlte Ofenrollen (Fukubayashi, Amano, Nakamura, Ohno, & Nitta, 1996). Hier dient die Beschichtung meist als Korrosion- oder Verschleißschutz. Gekühlte Ofenrollen mit einer Beschichtung sind bislang nicht bekannt.

Atmosphärenzusammensetzung möglich. **Abbildung 3-2** zeigt schematisch die Messlinien der traversierenden Messungen.

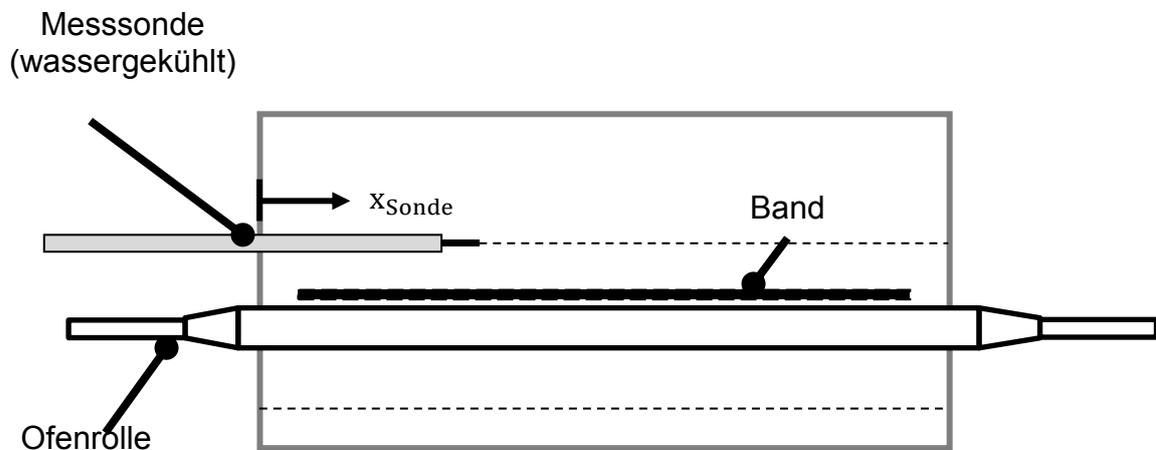


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Messlinien ober und unterhalb der Ofenrollen

Im Bereich der Ofenrollen wurden Temperaturwerte von bis zu 1.424 °C in der Ofenatmosphäre gemessen. Die niedrigste gemessene Temperatur während den Betriebsmessungen lag bei ca. 670 °C. Die Temperaturverteilung an den hier gezeigten Messstellen war homogen. Es konnten keine lokalen Temperaturspitzen durch etwaige Brennerflammen festgestellt werden. Die Ergebnisse aus der traversierenden Ofenatmosphärenkonzentrations- und Temperaturmessung sind exemplarisch für Zone 3 (Bandauslaufseite) in **Abbildung 3-3** und für Zone 1 (erste unterstöchiometrisch beheizte Zone auf Bandeinlaufseite) in **Abbildung 3-4** dargestellt. In **Abbildung 3-3** (Zone 3) ist die Ofenraumtemperatur etwa 50 K niedriger als in **Abbildung 3-4** (Zone 1). Die niedrigeren CO- und H₂-Werte und der höhere CO₂-Werte in Zone 1 deutet auf mehr Sauerstoff in der Ofenatmosphäre im Vergleich zu Zone 3 hin.

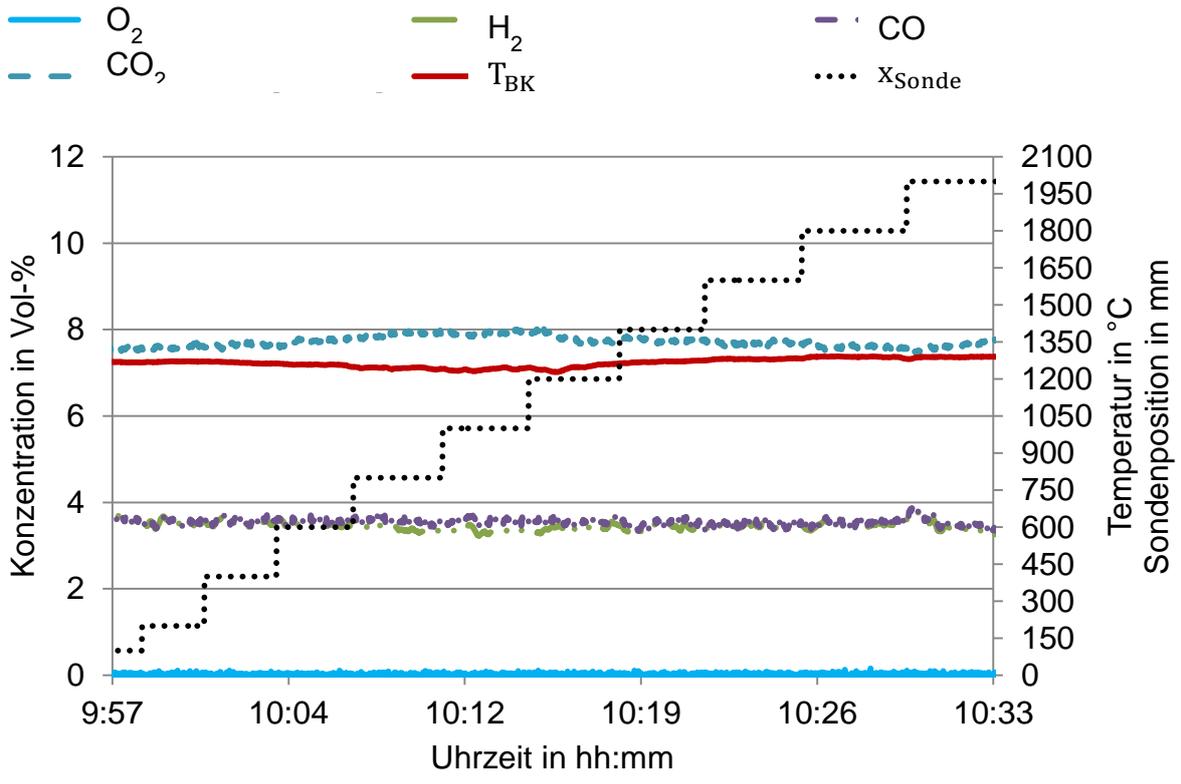


Abbildung 3-3: Traversierung, Messstelle 1 in Zone 3

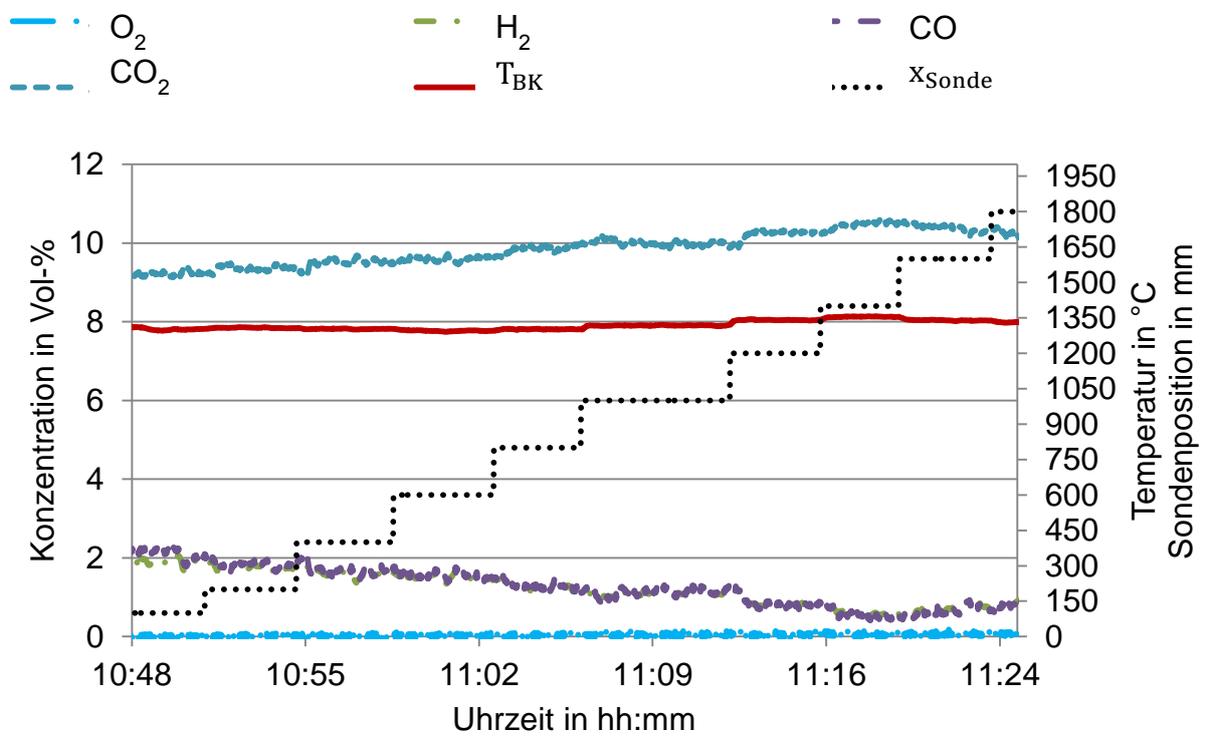


Abbildung 3-4: Traversierung, Messstelle 2 in Zone 1

Tabelle 3-1 zeigt die messtechnisch erfassten minimalen, maximalen und gemittelten Temperatur- und Konzentrationswerte im untersuchten Vorwärmofen.

Tabelle 3-1: Messtechnisch erfasste Temperatur- und Konzentrationswerte im untersuchten Vorwärmofen

| Messgröße | | |
|---------------------------|--------|------|
| O ₂ in Vol.-% | min. | ≈0 |
| | max. | 19 |
| | mittel | 0,4 |
| CO ₂ in Vol.-% | min. | 5 |
| | max. | 11 |
| | mittel | 8 |
| CO in Vol.-% | min. | 0 |
| | max. | 5 |
| | mittel | 3 |
| H ₂ in Vol.-% | min. | 0 |
| | max. | 9 |
| | mittel | 2 |
| Temperatur in °C | min. | 670 |
| | max. | 1424 |
| | mittel | 1300 |

Speziell das ermittelte O₂-Maximum von 19 Vol.-% ist sehr wahrscheinlich auf eine störungsbedingte Beeinflussung der Messung durch Falschluf zurückzuführen. Besonders in den Ofenzonen 3 und 4 wurde in der Ofenatmosphäre ein sehr hohes H₂-Niveau gemessen. Als Ursache für die hohen H₂-Konzentrationswerte in den genannten Zonen konnte die Schutzgasatmosphäre des (in Bandlaufrichtung) nachgeschalteten Glühofens festgestellt werden. Diese Atmosphäre besteht ausschließlich aus H₂ und N₂ und tritt im Bereich der Zone 4 über eine Schleuse in den Vorwärmofen ein, was zur genannten H₂-Anreicherung in diesem Bereich führt.

3.2 Bestimmung der Kühlverluste der Ofenrollen im Vorwärmofen

Zur Ermittlung des energetischen IST-Zustandes wurde der Energieverluste von zwei der aktuell eingesetzten wassergekühlten Ofenrollen der Bauform 1 (Abbildung 2-3) im Betrieb gemessen. Um eine spätere vollständige energetische Bilanzierung der beiden ausgewählten Ofenrollen zu ermöglichen, wurden dabei folgende Größen messtechnisch erfasst:

- Ofenraumtemperatur (T_{BK})
- Wassereintrittstemperatur ($T_{W, Ein}$)
- Wasseraustrittstemperatur ($T_{W, Aus}$)
- Wasserdurchlaufmenge (\dot{V}_W)

Der Kühlverlust bzw. die Kühlleistung wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_V = \dot{V}_W \cdot \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot (T_{W, Aus} - T_{W, Ein}) \quad 3-1$$

Abbildung 3-5 zeigt eine fotografische Aufnahme der Wasserdurchlaufmessung mittels magnetisch-induktivem Durchflussmesser und in Vor- und Rücklauf angebrachten Thermoelement.

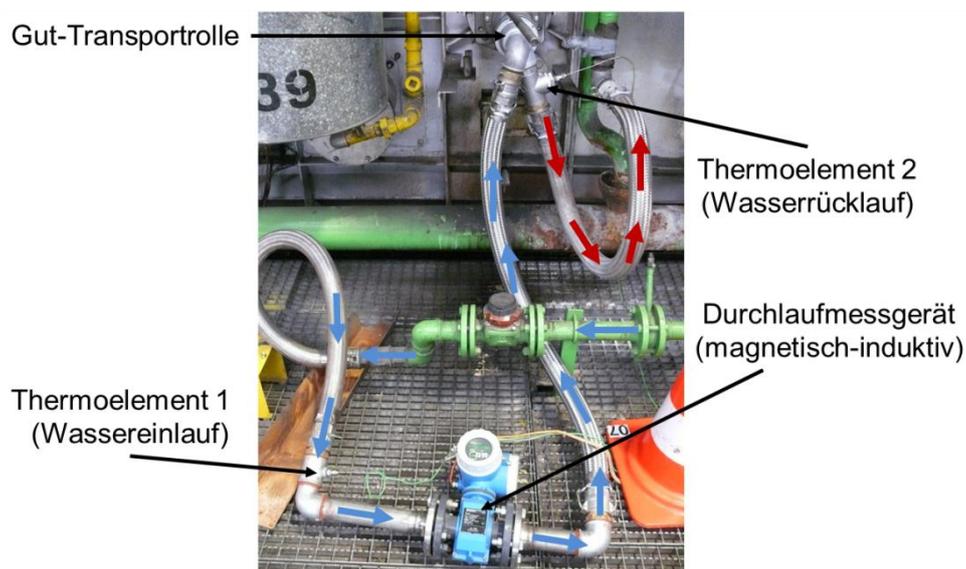


Abbildung 3-5: Wasserdurchlaufmessung an einer wassergekühlten Ofenrolle

Abbildung 3-6 zeigt einen zeitlichen Verlauf der aus den Messwerten des Wassers berechneten Kühlleistung, der Ofenraumtemperatur und der Bandbreite für Ofenrolle 4 in Zone 2. **Abbildung 3-7** zeigt dies für Ofenrolle 6 in Zone 4.

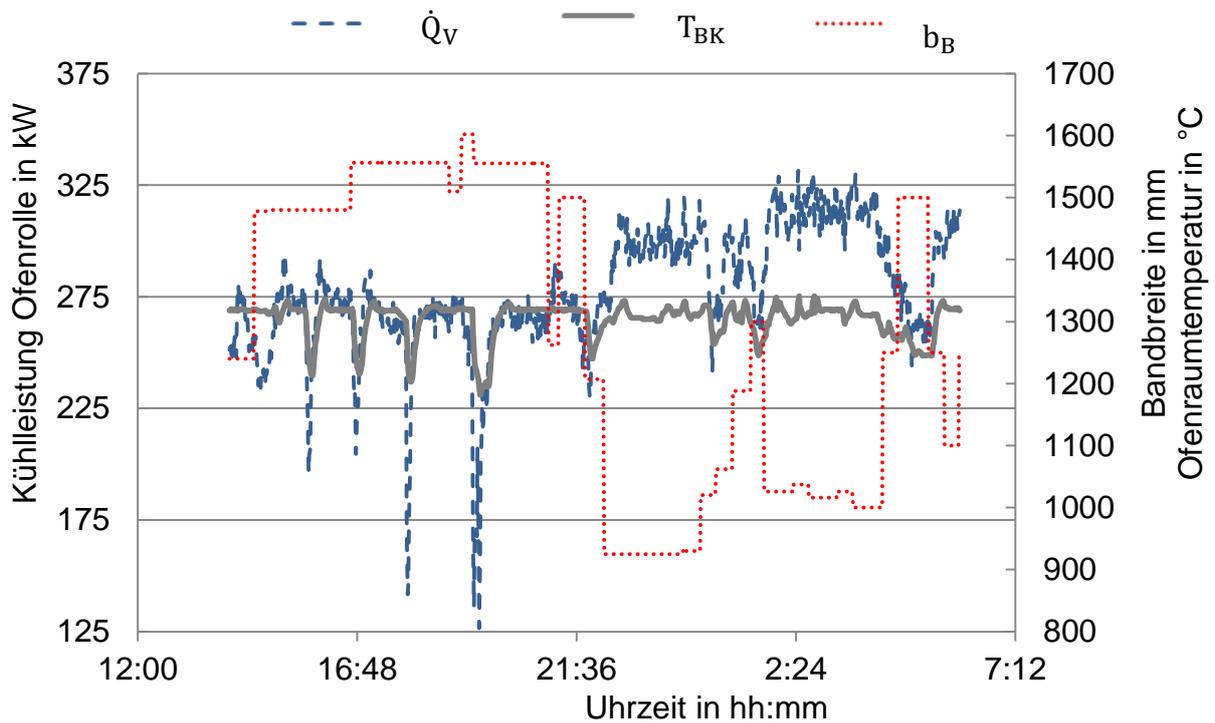


Abbildung 3-6: Kühlleistung von Ofenrolle 4 in Zone 2

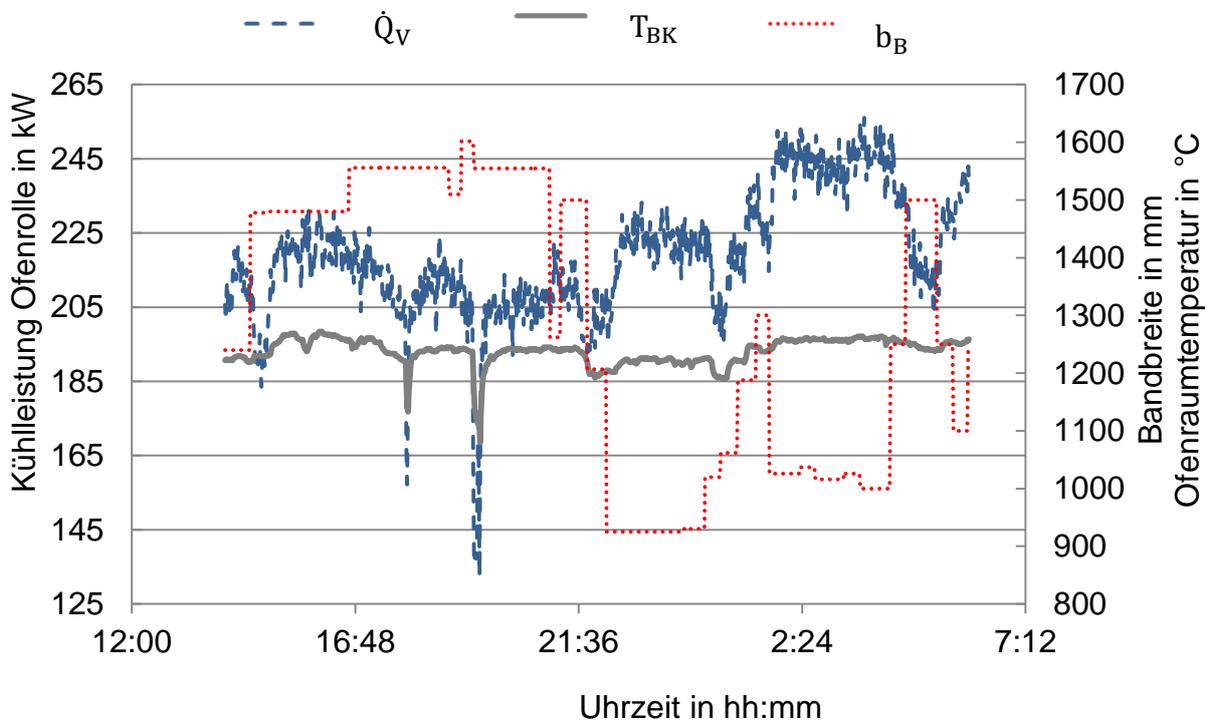


Abbildung 3-7: Kühlleistung von Ofenrolle 6 in Zone 4

Bei einer Ofenraumtemperatur von maximal 1.340 °C beträgt die Kühlleistung von

Ofenrolle 4 im Mittel ca. 278 kW, maximal 331 kW bei einer Bandbreite von 1,026 m (Abbildung 3-6). Bei einer Ofenraumtemperatur von maximal 1.260 °C beträgt die Kühlleistung von Ofenrolle 6 im Mittel ca. 219 kW, maximal 256 kW bei einer Bandbreite von 1,0 m (Abbildung 3-7). Deutlich zu erkennen ist der Einfluss der Bandbreite. Dies bestätigt die theoretischen Betrachtungen in Kapitel 2.3.1.

3.3 Heißgaskorrosionsversuche

Im Zuge der Untersuchungen wurden verschieden hitzebeständige Werkstoffe auf ihr Korrosionsverhalten getestet. Aufgrund des Fertigungsverfahrens der Rollen, die im Schleuderguss gefertigt werden, wurde sich hier auf Gusswerkstoffe beschränkt. Eine ergänzende Beschreibung der Versuche befindet sich im Anhang A4. Alle Werkstoffe finden Einsatz im Ofenbau (1.4837, 1.4857, 1.4869) oder unter schwierigen thermischen Bedingungen wie bspw. an Ventilsitzringen in hochbeanspruchten Motoren (K6040, K6040AL), vgl. **Tabelle 3-2**.

Tabelle 3-2: Geprüfte Werkstoffzylinderproben im Vorwärmofen

| Werkstoff | Max. Einsatztemperatur an Luft lt. Datenblatt | Bemerkung lt. Datenblatt |
|-----------|--|---|
| 1.4837 | 1050°C | |
| 1.4857 | 1100°C | |
| 1.4869 | 1100°C | Besonders resistent gegen Aufkohlung |
| K6040 | 1050°C | ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit (Einsatz in Ventilsitzringen) |
| K6040AL | 1250°C | Weiterentwicklung des K6040. Geeignet für besonders hohe Temperaturen. |

Die Proben wurden für eine Dauer von 7 Monaten in verschiedenen Ofenzonen platziert. Kein Werkstoff konnte den extremen Bedingungen im Innern des Vorwärmofens dauerhaft standhalten. Exemplarisch sind die Zylinderproben des Werkstoffs 1.4869 in **Abbildung 3-8** dargestellt.

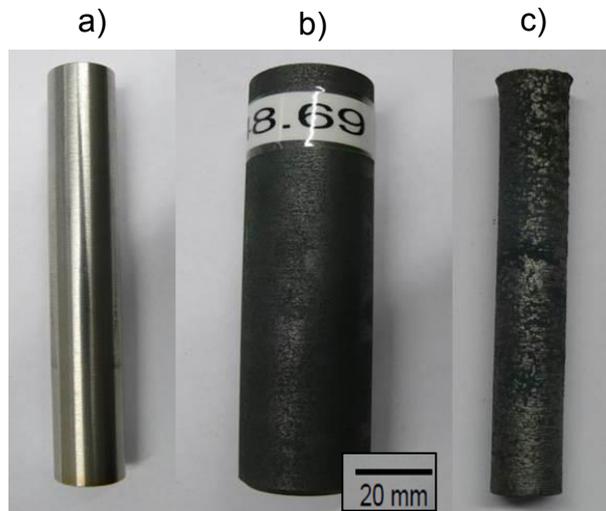


Abbildung 3-8: Materialproben aus 1.4869 (lt. Datenblatt oxidationsbeständig Bis 1.100 °C), a) Referenz; b) 8 Tage, 1.100 °C, Luft; c) 150 Tage, < 1.000 °C, Ofenatmosphäre

In **Abbildung 3-9** sind die Proben nach einer 7 monatigen Prüfzeit im Vorwärmofen aus dem Werkstoff 1.4837 dargestellt. Man kann deutliche Korrosionserscheinungen schon in der Ofenzone mit Temperaturen von 700 – 1.000 °C erkennen.

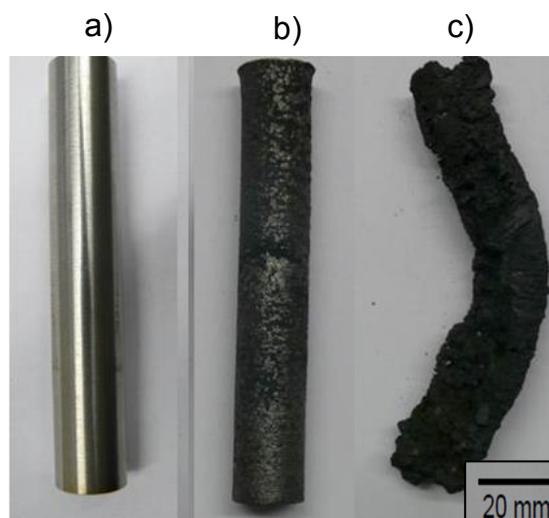


Abbildung 3-9: Probe 1.4837 a) vor Versuch, b) 700-1.000°C, c) 1.200-1.350°C

Auch der vermeintlich beste Werkstoff K6040AL zeigte bereits in der Ofenzone mit Temperaturen $< 1.000^{\circ}\text{C}$ nicht tolerierbare Korrosionserscheinungen, siehe **Abbildung 3-10**.

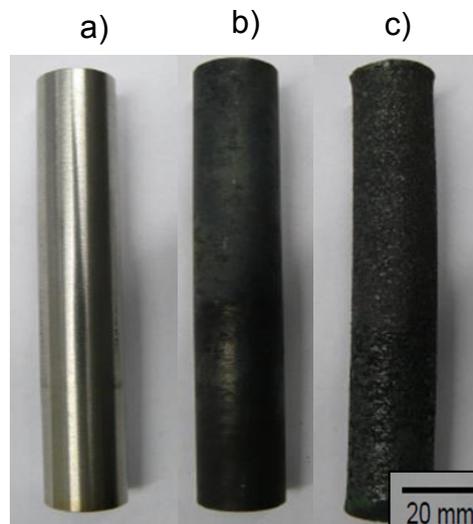


Abbildung 3-10: Probe K6040Al a) vor Versuch, b) $700-1.000^{\circ}\text{C}$, c) $1.200-1.350^{\circ}\text{C}$

Die Proben wurden weiterhin unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Es konnten neben den erwarteten Spuren der Aufkohlung auch Spuren der Oxidation festgestellt werden. Die Oxidbildung lässt darauf schließen, dass trotz der understöchiometrischen Ofenatmosphäre Sauerstoff in den Ofen gelangt. Der Sauerstoffeintrag ist darauf zurückzuführen, dass bei Änderungen der Ofenleistung die Brennereinstellungen geändert werden und so kurzzeitig das Gas-Luftverhältnis in den überstöchiometrischen Bereich verschoben wird. Hier reichen, wegen der relativ hohen Temperaturen in diesem Ofenbereich von $700-1.000^{\circ}\text{C}$, kurze Zeiträume aus, damit Sauerstoff in die Proben eindiffundiert. Es konnte gezeigt werden, dass hierbei nicht allein die hohe Temperatur ursächlich für das Versagen ist, sondern die Kombination aus Temperatur und wechselnder Ofenatmosphäre (reduzierend und zeitweise oxidierend) mit teilweise hohen Anteilen von H_2 und CO . Während einige der untersuchten Proben Temperaturen von bis zu 1.100°C in Luft standhalten konnten (**Abbildung 3-8** b), versagten alle untersuchten Proben bei vergleichbarer Temperatur unter Einfluss der Ofenatmosphäre (**Abbildung 3-8** c). Ein Einsatz der getesteten Werkstoffe in dieser Ofenatmosphäre über 1.000°C ist aufgrund der Ergebnisse nicht empfehlenswert und führt unweigerlich zu

frühzeitigem Versagen der Ofenrollen. Eine Beständigkeit der ausgesuchten Werkstoffe ist im Rand- bis sogar in Probenmitte gegen die relativ heiße Ofenatmosphäre nicht für längere Zeiträume (> 5 Monate) gegeben. Die Oberflächengüte der neuen Ofenrolle wäre bei diesen Temperaturen und Werkstoffen nicht ausreichend. Für die neue Ofenrolle wird eine glatte Oberfläche gefordert, von der sich keine Partikel ablösen dürfen.

3.4 Untersuchungen der IST-Ofenrollen am Versuchsofen der Technikumsanlage des BFI

Der Versuchsofen der Technikumsanlage des BFI auf dem Gelände des Hüttenwerk-Krupp-Mannesmann (HKM) in Duisburg wird im Wesentlichen zur Untersuchung von Industriebrennern eingesetzt. Diese können an einem Versuchsofen installiert und geprüft werden. Für die Untersuchung der Ofenrollen wurde die Brennkammer zusätzlich mit einer Durchführung für Ofenrollen ausgestattet, siehe **Abbildung 3-11**.

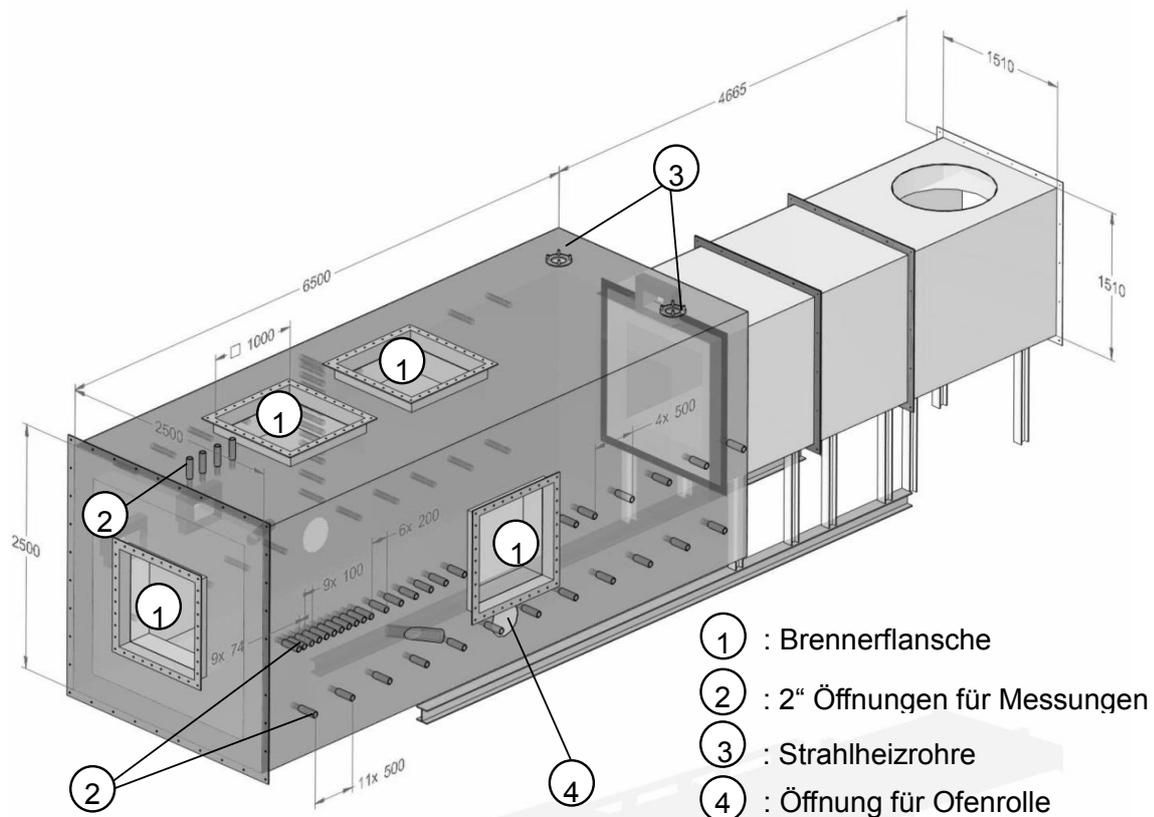


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung des Versuchsofens des BFI

Hier sind vier 1x1m Flansche zu erkennen, an denen Brenner montiert werden können. Die innere Brennkammer besitzt die Maße 2x2x6m und ist damit nur 0,202 m schmaler als der untersuchte Vorwärmofen. Die Fläche des Rollenmantels im Ofen ist daher etwa 10% kleiner als im Vorwärmofen. Die Ofenatmosphäre des Vorwärmofens kann an diesem Versuchsofen aus Sicherheitsgründen nicht eingestellt werden. Für alle hier durchgeführten Versuche wurde ein mit Koksgas betriebener Brenner, der an der Frontplatte (links) montiert wurde, verwendet. Der Brenner wurde mit maximal 650 kW betrieben. Zusätzlich ist der Versuchsofen mit zwei Strahlrohren mit einer Nennleistung von 72 kW ausgestattet. In **Abbildung 3-12** ist die Frontansicht sowie eine Seitenansicht des Versuchsofens zu sehen. In der Frontansicht ist der installierte Brenner zu sehen und in der Seitenansicht der aus der Brennkammer herausragende Rollenzapfen einer getesteten Ofenrolle. Hier sind auch die aus dem Ofen herausgeführten Thermoelemente zu sehen.

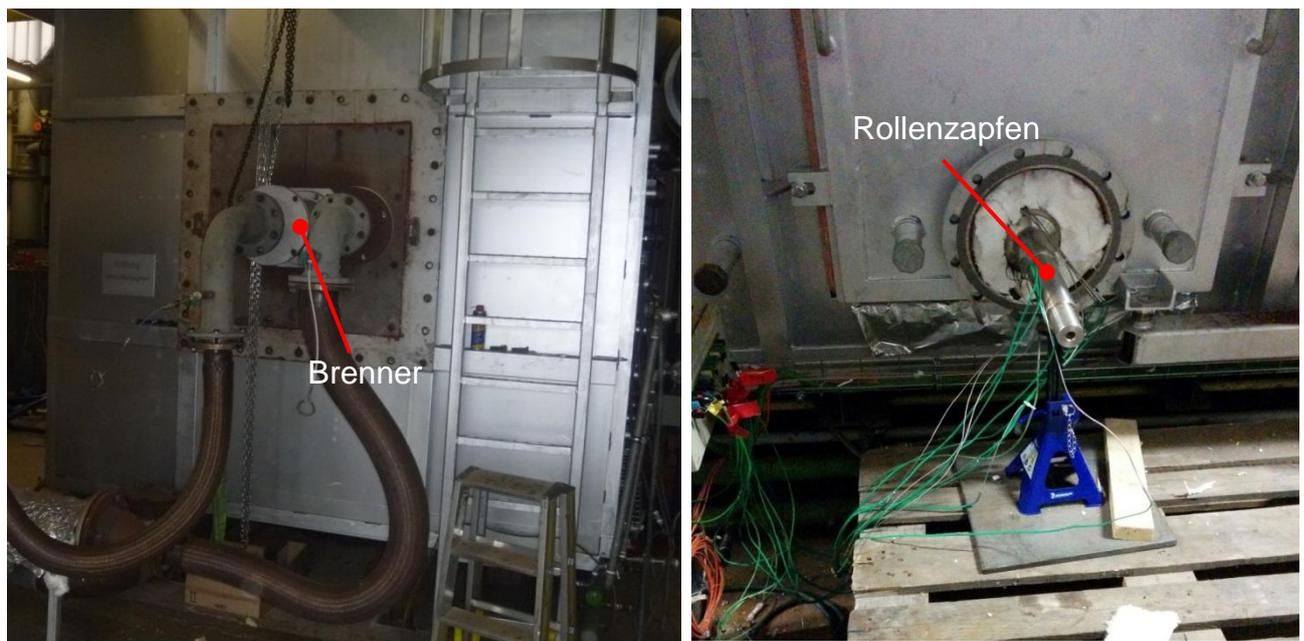


Abbildung 3-12: Frontansicht des Versuchsofens mit Brenner (links) und Seitenansicht des Versuchsofens mit Rollenzapfen (rechts)

Bei den Versuchen wurden folgende Größen messtechnisch erfasst:

- Wassereintrittstemperatur ($T_{W, Ein}$)
- Wasseraustrittstemperatur ($T_{W, Aus}$)
- Wasserdurchlaufmenge (\dot{V}_W)

- Rollenmaterialtemperaturen (T_1, T_2, T_3, \dots)
- Ofenraumtemperatur (T_{BK}).

Die Kühlleistung wird wiederum nach Gleichung 3-1 berechnet. Zur Messung des Volumenstroms wurde derselbe Durchflussmesser wie bei den Betriebsmessungen verwendet, vgl. Abbildung 3-5. Zur Erfassung der Rollenmaterialtemperaturen wurden in den Rollenmantel der Ofenrollen 2-4 mm tiefe und etwa 2 mm durchmessende Bohrungen erzeugt, in denen die Thermoelemente verklemt wurden. Die Thermoelemente wurden zudem mit Stahlblechen fixiert und gleichzeitig verdeckt. Hierdurch sollen zum einen unerwünschte Strahlungseinflüsse minimiert werden und zum anderen die Fixierung der Thermoelemente verbessert werden.

Abbildung 3-13 zeigt schematisch die Messwerte an der Ofenrolle bzw. in den Kühlleitungen. Bei der Bauform 2 einer Ofenrolle wird dementsprechend auf der rechten Seite die Austrittstemperatur gemessen.

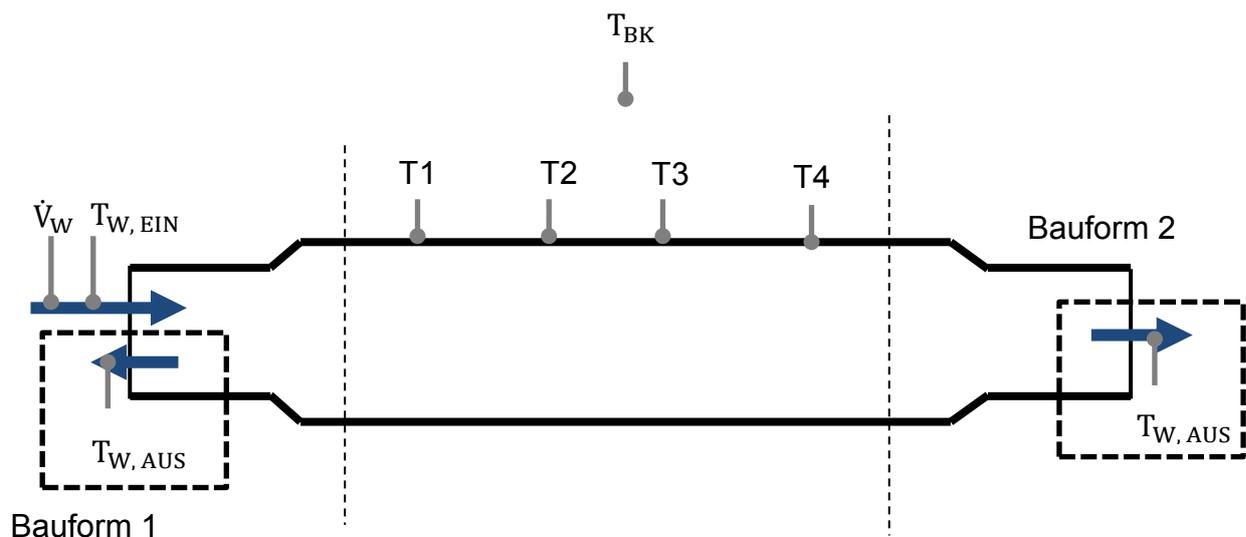


Abbildung 3-13: Messschema der Technikumsversuche für die IST-Rollen

Die Versuche wurden zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit 1-4-mal wiederholt. Im Folgenden werden nur einzelne Versuchstage gezeigt und ausgewertet, falls keine gravierenden Veränderungen bei den Wiederholungsversuchen festgestellt werden konnten. Zur Vergleichbarkeit der Messergebnisse und Analyse möglicher Unterschiede zur Betriebsmessung wurden die in Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4 gezeigten aktuellen Bauformen der IST-Ofenrollen im Versuchsofen geprüft. Es handelt sich bei beiden getesteten Ofenrollen um bereits in Vorwärmöfen betriebene

und zum Austausch oder zur Überarbeitung ausgebaute Ofenrollen. Um etwaige Schmutzpartikel und Ablagerungen auf den Ofenrollen zu entfernen wurden diese vor den Versuchen händisch abgeschliffen. Die getesteten Ofenrollen werden in **Abbildung 3-14** gezeigt.



Abbildung 3-14: IST-Ofenrollen, links Bauform 2, rechts Bauform 1 im Versuchsofen

Abbildung 3-15 zeigt die gemessenen Werte der Ofenraumtemperatur und der Rollenmaterialtemperaturen sowie die berechnete Kühlleistung der IST-Rolle in der Bauform 1. Bei einer maximalen Brennerleistung von 650 kW konnte durch die hohe Kühlleistung von bis zu 217 kW nur eine Ofenraumtemperatur von 1.236 °C im Versuchsofen erreicht werden. Die gemessenen Rollenmaterialtemperaturen lagen zwischen 260 - 460 °C, wobei hier am Thermoelement T2 etwa 150 K höhere Temperaturen gemessen wurden als an den Thermoelementen 1,3 und 4. Dies scheint ein fehlerhafter Messwert zu sein. Eventuell konnte an Thermoelement 2 heißes Gas in die Bohrung eindringen und/oder das Thermoelement hat sich etwas gelöst. Diese Vermutung würde auch den Verlauf der Messkurve plausibel erscheinen lassen, da diese bei T2 zu Beginn sprunghaft ansteigt (gegen 9:45Uhr) und während des Versuchs spontan wieder abfällt (gegen 11:15Uhr). Vernachlässigt man T2 liegen die Rollenmaterialtemperaturen bei 252-322 °C.

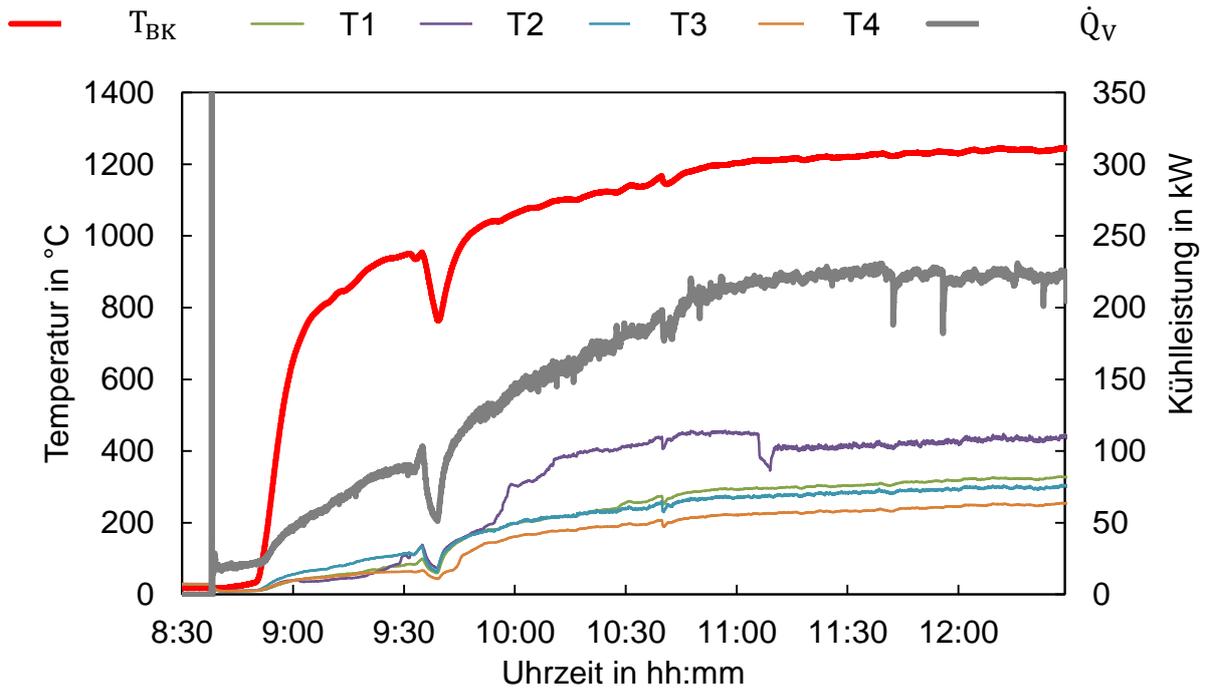


Abbildung 3-15: Temperatur und Kühlleistung der IST-Rolle (Bauform 1), Technikum BFI

Abbildung 3-16 zeigt das gleiche Diagramm für die Messung von Bauform 2.

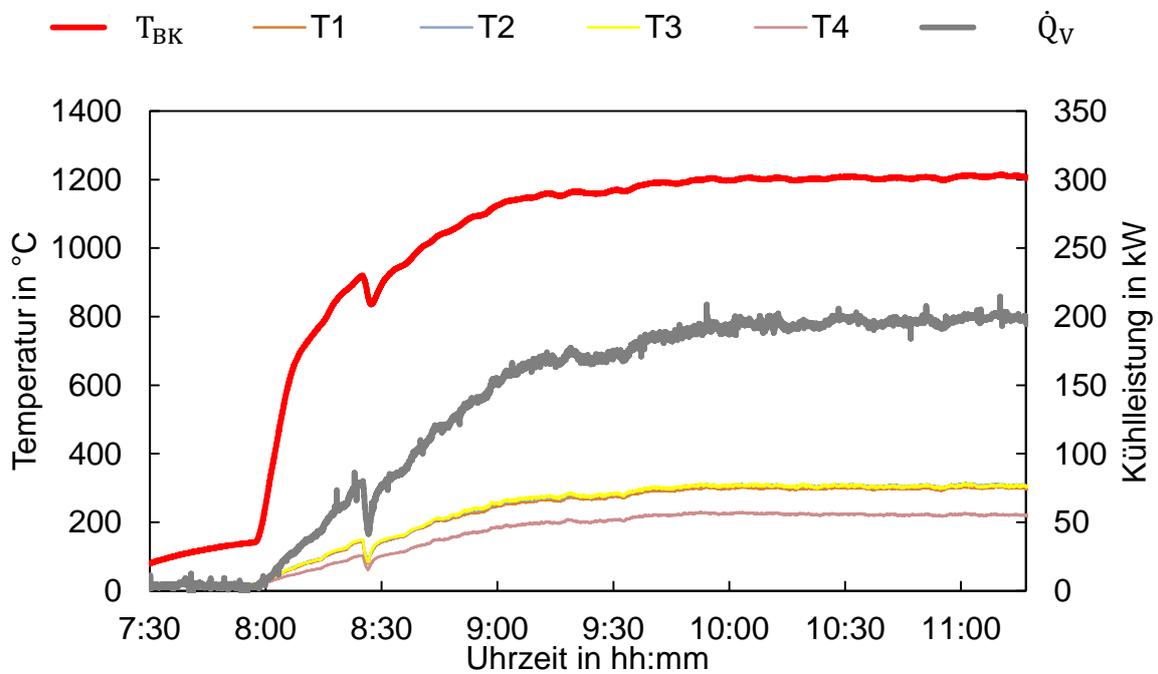


Abbildung 3-16: Temperatur und Kühlleistung der IST-Rolle (Bauform 2), Technikum BFI

Die Kühlleistung der Ofenrolle liegt hier bei einer Ofenraumtemperatur 1210 °C bei 200 kW. Die Rollenmaterialtemperaturen liegen bei 218-303 °C. Bauform 2 hat demnach bei gleichem Rollendurchmesser 6-8% weniger Kühlverlust. Da sowohl die Rollenmaterialtemperatur sowie die Kühlleistung niedriger sind, könnte der Emissionsgrad des Mantelmaterials von Bauform 2 etwas geringer sein. Der Einfluss eines niedrigeren Emissionsgrads wird im nachfolgenden Kapitel untersucht.

3.5 Untersuchung des Einflusses des Oberflächenemissionsgrads

Der Einfluss des Oberflächenemissionsgrads wurde anhand eines wasserkühlbaren Zylinders aus Aluminium getestet. Aluminium besitzt sehr gute Reflexionseigenschaften und hat selbst im rauen oder stark oxidierten Zustand noch sehr geringe Emissionsgrade. Im Vergleich zu oxidiertem Stahl, der einen Emissionsgrad von 0,7-0,95 besitzt, liegt dieser bei Aluminium etwa bei 0,1-0,4. Siehe hierzu die Emissionsgradtabelle im Anhang A3. Aufgrund der zusätzlich sehr hohen Wärmeleitfähigkeit von mehr als 200 W/(m K) sind zudem niedrige Materialtemperaturen zu erwarten. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den theoretischen Berechnung wurden mehrere Messstellen (T1-T12) in unterschiedlichen Tiefen im Material aufgenommen, vgl. **Abbildung 3-17**. Hierbei befinden sich T3, T6 und T9 jeweils in Nuten von wenigen Millimetern Tiefe in der Oberfläche des Zylinders, T4, T7 und T10 in einer 12,5 mm und T5, T8, T11 in einer 20 mm tiefen Bohrung. Der Abstand zwischen den Messstellen und den Ofenwänden betrug jeweils 500 mm. Die Wasserströmung wird innerhalb des Zylinders, ähnlich zu Bauform 1 der IST-Ofenrolle, umgelenkt und strömt im Ringspalt zurück. Der hydraulische Durchmesser des Ringspalts entspricht dem der beiden Bauformen der IST-Ofenrollen.

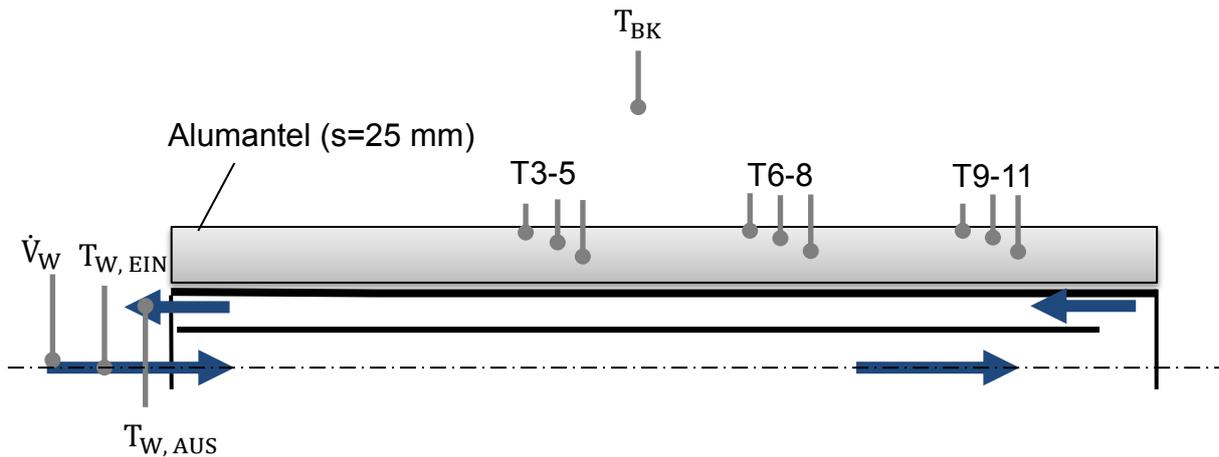


Abbildung 3-17: Schema des Technikumsversuchs mit einem gekühlten Aluminiumzylinder

Abbildung 3-18 zeigt eine fotografische Aufnahme der Messstellen T3-5. Ebenfalls auf dem Aluminiumzylinder eingezeichnet ist die Strömungsrichtung des Wassers.



Abbildung 3-18: Foto der Messstellen 3-5 am Aluminiumzylinder

Die Messwerte aus **Abbildung 3-19** belegen den Einfluss des Emissionsverhaltens des Rollenwerkstoffs. Sowohl die Kühlleistung mit 110-120 kW als auch die Materialtemperaturen mit 95-105 °C sind deutlich geringer als bei den IST-Ofenrollen. Die relativ kalten Materialtemperaturen haben einen zusätzlichen positiven Einfluss auf die entstehenden thermischen Spannungen, da diese proportional zur Temperaturdifferenz im Material steigen. Die maximale Temperaturdifferenz im Mantel ist beim Aluminiumzylinder mit ca. 35 K um ein Vielfaches geringer als bei den Stahl-Ofenrollen.

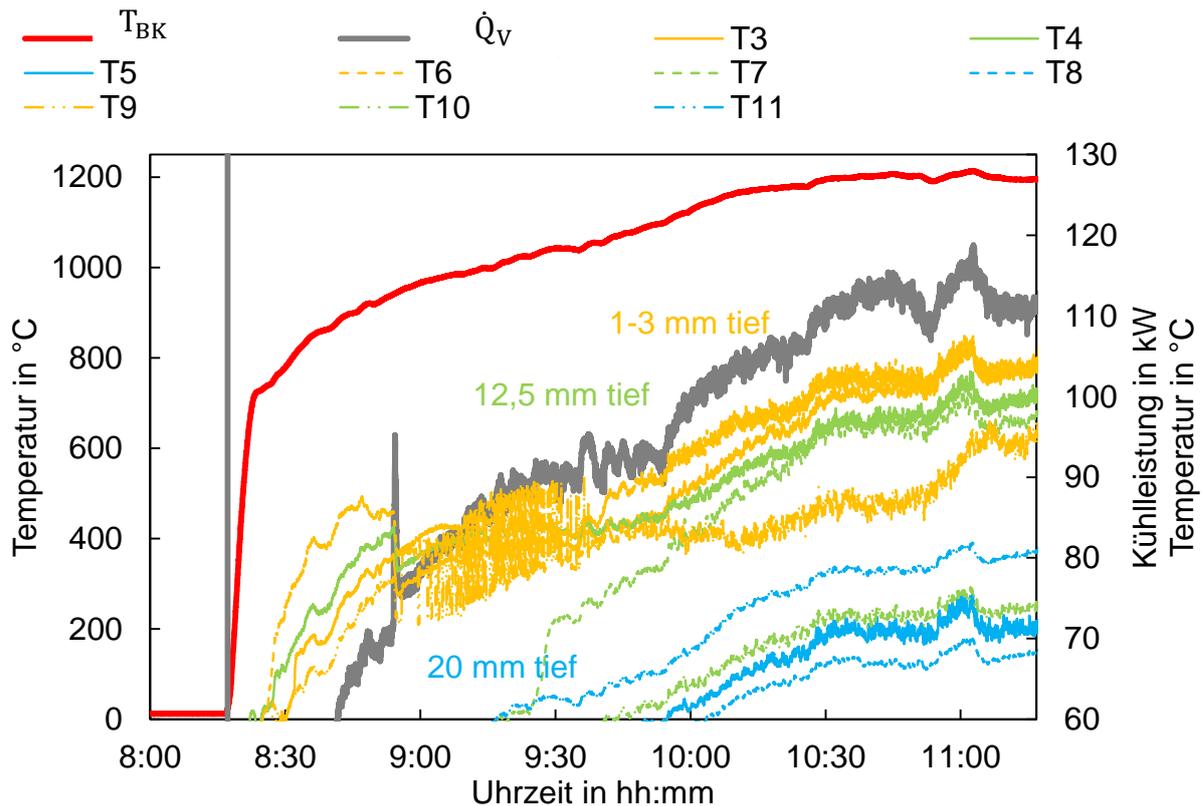


Abbildung 3-19: Temperatur und Kühlleistung des Aluminiumzylinders, Technikum BFI

Die relativ kalte Aluminiumrolle konnte zum einen den Kühlverlust reduzieren und zum anderen die Thermospannungen im Rollenmaterial senken. Allerdings kommt eine Voll-Aluminiumofenrolle für die Anwendung im Vorwärmofen mit Temperaturen von über 1.300 °C aufgrund fehlender Notlaufeigenschaften, Härte und Festigkeit nicht in Frage. Es konnte mit diesen Versuchen der starke Einfluss des Emissionsgrads auf den Wärmestrom und die Materialtemperaturen bestätigt werden. Der Emissionsgrad bzw. die Messwerte am Aluminiumzylinder konnten in Wiederholungsversuchen reproduziert werden.

3.6 Gekoppelte FSI-Berechnung einer Ofenrolle

Zur detaillierteren Betrachtung der Temperaturverteilung im Ofen und in Rollennähe sowie der Temperatur- und Spannungsverteilung in der Ofenrolle wurden gekoppelte CFD-FEM-Berechnungen durchgeführt.

3.6.1 CFD-Berechnung eines Ofensegments mit gekühlter Ofenrolle

Das erstellte CFD-Modell berücksichtigt sowohl die Einflüsse der Brenner, als auch den Energieeintrag aus den benachbarten Ofenzonen sowie das durchlaufende Band. Es beinhaltet hierzu insgesamt vier Brenner, eine wassergekühlte Ofenrolle sowie den Bandabschnitt, **Abbildung 3-20**.

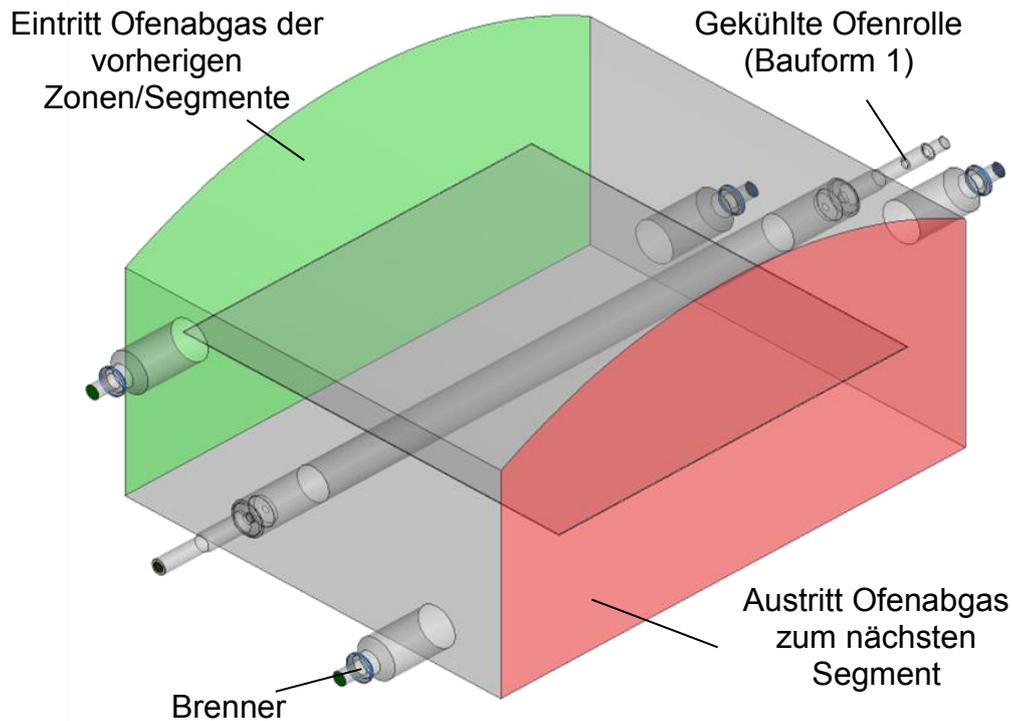


Abbildung 3-20: Modell eines Ofensegments des Vorwärmofen

Abbildung 3-21 zeigt das verwendete hybride Berechnungsgitter mit 8,2 Mio. Zellen. In **Tabelle 3-3** sind die wichtigsten Randbedingungen und die verwendeten Modelle aufgelistet.

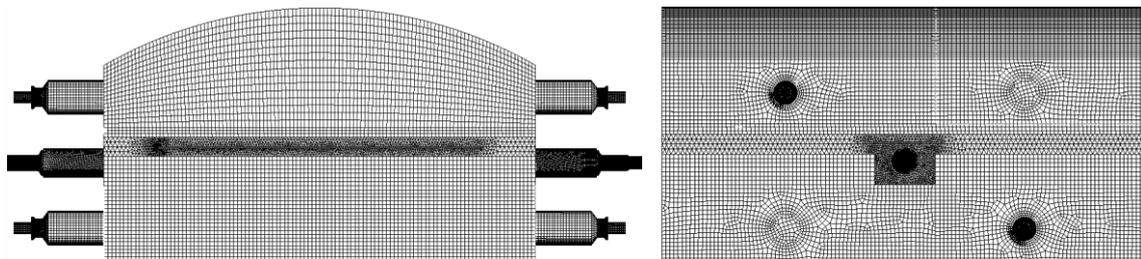


Abbildung 3-21: Berechnungsgitter des Ofensegments

Tabelle 3-3: Randbedingungen und verwendete Modelle für die CFD-Berechnung

| | |
|--|---------------------------------------|
| Ofensegmentinnenmaße (Länge x Breite x Höhe) | ca. 2 x 2.2 x 1,3 m |
| Durchmesser der Ofenrolle | 0.15 m |
| Ofenraumtemperatur | 1320 °C |
| Umdrehungsgeschwindigkeit Ofenrolle | 371 U/min |
| Bandgeschwindigkeit / Bandanfangstemperatur / Bandbreite | 175 m/min / 650 °C / 1,24 m |
| Wasserdurchfluss | 26 m ³ /h |
| Eintrittstemperatur Wasser / Abgas der vorherigen Zonen | 20 / 1320 °C |
| Brennerleistung pro Brenner (Erdgas) / Brennlufttemperatur | 214 kW / 400°C |
| Luftverhältnis | 0.91 |
| Emissionsgrad Ofenrolle / Band / Ofenwände | 0.9 / 0.45 / 0.85 |
| Turbulenzmodell | Realizable k-ε-model |
| Strahlungsmodell | Discrete ordinates model (4x4) |
| Verbrennungsmodell | Presumed-Density-Function-model (PDF) |

Das Modell erlaubt die Berechnung der Temperaturverteilung innerhalb des Ofensegments und des Rollenkörpers sowie des Kühlmediums Wasser. Zusätzlich erlaubt das Modell die Erstellung von vollständigen Energiebilanzen zur energetischen Bewertung und zum Vergleich der erzeugten Ergebnisse. Zur Verifizierung des Modells wurde die aktuelle Betriebssituation der Rollen simuliert und mit den Messdaten verglichen. Hier liefert das Modell bereits in allen wesentlichen Punkten mit den Messwerten übereinstimmende Ergebnisse. **Abbildung 3-22** zeigt die Temperaturverteilung im betrachteten Ofensegment. Abgesehen von den sichtbaren heißen Bereichen der Brennerflammen ist die Temperatur im Ofensegment relativ homogen bei 1.300–1.350 °C. Die Brennerflammen werden durch die Abgasströmung aus den vorherigen Zonen abgelenkt. Die Bandanfangstemperatur beim Eintritt in das Segment (Band bewegt sich entgegen der Abgasströmung) beträgt 650 °C. Das Band erwärmt sich in der Berechnung von Eintritt zu Austritt (2 m Länge) um etwa 10-15 K. Der berechnete Wärmeeintrag in die Ofenrolle (vergleichbar mit der Kühlleistung) liegt in der Berechnung bei 294 kW.

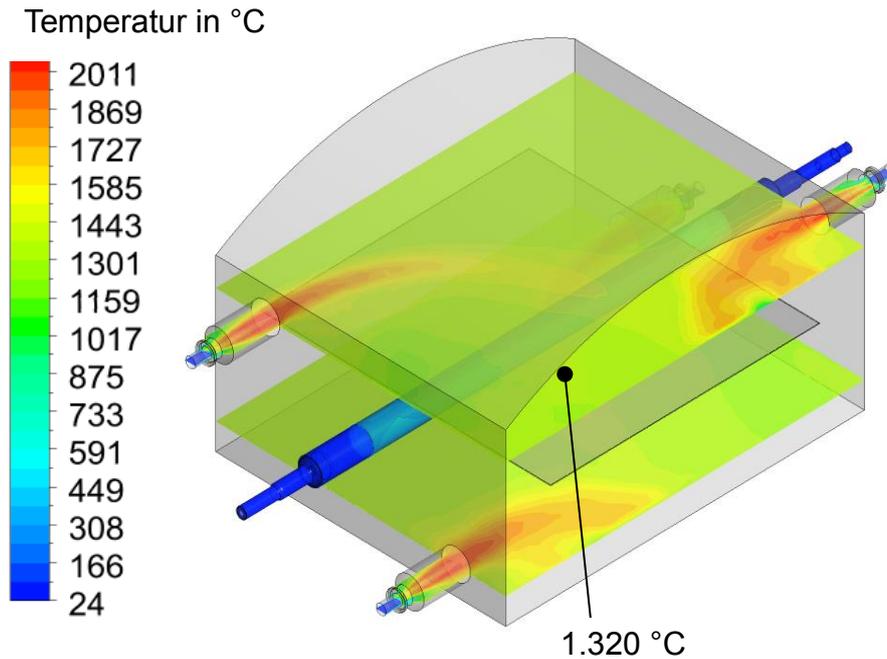


Abbildung 3-22: Temperaturverteilung im Ofensegment

Verglichen mit der im Betrieb gemessenen Kühlleistung bei diesen Randbedingungen (**Abbildung 3-23**) liegt die berechnete Kühlleistung damit etwa 10% höher als die gemessene.

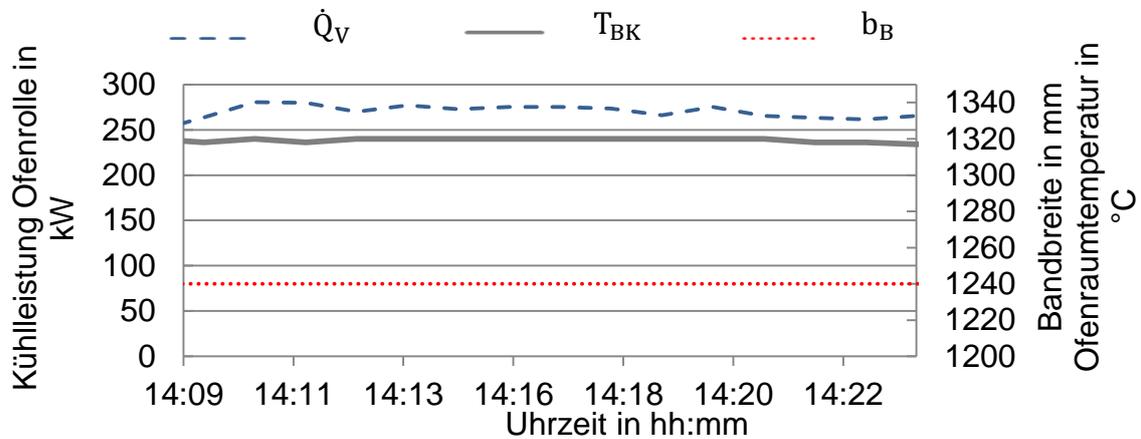


Abbildung 3-23: Gemessene Kühlleistung bei 1.320 °C Ofenraumtemperatur und Bandbreite 1,24 m

Abbildung 3-24 zeigt die berechnete, lokale Temperaturverteilung auf der Ofenrollenoberfläche im Detail. Deutlich zu erkennen ist der Effekt des Bandes, welches hier prinzipiell als Strahlungsschirm fungiert. Es schattet die Ofenrolle an der Oberseite gegenüber der Strahlung des Ofens ab. Dadurch ergeben sich in diesem Bereich geringere Oberflächentemperaturen von 100-140 °C. Links- und rechtsseitig

des Bandes sowie an der Ofenrollenunterseite liegen die Oberflächentemperaturen bei 270 – 340 °C. In der Anlage bestand keine Möglichkeit die Oberflächentemperaturen messtechnisch zu erfassen. Hierfür wurden die in Kapitel 3.4 beschriebenen Technikumsversuche durchgeführt. Hier wurden für die simulierte Bauform 1 der Ofenrolle Oberflächentemperaturen von 250 – 430 °C bei einer Ofenraumtemperatur von 1.200 °C gemessen, wobei es sich bei den 430 °C höchstwahrscheinlich um einen Messfehler handelt. Die gemittelte gemessene Oberflächentemperatur liegt bei etwa. 300 °C.

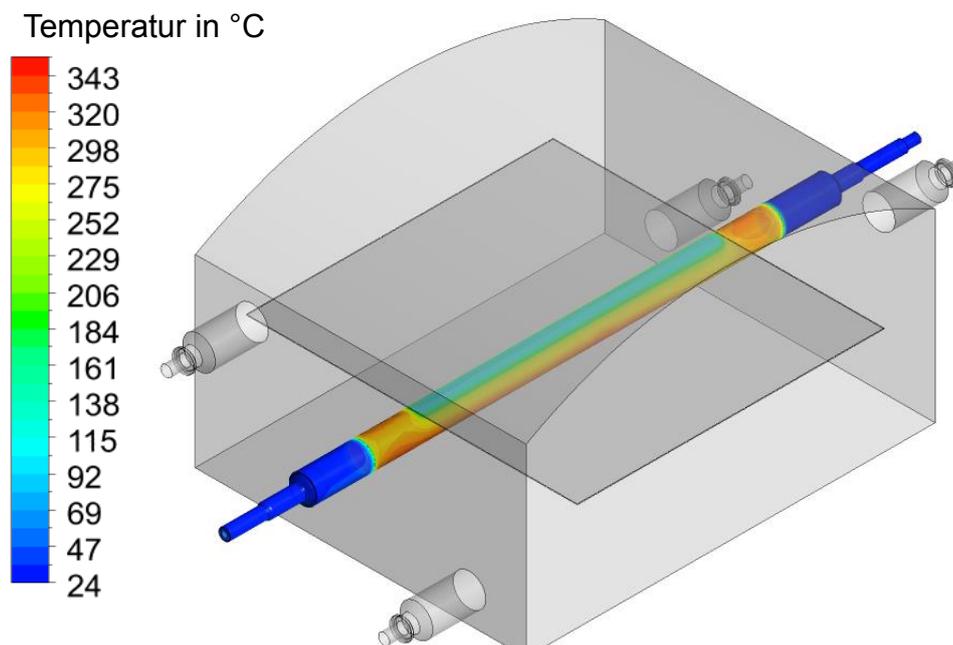


Abbildung 3-24: Temperaturverteilung auf der Ofenrollenoberfläche

Ein detaillierter Vergleich zwischen Messung im Technikum und Simulation ist hier aufgrund der unterschiedlichen Ofengeometrien, eingesetzten Brenngasen, der Rotation im Betrieb etc. nicht möglich. Tendenziell erscheinen die berechneten Oberflächentemperaturen aber als plausibel. Um dies zu untermauern wurde in einer weiteren Simulation auf das Band verzichtet, vgl. **Abbildung 3-25**. Ohne das Band liegen die berechneten Oberflächentemperaturen auf der Ofenrolle zwischen 290-350 °C. Sie sind damit durchschnittlich etwa 10-20 K höher. Ohne die Abschattung durch das Band ist die Temperaturverteilung auch insgesamt gleichmäßiger. Der berechnete Wärmeeintrag in die Ofenrolle liegt hier bei 369 kW. Messtechnisch gibt es hierfür keinen Vergleichswert, da im Vorwärmofen nicht ohne Band gemessen werden konnte (dies kommt nur bei einem Bandriss vor oder wenn der Ofen

stillsteht). Die maximal im Betrieb gemessene Kühlleistung betrug 331 kW bei einer Bandbreite von 1,026 m.

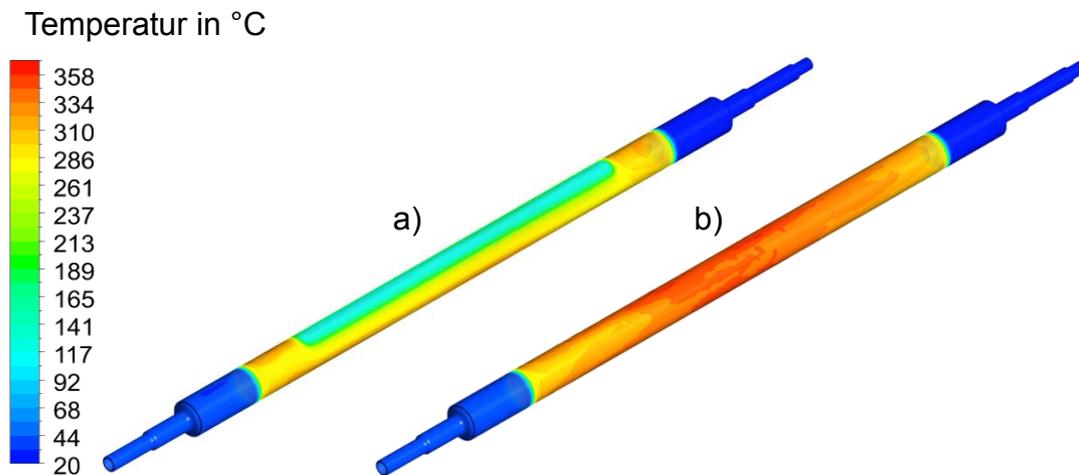


Abbildung 3-25: Temperaturverteilung auf der Ofenrollenoberflächen, a) mit Bandedeinfluss, b) ohne Bandedeinfluss

Zur Vervollständigung wurde auch in der CFD der Ofenrollenemissionsgrad variiert. Hierzu wurde der Emissionsgrad der Ofenrollenoberfläche auf 0,3 verringert.

Abbildung 3-26 zeigt die Temperaturverteilung der IST-Ofenrolle mit $\epsilon_R = 0,9$ und mit $\epsilon_R = 0,3$.

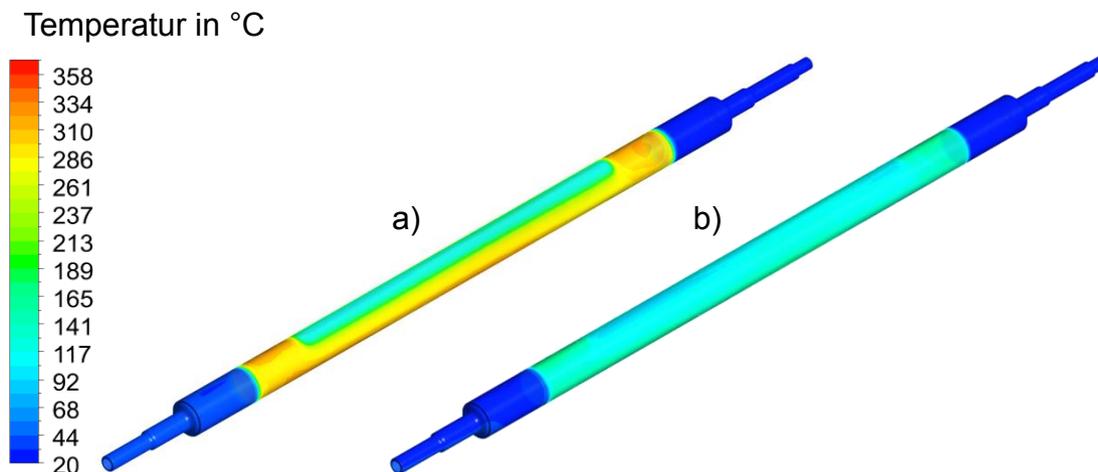


Abbildung 3-26: Temperaturverteilung auf der Ofenrollenoberfläche
a) $\epsilon_R = 0,9$, b) $\epsilon_R = 0,3$

Durch die Senkung des Emissionsgrads sinkt die berechnete Kühlleistung auf 127 kW (294 kW bei $\epsilon_R = 0,9$) und zudem sinken die Oberflächentemperaturen der

Ofenrolle. Diese liegen zwischen 100 – 170 °C. Dieses Ergebnis deckt sich mit den im Technikum erzielten Ergebnissen des gekühlten Aluminiumzylinders.

3.6.2 FEM-Berechnung der Ofenrolle

Die mittels CFD berechnete Temperaturverteilung im Rollenkörper wurde anschließend in die FEM-Simulation in ANSYS Mechanical ® exportiert. Sie wird neben den mechanischen Randbedingungen als Temperaturrandbedingung in der FEM-Simulation verwendet (vgl. Abbildung 2-22). Nachfolgende **Abbildung 3-27** zeigt die mechanischen Randbedingungen.

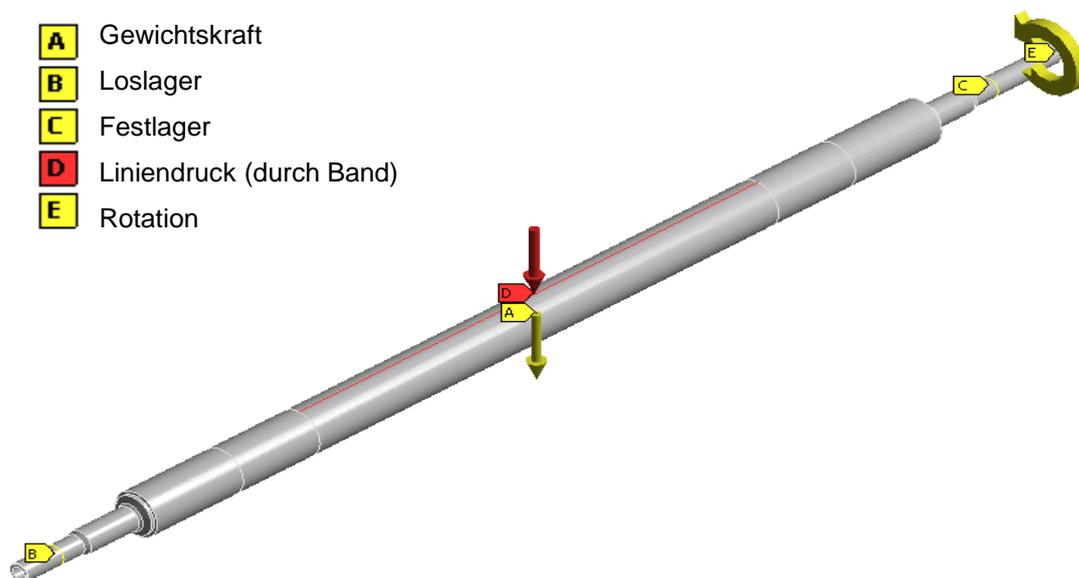


Abbildung 3-27: Mechanische Randbedingungen der ANSYS Mechanical Simulation

Das FEM-Modell wurde zu Beginn anhand einer kalten Ofenrolle und mit analytischen Festigkeitsberechnungen verifiziert. **Abbildung 3-28** zeigt die Spannungsverteilung der Von-Mises-Vergleichsspannung in der kalten Ofenrolle. Die maximal errechnete Spannung liegt hier am linken Zapfen der Ofenrolle und wird durch einen kleinen Radius hervorgerufen. Diese Stelle liegt nicht im thermisch belasteten Bereich der Ofenrolle und der Wert ist weit unterhalb der Dehngrenze, sodass hier keinerlei Maßnahmen notwendig sind. Die maximale Spannung im Rollenmantel, die größtenteils durch Biegung hervorgerufen wird liegt in der Mitte der

Ofenrolle und beträgt ca. 19 MPa. Der durch Festigkeitsberechnung ermittelte Wert der maximalen Biegespannung liegt bei 19,79 MPa.

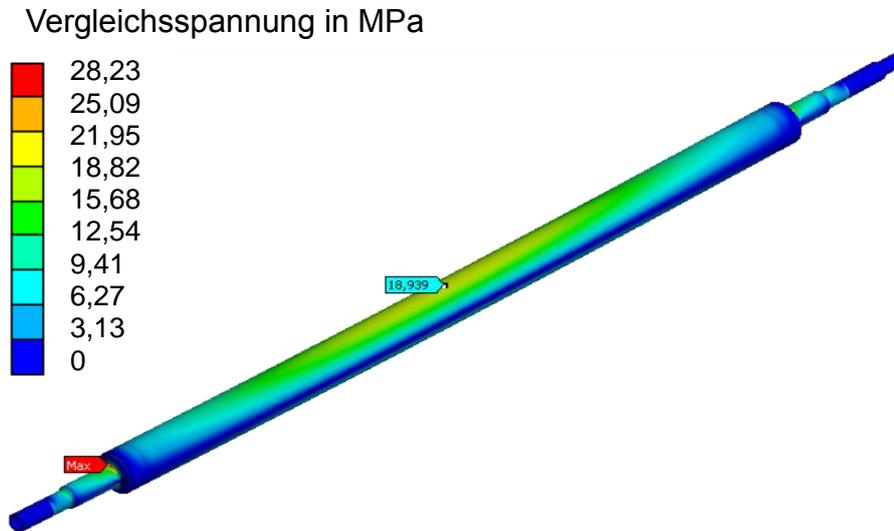


Abbildung 3-28: Spannungsverteilung (Von-Mises-Vergleichsspannung) der kalten (20°C) Ofenrolle

Zu den Belastungen durch das Eigengewicht und das Band kommen thermische Spannungen durch Temperaturunterschiede im Material dazu. Hierbei kann es passieren das die berechnete Spannung oberhalb der Streckgrenze bei der entsprechenden Temperatur liegt, was in der Realität zu einer Verfestigung und/oder plastischen Verformung führt. Dies kann die FEM-Berechnung nicht darstellen und gibt somit die Spannung der Streckgrenze aus. Hier setzt das in Kapitel 2.7.2 vorgestellte bi-lineare Materialmodell an. Die Spannung wird bis zur Zugfestigkeit des Werkstoffs bei der entsprechenden Temperatur linearisiert. Eine Belastung die sich nahezu ausschließlich aufgrund der Länge und des Gewichts der Ofenrolle und des Bandes ergibt, ist die Biegespannung. **Abbildung 3-29** zeigt die aus der Biegespannung resultierende Durchbiegung im kalten Zustand und im in der CFD berechneten Betriebszustand für die IST-Ofenrolle (Abbildung 3-24). Im kalten Zustand liegt die Durchbiegung bei maximal 1,6 mm in der Mitte der Ofenrolle. Die sich aufgrund der Durchbiegung ergebende Biegespannung stellt hier auch die Hauptbelastung dar. Im berechneten Betriebszustand im Ofen liegt die Durchbiegung um das 8,5 fache höher bei 13,6 mm, ebenfalls in der Mitte der Ofenrolle. Dies allein führt bereits zu einer erheblichen und aufgrund der Rotation wechselnden Belastung.

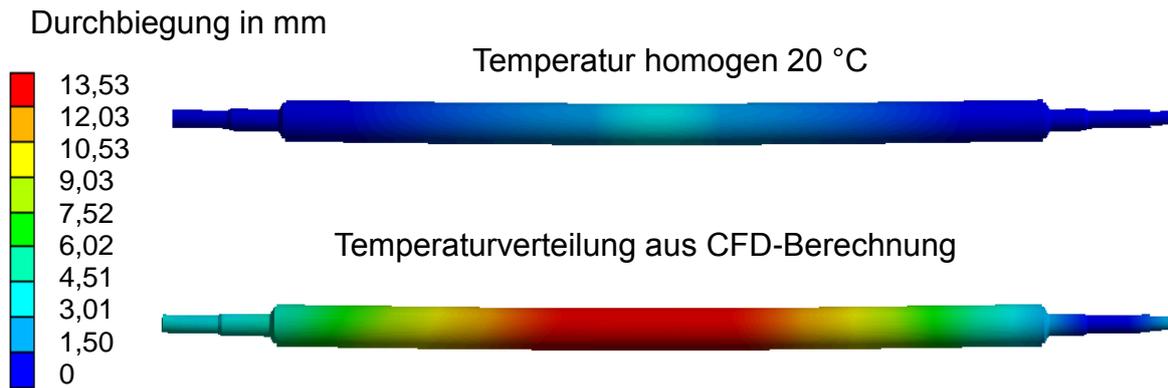


Abbildung 3-29: Berechnete Durchbiegung der IST-Ofenrolle (kalt und mit berechneter Temperaturverteilung)

Betrachtet man die Vergleichsspannungen sieht man ein deutlich verändertes und kaum mit dem kalten Zustand vergleichbares Bild, vgl. **Abbildung 3-30**.

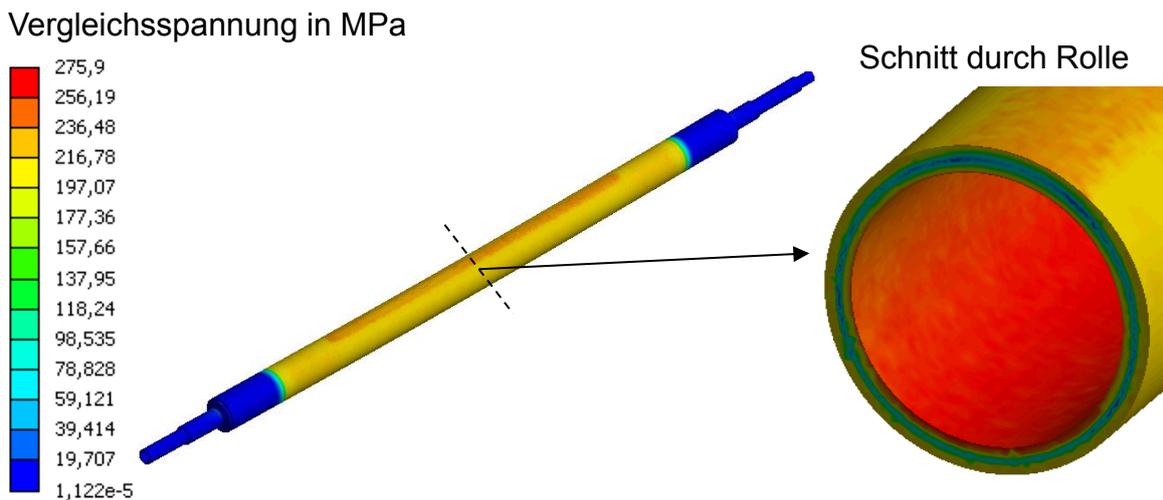


Abbildung 3-30: Spannungsverteilung (Von-Mises-Vergleichsspannung) der Ofenrolle im berechneten Betriebszustand

Es kommt bei Betrieb im Ofen zu zusätzlichen thermischen Spannungen durch Temperaturdifferenzen im Bauteil. Hier gilt vereinfacht $\sigma_{th} \sim E \cdot \alpha_l \cdot \Delta T$. Aufgrund der temperaturabhängigen Festigkeitswerte kann aus Abbildung 3-30 nicht auf mögliches Bauteilversagen geschlossen werden. Es zeigt lediglich wo die absoluten Spannungen liegen. Diese sind aufgrund des hier höheren E-Moduls an den kalten Bauteilstellen zu finden (am Innendurchmesser und im kalten Bereich auf der Ofenrolle unterhalb des Bandes). Dort sind allerdings auch die Festigkeitswerte des Werkstoffs höher. **Tabelle 3-4** zeigt einige verwendete Materialdaten. Diese erklären

die tendenziell höheren Spannungswerte im kalten Ofenrollenbereich. Das E-Modul fällt wesentlich stärker ab, als der Wärmeausdehnungskoeffizient bei höheren Temperaturen ansteigt. Das Produkt beider Materialwerte wird mit steigender Temperatur kleiner.

Tabelle 3-4: Verwendete Materialdaten in der FEM-Berechnung

| Temperatur in °C | Wärmeausdehnungskoeffizient (α_l) in 10E-6/K von 20°C | E-Modul in MPa | Streckgrenze ($R_{p0,2}$) in MPa | Zugfestigkeit (R_m) in MPa |
|------------------|--|----------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 20 | 13,5 | 200 | 240 | 500* |
| 100 | 14 | 180 | 220 | * |
| 200 | 14,5 | 173 | 200 | * |
| 300 | 15 | 161 | 180 | * |
| 400 | 15,5 | 155 | 170 | * |

*Zugfestigkeit ist lt. Datenblatt zwischen 400-600 MPa. Die Werte bei höheren Temperaturen wurden anhand der Steigung zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit bei 20 °C ermittelt.

Abbildung 3-31 zeigt exemplarisch das erstellte Materialmodell mit bi-linearem Werkstoffverhalten, vgl. Kapitel 2.7.2.

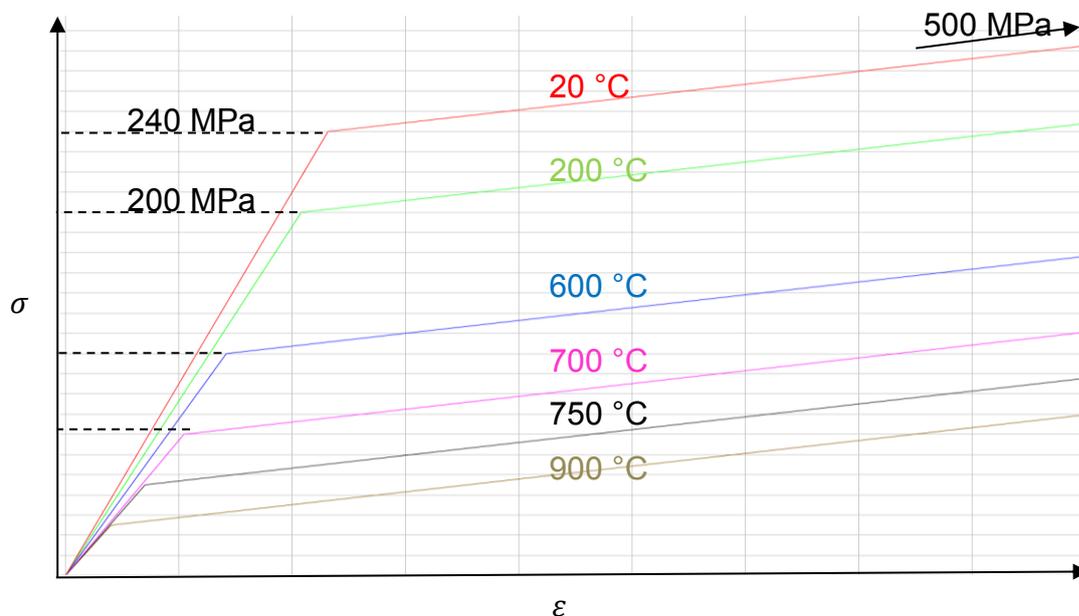


Abbildung 3-31: Schematische Darstellung des erstellten bi-linearen Materialmodells (implementiert in die FEM-Berechnung)

Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf steigt bei jeder Temperatur linear bis zur Streckgrenze und dann ebenfalls linear bis zur Zugfestigkeit. **Abbildung 3-32** zeigt die berechnete Normalspannung in Tangentialrichtung der Ofenrolle im Rollenmantel, welche sich direkt aus der thermischen Spannung herleiten.

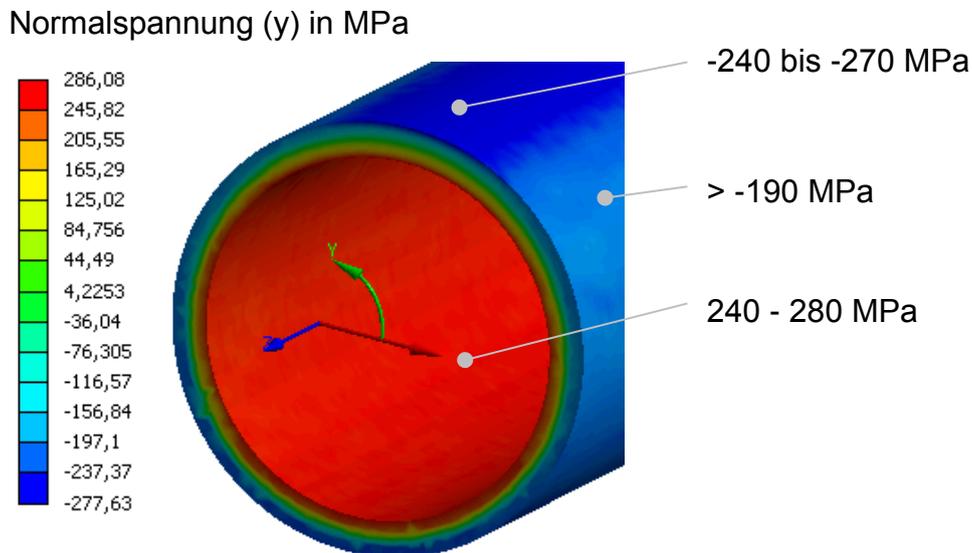


Abbildung 3-32: Berechnete Normalspannung in Tangentialrichtung im Rollenmantel

Wie bereits in Kapitel 2.4.2 (Abbildung 2-20) anhand einer einfachen Wand beschrieben bilden sich die höchsten thermischen Spannungen im Rollenmantel, siehe hierzu den Schnitt durch die Rolle in Abbildung 3-30. Am Außen- und am Innendurchmesser bilden sich die höchsten absoluten Spannungswerte, wobei diese am Innendurchmesser noch etwa um 10 MPa höher liegen. Dort ist auf Basis der berechneten Vergleichsspannung und Normalspannung am wahrscheinlichen mit einer Verfestigung und/oder plastischen Verformung zu rechnen. Auch in den Bereichen wo die Ofenrollenaußentemperatur 300 °C übersteigt (vgl. Abbildung 3-24) liegt die berechnete Spannung höher als die zulässige (Streckgrenze). An der dem Band zugewandten Rollenfläche (Bereich der vom Band verschattet wird) aufgrund der berechneten Normalspannungen mit erhöhter plastischer Verformung zu rechnen. Dies sind Indizien für eine grenzwertige Belastung der IST-Ofenrollen. Sehr wahrscheinlich kommt es aufgrund der thermischen Spannungen zu Verfestigungen und/oder plastischen Verformungen in einem großflächigen Bereich am Innendurchmesser und auch teilweise am Außendurchmesser des Rollenmantels.

Ein weiteres Indiz hierfür ist die kurze Lebensdauer der Ofenrollen von nur knapp 1-1,5 Jahren, wobei auch Unwuchten (die in der FEM nicht berücksichtigt wurden) eine zentrale Rolle beim Versagen der Rollen spielen.

3.6.3 Fazit FSI-Berechnung

Die detaillierte Berechnung der Temperatur- und Spannungsverteilung der Ofenrolle konnte den Stand des Wissens um folgende Faktoren erweitern:

- Aufgrund des Bandes kommt es zu starken Temperaturgradienten auf der Ofenrollenoberfläche, die sich nachfolgend in Form von erhöhten thermischen Spannungen bemerkbar machen.
- Die thermischen Spannungen im Rollenmantel (insbesondere an der Mantelinnenseite) stellen die höchsten Belastungen dar. Verfestigung und/oder plastische Verformung ist hier wahrscheinlich.

Die Rechenzeiten dieses FSI-Modells sind relativ lang. Der Rechenaufwand für eine CFD-Berechnung lag bei mehreren Wochen und der der FEM-Berechnung bei ca. 8-10h pro Berechnung. Die Möglichkeit von Parameterstudien zur Entwicklung neuer Ofenrollenkonzepte ist hierdurch nicht gegeben. Der Fokus der Untersuchung wird nachfolgend auf die Betrachtung der thermischen Spannungen gelegt, da zum einen alle externe Einflüsse durch Band, Gewicht und Rotation nur bedingt beeinflussbar sind und die thermischen Spannungen direkt durch die angestrebte Reduzierung des Wärmestroms in die Ofenrolle beeinflusst werden. Es wurde daher ein vereinfachtes Rechenmodell entwickelt, welches nur die thermische Spannung im Rollenmantel betrachtet. Dieses ermöglicht wesentlich schnellere Rechenzeiten und wird im folgenden Kapitel beschrieben.

3.7 Energieeinsparpotenziale

Der in dieser Arbeit betrachtete Vorwärmofen produziert 400.000 – 450.000 Tonnen Stahl pro Jahr und ist dabei etwa 8000-8400 h in Betrieb. Hiermit lassen sich die Energieeinsparpotenziale an den Ofenrollen exemplarisch darstellen.

Randbedingungen der Berechnung sind in **Tabelle 3-5** aufgelistet und die Ergebnisse der Berechnung in **Abbildung 3-33** dargestellt. Als mittlere Kühlverluste wurden die gemessenen Kühlverlustwerte aus **Abbildung 3-6** und **Abbildung 3-7** verwendet.

Tabelle 3-5: Randbedingungen zur Berechnung von Energieeinsparpotenzialen (für eine Anlage)

| Parameter | Mindestwert | Maximalwert | Einheit |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------------|
| Betriebsstunden | 8000 | 8400 | h |
| Mittlerer Kühlverlust | 256 | 278 | kW |
| Anzahl gekühlter Ofenrollen | 3,00 | 4,00 | Stück |
| Energieverlust | 5.256.000,00 | 9.340.800,00 | kWh |
| Heizwert Erdgas | 10,73 | 10,73 | kWh/m ³ |

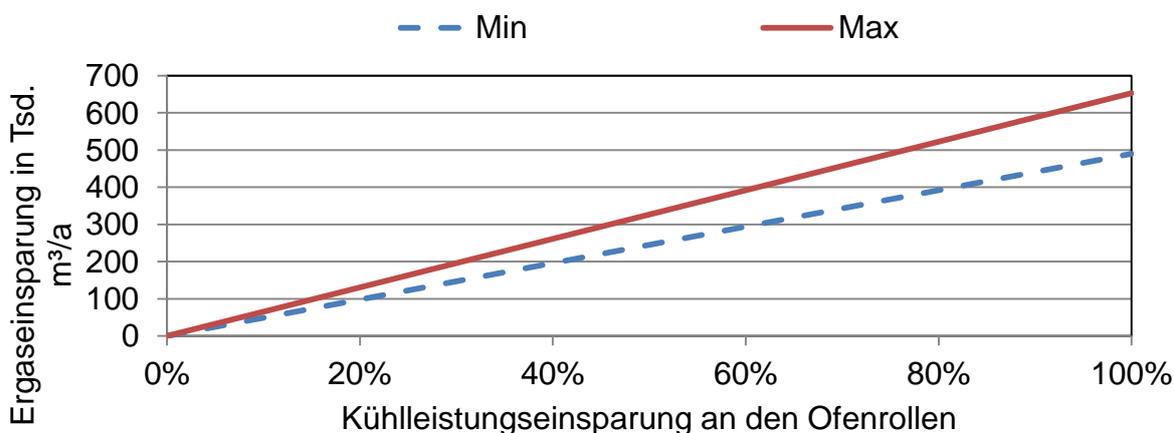


Abbildung 3-33: Erdgaseinsparung in Abhängigkeit der Kühlleistungseinsparung an den Ofenrollen

Es ergibt sich ein Einsparpotenzial von ca. 49 – 65 Tsd. m³ Erdgas bei 10% Kühlleistungseinsparung pro Jahr. Dies entspricht ca. 98 -130 t CO₂ pro Jahr. Bei aktuellen Gaspreisen von 1,6 – 1,9 Cent/kWh ergeben sich somit bei 10% Kühlleistungseinsparung etwa 10-13 Tsd. € Erdgaskosteneinsparungen pro Jahr und pro Anlage. Hierzu ist anzumerken, dass sich der Gaspreis für Gewerbekunden aktuell auf einem sehr niedrigen Niveau befindet. Der durchschnittliche Gaspreis lag

2012 noch bei 2,96 Cent/kWh, also etwa. 170% höher (ISPEX, 2017). Trotz des niedrigen Erdgaspreises addieren sich die Kosteneinsparungen bei ca. 6 Anlagen dieses Typs (4 in Deutschland, eine in Österreich und eine in den Niederlanden) und angestrebten Kühlleistungseinsparungen von 20-50% zu 120– 234 Tsd. € pro Jahr. Die Forschungs- und Entwicklungskosten, auch vor dem Hintergrund eventuell wieder steigender Erdgaspreise, amortisieren sich im Erfolgsfall innerhalb von 2-3 Jahren.

3.8 Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Die Voruntersuchungen können zusammengefasst folgende Aspekte aufzeigen:

- Die Ofenraumtemperaturen im Bereich der Rollen liegen zwischen 670 – 1424°C und sind zeitlich stark wechselnd.
- Die Ofenatmosphäre enthält einstellige Volumenprozentwerte an CO und H₂ sowie zweitweise hohe Konzentrationen an O₂, die durch Modulation der Brennerleistung und damit verbundener Anpassung des Luftverhältnisses entstehen.
- Die Kühlleistung der Rollen liegt zwischen 200 und 331kW pro Rolle, je nach Ofenraumtemperatur und Bandbreite. Das Band fungiert in Bezug auf die Rolle als Strahlungsschirm.
- Die Heißgaskorrosionsversuche zeigten, dass keiner der ausgewählten Hochtemperaturwerkstoffe den Bedingungen im Ofen über lange Zeit ungekühlt bei über 1.000 °C Ofenraumtemperatur standhält. Eine Variante ohne Kühlung kann ausgeschlossen werden. Materialtemperaturen sollten in jedem Fall unter 1.000 °C liegen.
- Im Technikum wurde an den IST-Ofenrollen eine Kühlleistung von 200–230 kW bei einer Ofenraumtemperatur von ca. 1200 °C gemessen. Die gemessenen Materialtemperaturen lagen bei 260 – 430°C bzw. 220 – 316 °C.
- Zur Untersuchung des Einflusses des Oberflächenemissionsgrads auf die Kühlleistung und die Materialtemperaturen wurde ein gekühlter Aluminiumzylinder getestet. Dieser wies bei gleicher Ofenraumtemperatur nur etwa die halbe Kühlleistung auf. Zudem wurden die Materialtemperaturen etwa halbiert.

- Die gekoppelten CFD-FEM-Simulationen (FSI-Modell) konnten das Wissen über die Temperatur- und Spannungsverteilung in und auf den Ofenrollen erweitern. Tendenziell konnten ausreichende Übereinstimmungen mit zahlreichen Messwerten gefunden werden. Der Einfluss des Bandes und des Emissionsgrads der Ofenrollenoberfläche konnte dargestellt werden. Das FSI-Modell ist allerdings aufgrund des Detailgrads für eine weitere Entwicklung von Ofenrollenkonzepten unhandlich, da es sehr lange Rechenzeiten benötigt.
- Die Energieeinsparpotenziale sind aufgrund der Betriebsstunden der Vorwärmöfen von 8.000 – 8.400 im Jahr sehr hoch. Bereits durch 10% Kühlleistungseinsparung können pro Anlage im Mittel 57 Tsd. m³ Erdgas pro Jahr eingespart werden. Im Erfolgsfall ist von einer schnellen Amortisation der Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen auszugehen.

4 Analytische und numerische Untersuchung zur Entwicklung von Ofenrollenkonzepten

4.1 Analytisches Modell zur Berechnung des Wärmeeintrags in die Ofenrolle und der Materialtemperaturen im Rollenmantel

Auf Basis der in Kapitel 2.3 gezeigten Gleichungen wurde ein Modell entwickelt, welches die Möglichkeit bietet verschiedene Parameter wie beispielweise Bandbreite und Ofenraumtemperatur zu variieren und die Auswirkung auf die Kühlleistung der aktuellen Ofenrollen zu bestimmen. Die vorgegebenen Randbedingung des Modells zu Berechnung der Ofenrollen-Kühlleistung sind in **Tabelle 4-1** aufgelistet.

Tabelle 4-1: Verwendete Randbedingungen zur Berechnung der Kühlleistung in Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2

| Parameter | Wert | Einheit |
|---------------------------|------|----------------------|
| b_O | 2,2 | m |
| D_R | 0,15 | m |
| T_R (Startwert) | 300 | °C |
| ε_R | 0,9 | |
| ε_W | 0,85 | |
| ε_B | 0,4 | |
| α_{GR} (berechnet) | 30 | W/(m ² K) |

Das Modell zur Kühlleistungsberechnung wurden mit den verfügbaren Messdaten für zwei Ofenrollen verglichen, **Abbildung 4-1** und **Abbildung 4-2**. Bei Ofenrolle 6 beträgt die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Kühlleistung durchschnittlich 2,90%, minimal 0,01% und maximal 23%. Zu den maximalen Abweichungen ist anzumerken, dass diese sich zu den Zeitpunkten ergeben, an denen die Ofenraumtemperatur und/oder die Bandbreite sich ändert. Die gemessene Kühlleistung ändert sich in diesen Phasen überproportional stark. Das Modell hat sehr kleine Abweichungen wenn ein stationärer Temperatur- und Bandzustand vorliegt.

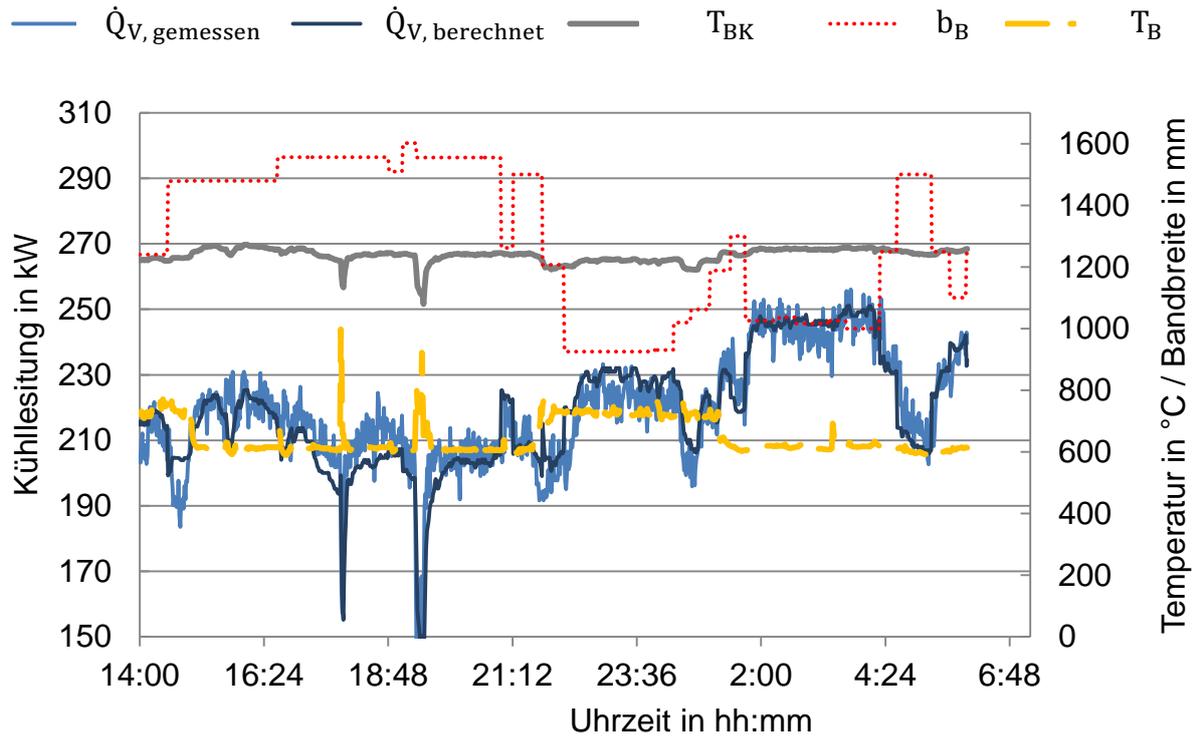


Abbildung 4-1: Validierung des analytischen Modells mit den aufgenommenen Messwerten von Ofenrolle 6

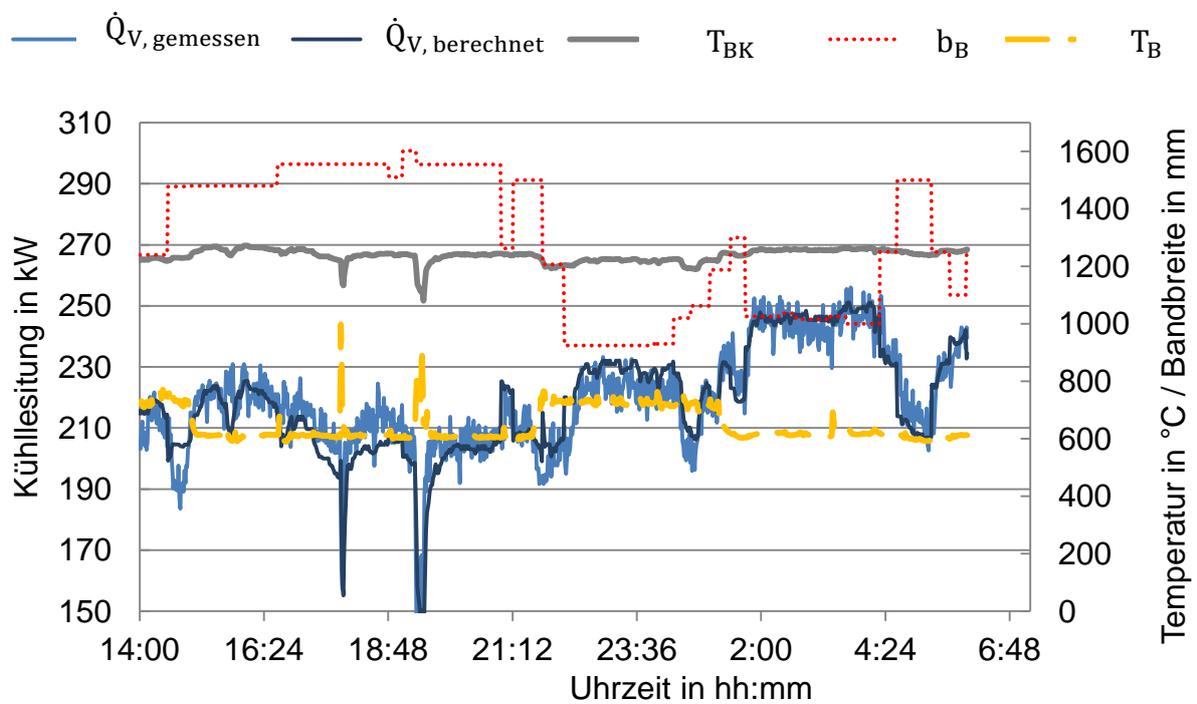


Abbildung 4-2: Validierung des analytischen Modells mit den aufgenommenen Messwerten von Ofenrolle 3

Bei Ofenrolle 3 beträgt die Abweichung zwischen berechneter und gemessener Kühlleistung durchschnittlich 8,75%, minimal 0,03% und maximal 46%. Die höheren Abweichungen im Vergleich zur Ofenrolle 6 liegen hier größtenteils an den häufigeren Schwankungen von Ofenraumtemperatur und Bandbreite im Messverlauf. Allerdings wird auch in stationären Phasen die Kühlleistung etwa 9% zu niedrig berechnet. Die Ofenraumtemperaturen liegen im Vergleich zu Ofenrolle 6 etwa 50 K höher. Der Strahlungseinfluss ist hier noch dominanter. Im Modell wird die gegenseitige Reflexion der Wände sowie die Absorption und Emission des Gases vernachlässigt, was mitunter der Grund für diese höhere Abweichung bei höheren Temperaturen sein könnte. Vorstellbar wäre, dass der Einfluss der Reflexion der Strahlung vom Band auf die Ofenrolle stärker wird. Weiterhin ist aber auch die Änderung der Emissionsgrade der Oberflächen bei höheren Ofenraum- und Materialtemperaturen ein möglicher Grund. Insgesamt sind die Abweichungen für ein analytisches Modell ausreichend gering. Anhand des analytischen Modells können hinreichend genaue Aussagen über die Kühlleistung der Ofenrollen getroffen werden.

Im Folgenden wird das Modell um die Berechnung der Materialtemperaturen erweitert. **Abbildung 4-3** zeigt schematisch das Modell, die berücksichtigten Einflüsse und die Parameter, die damit berechnet werden können. Das Modell berücksichtigt die wichtigsten äußeren Einflüsse auf das Material. Es wurde zur Entwicklung neuer Ofenrollenkonzepte zum einen um eine mögliche Beschichtung und zum anderen um eine weitere Rollenschale erweitert. Dies ermöglicht es auch, beschichtetete Ofenrollen oder einen möglichen mehrschaligen Ofenrollenaufbau exemplarisch zu berechnen. Es kommt je nach Temperaturgefälle in den Schalen zu einer Spaltbildung, die ebenfalls im Modell anhand der thermischen Ausdehnung des Materials berechnet werden kann. Inwieweit sich ein möglicher Spalt auswirkt, ist unbekannt. Es wurde hierzu ein Spaltwirkungsfaktor eingebaut, der zwischen 0 und 100% variiert werden kann. Bildet sich der Spalt vollständig um den Durchmesser, liegt dieser Faktor bei 100%. In der Realität kommt es aber zwangsweise zu Kontakt zwischen den Schalen, wodurch der Faktor unter 100% liegt.

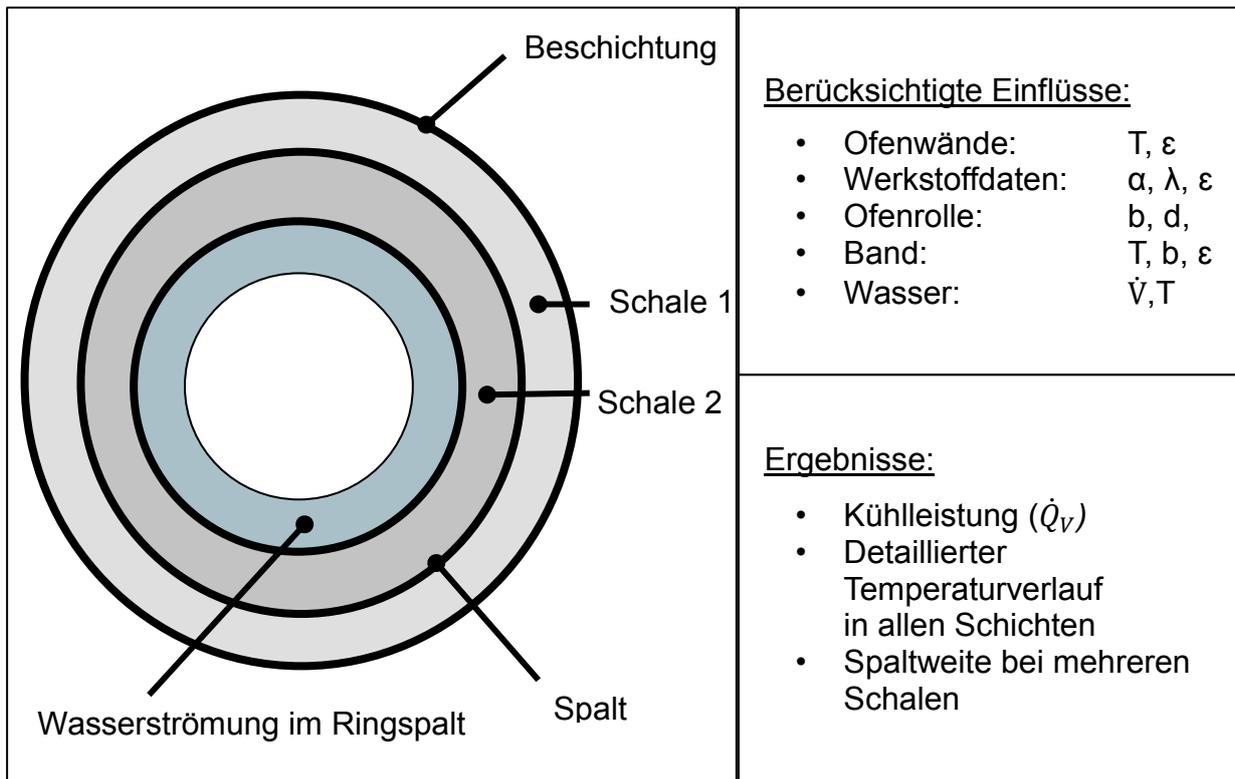


Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung des erstellten analytischen Berechnungsmodells

Abbildung 4-4 zeigt die mit dem Modell berechnete Temperaturverteilung für die IST-Ofenrolle. Die berechneten Temperaturen liegen zwischen 279 °C außen und 57 °C innen.

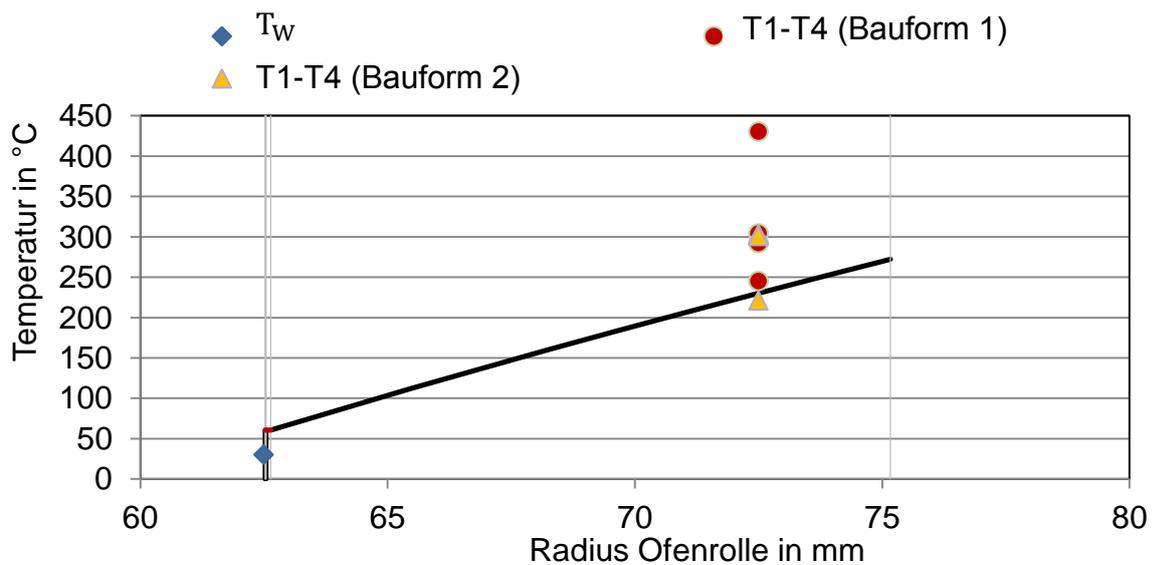


Abbildung 4-4: Modelhaft berechnetes Temperaturgefälle in der IST-Ofenrolle (s=12,5 mm)

Die berechneten Außentemperaturen liegen tendenziell etwas niedriger als die gemessenen, was vermutlich auch am Messverfahren liegt. Es wurde in Bohrungen im Rollenmantel gemessen. Die Abweichung zwischen Berechnung und Messung beträgt zwischen -4 und + 105 K. Im Fall des Aluminiumzylinders ergibt sich der in **Abbildung 4-5** gezeigte Temperaturverlauf in der Berechnung. Es wurde in drei verschiedenen Tiefen im Aluminiumzylinder gemessen.

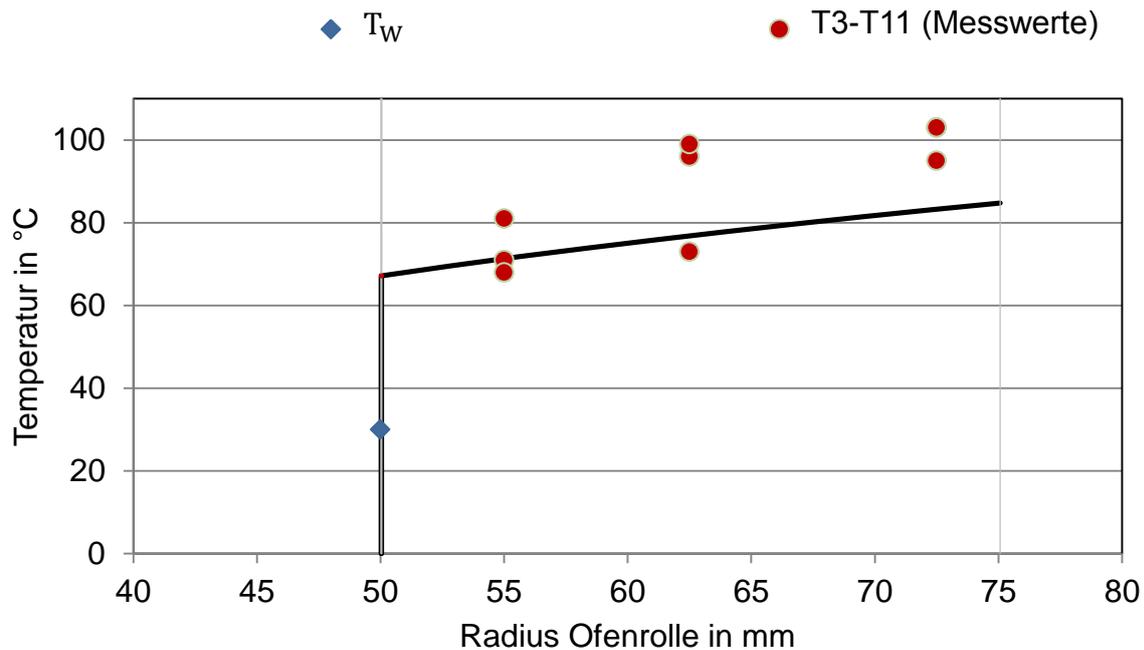


Abbildung 4-5: Modelhaft berechnetes Temperaturgefälle des Aluminiumzylinders ($s=25$ mm)

Die gemessenen Werte liegen tendenziell näher an den berechneten als bei der IST-Ofenrolle. Es kommt zu Abweichungen von maximal -3 bis +20 K. Die Außentemperaturen werden also bei beiden Berechnungen im Vergleich zur Messung unterschätzt. Mit dem Wissen über die Genauigkeit und die entstehenden Abweichungen stellt das Modell ein gutes Werkzeug dar, um mit kurzer Rechenzeit den Einfluss von Randbedingungen auf die Ofenrolle und den Kühlverlust abzuschätzen. Parameterstudien sind somit leicht möglich. Es wird nachfolgend für die Entwicklung von Ofenrollenkonzepten verwendet.

4.2 Entwicklung eines thermisch-statischen FEM-Modells

Da die thermischen Spannungen als größte Belastung identifiziert werden konnten, wurde ein einfacheres und weniger rechenintensives thermisch-statisches FEM-Modell entwickelt, welches nur die thermischen Spannungen im Querschnitt des Rollenmantels berechnet. In dieses Modell wurde wiederum das bi-lineare Materialmodell implementiert. Es wird hierbei auf die rechenintensive CFD-Berechnung verzichtet und nur ein Querschnitt des Rollenmantels betrachtet. Dies beschleunigt die Rechenzeit um mehr als das 100-fache. Das Modell verfolgt den Ansatz, dass die thermischen Spannungen und die dadurch entstehende Verformungen, neben den entstehenden Unwuchten, zum Versagen der Ofenrollen führen. Belastungen durch Rotation, Eigengewicht, Bandgewichtung und auch Temperaturunterschiede über der Länge der Ofenrolle werden außer Acht gelassen. Die Randbedingungen des analytischen Modells werden in die thermische FEM-Berechnung implementiert. Durch dieses Vorgehen wurde eine höhere Auflösung des Temperaturverlaufs im Rollenmantel erreicht, **Abbildung 4-6**. Die Unterschiede zwischen analytischer und numerischer Berechnung sind allerdings gering.

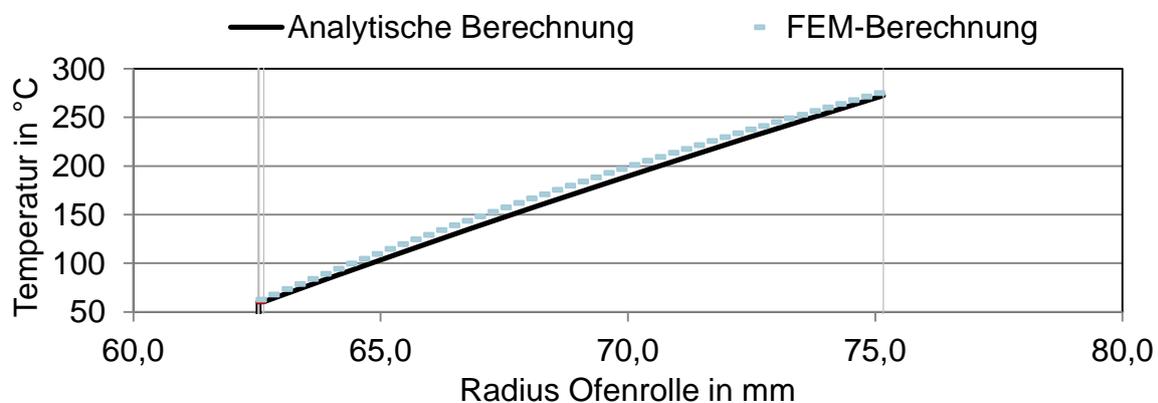


Abbildung 4-6: Vergleich des analytischer und numerischer Berechnung des Temperaturverlaufs im Rollenmantel (bei 1243 °C Ofenraumtemperatur)

Anschließend wurden die berechnete Temperaturverteilung im Rollenmantel-ausschnitt erneut in ANSYS Mechanical als Randbedingung übertragen und die thermischen Spannungen berechnet. **Abbildung 4-7** zeigt exemplarisch die Randbedingungen und die Ergebnisse für die IST-Ofenrolle bei 1.320 °C

Ofenraumtemperatur und einer mittleren Wassertemperatur von 32 °C. Alle Berechnungen berücksichtigen keinen Bandeinfluss.

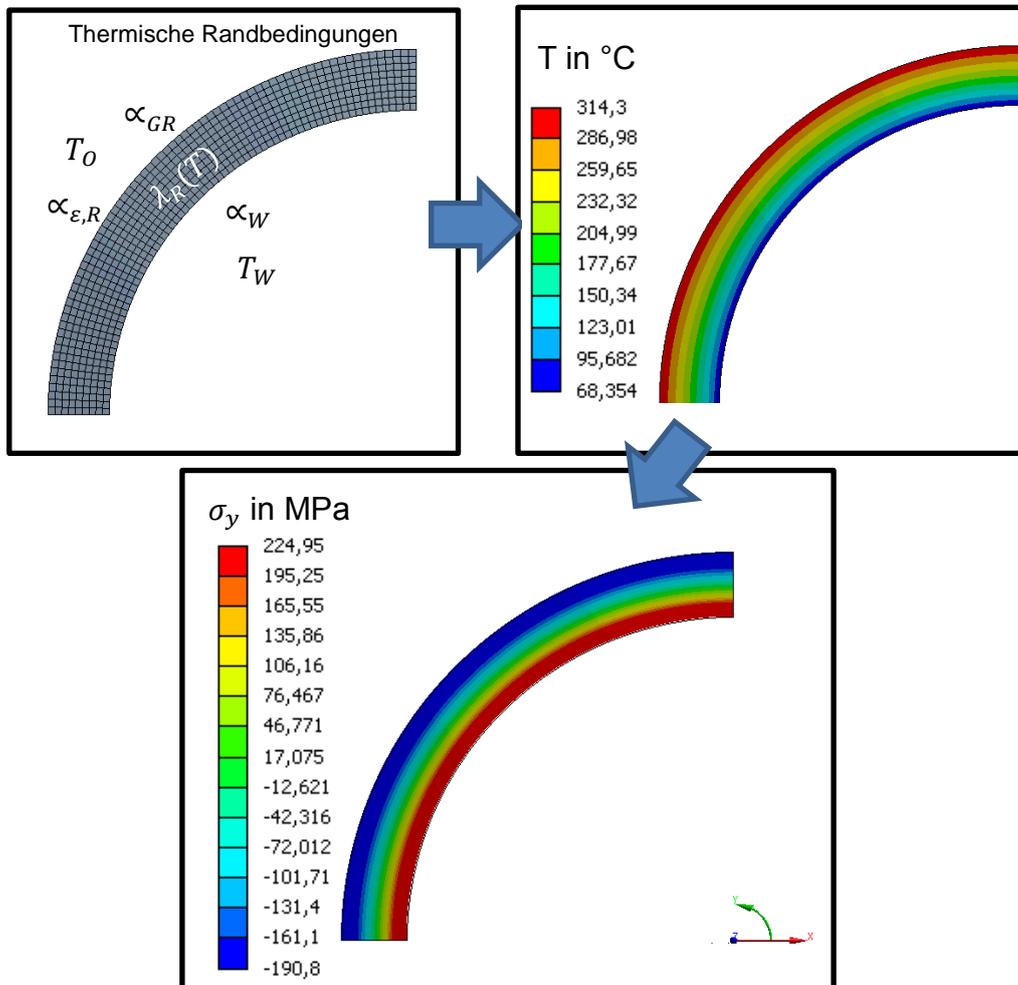


Abbildung 4-7: Randbedingungen und Ergebnisse des thermisch-statischen FEM-Modells zur Vorhersage der thermischen Spannungen im Rollenmantel (Ofenraumtemperatur 1.320 °C / Wassertemperatur 32 °C)

Die errechnete Außentemperatur am Rollenmantel deckt sich gut mit der in der CFD-Simulation errechneten Oberflächentemperatur an der Unterseite der Ofenrolle sowie mit einigen der aufgenommenen Messwerte im Technikum, vgl. Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16. Der Normalspannungsverlauf ergibt sich daher ausschließlich durch die Temperaturbelastung. Die errechneten Spannungen sind niedriger als in der FSI-Berechnung. Hier ist die Normalspannung am Außenmantel etwa 60 MPa höher und am Innenmantel etwa 87 MPa höher. Der prinzipielle Verlauf der Normalspannungen im Rollenmantel ist allerdings sehr ähnlich, vgl. Abbildung 3-32. Durch die hier

berechnete rein thermische Spannung kommt es am Außenmantel zu einer Überschreitung der temperaturabhängigen Streckgrenze ($Rp_{0,2(300^{\circ}C)} = 180MPa$) von etwa. 10 MPa, vgl. Tabelle 3-4. Am Innendurchmesser liegen zwar die höchsten thermischen Spannungen vor, diese liegen hier aber knapp unterhalb der temperaturabhängigen Streckgrenze ($Rp_{0,2(60^{\circ}C)} = 230MPa$). Für einen Vergleich mit anderen Ofenrollenkonzepten ist diese vereinfachte Berechnung ausreichend. Der in Abbildung 4-7 berechnete Normalspannungsverlauf dient somit als Referenz für den Vergleich mit anderen Ofenrollenkonzepten. Zur besseren Vergleichbarkeit von Ofenrollenkonzepten wurde eine Darstellung gewählt, die den Temperaturverlauf, den Betrag der Normalspannung in Tangentialrichtung und die temperaturabhängige Streckgrenze des Werkstoffs darstellt. Hierin wird der „kritische Bauteilbereich“, indem die berechnete Normalspannung die zulässige Spannung des Werkstoffs (Streckgrenze) überschreitet, rot markiert, **Abbildung 4-8**.

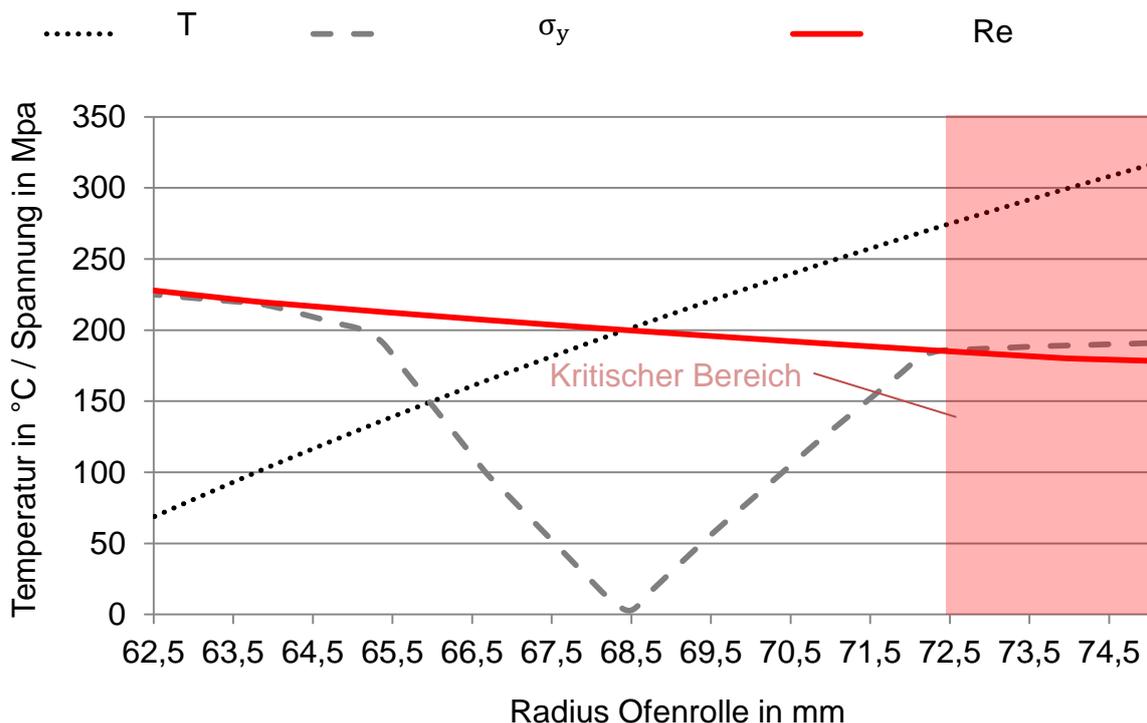


Abbildung 4-8: Darstellung der berechneten Werte für Tangentialspannung und Temperatur sowie der Streckgrenze zur Bestimmung kritischer Bauteilbereiche für die IST-Ofenrolle

Man erkennt, dass der kritische Bauteilbereich für die IST-Rolle bei einem Radius von 72,5-75 mm liegt. Zudem wird die Streckgrenze am Innenradius des Rollenmantels bei 62,5-63,5 mm nur um wenige MPa unterschritten. Die IST-Rolle ist also bereits durch die thermischen Spannungen stark ausgereizt.

4.3 Entwicklung von Ofenrollenkonzepten anhand der analytischen und numerischen Modelle

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass im betrachteten Vorwärmofen gekühlte Stahl-Ofenrollen erforderlich sind. Vollkeramischen Ofenrollen wurden hier bereits getestet und brachen nach kurzer Betriebszeit (Gosemann, et al., 2011). Moderne hitzebeständigen Stahllegierungen haben ihre Einsatzgrenze bei den vorliegenden Belastungen bei etwa 900 °C, vgl. Kapitel 2.4.1. Schwankungen in der Ofenatmosphäre senken die Einsatzgrenze des Werkstoffs weiter ab. In den Langzeitkorrosionsversuchen getestete hitzebeständige Stahllegierungen zeigten Korrosionserscheinungen, die bereits bei Ofenraumtemperaturen von 700-1.000 °C und nach 5-7 Monaten, zum Ausfall der Rollen führen würden, vgl. Kapitel 3.3.

Das Ziel der Arbeit ist es, die abgeführte Wärme an das Kühlmedium zu minimieren. Im Wesentlichen wird die Wärme über Strahlung an die Rolle abgeführt. Die Außengeometrie der Ofenrollen ist durch den Prozess vorgegeben. Es gibt daher folgende Möglichkeiten die Wärmeabfuhr über die Ofenrollen zu reduzieren (siehe Gleichung 2.2):

- Erhöhung der Rollenoberflächentemperatur (werkstoffbegrenzt)
- Reduzierung des Emissionsgrads (werkstoff- und oberflächenabhängig)

Aus diesen Lösungsansätzen haben sich zwei verschiedene Strategien zur Weiterentwicklung ergeben:

1. Erhöhung der Rollentemperatur unter Berücksichtigung thermisch induzierter Spannungen
2. Reduzierung des Emissionsgrads durch andere Werkstoffe bzw. Veränderung der Rollenoberfläche unter Berücksichtigung auftretender Stoß- und Spannungsbelastungen

4.3.1 Anhebung der Ofenrollen-Oberflächentemperatur

Der Ansatz basiert auf der Anhebung der Rollenoberflächentemperatur, um so die Temperaturdifferenz zwischen Rollenoberfläche und Ofenwänden sowie Band zu senken. Damit wird der Wärmeeintrag in die Rolle und damit die entstehende Verlustleistung aus dem Ofenraum minimiert. Die maximal zulässige Manteltemperatur der Rolle ist auf 800 – 900 °C zu begrenzen, was eine sehr definierte Kühlung der Rolle erforderlich macht. Die erreichbare Energieeinsparung gegenüber den konventionell gekühlten Ofenrollen, liegt in diesem Bereich bei ca. 15-25%. Die aus den Rollen abzuführende Verlustleistung beträgt dann, je nach Ofenrollenposition und Bandbreite, 150-250 kW pro Rolle.

Wahl des Kühlmediums

Um das Temperaturgefälle im Rollenmantel zu senken und thermische Spannungen zu reduzieren, wäre es sinnvoll, ein anderes Kühlmittel einzusetzen, welches drucklos auch bei geringem Betriebsdruck deutlich über 100 °C einsetzbar ist. Luft als Kühlmedium erfordert aufgrund der sehr geringen spezifischen Wärmekapazität entweder sehr hohe Volumenströme oder sehr hohe Rücklauftemperaturen, vgl.

Abbildung 4-9.

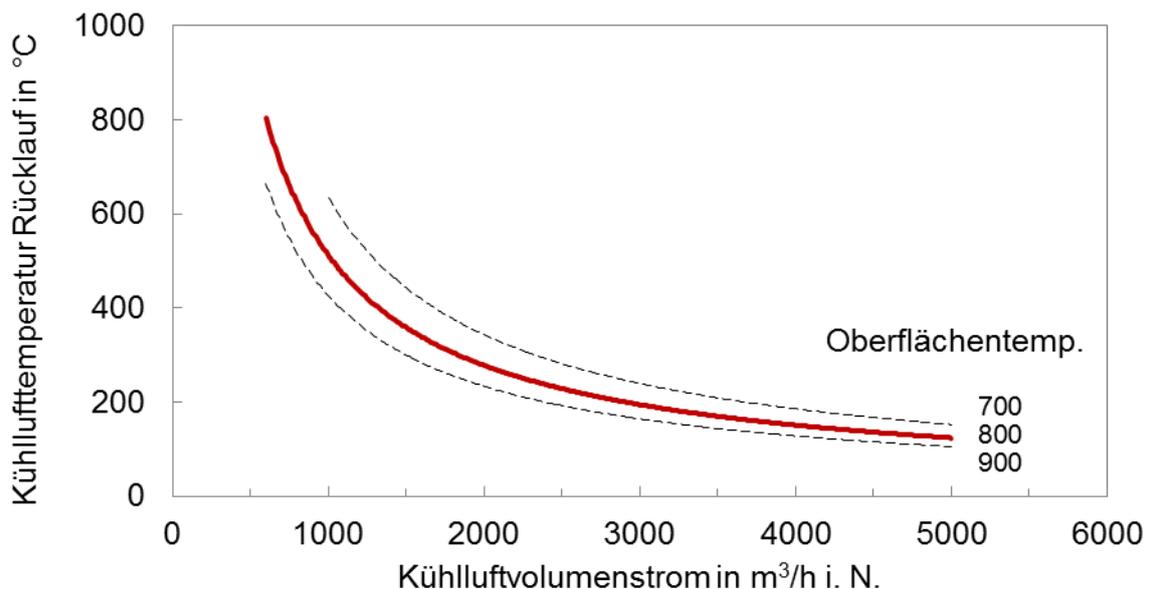


Abbildung 4-9: Zusammenhang zwischen Kühlluftmenge und Rücklauftemperatur bei verschiedenen Rollenoberflächentemperaturen und 25 °C Vorlauftemperatur

Luftvolumenströme von mehreren 1.000 m³/h i.N. pro Ofenrolle sind wirtschaftlich und aus Platzgründen für die notwendigen Aggregate nicht umsetzbar. Die hohen Rücklauftemperaturen von bis zu 1.000 °C erfordern einen hohen apparativen Aufwand und sind wirtschaftlich nicht darstellbar. Des Weiteren wird bereits für 150 kW Kühlleistung ein Wärmeübergangskoeffizient am Innendurchmesser des Rollenmantels von mehr 200 W/(m²K) benötigt. Der dafür erforderliche Vordruck bedingt ebenfalls einen hohen apparativen und energetischen Aufwand.

Thermoöle als Kühlmedium, wie sie bspw. bei der Motorenkühlung zum Einsatz kommen, sind zwischen -45 °C und 400 °C als Wärmeträger- oder Kühlmedium drucklos einsetzbar. Sie besitzen im Temperaturbereich von 0-250 °C eine Dichte von 870 – 720 kg/m³ und eine spez. Wärmekapazität von 1,8 – 2,7 kJ/(kg K). Erreichbare Wärmeübergangskoeffizienten liegen bei 50 – 1.000 W/(m² K) (Goedecke, 2011). Bei einer Temperaturdifferenz im Thermoöl von 200 K wären beispielsweise Volumenströme von 1 - 4 m³/h für eine Kühlleistung von 200 kW erforderlich. In einer exemplarischen Berechnung mit einer mittleren Thermoöltemperatur von 150 °C und einem Wärmeübergangskoeffizient von 1.000W/(m² K) an der Rollenmantelinnenseite ergibt sich das in **Abbildung 4-10** gezeigte Diagramm von Tangentialspannung, Temperatur und der Streckgrenze des Werkstoffs. Die rot markierten „kritischen Bauteilbereiche“ befinden sich an der Innen- und Außenseite des Mantels. Insgesamt sind nur 2,5 mm des Mantels betroffen, obwohl die Oberflächentemperatur der Ofenrolle bei 637 °C liegt. Die Belastung durch thermische Spannungen ist vergleichbar zu der der IST-Ofenrolle und die Energieeinsparung beträgt etwa 10 - 20 %, abhängig vom Rollentyp und Thermoöltemperatur. Prinzipiell stellt der Einsatz von Thermoöl eine Möglichkeit dar, die Ofenrollentemperatur zu erhöhen, ohne maßgeblich höhere thermische Spannungen hervorzurufen.

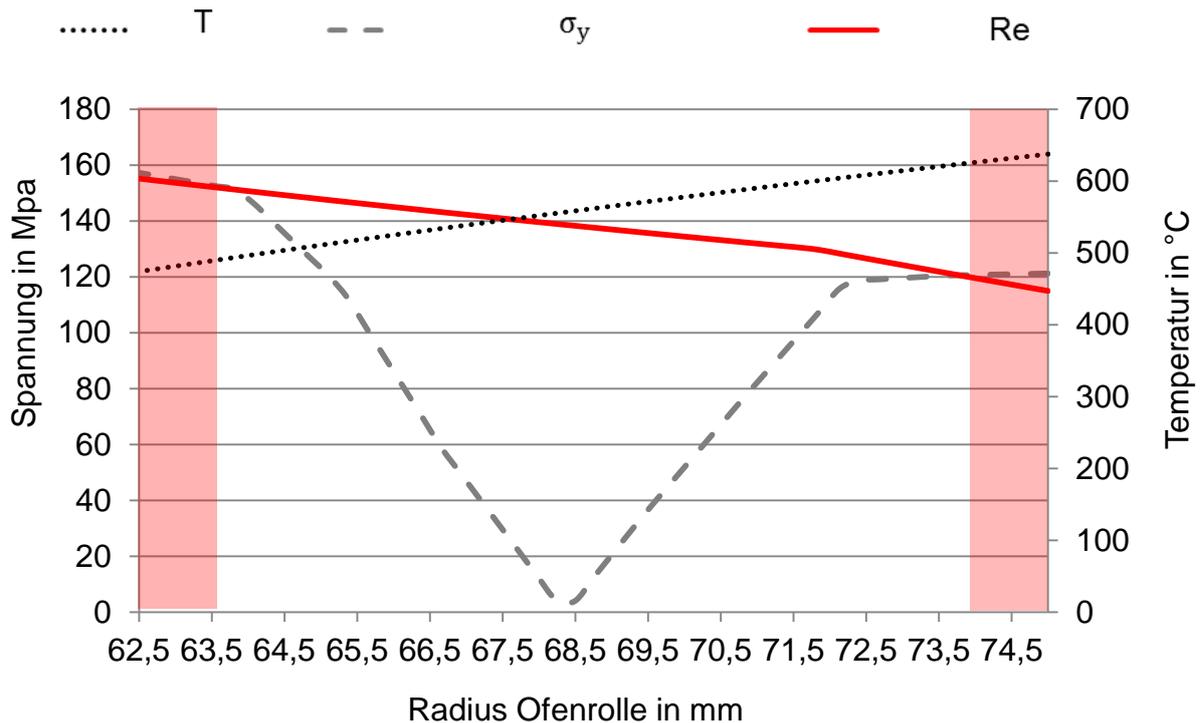


Abbildung 4-10: Darstellung der berechneten Werte für Tangentialspannung und Temperatur sowie der Streckgrenze zur Bestimmung kritischer Bauteilbereiche für eine Ofenrolle mit Thermoölkühlung (150 °C)

Das Temperaturgefälle im Rollenmantel könnte auf ein höheres Temperaturniveau verschoben werden. Ein Umbau auf einen Thermoölkreislauf erfordert einen hohen apparatetechnische Aufwand, der ähnlich zur Luftkühlung nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Nachfolgend werden Möglichkeiten der bestehenden Konfiguration mit Wasserkühlung untersucht.

Wie die FSI-Berechnung gezeigt hat, kommt es bereits bei den IST-Ofenrollen zu plastischen Verformungen. Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen wird eine Oberflächentemperatur von 800 - 900 °C angestrebt. Der einfachste Weg, die gewünschte erhöhte Oberflächentemperatur zu erreichen, ist eine Erhöhung der Stärke des Rollenmantels. Aus Gleichung 2-21 oder durch Parametervariation in den vorgestellten Modellen lässt sich die erforderliche Mantelstärke bestimmen, mit der eine bestimmte Oberflächentemperatur erreicht werden kann. Beispielsweise zeigt **Abbildung 4-11** den Betrag der Normalspannung, den Temperaturverlauf und die Streckgrenze des Werkstoffs für eine Ofenrolle mit 40 mm starkem Rollenmantel. Die

Oberflächentemperatur der Ofenrolle liegt bei 764 °C. Im Vergleich zur IST-Ofenrolle sind deutlich größere „kritische Bauteilbereiche“ vorhanden. Von 35-46 mm und 61-75 mm wird die Streckgrenze durch die berechneten Tangentialspannung überschritten. 62,5 % des Rollenmantels sind überlastet, allein durch die thermischen Spannungen. Die Lebensdauer einer solchen Ofenrolle wäre deutlich niedriger als die der IST-Ofenrollen.

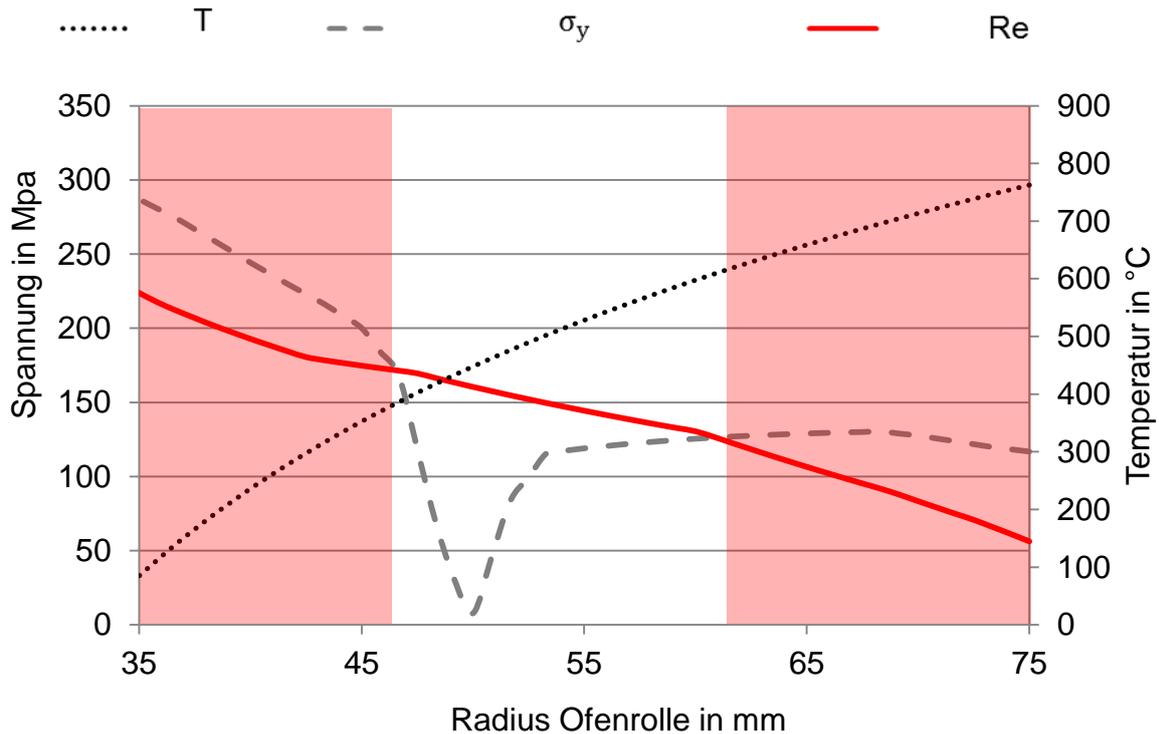


Abbildung 4-11: Darstellung der berechneten Werte für Tangentialspannung und Temperatur sowie der Streckgrenze zur Bestimmung kritischer Bauteilbereiche für eine Ofenrolle mit 40 mm dickem Rollenmantel

Um Thermospannungen zu verringern, wurde die Konstruktion einer Verbundgussrolle geprüft. Hierbei wird der Rollenmantel durch das aufeinanderfolgende Gießen verschiedener Schmelzen im Schleudergussverfahren aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt. Das Verfahren wird unter anderem für die Herstellung von Führungsrollen bei Stranggussanlagen verwendet. Aktuell gibt es dieses Verfahren aber nur für größere Durchmesser und kürzere Längen aber nicht für die relativ dünnen und langen Ofenrollen im betrachteten Vorwärmofen.

Alternativ wurde ein Ofenrollenkonzept entwickelt welches einen Ofenrollenmantel aus zwei getrennten Schalen besitzt. Hierbei werden die beiden Schalen spannungstechnisch voneinander getrennt betrachtet, da sie sich gegeneinander bewegen können. Die Idee ist, dass dadurch geringere thermische Spannungen entstehen als in einer einwandigen Ofenrolle. Allerdings kommt es unweigerlich zu einer Spaltbildung zwischen den beiden Schalen, die stark wärmedämmende Wirkung hat. Dies hat den Vorteil, dass nahezu das gesamte Temperaturgefälle in diesem Spalt liegt und die thermisch bedingten Spannungen in den Schalen gering bleiben. Die äußere Schale erreicht so jedoch ein höheres Temperaturniveau, was in der späteren Ofenatmosphäre zu verstärkten Korrosionserscheinungen führt. Anhand des vorgestellten analytischen Modells wurden hierzu Parametervariationen durchgeführt, indem die Spaltwirkung zwischen 0 – 100 % variiert wurde. 100% bedeutet, dass der Spalt sich vollständig um die gesamte Mantelfläche der Innenschale bildet. Entsprechend berücksichtigen niedrigere Prozentwert, einen Kontakt zwischen Innen- und Außenschale im jeweiligen Prozentbereich.

Abbildung 4-12 zeigt den berechneten Temperaturverlauf von zwei 12,5 mm starken Rollenschalen aus 2.4879 und 100% Spaltwirkung. **Abbildung 4-13** zeigt das Szenario bei 50% Spaltwirkung.

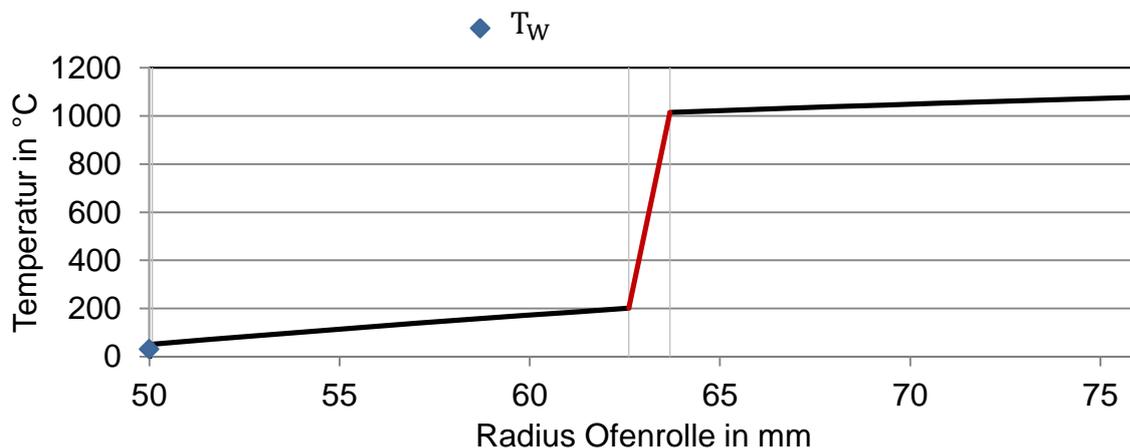


Abbildung 4-12: Berechneter Temperaturverlauf in einer 2-schaligen Ofenrolle (2x12,5 mm aus 2.4879) bei 100% Spaltwirkung

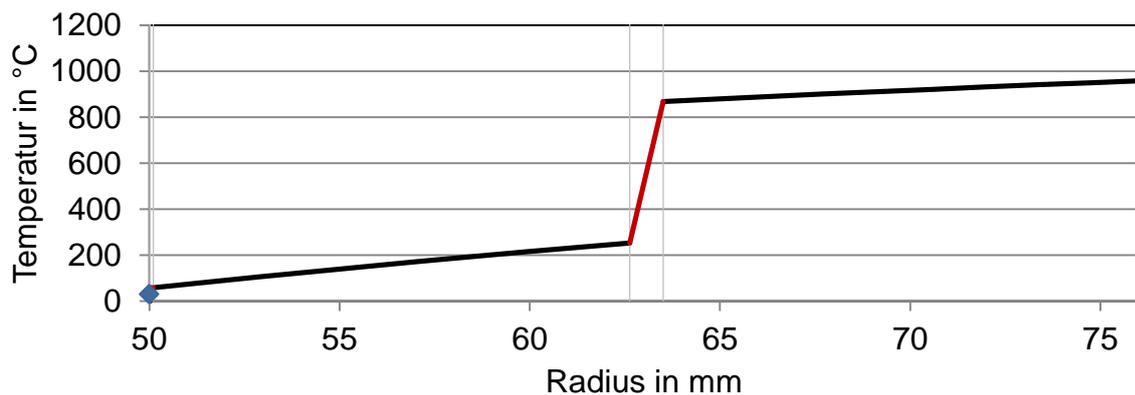


Abbildung 4-13: Berechneter Temperaturverlauf in einer 2-schaligen Ofenrolle (2x12,5 mm aus 2.4879) bei 50% Spaltwirkung

Abbildung 4-14 zeigt die Verläufe von Tangentialspannung, Temperatur und Streckgrenze für eine zweischalige Ofenrolle entsprechend Abbildung 4-13.

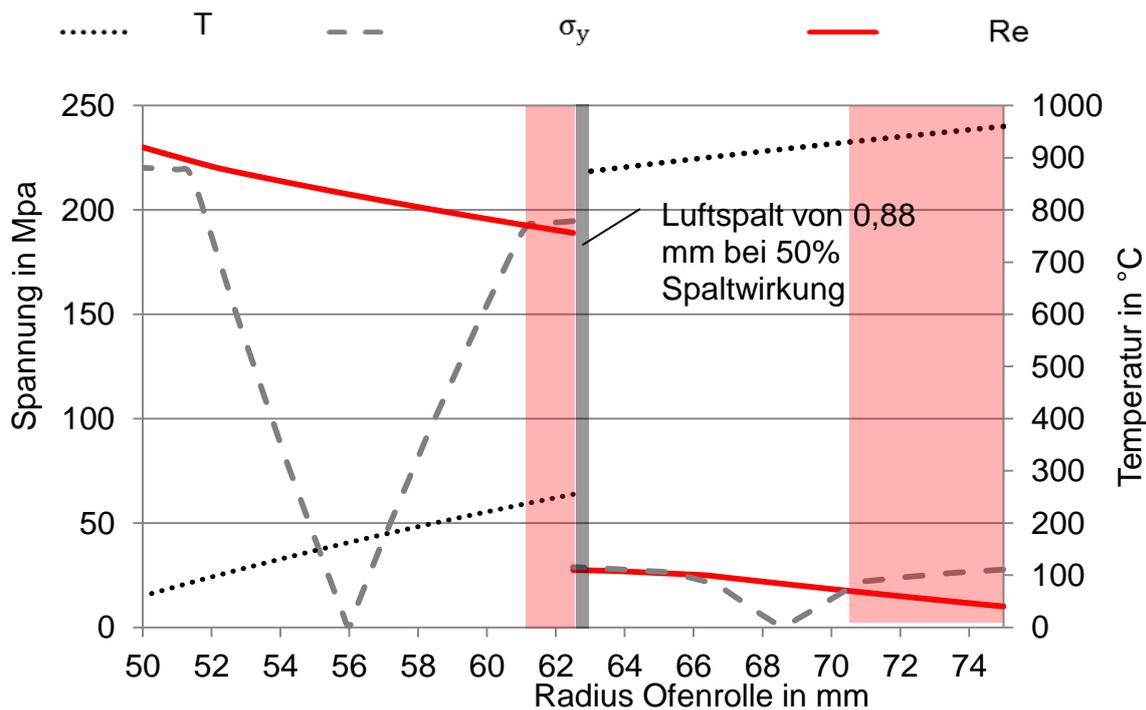


Abbildung 4-14: Darstellung der berechneten Werte für Tangentialspannung und Temperatur sowie der Streckgrenze für eine Ofenrolle mit zwei 12,5 mm starken Rollenmänteln bei 50% Spaltwirkung

Der Spalt hat aufgrund seines hohen Wärmeleitwiderstands einen großen Einfluss auf das Temperaturgefälle. Oberflächentemperaturen von unter 800 °C stellen sich erst bei einer Spaltwirkung von unter 20% ein, was konstruktiv kaum zu erreichen ist. Die Temperaturdifferenz in den einzelnen Schalen (außen < 100 K; innen < 200K) ist um ein Vielfaches geringer, sodass die thermischen Spannungen ebenfalls geringer ausfallen. Die Innenschale ist aufgrund des wärmedämmenden Spalts und der Außenschale thermisch weniger belastet als der Mantel der IST-Ofenrolle. Es liegen nur etwa 8% im kritischen Bauteilbereich. Bei der IST-Ofenrolle sind 20% des Rollenmantels „kritisch“. Der Außenmantel erreicht ein deutlich höheres Temperaturniveau, wodurch trotz der relativ kleinen thermischen Spannungen kritische Bauteilbereiche am Außenradius entstehen. Der äußere Mantel kann als „Schutzmantel“ des Inneren betrachtet werden, den man ggfs. bei Ofenstillständen austauscht. Der Außenmantel müsste in diesem Aufbau keine große Tragfähigkeit mehr besitzen. Es ist jedoch aufgrund der Temperatur mit erhöhten Korrosionserscheinungen zu rechnen. Weiterhin wird das Gewicht der Ofenrolle aufgrund des mehrschaligen Aufbaus um etwa 40% erhöht, was sich proportional auch auf die entstehenden Biegespannungen auswirkt.

4.3.2 Reduzierung des Ofenrollen-Emissionsgrads

Ein weiteres Konzept basiert auf der Senkung des Oberflächenemissionsgrads. Dadurch wird der Energieeintrag durch Strahlung in die Ofenrolle gesenkt. Gleichzeitig wird auch die Materialtemperatur des Werkstoffs gesenkt, was die thermischen Spannungen verringert. In **Abbildung 4-15** berechnete Verläufe für die Temperatur, die Tangentialspannung und die Streckgrenze einer Ofenrolle mit einem Oberflächenemissionsgrad von 0,3 gezeigt.

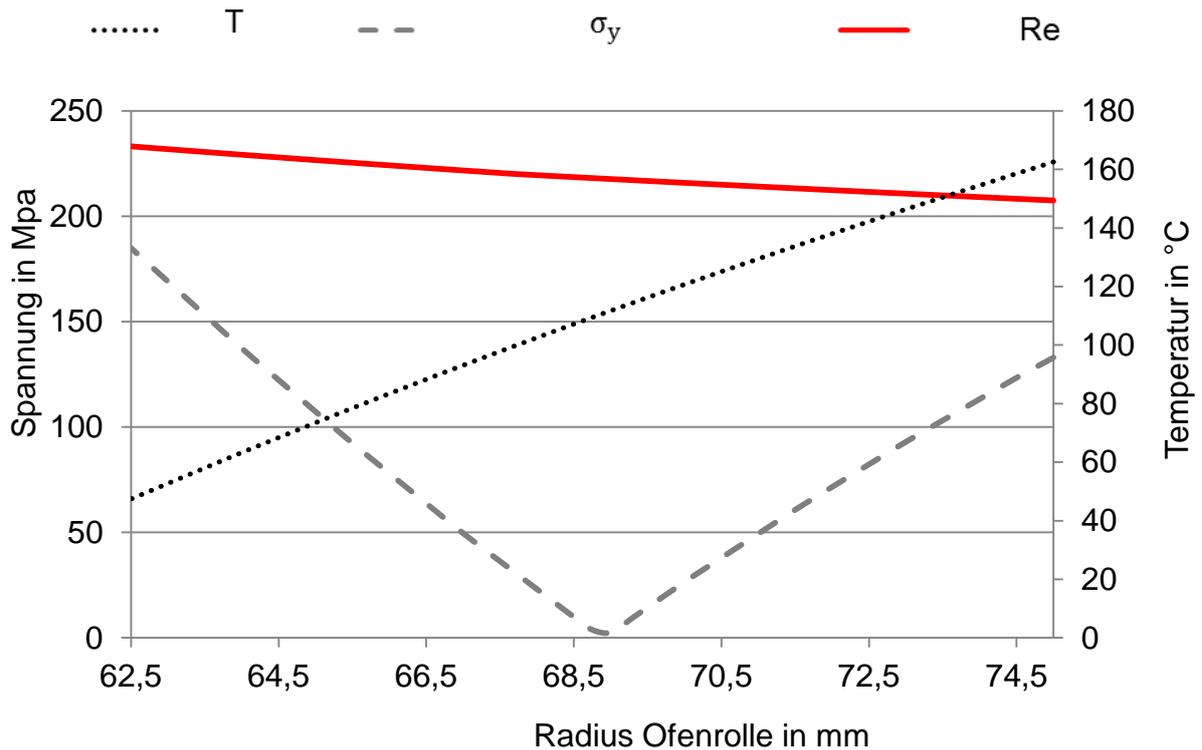


Abbildung 4-15: Darstellung der berechneten Werte für Tangentialspannung und Temperatur sowie der Streckgrenze zur Bestimmung kritischer Bauteilbereiche für eine Ofenrolle mit einem Oberflächenemissionsgrad von 0,3 (statt 0,9)

Durch die Senkung des Emissionsgrads an der Oberfläche der Ofenrolle von 0,9 auf 0,3 kann die Kühlleistung um etwa 50 – 60% reduziert werden. Gleichzeitig sinkt das Temperaturgefälle im Rollenmantel um etwa 140 K, was wesentlich geringere thermische Spannungen zur Folge hat. Dadurch ergibt sich an keiner Stelle des Bauteils eine kritische thermische Spannung. Die Abstände zur Streckgrenze sind selbst bei den höchsten berechneten Spannungen am Innen- und am Außenradius mit 55 MPa bzw. 80 MPa noch sehr groß. Ein entsprechend niedrigerer Emissionsgrad an der Ofenrollenoberfläche kann durch eine Beschichtung erzielt werden. Die Beschichtung muss einige Anforderungen erfüllen. Falls die Beschichtung versagt oder es im Laufe der Betriebszeit zu Alterungserscheinungen kommt, darf es zu keiner Beeinflussung der Bandqualität kommen. Kommt es im Laufe des Betriebs zu Verschmutzungen, würde sich im schlechtesten Fall der IST-Zustand der Ofenrollen wieder einstellen. Weiterhin ist auf die Korrosionsbeständigkeit gegenüber der Ofenatmosphäre zu achten.

Dieses Ofenrollenkonzept besitzt das höchste Einsparpotential der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzepte. Weiterhin wird die Lebensdauer der Ofenrollen durch die Senkung der thermischen Spannungen erhöht. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die Beschichtung die Konstruktion der Ofenrolle kaum geändert werden muss. Antriebsleistung und Lager können weiterverwendet werden, da man von geringfügigen Massezunahmen durch eine Beschichtung ausgeht. Schichtdicken von maximal 0,2 mm sind angedacht.

4.3.3 Fazit zu den entwickelten Ofenrollenkonzepten

Es wurden auf Basis der Untersuchungen zwei Ofenrollenkonzepte ausgewählt. Zum einen wurde eine Ofenrolle mit mehrschaligem Aufbau betrachtet. Dieser Aufbau dient vor allem zur Eindämmung thermisch bedingter Spannungen, indem eine Bewegung der Schalen gegeneinander möglich gemacht wird. Kritisch zu betrachten ist hier die entstehende Spaltbildung zwischen den Schalen. Diese kann zu einer Überhitzung der äußeren Ofenrollenschale führen. Das zweite Konzept basiert auf einem gesenkten Oberflächenemissionsgrad der Ofenrollen durch eine Beschichtung. Falls die Beschichtung versagt, wären immer noch die Eigenschaften der IST-Ofenrollen gegeben. Ein weiteres Ofenrollenkonzept basiert auf der Umstellung des Kühlmittels von Wasser auf Thermoöl. Prinzipiell könnten hiermit Temperaturen von bis zu 400 °C im Kühlmedium erreicht werden, was gleichzeitig die Oberflächentemperatur und die Innenwandtemperatur des Rollenmantel im Betrieb anhebt. Dadurch könnte die Kühlleistung durch eine erhöhte Oberflächentemperatur der Ofenrolle reduziert werden, ohne die thermischen Spannungen aufgrund der Temperaturdifferenz signifikant zu erhöhen. Aufgrund des hohen anlagentechnischen Aufwands wurde dieser Lösungsansatz nicht weiter untersucht. Im Folgenden werden die Konzepte des mehrschaligen Aufbaus und der Absenkung des Emissionsgrads umgesetzt und im Technikum untersucht.

5 Entwickelte Prototypen und Technikumsversuche

Ein Prototyp mit mehrschaligem Rollenaufbau und zwei Prototypen mit Beschichtungen wurden gefertigt und im Technikum getestet.

5.1 Zweischalige Ofenrolle mit erhöhter Oberflächentemperatur

Auf Basis der theoretischen Betrachtung und der analytischen Berechnungen wurde ein Prototyp einer zweischaligen Ofenrolle gebaut und im Technikum getestet. Bereits die Fertigung war mit einigen Fehlschlägen verbunden. Beim Ineinanderstecken der ca. 3 m langen Rollenschalen (Zylinderhülsen) kam es zu einigen Fehlversuchen, siehe **Abbildung 5-1**. Hierin ist links der fehlgeschlagen Versuch dargestellt, die Rollenmäntel ineinander zu schieben. Rechts ist eine fotografische Aufnahme der fertigen Rolle sowie der fehlgeschlagenen Rolle zu sehen.

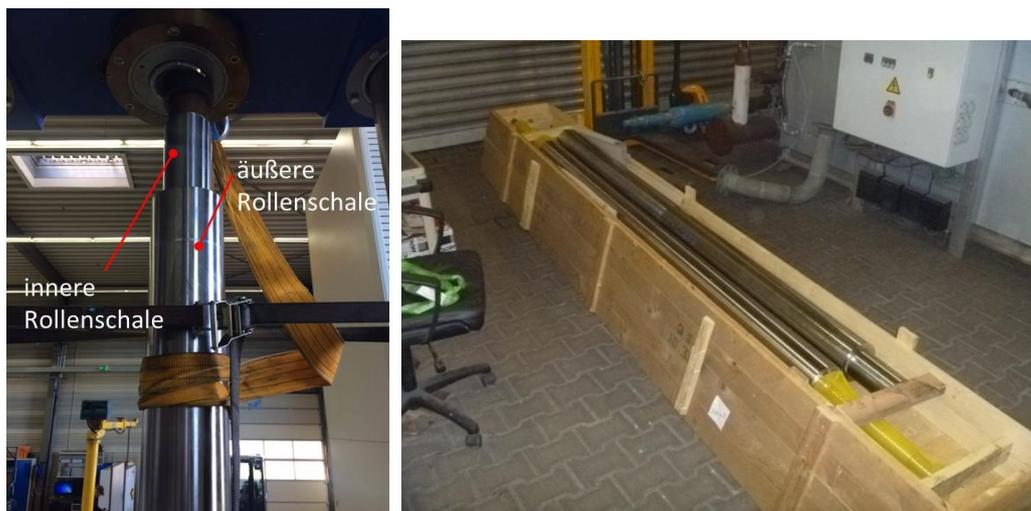


Abbildung 5-1: Montageversuch einer zweischaligen Ofenrolle (links); fertige sowie fehlgeschlagene Ofenrolle (rechts)

Im Rahmen der Arbeit konnten letztendlich zwei 20 mm dicke Schalen vollständig ineinander geschoben werden. Hierbei ist laut analytischem Modell bei einer Spaltwirkung von 50-100% mit Oberflächentemperaturen von 1.020-1.115 °C zu rechnen. Aufgrund der Fertigungstoleranzen, kann es zusätzlich zu fertigungsbedingten Spalten zwischen den Rollenschalen kommen, was die wärmedämmende Wirkung des Spaltes in den Versuchen verstärkt. Daher war

anzunehmen, dass die äußere Manteltemperatur die zulässigen Werte überschreitet. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Erkenntnisse der Versuche eingegangen. Im Technikum wurden die Temperaturen am äußeren Rollenmantel erfasst, vgl. Abbildung 3-13. Am ersten Versuchstag kam es bei den Materialtemperaturen im Außenmantel zu Schwankungen ab einer Temperatur von etwa 1170 °C, vgl. gemittelte Temperatur für T1-T4 in **Abbildung 5-2**. Bis zu dieser Temperatur erreicht die gemittelte Temperatur im Außenmantel 836 °C, was laut analytischem Modells eine Spaltwirkung von 42% ergibt.

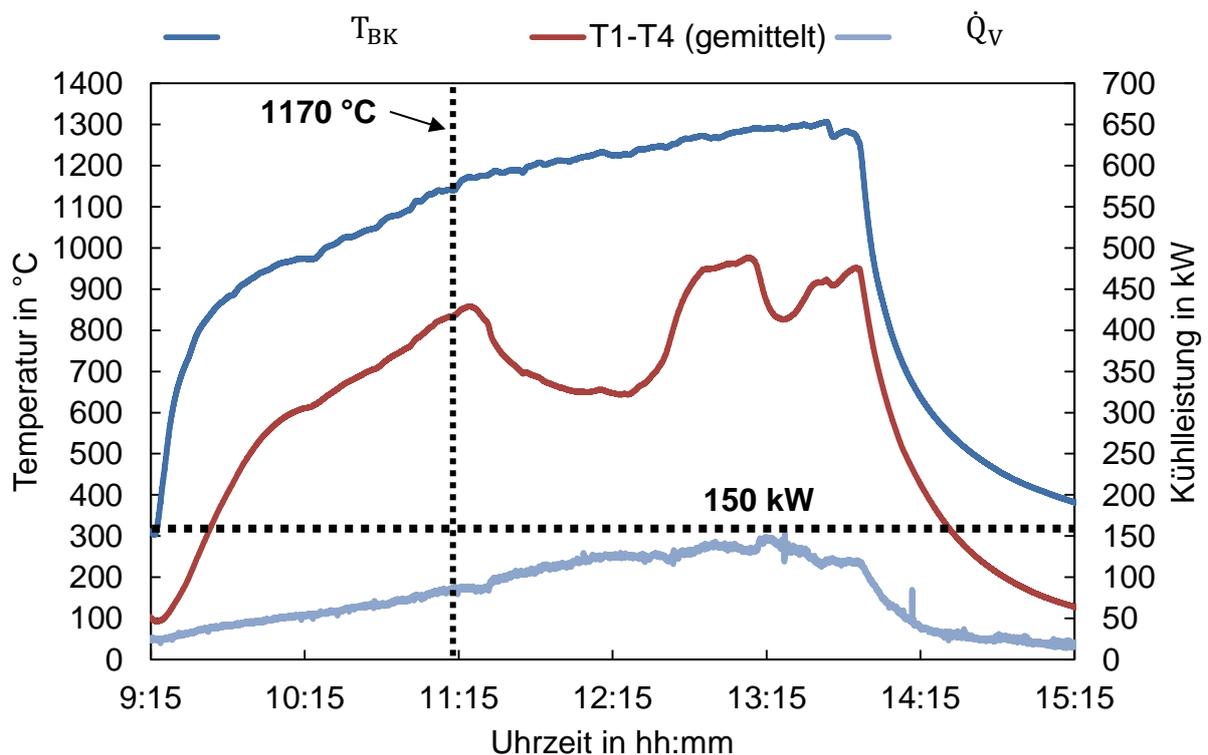


Abbildung 5-2: Temperatur, Kühlleistung und Außenmanteltemperatur der zweischaligen Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 1

Danach scheinen die beiden Mäntel sich gegeneinander zu bewegen, wodurch es durchgehend zu Temperaturschwankungen bis zu Versuchsendtemperatur von 1.300 °C kommt. Die errechnete Spaltwirkung variiert hier zwischen 10 und 50%. Die Kühlleistung von unter 150 kW ergibt sich durch die gesteigerte Oberflächentemperatur der Ofenrolle und einen geringfügig geringeren Emissionsgrad als 0,9. Aus der analytischen Berechnung ergibt sich ein Wert von 0,8. Die Kühlleistung ist damit 35-45% geringer als bei den IST-Ofenrollen. Ab dem

zweiten Versuchstag traten weniger und nach mehreren Versuchstagen keine Temperaturschwankungen mehr auf, vgl. **Abbildung 5-3**. Bei 1.272 °C Ofenraumtemperatur stieg die gemittelte Außenmanteltemperatur bis auf 1.076 °C.

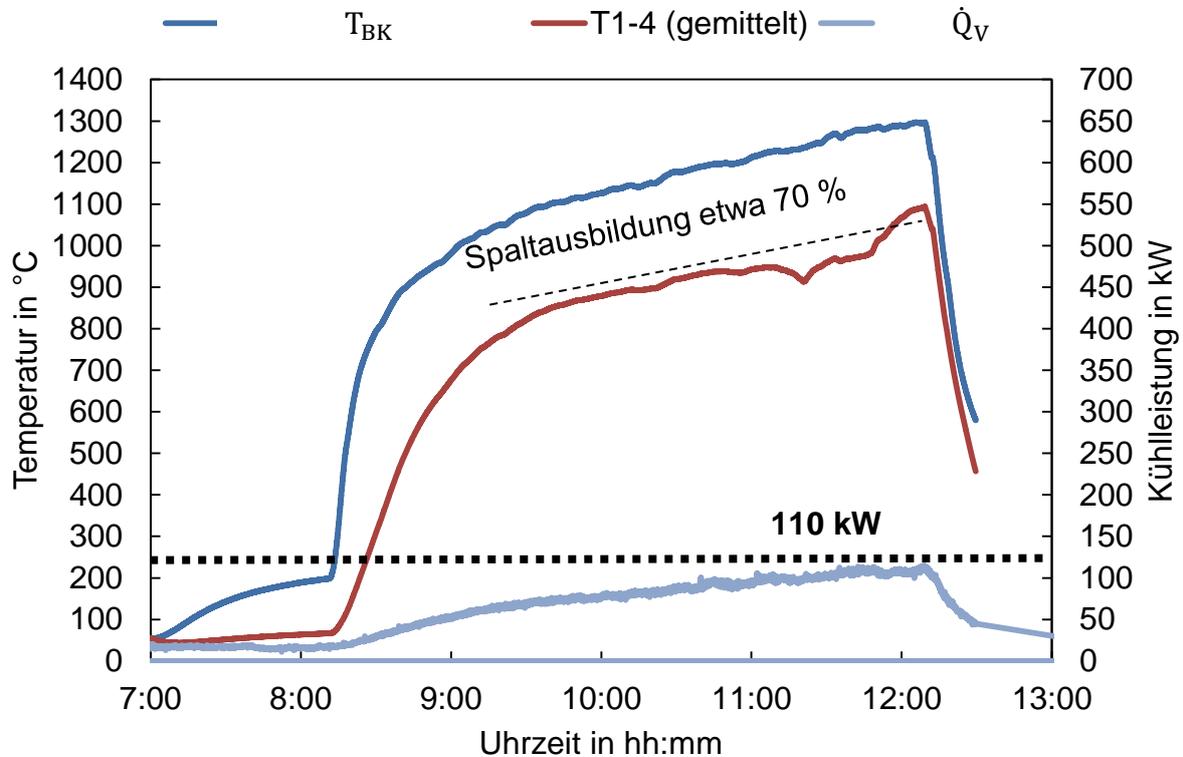


Abbildung 5-3: Temperatur, Kühlleistung und Außenmanteltemperatur der zweischaligen Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 2

Die Technikumergebnisse konnten Anhaltspunkte über die langfristige Spaltausbildung zwischen den Schalen geben. Für die Versuche ab Versuchstag 2, konnte mit dem analytischen Modell eine Spaltwirkung von durchschnittlich 70% ermittelt werden. Weiterhin konnte mit diesen Versuchen die Genauigkeit des analytischen Modells untermauert werden. Für im Technikum gemessenen Temperaturen im Ofenraum von 1.272°C und am Außenmantel von 1.076 °C ergibt sich eine berechnete Kühlleistung von 107,2 kW, was gut mit der Messung übereinstimmt. Die Kühlleistung ist damit über 50% geringer als bei den IST-Ofenrollen. Für den Emissionsgrad ergibt sich auf Basis des analytischen Modells ab dem 2. Versuchstag wieder ein Wert von 0,9. Dies lässt auf ein sehr schnelles Ansteigen des Emissionsgrad nach Kontakt mit der Atmosphäre des Versuchsofens schließen. Nach den Versuchen wurde die zweischalige Ofenrolle ausgebaut und

begutachtet. Es wurde ein glatter Bruch im vollen Umfang an einer der Bohrungen für ein Thermoelement festgestellt, vgl. **Abbildung 5-4**.



Abbildung 5-4: Fotografische Darstellung des „glatten“ Bruchs des äußeren Rollenmantels nach den Technikumsversuchen mit der zweischaligen Ofenrolle

Die Beschaffenheit des Bruchs und die glatten Bruchflächen lassen hier auf einen spröden Gewaltbruch schließen, da keine plastische Verformung zu erkennen ist und die Bruchfläche senkrecht zur größten Normalspannung (der thermischen Tangentialspannung) verläuft. Sehr wahrscheinlich hat die Bohrung für das Thermoelement diese Stelle im Außenmantel stark geschwächt. Das Ofenrollenkonzept der mehrschaligen Ofenrolle wurde anhand der Fertigungsprobleme und der Technikumsversuche als nicht erfolgsversprechend eingestuft. Die Toleranzen bei der Fertigung von Hülsen mit 3 m Länge sind zu hoch, sodass es hier häufig zu Fehlversuchen beim Ineinanderstecken der Mäntel kommt. Weiterhin sind die hohen Temperaturen am Außenmantel mit über 1.000 °C aufgrund der Spaltwirkung von etwa 70% für die im Vorwärmofen vorliegenden Ofenatmosphäre zu hoch. Hier ist mit starken Korrosionserscheinungen zu rechnen, vgl. Kapitel 3.3.

5.2 Beschichtete Ofenrollen mit reduziertem Emissionsgrad der Ofenrollenoberfläche

Im nächsten Schritt wurde das Ofenrollenkonzept zur Reduzierung des Oberflächenemissionsgrads durch Beschichtung der Ofenrollenoberfläche realisiert.

Hierzu wurden zwei Ofenrollen beschichtet. Die Beschichtung wurde mit Blick auf die optischen Eigenschaften und das Verhalten in oxidierenden und reduzierenden Ofenatmosphären berücksichtigt. Das Beschichtungsverfahren, das Material oder auch das Abrasions- und Adhäsionsverhalten der Oberflächen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Hier ist Bedarf für weitere Untersuchungen. Effekte, die durch Kontakt mit dem Band im späteren Vorwärmofen entstehen könnten, wurden ebenfalls nicht untersucht. Aufgrund der Erfahrungen mit einem gekühlten Aluminiumzylinder, der guten Reflexionseigenschaften und der Beständigkeit von Aluminium gegen Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenmonoxid fiel die Wahl der ersten Beschichtung auf Aluminium. Da Aluminium im nachgelagerten Zinkbad zugemischt wird, wird ein Abrieb am Band als unbedenklich eingestuft. Zum Beschichten mit Aluminium gibt es eine Vielzahl von Aufbringverfahren und Aluminiumlegierungen, mit denen beschichtet werden kann (Bobzin, 2013). Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Ofenrolle mit reinem Aluminium im Drahtflammspritzverfahren beschichtet. Die relativ raue Oberfläche von $R_a=10\ \mu\text{m}$ nach dem Beschichten wurde durch Nachbearbeiten der beschichteten Oberfläche mittels Bandschleifen auf $R_a=1,5\text{-}2\ \mu\text{m}$ gesenkt, um die Reflexionseigenschaften zu verbessern. Die Schichtdicke der Endsicht beträgt 0,1 mm. Die max. Einsatztemperatur des Aluminiums sollte 400 °C nicht überschreiten. In **Abbildung 5-5** ist die beschichtete Ofenrolle (links) und die Oberfläche im Detail vor und nach dem Schleifen dargestellt. Zu erkennen sind offenen Bereiche (Poren) in der Aluminiumschicht, die aus Aluminiumoxid bestehen und aufgrund des Beschichtungsverfahrens entstehen.

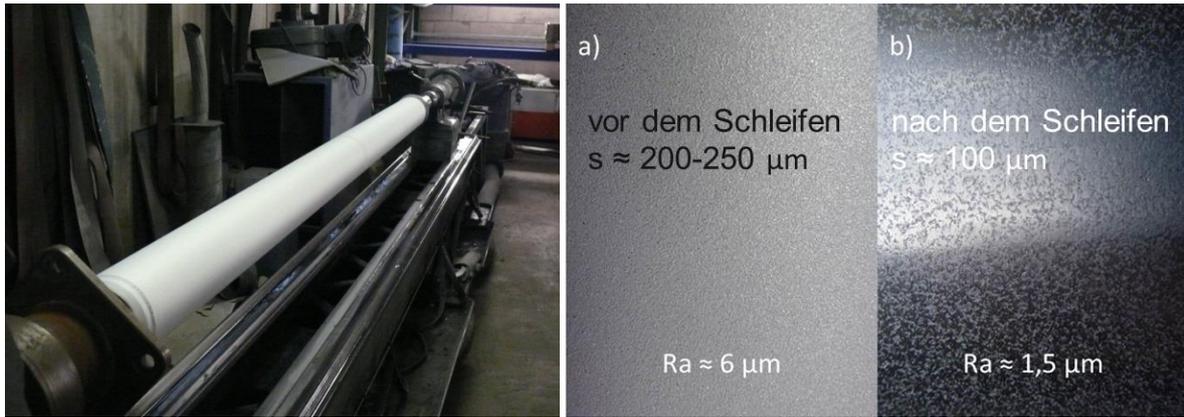


Abbildung 5-5: Fotografie der mit Aluminium beschichteten Ofenrolle (links) und Detailaufnahme der Oberfläche vor dem Schleifen (a) und nach dem Schleifen (b)

Eine weitere Ofenrolle wurde mit Chrom beschichtet. Es weist ebenfalls sehr geringe Emissionsgrade auf. Weitere positive Eigenschaften sind die hohe Härte, der niedrige Reibkoeffizient der Oberfläche und ein geringes Adhäsionsvermögen der Oberfläche für Öle und Fette. Weiterhin bestehen Erfahrungen mit dem Einsatz von Chrom in der Industrie. Es wird bspw. an Ventilen und Kurbelwellen in der Automobilindustrie oder Kühl-, Heiz- und Umlenkwalzen in der Druckindustrie eingesetzt. Die Einsatztemperaturen liegen bei -200 bis 800 °C (Spritzke Hartchrom GmbH, 2017). **Abbildung 5-6** zeigt eine Fotografie der verchromten Ofenrolle. Die Schichtdicke der Chromschicht beträgt 30 µm und die Oberflächenrauigkeit $Ra = 0,8 \mu\text{m}$.



Abbildung 5-6: Fotografie der mit Chrom beschichteten Ofenrolle

In den Versuchen wurden darauf verzichtet die Schichten zu Durchbohren, um mit Thermoelementen die Materialtemperatur zu erfassen. Zum einen hätte dies eine Beschädigung der Schicht zur Folge und zum anderen haben die bisherigen Ergebnisse gezeigt, dass sich die Materialtemperaturen auch sehr genau anhand der Messwerte für Kühlleistung, Ofenraum- und Wassertemperatur ermitteln lassen.

Versuchsergebnisse der mit Aluminium beschichteten Ofenrolle

Abbildung 5-7 zeigt die Ergebnisse am ersten Versuchstag. Am ersten Versuchstag wurden die erreichbaren Temperaturgrenzen mit maximaler Brennerleistung geprüft. Der Versuchsofen wurde mit dem Brenner bei 650 kW Leistung bis maximal 1397 °C erhitzt, was aufgrund der deutlich niedrigeren Kühlleistung von maximal 124 kW möglich war. An den weiteren Versuchstagen wurden gezielt Temperaturniveaus zum Vergleich mit den Technikumsversuchen der IST-Ofenrollen angefahren. In **Abbildung 5-8** ist die gemessene Kühlleistung bei einer Temperatur von 1.220 bis 1.240 °C dargestellt. Bei den Versuchen mit den IST-Ofenrollen war dies der maximal erreichbare Temperaturbereich.

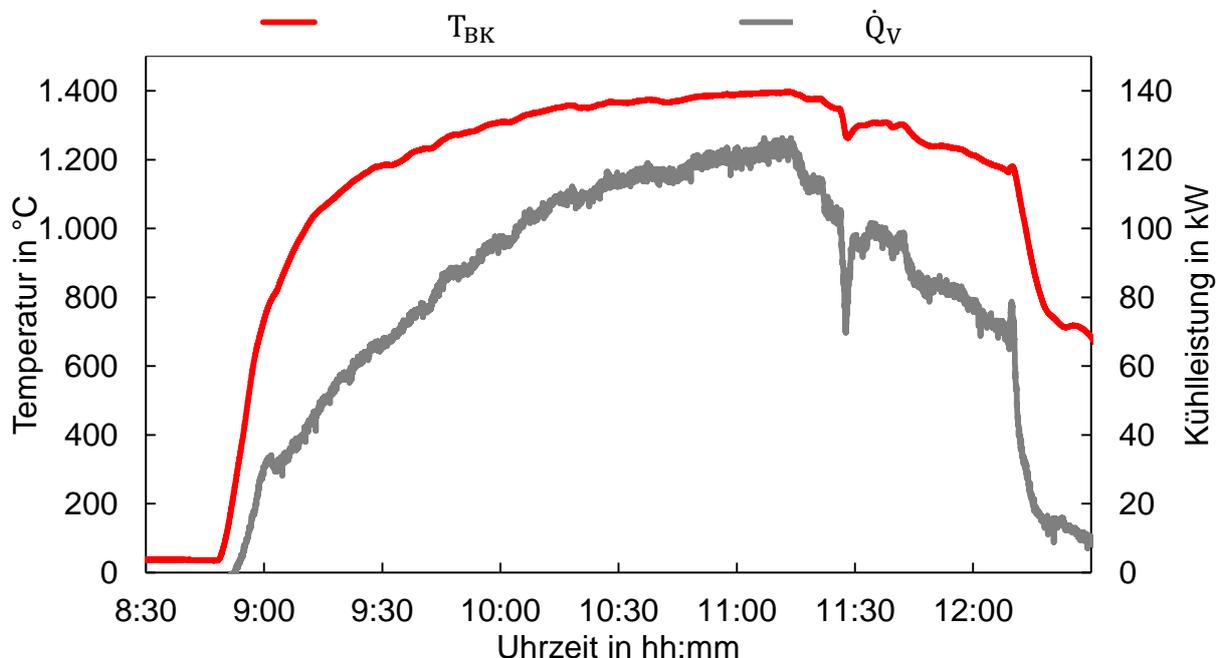


Abbildung 5-7: Ofenraumtemperatur und Kühlleistung der mit Aluminium beschichteten Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 2

Die Kühlleistung der IST-Ofenrollen lagen hier für die Bauform 1 bei ca. 225 kW und für die Bauform 2 bei ca. 200 kW. Die Kühlleistung der mit Aluminium beschichteten Ofenrolle liegt bei 90–99 kW. Die Kühlleistungseinsparung liegt somit bei 51–60%. Anhand des analytischen Modells ergibt sich ein Emissionsgrad von ca. 0,25–0,27 und ein Temperaturverlauf im Rollenmantel von 46–163 °C. Die Kühlleistung und die Materialtemperaturen können mit der Aluminiumbeschichtung deutlich gesenkt werden, was neben der Energieeinsparung auch zur Senkung der thermischen Belastung der Ofenrolle führt.

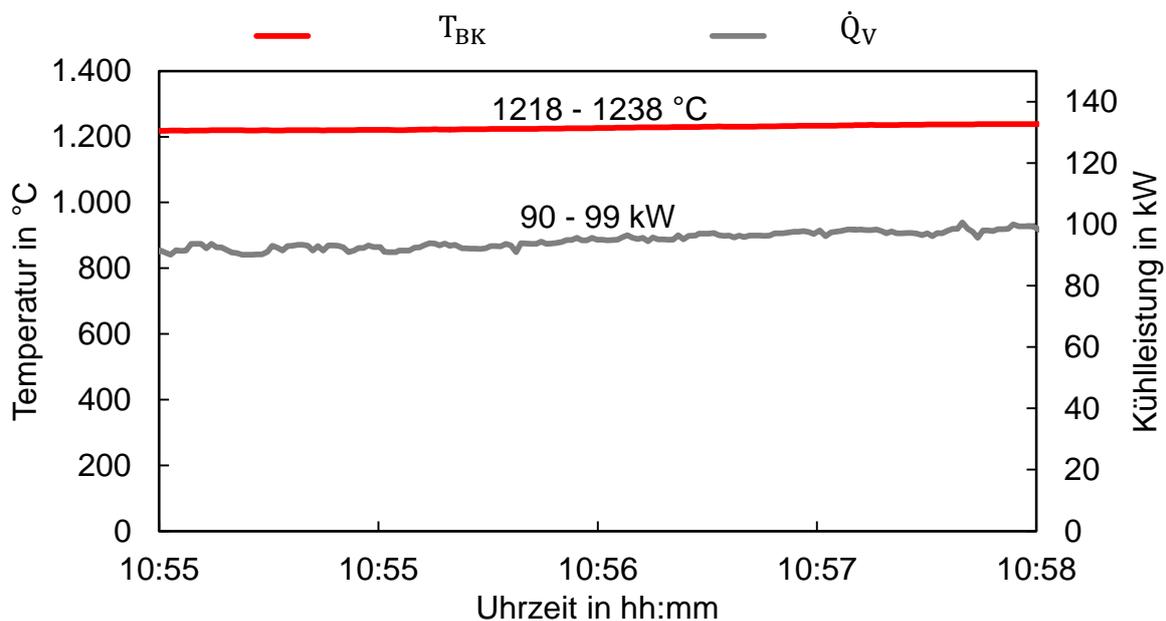


Abbildung 5-8: Ofenraumtemperatur und Kühlleistung der mit Aluminium beschichteten Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 4, Detailausschnitt

Nach vier Versuchstagen mit konstanten Randbedingungen und reproduzierbaren Messwerten wurde die Ofenrolle visuell begutachtet. Es konnten keinerlei Abplatzungen, Verfärbungen oder ähnliches festgestellt werden, vgl. **Abbildung 5-9**.



Abbildung 5-9: Mit Aluminium beschichtete Ofenrolle nach den Versuchen

Versuchsergebnisse mit der verchromten Ofenrolle

Abbildung 5-10 zeigt die Messwerte des ersten Versuchstags mit der verchromten Ofenrolle. Zwischen 9:36 und 10:06 Uhr wurde das Temperaturniveau von ca. 1.220 °C – 1.240 °C erreicht. Die Kühlleistung der verchromten Ofenrolle lag hier nahezu konstant bei 89 kW.

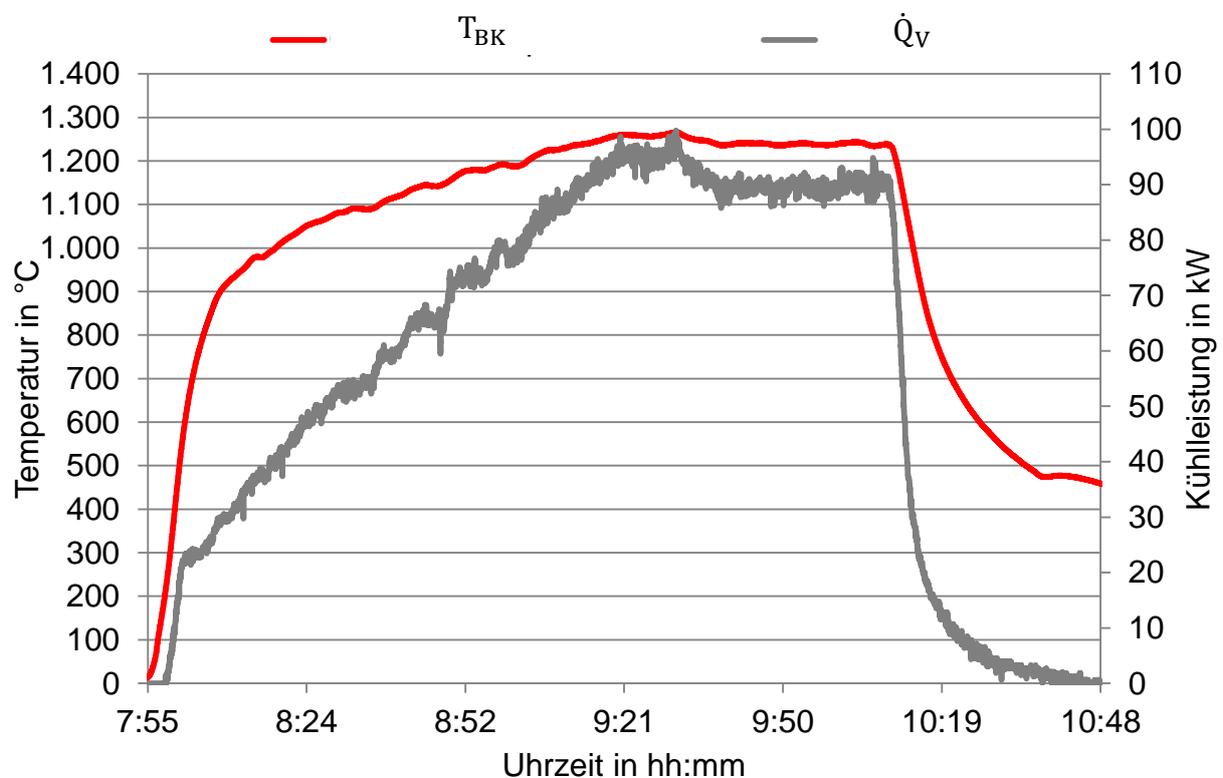


Abbildung 5-10: Ofenraumtemperatur und Kühlleistung der verchromten Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 2

Abbildung 5-11 zeigt den Kühlleistungsverlauf bei 1.222 °C–1.236 °C. Die gemessene Kühlleistung liegt bei 82 – 90 kW. Die verchromte Ofenrolle weist bei vergleichbaren Ofenraumtemperaturen etwa 10 % weniger Kühlleistung auf als die Ofenrollen mit Aluminiumbeschichtung. Im Vergleich zu den IST-Ofenrollen liegt die Kühlleistungseinsparung bei 55–67 %. Der anhand des analytischen Modells ermittelte Emissionsgrad liegt bei 0,23–0,25 und das Temperaturgefälle im Rollenmantel bei 41°C–125 °C.

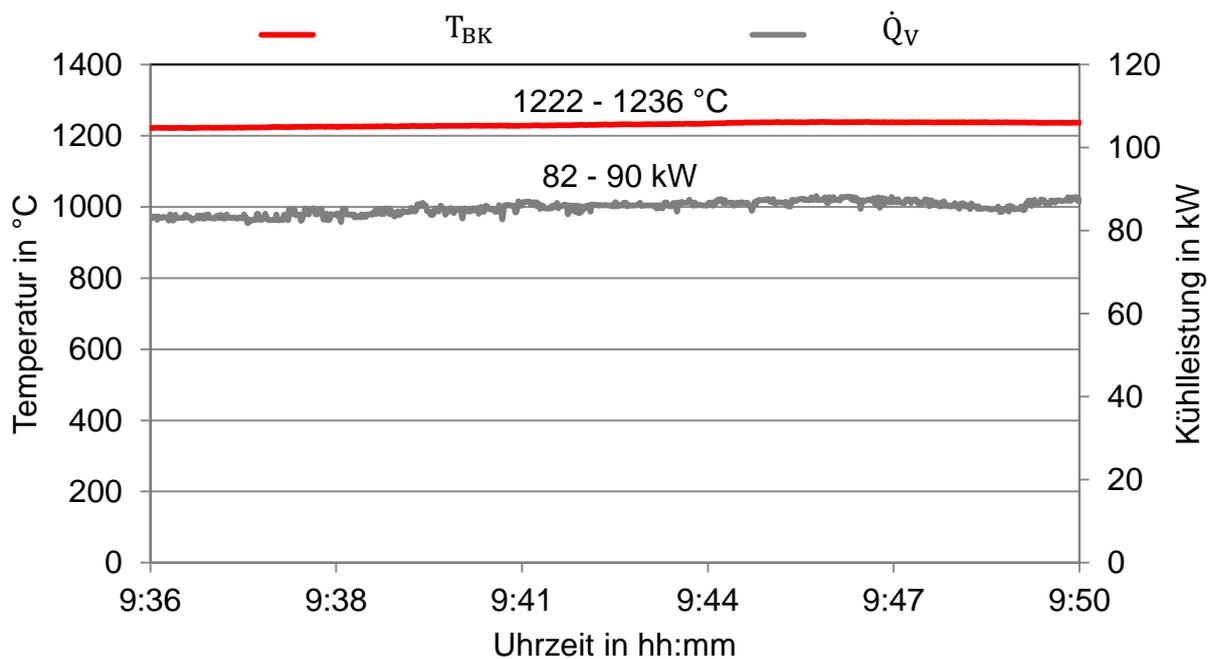


Abbildung 5-11: Ofenraumtemperatur und Kühlleistung der verchromten Ofenrolle, Technikum BFI, Versuchstag 3, Detailausschnitt

Auch bei der verchromten Ofenrolle konnten keinerlei Beschädigungen der Chromschicht festgestellt werden. **Abbildung 5-12** zeigt eine fotografische Ansicht eines Abschnitts der verchromten Ofenrolle nach 4 Versuchstagen.



Abbildung 5-12: Verchromte Ofenrolle nach 4 Versuchstagen

Trotz der im Versuchsofen sehr starken Temperaturgradienten durch die Erwärmung des Versuchsofens auf bis zu 1.400 °C und Abkühlung auf Raumtemperatur innerhalb eines Tages konnten bei beiden Schichten keinerlei Abplatzungen festgestellt werden.

5.3 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Technikumsversuchen werden wie folgt zusammengefasst:

- Das Konzept des mehrschaligen Rollenaufbaus zur Erhöhung der Oberflächentemperatur unter Berücksichtigung der thermischen Spannungen stellte sich im Technikum nicht als erfolgsversprechend heraus. Der äußere Mantel ist in vollem Umfang gebrochen, wahrscheinlich aufgrund der Schwächung durch eine Thermolementbohrung und der großen thermischen Spannungen. Auf eine Weiterführung des Konzeptes wurde verzichtet, da der Einfluss des Spaltes höher als erwartet ausfällt. Die heiße Außenschale wird eine geringe Lebensdauer aufweisen, stark korrodieren und die Bandqualität im schlimmsten Fall beeinflussen.
- Das Beschichten von Ofenrollen zur Senkung des Oberflächenemissionsgrads könnte eine Lösung zur Reduzierung der Kühlleistung darstellen. Zudem

werden die Materialtemperaturen signifikant gesenkt, was die Lebensdauer der Ofenrollen erhöht.

- Im Vergleich zu den IST-Ofenrollen beträgt die Kühlleistungseinsparung zwischen 51 – 67%, wobei die verchromte Ofenrolle eine etwa 10% niedrigere Kühlleistung als die mit Aluminium beschichtete Ofenrolle aufweist.

6 Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Wärmeaufnahme von wassergekühlten Ofenrollen in Vorwärmöfen von Feuerverzinkungsanlagen. Die Wasserkühlung entzieht dem Ofen ca. 300 kW pro Ofenrolle, was durch die Ofenbeheizung ausgeglichen werden muss. Diese Verlustleistung gilt es zu minimieren. In vorangegangenen Untersuchungen zu diesem Thema konnten Versuche mit ungekühlten keramischen oder luftgekühlten Stahlrollen kein erfolgsversprechendes Ofenrollenkonzept aufzeigen.

Die theoretischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit konnten mehrere Einflussfaktoren auf den Wärmeeintrag in die Ofenrollen aufzeigen. Es kommt durch das Band zu einer Verschattung der Ofenrollen gegenüber dem Ofenraum/den Ofenwänden, was den Wärmeeintrag in die Ofenrollen senkt. Zur direkten Senkung des Wärmeeintrags in die Rollen konnten zwei Konzepte aufgezeigt werden. Durch Erhöhung der Oberflächentemperatur der Ofenrollen oder Senkung des Emissionsgrads der Ofenrollenoberfläche kann die Kühlleistung reduziert werden. Beide Konzepte erfordern den Einsatz neuer Werkstoffe und die Betrachtung der äußeren Einflüsse auf die Ofenrollen. Der Festigkeitsnachweis der Rollen ergibt eine max. Biegespannung, die von der 1-%-Zeit-Dehngrenze der aktuell verfügbaren hitzebeständigen Stähle bei 900 °C unterschritten wird. Dies schließt den Einsatz ungekühlter Stahlrolle aus.

Die Randbedingungen der Ofenrollen im Betrieb wurden durch Betriebsmessungen und numerische Untersuchungen ermittelt. Zudem wurden die aktuellen IST-Ofenrollen im Technikum untersucht. Aufgrund der Temperatur von durchschnittlich ca. 1.300 °C, der wechselnden (überwiegend reduzierenden) Ofenatmosphäre und den hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Ofenrollen sollten Ofenrollentemperaturen von über 900 °C vermieden werden. Für die aktuellen IST-Ofenrollen wurden im Technikum Materialtemperaturen von 220- 430 °C gemessen. Technikumsversuche mit einem gekühlten Aluminiumzylinder konnten den in der Theorie beschriebenen Effekt eines geringeren Emissionsgrads der Ofenrolle bestätigen. Kühlleistung und Materialtemperaturen konnten in etwa halbiert werden. In numerischen Berechnungen wurden die verifizierten CFD-Ergebnisse zur

Temperaturverteilung in der Ofenrolle als Randbedingung für eine Festigkeitsberechnung mittels FEM verwendet. Mit Hilfe eines implementierten bilinearen Materialmodells konnten Spannungen oberhalb der temperaturabhängigen Streckgrenze ermittelt werden. Die FEM-Berechnung konnte aufzeigen, dass es bereits bei den IST-Ofenrollen aufgrund der thermo-mechanischen Belastungen kritische Bauteilbereiche gibt. Eine weitere Erhöhung der Oberflächentemperatur und der Materialtemperatur führt sehr schnell zu höheren thermischen Spannungen. Die Reduzierung des Emissionsgrad der Ofenrollenoberfläche führt hingegen neben der Senkung des Wärmeeintrags auch zur Senkung der Materialtemperaturen, was die thermischen Spannungen in der Ofenrolle reduziert. Theorie, Numerik und Technikumsversuche zeigten qualitativ gute Übereinstimmungen.

Auf Basis der Ergebnisse wurden Werkzeuge geschaffen, mit denen verschiedene Ofenrollenkonzepte schnell analytisch und numerisch berechnet werden können. Der Einsatz eines alternativen Kühlmediums wurde diskutiert. Wasser ist drucklos nur bis 100 °C einsetzbar, wodurch große Temperaturunterschiede und hohe thermische Spannungen in der Ofenrolle entstehen. Luft wurde aufgrund der großen benötigten Volumenströme und Drücke zur Einhaltung der Wärmeübertragungsbedingungen ausgeschlossen. Eine Alternative stellt Thermoöl dar, welches bis 400 °C drucklos einsetzbar ist. Eine mit Thermoöl gekühlte Ofenrolle könnte aufgrund der höheren Kühlmitteltemperatur eine erhöhte Oberflächentemperatur erreichen, ohne die thermischen Spannung bedeutend zu erhöhen. Der apparative Aufwand zur Umstellung des Kühlkreislaufs auf Thermoöl ist jedoch wirtschaftlich nicht darstellbar. Daher wurden Konzepte mit der bestehenden Wasserkühlung untersucht.

Zur Erhöhung der Oberflächentemperatur wurde eine zweischalige Ofenrolle entwickelt, die aufgrund ihrer Konstruktion den Großteil des Temperaturgefälles im Spalt zwischen den Schalen abbaut. Dadurch und durch die ermöglichte Bewegung beider Schalen gegeneinander können die thermischen Spannungen im Vergleich zu einer einfachen, dickwandigen Rollenschale reduziert werden. Die Spaltbildung zwischen den Schalen stellt aber gleichzeitig eine Unsicherheit dar, weil nicht bekannt ist, ob sich der Spalt vollständig um den Umfang bildet oder nur in Teilbereichen. Das Konzept wurde im Rahmen dieser Arbeit konstruktiv umgesetzt. Es kam beim Ineinanderstecken der Rollenschalen zu Problemen, die es nicht

ermöglichten den angedachten Aufbau aus zwei 12,5 mm dicken Schalen zu realisieren. Es konnten lediglich zwei 20 mm dicke Schalen erfolgreich ineinander geschoben werden. Zudem war die ermittelte Spaltbildung mit etwa 70 % höher als erwartet. In den Versuchen wurde der äußere Mantel im Mittel etwa 1080 °C warm und die Kühlleistung wurde dadurch auf 107 kW gesenkt, was im Vergleich mit den IST-Ofenrollen 46–53 % Kühlleistungseinsparung darstellte. Nach den Versuchen war der äußere Rollenmantel in vollem Umfang gerissen. Letztendlich führten diese Ergebnisse dazu, das Konzept zu verwerfen.

Ein weiteres Konzept zur Senkung des Wärmeeintrags in die Ofenrolle wurde mit der Beschichtung von Ofenrollen verfolgt. Hierbei diente die Beschichtung dazu, den Emissionsgrad der Ofenrolle zu senken. Die mit Aluminium und Chrom beschichteten Ofenrollen wiesen eine um bis zu 67 % geringere Kühlleistung auf als die konventionellen IST-Rollen. Zudem werden die Materialtemperaturen in den Ofenrollen gesenkt, was durch Voruntersuchungen an einem gekühlten Aluminiumzylinder gezeigt wurde. Die thermischen Spannungen werden durch das geringere Temperaturgefälle gesenkt. In jeweils mehreren Versuche konnten die Ergebnisse reproduziert werden. Nach Ausbau der Ofenrollen konnten trotz der starken Temperaturgradienten im Versuchsofen keinerlei Beschädigungen oder Verschmutzung auf den beschichteten Ofenrollen festgestellt werden. Das Konzept der Senkung des Ofenrollenoberflächenemissionsgrads stellt somit eine potentielle Möglichkeit zur Senkung der Kühlverluste dar und sollte weiterverfolgt werden.

7 Ausblick

Das erfolgsversprechende Konzept des Beschichtens von Ofenrollen zur Reduzierung des Emissionsgrads und damit des Wärmeeintrags in die Ofenrollen besitzt ein hohes Energieeinsparpotential und könnte zudem zu kürzeren Austauschintervallen der Ofenrollen durch verminderte thermische Spannungen führen. Die getesteten Beschichtungen sind auf Basis der optischen Eigenschaften und chemischen Beständigkeit gegenüber der Ofenatmosphäre ausgewählt worden. Für einen Einsatz im Vorwärmofen ist zwingend die Interaktion mit dem Band zu betrachten. Hier sollten umfassende Verschleißtests und das Abrieb- und Adhäsionsverhalten der Beschichtung im Kontakt mit dem Band und eventuellen Schmutzpartikeln untersucht werden. Die Verschmutzung durch Öle, Fette und Emulsionen vom Band und Staub im Ofenraum kann einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben. Dieser Einfluss sollte untersucht werden. Aufgrund der hohen Potenziale zur Senkung der Kühlverluste und Erhöhung der Standzeit, ist eine weiterführende Forschung sinnvoll, vgl. auch Kapitel 3.7.

Literaturverzeichnis

- Baehr, H.-D., & Stephan, K. (1994). *Wärme- und Stoffübertragung*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Behrens, H.-A. (1997). Vergleich einer ofenbeheizten Gleitschrittofens mit einem indirekt beheizten Rollenherdöfen. *GASWÄRME Int.* 46, Nr. 12, S. 599-600.
- Bittner, H.-G., & Pötke, W. (2004). Einsatz von keramischen Rollen in Rollenherdöfen der Metallindustrie. *GASWÄRME Int.* 53, Nr. 5.
- Bobzin, K. (2013). *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Böswirth, L., & Bschorer, S. (2014). *Technische Strömungslehre*. Springer.
- Bürgel, R. (1998). *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Chmielowski, M. (2005). *Modellierung der unter- und oberseitigen Wärmeübertragung an plattenförmiges Gut in Rollenöfen, Dissertation*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
- Dietz, U. (1992). *Einsatz mathematischer Modelle zur Simulation industrielle Feuerräume unter besonderer Berücksichtigung des Strahlungsaustausches, Dissertation*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität Magdeburg.
- Divjak, F.-J., & Gohres, H.-W. (2005). *Patentnr. 102004003520B3*. DE.
- Doege, E., & Behrens, B.-A. (1996). *Handbuch der Umformtechnik*. Hannover: Springer Verlag.
- Ferziger, J. H. (2013). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin-Heidelberg-New York: Springer.
- Figer-Schlangen, K. (2001). *Patentnr. 10024556A1*. DE.
- Friedrich, K. E. (2003). *Patentnr. 10223639A1*. DE.
- Friedrich, K. E. (2006). *Patentnr. 10223639B4*. DE.

- Fukubayashi, H. H., Amano, M., Nakamura, Y., Ohno, K., & Nitta, H. (1996).
Patentnr. DE69111552. DE.
- Glück, B. (1981). *Strahlungsheizung – Theorie und Praxis*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen Berlin.
- Goedecke, R. (2011). *Fluid-Verfahrenstechnik*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag.
- Gorman, H., & Plocki, L. (1981). *Patentnr. US4260404. USA.*
- Gosemann, D., Drodowsky, U., Stranzinger, B., Giese, R., Mintus, F., & Bender, W. (2011). *Senkung von Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß an Wärmöfen mit unterstöchiometrischer Heißgas-Atmosphäre durch ein innovatives Ofenführungskonzept mit kontinuierlichem Ausbrand-Messsystem*. Düsseldorf: TIB.
- Hoffmann, H.-R. (1996). *Patentnr. DE4445699A1.*
- Höfner, F., Samos, D., & Vägt, H.-D. (1992). *Wärme und Stofftransport – Mathematische Methoden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Holler, G. (2006). *Patentnr. DE102004032143A1. Deutschland.*
- Holzapfel, K.-U. (2000). *Einfluss der Transportrolle auf den Wärmeübergang in Rollenöfen, Dissertation*. Otto-von-Guericke Universität Magdeburg: Magdeburg.
- ISPEX. (07. 04 2017). *www.ispex.de*. Von ISPEX Gaspreisindex:
<https://www.ispex.de/energiemarkt-kommentar-02-2017-strompreis-startet-schwaecher-gaspreis-stabil-ins-neue-jahr/> abgerufen
- Jarosinski, W. J. (2009). Thermal shock testing of furnace roll coatings for extended life. *AISTech Proceedings*, (S. Volume 2).
- Klein, B. (2010). *FEM*. Wiesbaden: Springer Verlag.
- Kostowski, E., Jeschar, R., & Alt, R. (1999). *Wärmestrahlung in Industrieöfen*.
- Long, C. (1999). *Essential heat transfer*. New York: Pearson Education Limited.

- Maaß, P., & Peißker, P. (1993). *Handbuch Feuerverzinken*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- Mahan, J. (2002). *Radiation heat transfer - A statistical approach*. New York: John Wiley & Sons.
- Marek, R., & Nitsche, K. (2015). *Praxis der Wärmeübertragung*. München: Hanser Verlag.
- Meyer, L. (1999). *Stahl im Automobilbau*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH.
- Miller, D., Pankiw, R., & Echlin, R. (2002). Advances in tunnel furnace rolls. *AISE Annual Convention*. Nashville Tennessee.
- Neubert, S. (2014). *Hochtemperaturverhalten von Nickel-Chrom-Aluminium-Legierungen für den industriellen Ofen- und Apparatebau*. Aachen: Shaker Verlag.
- Ottersbach, W. (1994). Modern Hot-dip Galvanizing Lines. *National Conference on Coated Steel – Technology, Applications & Markets*, (S. CS 3/1-3/4). New Dehli.
- Otto, S., Walter, G., & Krause, H. (2002). Corrosion of SiSiC Ceramics in Combustion Environments. *6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*. Porto.
- Paul, G. (1987). *Mathematische Modellierung der Wärmeübertragungsprozesse in gasbeheizten Brennkammern und Industrieöfen, Dissertation*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität.
- Pfeifer, H. (2007). *Industrielle Wärmetechnik, 4. Auflage*. Essen: Vulkan Verlag.
- Schupe, W., & Jeschar, R. (1975). Vereinfachte Berechnung des Strahlungswärmeübergangs in Industrieöfen und Vergleich mit Messungen in einer Versuchsbrennkammer. *GASWÄRME int*, 24, S. 64-75.
- Sharma, V. (1994). Continuous Galvanized Steel: Technology & Applications. *National Conference on Coated Steel - Technology, Applications & Markets*, (S. CS 3/1-3/4). New Dehli.

- Siegel, R., & Howell, J.-R. (2001). *Thermal radiation heat transfer*. New York: NY Taylor& Francis.
- Siegel, R., Howell, J.-R., & Lohrengel, J. (1991). *Wärmeübertragung durch Strahlung Teil 2 Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen und in Umhüllungen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Sokolova, I., & Pötke, W. (1999). *Abschlussbericht zu FOGI-Forschungsvorhaben 657*.
- Solka, H.-C. (1988). *Zonale wärmetechnische Bewertung der Strahlungszone von Spaltröhrenöfen, Dissertation*. Magdeburg: Otto-von-Guericke Universität.
- Specht, E. (2014). *Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik*. Essen: Vulkan Verlag.
- Specht, E., & Chmielowski, M. (2003). Einfluss der Transportrollen auf den Wärmeübergang in Rollenöfen. *GASWÄRME Int.* 52, S. 451-455.
- Specht, E., & Holzapfel, K.-U. (1999). Wärmeübergang zwischen Transportrolle und Gut im Rollenofen. *GASWÄRME int.* 48, S. 275-280.
- Specht, E., & Holzapfel, K.-U. (2002). Compensation of the heat transfer on the upper-side and under-side in roller-kilns. *6th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers*. Porto.
- Spritzke Hartchrom GmbH. (02. 03 2017). *Hartchrom ein bewährter Klassiker*. Von <http://www.spitzke-hartchrom.de>: <http://www.spitzke-hartchrom.de/files/spitzke-hartchrom/downloads/Technisches-Datenblatt-Hartchrom.pdf> abgerufen
- Steinkusch, W. (August 1987). Hitzebeständiger Stahlguß für Wärmebehandlungsanlagen. *Gas Wärme International*, S. 340-350.
- Subramanian, V. R. (1994). Coated Steel Sheet: An Overview, National Conference on Coated Steel - Technology, Applications & Markets. *eet: An Overview, National Conference on Coated Steel - Technology, Applications & Markets*, (S. CS 3/1-3/4). New Dehli.

Verein Deutscher Eisenhüttenleute. (2002). *Stahlfiibel*. Düsseldorf: Verlag Stahl Eisen GmbH.

Verein Deutscher Ingenieure. (2002). VDI-Wärmeatlas. In D. Vortmeyer, *Einstrahlzahlen* (S. Kb8-Kb9). Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag.

Von Stark, A., & Mühlbauer, A. (2004). *Praxishandbuch Thermoprozesstechnik, Band 2*. Essen: Vulkan Verlag.

Zeichner, A. (2013). *Entwicklung einer Ofenrollenbeschichtung für das Presshärten*. Aachen.

Im Rahmen dieser Arbeit erschienene Fachartikel und Publikationen:

Konferenzvortrag oder Postervorstellung und Artikel in Proceedings:

- Rein, C.; Giese, R.; Thienpont, K.; Velten, M.; Bender, W.: Development and design of new air-cooled furnace rollers under use of coupled FSI-Simulations. 10TH European conference on Industrial Furnaces and Boilers (ISBN: 978-972-99309-7-3). Gaia, Portugal, 2015.
- Thienpont, E.; Rein, C. Velten, M.; Stranzinger, B.: Entwicklung einer neuen luftgekühlten Ofentransportrolle unter Verwendung der FSI-Simulation. ANSYS CONFERENCE & 33. CADFEM USERS' MEETING (ISBN: 3-937523-12-X). Bremen, 2015.
- Rein, C.; Thienpont, E.; Velten, M.; Stranzinger, B.; Simon, T., Schlegel, C.: Development and design of new furnace rollers under use of coupled FSI-Simulations. METEC & 2nd ESTAD (ISBN: 978-3-00-049542-7). Düsseldorf, 2015.

Postervorstellung:

- Stranzinger, B; Rein, C.; Thienpont, E.: Untersuchung zur Reduzierung der Wärmeaufnahme durch gekühlte Ofenrollen in Banderwärmungsanlagen (Poster). ProcessNet Jahrestreffen Fachgruppe Hochtemperaturtechnik. Frankfurt, 2017.

Anhang

A1 Festigkeitsberechnung der Ofenrolle

Vereinfachte Berechnung der Kräfte durch Kräftegleichgewichtsgesetz, siehe **Abbildung A 1-1 – Abbildung A 1-3..**

Gegeben:

| | | |
|---------------------|----------------------|--------------------------|
| Rollenabstand | L_{RA} | 6000 mm |
| Stahldichte | ρ_{St} | 7,8 kg/dm ³ |
| Rollendurchmesser | d_R | 150 mm |
| Rollenmantelgewicht | m_{RM} | 146 kg |
| Torpedogewicht | m_T | 21 kg |
| Wasservolumen | V_W | 0,032308 m ³ |
| Wasserdichte | $\rho_W(25^\circ C)$ | 997,04 kg/m ³ |
| Wassergewicht | m_W | 32,31 kg |
| Bandbreite | L_{BB} | 1650 mm |
| Banddicke | S_B | 4 mm |
| Bandvolumen | V_B | 0,0396 m ³ |
| Bandgewicht | m_B | 308,88 kg |

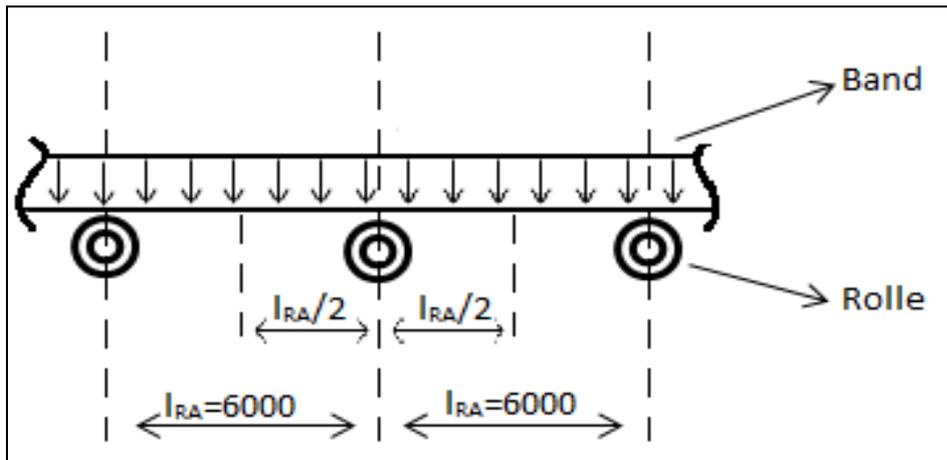


Abbildung A 1-1: Seitenansicht der Rolle und die einwirkende Last

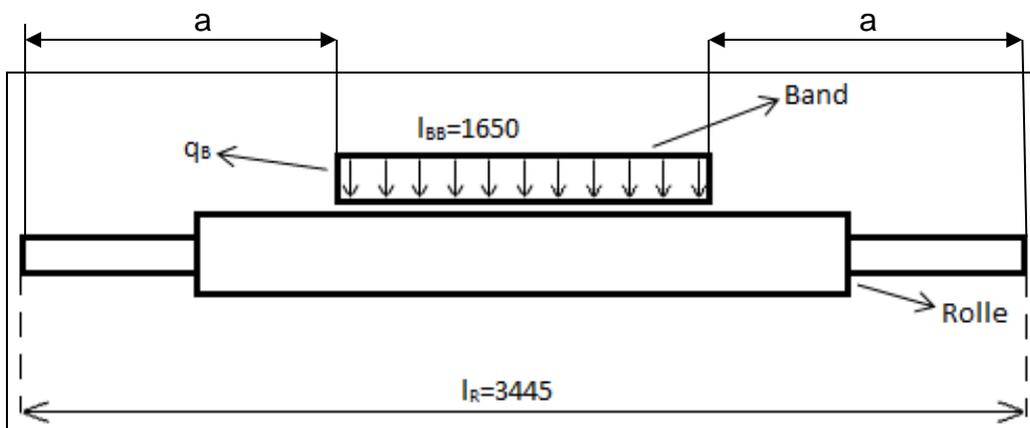


Abbildung A 1-2: Vorderansicht der Rolle und die einwirkende Last

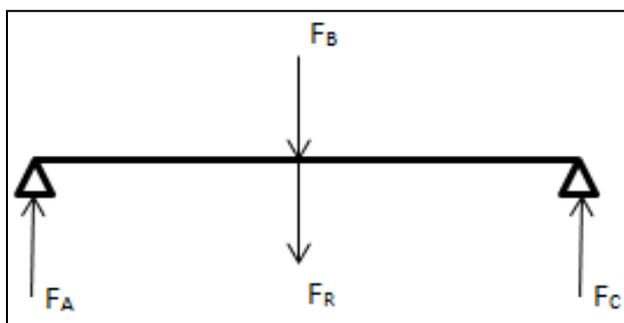


Abbildung A 1-3: Kräftegleichgewicht der Rolle

Es wird hier angenommen, dass die Rolle aus dem Werkstoff 1.4837 hergestellt wurde. Als erstes wird der Festigkeitsnachweis berechnet. Dieser ist erfüllt, wenn die folgende Bedingung

$$\sigma_{max} < \sigma_{zul}$$

erfüllt ist.

Berechnung der maximalen Biegespannung

Die maximale Biegespannung lässt sich berechnen, wenn das maximale Biegemoment bekannt ist.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_R}$$

Zur Berechnung des maximalen Biegemoments müssen Bandgewichtskraft, Rollengewichtskraft und die Lagerkräfte berechnet werden.

Berechnung der Bandgewichtskraft

$$F_B = m_g * g = 308,88kg * 9,81m/s^2$$

$$F_B = 3030,11 N$$

Berechnung der Rollengewichtskraft

$$F_R = (m_{RM} + m_T) * g = (146 + 21)kg * 9,81m/s^2$$

$$F_R = 1638,27N$$

Berechnung der Lagerkräfte

$$F_A + F_C - F_R - F_B = 0$$

$$F_A = F_C = \frac{F_B + F_R}{2} = \frac{(3030,11 + 1638,27)N}{2} = 2334,19N$$

Berechnung des maximalen Biegemoments/Biegemomentverteilung

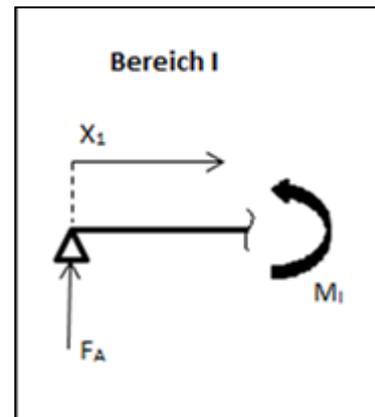
Das maximale Biegemoment wird anhand der Schnittgrößen berechnet.

Bereich I: $0 < x_1 \leq a=897,5\text{mm}$

$$M_I(x_1) = F_A * x_1$$

$$M_I\left(x_1 = \frac{L_R}{2} - \frac{L_{BB}}{2} = 897,5\text{mm}\right) = 2334,19\text{N} * 897,5\text{mm}$$

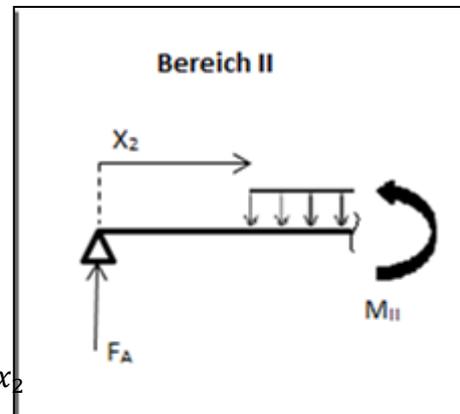
$$M_I = 2094,94 \text{ Nm}$$



Bereich II: $a=8897,5\text{mm} < x_2 \leq L_R/2$

$$q_B = \frac{m_B * g}{L_{BB}} = \frac{308,88\text{kg} * \frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2}}{1,650\text{m}} = 1836,432 \text{ Nm}$$

$$M_{II}(x_2) = -q_B * \frac{L_{BB}}{2} * \left(x_2 - \frac{L_{BB}}{4} - 897,5\text{mm}\right) + F_A * x_2$$



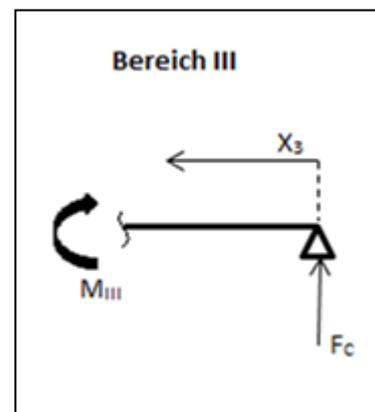
$$M_{II}\left(x_2 = \frac{L_R}{2}\right) = -1836,432\text{Nm} * \frac{1,65\text{m}}{2} * \left(\frac{3,445\text{m}}{2} - \frac{1,65\text{m}}{4} - 0,8975\text{m}\right) + 2334,19\text{N} * \frac{3,445\text{m}}{2}$$

$$M_{II} = 3395,68 \text{ Nm}$$

Bereich III: $(L_{BB} + a) < x_3 \leq L_R$

$$M_{III}(x_3) = F_C * x_3$$

$$M_{III}(x_3 = 897,5\text{mm}) = 2334,19 * 0,8975\text{m}$$



$$M_{III} = 2094,94 \text{ Nm}$$

Somit lautet das maximale Biegemoment

$$M_{\max} = 3395,68 \text{ Nm}$$

und befindet sich in der Mitte der Rolle.

Berechnung des Widerstandsmoments

$$W_R = \frac{\pi}{32 \cdot d_a} * (d_a^4 - d_i^4) = \frac{\pi}{32 \cdot 0,150 \text{ m}} * (0,150 \text{ m}^4 - 0,125^4)$$

$$W_R = 1,7155 * 10^{-4} \text{ m}^3$$

Nun kann die maximale Biegespannung berechnet werden.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_R} = \frac{3395,68 \text{ Nm}}{1,7155 * 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{\max} = 19794112,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 19,79 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{\max} = 19,79 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

A2 Messung der Dehnungen am Rollenlager

Es wurden Dehnmessstreifen (DMS) an den Rollenlagern befestigt und die gemessenen Dehnung ausgewertet, vgl. **Abbildung A 2-1**.

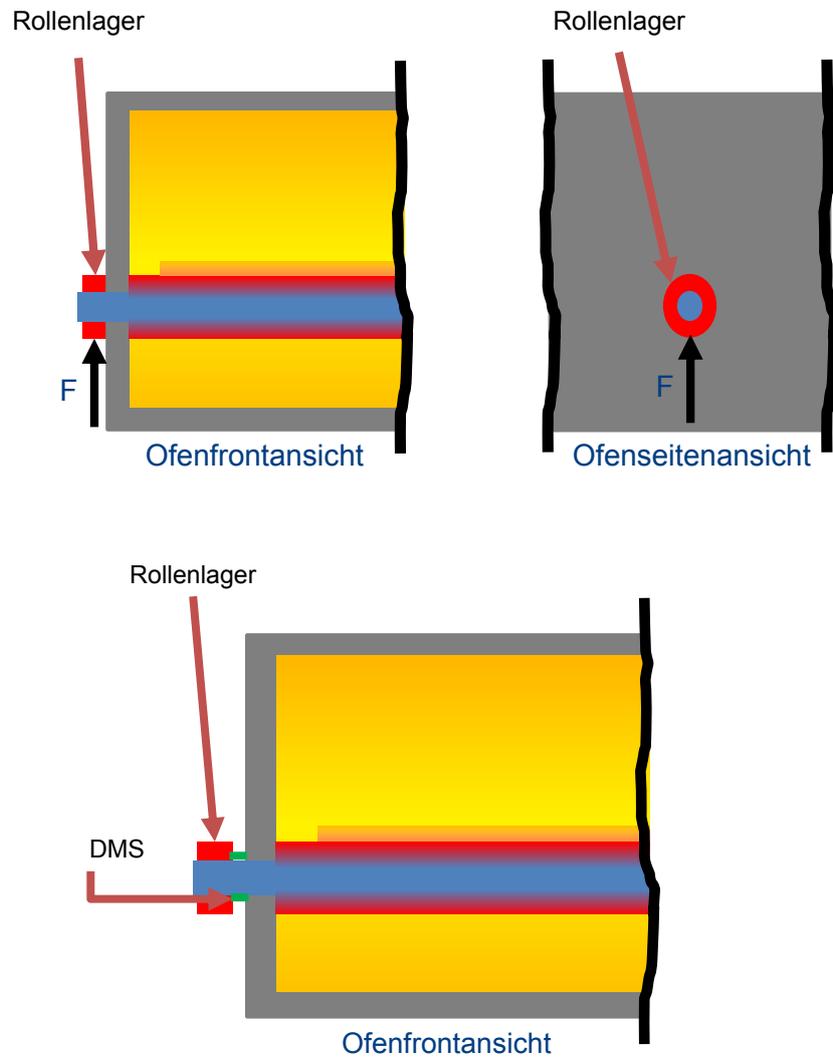
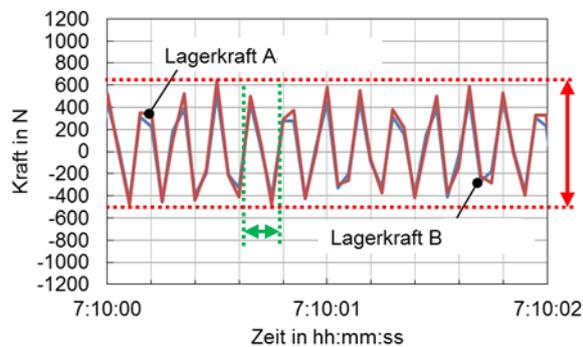


Abbildung A 2-1: Schematische Darstellung der DMS an den Rollenlagern

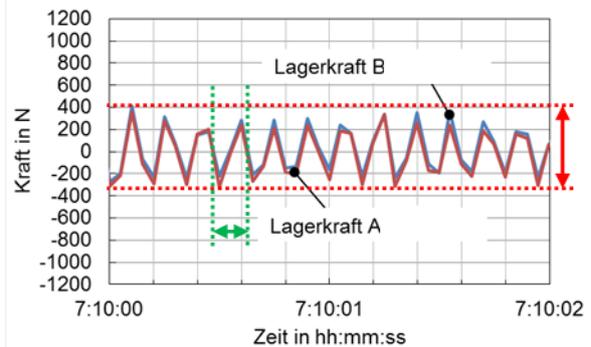
An der Schwingbreite der gemessenen Kraft konnte man schnell auf die Betriebsdauer der Ofenrollen schließen, vgl. **Abbildungen A 2-2 – A 2-3**. Die Schwingbreite korreliert linear mit der Bandgeschwindigkeit bzw. der Umdrehungsgeschwindigkeit der Rollen. Anhand der Messungen lässt sich die Unwucht der Rollen bewerten. Diese nimmt mit fortschreitender Betriebsdauer zu. Zu starke Schwingungen wie bspw. an Rolle 6 nach 17 Betriebsmonaten sind auch visuell am Rollenlager erkennbar und führen zum Austausch der Rolle.

➤ Rolle 6 (17 Betriebsmonate)



Rolle 6 ≈ 1120N

➤ Rolle 1 (8 Betriebsmonate)

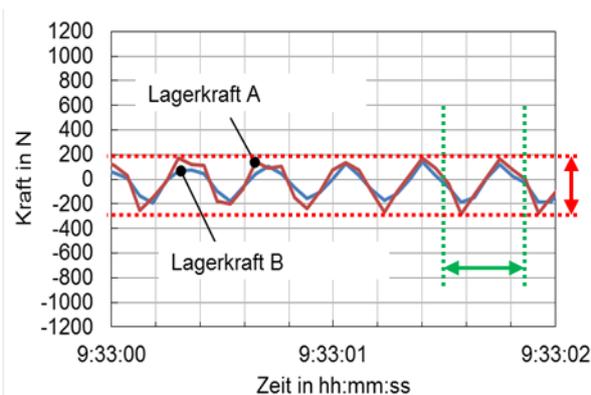


Rolle 1 ≈ 690 N

Schwingbreite:

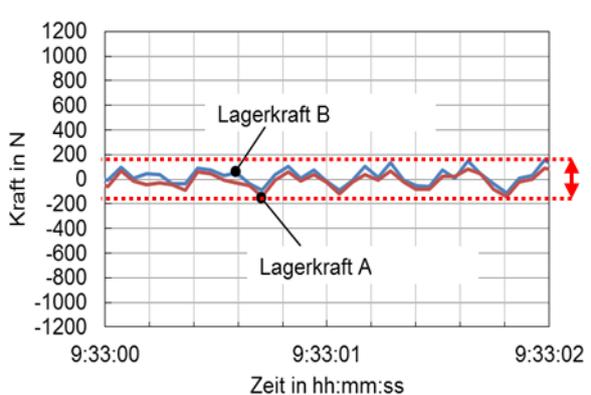
Abbildung A 2-2: Kräftemessung an zwei Ofenrollen (Bandgeschwindigkeit 371 U/min)

➤ Rolle 6 (17 Betriebsmonate)



Rolle 6 ≈ 460N

➤ Rolle 1 (8 Betriebsmonate)



Rolle 1 ≈ 270 N

Schwingbreite:

Abbildung A 2-3: Kräftemessung an zwei Ofenrollen (Bandgeschwindigkeit 92 U/min)

A3 Emissionsgradtabelle

Tabelle A 3-1: Emissionsgradtabelle (Quelle: <http://www.kleiberinfrared.de>)

| Material | Eigenschaften | T / °C | Emissionsgrad gesamt |
|-----------|---|--------------|-------------------------|
| Aluminium | Blech, eloxiert | 100 | 0,55 |
| | Blech, blank | 100 | 0,1 |
| | Blech, poliert | 23; 100 | 0,05 |
| | Blech, oxidiert | | 0,2 - 0,3 |
| | Block rau bearbeitet | | 0,4 |
| | Drehteil, blank | | 0,3 |
| | hochglanzpolierte Alu- Oberfläche | 100 | 0,095 |
| Chrom | poliert | 50 | 0,1 |
| | | 150 | 0,071 |
| | oxidiert | 50 – 1000 | 0,28 - 0,38 |
| Stahl | oxidiert | 50 | 0,08 |
| | | 100 - 700 | 0,79 - 0,8 |
| | Blech, blank | | 0,25 - 0,65 |
| | Edelstahl oxidiert nach Ofenbehandlung | 200 - 500 | 0,9 - 0,95 |
| | Nickelchromstahl Draht, oxidiert | 50 - 500 | 0,95 - 0,98 |

| | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|
| | stark oxidiert | 50 500 | 0,88 0,98 |
| Stahllegierungen | Inkonel (80% Ni, 14% Cr, 6% Ti) | 200 - 900 | 0,55 - 0,78 |
| | gewalzt | 816 | 0,69 |
| | sandgestrahlt | 816 | 0,79 |
| | Leg. mit 8% Ni, 18% Cr | 500 | 0,35 |
| Steine | Feuerfest, porös | | 0,85 |
| Wasser | destilliert | 20 | 0,96 |
| | Film auf Metall | 20 | 0,98 |
| | stehende Wasseroberfläche | | 0,98 |
| Ziegel | feuerfest - stark strahlend | 500 - 1000 | 0,8 - 0,9 |
| Zink | oxidiert | 400 1000 - 1200 | 0,11 0,5 - 0,6 |

A4 Heißgaskorrosionsversuche

Nachfolgende **Abbildung A 4-1** zeigt den verwendeten Probenhalter für die Heißgaskorrosionsversuche.

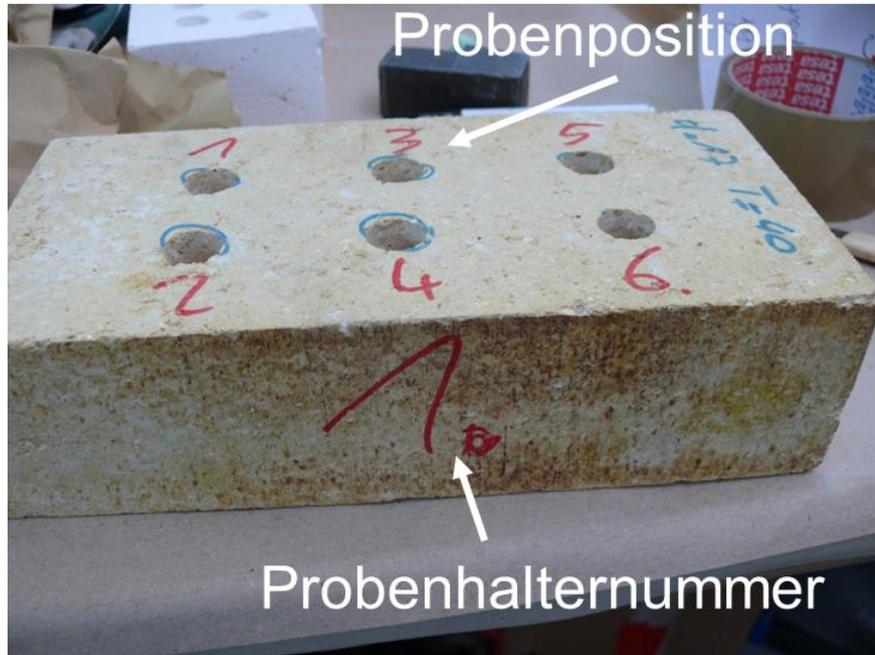


Abbildung A 4-1: Probenhalter aus Feuerfestmaterial

Die metallograpischen Untersuchungen der Proben im Temperaturbereich von 700-1.000°C mit einer Versuchszeit von nur 5 Monaten bestätigen die Unbeständigkeit der untersuchten Proben gegenüber der unterstöchiometrischen Ofenatmosphäre besonders im Oberflächenbereich im Probenrand. Im Bereich der Probenoberfläche konnte Siliziumoxid und Chromcarbid an den Korngrenzen nachgewiesen werden.

In der Probenmitte konnte Chromoxid und Siliziumoxid auf den Korngrenzen detektiert werden. Eisen, Nickel und Kobalt zeigen in beiden Bereichen (Probenrand und -mitte) identische Verteilungen im Mischkristall. Die Probe wurde somit bis in die Probenmitte durch die heiße Ofenatmosphäre beeinflusst. Alle Werkstoffproben (1.4857, 1.4837, K6040 und K6040Al) zeigen tendenziell das gleich Verhalten.

LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE ANGABEN

Name: Carsten Herbert Rein
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder
Staatsangehörigkeit: deutsch
Geburtsdatum: 09.08.1986
Geburtsort: Hachenburg

BERUFSPRAXIS

07/2012 – heute Projektleiter
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH in Düsseldorf

10/2011 – 06/2012 Projektingenieur
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH in Düsseldorf

02/2011 – 09/2011 Diplomarbeiter
Bosch Thermotechnik GmbH in Lollar

AUSBILDUNG

04/2007 – 09/2011 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens Fachrichtung
Maschinenbau, Schwerpunkt Strömungs- und
Energietechnik an der Universität Siegen.
Note: Sehr gut (1,3), Abschluss: Diplom.

06/2006 – 03/2007 Grundwehrdienst
Jagdbombergeschwader 33 in Cochem/Büchel

03/2006 Abitur
Freiherr-vom-Stein-Gymnasium in Betzdorf-Kirchen

Hachenburg, 28. April 2017