



Abschlussbericht

Projekt: EnEffiSint

Steigerung der Energieeffizienz von Sinteröfen

Förderkennzeichen: 03ET1640x (x=A,B,C,D,E)

Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2018 bis 31.10.2022

Datum: 19.04.2023

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Fördermaßnahme »Anwendungsorientierte nichtnukleare FuE im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung« im Förderbereich »Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)« des BMWK durchgeführt.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Koordinator:

GKN Sinter Metals Engineering GmbH

Dr. Anastasia Özkan (bis 3/19), Vitali Janzen (3/19 bis 10/21), Markus Preuß (ab 10/21)

Krebsöge 10

42477 Radevormwald

Das Dokument enthält die Ergebnisse von folgenden Projektpartnern:

Firma/Institut: GKN Sinter Metals Engineering GmbH

Adresse: Krebsöge 10, 42477 Radevormwald

Autoren: Vitali Janzen, Dr. Eberhard Ernst, Dr. Markus Schneider, Markus Preuß

Förderkennzeichen: 03ET1640A



Firma/Institut: ONEJOON GmbH

Adresse: Leinetal/Auf der Mauer 1 • 37120 Bovenden

Autoren: Konstantin Bernd, Martin Creutziger

Förderkennzeichen: 03ET1640B



Firma/Institut: MESA Industrie-Elektronik GmbH

Adresse: Neckarstrasse 19, 45768 Marl

Autoren: Norbert Engler, Peter Halwas

Förderkennzeichen: 03ET1640D



Firma/Institut: HTCO GmbH

Adresse: Rabenkopfstraße 4, 79102 Freiburg

Autoren: Teodora Vatahska, Sebastian Pietrucha

Förderkennzeichen: 03ET1640C



Firma/Institut: Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik IWM

Adresse: Wöhlerstr. 11, 79108 Freiburg

Autoren: Dr. Torsten Kraft, Dr. Ingo Schmidt

Förderkennzeichen: 03ET1640E

(Berichtsnummer 1018/2023)



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

Inhalt

1. Zusammenfassung (Executive Summary)	4
2. Einleitung (PL)	5
3. Projektüberblick (PL, Partner)	6
3.1 Ziele des Projekts (PL)	6
3.2 Struktur, Aufgaben, Vernetzung (PL).....	6
3.3 Projektpartner	7
4. Ergebnisse (alle)	9
4.1 Exp. Methoden/Datenbasis (ONEJOON, GKN, MESA)	9
4.1.1 Herstellung Probekörper (GKN).....	9
4.1.2 Gas- und Temperaturmesstechnik (MESA).....	11
4.1.3 Charakterisierung Werkstoff und Bauteil (ONEJOON).....	13
4.2 Bestandsaufnahme und Ertüchtigung Durchlaufofen (GKN, MESA).....	22
4.2.1 Aufrüstung Gassensorik im Produktionsofen (MESA).....	22
4.2.2 Leerlaufversuche (GKN).....	23
4.2.3 Versuche mit Beladung (GKN).....	31
4.3 Modellbildung (IWM, HTCO).....	41
4.3.1 Werkstoff- und Bauteilmodell (Entwachsen & Sintern) (IWM)	41
4.3.2 Ofenmodell (HTCO)	48
4.3.3 Kopplung Bauteilmodell mit Ofenmodell (IWM, HTCO)	52
4.4 Simulation Temperaturverteilung und Gasströmung (HTCO).....	55
4.4.1 Simulation leerer Ofen (HTCO)	55
4.4.2 Simulation mit Beladung (HTCO).....	60
4.4.3 Sequenziell gekoppelte Simulation (IWM, HTCO)	66
4.5 Umsetzung im Produktionsofen (GKN, ONEJOON)	70
4.5.1 Ermittlung Problemstellen & Optimierungspotenzial (GKN, ONEJOON).....	70
4.5.2 Optimierung der Brennerregelstrecke (ONEJOON, GKN)	73
4.5.3 Verbesserung Strömungsführung und Anlagentechnik (GKN, ONEJOON)	76
5. Schlussfolgerungen, Handlungsempfehlungen (PL)	80
6. Anhang	82
6.1 Anhang A – Gasanalyse am Versuchsofen bezüglich CO ₂ , CO und H ₂	82
6.2 Anhang B – Gasanalyse am Produktionsofen.....	88
6.2.1 Darstellung der Messergebnisse aus 08-2019.....	88
6.2.2 Darstellung der Messergebnisse aus 06-2021.....	96

1. Zusammenfassung (Executive Summary)

In der Pulvertechnologie ist der Brennprozess ein wesentlicher Prozessschritt. Dabei durchlaufen die Bauteile einen Sinterofen, in dem das unfertige, poröse Zwischenprodukt (der sog. „Grünling“), der bei Sintermetallen neben den Metallpartikeln einen kleinen Anteil Wachs enthält, zu einem festen und dichten Bauteil gesintert („gebacken“) wird. Bei diesem Prozess spielt die im Ofen herrschende Atmosphäre eine entscheidende Rolle – sowohl für die Qualität des Produkts als auch für die Energieeffizienz des Prozesses.

Zu Projektbeginn stellte sich heraus, dass der eigentliche Sinterschritt bei dem untersuchten Bandofen schon weitgehend energieoptimiert ist. Das deutlich größere (und einfacher zu hebende) Einsparpotenzial wurde beim Entwachsungsschritt vermutet, da die dort entstehenden gasförmigen Zersetzungsprodukte wie Methan einen signifikanten Energieinhalt aufweisen, der für die Aufheizung zugänglich gemacht werden könnte.

Durch die enge Zusammenarbeit eines Anwenders, eines Ofenherstellers, eines Messtechnikexperten und zweier Simulationsexperten wurden die Strömungsverhältnisse in dem als Referenz verwendeten Durchlaufbandofen untersucht. Dazu wurde zum einen eine spezielle Messtechnik adaptiert, um die lokale Gaszusammensetzung und Temperaturentwicklung bei der Durchfahrt der Bauteile an verschiedenen Positionen zu messen. Zum anderen wurden theoretische Modelle der inhomogenen Wachszersetzung im Bauteil entwickelt und mit der Gasströmung im kompletten Ofen gekoppelt, um mittels numerischer Parameterstudien die Gasströmung im Ofen so zu optimieren, dass die gasförmigen Zersetzungsprodukte des Wachses energetisch sinnvoll genutzt werden können. Es zeigte sich aber, dass schon die genaue Kenntnis der Strömungsverhältnisse des Istzustandes zielgerichtete Hinweise auf Prozessoptimierungen (z.B. Brenneinstellungen und Positionierungen) liefern kann.

Die Projektarbeiten zeigten aber auch, dass die Idee der energetischen Nutzung der im Prozess entstehenden Abgase zwar grundsätzlich möglich ist, jedoch mit einem enormen Aufwand mit Blick auf den Umbau der bestehenden Anlage einhergeht. Einfacher umzusetzen wäre die erarbeitete Optimierung der Brennerregelstrecke. Auch die Verwendung gasdichter Schleusen im Ein- und Auslaufbereich des Ofens würde einen deutlichen Mehrwert für die Optimierung des Sinterprozesses bringen. Da diese beim bestehenden Ofenkonzept jedoch keine Verwendung finden können, ist für zukünftige Sinteranlagen die Verwendung eines Rollenofens aus energetischer Sicht dringend zu empfehlen.

Die Endphase des Projekts und vor allem die Umsetzung im Produktionsofen war maßgeblich von der Covid-Pandemie und den gestörten Lieferketten sowie dem Ukraine-Russland Konflikt mit den dadurch bedingten stark steigenden Energiepreisen geprägt. Um diesen Ereignissen entgegen zusteuern, wurde bei GKN entschieden, zahlreiche Anlagen - und hier vor allem die sehr energieintensiven Sinteröfen - herunterzufahren. Der Fokus der verbliebenden Öfen lag dabei auf der Serienfertigung. Dadurch konnten die abschließenden Versuche und Umbaumaßnahmen des Projekts nicht wie ursprünglich geplant umgesetzt werden.

2. Einleitung (PL)

Angesichts des Klimawandels und insbesondere auch der aktuellen Energiekriese rückt die Verbesserung der Ressourcen- und Energieeffizienz in der Produktion immer stärker in den Fokus. Um die Wettbewerbsfähigkeit und technologische Spitzenposition der deutschen Industrie zu sichern, hat die Bundesregierung im Rahmen ihres 6. Energieforschungsprogramms die „*Steigerung der Energieeffizienz bei der Bereitstellung, Verteilung und Nutzung von Energie (Beitrag zur Senkung des Primärenergiebedarfs [...])*“ als einen wesentlichen Baustein erkannt. Insbesondere wurde dabei auch für „*energieeffiziente Industrieöfen*“ explizit Forschungsbedarf gesehen. Als energieintensive Anwendung bieten die Industrieöfen der Pulvertechnologie ein großes Einsparpotenzial, denn rund 50% des Energieaufwands für die Produktion eines pulvermetallurgischen Bauteils steht in direktem Zusammenhang mit dem Sinterofen (Sintern, Wärmebehandlung, Gase)¹, und nur 10-20% dieser Energie erreicht das eigentliche Bauteil². Im Rahmen dieses Forschungsprogramms wurde auch das in diesem Bericht beschriebene Projekt EnEffiSint gefördert.

In der Pulvertechnologie ist das Sintern für keramische und metallische Bauteile ein wesentlicher Prozessschritt. Dabei durchlaufen diese einen Sinterofen, in dem das unfertige, poröse Zwischenprodukt (der sog. „Grünling“) zu einem festen und dichten Bauteil gesintert („gebacken“) wird. Bei diesem Prozess spielt die im Ofen herrschende Atmosphäre eine entscheidende Rolle – sowohl für die Qualität des Produkts als auch für die Energieeffizienz des Prozesses. Die technischen Gegebenheiten (d.h. Temperaturen bis 2000 °C, abgeschlossene Ofenkammern, etc.) erschweren die *in situ* Messung der Atmosphäre erheblich und machen so z.B. ein gezieltes Regeln der einzelnen Gasbestandteile bisher unmöglich. Als Folge ergeben sich oft unnötig lange Anfahrzeiten und eine unvollständige Auslastung der Anlagen. Doch nicht nur der Betrieb, sondern auch die präzise Auslegung von industriellen Öfen ist ohne entsprechende detaillierte Modelle schwierig, sodass branchenweit noch immer auf Basis von Erfahrungswerten dimensioniert wird. Überdimensionierung und ein damit einhergehender erhöhter Energieaufwand sind häufig die Folge.

Im Rahmen des Projekts EnEffiSint wurden verschiedene Grundlagen für eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz erarbeitet. Durch die intensive Zusammenarbeit von Endanwendern und Ofenherstellern sowie Messtechnik- und Simulationsexperten mit komplementärem Know-how wurden Werkzeuge entwickelt, die zukünftig dabei helfen können, bisher brachliegende energetische Einsparungspotentiale in diesem Industriezweig zu erschließen. Die konkrete Zielsetzung war dabei zweigeteilt: Zum einen sollten die im Projekt entwickelten neuartigen numerischen Tools zur Ofenauslegung für neue Öfen eine direkte Effizienzsteigerung ermöglichen, z.B. durch den Wegfall von Verlusten durch unnötig lange Öfen (sog. Wandverluste) oder eine optimierte Positionierung der Brenner. Zum anderen sollten Mess- und Regelungsmethoden weiterentwickelt werden, um durch eine präzise Steuerung der Ofenatmosphäre auch den Prozess an sich effizienter und genauer zu fahren, was höhere Durchsatzraten, weniger Ausschuss und kürzere Prozesszeiten ermöglicht. All diese Faktoren wirken sich ebenfalls positiv auf den energetischen Fußabdruck eines Bauteils aus.

¹ <http://beta.ipmd.net/articles/001134.html>

² E. Ernst, Energy Balance of a Belt Sinter Furnace, in: Proc. EuroPM 2012, Vol. 1 (2012) 277-282, EPMA, ISBN: 978-1-899072-36-1

3. Projektüberblick (PL, Partner)

3.1 Ziele des Projekts (PL)

Im Projekt EnEffiSint sollten verschiedene Methoden und Werkzeuge für eine deutliche Energieeinsparung entwickelt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, arbeiteten Ofenhersteller, Messtechnik- und Simulationsexperten mit einem Bauteilhersteller zusammen. Das mögliche Energieeinsparpotenzial sollte erreicht werden, indem zum einen ein robustes und validiertes Simulationsmodell entwickelt und auf einen industriellen Bandofen angewendet wird, mit dem in den Prozess hineingeschaut und gezielte Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden können. Auf Basis dieses Gesamtmodells wurden mehrere Stoßrichtungen verfolgt:

- erhöhter Wirkungsgrad durch optimierte Auslegung neuer Anlagen sowie verbesserte Prozesskontrolle
- optimierte Produktion durch detaillierte Kenntnis der Zustände im Ofeninneren

Zum anderen sollte auch die Mess- und Regelungstechnik am Ofen weiterentwickelt werden, um auch durch eine gezielte Einstellung der Ofenatmosphäre die Energieeffizienz zu verbessern.

3.2 Struktur, Aufgaben, Vernetzung (PL)

Partner im Projekt waren die folgenden Firmen und Einrichtungen

- GKN Sinter Metals Engineering GmbH
- ONEJOON GmbH
- HTCO GmbH
- MESA Industrie-Elektronik GmbH
- Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Ein gemeinsames Ziel der am Projekt beteiligten Partner bestand neben der Entwicklung der Mess- und Simulationmethoden darin, am Beispiel des ausgewählten industriellen Produktionsofens das Energieeinsparpotenzial bei der Herstellung von Sinterstahlbauteilen zu demonstrieren. Durch die Simulation des kompletten Ofens mit Schwerpunkt auf der Entwachsungszone und inklusive der Vorgänge im Brenngut sollten realisierbare Einsparpotenziale aufgezeigt werden, die anschließend am Produktionsofen verifiziert werden sollten. Bild 3.2-1 zeigt die Projektstruktur mit den wesentlichen Arbeitspaketen und den jeweils beteiligten Partnern.

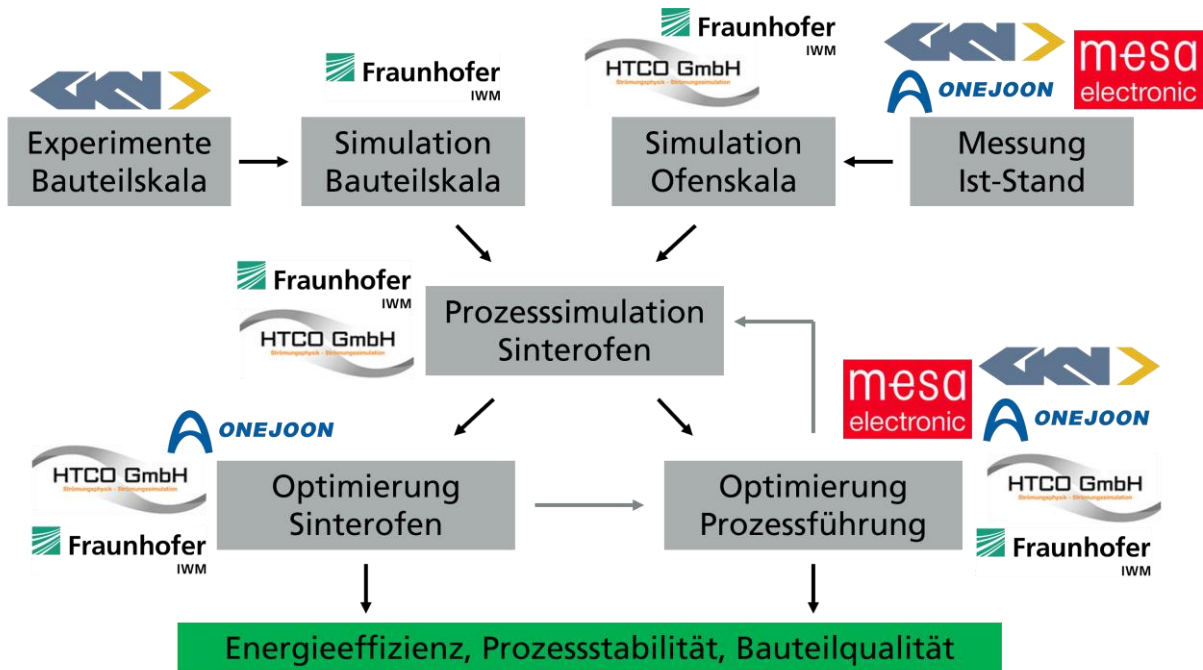


Abbildung 3.2-1: Schematische Darstellung der Projektstruktur

3.3 Projektpartner

GKN Sinter Metals Engineering GmbH

GKN Sinter Metals ist ein global operierendes Unternehmen mit ca. 1.500 Beschäftigten in Deutschland mit Schwerpunkt in der Entwicklung und Herstellung pulvermetallurgischer Bauteile. Mit Hoeganaes Corporation gehört ein eigener Pulverlieferant zur Firmengruppe und erlaubt eine komplette Abdeckung der Wertschöpfungskette vom Pulver über Pulverpressen und Sintern zum fertigen Bauteil. Die GKN Sinter Metals Engineering GmbH entwickelt Materialien, Produkte und Prozesse. Neben einer Versuchshalle zur Evaluierung von Fertigungsprozessen stehen auch ein Metallographielabor mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie, mechanischer und chemischer Charakterisierung sowie Materialprüfung zur Verfügung. Umfangreiche Möglichkeiten zur Bauteilauslegung mittels Finite-Elemente-Methoden sowie der Belastungs-, Strömungs- und Prozesssimulation ergänzen die Entwicklungsaktivitäten.

ONEJOON GmbH

Die Onejoon GmbH gehört zu den weltweit führenden Industrieunternehmen im Bereich des Industrieofenbaus. Mit Blick auf die gesamte Firmenhistorie kann das Unternehmen mittlerweile auf über 125 Jahre Erfahrung und Expertise in der Entwicklung unterschiedlichster Thermo-processanlagen zurückgreifen. In das Produktportfolio der Onejoon GmbH fallen alle gängigen Ofenbauformen für kontinuierliche Prozesse wie Schubplattenöfen, Drehrohröfen, Rollenöfen, aber auch Öfen für den Batch-Betrieb. Die Onejoon GmbH besitzt ein eigenes TestCenter, in dem sich unterschiedlichste Versuchsanlagen befinden. Zweck dieses TestCenters ist die Erprobung und Validierung von Prozessen für und mit Kunden zusammen, um diese anschließend hochskalieren zu können. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Weiterentwicklung und Optimierung von Pyrolyse-Prozessen sowie Entbinderungs- und Sinterprozessen, aber beispielsweise auch Karbonisierungs- oder Oxidationsprozesse. Im Rahmen des Projekts EnEffiSint sollen mit Hilfe der im TestCenter zur Verfügung stehenden Versuchsanlagen Untersuchungen an einzelnen Sinterbauteilen durchgeführt werden, um den Entbinderungsprozess genauer zu verstehen. Zusätzlich soll die Onejoon GmbH die bestehende Anlagentechnik der

GKN Sinter Materials GmbH untersuchen und gegebenenfalls Empfehlungen zur Optimierung dieser Anlagen definieren und dokumentieren.

HTCO GmbH

Die HTCO GmbH ist ein Engineering-Dienstleister, der sich auf die virtuelle Produktentwicklung und -optimierung mittels numerischer Simulation (CFD) von Flüssigkeits- und Gasströmungen sowie Temperaturberechnungen spezialisiert hat. In mehr als 25 Jahren wurden hunderte Industrieprojekte im F&E-Bereich erfolgreich realisiert. Das Unternehmen verfügt über Lizenzen der führenden CFD-Simulations-Software (ANSYS FLUENT, STAR CCM+) und die entsprechenden Rechnerkapazitäten. Innerhalb des Konsortiums führt HTCO zusammen mit dem IWM numerische Simulationen zur Strömungs- und Temperaturverteilung in Sinteröfen aus, um genaue Hinweise auf die tatsächlichen lokalen Temperaturen an den zu sinternden Bauteilen zu bekommen.

MESA Industrie-Elektronik GmbH

Firma Mesa Industrie-Elektronik GmbH bietet ein umfangreiches Programm für den Industrieofenbau - Thyristorsteller bis 2700A, Sensoren, Regler, Prüfgeräte und insbesondere Gasanalysegeräte für Ofenatmosphären nach verschiedenen physikalischen Verfahren. Die neueste Entwicklung der Mesa Industrie-Elektronik GmbH vereint die Gasanalyse und Atmosphärenregelung in einer kompakten Einheit. Durch den Einsatz modernster Technologien kann nahezu jede Kommunikationsschnittstelle bedient werden. Die Produkte der Fa. Mesa werden weltweit eingesetzt. Die Kundenzufriedenheit basiert auf der umfassenden Betreuung durch ein zuverlässiges, kompetentes Mitarbeiter-Team. Innovative Lösungen, die flexibel auf die Erfordernisse des Kunden angepasst werden, gewährleisten ein Optimum an Qualität und Produktivität mit hoher Betriebssicherheit.

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM charakterisiert, simuliert und bewertet das Verhalten von Werkstoffen, Bauteilen und Systemen unter dem Einfluss äußerer Kräfte in unterschiedlichen Umgebungen. Für Unternehmen und öffentliche Auftraggeber erarbeitet das Fraunhofer IWM Lösungen, die die Sicherheit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Funktionalität von technischen Bauteilen und Systemen verbessern. Damit leistet das Fraunhofer IWM wichtige Beiträge zur Wirtschaftlichkeit, Ressourcenschonung und zur Energieeffizienz und trägt somit zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei.

In seiner Gruppe »Pulvertechnologie und Fluidodynamik« beschäftigt sich das Fraunhofer IWM schon seit langem mit der Simulation von pulvertechnologischen Prozessschritten und -ketten und trägt dazu bei, die Fertigung formgenauer und rissfreier Bauteile effizienter zu gestalten, wobei in erster Linie sowohl klassische Kontinuumsmechanik (FEM) als auch partikelbasierte Methoden (DEM, SPH) zum Einsatz kommen.

4. Ergebnisse (alle)

Um das übergeordnete Ziel der Effizienzsteigerung zu erreichen, wurde das Vorhaben in 6 Arbeitspakete aufgeteilt. Das erste Arbeitspaket umfasst die finale Definition aller benötigten Anlagen, Werkstoffe, Testteile, Daten und Schnittstellen, sowie die Datenerfassung und grundlegende Messungen zum aktuellen Ist-Stand. Die Modellsysteme wurden im Wesentlichen bereits vor dem Projektbeginn vordefiniert. Weiterhin wurde ein Ofen, der als Basis für alle Untersuchungen und Modifikationen im Projekt genutzt werden soll, festgelegt. Zum Einsatz kam ein im GKN Sinter Metals-Werk Bad Brückenau bestehender Bandofen. Nachfolgend werden die verschiedenen experimentellen Aufbauten und Versuche sowie die durchgeführten Simulationen beschrieben.

4.1 Exp. Methoden/Datenbasis (ONEJOON, GKN, MESA)

Der dem Projekt als Basis zugrundeliegende Bandofen BBR 212 mit $w=800$ mm Bandweite in Bad Brückenau besteht aus mehreren Zonen (siehe auch Abschnitt 4.2.2). Der Transport erfolgt über ein netzartiges Band, auf dem entweder die Bauteile direkt stehen oder aber über Netzplatten aufgebracht werden.

Die erste Zone ist der Aufgabe-Bereich. Hier können die Grünlinge – die gepressten aber nicht gesinterten Rohteile – auf das Transportband aufgegeben werden. In der Regel erfolgt dies automatisch über einen Manipulator (Roboterarm). Der Aufgabe-Bereich besitzt Umgebungstemperatur und Umgebungsatmosphäre. Die nächste Zone dient dem Ausbrennen, d.h. hier werden die Bauteile langsam aufgeheizt. Die Bindestoffe, in der Regel Wachse, schmelzen und verbrennen in diese Zone. Die Solltemperatur in der Ausbrenn-Zone liegt zwischen 800 und 900 °C. Die Atmosphäre in dieser Zone besteht hauptsächlich aus Brennerabgasen. Hinzu kommt ein geringer Teil der folgenden Sinterzonen-Atmosphäre.

Durch einen kleinen Übergangstunnel gelangen die Grünlinge in die Sinterzone. Hier werden aus den Grünlingen die Sinterteile. Dies geschieht bei einer Sintertemperatur von ca. 1100 °C. Die Sinterzone hat eine fest eingestellte Atmosphäre von 2 % H_2 und 98 % N_2 . Hinter der Sinter-Zone schließt sich ein kleiner Übergangstunnel an, der zur Schroffkühlung führt. Hier werden über zwei geregelte Gebläse mittels kalten Stickstoffes die Sinterkörper abgekühlt. Die Gebläse werden so geregelt, dass nach Möglichkeit die Gassäule, die durch den Ofen fließt, keinerlei Bewegungen zum Ofeneintritt oder zum Ofenaustritt verursacht. An die Schroffkühlung schließt sich ein Kühltunnel und der Entnahmebereich an. Der Kühltunnel wird mit Stickstoff gespeist. Im Entnahmebereich herrscht wieder Umgebungsatmosphäre. Im Normalfall werden hier die Sinterteile mittels Manipulator entladen.

4.1.1 Herstellung Probekörper (GKN)

Hinsichtlich der Herstellung der Probekörper galt es, eine möglichst repräsentative Geometrie und einen besonders häufig in der industriellen Praxis anzutreffenden Werkstoff zu finden. Da sämtliche Wärmeübertragungs- und Diffusionsvorgänge auch von einer charakteristischen Bauteillänge abhängen, hat die Wahl einer repräsentativen Geometrie unter ähnlichkeiththeoretischen Aspekten (z. B. Verhältnis von Volumen zu wärmeübertragender Oberfläche) eine besondere Bedeutung. Typische Sinterbauteile von GKN sind rotationssymmetrische Zahnräder mit Teilkreisdurchmessern von ca. $d=10$ mm bis ca. $d=120$ mm. Daher wurde eine ebenfalls rotationsymmetrische Geometrie (allerdings ohne Verzahnung) gewählt. Aus Abbildung 4.1.2-1 sind die Hauptabmessungen (Dicke: $t=18$ mm, Außendurchmesser: $d_a=56$ mm und Innendurch-

messer $d_i=18$ mm) zu entnehmen. Mit den gewählten Testteilen lässt sich eine Teilbeladung wie auch eine Vollbeladung des Versuchsofen realisieren. Die Testbauteile in der Ausführung als Scheibe stellen eine einfache Geometrie dar und eignen sich hervorragend für die geplanten Grundlagenuntersuchungen.

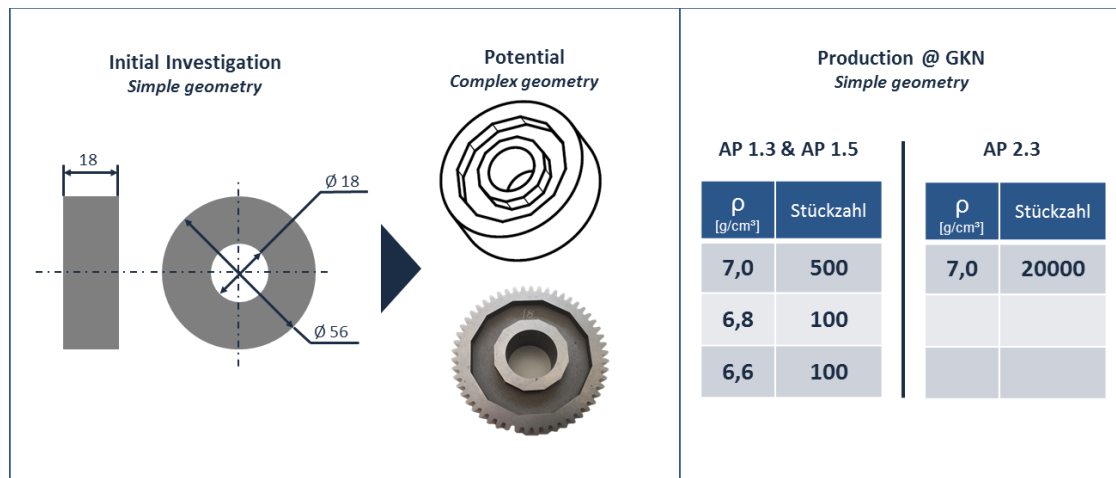


Abbildung 4.1.2-1: Hauptabmessungen der für die Versuche gewählten Geometrie, die geometrische Ähnlichkeit zu Zahnradern ist erkennbar

Die finale Festlegung des Standardwerkstoffes basierte darauf, dass dieser Werkstoff im industriell relevanten Umfang zum Einsatz kommt. Des Weiteren sollten die Legierungselemente, etwaige Zusatzstoffe und Additive weitestgehend bekannt und zugänglich sein. Als Standardwerkstoff wurde daher ein Sinterstahl auf FeCuC-Basis (SintD11) festgelegt. Sinterstähle auf FeCuC-Basis machen in etwa 70 % der weltweit produzierten Sinterbauteilen aus. Die chemische Zusammensetzung ist der Tabelle 4.1.2-1 zu entnehmen. Die Dichteklasse „D“ definiert den Dichtebereich von $r=6,8$ g/cm³ bis $r=7,2$ g/cm³ mit einer typischen (mittleren) Dichte von $r=7,0$ g/cm³. Wasserverdüstertes Eisenpulver der Hoeganaes Corporation vom Typ Ancorsteel AS 1000BMn diene als Grundlage. Die weiteren Legierungsbestandteile und Additive wurden dem Eisenpulver untergemischt. Um Kupfersegregationen bzw. -entmischungen zu vermeiden und um ein besseres Maßverhalten zu garantieren, wurde Kupfer in Form von diffusionsgebundenen Ancorsteel AS FD20Cu zugemischt. Als Presshilfsmittel (Gleitmittel) wurde hier das weit verbreitete und gut untersuchte LDL, auch bekannt als Licowax bzw. Acrawax, eingesetzt. Besonders feiner Grafit vom Typ Kropfmühl UF4 diene als Kohlenstoffträger. Die Zugabe einer geringen Menge von Mangansulfid MnS ist typisch für Sinterbauteile, die nach der Sinterung noch zerspannt werden müssen (Zerspanhilfsmittel).

Grundpulver	Kupfer	Kohlenstoff	MnS	Gleitmittel
AS 1000BMn	7,5% AS FD20Cu	0,50% UF4	0,25% MnS	1,0% LDL

Tabelle 4.1.2-1: Standardwerkstoff auf FeCuC-Basis mit seiner chemischen Zusammensetzung (mit Gewichtsprozenten)

4.1.2 Gas- und Temperaturmesstechnik (MESA)

Die erste Aufgabe im Bereich der Messtechnik bestand darin, geeignete Messgeräte auszuwählen. Brennerabgase bestehen in der Regel aus CO und CO₂. Bei unverbrannten Rückständen könnten noch Reste O₂ oder unverbranntes CH₄ auftreten. Darüber hinaus sollte auch der Einfluss aus der „Sinteratmosphäre“ gemessen werden. Da Stickstoff nicht zu detektieren ist, wurde lediglich der H₂-Gehalt der Atmosphäre gemessen. Weitere Messgrößen wären wünschenswert gewesen, jedoch waren keine eindeutigen Angaben zu den Zerfallsprodukten der eingesetzten Wachse bekannt. Diese zerfallen im ersten Schritt in sehr langkettige Wachsorten und CH₄, die sich dann, bei der für Wachse relativ hohen Temperatur, weiter zersetzen.

Eingesetzte Technik

Fast die gesamte Gasmesstechnik beruht auf nicht In-Situ-Messungen, d.h. das zu analysierende Gas wird aus der Ofenatmosphäre abgesaugt und extern in einem Messgerät analysiert. Die eingesetzten Messgeräte sind sehr teuer und erlauben keine extremen Umgebungsbedingungen wie sie innerhalb eines Ofenraums herrschen. Die Gase CO, CO₂ und CH₄ wurden nach der Infrarot-Absorptions-Spektrometer-Messung ermittelt. Dieses Messverfahren ist gaselektiv, d.h. es gibt so gut wie keine Querempfindlichkeiten.

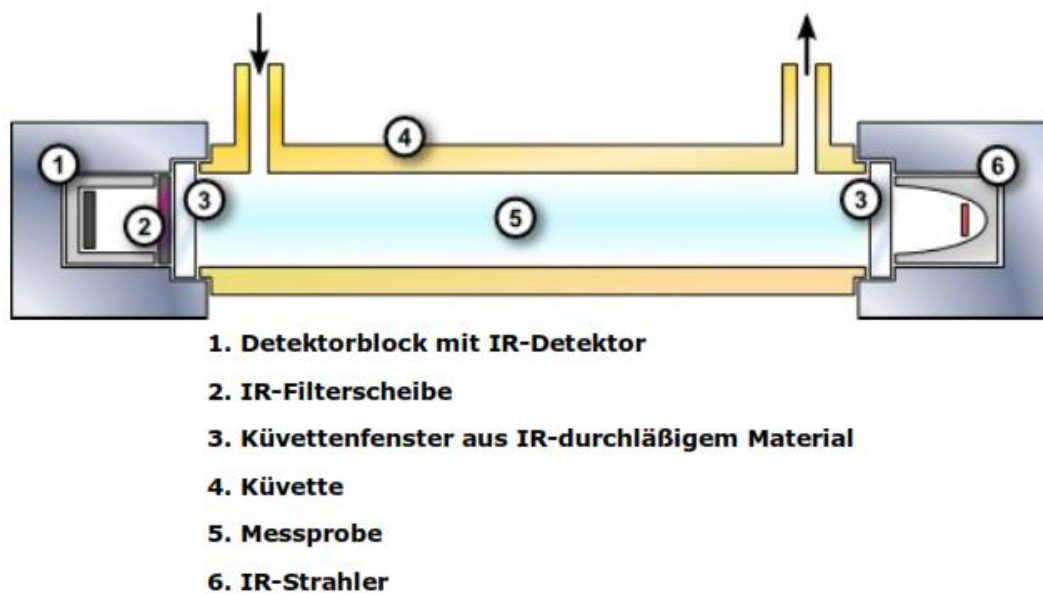


Abbildung 4.1.2-2: Infrarot-Absorptions-Spektrometer mit Referenzkanal („Messverfahren“ TAD Gesellschaft für Elektronik-Systemtechnik mbH)

Die H₂-Messung wurde mit Wärmeleitfähigkeitssensoren durchgeführt. Diese Messung ist nur begrenzt gaselektiv, d.h. es gibt in einem geringen Maß Querempfindlichkeiten und Messverfälschungen. Diese hängen von der Wärmeleitfähigkeit der zu messenden Gase ab. Verwendet man bei der Kalibrierung der Sensoren Prüfgase mit gleichen oder sehr ähnlichen Zusammensetzungen wie das zu messende Gas, kann der zu erwartende Fehler minimiert werden. Bei stark schwankenden Zusammensetzungen ist diese Methode nicht sinnvoll.

Gase (Normbedingung)

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m·K)
Wasserstoff	0,186 ^[17]
Ammoniak bei 25 °C	0,024 ^[18]
Helium	0,1567 ^[17]
Argon	0,0179 ^[17]
Krypton	0,00949
Xenon	0,0055 ^[17]
Luft	0,0262 ^[17]
Sauerstoff	0,0263 ^[17]
Stickstoff	0,0260 ^[17]
Wasserdampf	0,0248
Kohlenstoffdioxid	0,0168 ^[17]
Methan (20 °C, 1 bar)	0,0341 ^[17]
Schwefelhexafluorid	0,012

¹⁷ David R. Lide (Hrsg.): CRC Handbook of Chemistry and Physics. 90. Auflage. (Internet-Version: 2010), CRC Press / Taylor and Francis, Boca Raton FL, Fluid Properties, S. 6-184. Werte gelten bei 300 K.)

¹⁸ E. Schramek, H. Recknagel: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik

Tabelle 4.1.2-1: Wärmeleitfähigkeit von Gasen (Wikipedia 25.01.2023 => aus Landolt-Börnstein – Datenbank für fast alle Stoffwerte, so auch Wärmeleitfähigkeitswerte)

Die eingesetzten Sauerstoffmessungen beruhen auf zwei verschiedenen Verfahren:

1. Sauerstoffsonde aus Zirkoniumdioxid
2. Elektrochemische Sensoren

Eine Unterart der Sauerstoffsonden ist die Lambda-Sonde (L-Sonde), die auch in Fahrzeugen oder Brennern zum Einsatz kommt. Zur Restsauerstoffmessung wird die Nernst-Gleichung herangezogen. Diese ist jedoch nur gültig, solange keine brennbaren Bestandteile in der zu messenden Atmosphäre sind. Die mitlaufenden Messungen dienen zur Beurteilung, ob die L-Sonde als Sensor für Steueraufgaben zur Energieeinsparung durch die Nutzung der brennbaren Bestandteile in der Atmosphäre in der Ausbrenn-Zone verwendet werden kann. Um Sauerstoff unabhängig von brennbaren Bestandteilen messen zu können, eignen sich elektrochemische Sensoren gut. Diese besitzen meist keine Querempfindlichkeit zu anderen Gasen, speziell zu Brennerabgasen. Einziger Nachteil ist die relativ starke Abhängigkeit zum Luftdruck. Somit müssen diese Sensoren regelmäßig an Umgebungsluft abgeglichen werden. Dies übernimmt aber der eingesetzte Messumformer durch eine zeitgesteuerte automatische Kalibrieroutine.

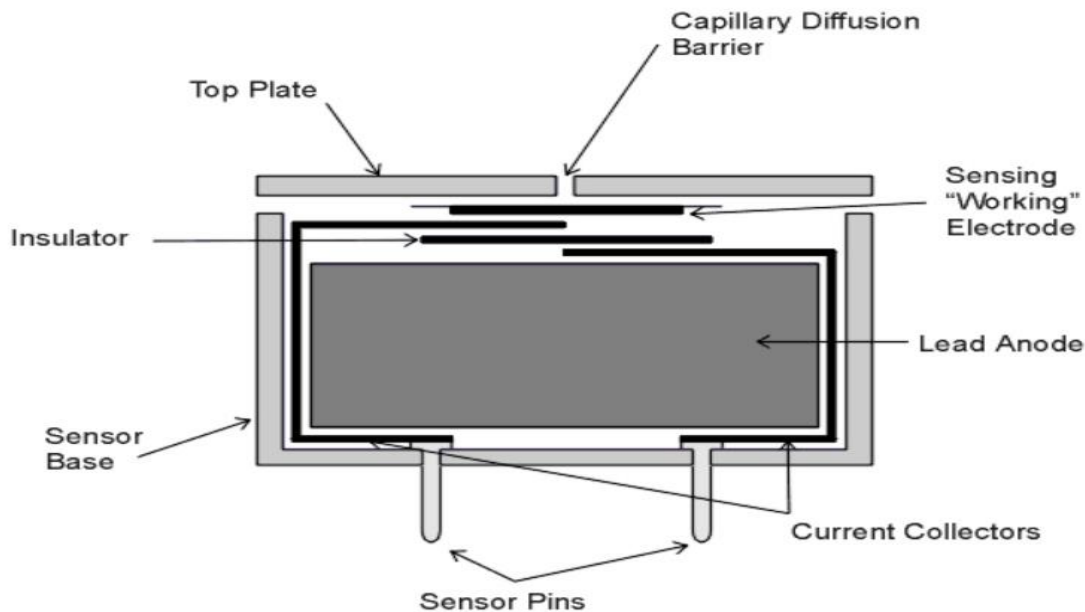


Abbildung 4.1.2-3: elektrochemischer Sensor

Probleme bei der Messung

Die automatische Temperatur-Regelung in der Ausbrennzone wurde abgeschaltet und die geforderten Temperaturen für die unterschiedlichen Betriebszustände wurden im Handbetrieb manuell angepasst. Leider gab es bei dem Verfahren des Schlittens immer wieder kleinere Probleme, aus denen dann eine ungleichmäßige Beladung oder aber andere störende Effekte resultierten, so dass die Temperatur nicht immer einwandfrei stabil blieb. Auch ergaben sich zeitweilig unerklärliche Temperaturunterschiede in der Aufzeichnung. Die Brenner mussten dann entsprechend manuell nachgeführt werden.

Ein weiteres Problem ergab sich an einer der Messstellen auf dem Schlitten. Hier kam es zeitweilig zu kondensierenden Wachsdämpfen, die dann den Absauge-Mechanismus verstopften und somit zu ungeplanten Reinigungsarbeiten führten. In der eigentlichen Auswertung sind diese Messwertprobleme ausgeblendet bzw. herausgefiltert worden.

4.1.3 Charakterisierung Werkstoff und Bauteil (ONEJOON)

Im Testcenter der ONEJOON GmbH wurden unterschiedliche Versuche bezüglich der Charakterisierung des Grünlingswerkstoffs und des Entbinderungsverhaltens durchgeführt. Diese Versuche dienten dem Zweck der Validierung von Simulationen für den weiteren Verlauf des Projekts und zur Abschätzung des tatsächlichen Energieeinsparungspotenzials. Die von der ONEJOON GmbH durchgeführten experimentellen Untersuchungen gliederten sich hierbei in zwei unterschiedliche Versuchsreihen. **Versuchsreihe 1** befasste sich hierbei mit der Analyse des Massenverlust während des Entbinderungsprozesses. Im Rahmen von **Versuchsreihe 2** wurde analysiert, welche Prozessgase zu welchem Zeitpunkt der Entbinderung entstehen. Während der Durchführung dieser Versuchsreihen wurden unterschiedliche Versuchsparameter variiert, um deren möglichen Einfluss zu detektieren. Diese Versuchsparameter waren:

- Aufheizgradient (3, 7, 10, 15, 22 K/min)
- Anzahl der Bauteile (1, 2, 3 – übereinandergestapelt)
- Geometrie der Bauteile (siehe Abbildung 4.1.3-7)
- Bauteildichte (6,6; 6,8; 7,1 g/cm³)

Anhand der hier durchgeführten Versuche kann jedoch noch keine Abschätzung des tatsächlichen Energieeinsparungspotenzials getroffen werden. Diese Versuchsergebnisse dienen lediglich der Validierung der computergestützten Simulationen mit dem Ziel das Einsparungspotenzial zu ermitteln.

Versuchsofen

Abbildung 4.1.3-1 zeigt einen kleinen Kammerofen des Testcenters der ONEJOON GmbH, der im Projekt verwendet wurde: In die Muffel des Ofens wurde ein Loch gebohrt, in das anschließend ein Rohr eingeschweißt wurde. Durch diese Öffnung kann eine Vorrichtung geführt werden, mit deren Hilfe während der thermischen Behandlung des Grünlings innerhalb des Ofens kontinuierlich die Bauteilmasse aufgezeichnet werden kann.

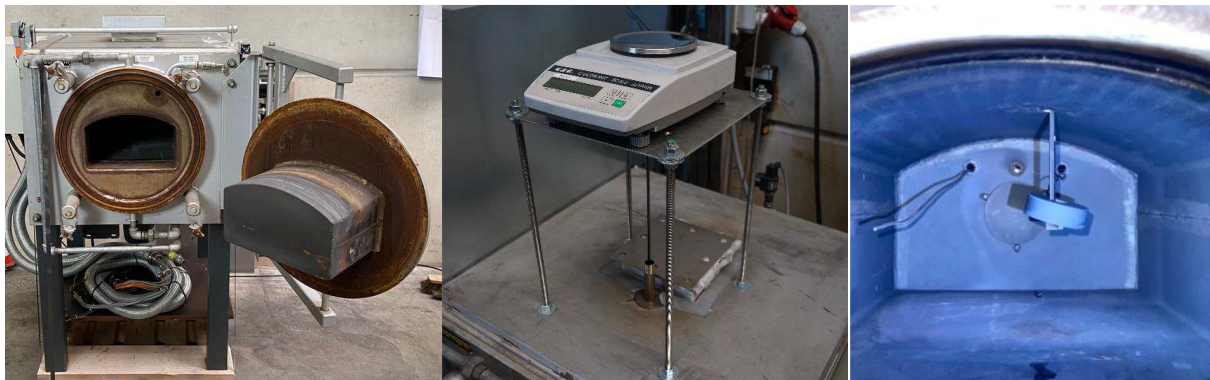


Abbildung 4.1.3-1: Versuchsstand für die Entbinderungsversuche

Versuchsreihe 1 – Analyse des Massenverlusts

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurde zunächst untersucht, ob die Aufheizgeschwindigkeit der Sinterteile einen erkennbaren Einfluss auf das Entbinderungsverhalten hat. Zu diesem Zweck wurden Grünlinge bei verschiedenen Aufheizgradienten (3, 7, 10, 15 und 22 K/min) auf die Zieltemperatur 650 °C erwärmt. Während des Aufheizprozesses wurde die Bauteilmasse kontinuierlich aufgezeichnet. Abbildung 4.1.3-2 zeigt den temperaturabhängigen Massenverlust der Grünlinge, die bei den oben genannten Aufheizgradienten untersucht wurden. In der Abbildung ist der prozentuale Massenverlust dargestellt, aufgetragen über der Temperatur innerhalb des Versuchsofens.

Da in den Grünlingen rund 1% Bindemittel enthalten ist, wurde bei diesen Versuchen entsprechend circa 1% Massenverlust erwartet. Das Ergebnis der Untersuchung des Massenverlusts hat bei allen Versuchen laut Abbildung 4.1.3-2 dementsprechend ein realistisches Ergebnis zufolge gehabt. Der Massenverlust liegt hierbei zwischen 0,91% (Versuch 15 K/min) und 0,98% (Versuch 7 K/min). Gemäß der Abbildung wird deutlich, dass mit größer werdendem Aufheizgradienten auch die Temperatur wächst, bei der die Entbinderung beginnt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Temperatur des Bauteils der Ofentemperatur bei schnellerem Aufheizen hinterhereilt. Hat der Entbinderungsprozess jedoch erst einmal begonnen, so verlaufen die Kurven des Massenverlust in Abhängigkeit der Ofentemperatur sehr ähnlich.

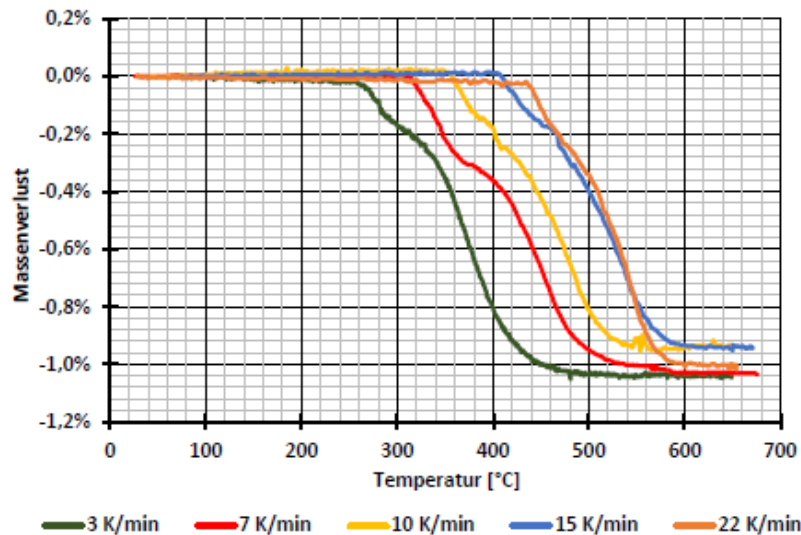


Abbildung 4.1.3-2: Vergleich verschiedener Aufheizgradienten – Darstellung der Masseverluste als Funktion der Temperatur $m(T)$

Anders verhält es sich jedoch, wenn man den Massenverlust in Abhängigkeit der Laufzeit betrachtet. Dieser ist für die 5 genannten Aufheizgradienten in Abbildung 4.1.3-3 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der einzelnen Kurven wurde jeweils der Zeitpunkt, bei dem die Entbinderung beginnt, als „Startpunkt“ festgelegt.

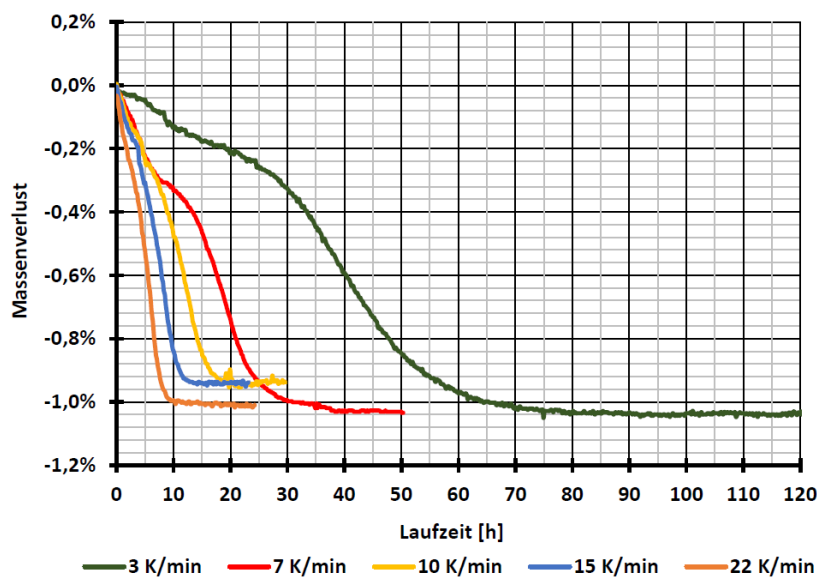


Abbildung 4.1.3-3: Vergleich verschiedener Aufheizgradienten – Darstellung der Masseverluste als Funktion der Laufzeit $m(t)$

Bei der Betrachtung des Massenverlusts in Abhängigkeit der Laufzeit ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Versuchen mit unterschiedlichen Aufheizgradienten zu erkennen. Je schneller der Ofen und somit auch das Bauteil aufgeheizt wurden, desto schneller läuft der Entbinderungsprozess des Grünlings ab. Dieser Zusammenhang lässt sich auf die Durchwärmung des Bauteils zurückführen. Welche umso langsamer erfolgt, je langsamer der Ofen aufgeheizt wird.

Für die nachfolgenden Untersuchungen anderer Prozessparameter wurden 10 K/min Aufheizrate und 650 °C als „Standardparameter“ definiert. Es ist üblich, dass in Sinteranlagen mehrere Bauteile übereinandergestapelt und so durch den Ofen befördert werden. Aus diesem Grund wurde im Anschluss an die Analyse des Aufheizgradienten der Einfluss durch die Bauteilanzahl untersucht. Zu diesem Zweck wurden zwei und anschließend drei Bauteile übereinander im Ofen entbindert.

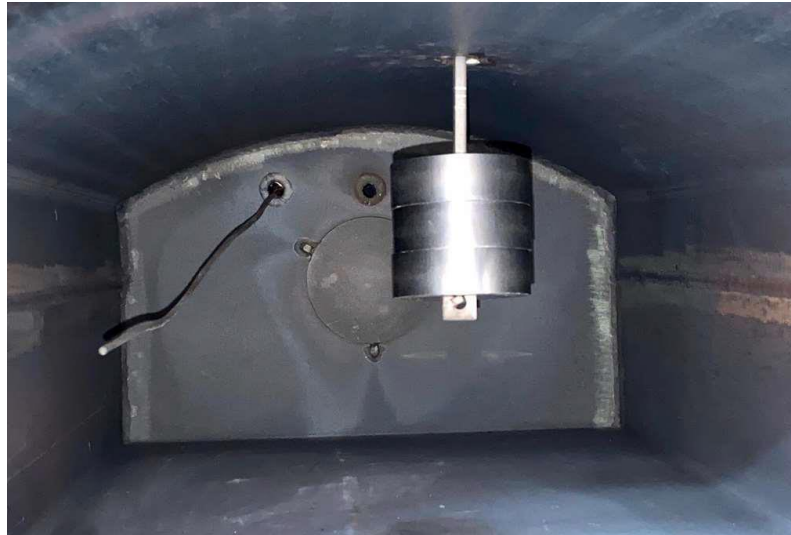


Abbildung 4.1.3-4: Drei Bauteile übereinander im Versuchsofen

Das Ergebnis der Untersuchung mit unterschiedlicher Bauteilanzahl zeigt Abbildung 4.1.3-5. Hierbei wird deutlich, dass mit zunehmender Bauteilanzahl der Entbinderungsprozesses später beginnt. Zurückführen lässt sich dieses Ergebnis auf die verringerte Bauteiloberfläche des Grünlingsstapels bezogen auf die Masse, die dafür sorgt, dass die Durchwärmung des Stapels langsamer abläuft als die eines einzelnen Grünlings.

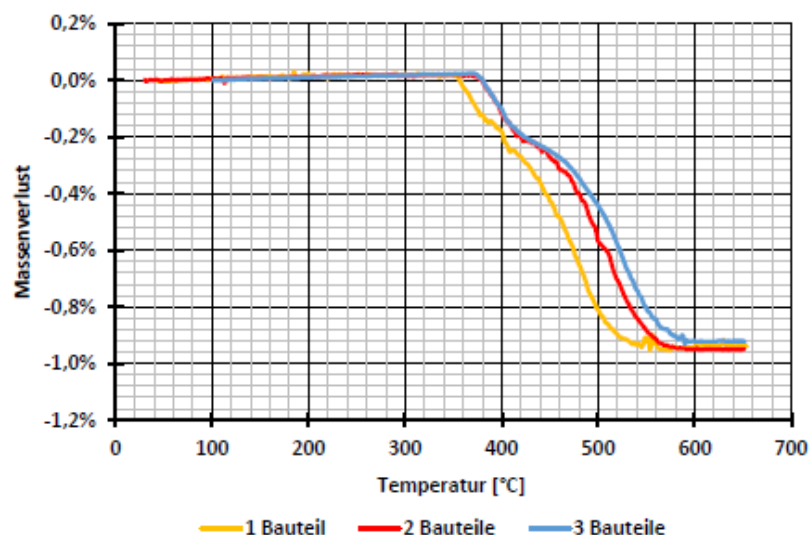


Abbildung 4.1.3-5: Vergleich des relativen Massenverlusts von einem, zwei und drei Bauteilen in Abhängigkeit der Temperatur T

Deutlicher wird dieses Resultat auch anhand des Vergleichs der Massenverlustkurven in Abhängigkeit der Laufzeit gemäß Abbildung 4.1.3-6.

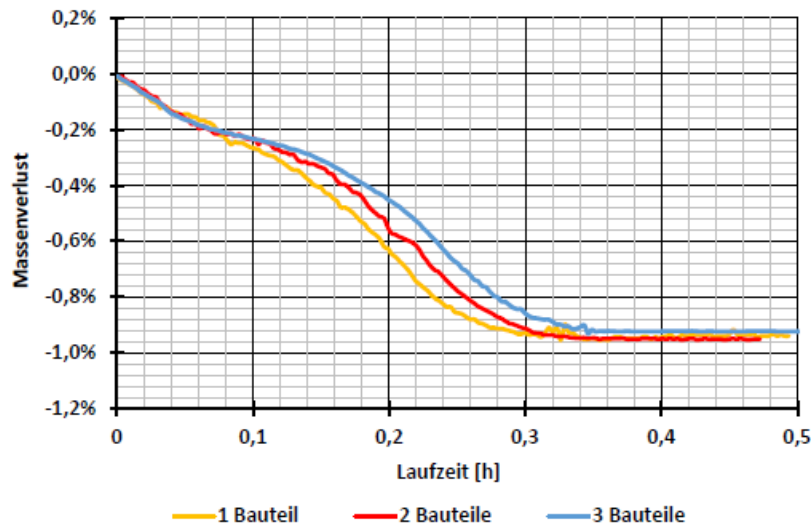


Abbildung 4.1.3-6: Vergleich des relativen Massenverlusts von einem, zwei und drei übereinandergestapelten Bauteilen in Abhängigkeit der Versuchslaufzeit t

Im Anschluss an diese Bauteilanzahl wurde der mögliche Einfluss der Bauteilgeometrie analysiert. Die verschiedenen Bauteilgeometrien, die hierbei untersucht wurden, zeigt Abbildung 4.1.3-7.

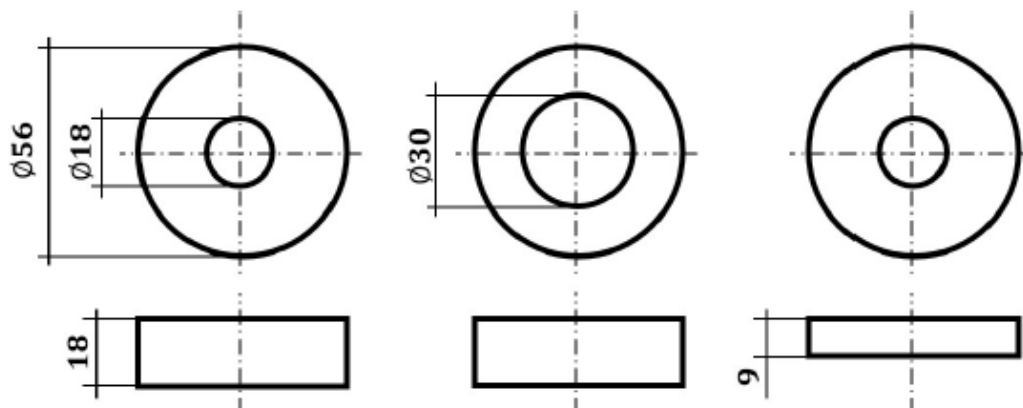


Abbildung 4.1.3-7: Verschiedene untersuchte Grünlingsgeometrien

Der Vergleich der Kurven des Massenverlusts bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien zeigt kein so deutliches Ergebnis wie bei den vorherigen Versuchen. Allerdings fällt hierbei auf, dass mit veränderter Bauteilgeometrie der Entbinderungsprozess bei beiden veränderten Geometrien früher beginnt als bei der „Standard-Geometrie“.

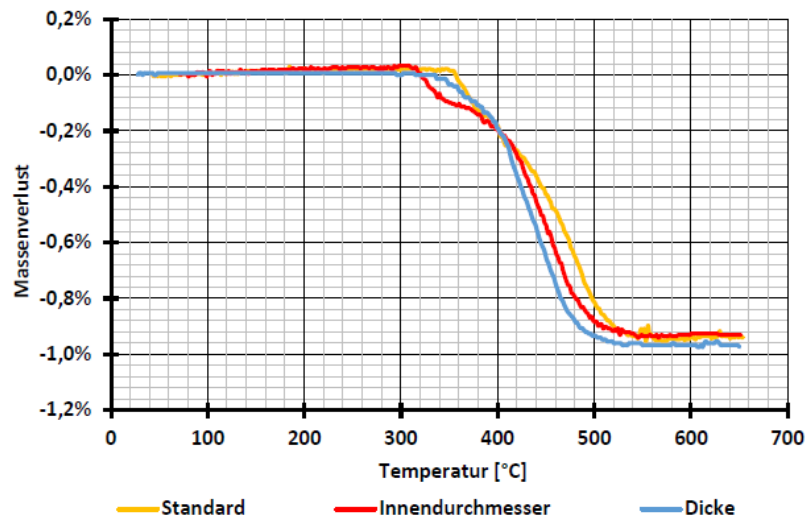


Abbildung 4.1.3-8: Vergleich des Massenverlustes bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien

Der Entbinderungsprozess läuft am schnellsten bei der Geometrie mit reduzierter Bauteildicke ab. Dieses Ergebnis ist auf das Verhältnis Bauteiloberfläche zu Bauteilmasse zurückzuführen. Setzt man die Bauteilmasse ins Verhältnis mit der Bauteiloberfläche, so hat die Geometrie mit reduzierter Bauteildicke den geringsten Wert (besserer Wärmeeintrag bei geringerer zu erwärmender Bauteilmasse). Zuletzt wurde untersucht, inwiefern die Grünlingsdichte das Entbinderungsverhalten beeinflusst. Das Ergebnis dieser Untersuchung zeigt Abbildung 4.1.3-9.

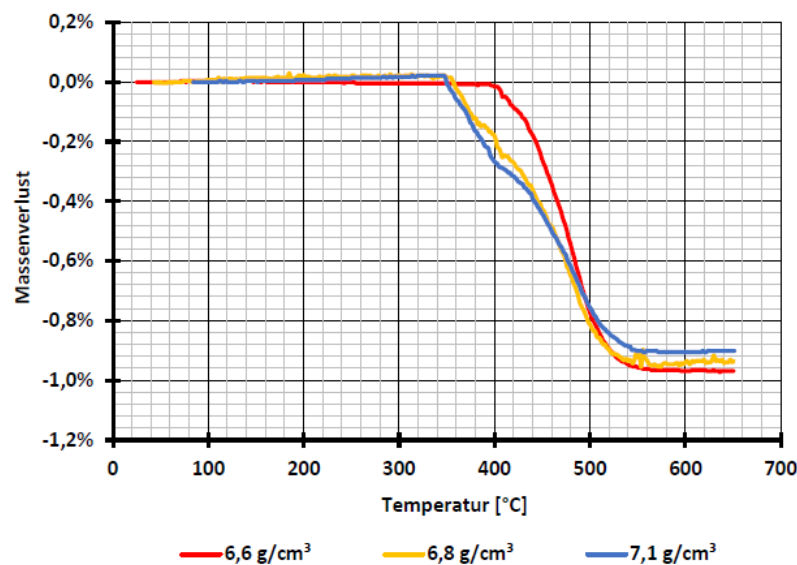


Abbildung 4.1.3-9: Vergleich des Massenverlustes bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie

Das Diagramm zeigt keinen merklichen aus der Bauteildichte resultierenden Einfluss. Auffällig ist jedoch, dass das Ergebnis des Versuchs mit 6,6 g/cm³ Bauteildichte deutlich von den anderen beiden Versuchsergebnissen abweicht. Hierbei ist es wichtig zu erwähnen, dass die Versuchsergebnisse Teil einer studentischen Abschlussarbeit waren. Aufgrund der begrenzten Bearbeitungszeit dieser Abschlussarbeit konnten die einzelnen Versuche nicht mehrfach durchgeführt werden, um deren Reproduzierbarkeit nachzuweisen.

Versuchsreihe 2 – Analyse der Prozessgase

Im Rahmen der zweiten Versuchsreihe wurden die während des Entbinderungsprozesses entstehenden Prozessgase analysiert. Diese wurde mit Hilfe eines Messgerätes der Firma MESA detektiert. Das Messgerät kann folgende Gase messen:

- CO₂, CH₄, H₂ → Messbereich: 0...10%
- CO → Messbereich: 0...35%

Im Zuge dieser Versuchsreihe wurden dieselben Parameter verändert und untersucht wie zuvor bei der Analyse des Massenverlusts. Da die Darstellung der vier messbaren Prozessgase bei je mindestens drei unterschiedlichen Prozessparametern in einem Diagramm sehr unübersichtlich würde, wird nachfolgend nur ein Prozessgas in einem Diagramm bei unterschiedlichen Prozessparametern dargestellt. Im Rahmen dieses Berichts wird hier das Gas CH₄ dargestellt. Die Diagramme bezüglich der Gasmengen von CO₂, CO und H₂ befinden sich im Anhang 6.1 des Berichts.

Abbildung 4.1.3-10 zeigt den CH₄-Anteil in Vol% in der Atmosphäre im Ofen bei unterschiedlichem Aufheizgradienten in Abhängigkeit der Ofentemperatur im Bereich bis 850 °C.

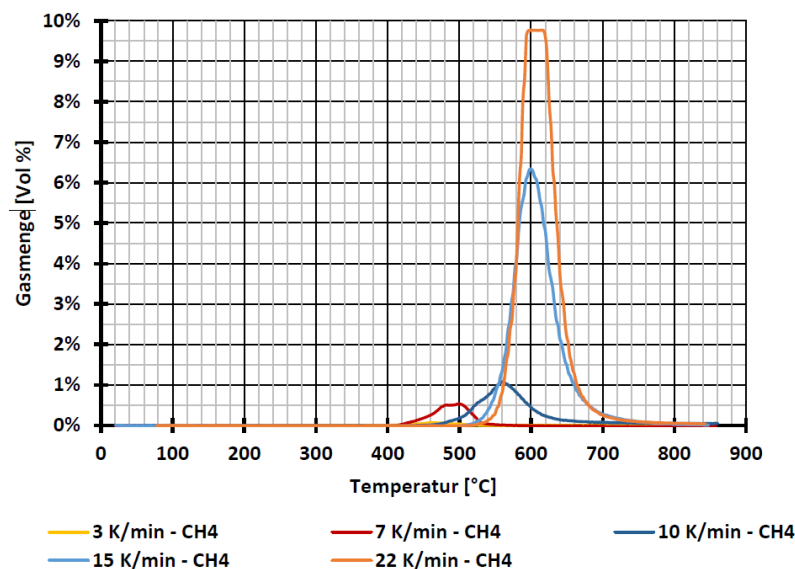


Abbildung 4.1.3-10: CH₄-Gehalt bei unterschiedlichen Aufheizgradienten

Deutlich wird, dass mit zunehmender Aufheizrate auch der CH₄-Gehalt größer wird. Dieses Ergebnis ist damit zu begründen, dass der Entbinderungsprozess nach Abbildung 4.1.3-3 bei schnellerem Aufheizgradienten auch schneller abgeschlossen ist. Da der Ofen während aller Versuche jedoch mit einer konstanten Stickstoffmenge von 5 l/min gespült wurde, wird der entsprechende Anteil an Prozessgas in der Atmosphäre umso stärker verdünnt, je länger der Entbinderungsprozess dauert. Zusätzlich ist deutlich zu erkennen, dass der CH₄-Gehalt beim Versuch mit 22 K/min den gegebenen Messbereich bis 10 Vol% überschritten hat (Plateau).

Dieses Ergebnis wird untermauert durch Abbildung 4.1.3-11. Diese Abbildung zeigt der Vergleich der CH₄-Gehalt bei unterschiedlichem Volumenstrom den Stickstoffspülung. Die Versuchsparmeter hierbei waren 10 K/min und 850 °C Endtemperatur. Diese Parameter gelten auch für alle folgenden Versuchsergebnisse.

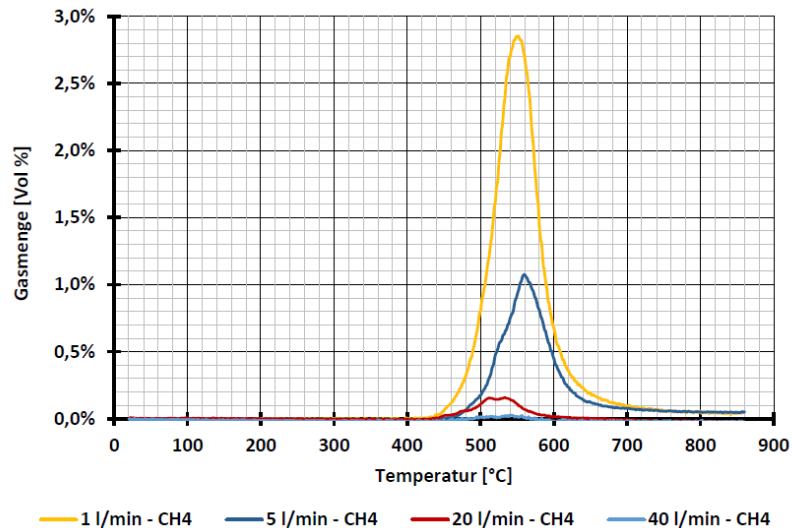


Abbildung 4.1.3-11: CH_4 -Gehalt bei unterschiedlichem Stickstoffvolumenstrom

Bei kleiner werdendem Stickstoffvolumenstrom steigt der messbare Anteil des Prozessgases CH_4 . Abbildung 4.1.3-12 zeigt den CH_4 -Gehalt bei unterschiedlicher Anzahl übereinander gestapelter Bauteile.

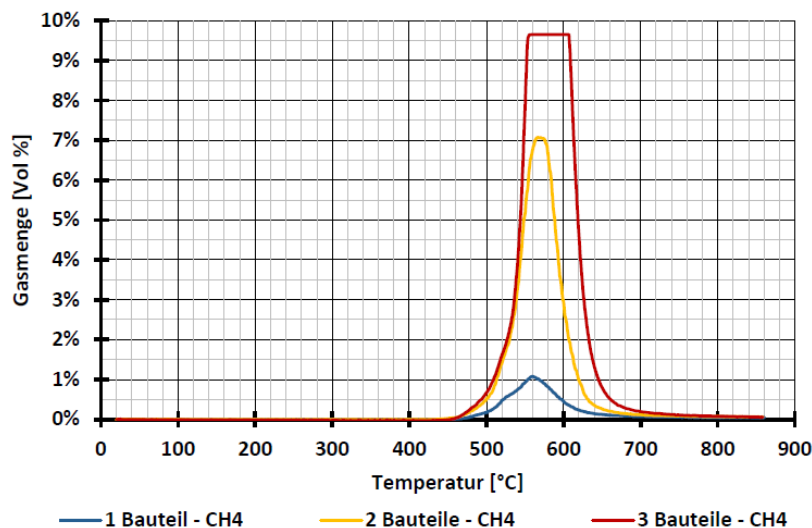


Abbildung 4.1.3-12: CH_4 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilanzahl

Das Diagramm verdeutlicht, dass der Anteil an CH_4 in der Atmosphäre bei größer werdender Bauteilanzahl und sonst gleichen Versuchsbedingungen größer wird. Auch hierbei ist ein Plateau zu erkennen, an dem der Messbereich überschritten worden ist. Mit zunehmender Bauteilanzahl wird folglich auch die Menge an austretendem Bindemittel während der thermischen Behandlung größer. Somit entspricht auch dieses Ergebnis den Erwartungen.

In Abbildung 4.1.3-13 ist der CH_4 -Gehalt in der Atmosphäre bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie dargestellt. Die Bauteilgeometrien waren hierbei dieselben wie in Abbildung 4.1.3-7. Auch dieses Ergebnis zeigt das erwartete Bild. Mit kleiner werdender Bauteilmasse („Standard“- > „Innendurchmesser“- > „Dicke“-Geometrie) reduziert sich der Anteil an austretendem Bindemittel und somit auch der Anteil der entstehenden Prozessgase.

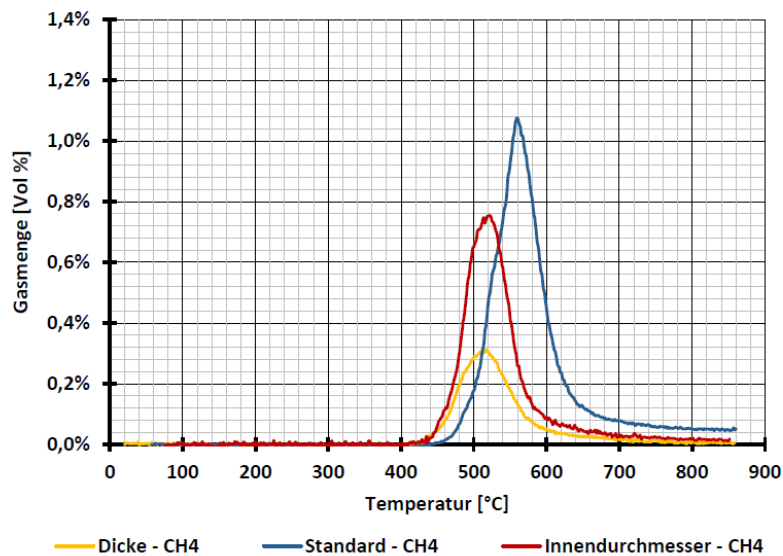


Abbildung 4.1.3-13: CH_4 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie

Im letzten Teil der Versuchsreihe wurde die Bauteildichte untersucht. Dieses Ergebnis entsprach jedoch nicht den Erwartungen, da hier bei kleiner Bauteildichte mehr Abgase gemessen wurden. Allerdings kann dieses Ergebnis vielen Faktoren geschuldet sein:

- Größere Bauteilmasse (fertigungsbedingte Schwankungen)
- Größerer eingestellter Volumenstrom des Stickstoffs im Versuch
- Fehler seitens der Messtechnik

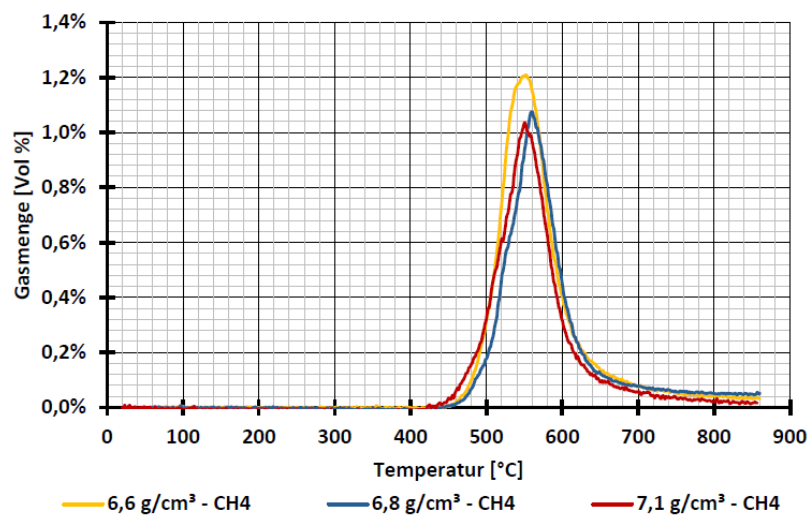


Abbildung 4.1.3-14: CH_4 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteildichte

4.2 Bestandsaufnahme und Ertüchtigung Durchlaufofen (GKN, MESA)

Da in der Ausbrennzone die größten Energieüberschüsse zu erwarten waren, war es wichtig diese Zone möglichst genau zu vermessen und so nutzbare Werte für die Erstellung und Optimierung der numerischen Modelle zu liefern. Es wurde ein Querprofil (Messstellen M4/M5/M6) und ein Längsprofil (M2/M3/M4) über den Bauteilen aufgenommen (Abbildung 4.1.2-1). Darüber hinaus wurde die Gaszusammensetzung im Übergangstunnel zur Sinterzone (M8) gemessen. Um die Atmosphäre direkt oberhalb der Bauteile aufnehmen zu können, wurde ein Schlitten angefertigt, in dessen Mitte ebenfalls eine Gasentnahme angebracht wurde.

Für all diese Messpunkte wurde eine spezielle Gasentnahmesonde gebaut. Diese hatte neben der eigentlichen Gasentnahme auch noch eine 2. Messöffnung, so dass nach dem Prandtl-Prinzip ein Staudruck gemessen werden konnte und somit die Gasgeschwindigkeit berechnet werden kann. Weiterhin waren zwei Thermoelemente verbaut, eines herausragend, so dass Strahlung und Wärmeübergang aus dem Gas gemessen werden konnten, und eines zurückgezogen innerhalb der Gasentnahme, so dass hier nur der Wärmeübergang aus dem Gas gemessen wird.

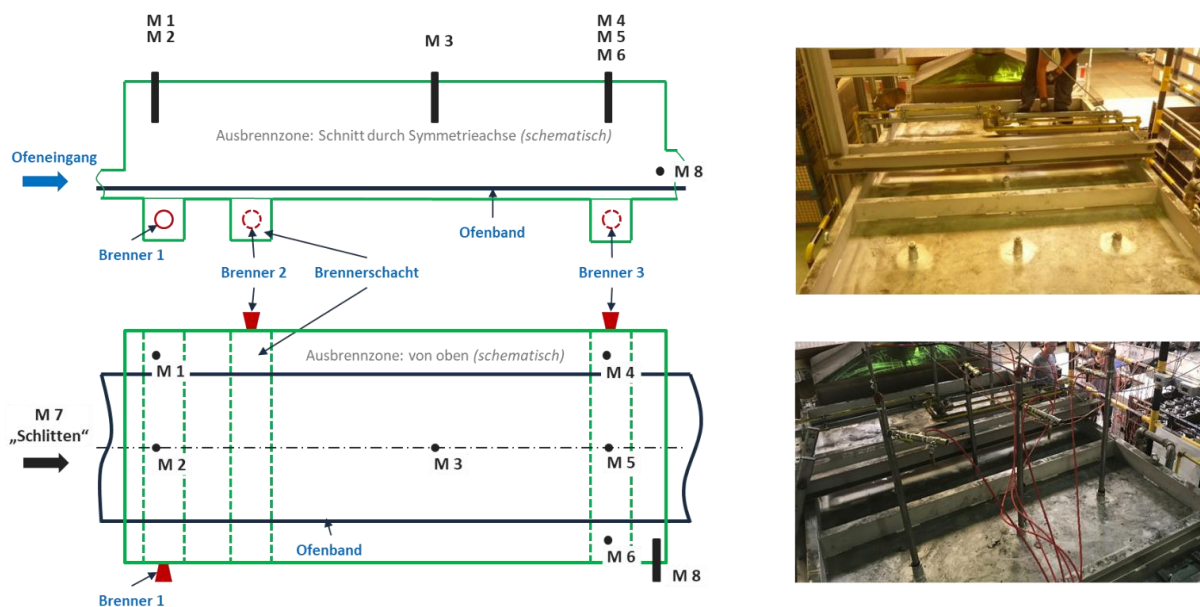


Abbildung 4.1.2-1: Messstellen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

4.2.1 Aufrüstung Gassensorik im Produktionsofen (MESA)

Die Gasgeschwindigkeiten wurden über die Prandtl-Rohre mittels Differenzdruckmessung aufgenommen (GKN), Gas-Temperatur und Strahlungswärme über die Thermoelemente. Bei den Messungen sollten die Brenner quasi statisch arbeiten, d.h. sie sollten immer im gleichen Arbeitspunkt laufen, um Vergleiche mit anderen Ofenzuständen zu ermöglichen. Folgende Betriebszustände wurden aufgenommen:

- Leerer Ofen
- Teilbeladung (50 %) mit Ausbrenn- (Entbinderungs-) Prozess
- Teilbeladung (50 %) ohne Ausbrenn- (Entbinderungs-) Prozess
- Vollbeladung (100 %) mit Ausbrenn- (Entbinderungs-) Prozess
- Vollbeladung (100 %) ohne Ausbrenn- (Entbinderungs-) Prozess

Da die Brenner bei Beladung in einem anderen Arbeitspunkt laufen, wurden neben den Versuchen mit Entbinderung auch Referenzversuche ohne Entbinderung durchgeführt. Dies ermöglichte die Datensammlung unter unterschiedlichen Randbedingungen, um eine eindeutige Referenz zu schaffen.

Die vorbereitenden Arbeiten zur Messtechnik am untersuchten Bandofen BBR 212 erledigten die Instandhalter am Standort. Die Daten wurden einerseits von einem Betriebsdaten-Erfassungssystem von GKN aufgenommen. Parallel wurden die Gasanalysewerte ebenfalls in den Analysatoren gespeichert, nachträglich zusammengeführt und ausgewertet. Bei den einzelnen definierten Betriebszuständen mussten alle Messstellen einzeln gemessen werden. Durch den Wechsel der Messstelle kam es so immer zu Unterbrechungen bei den Messungen und zu unerwünschten Ein- und Ausschwingverhalten. Daher wurden für die Auswertung immer nur die stabilen Messzeiten berücksichtigt und über diesen Zeitraum ein Mittelwert gebildet. Somit konnte zu jeder Messposition und zu jedem Betriebszustand ein signifikanter Messwert ermittelt werden.

4.2.2 Leerlaufversuche (GKN)

Der im Projekt untersuchte Bandofen BBR 212 wird unter Schutzgas 98% N_2 + 2% H_2 (Mischgas) betrieben. Alle Daten, die zur Modellierung des Ofens und zur Konkretisierung von anlagenbaulichen Maßnahmen benötigt werden, wurden sorgfältig erfasst. Im Einzelnen wurde die Ofengeometrie in ein CAD-Modell überführt (siehe Abbildung 4.2.2-1). Die Kennwerte des Ofens im Nennbetrieb, die Kennwerte des Wärmehaushalts sowie die Lage der bestehenden Sensorik und Heiztechnik wurden dokumentiert.

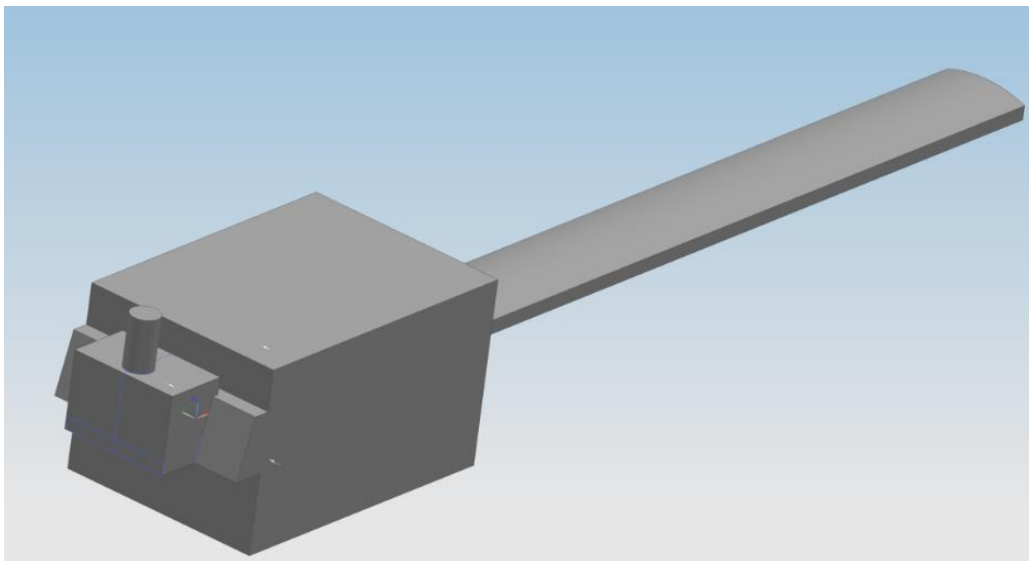


Abbildung 4.2.2-1: CAD-Volumen-Modell des Innenraums des Versuchsofens für die Strömungssimulation (rechts befindet sich die lange Sinterzone, das große Volumen ist die Ausbrennzone und links vorne der Abgaskanal)

Im nächsten Schritt wurde eine Erstbewertung des Ausbrennvorgangs durch Messungen der Atmosphärenzusammensetzung und -temperatur beim Serienbetrieb des Ofens durchgeführt. Dabei wurden die Sensoren durch den Ofeneingang eingeführt, d. h. optimale Messpositionen konnten nicht erfasst werden. Dennoch kann als Erkenntnis aus den Messungen folgendes festgehalten werden: Der Anteil der brennbaren Kohlenstoffverbindungen lässt auf eine unvollständige Verbrennung und somit auf eine schlechte Energiebilanz beim Ausbrennprozess schließen. Hier besteht Energieeinsparungspotential durch Optimierung in der Prozessführung.

Außerdem bestätigen die Messergebnisse, dass für eine ausreichende Erfassung der Zustände in der Ausbrennzone und für eine spätere Regelung des Ausbrennvorgangs an wesentlich mehr Stellen im Ofen mit angepasster Messtechnik gemessen werden muss. Für mehr Details zu den Erkenntnissen aus der Erstmessungen wird an dieser Stelle auf Abschnitt 4.2.1 und den Ergebnissen der Fa. MESA hingewiesen. Die aus der Erstbewertung des Ausbrennvorgangs abgeleitete Nachrüstung des Ofens mit neuen Zugängen für die Sensoren wurde erfolgreich durchgeführt. Dies ermöglichte, durch Einführung von angepasster und umfangreicher Mess- und Datenerfassungstechnik, die Generierung von präziseren Daten während der nächsten Sinterversuche. Auf dieser Grundlage konnten dann Testbauteile zur Erstellung einer soliden Datenbasis für die Parametrisierung und Validierung der Simulationsmodelle gesintert werden (Arbeitspakete AP2.2, AP2.3 und AP2.4). Während der Umbaumaßnahmen wurden aus der Ausbrennzone an mehreren Stellen Proben von Ablagerungen (Ausschwitzungen) entnommen, die nach einer Laboranalyse zusätzliche Daten bzw. Erkenntnisse zur Charakterisierung des Ausbrennvorganges lieferten. Die Bilder 4.2.2-2 bis 4.2.2-6 vermitteln einen Eindruck von den durchgeführten Umbaumaßnahmen.



Abbildung 4.2.2-2: Blick in die Ausbrennzone und auf den Schacht zur Sinterzone von Ofen BBR 212



Abbildung 4.2.2-3: Blick nach vorne in die Ausbrennzone von Ofen BBR 212



Abbildung 4.2.2-4: Schacht zur Sinterzone von BBR 212 (Deckel leicht angehoben, glasartige Ausschwitzungen hängen stalaktitartig herab)

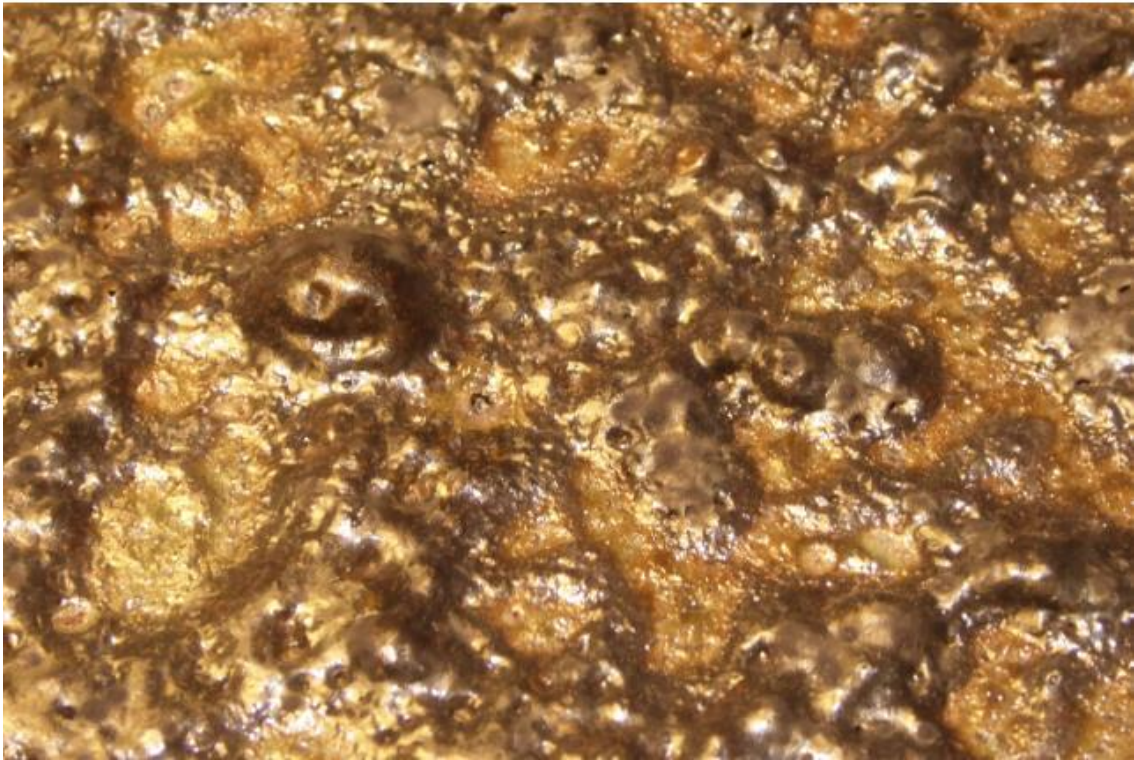


Abbildung 4.2.2-5: Detailaufnahme der glasartigen Ausschwitzungen (Schacht zur Sinterzone von BBR 212)



Abbildung 4.2.2-6: Im Vordergrund die neuen Flansche für die Zugänge der Messsensoren im Ofendeckel von BBR 212

Die in den Abbildungen 4.2.2-4 und 4.2.2-5 gezeigten glasartigen Ausschwitzungen und die restlichen aus dem Ofen entnommenen Proben bestehen aus diversen Verbindungen mit unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen. Den glasartigen Ausschwitzungen gemeinsam ist der hohe Kohlenstoff-, Sauerstoff-, Natrium-, Silizium- und Mangananteil. Der Ursprung des Mangans könnte in der Nutzung des Zerspanhilfsmittels Mangansulfid MnS liegen. Der hohe Kohlenstoffanteil könnte auf Rückstände der kohlenwasserstoffhaltigen Presshilfsmittel (Gleitmittel) hindeuten.

Proben aus dem vorderen Übergangsbereich zwischen Ausbrenn- und Sinterzone der Ofenabdeckung sind deutlich mit Zink angereichert. Zink ist Bestandteil einiger Presshilfsmittel (Gleitmittel) wie beispielsweise Zinkstearat, wohingegen Zink als Legierungselement in der Pulvermetallurgie der Eisenbasiswerkstoffe (vs. Pulvermetallurgie der Aluminiumbasiswerkstoffe) keine Rolle spielt. Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass es sich tatsächlich um einen Rückstand der Presshilfsmittel (Gleitmittel) handelt. Proben von der Ofenabdeckung aus dem hinteren Übergangsbereich zwischen Ausbrenn- und Sinterzone sind hingegen reich an Silizium und Sauerstoff. Vermutlich stammt das Silizium aus den Schamottsteinen. Die Proben aus der Schrockkühlzone des Ofens BBR 212 sind dagegen reich an Mangan und Chrom. Beide Legierungselemente sind in einigen Sinterstählen zu finden. Aufgrund der Verdampfungsneigung (Dampfdruck) beider Legierungselemente ist davon auszugehen, dass diese Ablagerung aus den Sinterbauteilen (Sinterzone) stammen.

Nachdem im AP1 die Datenbasis erfasst und dokumentiert wurde, erfolgte im AP2, gemäß dem Projektplan, die experimentelle Betrachtung der Vorgänge in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212 bei GKN Sinter Metals. Durch eine systematische Erfassung der relevanten Parameter (Temperaturen und -profile, Gasgemischzusammensetzung sowie Gasgeschwindigkeiten an relevanten Stellen) entstand ein detailliertes Prozessbild bei definierten Randbedingungen (Werkstoff, Bauteilbeladung, Bandgeschwindigkeit, Gaszufuhr usw.). Auf Basis dieser Daten konnten die Simulationsmodelle aus AP3 (Ofen- und Gesamtmodell) später parametrisiert und validiert werden. Nach der Auswertung der Voruntersuchungen am Versuchsofen und unter Berücksichtigung konstruktiver Gegebenheiten vor Ort wurden insgesamt sieben festen Messstellen in der Ausbrennzone des Ofens definiert. Die Positionen der Messstellen können der Abbildung 4.1.2-1 entnommen werden. Bei der Nachrüstung wurde die optionale Höhenverstellung der Messstellen innerhalb der Ausbrennzone realisiert. Somit kann das Ausbrennzonenvolumen oberhalb des Bandes bedarfsgerecht abgetastet werden.

Um die relevanten Parameter in unmittelbarer Nähe der Sinterbauteile an unterschiedlichen Stellen entlang der Ausbrennzone erfassen zu können, wurde eine zusätzliche, „variable“ Messstelle vorgesehen. Dafür wurde ein ausreichend langer Schlitten mit einem Bügel konstruiert, der über den aufgelegten Bauteilen steht und vom Anfang bis zum Ende der Ausbrennzone stufenlos positioniert werden kann. Mit der auf dem Bügel installierten Sensorik lassen sich somit Parameter unmittelbar oberhalb der Sinterbauteile ausbrennprozessbegleitend erfassen. Da insbesondere bei den Messungen der Gaszusammensetzung ein quasi-statischer Zustand Voraussetzung für solide Ergebnisse ist, wurde der Messschlitten in $x=50$ cm Abständen im Ofen positioniert und für die jeweilige Messung festgehalten. Somit ergaben sich fünf Messstellen entlang der Ausbrennzone, die eine ausreichend gute Charakterisierung der Vorgänge und Zustände oberhalb der Sinterbauteile sichern.

Für eine erfolgreiche Verifizierung der simulierten Strömungsverhältnisse innerhalb der Ausbrennzone sind Kenntnisse der Strömungsgeschwindigkeiten an definierten Stellen nötig. Unter der Annahme einer stationären Strömung und eines näherungsweise niedrigviskosen, inkompressiblen Gasgemischs der Dichte ρ_{GG} innerhalb der Ausbrennzone lässt sich die

Gasgemischgeschwindigkeit v_{GG} mit den Prandtlrohren messen. Die lokale Gasdichte ρ_{GG} wird über die jeweils lokal gemessenen Gastemperaturen und Gaszusammensetzungen berechnet. Am Staupunkt des Prandtlrohres werden der Gesamtdruck p_a und kurz dahinter der statische Druck p_0 gemessen. Der dynamische Druck p_{dyn} ist die Differenz aus Gesamtdruck p_a und statischen Druck p_0 . Der dynamische Druck p_{dyn} liefert über die Bernoulli-Gleichung (Gleichung 1) mit der lokalen Gasdichte ρ_{GG} die lokale Strömungsgeschwindigkeit v_{GG} (Gl. 2).

$$p_a = p_0 + p_{dyn} = p_0 + \frac{1}{2} * \rho_{GG} * v_{GG}^2 \quad \text{Gl. 1}$$

$$v_{GG} = \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho_{GG}}} \quad \text{mit } \Delta p = p_a - p_0 \quad \text{Gl. 2}$$

Das Gasgemisch muss die Prandtlsonde jeweils möglichst in Längsrichtung anströmen. Fehler durch Winkelabweichungen sind bei den zu erwartenden kleinen Anström winkeln im Rahmen der ohnehin vorhandenen allgemeinen Ungenauigkeiten bei diesem Projekt vernachlässigbar. Um für die Kalibrierung der Simulation brauchbare Geschwindigkeiten (Temperaturen, Gaszusammensetzungen) zu erhalten, wurden für die Prandtlrohre drei Messstellen basierend auf den Ergebnissen aus der ersten strömungstechnischen Simulation definiert (Messstellen 1 und 6 sowie Messstelle 7 „Schlitten“, siehe Abbildung 4.1.2-1).

Zum anderen muss die relativ hohe und zudem räumlich inhomogene Temperaturverteilung innerhalb der Ausbrennzzone bei der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten mitberücksichtigt werden. Daher wurde neben der Strahlungstemperatur an allen Messpunkten auch jeweils die Gastemperatur gemessen. Die Thermometer für die Strahlungstemperatur und Gasanalyserohre wurden möglichst nah an den Prandtlsonden so positioniert, dass sie die Prandtlrohre nicht beeinflussen. Um für die Gastemperaturmessung die Strahlungseinwirkung zu minimieren, wurden aus leichtem Schamottstein Strahlungsschildkörper hergestellt (siehe Abbildung 4.2.2-7), die in die Enden von Edelstahlrohren eingeschoben alle Sensoren in Position hielten. Diese Schamottkörper erhielten eine Spitze mit Bohrung, um das Gas für die Temperaturmessung anzusaugen. Auch diese Spitze wurde möglichst günstig in der Nähe der Prandtlrohre positioniert. Der mit der Bohrung beginnende Kanal wurde so durch den Körper mäandrierend gelegt, dass das im Inneren liegende Thermometer zwar vom Gas umströmt wurde, aber keiner direkten Strahlung ausgesetzt war. Die Wände innerhalb des Körpers stellen sich auf die Gastemperatur ein, da die Wärmeleitung durch den hochporösen Schamottestein gering ist. Damit das Gas tatsächlich durch die vorgesehenen Kanäle strömt, wurde die äußere Oberfläche des Schamottkörpers abgedichtet. Um das Gas am Thermometer vorbeizusaugen, wurde am außen abgedichteten Ende des Edelstahlrohres jeweils eine Unterdruckpumpe angeschlossen. Beim Einschalten der Pumpen ändert sich die vom innenliegenden Thermometer gemessene Temperatur. Beim Erhöhen des Volumenstroms (Bypassventil) flacht die Temperaturkurve ab, bis man einem konstanten Wert der Gastemperatur erreicht hat. Bei der Gasanalyse wurden folgende relevante Anteile erfasst und in Volumenprozent ausgewertet: CO, CO₂, CH₄, H₂ und O₂. Die restlichen Gasgemischanteile (Stickstoff, Wasserdampf, evtl. andere Kohlenwasserstoffverbindungen und Verunreinigungen) wurden nicht messtechnisch erfasst.

Während der Untersuchungen wurden Signale von den installierten Sensoren mit geeigneter Messtechnik erfasst und über das werksinterne Process Control System APROL mit den Daten der Gasanalyse (erfasst und bereitgestellt durch Fa. MESA) und allgemeinen Parametern, die am Versuchsofen standardmäßig erfasst werden, zeitsynchron zusammengeführt und mit einer Frequenz von $f=1$ Hz gespeichert.

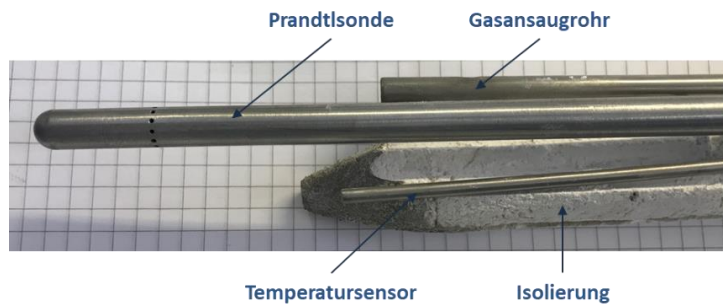


Abbildung 4.2.2-7: Messkopf mit Prandtlsonde, Temperatursensor und Gasansaugrohr

Die Bandgeschwindigkeit von $v=10$ m/h sowie die Schutzgaszusammensetzung im Verhältnis von 98% N_2 + 2% H_2 wurden während der Untersuchungen serienkonform beibehalten. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich die messtechnische Erfassung der tatsächlichen Aufteilung des Schutzgases zwischen Sinter- und Schroffkühlzone relativ komplex gestaltet hat. Die Brenner wurden mit Unterstützung von der Fa. Mahler (Ofenhersteller) basierend auf den Parametern der vorher automatisch laufenden Regelung manuell so eingestellt, dass ein quasistationärer Verbrennungszustand bei den jeweiligen Messungen realisiert werden konnte. Sinterversuche bei unterschiedlichen Lastzuständen (siehe Abbildung 4.2.2-8) lieferten die Messdaten, die aufbereitet und ausgewertet den Ausbrennprozess des „IST-Zustand“ charakterisieren, um Optimierungspotenziale aufzudecken und für die Validierung der Simulationsmodelle herangezogen wurden.

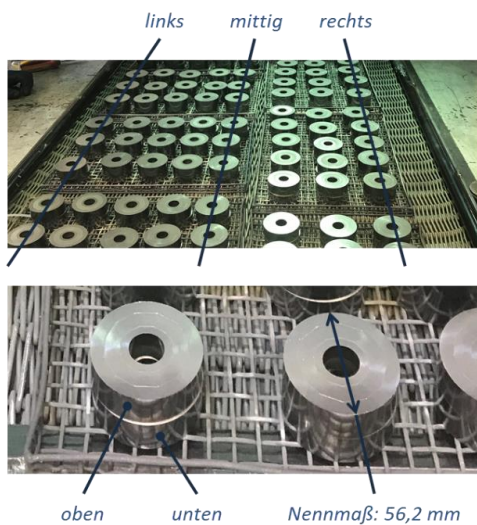
Lastzustand	Beladung [kg/h]	Entwachsen	Bandgeschwindigkeit [mm/min]	Schutzgas (N_2/H_2) [m^3/h]	Lambda Brenner
Leerlauf	-	nein	167	69,7/1,4	0,68
Teilbeladung	302,29	ja	167	69,7/1,4	0,68
Teilbeladung	299,60	nein	167	69,7/1,4	0,68
Vollbeladung	571,09	ja	167	69,7/1,4	0,68
Vollbeladung	565,71	nein	167	69,7/1,4	0,68



Abbildung 4.2.2-8: Lastzustände und zugehörige Ofenbeladungen

Um das Maßverhalten der Bauteile im späteren Projektverlauf bei der Bewertung der Ofenproduktivität mit optimierter Ausbrennprozessführung zu berücksichtigen, wurde der Außendurchmesser da der Bauteile bei den „IST-Zustand“-Untersuchungen exemplarisch vor und nach dem Sintern gemessen. Abbildung 4.2.2-9 beschreibt das Maßverhalten der Bauteile für Teil- und Vollbeladung zeitlich verteilt und jeweils abhängig von der Lage auf dem Band (links/mittig/rechts). Bei der Vollbeladung wurde dabei zusätzlich zwischen direkt auf den Sinternetzen platzierten Bauteilen und Bauteilen aus der oberen Reihe (unten/oben) differenziert. Das Gesamtniveau der maßlichen Änderungen (Grünteil vs. Sinterteil) liegt innerhalb der typischen Toleranz für den Werkstoff. Leicht höhere Änderungen bei voll beladenem Ofen gegenüber den Änderungen bei der Teilbeladung waren zu erwarten und resultieren aus geänderter thermischer Last bei quasi konstant gehaltenen Prozessbedingungen.

Bauteillagen



Maßänderung

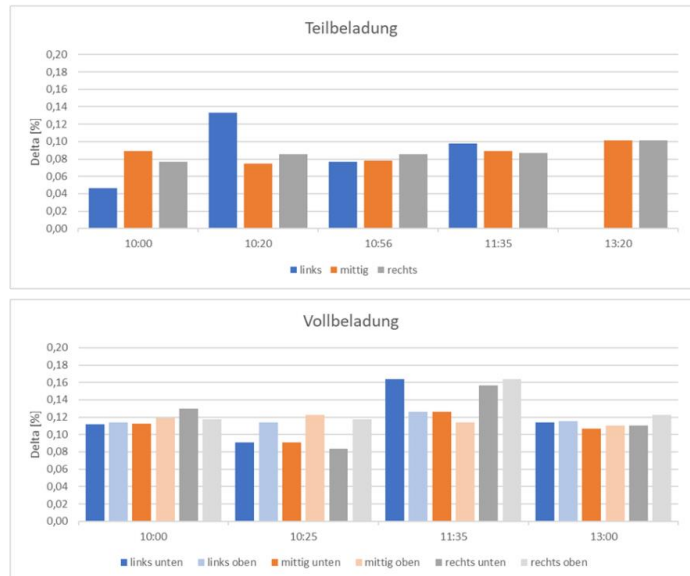
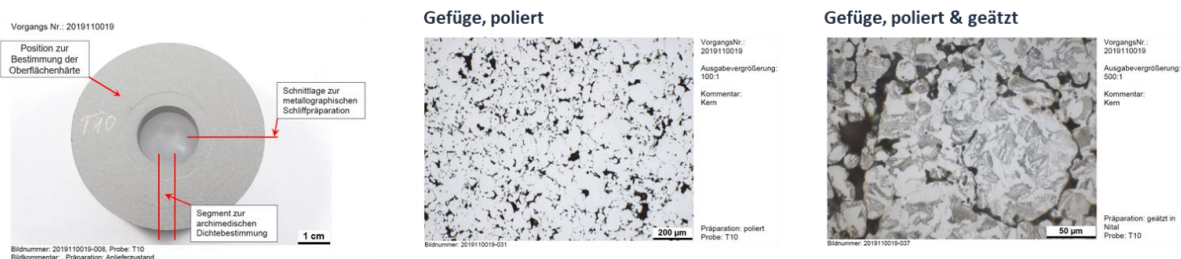


Abbildung 4.2.2-9: Maßverhalten (prozentuelle Änderung des Außendurchmessers d_a , Grünteil vs. Sinterteil) der untersuchten Bauteile in Abhängigkeit von der Ofenbeladung und der Lage auf dem Ofenband

Das Maßverhalten der Testbauteile zeigt keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Ofenbandbreite wie auch im zeitlichen Verlauf der Versuchsreihen. Dieses Verhalten deutet auf einen gut geführten und robusten Prozess hin. Die vom Mittelwert stärker abweichenden Werte einzelner Bauteile, wie beispielsweise $\Delta = 0,133\%$ Außendurchmesseränderung bei der Teilbeladung („links/10:20“-Probe, siehe Abbildung 4.2.2-9) sind auf Messunsicherheiten zurückzuführen.

Weitere für die Charakterisierung des Sinterprozesses relevanten Bauteileigenschaften wie Dichte, Oberflächenhärte, Kernhärte und C-Gehalt – ergänzt mit dem sich ausgebildetem Materialgefüge – wurden im Labor untersucht und dokumentiert (siehe Abbildung 4.2.2-10).



	Bauteil		Härte, HV30		Archimedische Dichte [g/cm ³]	C-Gehalt, %	
	Bezeichnung		Oberfläche	Kern		Rand	Kern
Teil- beladung	T10		131 ± 6	132 ± 5	6,94	0,409 ± 0,005	0,413 ± 0,005
	T11		133 ± 2	127 ± 5			
	T12		136 ± 2	132 ± 5			
Voll- beladung	V13		127 ± 3	122 ± 3	6,94	0,425 ± 0,006	0,431 ± 0,005
	V14		121 ± 5	120 ± 3			
	V15		127 ± 2	120 ± 2			
	V16		124 ± 4	119 ± 6			
	V17		127 ± 4	122 ± 3			
	V18		126 ± 3	126 ± 1			

Abbildung 4.2.2-10: Eigenschaften der Testbauteile nach dem Sintern (Auszug aus dem Laborbericht)

4.2.3 Versuche mit Beladung (GKN)

Im AP2 erfolgte, gemäß dem Projektplan, die experimentelle Betrachtung der Vorgänge mit Beladung in der Ausbrennzone des Versuchsofens bei GKN Sinter Metals in Bad Brückenau. Nachfolgend sind Ergebnisse der Untersuchungen weiterer relevanten Kenngrößen (Gas- und Strahlungstemperatur, Gaszusammensetzung und Gasgeschwindigkeit) dargestellt. Die räumliche Zuordnung der Messstellen in der Ausbrennzone des Versuchsofens ist in Abbildung 4.2.2-6 zusammengefasst. Zunächst wurden die Messdaten parametrisiert und zeitsynchron bezogen auf Lastzustände „Leerlauf“ (LL), „Teilbeladung“ (T), „Teilbeladung nur thermischer Last“ (TT), „Vollbeladung“ (V) und „Vollbeladung nur thermischer Last“ (VT) aufgeteilt. Danach erfolgte eine Plausibilitätsprüfung der Messdaten. Alle Messartefakten und signifikanten Messausreißer wurden dabei aus den Messdatensätzen händisch entfernt. Schließlich wurden Zeitfenster für die jeweils relevanten Messstellen nach Versuchsaufzeichnungen und unter Beachtung stabiler, „quasistatischer“ Verläufe der Messdaten identifiziert und für die Auswertungen dokumentiert. Auf dieser Art wurden 55 Datensätze (insgesamt 11 Messstellen und 5 Lastzustände) generiert, auf der die finale Auswertung basierte. An der Stelle ist anzumerken, dass die Messdaten für die Gaszusammensetzung an die Fa. MESA und das APROL System weitergeleitet wurden, um weitere Bearbeitungsschritte daran durchzuführen. Diese Messdaten sind ausschließlich für die Abschätzung der jeweiligen Gasdichten, die für die Berechnung der lokalen Gasgeschwindigkeiten benötigt werden, ausreichend. Die eigentliche Auswertung der Gaszusammensetzung erfolgt durch Fa. MESA. Abbildung 4.2.3-1 gibt exemplarisch die aufbereiteten Messdaten der Messstelle 1 für den Lastzustand „Teilbeladung“ (T) wieder.



Abbildung 4.2.3-1: Differenzdruck, Gastemperaturen und Gaszusammensetzung an der Messstelle 1 bei der Teilbeladung des Versuchsofens

Die folgenden Bilder 4.2.3-2 bis 4.2.3-11 stellen die ausgewerteten Datensätze für die jeweiligen Messpunkte und Lastzustände dar. Diese Daten dienen der Parametrisierung und Validierung der Simulationsmodelle aus AP3 (Temperaturen sind in Grad Celsius angegeben) in Abschnitt 4.3.

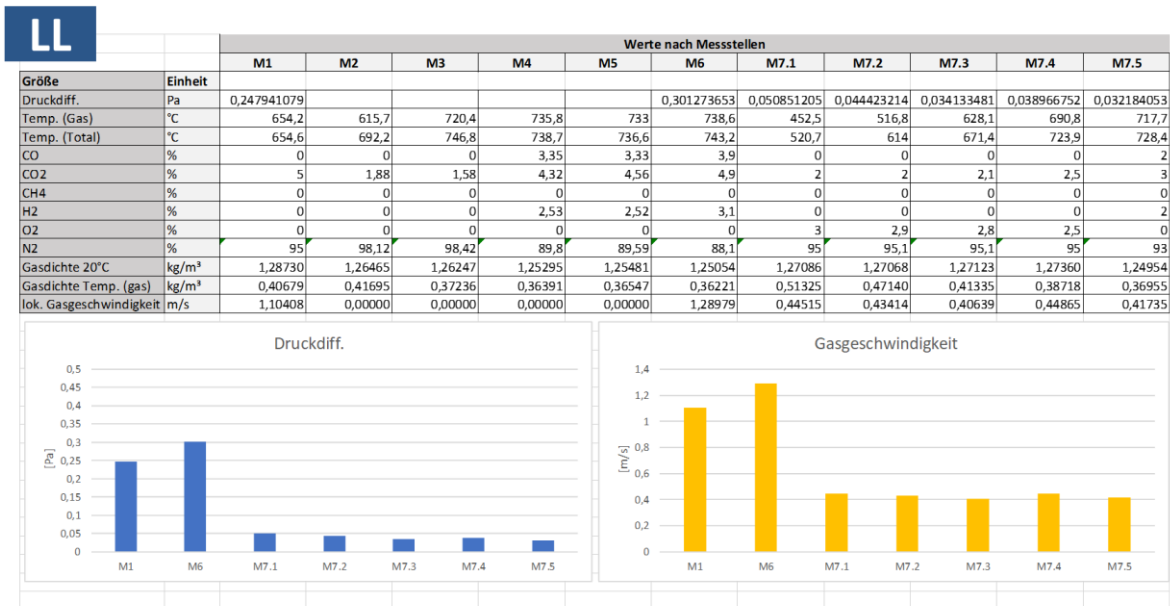


Abbildung 4.2.3-2: Leerlauf-Gasgeschwindigkeiten in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

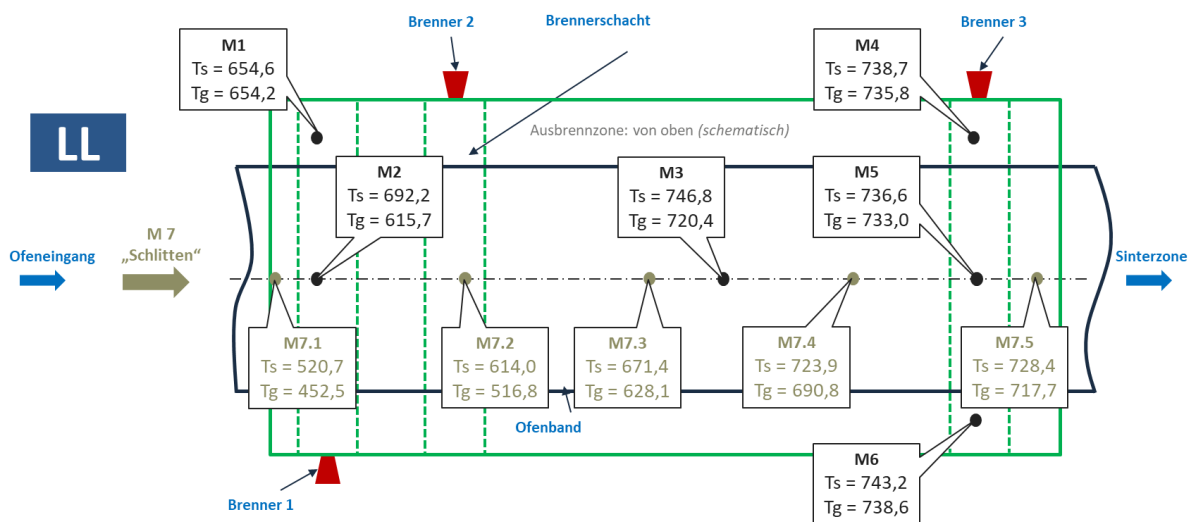


Abbildung 4.2.3-3: Leerlauf-Temperaturen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

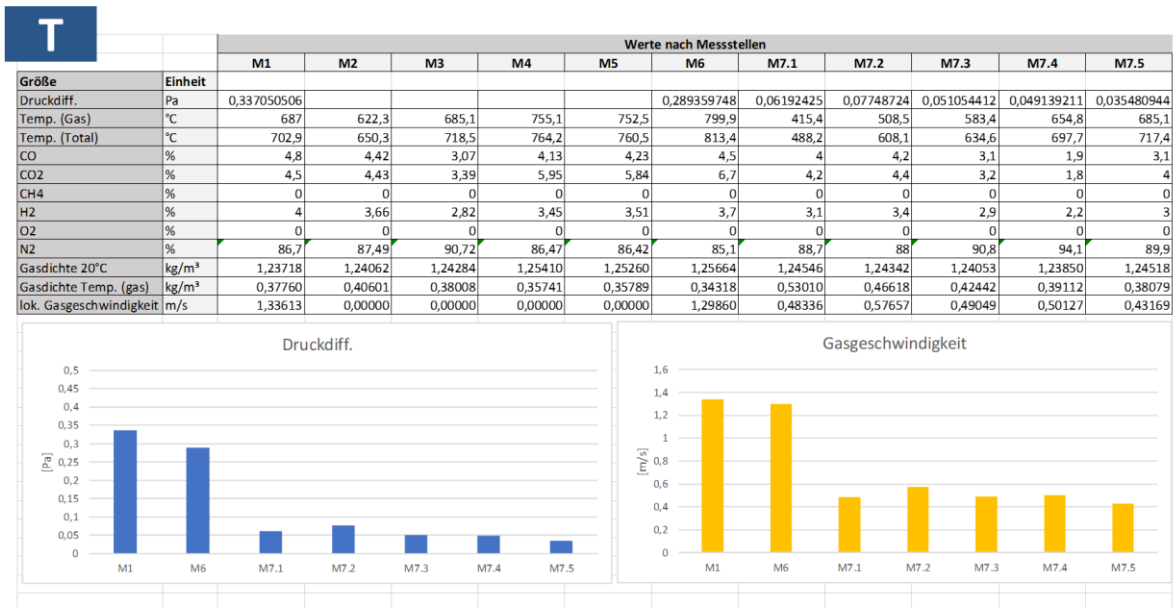


Abbildung 4.2.3-4: Teilbeladung-Gasgeschwindigkeiten in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR

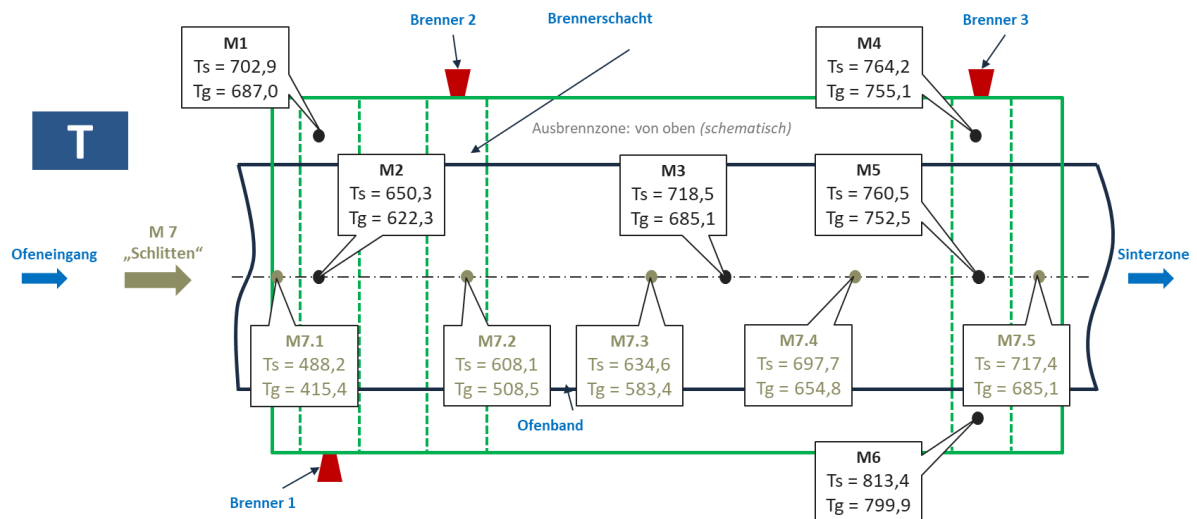


Abbildung 4.2.3-5: Teilbeladung-Temperaturen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

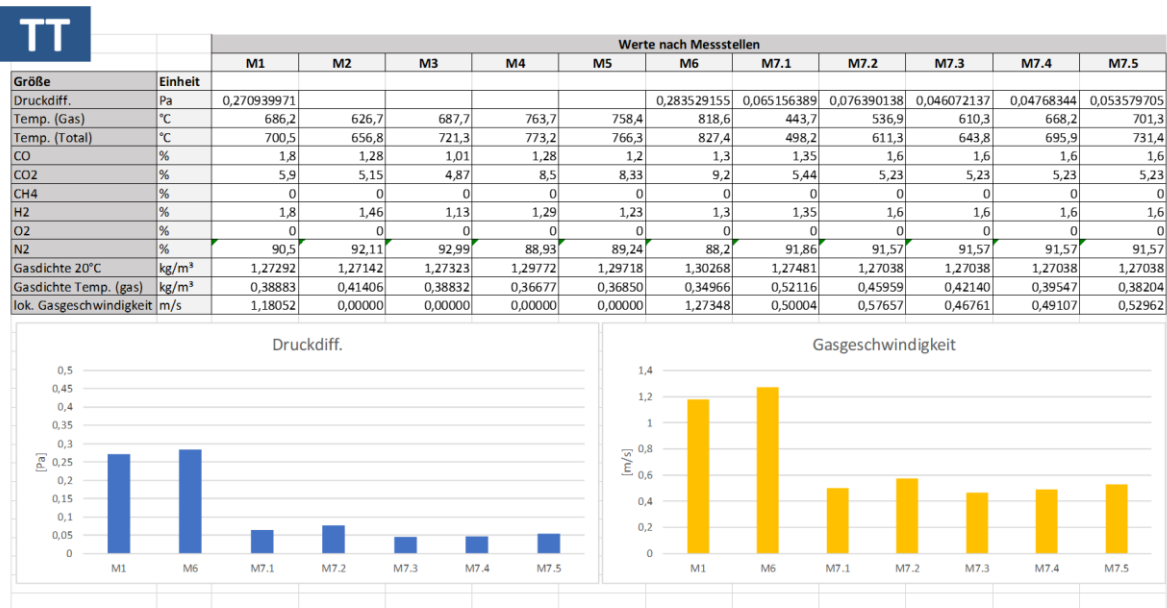


Abbildung 4.2.3-6: Teilbeladung-Gasgeschwindigkeiten in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR

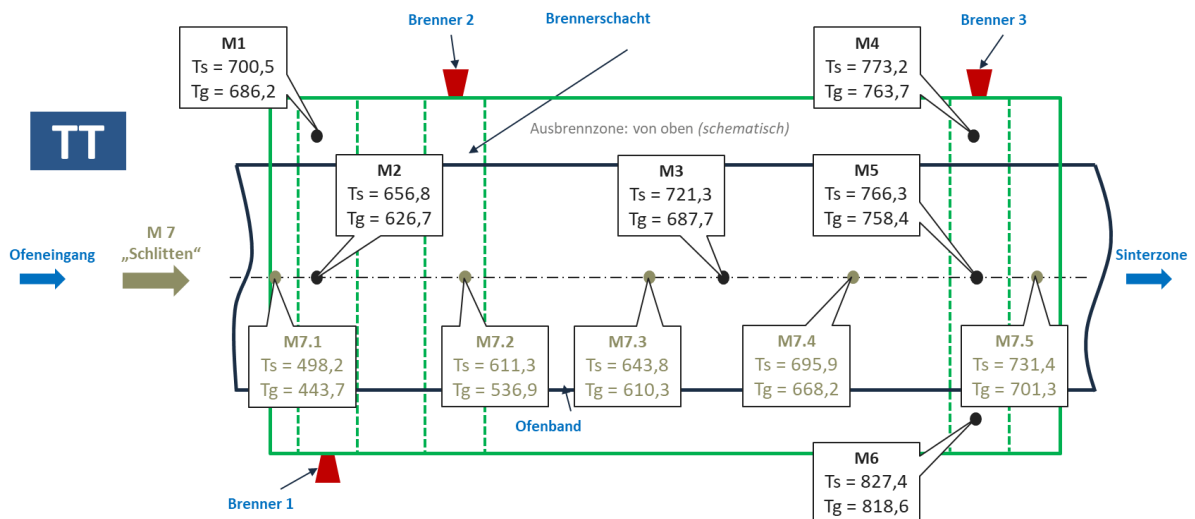


Abbildung 4.2.3-7: Teilbeladung-Temperaturen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

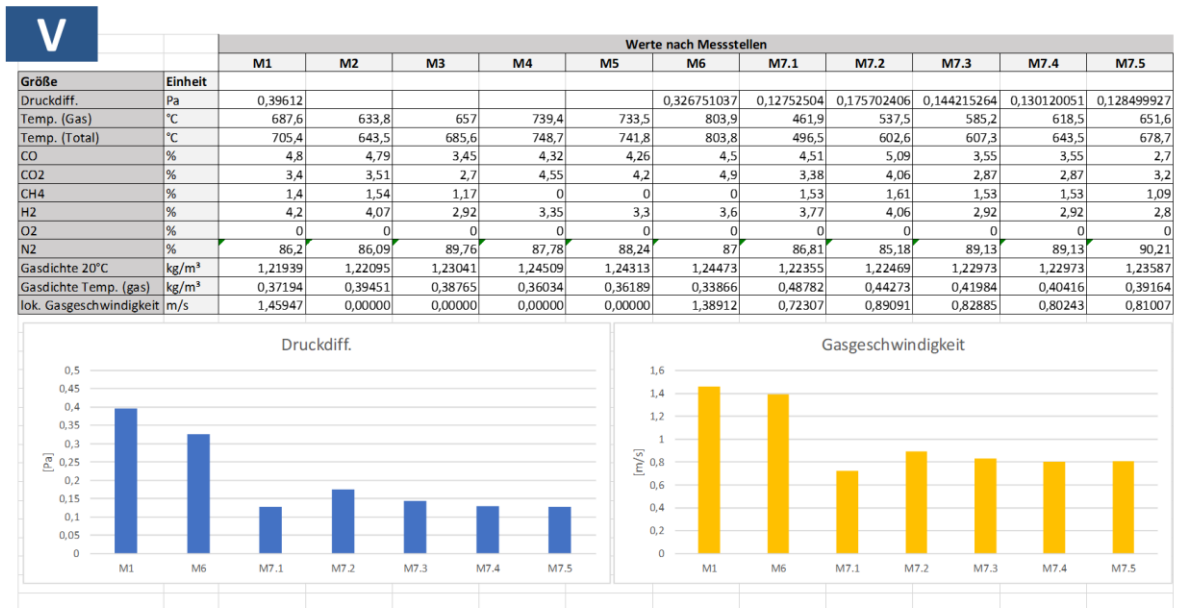


Abbildung 4.2.3-8: Vollbeladung-Gasgeschwindigkeiten in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR

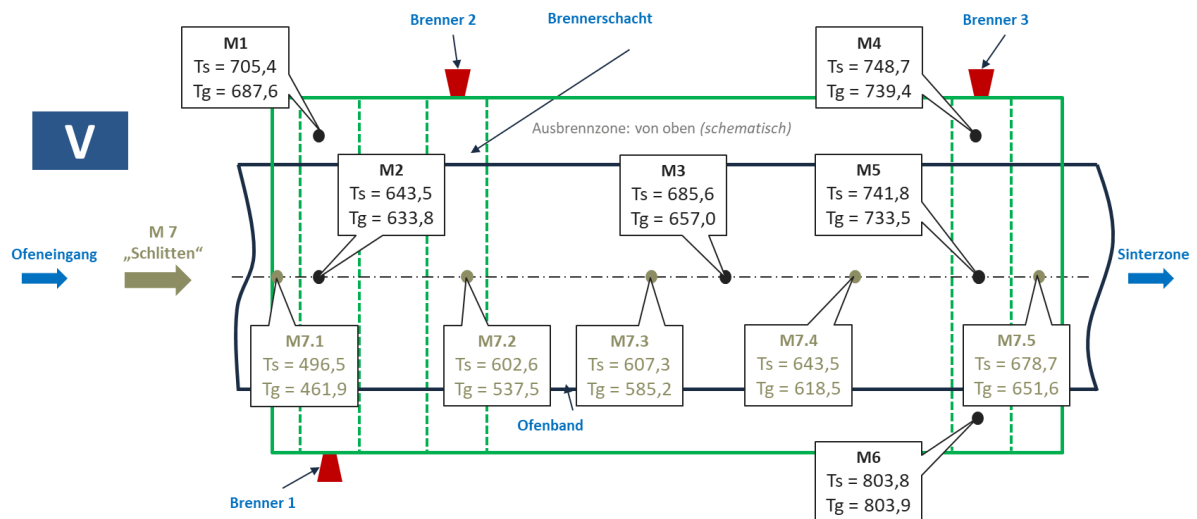


Abbildung 4.2.3-9: Vollbeladung-Temperaturen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

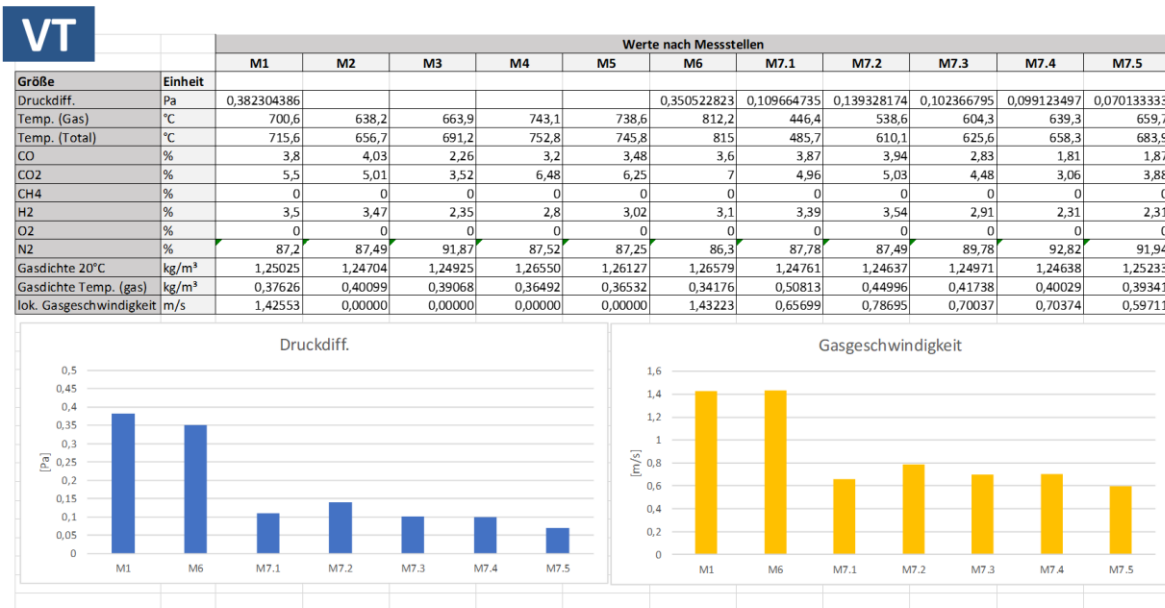


Abbildung 4.2.3-10: Vollbeladung-Gasgeschwindigkeiten in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR

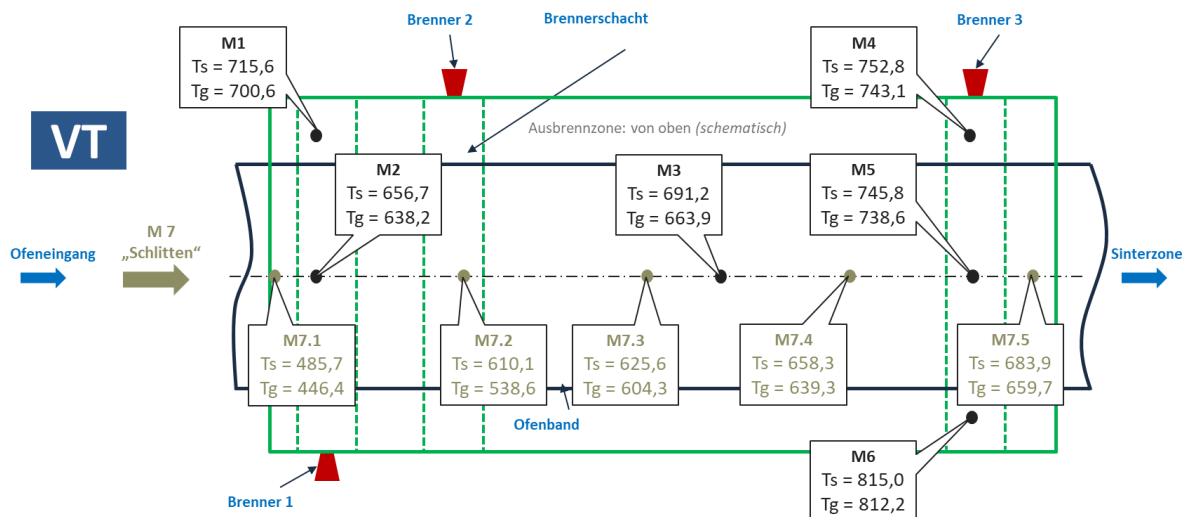


Abbildung 4.2.3-11: Vollbeladung-Temperaturen in der Ausbrennzone des Versuchsofens BBR 212

Die ausgewerteten Messdaten werden als Input für die Anpassung der Simulationsmodelle aus AP3 eingesetzt. Bei der näheren Betrachtung des angepassten Simulationsmodells wurde festgestellt, dass Kenntnisse über die Massentemperatur der Bauteile in den unterschiedlichen Lagen auf dem Ofenband entlang der Ausbrennzone wesentlich zur Verfeinerung des Simulationsmodells beitragen können. Außerdem zeigten erste Simulationen, dass die Strömungsverhältnisse sowie die Gaszusammensetzung unmittelbar in Bauteilnähe für die Beschreibung der Vorgänge in der Ausbrennzone des Versuchsofens eine wichtige Rolle spielen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Übergang Sinterzone/Ausbrennzone. Um die erforderlichen Daten messtechnisch zu erfassen, wurden weitere Untersuchungen am Versuchsofen BBR 212 sorgfältig geplant und vorbereitet. Die Durchführung der Untersuchungen verzögerte sich aufgrund der eingetretenen Corona-Pandemie und der dadurch reduzierten Auftragslage in der Produktion. Basierend auf den ersten Simulationsergebnissen wurden folgende mögliche Ansätze zur

Optimierung der Strömungsverhältnisse in der Ausbrennzone des Ofens hinsichtlich des Temperaturmanagements und der nahezu vollständigen Verbrennung der Wachsrückstände in den Brennerflammen ausgearbeitet, mit dem Ziel den Brennwert des Presshilfsmittels (Gleitmittels) zu nutzen:

- Reduktion des Ofenraums zur Erzwingung einer stärkeren Konvektionsströmung entlang der Sinterlinge und dem Transport der Zersetzungsprodukte des Gleitmittels in die Brennerflammen
- Umgestaltung der seitlichen Mauersegmente, um Wechselwirkungen der Brenner zu reduzieren und um eine Ofenlängsströmung zu forcieren
- Verlängerung des Deckels zur Sinterzone abhängig von der Verdampfungsneigung der Presshilfsmittel, um mit Hilfe des Schutzgases eine gleichmäßigere Umströmung und damit Temperierung der Sinterlinge zu erzwingen (dies ist limitiert durch die jeweils niedrigste Kondensationstemperatur der Zersetzungsprodukte)
- Bandauflage mit Löchern versehen, um die „kalten“ „schweren“ Zersetzungsprodukte direkt in die Brennerflammen zu ziehen oder in die darüber liegende Atmosphäre
- Benötigte Zusatzluft der Brenner über eine (Lambda?) Sonde regeln

Nachdem die 2020 aufgenommenen Messdaten aus den ersten Untersuchungen ausgewertet und die Simulationsmodelle damit parametrisiert wurden, wurde festgestellt, dass für eine finale Validierung und einer anschließenden Variationsrechnung zwecks Optimierung des Ausbrennprozesses Kenntnisse über die Massentemperaturänderungen der Testteile entlang der Ausbrennzone notwendig sind. Dazu wurde der Versuchsaufbau für die Zusatzuntersuchungen im Wesentlichen gleich dem aus 2019 gehalten. Der Unterschied besteht neben zusätzlichen Massentemperaturmessungen in der Gestaltung des Messkopfes von der „variablen“ Messstelle (M 7) am Schlitten (siehe Abbildung 4.2.3-12).

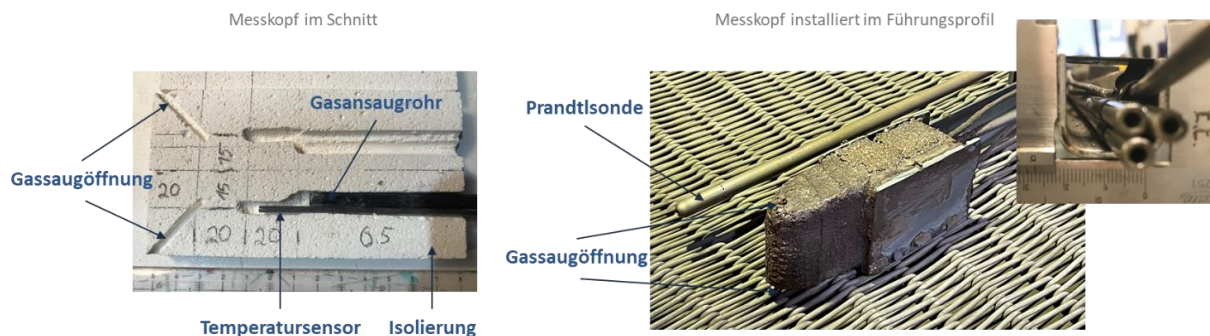


Abbildung 4.2.3-12: Messkopf mit Prandtlsonde, Temperatursensor und Gasansaugrohr

Der Messkopf wurde mit zwei Messstellen für die Gasanalyse (Zusammensetzung und Temperatur) ausgestattet und in der Nähe des Ofenbandes und oberhalb der Testteile platziert. Diese Anordnung erlaubte eine detaillierte Gasanalyse beim Ausbrennprozess in direkter Bauteilumgebung. Ergebnisse der Thermoelementschleppmessungen sind für die jeweiligen Beladungszustände in den folgenden Bildern 4.2.3-13 bis 4.2.3-16 dargestellt. Das gemessene Verhalten entspricht den bei GKN Sinter Metals gesammelten Erfahrungen und spiegelt die Massentemperaturänderung von Serienbauteilen entlang der Ausbrennzone (mit Ausnahme der Messungen bei der Teilbeladung) wider. Der rapide Anstieg der Massentemperatur am linken Bauteil aus Abbildung 4.2.3-13 (gleich am Ofeneintritt) ist physikalisch nicht erklärbar und deutet darauf hin, dass sich das Thermoelement vom Bauteil abgelöst hat und für die restliche

Zeit der Messung lediglich die Umgebungstemperatur in unmittelbarer Nähe des Bauteils entlang der Ausbrennzone anzeigte. Die Annahme wird dadurch bestätigt, dass sich die angezeigten Werte beider Thermoelemente erst kurz vor dem Eintritt in die Sinterzone angleichen.

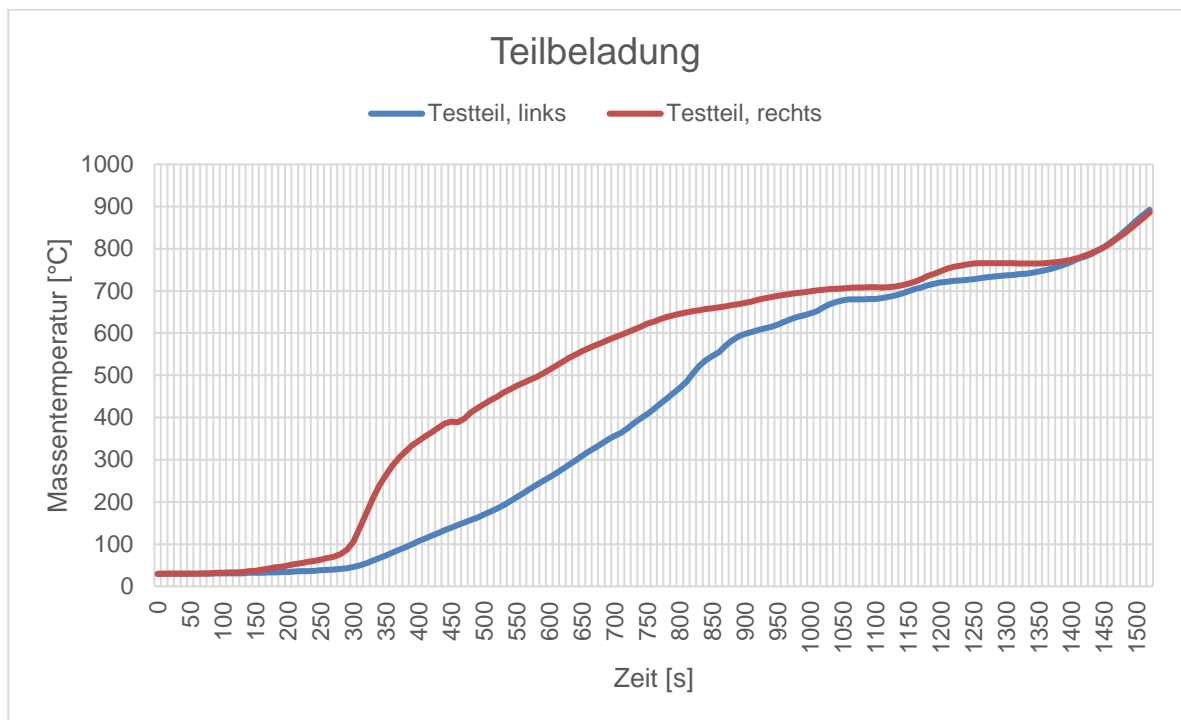


Abbildung 4.2.3-13: Massentemperatur der Bauteile (links und rechts auf dem Band, Teilbeladung des Ofens BBR 212)

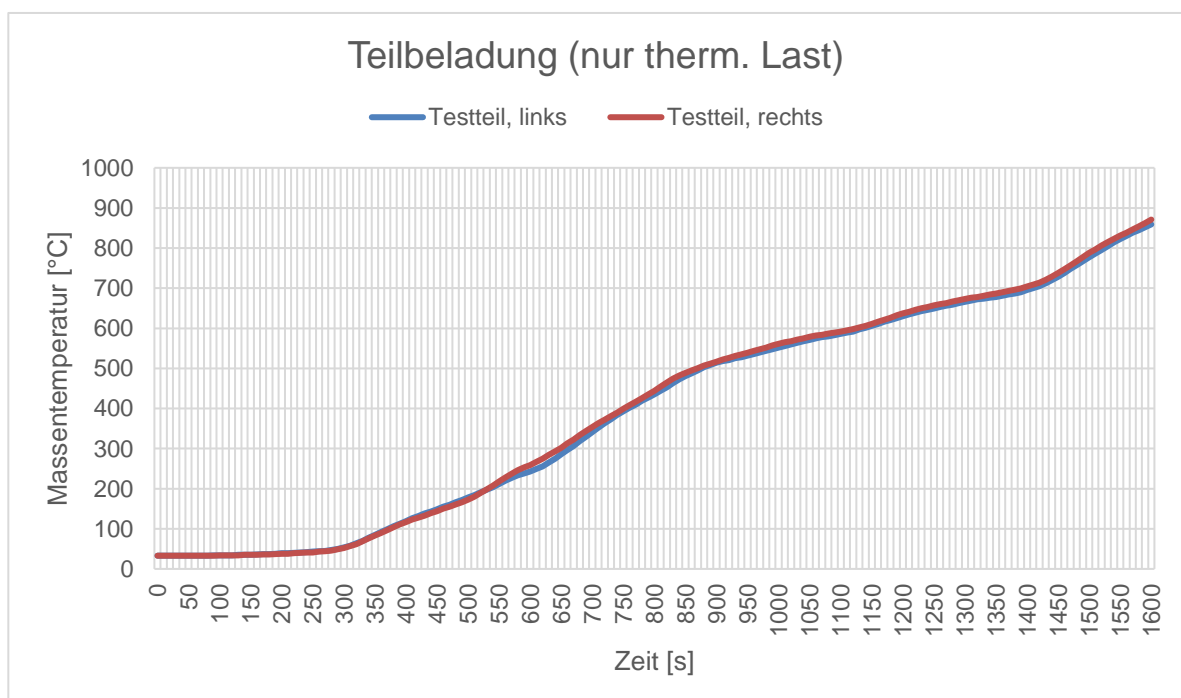


Abbildung 4.2.3-14: Massentemperatur der Bauteile (links und rechts auf dem Band, Teilbeladung des Ofens (nur therm. Last))

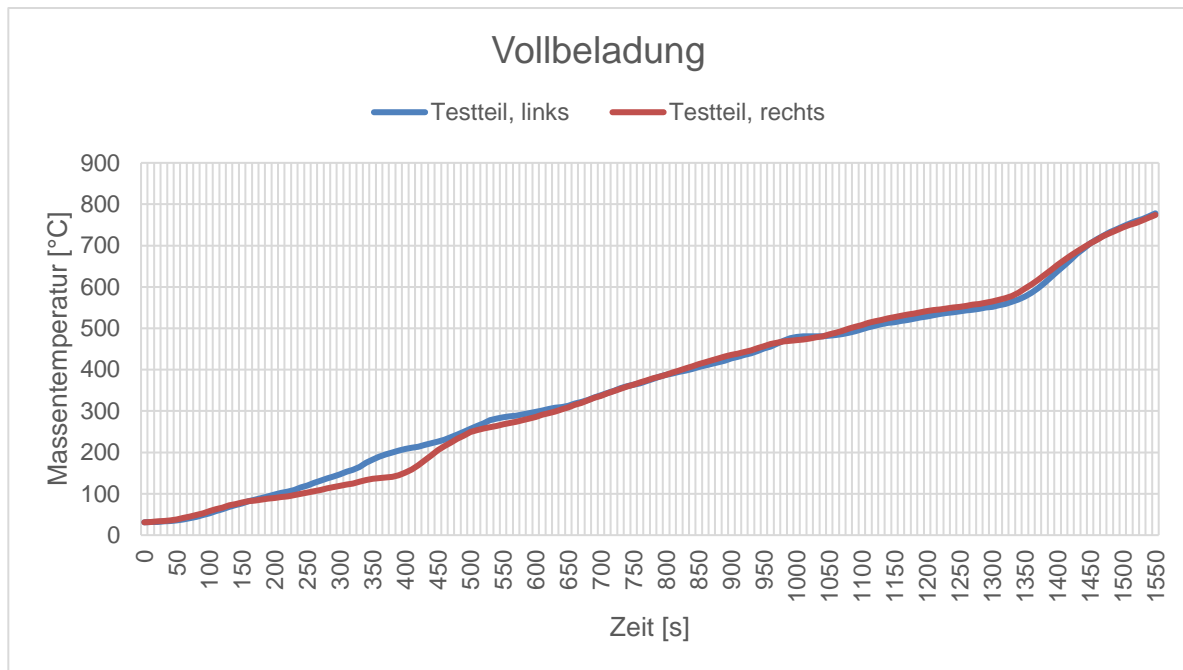


Abbildung 4.2.3-15: Massentemperatur der Bauteile (links und rechts auf dem Band, Vollbeladung des Ofens BBR 212)

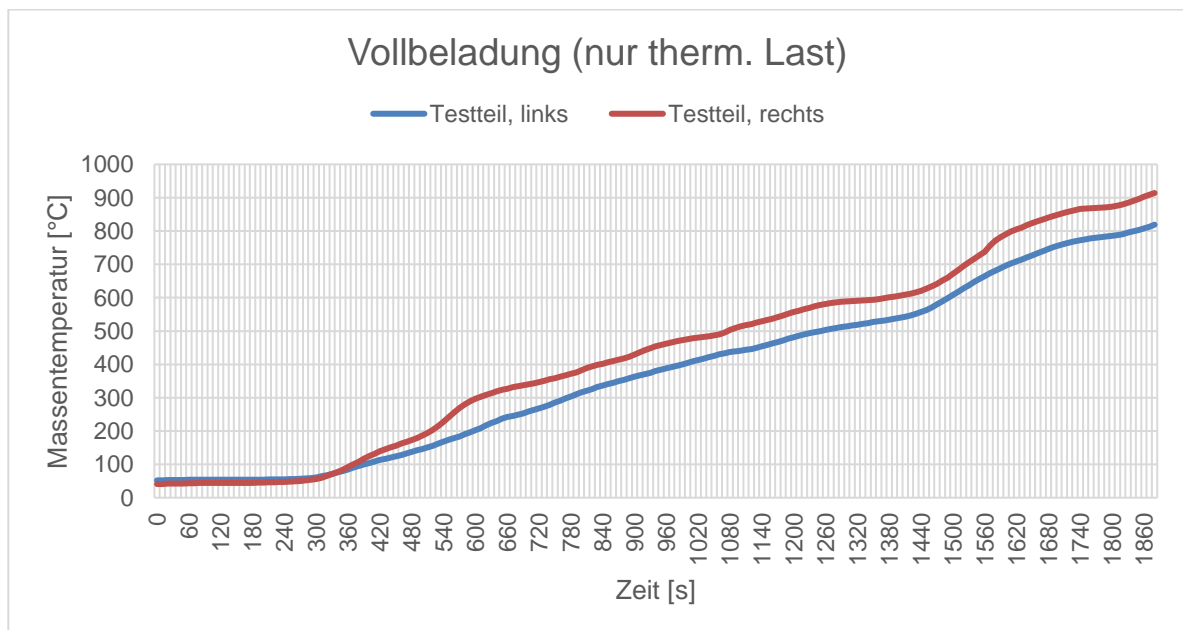


Abbildung 4.2.3-16: Massentemperatur der Bauteile (links und rechts auf dem Band, Vollbeladung des Ofens (nur therm. Last))

4.2.4 Gasanalysemessungen (MESA)

Im Projektverlauf wurden zwei größere Messkampagnen durchgeführt. Die detaillierten Diagramme der durchgeführten Gasanalysemessungen sind in Anhang 6.2 dargestellt.

Alle Messreihen der ersten Messkampagne (siehe 6.2.1) zeigen weitgehend ein gleichmäßiges Verhalten. Erkennbar ist in den Messungen der Längsprofile unten-mitte ein leichter Anstieg nach dem Eintritt und ein stärkerer Abfall bei ca. 1,5 m, danach wieder einen Anstieg. Dies

spiegelt auch weitgehend die Brennersituation wieder, da im vorderen Bereich 2 Brenner eingebaut sind und im hinteren nochmals ein weiterer.

Auffällig, aber erklärbar ist der Sachverhalt, dass je mehr Leistung für Heizung benötigt wird, desto größer die Mengen an CO ist. Bei größerer Leistungsanforderung wird die Verbrennung immer schlechter. Im Umkehrschluss zeigt dies aber auch, dass die Optimierung der Brenner immer ohne thermische Belastung durchgeführt wurde.

Weiterhin ist erkennbar, dass bei den Entbinderungs-Prozessen wie erwartet CH_4 entsteht. Dabei immer am Anfang mehr als am Ende. Ein Schluss könnte sein, dass die Entbinderungsprozesse ggf. den Restsauerstoff an sich binden und somit unverbranntes Erdgas der Brenner zu finden ist. Die wahrscheinlichere Möglichkeit ist aber, dass das Methan ein Spaltprodukt der sich auflösenden Wachskomponenten darstellt. Dafür würde auch sprechen, dass zum Ende des Entbinderungs-Prozesses die CH_4 -Mengen rückläufig sind, da kein Wachs mehr gespalten werden muss. Der H_2 -Gehalt bleibt nahezu konstant. Er entspricht auch etwa der Menge, die in der Sinterzone zugeführt wird. Die Schwankungen können durch die Turbulenzen, die durch die Brenner verursacht werden, erklärt werden.

Die Ergebnisse der Längsprofile oben-mitte decken sich weitgehend mit denen der Profile unten. Markant reißt der CO_2 -Wert immer bei der Messstelle 5 eine Spitze in die Verteilung. Dies dürfte durch die direkte Abgasströmung des hinteren Brenners zu erklären sein. Auch bei den Messungen der Profile oben scheint sich wieder ein Zusammenhang zwischen Entbinderung und CH_4 zu zeigen. Die Einbrüche zum Ende hin werden noch stärker. Dies kann aber auch täuschen, da in diesem Profil nur 3 Messpunkte vorhanden sind. Eine lastabhängige Zunahme der CO-Konzentration ist hier nicht so deutlich zu erkennen wie im unteren Längsprofil.

Die Querprofile zeigen keine neuen Informationen. Sie bestätigen vielmehr die vorher gefundenen Ergebnisse. Erstaunlich ist die Konstanz der Werte, die sich in allen Betriebszuständen zeigt. Dies deutet auf eine hohe gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit in Querrichtung hin. Weiterhin zeigt sich eindeutig, dass an dieser Position zu keiner Zeit signifikante CH_4 -Konzentrationen zu finden sind. Entweder wird das Gas durch die hohe Strömung im unteren Bereich gehalten, oder aber die Mengen sind hier zu klein, um noch ins Gewicht zu fallen. Der Entbinderungs-Prozess wäre dann auch abgeschlossen.

Die Ergebnisse der zweiten Messkampagne (siehe 6.2.2) zeigen im Vergleich zu denen der ersten Messkampagne keine wesentlichen Änderungen. Dadurch, dass weitere Messpunkte bei der Schlittenmessung hinzugekommen sind, ergibt sich jedoch eine bessere Auflösung des Bereiches ab 1,5 m im Ofen. Die CO und CO_2 -Messwerte haben im leeren Ofen immer noch ihr absolutes Minimum. Somit ist an der Einstellungsmethode der Brenner über die Abgasmessungen keine Änderung zu Vorjahr zu beobachten. In den belasteten Zuständen zeigen sich ebenfalls vergleichbare Werte, so dass die Versuche trotz des zeitlichen Versatzes vergleichbar blieben.

Die erweiterten Messpunkte im Übergangsbereich zur Hochtemperaturzone zeigen, dass dort keine Gase aus der Ausbrenn-Zone in den Hochtemperaturbereich strömen. Bei allen Endpunkt-Messungen bei 2,5 m werden nur Messwerte für H_2 angezeigt, das aus der Hochtemperatur Zone (HT-Zone) in die Ausbrenn-Zone strömt (H_2 Einspeisung nur in der HT-Zone). Die zusätzlichen Messungen in den zwei Höhen am Schlitten zeigten nur bei den Entbinderungs-Versuchen eine Zunahme der CH_4 -Konzentration. Ein Zeichen dafür, dass hier das Gas entsteht. Die Messungen gerade in der unteren Entnahme zeigten aber auch große Anfälligkeiten hinsichtlich des Messgasflusses, so dass nicht immer vollständige Messwertaufnahmen realisiert werden konnten. Die Messungen, die ohne Störungen durchgeführt wurden, zeigten aber auch, dass hier sehr große

Spitzen in der CH₄-Entstehung zu verzeichnen waren. Diese lassen sich durch die an der Messgasentnahme vorbeilaufenden Grünlingen erklären, dass genau beim Vorbeifahren an der Gasentnahme das austretende Wachs sich spontan zersetzt und als CH₄ detektiert wird. Die Messspitzen beliefen sich auf über 10 Vol.% (Ende des Messbereiches). Bei Betrachtung der Rohwerte des Analysators wurden Werte bis über 20 Vol. % erfasst.

Auch beim Vergleich der Querprofile bestätigten sich die in der ersten Messserie gefunden Ergebnisse. Die CO und CO₂-Werte zeigen vom Verlauf das gleiche Verhalten, die absoluten Werte sind leicht unterschiedlich. Die Unterschiede lassen sich durch die nicht 100-prozentig exakt übereinstimmenden Betriebsparametern der Brenner und ggf. durch leicht unterschiedliche Grundeinstellungen (Einstellung nach Abgaswerten) begründen.

4.3 Modellbildung (IWM, HTCO)

Das im Projekt entwickelte Modell zur Beschreibung der Vorgänge im Ofen setzt sich aus drei Bausteinen zusammen: (I) Ein strömungsmechanisches Modell des Sinterofens simuliert den Wärme- und die Strömungsverhältnisse in den unterschiedlichen Prozesszonen des Ofens und berücksichtigt die Ausbreitung von Zersetzungsprodukten. (II) Ein Sinter- und Endbinderungsmodell beschreibt auf Bauteilebene die thermophysikalischen Vorgänge innerhalb des Sinterguts und liefert Daten über Verbrauch und Entstehung einzelner Gasspezies. (III) Die Kopplung dieser Simulationsmodelle ermöglichte schließlich die ganzheitliche Simulation des gesamten Prozesses. Als Eingangsdaten wurden von den beteiligten Partnern Kenngrößen und Betriebsdaten des auch in den Versuchen verwendeten Bandofens BBR 212 benutzt. Die Validierung der einzelnen Modelle erfolgte dabei anhand von speziell für dieses Projekt erhobenen Messdaten, für die der Ofen instrumentiert wurde (siehe Abschnitt 4.2).

Im Laufe des Projektverlaufs stellte sich heraus, dass die Simulation der Ofenströmung im kompletten Ofen zum einen deutlich aufwändiger war als ursprünglich gedacht und – wichtiger – für die Optimierung in erster Linie die Vorgänge in der Entwachsungszone relevant sind. Deshalb wurde der Projektschwerpunkt im Bereich der Simulation auf diesen Ofenbereich gelegt und die Vorgänge in der Sinterzone weniger detailliert betrachtet.

4.3.1 Werkstoff- und Bauteilmodell (Entwachsen & Sintern) (IWM)

Wie im Antrag beschrieben - und auch im Laufe des Projekts bestätigt - ist eine bauteilebezogene Modellierung des Sintervorgangs in der Sinterzone für die energetische Optimierung nur von untergeordneter Bedeutung. In der Ofensimulation müssen nur die thermischen Effekte aufgrund der durchlaufenden Massen korrekt berücksichtigt werden. Die Deformation des Bauteils während des Sinterns und die daraus resultierenden Spannungs- und Dehnungszustände haben einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Energiebilanz. Im Rahmen des Projektes lag der Fokus deshalb auf der Entwicklung eines detaillierten Bauteilmodells für das Entwachsen.

Dazu wurde ein für keramische Grünkörper entwickeltes Entbinderungsmodell für das im Projekt verwendete Sinterstahlpulver auf FeCuC-Basis (SintD11) erweitert und angepasst. Der Fokus der Modellbildung lag dabei auf der Abbildung des Wachs-Schmelzens und der chemischen Zersetzungsreaktionen im Bauteil und an der Bauteiloberfläche und ihrer Wechselwirkung mit dem lokalen Temperaturfeld. Dieses Modell wurde anschließend in eine geeignete Form überführt, um als Sub-Modell im Rahmen der Gesamtsimulation das Verhalten der einzelnen Bauteile im Ofeninneren zu beschreiben.

Entwachsungsmodell

Die Beschreibung des Wachs austreibens basiert auf der Bilanzierung der Massen der verschiedenen Spezies, die im Porenraum des Grünlings vorhanden sind, und auf Stoffgesetzen für die Geschwindigkeit von deren Transport. In Abbildung 4.3.1-1 ist das Modell mit seinen Variablen illustriert. Der Porenraum ist teilweise mit Wachs gefüllt, im verbleibenden Raum befindet sich eine Mischung aus Gasen der Ofenatmosphäre und der Wachszersetzung. Sowohl das durch die Erwärmung flüssig gewordene Wachs als auch die Gasspezies werden als Folge von Druck und/oder Konzentrationsgradienten durch den Porenraum an die Oberfläche des Bauteils transportiert.

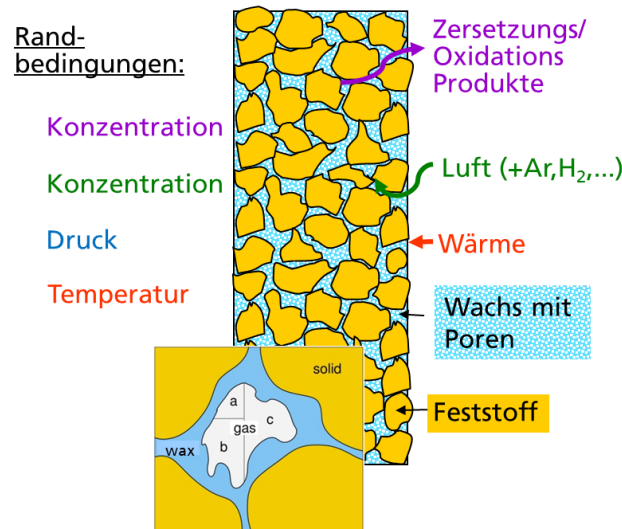


Abbildung 4.3.1-1: Entwachsungsmodell

Die zeitliche Änderung der in einem Volumenelement vorhandenen Massen des Wachses (w) und der Gasspezies (α) sind durch den Zu- und Abfluss sowie durch die Produktion bestimmt. In molarer Form lauten die Bilanzen

$$\frac{\partial}{\partial t} [\varphi_w c_w^*] = -\text{div } \vec{j}_w + \tau_w$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\varphi_g \frac{p_\alpha}{RT} \right] = -\text{div } \vec{j}_\alpha + \tau_\alpha$$

Wobei φ_w und c_w^* der Volumenanteil und die molare Dichte des Wachses, φ_g die aktuelle Porosität und p_α der Partialdruck der Gasspezies α ist. Die Stoffflüsse \vec{j} sind durch die Gradienten der chemischen Potentiale bestimmt, die wiederum wesentlich durch die Drücke in den entsprechenden Konstituenten festgelegt sind. Die Flüsse lassen sich in der Form

$$\vec{j}_w = -L_w \nabla p_w$$

$$\vec{j}_\alpha = - \sum_{\beta} K_{\alpha\beta} \nabla p_\beta$$

mit den Permeabilitäten L und K ausdrücken. Für den Druck im flüssigen Wachs gilt dabei

$$p_w = p_g - \sigma_c$$

mit der von der Sättigung abhängenden Kapillarspannung σ_c . Die Produktionsterme τ sind durch die Stöchiometrie und die Kinetik der chemischen Reaktionen der Wachszersetzung festgelegt. Das Modell wurde hinsichtlich der hier vorliegenden Besonderheiten des Wachstransports erweitert. In Versuchen wurde beobachtet, dass die Bauteile „schwitzen“, d.h. dass sich das Wachs in größer werdenden Tröpfchen an der Oberfläche des Bauteils sammelt, bevor es zur Zersetzung kommt. Dies kann als Folge der signifikanten Volumenvergrößerung des Wachses beim Schmelzen verstanden werden, durch die bei dem hier vorliegenden hohen Wachsgehalt - zuerst oberflächennah wo die Temperatur am größten ist - die Porenkanäle für den Gastransport verschlossen werden und so weiter innen ein Gasdruck entsteht, der das flüssige Wachs an die Oberfläche drückt. Im Modell kann dies durch Einführen einer „inneren Variablen“, die die an der Oberfläche gesammelte Menge von Wachs darstellt, und durch eine Randbedingung in der Form

$$\vec{j}_w \cdot \vec{n} = -k(p_w^\infty - p_w)$$

für den Wachsgehalt abgebildet werden, wobei ein Zufluss von Wachs in das Innere nur möglich ist, wenn an der Oberfläche bereits Wachs gespeichert wurde. Ein Abfluss von Gas ist genau dann nicht mehr möglich. Andernfalls gilt für die Gasströme, in Analogie zu Konvektionsrandbedingungen beim Wärmeübergang,

$$\vec{j}_\alpha \cdot \vec{n} = - \sum_\beta \tilde{K}_{\alpha\beta} (p_\alpha^\infty - p_\alpha)$$

Hierbei sind die mit „ ∞ “ bezeichneten Größen die in der Umgebung vorliegenden Partialdrücke. Neben der Massenbilanz wird in dem Modell der Energiehaushalt durch die Wärmeleitungsgleichung

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div } \vec{q} + r$$

berücksichtigt. Dabei ist \vec{q} der durch Temperaturgradient und Wärmeleitfähigkeit bestimmte Wärmefluss und r die infolge der chemischen Umsetzung pro Zeit im Volumen abgegebene Reaktionswärme. Für den Wärmestrom wird die Randbedingung

$$\vec{q} \cdot \vec{n} = -\alpha(T_\infty - T) - \epsilon\sigma(T_\infty^4 - T^4)$$

verwendet, mit der Konvektion und Strahlung berücksichtigt sind; α ist der Konvektionskoeffizient, ϵ die Emissivität und σ die Stefan-Boltzmann Konstante. Das hier skizzierte Modell mit seinen Besonderheiten ist in kommerziellen Codes nicht verfügbar; es wurde im Rahmen der Finite Elemente Methode implementiert.

Wachszersetzung

In diesem Projekt wurde das für die Formgebung von Stahlpulvern gängige Presshilfsmittel Ethylenebisstearimid (EBS) ausgewählt, da es frei verfügbar ist und seine chemische Zusammensetzung recherchiert werden kann; beim Projektpartner GKN wird es unter dem Namen „Licowax“ verwendet. Zur Zusammensetzung und zur Pyrolyse von EBS finden sich in Baum et al.³ für die vorliegende Fragestellung relevante Angaben. Die chemische Summenformel lautet $C_{38}H_{76}N_2O_2$, die Skelettformel ist

³ M. Baum et al.: „Lubricant Pyrolysis during Sintering of Powder Metallurgy Compacts“, Metallurgical and Materials Transactions B, 35B (2004) 381-392

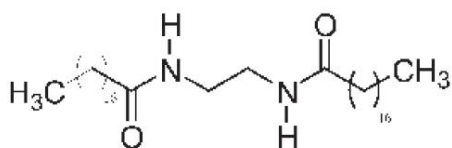


Abbildung 4.3.1-2: Skelettformel EBS

Mittels FTIR und GC/MS wurden in der o.g. Arbeit die Zersetzungsprodukte bei einer Heizrate von 10 K/min unter einem Gemisch von 95/5 % N_2/H_2 anhand eines Karbonyleisen-Grünlings analysiert. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4.3.1-3 über der Temperatur dargestellt. Die wichtigsten Zersetzungsprodukte sind, neben CO_2 , langkettige CH-Moleküle (summarisch unter HC), die bei etwa 450 °C auftreten, und - in einem frühen Stadium bei ca. 300 °C und in geringeren Mengen - Ethen, Methan und Ammoniak.

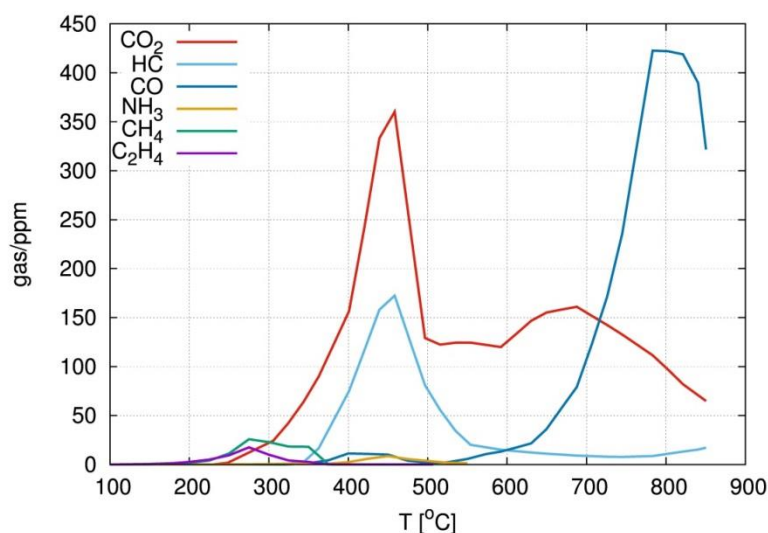


Abbildung 4.3.1-3: Zersetzungsprodukte EBS

In dem genannten Artikel werden verschiedene Zerfallsrouten diskutiert, insbesondere eine „cis-Elimination“ und eine „Hydrolyse“, diese sind in Abbildung 4.3.1-4 und 4.3.1-5 dargestellt.

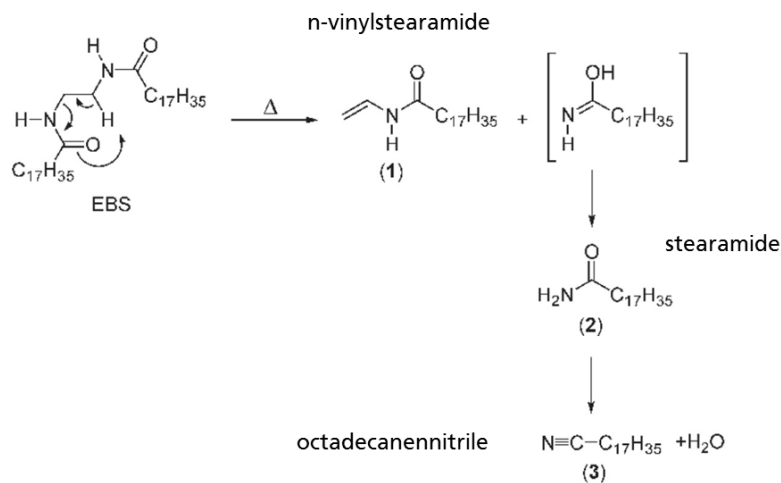


Abbildung 4.3.1-4: cis-Elimination

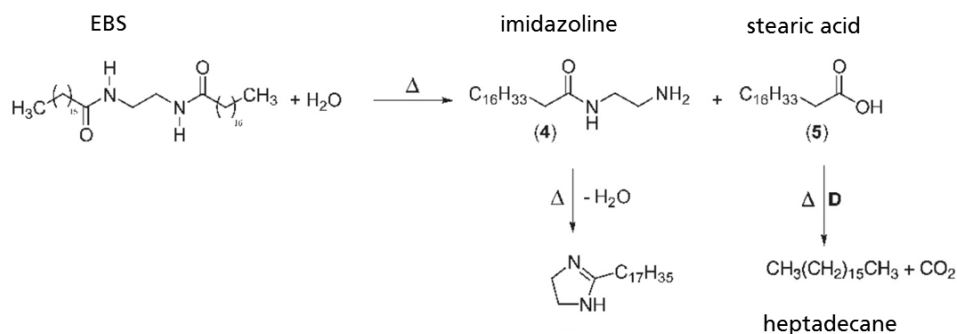
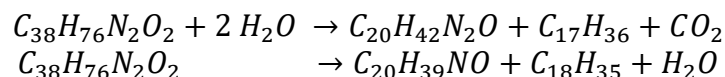


Abbildung 4.3.1-5: Hydrolyse

Auf dieser Basis wurden die folgenden chemischen Reaktionsgleichungen postuliert



Hiermit wird den o.g. Überlegungen zu den Zersetzungspfaden Rechnung getragen, so dass neben 4 langkettigen CH-Molekülen nur noch Wasserdampf und Kohlendioxid als Zersetzungsprodukte entstehen.

Unter Zugrundelegung dieser Reaktionsgleichungen können anhand von Differenz-Thermoanalyse (DTA) Messungen am reinen Wachs die Parameter des Entwachsungsmodells, die den Energiehaushalt der chemischen Reaktionen beschreiben (also nicht die Transportvorgänge), angepasst werden. In 4.3.1-6 sind diese Messungen, die bei GKN durchgeführt wurden, und die entsprechenden Ergebnisse des Modells dargestellt. Zu sehen sind hier die endothermen Ausschläge des DTA-Signals beim Schmelzen (ca. 140 °C) und beim Zersetzen (ca. 420 °C) des Waxes, wo auch die Massenabnahme stattfindet. Für das Modell ist hier der bei konstanter Heizrate zugeführte, willkürlich skalierte Wärmestrom dargestellt.

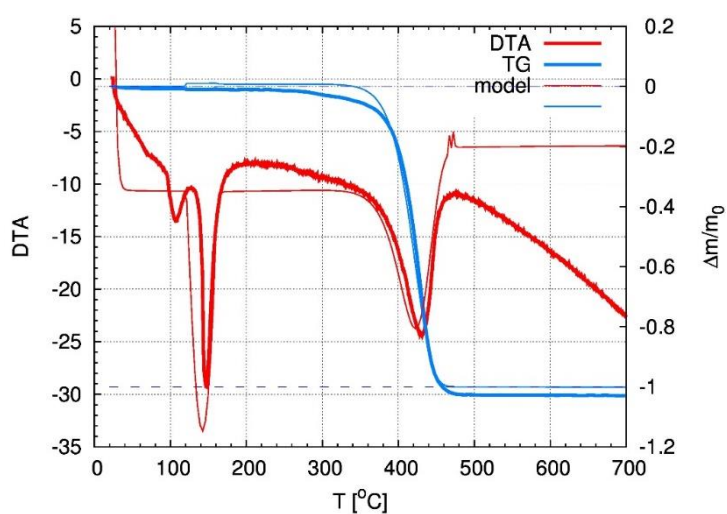


Abbildung 4.3.1-6: Anpassung an TG und DTA von reinem Licowax

Bauteilsimulationen

Anhand von Bauteilversuchen (vgl. 4.1.1.) können weitere Parameter des Modells, insbesondere die für die Transportvorgänge verantwortlichen, angepasst werden. Abbildung 4.3.1-7 zeigt die gemessenen Verläufe von Bauteil- und Ofentemperatur sowie die mit dem Modell berechneten Temperaturen an der Oberfläche und in der Mitte einer Kugel mit gleichem Volumen wie die im Versuch verwendeten ringförmigen Bauteile. Dabei wurden Standardwerte für den Konvektionskoeffizienten und die Emissivität verwendet und die Wärmeleitfähigkeit des porösen Presslings angepasst. Die gemessene Ofentemperatur schwankt um die vorgegebene Solltemperatur, und die Bauteiltemperaturen „ziehen nach“.

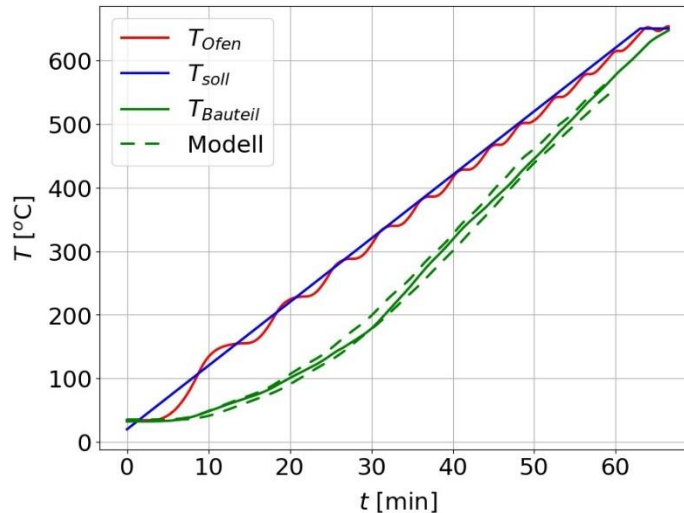


Abbildung 4.3.1-7: Temperaturverläufe für $\dot{T} = 10 \frac{K}{min}$

Anhand der Messungen aus 4.1.1. wurden weitere für den Transport verantwortliche Parameter angepasst. Mit diesen Parametern wurden die Massenverluste für verschiedene Heizraten berechnet. Für eine Heizrate von 10 K/min zeigt Abbildung 4.3.1-8 den gemessenen Massenverlust als Funktion der Solltemperatur im Ofen neben den mit dem Modell berechneten Verläufen, wobei der Massenverlust durch Verdampfen allein und der gesamte, also inklusive dem durch Austritt von flüssigem Wachs an die Oberfläche, separat abgebildet sind.

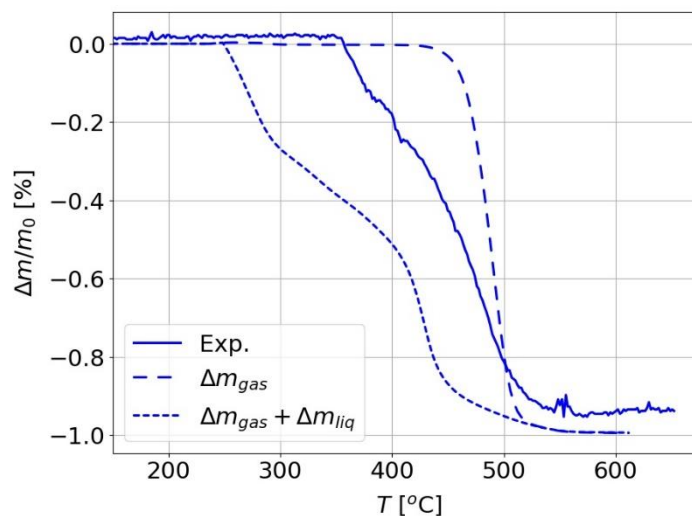
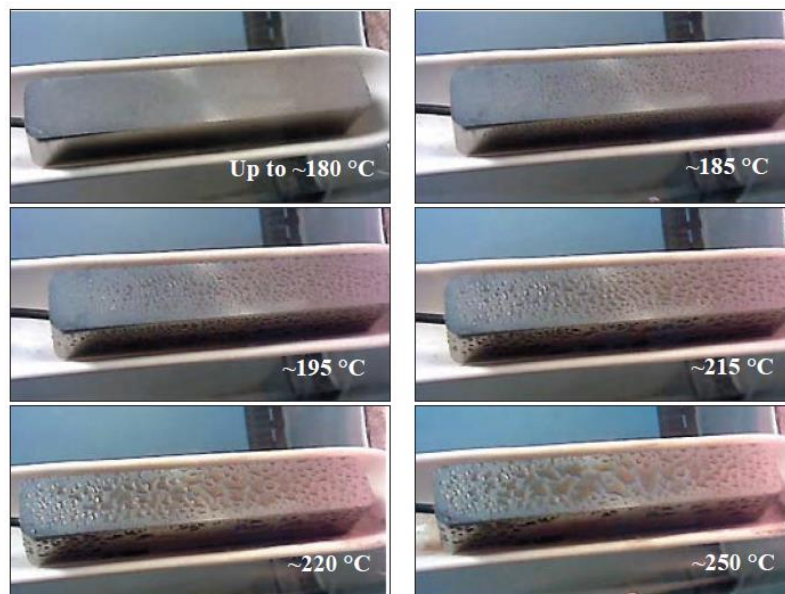


Abbildung 4.3.1-8: Massenverlust im Bauteilversuch für $\dot{T} = 10 \text{ K/min}$, Versuch (durchgezogen) und Modell (gestrichelt)

Es fällt auf, dass der Massenverlust im Versuch bei $T_{\text{soll}} = 350 \text{ °C}$ beginnt - zu einem Zeitpunkt, wo die Bauteiltemperatur gemäß Abbildung 4.3.1-7 erst bei etwa 210 °C liegt und eine Verdampfung daher noch nicht zu erwarten wäre (vgl. Messungen an reinem Wachs Abbildung 4.3.1-6). Der berechnete Massenverlust durch Verdampfen allein beginnt dagegen später und endet aber etwa wie der gemessene; dies ist konsistent, denn die zum Verdampfen erforderliche Temperatur wird im Bauteil erst viel später erreicht. Daneben zeigt der Verlauf, der den Austritt von flüssigem Wachs an die Oberfläche berücksichtigt, das qualitativ richtige Verhalten, beginnt allerdings verglichen mit der Messung zu früh. Bemerkenswert ist hier, dass der plötzliche Beginn und die Steigung aber richtig wiedergegeben werden. Der Beginn des Austritts wird im Modell maßgeblich durch den Wert der Porosität bei Porenabschluss bestimmt, bei der die Gaspermeabilität drastisch sinkt, und könnte noch besser mit den Experimenten in Übereinstimmung gebracht werden. Diese Beobachtungen legen jedenfalls nahe, dass ein signifikanter Teil der Entwachsung aufgrund des „Ausschwitzens“ von flüssigem Wachs erfolgt. Argumente hierfür findet man auch in der Literatur. Abbildung 4.3.1-9 zeigt eine aus Karamchedu⁴ entnommene Sequenz von Bildern eines Probekörpers bei der Wachsaustreibung, auf der die Tröpfchenbildung an der Oberfläche und insbesondere die Ansammlung von flüssigem Wachs in der Auffangschale zu sehen ist.

In Abbildung 4.3.1-10 sind die Verläufe des Massenverlusts für andere Heizraten in der gleichen Weise wie weiter oben dargestellt. Die dabei eintretenden Verschiebungen der Massenstufe zu höheren Temperaturen werden richtig vom Modell erfasst. Bei Messung und Modell bleibt die Breite des Soll-Temperaturbereichs, in dem der Masseverlust stattfindet, im Wesentlichen unverändert. Für die größere Heizrate wird dieser natürlich schneller durchlaufen.



⁴ S. Karamchedu: “Delubrication of Chromium Prealloyed Powder Metallurgy Steels”, Thesis, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University, Gothenburg, Sweden (2013)

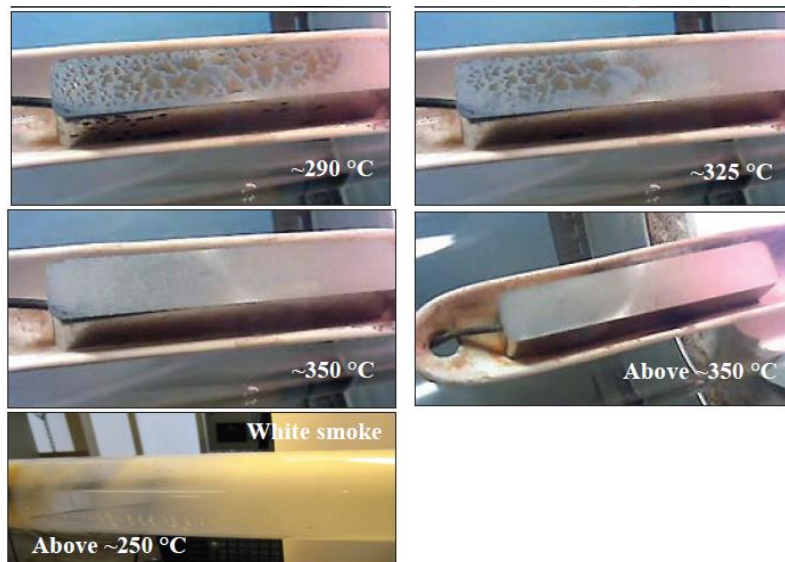


Abbildung 4.3.1-9: Bildsequenz aus Karamchedu⁴: Tröpfchenbildung und Wachsansammlung ab 250 °C

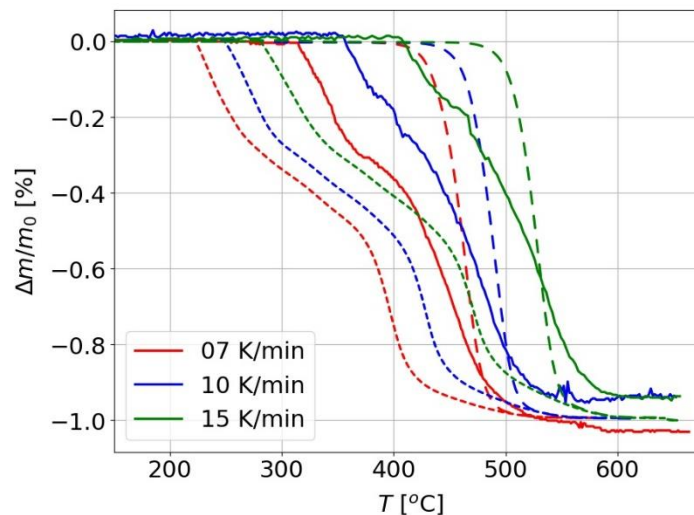


Abbildung 4.3.1-10: Massenverlust im Bauteilversuch für verschiedene Heizraten

4.3.2 Ofenmodell (HTCO)

Eine strömungsmechanische Simulation (Computational Fluid Dynamics, CFD) von Ofenatmosphären wird in der pulververarbeitenden Industrie bislang kaum zur detaillierten Untersuchung oder Auslegung von Sinteröfen eingesetzt. Allerdings kann nur eine solche Simulation, welche die verschiedenen im Ofen ablaufenden Prozesse (d.h. Entbindern, Sintern, Wärme- und Stofftransport bzw. Übertragung) miteinander verknüpft, essenzielle Erkenntnisse über die Temperatur- und Atmosphärenverteilung im Ofen liefern und damit die notwendigen Grundlagen für eine Prozessoptimierung schaffen.

Im ersten Schritt musste für den Sinterofen ein geometrisches CAD-Modell erstellt werden, welches dann als Grundlage für das zu erzeugende Simulationsmodell übernommen werden konnte. Da keine Konstruktionszeichnungen des Ofens verfügbar waren, mussten die geometrischen Maße recht aufwändig händisch (mittels Zollstocks und Fotos) ermittelt werden. Daraus wurde dann durch GKN ein erstes CAD-Modell erstellt (Abb. 4.3.2-1).

STAR-CCM+

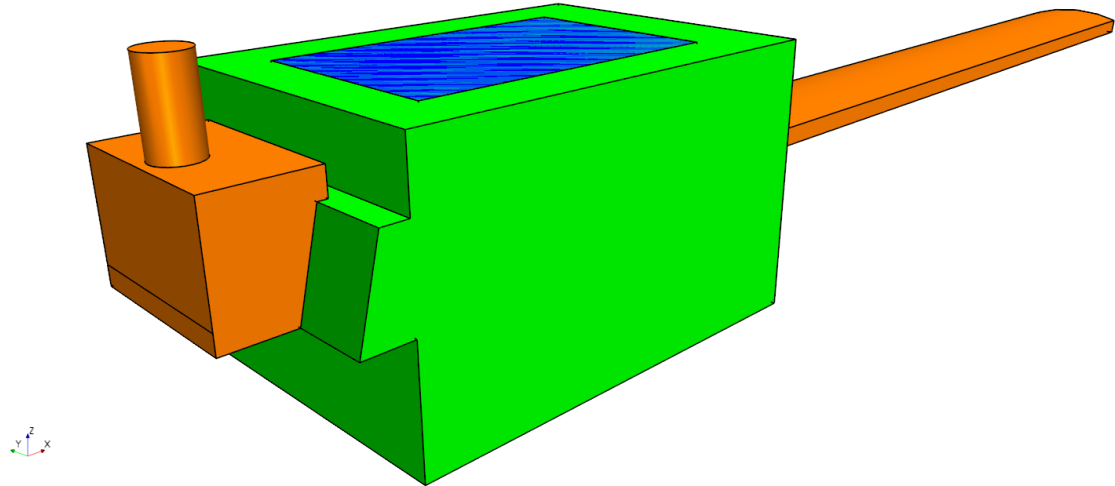


Abbildung 4.3.2-1: CAD-Modell des Sinterofens

Dieses CAD-Modell wurde dann dahingehend überarbeitet, dass daraus ein erstes Simulationsmodell des gesamten Sinterofens aufgebaut werden konnte. Hierzu musste es aufwendig an die Anforderungen der Simulationssoftware Star-CCM+ angepasst werden. Dazu gehört die Schließung kleinster Lücken zwischen den Bauteilen, Beseitigung von zu spitzen Winkeln und überlappenden Flächen.

Um zuverlässige Ergebnisse der Simulation zu erhalten war eine Erweiterung des Modells notwendig, die die Umgebung am Ofeneingang teilweise mit einbezieht. So wird eine realistische Interaktion der Innen- und Außenströmung gewährleistet (Abb. 4.3.2-2).

Simcenter STAR-CCM+

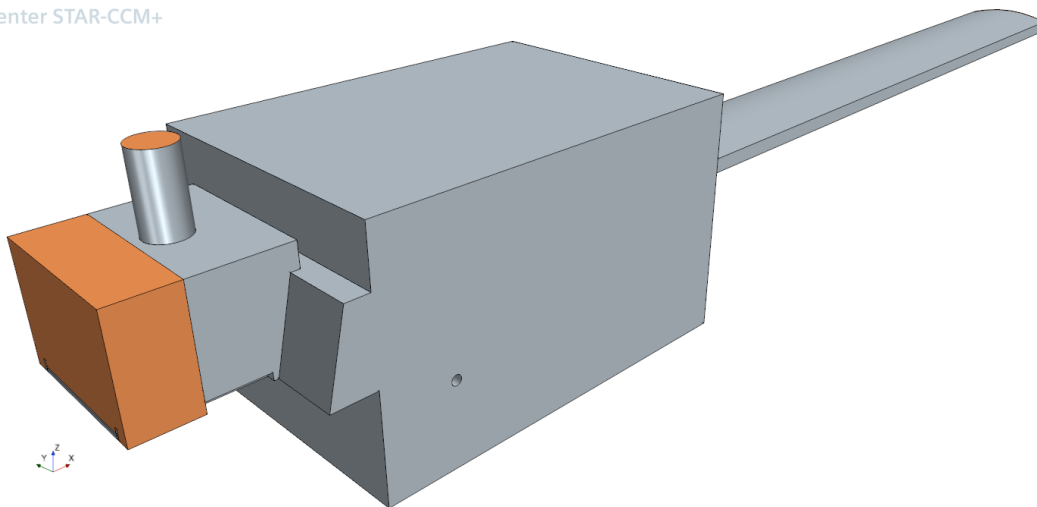


Abbildung 4.3.2-2: Erstes Ofenmodell - erweitert

Um qualitativ hochwertige Simulationen durchführen zu können, muss das Modell entsprechend vernetzt werden. Hierzu wurde ein Polyedernetz gewählt, dass an den Wänden zwei Prismenschichten generiert. Polyeder gewährleisten durch ihre unregelmäßige Struktur und vielen Flächen die beste Interpolation der physikalischen Größen in alle Richtungen. Das ist bei einem regelmäßigem Hexaedernetz nicht so, da die Flächen nur in drei Richtungen zeigen. Die Prismenschichten sorgen wiederum für eine gute Abbildung der Haftreibung. Die Netzqualität hängt jedoch auch wesentlich von der gewählten Feinheit ab. Die Basisgröße für eine Zelle wurde so gewählt, dass engräumige Grenzschichten abgebildet werden können, aber der Rechenaufwand überschaubar bleibt. Die war eine große Herausforderung, da die zahlreichen geplanten Simulationen mit einem überdimensionierten Netz zu viel Rechenzeit in Anspruch nehmen würden. Schließlich wurde eine Methode erarbeitet, die das Modell hinreichend gut vernetzt (Abb. 4.3.2-3). Hierzu wurden simulationstechnisch robuste Bereiche gröber, sensitive Bereiche umso feiner vernetzt.

Simcenter STAR-CCM+

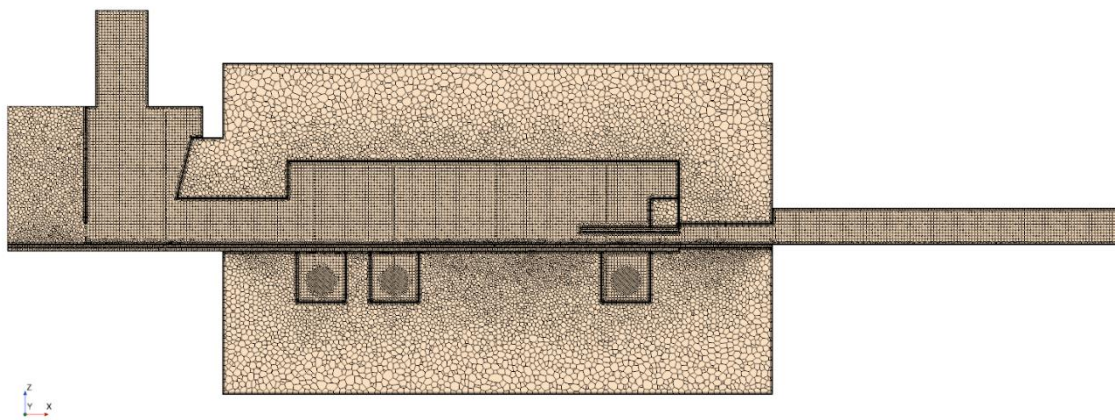


Abbildung 4.3.2-3: Ebene längs durch die Mitte des vernetzten Modells

Anschließend war eine Definition der benötigten Physik erforderlich. Das Simulationsmodell beinhaltet Luft, sowie Festkörper mit jeweils sehr verschiedenen Eigenschaften. Für das Luft-Kontinuum wurde ein ideales Gas und das realisierbare k-Epsilon-Turbulenzmodell gewählt. Dies ist die bewährteste und am besten quantifizierte aller Lösungsannäherungen, die mit den meisten strömungstechnischen Anforderungen gut zurechtkommt. Das war in dem Ofenmodell besonders wichtig, da das Strömungsverhalten unbekannt und schwer einzuschätzen war bzw. ist. Gerechnet wurde mit dem Segregated Solver, der die Gleichungen für alle physikalischen Größen getrennt voneinander löst. Diese Methode ist zwar anfälliger für kritische Initialbedingungen, beansprucht jedoch weniger Rechenkapazitäten. Da Druck und Geschwindigkeitsunterschiede zu Rechenbeginn jedoch gering waren, fiel die Wahl auf ihn und war auch von den Ergebnissen gerechtfertigt.

Für die Festkörper-Kontinua wurde eine konstante Dichte gewählt und auch mit dem Segregated Solver gerechnet. Dies war ohne weiters möglich, da eine Ausdehnung des Festkörpers aufgrund der Temperatur hier nicht maßgeblich war. Die verschiedenen Festkörper-Kontinua für Grünlinge, Stahl, Isolation usw. unterschieden sich nur durch die Materialeigenschaften der repräsentierten Körper.

Auf eine Integration der Strahlung in das Modell wurde verzichtet, da das Ziel eine transiente Simulation mit bewegten Bauteilen, den Grünlingen, ist. Bei einer Simulation mit Strahlung, werden View-Faktoren berechnet, die die Interaktion aller im Modell befindlichen Flächen

repräsentieren; dies ist äußerst zeitintensiv. Im Falle von Bewegung müssten die View-Faktoren nach jedem Zeitschritt, in dem sich die Bauteile weiterbewegen, neu berechnet werden. Eine Simulation, die zeitlich nicht den Rahmen sprengt, wäre so unmöglich.

Einen weiteren kritischen Punkt bildet die Flamme des Brenners, mit dem der Ofen beheizt wird. Die Ausdehnung des Gases beim Verbrennen, sowie die Strahlung der Flamme, die die Wände direkt erwärmt, sind wesentliche Einflussfaktoren. Aufgrund fehlender Daten zur Flamme und der Sensitivität gegenüber kleinen Parameteränderungen wurde entschieden eine vereinfachte Berücksichtigung zu verwenden. Der Ofen wird in der Simulation durch heiße Luft erwärmt, die anstelle der Flamme mit einer hohen Geschwindigkeit aus den Brennern austritt. Auf diese Weise sollten die korrekte Luftmenge und Temperatur gewährleistet werden.

In ersten Durchläufen hat sich jedoch gezeigt, dass der Kamin in der Simulation nicht richtig zieht. Die vorgenommene Erweiterung der Umgebung am Ofeneingang wurde somit nochmals vergrößert (Abb. 4.3.2-4) und der Kamin auf die realen Maße verlängert (Abb. 4.3.2-5). Die Strömung stellt sich in der Simulation aufgrund von Temperaturen und Drücken von selbst ein. Der Druckunterschied zwischen Ofen und Kaminaustritt musste somit stimmig sein, was nur möglich ist, wenn der Kamin die realen Ausmaße hat – ein niedriger Kamin zieht weniger als ein hoher. Die Sinterzone erwies sich als nicht relevant für die geplanten Untersuchungen und wurde aus dem Modell entfernt.

Simcenter STAR-CCM+

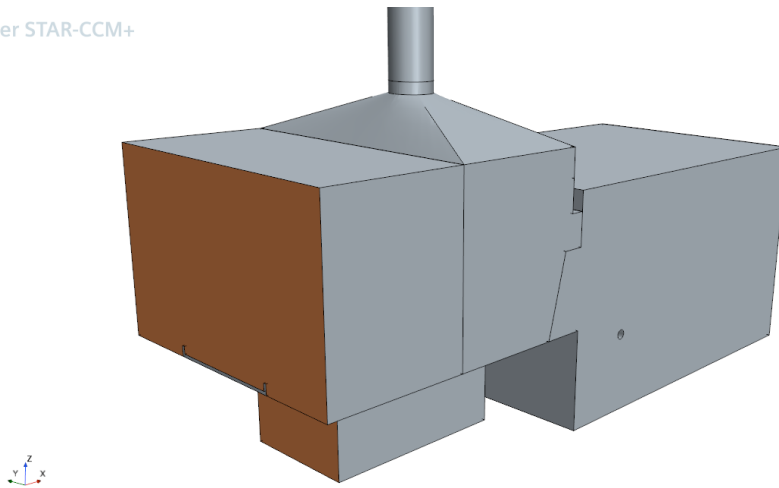


Abbildung 4.3.2-4: Ofenmodell 2 – Erneut modifizierte Umgebung am Ofeneingang

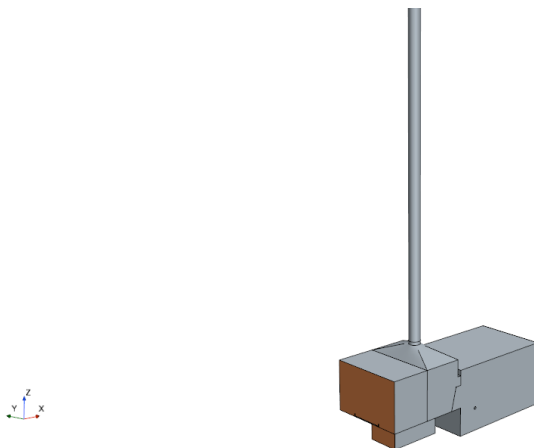


Abbildung 4.3.2-5: Ofenmodell 2 - Verlängerter Kamin

4.3.3 Kopplung Bauteilmodell mit Ofenmodell (IWM, HTCO)

Mit den Ergebnissen aus 4.3.1 und 4.3.2 kann nun berechnet werden, wie der Abbau des Waxes im eigentlichen Prozess abläuft, d.h. wann bzw. wo und wie viel Gas im Ofen aus den Bauteilen austritt. Hierfür wurde unter Verwendung der in Abschnitt 4.3.1 bestimmten Oberflächen-Transportkoeffizienten vereinfachend eine äußere Temperatur so angenommen, dass die im Ofen gemessenen Temperaturverläufe (vgl. 4.2) wiedergegeben werden. Abbildung 4.3.3-1 zeigt das Ergebnis dieser Anpassung. Die Ofentemperatur steigt zu Beginn, bei Einfahrt in den Ofen, stark an, danach weniger stark und liegt um die 700 °C. Die Anpassung bezieht sich auf den Fall der Teilbeladung, bei dem nur eine Lage Bauteile betrachtet wurde.

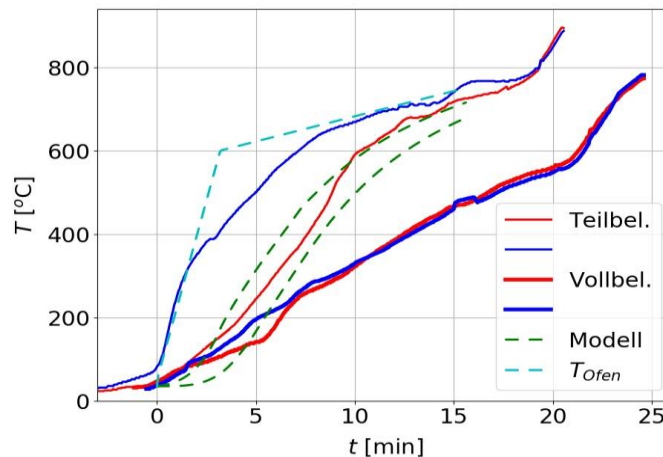


Abbildung 4.3.3-1: Temperaturen in Bauteil und Ofen in Experiment (durchgezogen) und Modell (gestrichelt). Rote Kurven sind die Bauteile links, blaue die rechts, dargestellt sind Teil- und Vollbeladung

Mit dieser Anpassung wiederum ergeben sich die Massenströme infolge des Entwachsens als Modellantwort auf die Temperaturgeschichte. Sie sind in Abbildung 4.3.3-2 dargestellt, wobei die Zeit mit der Bandgeschwindigkeit in eine Position im Ofen umgerechnet wurde. Zur Verdeutlichung der Position ist im Hintergrund die Geometrie des Ofens u.a. mit der Lage der Brenner dargestellt. Die Farbkonturen sind dabei unerheblich. Gezeigt ist hier insbesondere der in 4.3.1 angesprochene Austritt von flüssigem Wachs an die Oberfläche (j_{liq}), der sehr früh nach der Einfahrt in den Ofen auftritt und für die Frage nach dem Verbleib des Waxes und seiner Nutzarmachung wichtig ist. Zunächst wurden für die Kopplung mit dem Ofenmodell aber nur die Gasströme berücksichtigt.

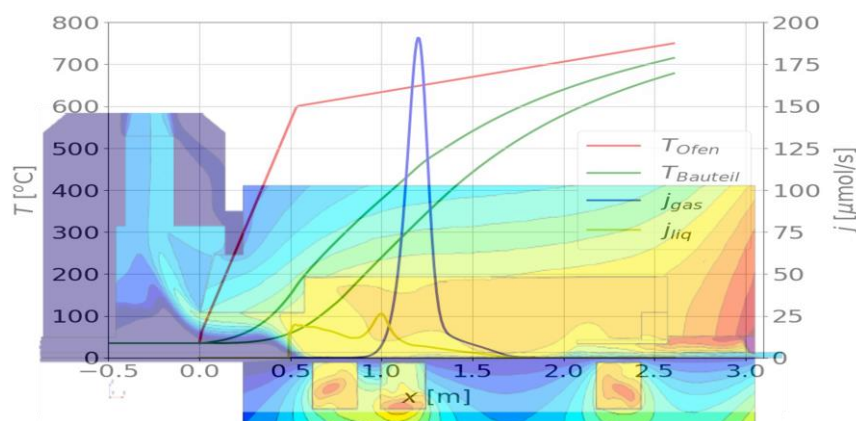


Abbildung 4.3.3-2: Beispielhafte Temperaturentwicklung und Massenströme infolge des Entwachsens über der Ofenposition

Nachdem das Ofenmodell fertig gestellt war und erste Rechnungen problemlos verliefen (s. Abschnitt 4.3.2), wurden die Bauteile modelliert und in den Ofen integriert (Abb. 4.3.3-3 und 4.3.3-4). Zuerst sollten stationäre Simulationen durchgeführt werden, bei denen sich die Bauteile nicht bewegen, sondern im Ofen an der gleichen Stelle verharren. Ziel war es, zu untersuchen, welchen Einfluss die Geometrie der Bauteile auf die Strömung im Ofeninneren hat, und wie die Luft zwischen den Bauteilen strömt. Da die Bandgeschwindigkeit sehr niedrig ist, konnte davon ausgegangen werden, dass die Bewegung der Bauteile für die Strömung zwischen ihnen (direkt am Band) vernachlässigbar ist.

Simcenter STAR-CCM+

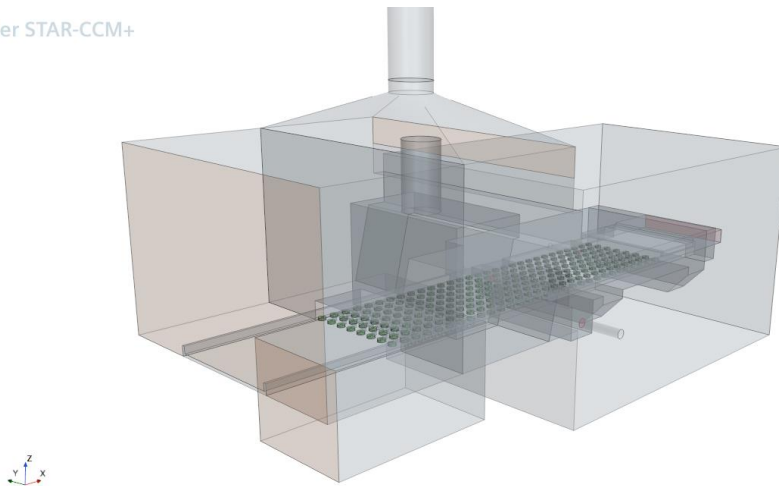


Abbildung 4.3.3-3: Geometrie Bauteilmodell 1

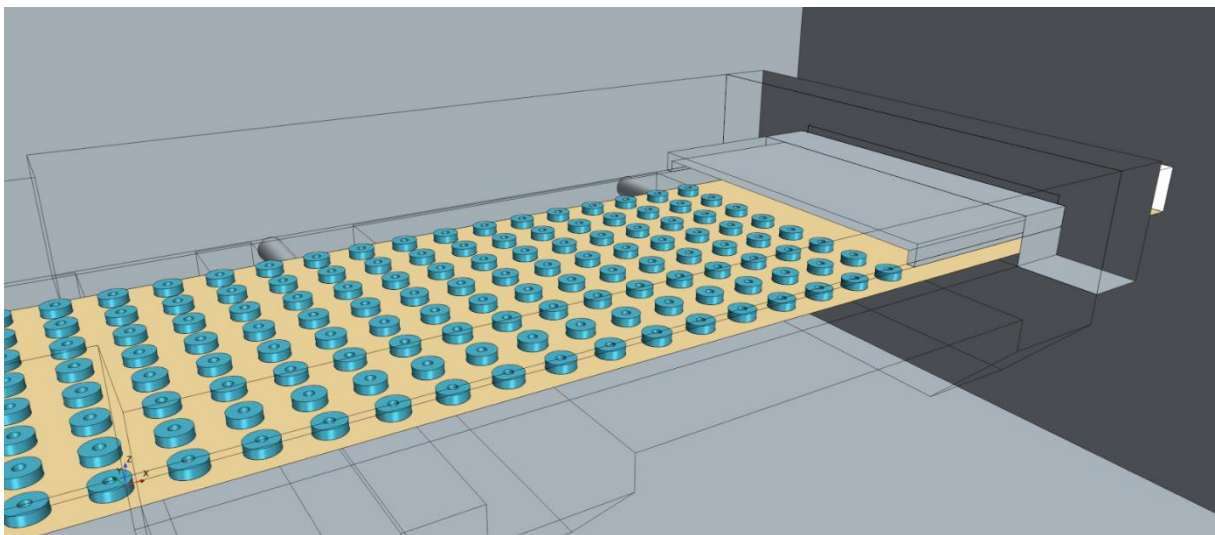


Abbildung 4.3.3-4: Bauteile im Detail

Die Integration der Bauteile in das Modell erforderte eine nicht nur neue, sondern im Bereich der Bauteile verfeinerte Vernetzung (Abb. 4.3.3-5). Dies war notwendig, da nur so die Strömungen zwischen den Bauteilen sichtbar gemacht werden können. Die lokale Verfeinerung bedeutete jedoch ein größeres Netz, das wiederum die Simulation verlängert. Um das in Grenzen zu halten, wurde versucht, das Netz so fein wie nötig, aber so grob wie möglich zu machen. Dies war arbeitsintensiv, sparte aber im Endeffekt Simulationszeit ein.

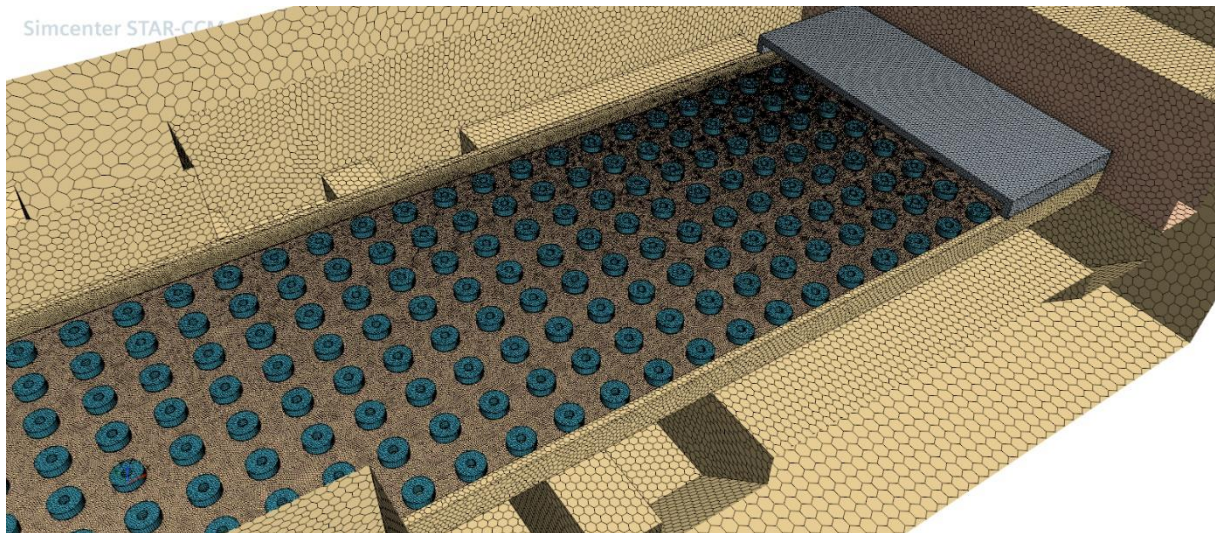


Abbildung 4.3.2-5: vernetztes Bauteilmodell

Für die transiente Rechnung musste ein anderes Konzept erarbeitet werden. Sowohl Modell als auch Vernetzung mussten modifiziert werden. Der Vorgang einer fortlaufenden Bewegung, bei dem stetig neue Bauteile in den Ofen kommen, ist in einer Simulation mit STAR CCM+ nicht möglich. Folglich wurde beschlossen nur eine Ladung in den zunächst leeren Ofen einfahren zu lassen und zu untersuchen, wie heiß die Teile werden und welche Strömung sich ausbildet. Dazu wurde in dem Modell nochmal die Umgebung vor dem Ofen erweitert und die Bauteile auf einer Art Schublade platziert, die in den Ofen hineingeschoben wurde (Abb. 4.3.3-6). In diesem Bereich musste das Modell auch auf eine andere Art vernetzt werden – mit dem Overset-Mesh. Hierbei werden der Ofen und die Bauteile separat voneinander vernetzt und die Netze übereinandergelegt. Dabei ist es wichtig, dass sich eine bestimmte Anzahl an Zellen überlappen, was eine sehr feine Vernetzung nötig macht. Das macht das Modell deutlich größer, wobei Speicherbedarf und Rechenzeit beträchtlich steigen.

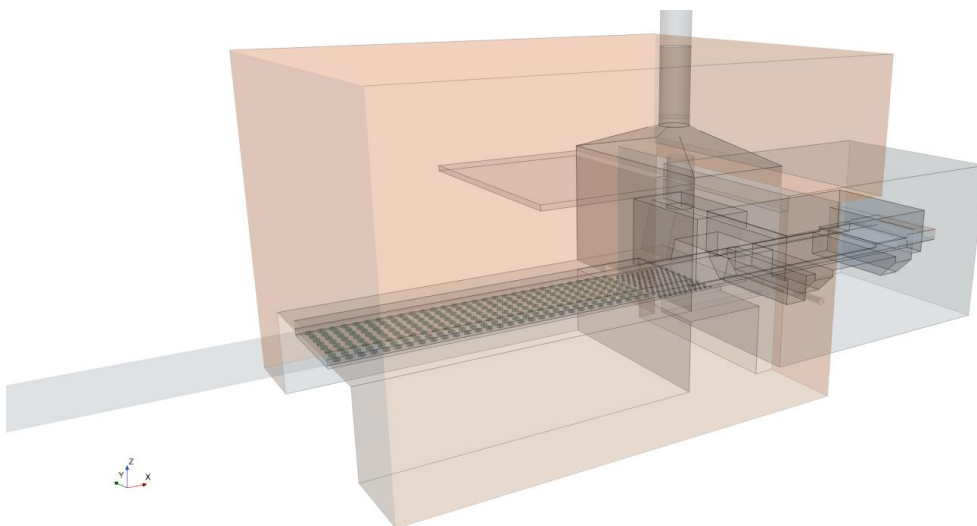


Abbildung 4.3.2-6: Bauteilmodell 2 – für transiente Rechnung

4.4 Simulation Temperaturverteilung und Gasströmung (HTCO)

4.4.1 Simulation leerer Ofen (HTCO)

Die ersten Berechnungen ohne Bauteile wurden mit dem Ofenmodell 2 durchgeführt. Hier sollte ausschließlich die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung analysiert werden. Auch ohne Bauteile war dies sinnvoll, da vorab geprüft werden konnte, ob die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung einigermaßen gleichmäßig ist, und welchen Stellen im Ofen für weitere Messungen infrage kommen. Bei ungleichmäßigen Verteilungen kann es auf kleinstem Raum große Unterschiede in den gemessenen Werten geben.

Zudem dienen die Simulationen der Validierung, einer Grundvoraussetzung, um ein wesentliches Ziel des Projekts zu erreichen – der Optimierung des Sinterofens, die gleichbedeutend mit der Optimierung der Strömung ist. Zur Validierung wurden die Messdaten zum leeren Ofen verwendet, die in einer sehr aufwändigen Messkampagne im Herbst 2019 ermittelt wurden (Abb. 4.4.1-1). Hierbei wurde auch der leere Ofen, also ohne zu sinternde Bauteile, vermessen, sodass dafür nun reine Ofendaten verfügbar waren, mit denen eine Validierung der Simulationen für den ebenfalls leeren Ofen im laufenden Projektabschnitt durchgeführt werden konnte.

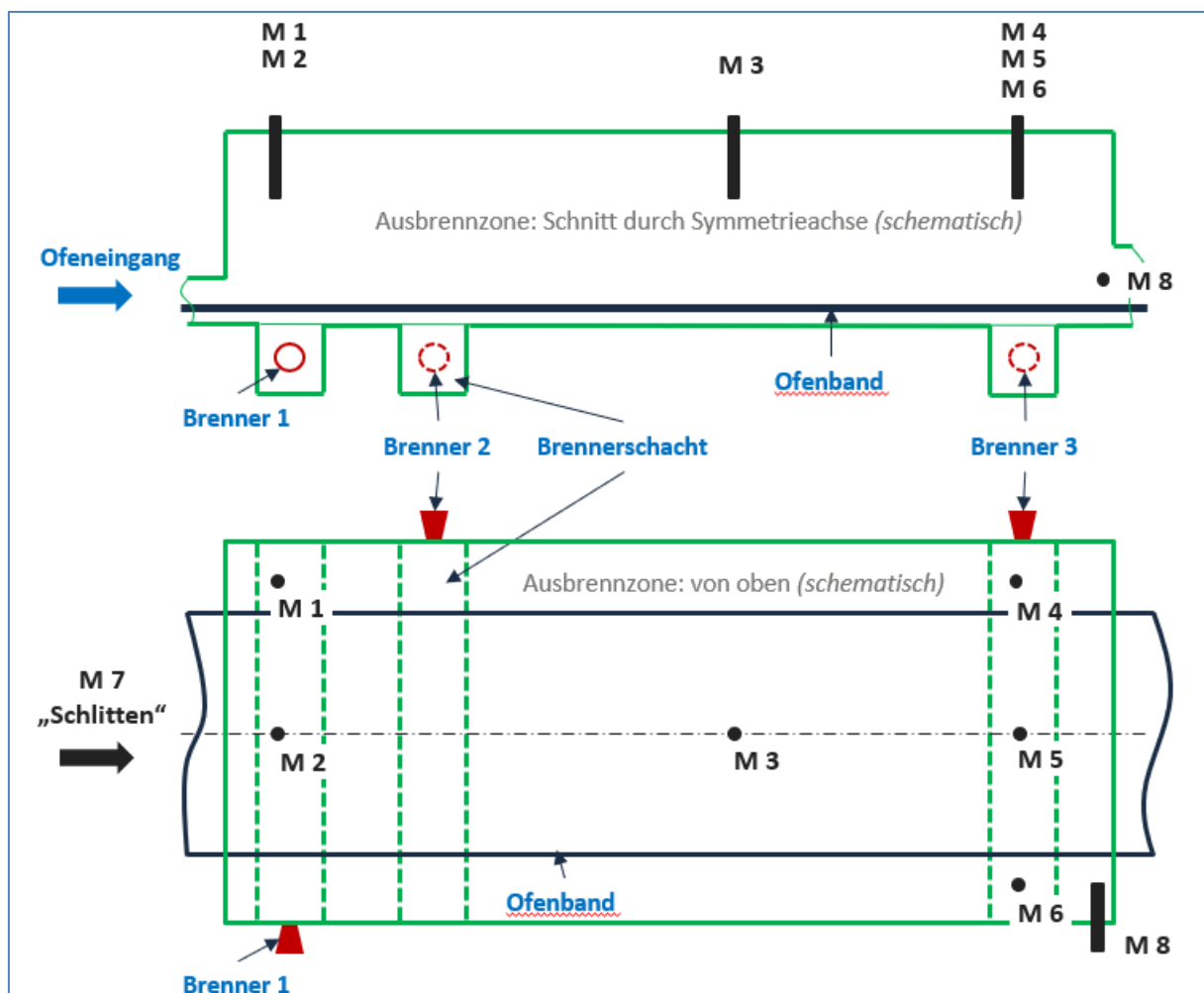


Abbildung 4.4.1-1: Positionen der Messstellen im Ofen

Bei der Auswertung der Daten für die lokalen Drücke, die mit Prandlrohren durchgeführt und zur Bestimmung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten gedacht waren, wurde allerdings im Nachhinein festgestellt, dass bei der durchgeführten Art der Messung nur der Betrag der Geschwindigkeiten ermittelt werden kann, nicht aber die Richtung der Strömung. Auf letztere kann daher nur mit Hilfe der Simulation geschlossen werden.

Es hat sich – wie erwartet – herausgestellt, dass weder Geschwindigkeits- noch Temperaturverteilung gleichmäßig sind. Daraus wurde gefolgert, dass weitere Variantenrechnungen schon zu diesem Zeitpunkt notwendig sind, um diese ungleichmäßigen Verteilungen in den Griff zu bekommen – d.h. zu homogenisieren.

Hierbei wurden verschiedene Randbedingungen für die Simulationen variiert, u. a. die Menge an Schutzgasrückströmung aus der Sinterzone und die Randbedingungen (Einstellungen) der Brenner. Dabei wurde beobachtet, dass vor allem die Einstellung der Brenner, die ja a priori auch nicht bekannt waren, eine entscheidende Rolle spielen. Es wurden mehrere solcher Variationen zur Kalibrierung des Modells iterativ durchgeführt, bis eine sehr gute Übereinstimmung der Messdaten mit den äquivalenten Simulationsergebnissen erreicht werden konnte. Den Vergleich der Messdaten mit den Simulationsergebnissen bei unterschiedlichen Randbedingungen ist in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 4.4.1-1: Vergleich der Messdaten mit den Simulationsergebnissen bei unterschiedlichen Randbedingungen

		M1	M2	M3	M4	M5	M6
EFS Var. 01							
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		669,4	665,3	664,1	663,1	669,8	670,1
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37455	0,37612	0,37664	0,37708	0,37433	0,37425
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		7,89834	0,80510	5,49365	2,57168	0,74970	5,93638
EFS Var. 02 (Sinterzone zu)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		669,9	664,6	663,1	670,2	665,2	673,3
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37433	0,37641	0,37707	0,37419	0,37624	0,37295
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		6,87402	0,58709	1,66547	4,23154	1,12297	7,90135
EFS Var. 03 (Sinter 10 m/s, Brenner 20 m/s)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6

Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		879,4	870,9	758,0	736,9	763,1	762,5
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,30628	0,30856	0,34234	0,34947	0,34065	0,34084
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		3,34438	0,60620	1,90875	1,10756	0,85199	2,00471
EFS Var. 04 (Sinter 0,1 m/s, Brenner 15 m/s, Abdeckung 0,2 W/m²-K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		591,9	606,2	639,3	640,7	652,6	654,7
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,40813	0,40143	0,38689	0,38626	0,38132	0,38048
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,62458	0,52855	0,70693	0,54116	0,13179	1,61766
EFS Var. 05 (Sinter 0,05 m/s, Brenner 10 m/s, Abdeckung 0,2 W/m²-K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		508,8	548,6	593,6	614,1	611,6	622,0
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,45144	0,42957	0,40730	0,39788	0,39896	0,39441
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		0,66189	0,44578	0,47519	0,42507	0,10752	1,13917
EFS Var. 06 (Sinter 0,1 m/s, Brenner 12,5 m/s, 800°C, Abdeckung 0,2 W/m²-K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		683,6	667,7	690,1	699,2	692,2	708,2
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,36896	0,37520	0,36645	0,36305	0,36563	0,35972
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,17946	0,48157	0,39151	0,87267	0,06373	1,14532
EFS Var. 07 (Sinter 0,15 m/s, Brenner 12 m/s, 750-850 °C, Abdeckung 0,2 W/m²-K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2

Temp. (Simulation)		673,4	676,6	736,9	741,5	746,9	750,3
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37295	0,37167	0,34950	0,34790	0,34607	0,34493
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,07753	0,50209	0,45806	0,68967	0,09060	1,28430

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, führen die Einstellungen der Randbedingungen bei Variante 7 zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen somit den mit den Messwerten kalibrierten Zustand des Sinterofens im Leerlauf.

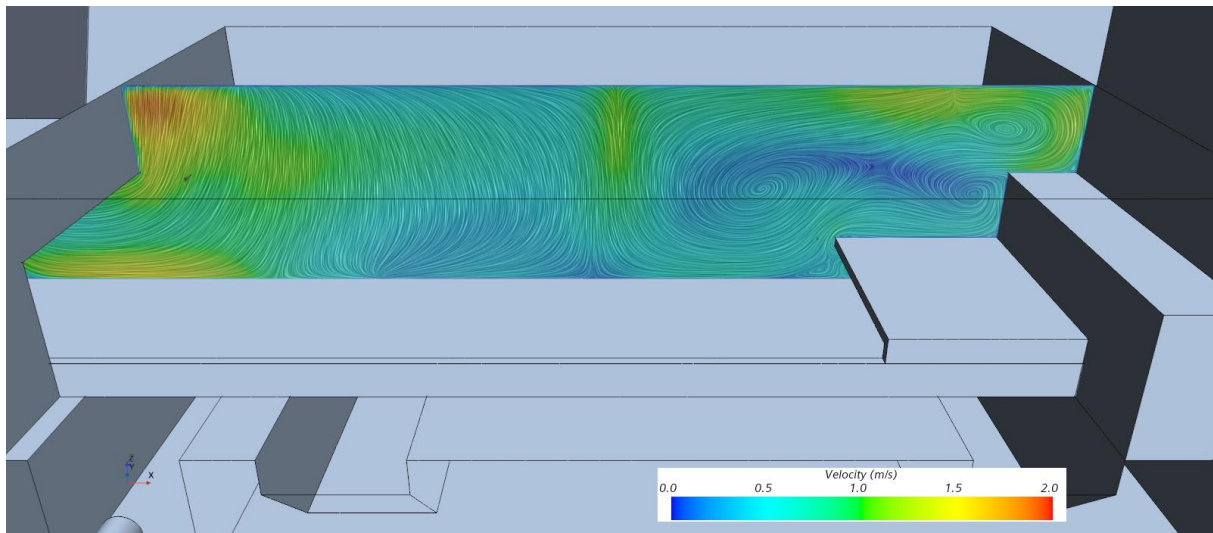


Abbildung 4.4.1-2: Strömungsgeschwindigkeiten im Ofen (mittiger senkrechter Schnitt)

Wie schon bei den bisherigen Simulationen zeigt sich auch im ‚kalibrierten‘ Fall ein sehr inhomogenes Geschwindigkeitsfeld mit großen gegenläufigen Wirbeln im Innern des Ofens (Abb. 4.4.1-2). Dies verdeutlicht sich nochmals in einem horizontalen Schnitt auf Höhe der später sich im Ofen befindlichen Bauteile (Abb. 4.4.1-3).

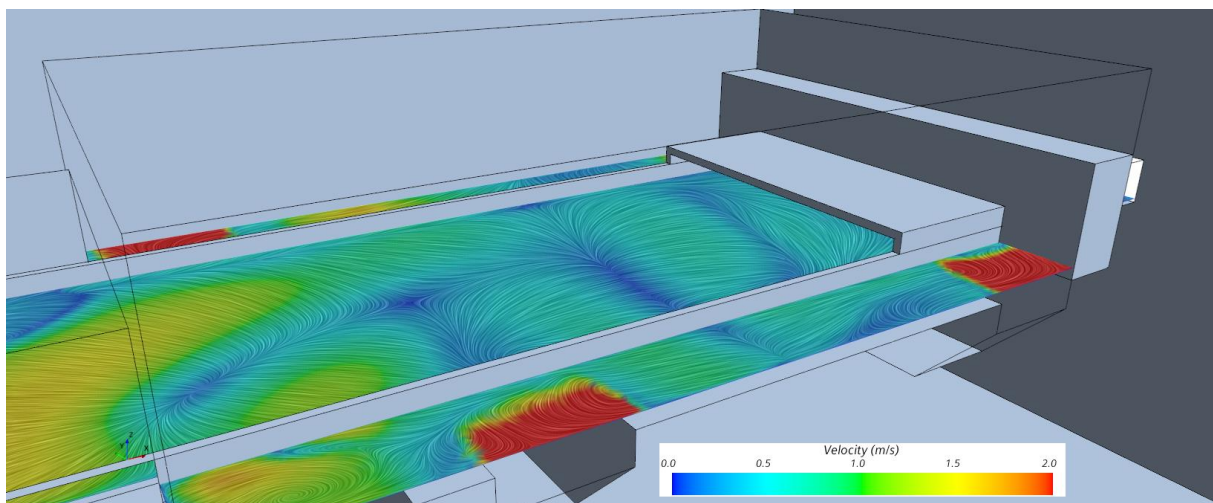


Abbildung 4.4.1-3: Strömungsgeschwindigkeiten auf Höhe der späteren Bauteile

Diese inhomogene Geschwindigkeitsverteilung hat wiederum gravierende Auswirkung auf die Temperaturen der Bauteile (Abb. 4.4.1-4). Es treten erhebliche Temperaturunterschiede nicht nur im Ofen an sich auf, sondern insbesondere auch auf Höhe der später sich im Ofen befindlichen Bauteile, sodass der Sinterprozess im Ofen nicht gleichmäßig ablaufen kann. Dies ist kontraproduktiv für einen effizienten, optimierten und genau kontrollierbaren Sinterprozess.

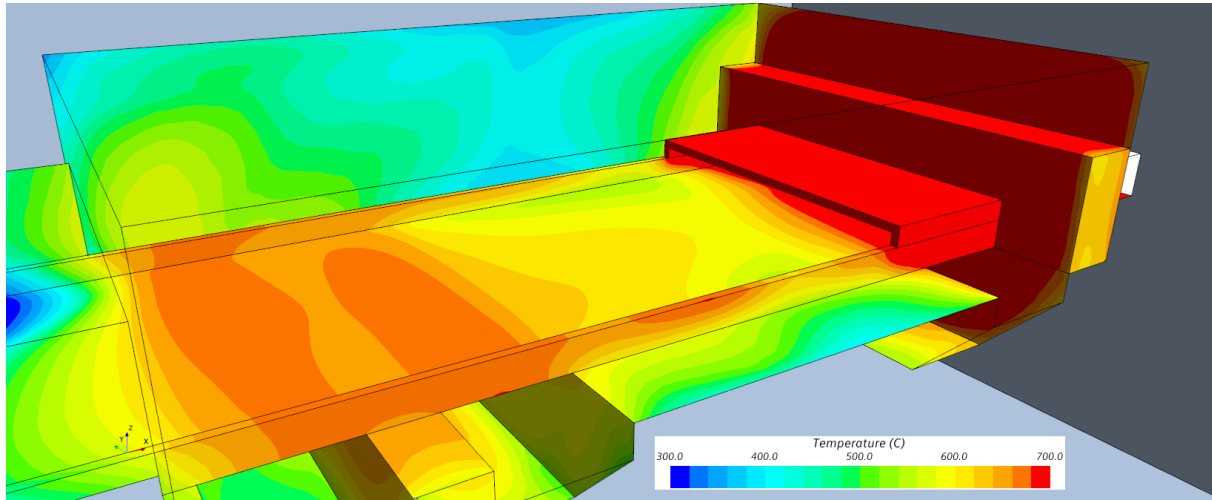


Abbildung 4.4.1-4: Temperaturverteilung auf Höhe der späteren Bauteile im Ofen

Die durchgeführten Simulationen zeigten somit, dass die Strömung und daraus folgend die Temperaturen in der gegenwärtigen Ofenausgestaltung sehr asymmetrisch waren, was sowohl für den Energieverbrauch als auch die Bauteilqualität ungünstig ist. Daher wurde auf Grundlage der Erfahrungen von GKN und HTCO begonnen erste geometrische Anpassungen vorzunehmen. Ziel war es, die Auswirkungen solcher Modifikationen vorab mittels Simulationen zu untersuchen.

Als erste Optimierungsmaßnahme hierzu wurde die Ausbrennzone verkleinert, indem der Deckel der Zone nach unten verschoben wurde (Abb. 4.4.1-5). Die Daten für diese Variante 9 sind in Tabelle 4.4.2-1 angegeben. Doch auch bei erniedrigte Ausbrennzone blieb die Asymmetrie im Ofen bestehen, was auf den Abbildungen 4.4.1-6 bis 4.4.1-8 zu sehen ist.

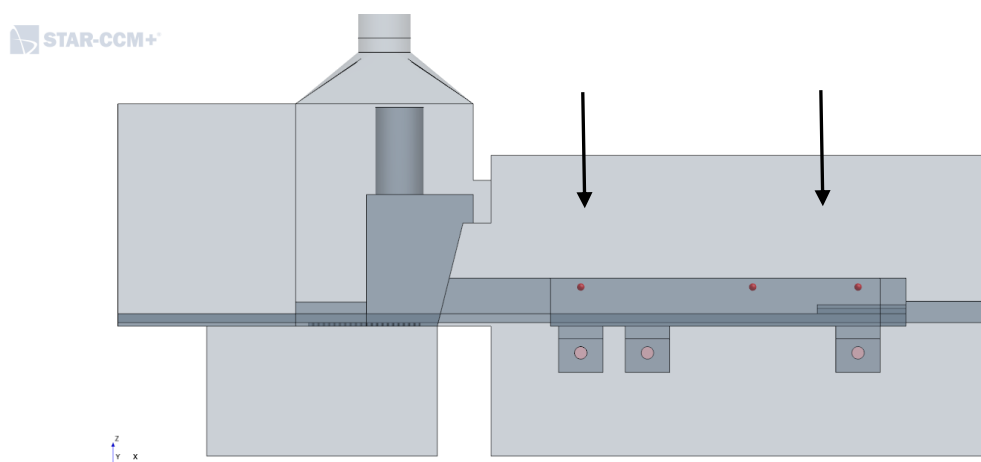


Abbildung 4.4.1-5: Modifizierte Geometrie mit reduzierter Höhe der Ausbrennzone

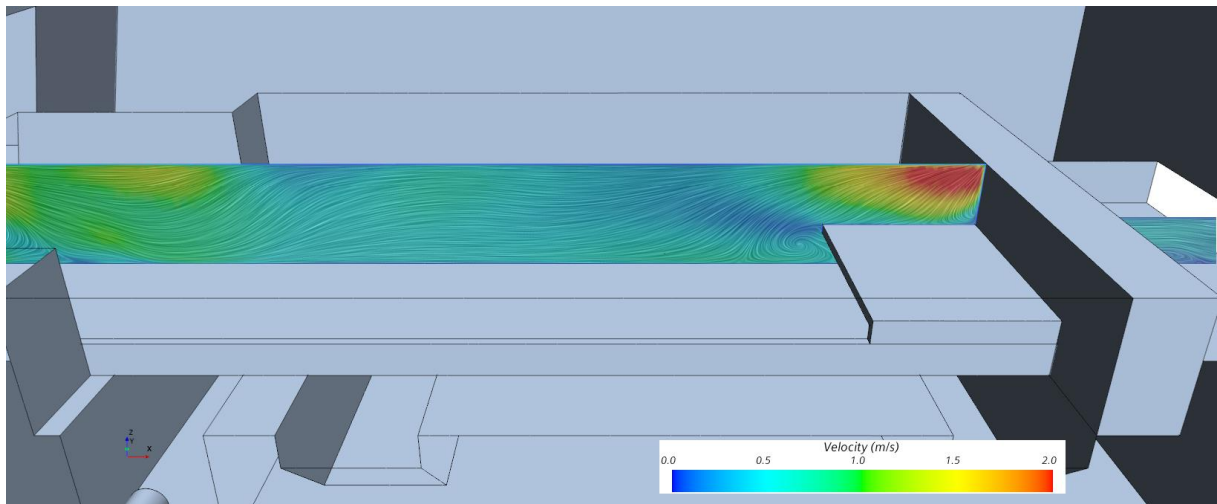


Abbildung 4.4.1-6: Geschwindigkeiten mittig im Ofen

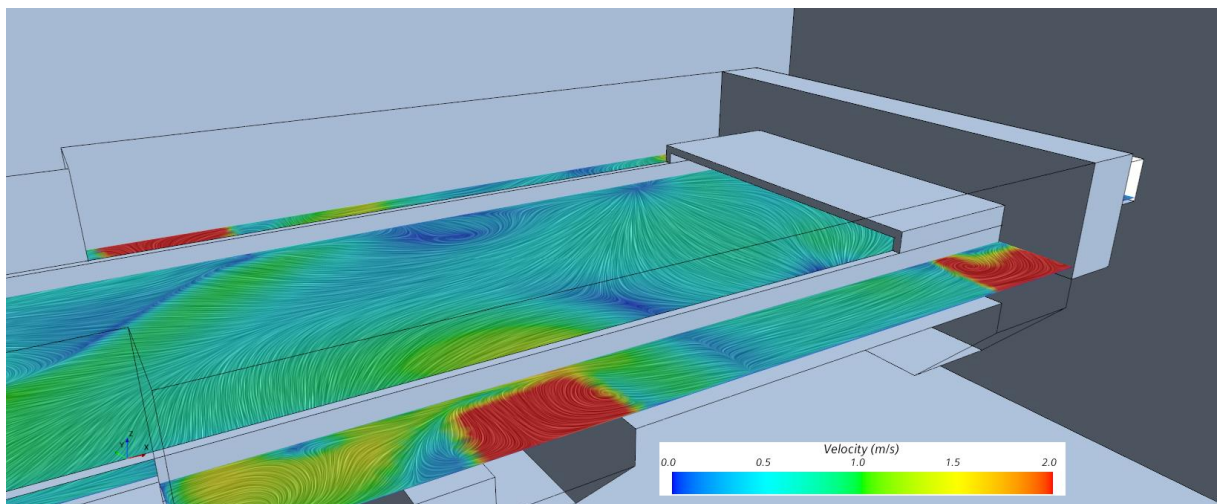


Abbildung 4.4.1-7: Geschwindigkeiten knapp über Bandhöhe

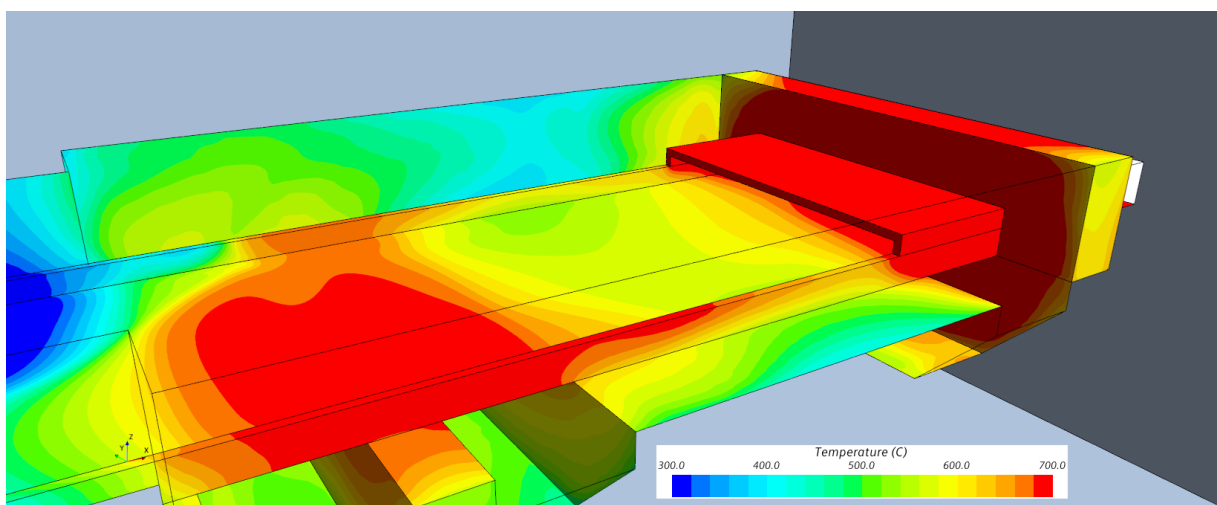


Abbildung 4.4.1-8: Temperaturen knapp über Bandhöhe

4.4.2 Simulation mit Beladung (HTCO)

Um einen direkten Vergleich zur Simulation ohne Beladung zu haben, wurde beschlossen zunächst eine stationäre Simulation mit Beladung durchzuführen. Diese Simulation soll nur den Einfluss der Bauteilgeometrie auf die Strömung zeigen. Um die dynamischen Prozesse der bewegten Bauteile darzustellen, eignet sie sich zwar nicht, aber es wurde erwartet die Strömung zwischen ihnen und deren Einfluss auf die unmittelbare Umgebung zu verstehen. Hierzu wurde die zuletzt gerechnete Variante 9 (siehe Tabelle 4.4.2-1) gewählt.

In den Abbildungen 4.4.2-1 bis 4.4.2-3 ist zu sehen, dass die Bauteile die Strömung über dem Band stark beeinflussen, die Temperaturen jedoch kaum. In der nachfolgenden Tabelle 4.4.2-1 werden die Ergebnisse nochmal quantitativ verglichen.

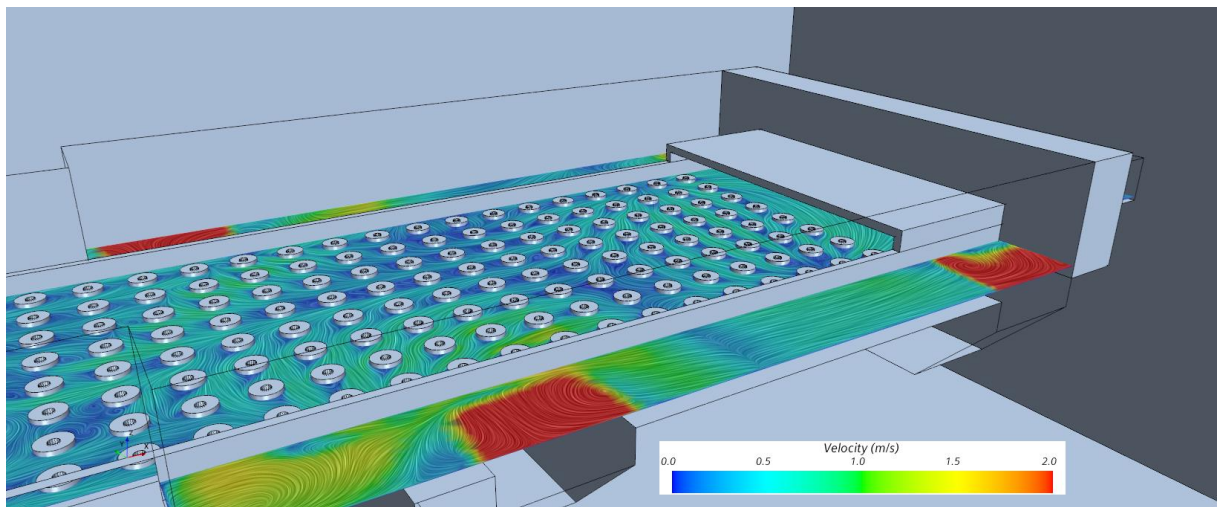


Abbildung 4.4.2-2: Geschwindigkeiten knapp über dem Band

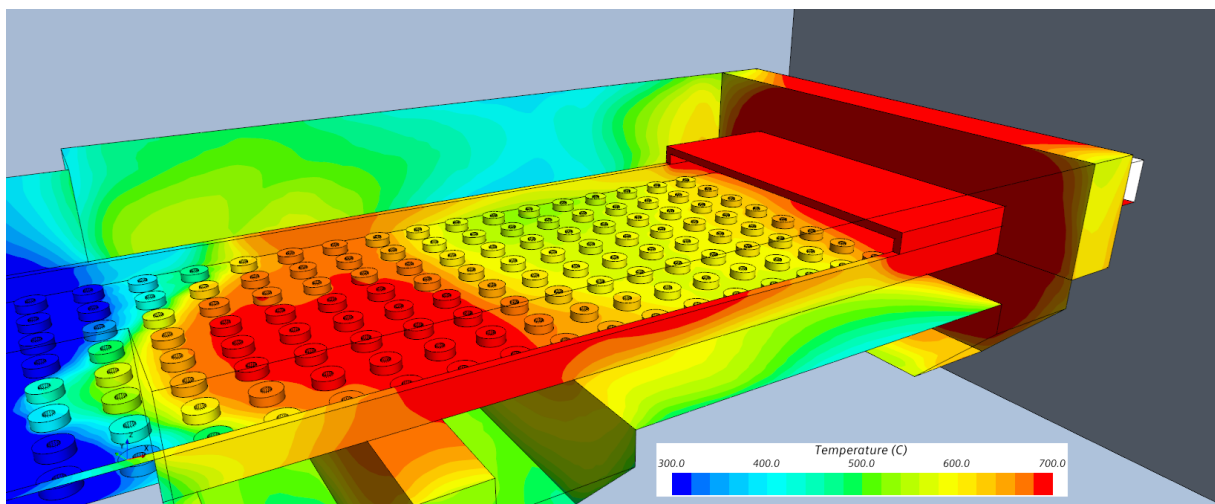


Abbildung 4.4.2-3: Temperaturen im Ofen

Tabelle 4.4.2-1: Vergleich der Messdaten der Simulationen 7 und 9

EFS Var. 07 (Sinter 0,15 m/s, Brenner 12 m/s, 750-850 °C, Abdeckung 0,2 W/m ² -K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		673,4	676,6	736,9	741,5	746,9	750,3
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m ³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37295	0,37167	0,34950	0,34790	0,34607	0,34493
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,07753	0,50209	0,45806	0,68967	0,09060	1,28430
EFS Var. 09 (Sinter 0,15 m/s, Brenner 12 m/s, 750-850 °C, Abdeckung 0,2 W/m ² -K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		674,3	697,9	749,8	742,6	753,4	761,9
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m ³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37257	0,36352	0,34507	0,34756	0,34388	0,34107
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,72224	1,63963	0,34496	1,32976	2,02943	1,93214
EFS Var. 09 Bauteile (Sinter 0,15 m/s, Brenner 12 m/s, 750-850 °C, Abdeckung 0,2 W/m ² -K)		M1	M2	M3	M4	M5	M6
Größe	Einheit						
Temp. (Gas)	°C	654,2	615,7	720,4	735,8	733	738,6
Temp. (Total)	°C	654,6	692,2	746,8	738,7	736,6	743,2
Temp. (Simulation)		672,2	698,5	752,6	741,9	752,4	759,7
Gasdichte Temp. (gas)	kg/m ³	0,40679	0,41695	0,37236	0,36391	0,36547	0,36221
Gasdichte (Simulation)		0,37341	0,36329	0,34411	0,34777	0,34422	0,34177
lok. Gasgeschwindigkeit	m/s	1,10408	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	1,28979
Geschwindigkeit (Simulation)		1,76760	1,64620	0,34752	1,28736	1,99773	1,89252

Da der Einfluss der Bauteile nun klar war, wurde die Bewegung dazu genommen und transient gerechnet. Hierzu wurde das Bauteilmodell 2 verwendet, bei dem die Bauteile auf einer Art Schublade in den leeren Ofen hineingeschoben wurden. Nur so ist eine genaue Simulation des Verhaltens der zu sinternden Teile im Ofen möglich. Wie im Abschnitt 4.3 bereits erwähnt, konnten diese Rechnungen nur mit dem komplexen Verfahren des Overset-Mesh realisiert werden. Zudem konnte die Simulation nicht sofort transient gestartet werden, sondern es musste erst in einem stationären Durchlauf der Initialzustand gerechnet werden. Das führte zu einer robusteren Simulation und machte den Abbruch aufgrund von Divergenzen unwahrscheinlich.

Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigen, dass die Temperaturen mit zunehmender Ofentiefe steigen, sich jedoch eine sehr starke links/rechts Asymmetrie ausbildet. Dadurch entstehen gravierende Unterschiede im Sinterverhalten, die es zu vermeiden gilt (Abb. 4.4.2-4). Auch bei den Strömungsrichtungen gab es keine eindeutige Richtung im Ofen und es gab sehr viele Totzonen hinter den einzelnen Bauteilen. Das bedeutet, dass ausgedampftes Sinterwachs nicht hinreichend abtransportiert wird, um in der Ausbrennzone vollständig verbrannt zu werden (Abb. 4.4.2-5).

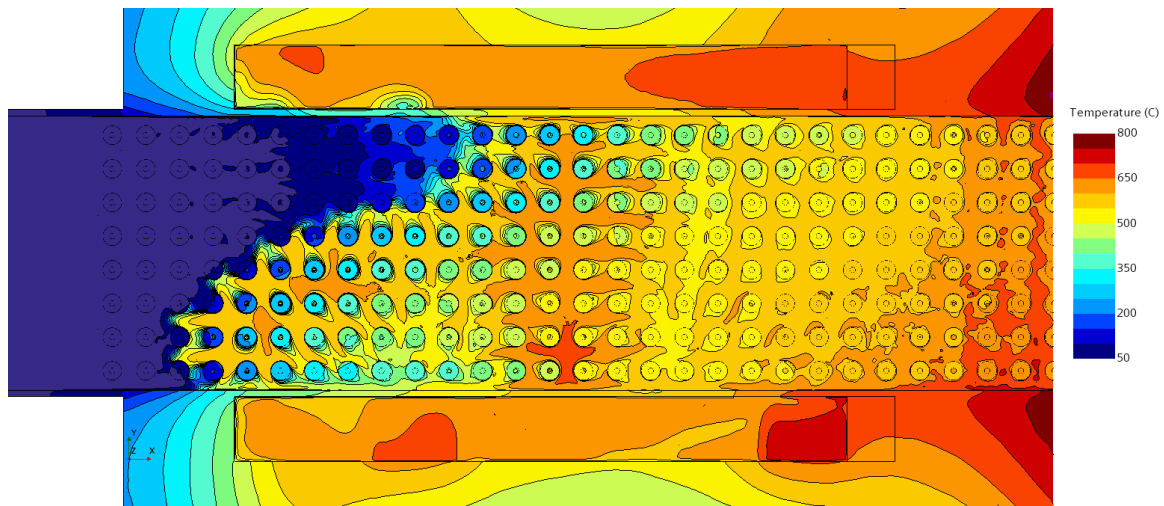


Abbildung 4.4.2-4: Asymmetrie der Temperaturen im Ofen

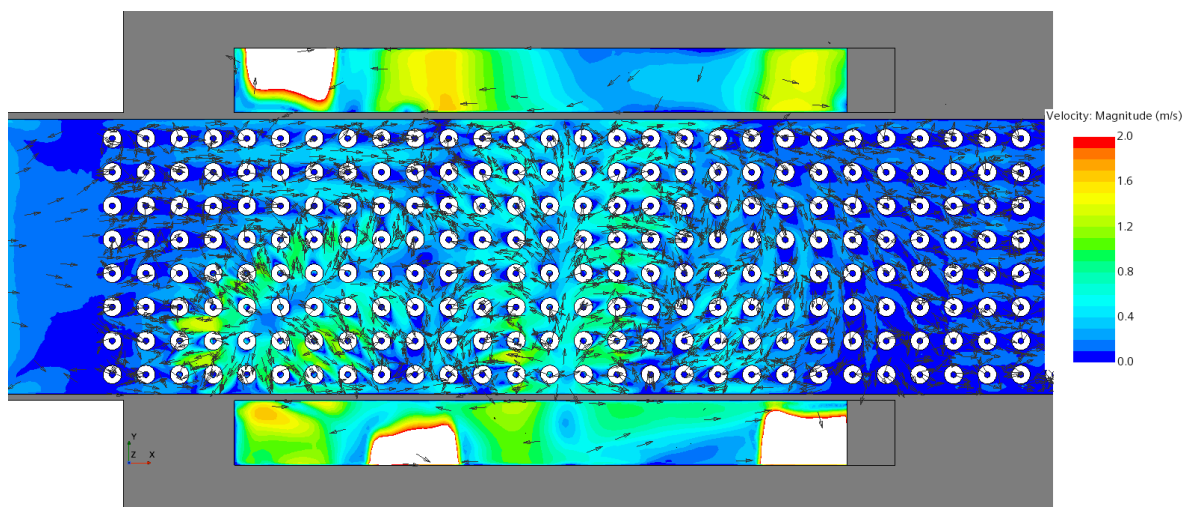


Abbildung 4.4.2-5: Richtung der Geschwindigkeiten im Ofen

Der Vergleich zur zweiten Messung mit Beladung, die im Juni 2021 durchgeführt wurde, zeigt in der Tendenz eine Übereinstimmung. Beide Verfahren weisen eine ungleichmäßige Temperaturverteilung zwischen rechter und linker Sinterzone auf (Abbildung 4.4.2-6). Allerdings ergeben sich in der Simulation niedrigere Temperaturwerte. Sie erklären sich zum Teil durch den Messaufbau, bei dem die Bauteile anders angeordnet waren, sowie nicht korrekt abgeschätzte Außenbedingungen und/oder Brenneinträge. Zudem wurde festgestellt, dass einige Randbedingungen bei Messung und Simulation unterschiedlich waren, wie folgende Auflistung und Tabelle 4.4.2-2 zeigen:

- In der CFD-Simulation wurde eine geringere Dichte der Sinterteile zu Grunde gelegt.
- Die Bandgeschwindigkeit wurde in der Simulation langsamer angegeben, als sie in der Messsituation war.
- Die Teilebeladung und damit der Massendurchsatz pro Stunde war während der Messung höher als es in der Simulation modelliert wurde.
- In der Simulation wurden die Teile mit symmetrischer Anordnung und mit mehr Abstand zwischen den einzelnen Reihen berücksichtigt (siehe Abbildung 4.4.2-6). In der Messung gibt es mehr Abstand in der Mitte des Bandes sowie einen Kabelführungskanal, der ein weiteres strömungsrelevantes Detail darstellt.

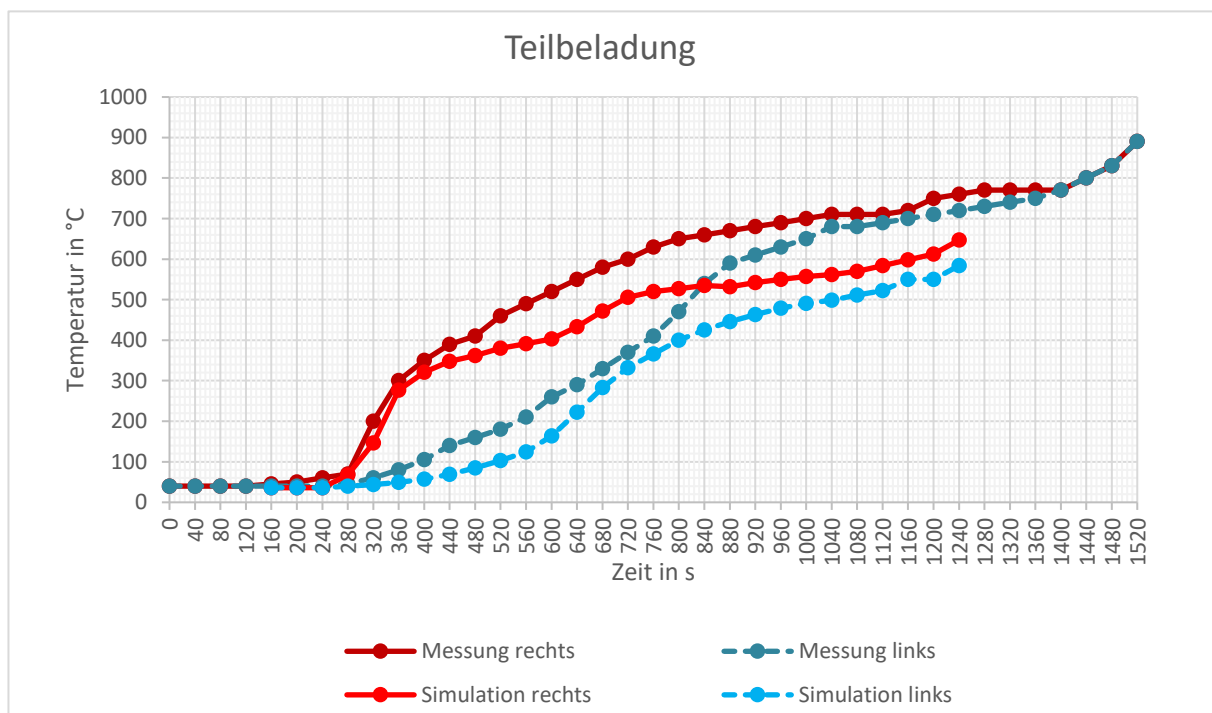


Abbildung 4.4.2-6: Rechts/links Asymmetrie bei Messung und Simulation

Tabelle 4.4.2-2: Randbedingungen und Materialwerte vom IWM, Messung (GKN) und Simulation (HTCO)

		IWM	GKN	HTCO
Dichte	g/cm ³	7,0	6,982	8,521
Wärmekapazität	kJ/kg K	0,45		0,48
Bandgeschwindigkeit	m/s	2,78E-03		2,66E-04
Bandgeschwindigkeit	mm/min	167	167	16,7
Bandgeschwindigkeit	m/h	10,0	10,0	1,0
Teileabstand	mm	70		100
Anzahl Teile Reihe		8	8	8
Anzahl Teile lfd. Meter		14,1	13,5	10
Durchmesser Teile (außen)	mm	56	56	56
Durchmesser Teile (innen)	mm	18	18	18
Höhe Teile	mm	32	18	18
Teile Volumen	cm ³	70,67	39,75	39,75
Teile Gewicht	g	495	278	339
Massendurchsatz	kg/h	561	300	26
ΔT bis kurz vor Sinterzone	°C	680	730	580

Daraufhin wurden im iterativen Verfahren weitere Simulationen mit den korrigierten Werten durchgeführt, um deren Einfluss auf die Ergebnisse erfassen zu können. Die Simulationen zeigten ein sehr ähnliches qualitatives Bild. Daraus ist zu folgern, dass das Modell an sich sehr robust gegenüber leichten Variationen der Randbedingungen ist, und dass die Ergebnisse tendenziell richtig sind. Nur die Temperaturwerte sind nicht weiter gestiegen, so dass keine perfekte Kalibrierung des Modells mit Beladung gegenüber der Messung erreicht werden konnte.

Das lässt den Schluss zu, dass es eine noch genauere Abbildung der Prozesse in der Entbinderungszone bedarf. Die Brennerflamme kann einen größeren Einfluss auf die Strömungssituation im Ofen haben als zuvor angenommen. So kann die Expansion des Brennstoffes bei der Verbrennung große Auswirkung auf die Strömung haben. Zudem kann die Strahlung der Flamme die Erwärmung des Ofens und somit die Temperaturverteilung deutlich stärker beeinflussen als zuvor angenommen.

Die Integration von Strahlung ist, wie bei Modellbildung erklärt, für dieses sehr aufwändige numerische Modells des Ofens nicht effizient möglich. Dazu mussten die Bauteile in ihrer exakten Geometrie entfernt und durch eine dünne Platte gleicher Dichte und Masse ersetzt werden (Abb. 4.4.2-7). Dieses vereinfachte geometrische Modell hat wiederum eine stationäre Simulation ermöglicht.

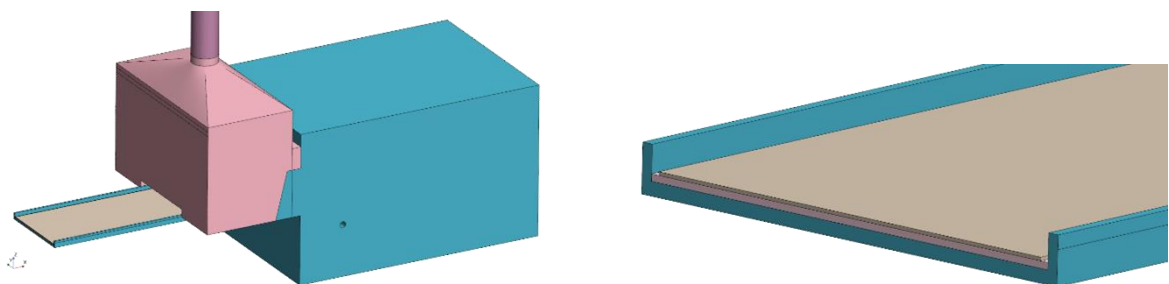


Abbildung 4.4.2-7: Vereinfachte Geometrie für die Rechnung mit Strahlung

Mit diesen iterativ angepassten Randbedingungen wurden etliche Simulationen durchgeführt, bei denen die Temperaturen jedoch immer deutlich zu niedrig waren. Eine plausible Erklärung dafür sind zu hohe Wärmeverluste an die Umgebung, da über Strahlung nicht nur eine Erwärmung, sondern auch eine Abkühlung erfolgt. Die geringere Ofentemperatur hat diese Analyse unterstützt.

Die besten Ergebnisse wurden erzielt als die Außenwände adiabatisch gerechnet wurden, um hohe Wärmeverluste an die Umgebung zu verhindern (Abb. 4.4.2-8). Die Temperaturen waren nun auf einem ähnlichen Niveau wie bei der ursprünglichen Rechnung mit langsamer Bandgeschwindigkeit und exakter Bauteilgeometrie. Dies ist ein Erfolg, wenn man bedenkt, dass die Bandgeschwindigkeit verzehnfacht wurde und die Bauteile nun deutlich weniger Zeit haben sich zu erwärmen. Eine Asymmetrie ist jedoch fast nicht mehr zu beobachten.

Insgesamt hat der Umfang und die Komplexität der Strömungssimulationen die geplanten Arbeiten um das Vielfache überstiegen. Die zahlreichen systematischen Untersuchungen haben gezeigt, dass alle Prozesse und Randbedingungen korrekt und umfassend repräsentiert werden müssen, und ein Modell des leeren Ofens mit vereinfachter Darstellung der physikalischen Prozesse (ohne der zu sinternden bewegten Teilen, ohne Brennerflamme, ohne Strahlung, ohne genaue Kenntnis der Randbedingungen) als virtuelles Modell nicht hinreichend aussagekräftig ist. Auf der anderen Seite, wenn alle diese Parameter in das CFD-Modell eingearbeitet werden, kommt man an die Grenzen der industriellen Effizienz der Berechnungen. Solche Modelle können sinnvoll nur in Rechenzentren mit vielfach größerer Parallelisierung der Lizenz- und Rechenressourcen erfolgen.

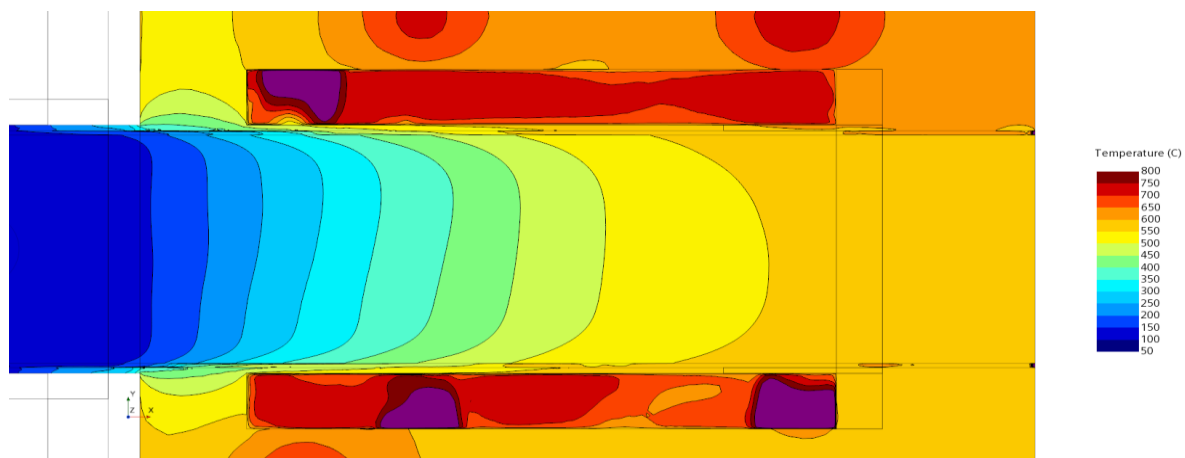


Abbildung 4.4.2-8: Temperaturen im Ofen bei Rechnung mit Strahlung

4.4.3 Sequenziell gekoppelte Simulation (IWM, HTCO)

Eine gekoppelte transiente Simulation mit der exakten Bauteilgeometrie hat sich als unpraktisch erwiesen. Hierzu müssten für jeden Zeitschritt der Bewegung an den entsprechenden Raumpunkten (Koordinaten) Werte der Temperatur und des Wärmeflusses in eine csv-Datei herausgeschrieben und nach dem entsprechenden Simulationszyklus im Entbinderprozess (IWM) wieder in die Simulation eingelesen werden. Die Datenmengen haben sich als zu groß für eine solche Kopplung erwiesen. So wurden die Werten nur an dem Zeitpunkt herausgelesen, an dem sich die Bauteile schon im Ofen befanden und ans IWM weitergegeben. Die Volumenströme des entwichenen Gases, wie von IWM berechnet und zurückgegeben, waren jedoch so gering, dass eine Integration in die Simulation, aufgrund der rechnerischen Genauigkeit, nicht möglich war.

Daraufhin wurde beschlossen das austretende Gas als kleine, masselose Partikel darzustellen, und diese an den Stellen in die Simulation einzulassen, an der es gem. Simulation auswachst. Diese Stellen wurden auf Basis der letzten Simulation mit Strahlung und den dort berechneten Temperaturen vom IWM ermittelt (Abb. 4.4.3-1) und die Partikelbahnen berechnet (Abb. 4.4.3-2 bis 4.4.3-4).

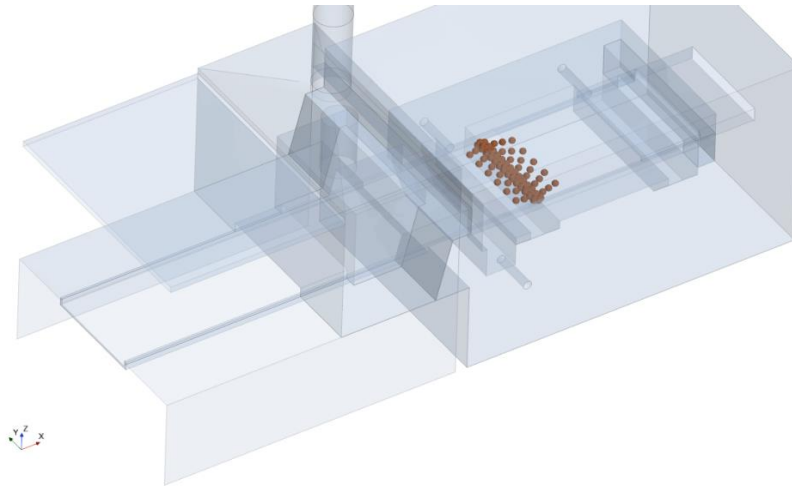


Abbildung 4.4.3-1: Bereiche an denen das meiste Wachs entgast

Aus den Partikelbahnen, die komplett der Strömung folgen, geht hervor, dass das entgaste Wachs sofort vor die Brenner gelangt und somit auch direkt verbrannt würde. Das war eines der Ziele des Forschungsprojektes und der Ofen müsste in dieser Hinsicht nicht mehr optimiert werden. Laut GKN und IWM passiert dies jedoch nicht, sondern das Wachs entweicht ungenutzt aus dem Ofen. Grund für Diskrepanz mit der Simulation könnte die fehlende Masse der Partikel, die das entgaste Wachs repräsentieren sollen, sein. So wurden die Partikel mit einer geringen Masse und ihre Bahnen noch einmal berechnet. Es ergaben sich jedoch keine wesentlichen Unterschiede zu den masselosen Partikeln und da Gasdichte nicht bekannt war, wurde dies nicht weiterverfolgt und die Partikelbahnen der masselosen Partikel als plausibel angesehen. Wahrscheinlicher ist jedoch die Erkenntnis (siehe 4.3.1), dass größere Mengen Wachs ausschwitzen und durch das Ofenband hindurchtropfen und damit in vollkommen andere Strömungsregime gelangen. Dies konnte aber im Rahmen der Projektlaufzeit nicht mehr numerisch untersucht werden.

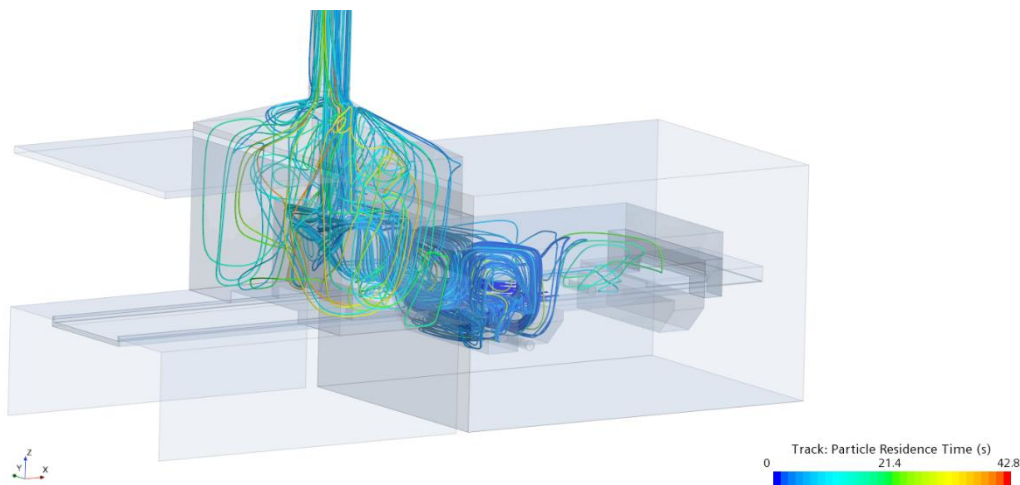


Abbildung 4.4.3-2: Partikelbahnen

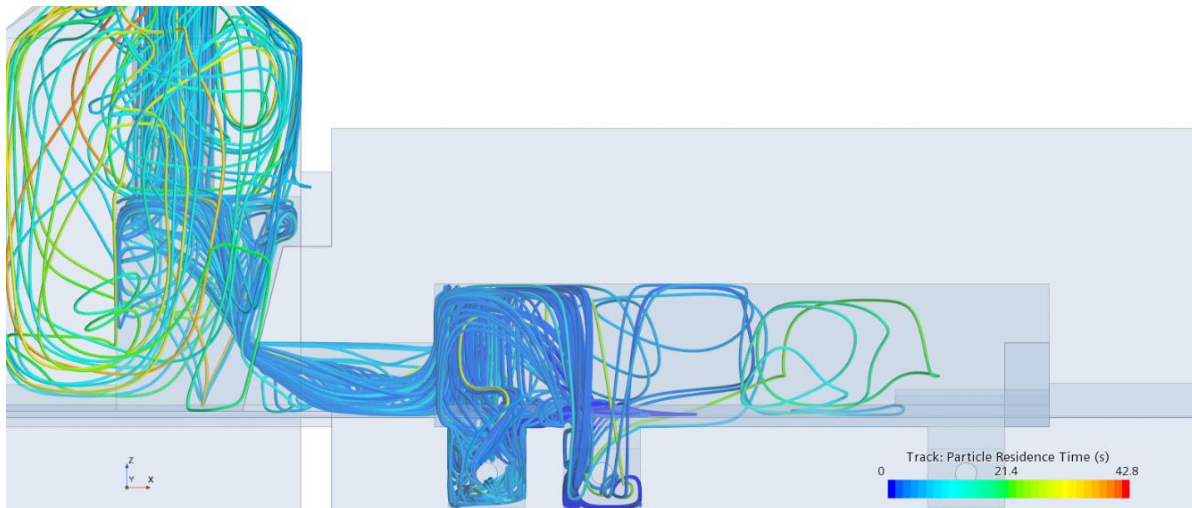


Abbildung 4.4.3-3: Partikelbahnen – Ofen von der Seite

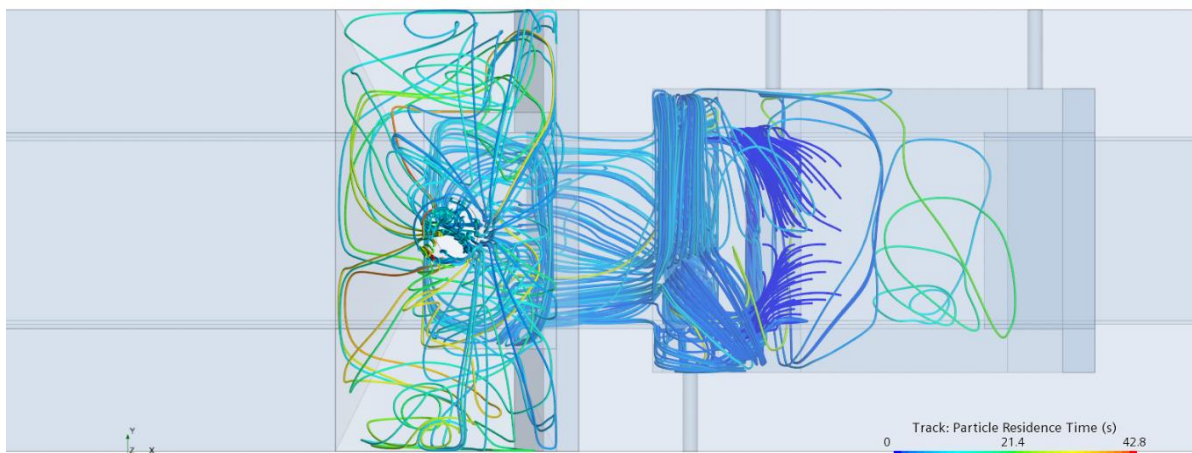


Abbildung 4.4.3-4: Partikelbahnen – Ofen von oben

4.4.4 Optimierung Gasströmung (HTCO)

Eine Optimierung der Ofengeometrie schien aufgrund der nicht validierten Strömung des ausgegasteten Waxes zunächst wenig sinnvoll. Es war jedoch von Nutzen zu überprüfen, ob eine Absaugung innerhalb der Ausbrennzone (Abb. 4.4.4-1) die Partikelbahnen dahin verändert, dass sie nicht mehr vor die Brenner gelangen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4.4.4-2 bis 4.4.4-3 dargestellt.

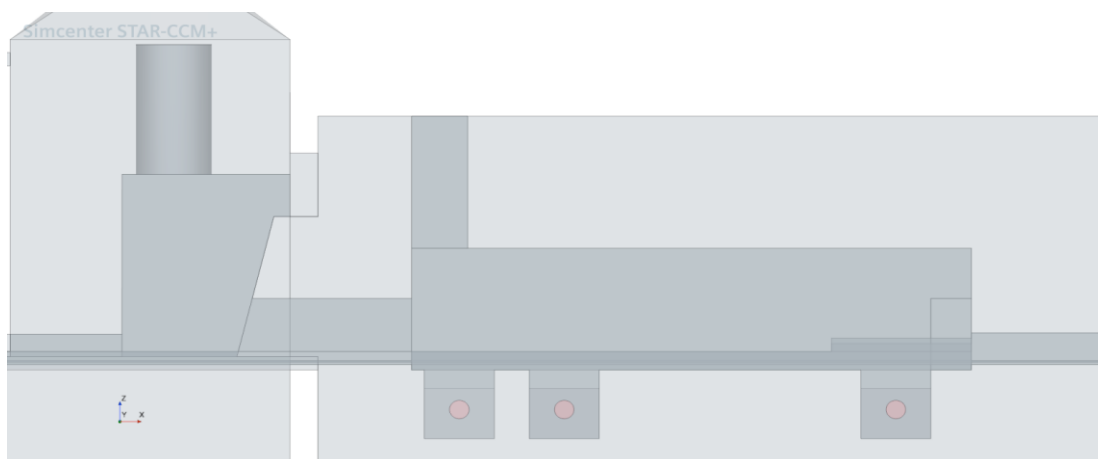


Abbildung 4.4.4-1: Optimierte Geometrie mit Absaugung in der Ausbrennzone

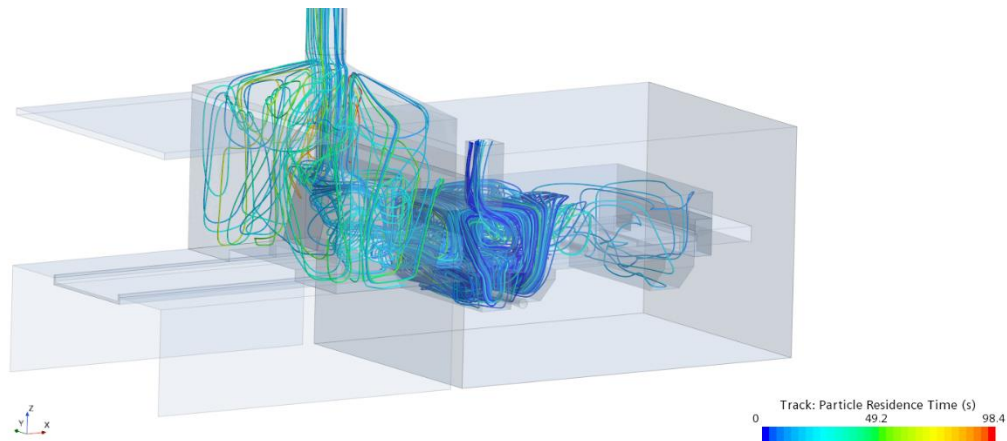


Abbildung 4.4.4-2: Weg der Tracerpartikel im Ofen

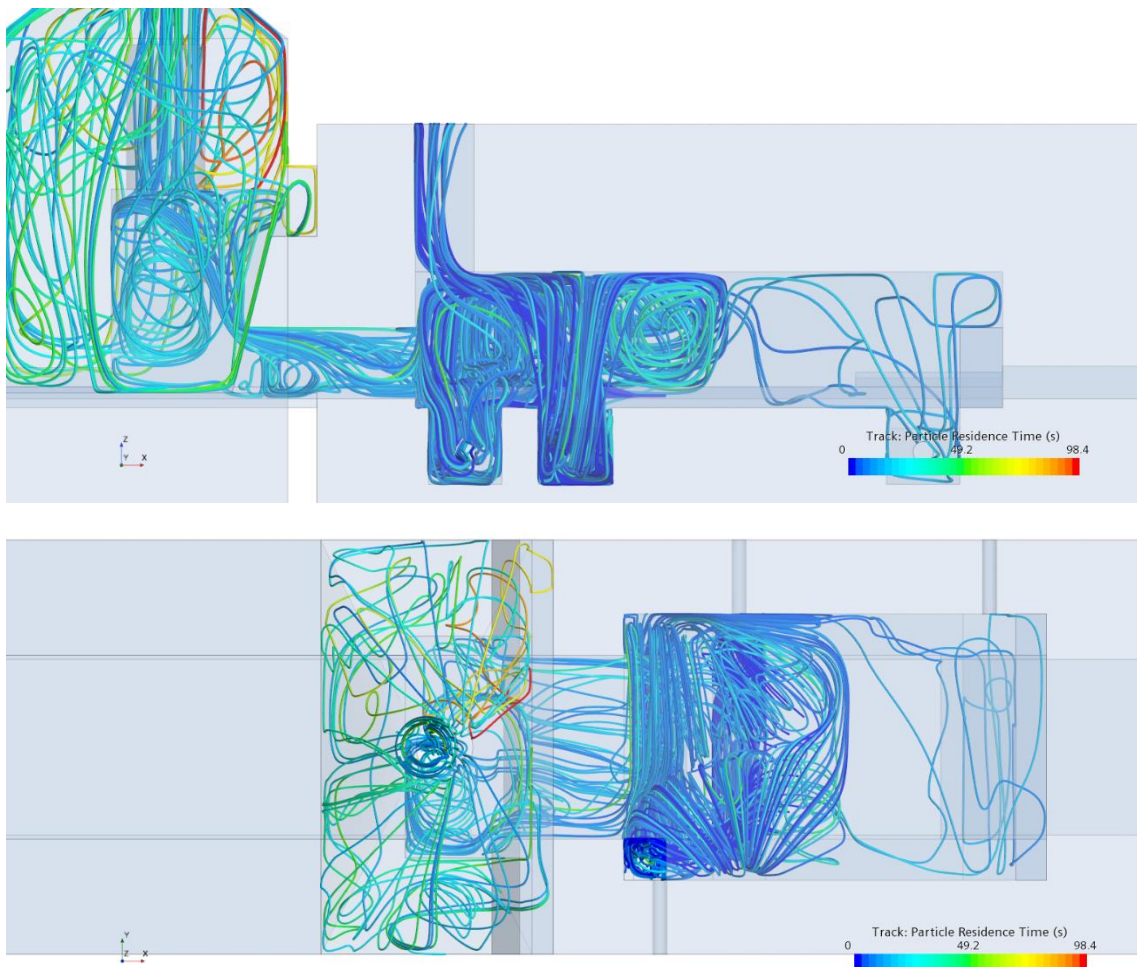


Abbildung 4.4.4-3: Weg der Tracerpartikel im Ofen (2D-Schnitte)

Wie den obigen Abbildungen zu entnehmen ist, gelangen weiterhin Partikel vor die Brenner. Daraus könnte geschlossen werden, dass das entgaste Wachs tatsächlich schon bei der vorhandenen Geometrie im Ofen verbrannt wird, denn das Modell scheint gegen kleine Parameteränderungen robust zu sein. Da keine Werte über die Gaszusammensetzung im Kamin vorhanden waren, konnte nicht validiert werden, ob die Bahnen realistisch dem ausgegasten Wachs folgen und tatsächlich vor die Brenner geleitet und dort direkt verbrannt werden. Hierzu wären zukünftige konkreten Messungen auch im Kamin sehr hilfreich, um solche Hypothesen zu belegen oder zu widerlegen. Eine abschließende Aussage hierzu war jedoch zum Ende des Forschungsprojektes nicht mehr möglich.

4.5 Umsetzung im Produktionsofen (GKN, ONEJOON)

Im Verlauf des Projekts haben sich die Projektpartner *GKN Sinter Metals Engineering GmbH*, *HTCO GmbH*, *MESA Industrie-Elektronik GmbH* und *ONEJOON GmbH* mehrfach bei GKN in Bad Brückenau getroffen, um anhand eines bestehenden Produktionsofens (Bandofen) das Potenzial hinsichtlich der Prozessführung zu beurteilen.

Allerdings war die Endphase des Projekts maßgeblich von der Covid-Pandemie geprägt. Die Lieferketten funktionierten auch zu Projektende 2022 noch nicht wieder so wie vor der Pandemie, was einen erheblichen Einfluss auf alle GKN Standorte und einen erheblichen Einfluss auf die gesamte Supply Chain hatte, Werke mit ausreichend Material zu versorgen. Dies hatte starken Einfluss auf die Planung der Produktionsanlagen und es war eine Herausforderung unter diesen Materiallieferschwankungen eine prognostizierende und vor allem stabile Fertigung aufrecht zu erhalten bzw. zu planen. Im Februar 2022 wurde das Geschäft zusätzlich durch die Ereignisse des Ukraine-Russland Konflikts weiter massiv negativ beeinträchtigt. Als Folge dessen kam es zu einer enormen Inflation bei fast allen Produkten. Dies war im speziellen in den europäischen Werken deutlich stärker als z. B. in den Produktionsstandorten in den USA zu erkennen. Daraus resultierten massive Preiserhöhungen für Energie, die wir hinnehmen mussten. Trotz aller Bemühungen des Verkaufsteams von GKN konnten die Preissteigerungen nicht 1:1 an die Kunden weitergegeben werden. In China kam es ab Q2/2022 zu massiven Auswirkungen von Sperrungen infolge steigender Fallzahlen bei Covid, was auf unser Geschäft weltweit ebenfalls mit einem enormen Anstieg an Frachtkosten für Material und einer weiteren Verknappung der Materialbestände einherging.

Um den oben aufgeführten Ereignissen entgegen zusteuern, und mit Fokus auf eine bestmögliche geglättete Produktionsplanung und Anlagenverfügbarkeit, wurde Ende Q2/2022 entschieden, Maschinen und Anlagen herunterzufahren. Dies betraf maßgeblich die Sinteröfen in verschiedensten Werken, da der Sinterprozess einer der energieintensivsten Prozesse bei GKN ist. Dies hatte zur Folge, dass nur noch eine gewisse Anzahl an Produktionsöfen zur Verfügung standen und dabei ganz klar der Fokus auf die Serienfertigung und der kontinuierlichen Kundenbelieferung gesetzt wurde. Versuche und Umbaumaßnahmen, die auch im speziellen auf das Projekt EnEffiSint bezogen waren, konnten somit nicht wie ursprünglich geplant angegangen und umgesetzt werden. Somit war eine finale Umsetzung der Tests inklusive des Umbaus einer Entwachsungszone an einem Sinterofen in BBR nicht mehr möglich. Nachfolgend werden jedoch einige der Optimierungsmöglichkeiten vorgestellt, die im Projekt erarbeitet wurden und insbesondere einzelne Teilaspekte betreffen. Für die Optimierung der Gesamtanlage muss jedoch leider auf die Simulationsergebnisse verwiesen werden.

4.5.1 Ermittlung Problemstellen & Optimierungspotenzial (GKN, ONEJOON)

Zunächst wurde potenzielle Problemstellen definiert und deren Optimierungspotenzial diskutiert. Zu diesem Zweck wurde z.B. das Brennerverhalten des Produktionsofens im Betrieb durch die ONEJOON GmbH untersucht sowie eine detaillierte Prozessgasanalyse durch die Fa. MESA durchgeführt.

Problemstellung

Im Betrieb wurde eine stark wechselnde Zusammensetzung des Brennergases festgestellt. Diese resultiert aus einem nicht konstanten Gas-Luft-Gemisch (λ) über den gesamten Regelbereich. Somit wird einerseits die Ofenatmosphäre im Bereich der Stearatzone beeinflusst und zum anderen gelangt Sauerstoff der Brennerabgase in den Ofen. Bei $\lambda = 2,5$ resultieren

ein Sauerstoffanteil von 12,5 Vol% in der Atmosphäre. Dies entspricht bei 24 m³ Brennerabgas 8 m³ O₂, die in den Ofen gelangen.

Aktuelle Umsetzung der Brennerregelstrecke

Die derzeitige Regelung basiert auf dem Prinzip der Gleichdruckregelung. Dieses Prinzip ist zwar einfach und kostengünstig, bringt jedoch auch einige Nachteile mit sich, was die Einstellung bzw. Einstellbarkeit bei kleinen Brennerleistungen anbetrifft. Bei der vorhandenen Gleichdruckregelung werden beide Brenner über einen Gleichdruckregler betrieben. Hierbei gestaltet es sich oftmals schwierig das Gas-Luft-Gemisch über den gesamten Leistungsbereich stabil zu halten. Am untersuchten Ofen wird angestrebt die Gas-Luft-Eindüsung nach unten in einem Bereich auszuweiten, in dem aufgrund der Brennerkonstruktion eine stabile (detektierbare) Flamme nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grund wurde die Flammüberwachung am Brenner deaktiviert. In Abbildung 4.5.1-1 ist die derzeitige Brennerregelstrecke schematisch dargestellt (GIK = Gleichdruckregler).

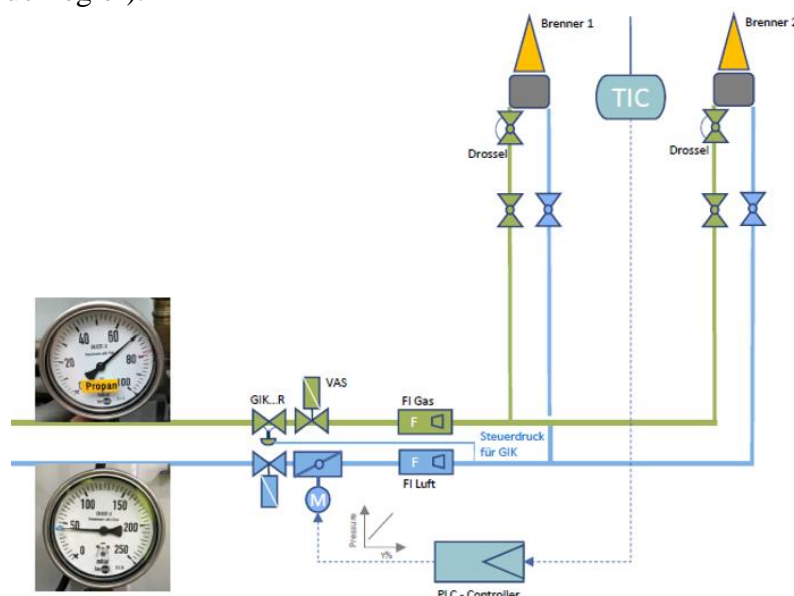


Abbildung 4.5.1-1: Schematische Darstellung der Brennerregelstrecke

Die Gewährleistung der Sicherheit wird in der vorhandenen Ausführung wahrscheinlich über einen zusätzlichen Zündbrenner und/oder durch den in der Sicherheitssteuerung aktivierten Hochtemperaturbetrieb gewährleistet. Das angestrebte Gas-Luft-Verhältnis liegt im Bereich zwischen $\lambda = 0,80 \dots 0,85$.

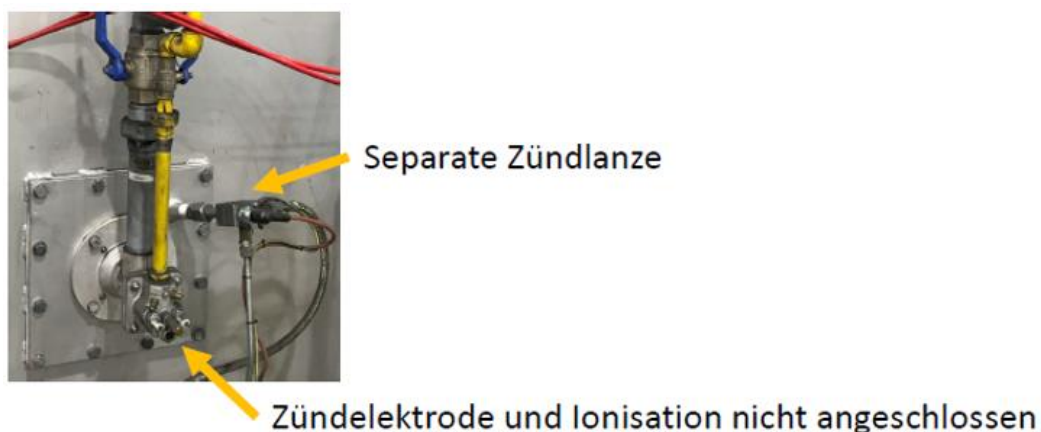


Abbildung 4.5.1-2: Flammüberwachung am Produktionsofen

Gemäß den aufgenommenen Daten entspricht das Gas-Luft-Verhältnis bei Minimumstellung dem gewünschten Sollwert ($\lambda = 0,851$). Die gemessenen Werte zeigt Tabelle 4.5.1-1. Das Verhältnis zwischen Gas und Luft wird in der Regel bei Minimumleistung am Gleichdruckregler eingestellt. Die Maximalleistung ergibt sich nach dem maximalen Luftdruck (Luftmenge hinter der Regelklappe). Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Gasausgangsdruck (die Gasmenge) am Gleichdruckregler bei steigendem Luftdruck (steigende Luftmenge) im Verhältnis 1:1 mitgezogen wird. Bei der vorhandenen Anlage erhöht sich zunächst jedoch ausschließlich die Luftmenge bei steigender Leistungsanforderung des Brenners. Bis zu einem Reglerausgangswert zwischen ca. 43...45% bleibt die Gasmenge hingegen konstant auf dem Wert, der bei Minimumstellung als Volumenstrom eingestellt ist.

Regler	Propan	Luft	Lambda
Minimum	0,40 m³/h	8,3 m³/h	0,851
38%	0,40 m³/h	20,6 m³/h	2,112
41%	0,40 m³/h	21,9 m³/h	2,245
43%	1,10 m³/h	22,0 m³/h	0,820
44%	1,20 m³/h	24,2 m³/h	0,825
44%	0,40 m³/h	24,2 m³/h	2,481
45%	1,20 m³/h	25,1 m³/h	0,858
?	3,30 m³/h	57,0 m³/h	0,708

Tabelle 4.5.1-1: Flammüberwachung am Produktionsofen

Das hat zur Folge, dass über beinahe den halben Regelbereich mehr Kaltluft (O_2) in den Ofen eingeblasen wird, was zusätzlich die Ofentemperatur absenkt, obwohl der Regler versucht diesem Effekt entgegenzuwirken. Der Regler arbeitet in der Praxis selbstoptimiert. Aus diesem Grund wird eine Stellung der Luftklappe < 40% im Betrieb nicht mehr angefahren. Dieses Verhalten sorgt dafür, dass es im Bereich des sich einstellenden Automatik-Minimums verstärkt Schwankungen gibt (sowohl mit Blick auf Ofentemperatur als auch -atmosphäre). Grund hierfür ist eine schlagartige Veränderung des Gas-Volumenstroms von 0,4 auf 1,2 m³/h, sobald der Gleichdruckregler entsprechend öffnet. Somit erhöht sich die eingebrachte Wärmeleistung des verwendeten Propan schlagartig von 10 kW (0,4 m³/h) auf 31 kW (1,2 m³/h). Der Sauerstoff der eingebrachten 24 m³/h Brennergase steigt beim Schließen des GIK schlagartig von 0 Vol% auf 12 Vol%.

Die folgenden Gründe könnten das beobachtete Verhalten der Regelstrecke verursachen:

- Die Eingangsdrücke für Propan (40 mbar) und Verbrennungsluft (70 mbar) sind nicht aufeinander abgestimmt
- Die Feder zur Gewichtskraftkompensation des Gleichdruckreglers ist zu stark vorgespannt.
 - Folge: Das Druckgleichgewicht kann bei kleinen Steuerdrücken in der Luftleitung nicht erreicht werden.
- Der Bypass wurde bei Minimeinstellung versehentlich geöffnet.
 - Gasgrundlast von 0,4 m³/h liegt ständig an, auch wenn der Ventilteller des Reglers geschlossen ist.
- Die Einbausituation des Gasdruckreglers beeinflusst das Regelverhalten negativ.

4.5.2 Optimierung der Brennerregelstrecke (ONEJOON, GKN)

Der Gleichdruckregler wird sowohl luft- als auch gaseitig angesteuert. Insbesondere im Bereich kleiner Gaslasten können diese Drücke sehr gering sein. In diesem Fall hat die Art der sich ausbildenden Strömungen an den Druckentnahmestellen einen großen Einfluss und kann zu Fehlern führen. An diesen Stellen sollte die Strömung möglichst laminar verlaufen, da aus Turbulenzen der Strömung Druckschwankungen resultieren. Aus diesem Grund sollten Druckentnahmestellen und Gasdruckregler mit ausreichend dimensionierten Ein- und Auslaufstrecken versehen werden. Idealerweise sollten hier das 3...5-fache des Rohrdurchmessers vorgesehen werden. Dies ist in der aktuellen Einbausituation gemäß Abbildung 4.5.2-1 nicht gegeben. Diese Einbausituation ist typisch für etablierte Bandöfen.



Abbildung 4.5.2-1: Einbausituation Gleichdruckregler und Druckentnahmestelle

Der Gasdruckregler liegt unmittelbar zwischen zwei 90°-Bögen. Zusätzlich ist dem auslaufseitigen Bogen direkt ein Magnetventil nachgeschaltet. Diese Einbausituation entspricht nicht den notwendigen Maßnahmen. Im rechten Teil der Abbildung ist eine Druckentnahmestelle direkt hinter einem Rotameter dargestellt. Dies hat sehr wahrscheinlich einen Druckverlust in Abhängigkeit des Durchflusses zur Folge. Dies wiederum resultiert in einem nichtlinearen Druckverlauf über den Regelbereich. Infolgedessen können Druckschwankungen im System auftreten. Gemäß dem Hersteller müssen Sicherheitsventile stets vor dem Gas-Gleichdruckregler eingesetzt werden. Zusätzlich ist die waagerechte Einbaulage des Magnetventils gemäß Abbildung 4.5.2-2 nicht optimal und nur dann zulässig, wenn der Eingangsdruck ≥ 80 mbar beträgt. Ansonsten ist dessen Funktion nicht gewährleistet. Dieser Druck wird bei weitgehend geschlossenem Gleichdruckregler sicherlich nicht erreicht werden.



Abbildung 4.5.2-2: Einbausituation Gleichdruckregler und Druckentnahmestelle

Auch der derzeit verbaute Gleichdruckregler vom Typ *GIK 25R* ist für den benötigten Einsatzfall deutlich überdimensioniert. Die Kennlinien für die GIK-Serie gemäß Abbildung 4.5.2-3 beginnen alle weit oberhalb der angestrebten Durchflussmengen. Die Kennlinie für den GIK-25R beginnt für Propan bei einem Minimumdurchfluss von $9 \text{ m}^3/\text{h}$ und verläuft bis etwa $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Vor Ort werden Gasdurchflüsse von $0,40 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $> 3,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ($4 \text{ m}^3/\text{h} = 1:10$) gefahren. Der Druckverlust am GIK liegt bei diesen geringen Volumenströmen über einen weiten Regelbereich deutlich unter 3 mbar, was einer guten Regelgenauigkeit über den gesamten Bereich sicherlich nicht dienlich ist. Besser geeignet für den Anwendungsfall wäre eventuell die Verwendung eines VAG aus der ValVario-Reihe von Honeywell-Kromschroder, da dieses auf die im betrachteten Einsatzfall angestrebten Volumenströme von $< 10 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt ist.

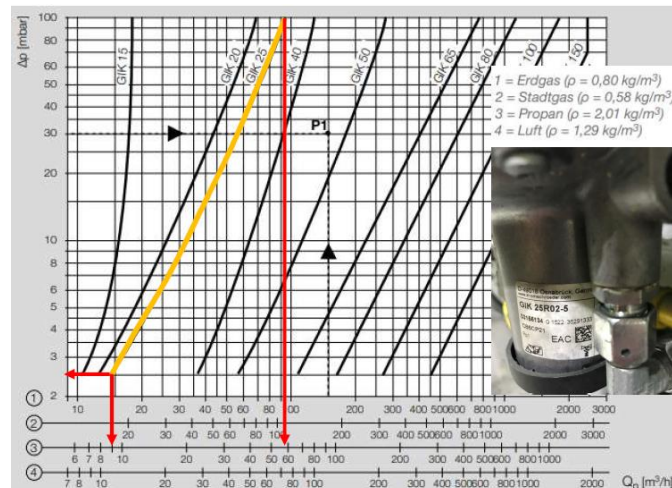


Abbildung 4.5.2-3: Kennlinie Gleichdruckregler GIK-25R

Die Rotameter nach Abbildung 4.5.2-4 sind nach durch die Regelung veränderlichen Stellgliedern (Luftklappe / GIK...R) angeordnet. Die Eingangsdrücke ändern sich abhängig von der Stellung der Luftklappe und sind in der Regel deutlich geringer als der der Kalibrierung zugrunde liegende Wert. Bei den in einem Sinterofen angestrebten sehr sauerstoffarmen, trockenen Atmosphären kann der Fehler recht bedeutend sein.



Abbildung 4.5.2-4: Rotameter für Propan und Luft

Da Rotameter nur bei vordefinierten Eingangsbedingungen (Druck und Temperatur) korrekte Werte anzeigen (Kalibrierung), kann die vorhandene Einbausituation zu verfälschten Anzeigewerten und Durchflüssen führen. Es wird deshalb empfohlen die Rotameter vor den Gleichdruckregler zu setzen (Eingangsseite).

In der betrachteten Regelzone 1 am Bandofen verteilt sich die Gas-Luft-Versorgung nach der Regelstrecke auf zwei Brenner links/rechts am Ofen. Dies ist eine kostengünstige Ausführung,

da man hierdurch 50% der Mess- und Regelarmaturen einsparen kann. In einem Ofen, in dem eine möglichst gute Atmosphärenverteilung erzielt werden soll, kann diese Ausführung jedoch zu einigen Nachteilen führen. Jede Rohrleitung hat einen Druckverlust, welcher abhängig vom (durch die Regelung veränderlichen) Volumenstrom ist. Dies kann dazu führen, dass die an den einzelnen Brennern ankommenden Volumenströme nicht gleich sind = unterschiedliche Brennerleistung links/rechts = unterschiedlicher Impuls = Einfluss auf Strömungen im Ofen. Im ungünstigsten Fall ($\Delta p_{\text{Gas}} \neq \Delta p_{\text{Luft}}$) sind auch die Gas-Luft-Verhältnisse an beiden Brennern links/rechts und damit auch die Atmosphärenverhältnisse im Ofen verschieden.

Bei jeder der nachfolgend vorgeschlagenen Optimierungsmöglichkeiten sollten die Durchflussmesser (FI) vor dem Regelventil verbaut werden.

Optimierungsmöglichkeit 1

Die erste Optimierungsmöglichkeit sieht anstelle des überdimensionierten Gleichdruckreglers für das Gas-Luft-Regelventil ein Magnetventil des Typs VAG aus der Reihe Valvario vor. Dieses Ventil entspricht (gemäß der Kennlinie) deutlich besser den gegebenen Anforderungen.

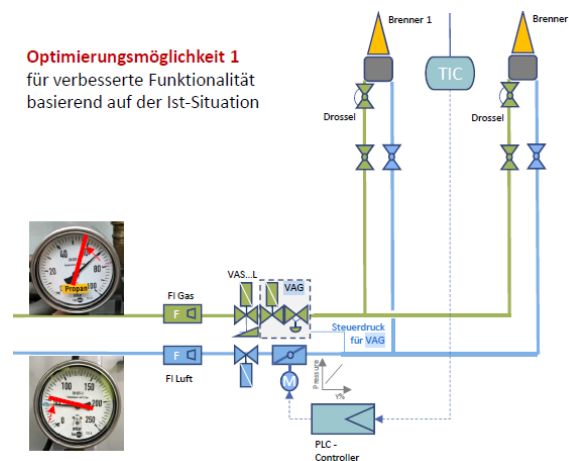


Abbildung 4.5.2-5: Prinzipskizze der optimierten Regelstrecke basierend auf der Ist-Situation

Optimierungsmöglichkeit 2

Der zweite Optimierungsvorschlag beruht auf dem Prinzip der Gleichdruckregelung, allerdings werden hierbei beide Gasleitungen der Brenner getrennt voneinander geregelt, mit dem Ziel einer gleichmäßigeren Ofenatmosphäre.

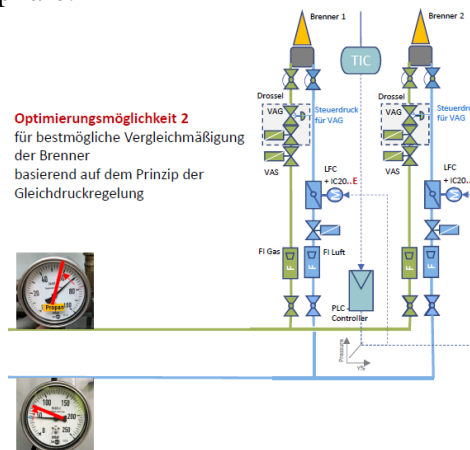


Abbildung 4.5.2-6: Prinzipskizze der optimierten Regelstrecke basierend auf der Gleichdruckregelung

Optimierungsmöglichkeit 3 & 4

Die Optimierungsmöglichkeiten 3 & 4 basieren auf dem Prinzip der „Gas-Luft-Verhältnis-Regelung“.

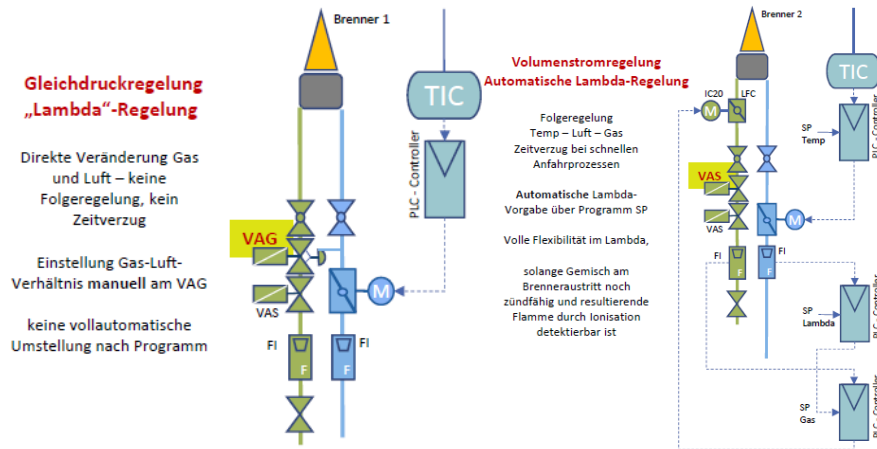


Abbildung 4.5.2-7: Prinzipskizze der optimierten Regelstrecke auf Basis möglicher Gas-Luft-Regelungen

Optimierungsmöglichkeit 5

Optimierungsmöglichkeit 5 basiert auf dem Prinzip der „Lambda-Regelung“.

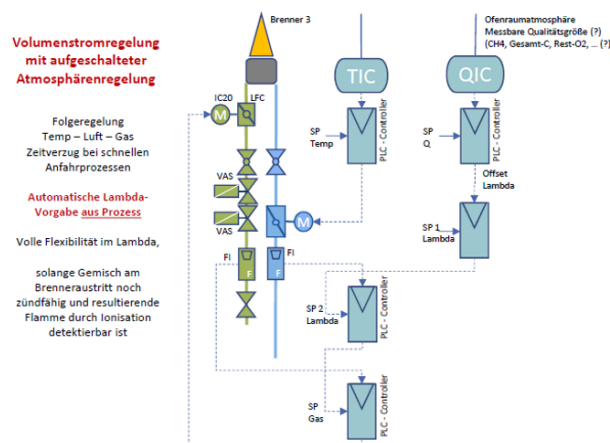


Abbildung 4.5.2-8: Prinzipskizze der optimierten Regelstrecke auf Basis einer möglichen Lambda-Regelung

4.5.3 Verbesserung Strömungsführung und Anlagentechnik (GKN, ONEJOON)

Im Verlauf des Projektes EnEffiSint wurden verschiedenste Konzepte zur energetischen Optimierung der bestehenden Anlage erarbeitet. Mit Blick auf die Effizienzsteigerung des Produktionsofens würden die folgenden Punkte besonderen Mehrwert bringen:

1. Optimierung der Strömung im Inneren des Ofens (abhängig von Beladung des Ofens)
2. Energetische Nutzung der Entbinderungsabgase durch Verbrennung im Ofeninneren (überstöchiometrischen Brennerregelung)
3. Energetische Nutzung der Entbinderungsabgase außerhalb des Ofens
4. Verbesserte Atmosphärentrennung

Diese Varianten gehen jedoch alle auch mit gewissen Nachteilen und Schwierigkeiten einher, die im Folgenden genauer erläutert werden.

Variante 1 – Strömungsoptimierung im Ofeninneren

Im Laufe des Projekts hat sich – auch durch die Durchführung entsprechender CFD-Simulationen – ergeben, dass die Strömung im Ofeninneren teils starken Turbulenzen und Verwirbelungen u.a. aufgrund der Beladung des Ofens mit den Sinterteilen unterliegt. Diese werden zum Teil auch übereinandergestapelt durch den Ofen hindurchgefahren, was die Strömung im Ofen zusätzlich negativ beeinflusst. Ein Punkt der energetischen Effizienzsteigerung der Sinteranlage wäre also eine Optimierung der Strömungsführung. Hierbei besteht jedoch das Problem, dass die Strömungsführung stark von der Bauteilgeometrie abhängt, welche durch den Ofen hindurchgefördert wird, wie u.a. auch die Simulationsrechnungen zeigten. Wird der Ofen nun konstruktiv derart angepasst, dass sich das Strömungsverhalten im Inneren verbessert, so ist es möglich, dass diese Anpassung keine Verbesserung bei veränderter Bauteilgeometrie erzielt. Das bedeutet, dass der Ofen nur für eine Art Bauteil optimiert werden könnte und das mit entsprechendem Aufwand.

Variante 2 – Verbrennung der Abgase im Ofeninneren

Während des Entbinderungsprozesses tritt (je nach Beladung des Ofens) eine Menge Abgas und flüssiger Binder (siehe auch Abschnitt 4.3.1) aus den Sinterteilen aus. Die Zusammensetzung dieses Abgases wurde im Rahmen der Versuche im Testcenter der ONEJOON GmbH analysiert. Da das entstehende Abgasgemisch zum Teil aus brennbaren Gasen besteht (CH_4 , H_2), kam hierbei die Überlegung auf, diese Gasanteile bereits im Ofeninneren zu verbrennen und die dadurch entstehende Wärme energetisch zu Nutzen. Zu diesem Zweck ist eine überstöchiometrische Regelung der Brenner denkbar, um somit einen gewissen Überschuss an Sauerstoff in den Ofen zu leiten, der aufgrund der vorhandenen Temperatur direkt mit den vorhandenen Prozessgasen verbrennt. Nachteil hierbei ist jedoch, dass diese Verbrennung nur sehr lokal Wärme in den Prozess einbringt und die ohnehin schon schwierige Brennerregelung des Ofens noch komplizierter werden würde. Diese Art der Prozessgasnutzung ist nur sehr schwer händelbar und es ist nahezu unmöglich einen gleichmäßigen Prozess im Ofen einzustellen.

Variante 3 – Verbrennung der Abgase außerhalb des Ofens

Im Vergleich zur schwer umsetzbaren Verbrennung der Prozessgase im Ofeninneren gemäß Variante 2 ist eine Verbrennung der Prozessgase außerhalb des Ofens denkbar. Die dadurch entstehende Wärme könnten dann energetisch genutzt werden. Die Abgase des Ofens werden bei der betrachteten Sinteranlage durch eine Absaughaube am Eintritt des Ofens abgeführt. Abbildung 4.5.3-1 zeigt die Prinzipskizze einer entsprechenden Sinteranlage. Da das Konzept des Bandofens eine stetige Öffnung eintrags- sowie austragsseitig verlangt, ist es hierbei unumgänglich, dass zusätzlich zum entstehenden Prozessgas auch Atmosphäre außerhalb des Ofens (Luft) durch die Absaughaube mit angesaugt wird. Betrachtet man nun die Zusammensetzung des Gases bestehend aus Entbinderungsabgas, Prozessgas (95% Stickstoff, 5% Wasserstoff) und Luft, so wird der energetisch nutzbare Anteil des Entbinderungsabgases derart stark verdünnt, dass der resultierende Heizwert keinen merklichen Mehrwert zur Folge hätte.

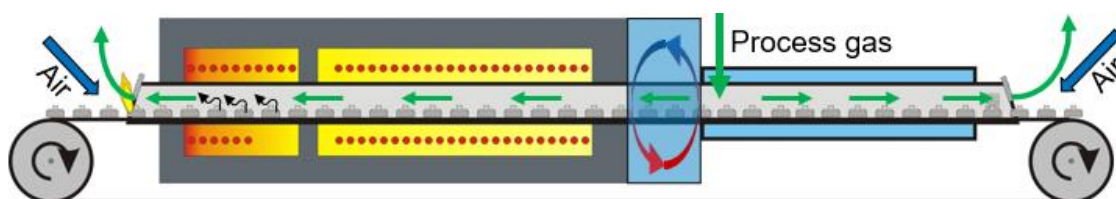


Abbildung 4.5.3-1: Prinzipskizze eines Bandofens für Sinterprozesse

Variante 4 – Verbesserte Atmosphärentrennung

Betrachtet man schließlich das Ofenkonzept des Bandofens nach Abbildung 4.5.3-1, so kommt zu der wenig optimalen Umsetzung der Trennung von Umgebungs- und Ofenatmosphäre hinzu, dass aufgrund der offenen Bauform eine enorme Schutzgasmenge nötig wäre, um den Ofen im Überdruck zu halten. Würde man den Ofen wie in Abbildung 4.5.3-2 dargestellt an der Auslaufseite mit einer Schleuse versehen, könnte man schätzungsweise 25% des notwendigen Schutzgasvolumenstroms einsparen.

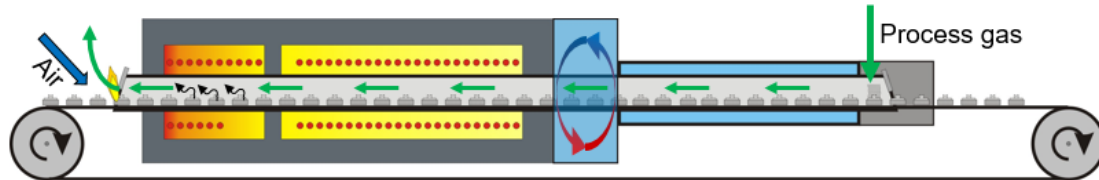


Abbildung 4.5.3-2: Variante 1 – Auslaufseitige Atmosphärentrennung

Durch die zusätzliche Verwendung einer Schleuse im Einlaufbereich des Ofens könnte die Menge an benötigtem Schutzgas sogar um ca. 50% reduziert werden, gemäß erster Abschätzungen (diese Werte sind ausschließlich erste Abschätzungen und keine validen/belegbaren Zahlen). Dieses Konzept würde die Dichtheit des Ofens maßgeblich verbessern und so auch die Sicherheit des Produktionsprozesses optimieren, da somit ausgeschlossen werden kann, dass toxische oder brennbare Prozessgasanteile in die Umgebung des Ofens gelangen.

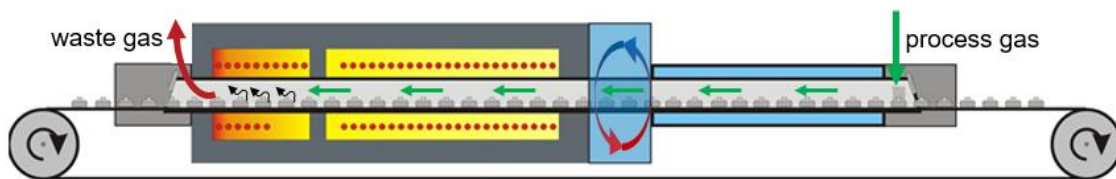


Abbildung 4.5.3-3: Variante 1 – Ein- und auslaufseitige Atmosphärentrennung

Problematisch hierbei ist jedoch die Bauform des Bandofens, die auf einem Endlosband basiert, welches stetig durch den Ofen fährt. Diese Konstruktion macht es unmöglich den Ofen ein- und auslaufseitig mit gasdichten Schleusen zu versehen. Besser wäre hierbei das Konzept des Rollenofens gemäß Abbildung 4.5.3-4. Der Rollenofen ist erheblich besser mit Blick auf Gasdichtheit als das Konzept des Bandofens, da der Rollenofen mit gasdichten Ein- und Auslaufschleusen versehen werden kann. Zusätzlich hat dieses Ofenkonzept den Vorteil, dass durch unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeit der Rollen die Verweilzeit der Bauteile in verschiedenen Ofensegmenten gesteuert werden kann. Die Geschwindigkeiten können je nach Segment passend zum Bauteil/Sinterteil optimiert werden, wodurch eine höhere Auslastung/Nutzung entsteht und somit die Gesamtanlage effektiver gestaltet werden kann. Hinzu kommt, dass im Rollenofen die Atmosphären in den einzelnen Bereichen der Anlage gezielter eingestellt und voneinander getrennt werden können.

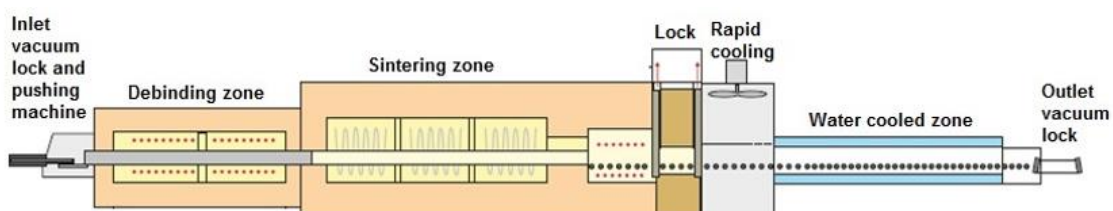


Abbildung 4.5.3-4: Variante 4 – Vollständige Atmosphärentrennung am Beispiel des Rollenofens

Zwischenfazit

Abschließend lässt sich also sagen, dass eine energetische Nutzung der im Prozess entstehenden Abgase zwar grundsätzlich möglich ist, jedoch mit einem großen Aufwand mit Blick auf den Umbau der bestehenden Anlagen einhergeht. Der energetische Nutzen steht hierbei in einem schlechten Verhältnis zu dem Aufwand, der aufgewendet werden muss, um die bestehenden Sinteranlagen zu optimieren. Dennoch lässt sich an der Produktionsanlage von GKN in Bad Brückenau die Brennerregelstrecke gemäß Kapitel 4.5.2 so optimieren, dass ein gewisses Einsparungspotenzial besteht, welches jedoch schwer in Zahlen anzugeben ist. Deutlichen Mehrwert für die Optimierung des Sinterprozesses würde aus der Verwendung gasdichter Schleusen im Ein- und Auslaufbereich des Ofens resultieren. Da diese beim bestehenden Ofenkonzept jedoch keine Verwendung finden können, ist für zukünftige Sinteranlagen die Verwendung eines Rollenofens zu empfehlen.

5. Schlussfolgerungen, Handlungsempfehlungen (PL)

Die durchgeführten Versuche, Modellentwicklungen und Ofensimulationen erlaubten eine Reihe von Schlussfolgerungen, aus denen konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet wurden. So zeigten z.B. die detaillierten Schleppmessungen am leeren und beladenen Ofen, dass mit zunehmender Beladung überproportional mehr Leistung für die Brenner benötigt wird, d.h. bei größerer Leistungsanforderung wird die Verbrennung immer schlechter. Dies zeigt eindringlich, dass für die Optimierung der Brenner in der Produktion immer der übliche Fall mit Beladung (und nicht der leere Ofen) verwendet werden sollte, um den Gasverbrauch in der Serienfertigung zu minimieren.

Weiterhin zeigten die Messungen, dass der Anteil der detektierten brennbaren Kohlenstoffverbindungen auf eine unvollständige Verbrennung und somit auf eine schlechte Energiebilanz beim Ausbrennprozess hindeutet. Hier besteht ein gewisses Energieeinsparungspotential durch Optimierung in der Prozessführung. Außerdem bestätigten die Messergebnisse, dass für eine ausreichende Erfassung der Zustände in der Ausbrennzone und für eine zukünftige Regelung des Ausbrennvorgangs an wesentlich mehr Stellen im Ofen als gegenwärtig mit angepasster Messtechnik gemessen werden muss. Hier zeigte sich auch, dass Messungen mit der entwickelten „variablen“ Messstelle sehr hilfreich für das Verständnis des Ofens waren. Mit der auf einem Bügel installierten Sensorik lassen sich die Parameter unmittelbar oberhalb der Sinterbauteile ausbrennprozessbegleitend erfassen.

Aus der Modellbildung in Kombination mit den Messungen im Testofen kommt die Erkenntnis, dass sich die Wachsbestandteile, anders als ursprünglich vermutet, nicht überwiegend in den Bauteilen zersetzen, sondern ein signifikanter Teil der Entwachsung durch „Ausschwitzten“ von flüssigem Wachs erfolgt. Argumente hierfür findet man auch in der Literatur. Das flüssige Wachs kann je nach Austrittsort und Bauteilform durch das Transportband hindurchtropfen und sich auf dem Ofenboden final zersetzen. Dies hat aber großen Einfluss auf die Optimierung der Gasströmung im Ofen und wie man die Zersetzungsenergie des Wachses am sinnvollsten nutzen kann.

Bei den Simulationen auf Ofenebene zeigte sich, dass ein Modell des leeren Ofens mit vereinfachter Darstellung der physikalischen Prozesse (ohne die bewegten Sinterteile, ohne Brennerflamme, ohne Strahlung, ohne genaue Kenntnis der Randbedingungen) als virtuelles Modell wenig aussagekräftig ist. Unter Berücksichtigung aller dieser Prozesse wurde jedoch deutlich, dass in Übereinstimmung mit den Messlanzen-Messungen die Strömung, und in der Folge die Temperaturen, in der gegenwärtigen Ofenausgestaltung sehr asymmetrisch sind, was sowohl für den Energieverbrauch als auch für die Bauteilqualität ungünstig ist. Auch bei den Strömungsrichtungen gibt es sehr unterschiedliche Bereiche im Ofen und darüber hinaus viele Totzonen hinter einzelnen Bauteilen. Das bedeutet, dass ausgedampftes Wachs nicht hinreichend abtransportiert wird, um in der Ausbrennzone vollständig verbrannt zu werden. Daher wurden auf Grundlage der Erfahrungen von GKN und HTCO verschiedene Optimierungsmaßnahmen durchgespielt. Während die Verkleinerung der Ausbrennzone mittels eines Deckels wenig brachte – die Asymmetrie im Ofen blieb bestehen – würden bei einer zusätzlichen Absaugung innerhalb der Ausbrennzone die gasförmigen Zersetzungsprodukte zuverlässig in die Brennerflamme befördert und sollten damit vollständig verbrannt werden, wenn die Brennersteuerung diese zusätzlichen Gase entsprechend in ihrer Regelung berücksichtigt.

Basierend auf den Simulationsergebnissen in Kombination mit den Versuchen wurden folgende Möglichkeiten zur Optimierung der Strömungsverhältnisse in der Ausbrennzone hinsichtlich des Temperaturmanagements und der nahezu vollständigen Verbrennung der Wachsrückstände in den Brennerflammen mit dem Ziel, den Brennwert des Presshilfsmittels zu nutzen, ausgearbeitet:

- Reduktion des Ofenraums zur Erzwingung einer stärkeren Konvektionsströmung entlang der Sinterlinge und dem Transport der Zersetzungsprodukte des Presshilfsmittels in die Brennerflammen
- Umgestaltung der seitlichen Mauersegmente, um Wechselwirkungen der Brenner zu reduzieren und um eine Ofenlängsströmung zu forcieren
- Verlängerung des Deckels zur Sinterzone abhängig von der Verdampfungsneigung der Presshilfsmittel, um mit Hilfe des Schutzgases eine gleichmäßigere Umströmung und damit Temperierung der Sinterlinge zu erzwingen (dies ist limitiert durch die jeweils niedrigste Kondensationstemperatur der Zersetzungsprodukte)
- Bandauflage mit ausreichend großen Löchern versehen, um die kalten und schweren Zersetzungsprodukte direkt in die Brennerflammen zu ziehen oder in die darüber liegende Atmosphäre zu leiten
- Benötigte Zusatzluft der Brenner über eine Lambda-Sonde regeln

Berücksichtigt man die konstruktiven Gegebenheiten am untersuchten Ofen, lässt sich zusammenfassen, dass eine energetische Nutzung der im Prozess entstehenden Abgase zwar grundsätzlich möglich erscheint, jedoch im vorliegenden Fall mit einem großen Aufwand mit Blick auf einen Umbau der bestehenden Anlage einhergeht. Dieser Nutzen steht hierbei in einem schlechten Verhältnis zu dem Aufwand, der aufgewendet werden müsste, um diese oder auch andere bestehende Sinteranlagen zu optimieren. Einfacher ließe sich an der konkreten Produktionsanlage von GKN die Brennerregelstrecke optimieren. Die sich ergebenden Einsparungen sind aber schwer zu beziffern.

Einen weiteren deutlichen Mehrwert für die Optimierung des Sinterprozesses würde aus der Verwendung gasdichter Schleusen im Ein- und Auslaufbereich des Ofens resultieren. Da diese beim bestehenden Ofenkonzept jedoch keine Verwendung finden können, ist für zukünftige Sinteranlagen die Verwendung eines Rollenofens zu empfehlen.

6. Anhang

6.1 Anhang A – Gasanalyse am Versuchsofen bezüglich CO₂, CO und H₂

Gasmengen der weiteren messbaren Prozessgase CO₂, CO und H₂ analog zu den Messungen für CH₄ in Abschnitt 4.1.3 bei je mindestens drei unterschiedlichen Prozessparametern.

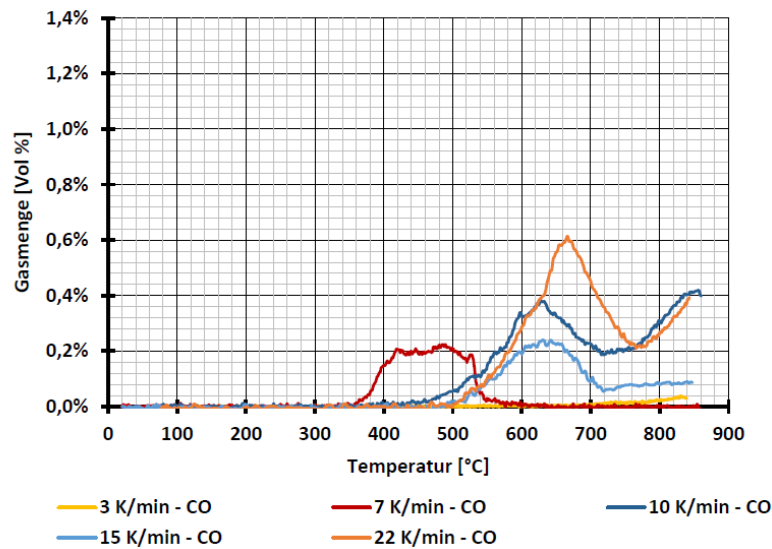


Abbildung 6.1-1: CO-Gehalt bei unterschiedlichen Aufheizgradienten

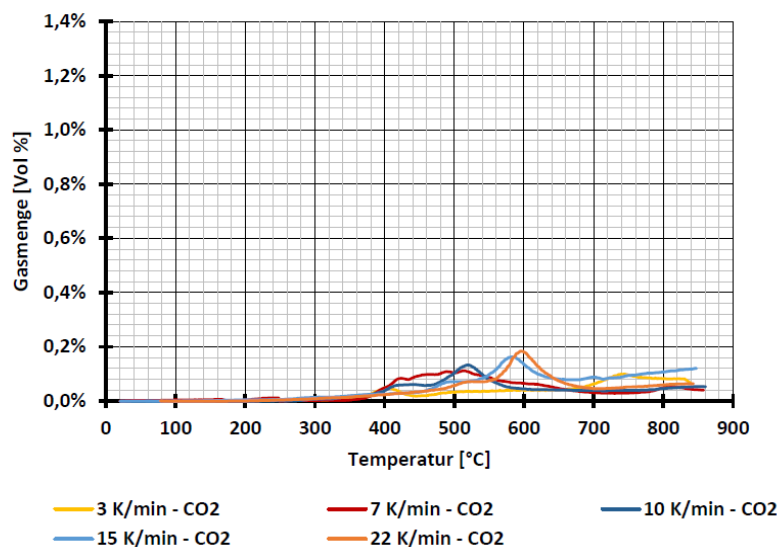


Abbildung 6.1-2: CO₂-Gehalt bei unterschiedlichen Aufheizgradienten

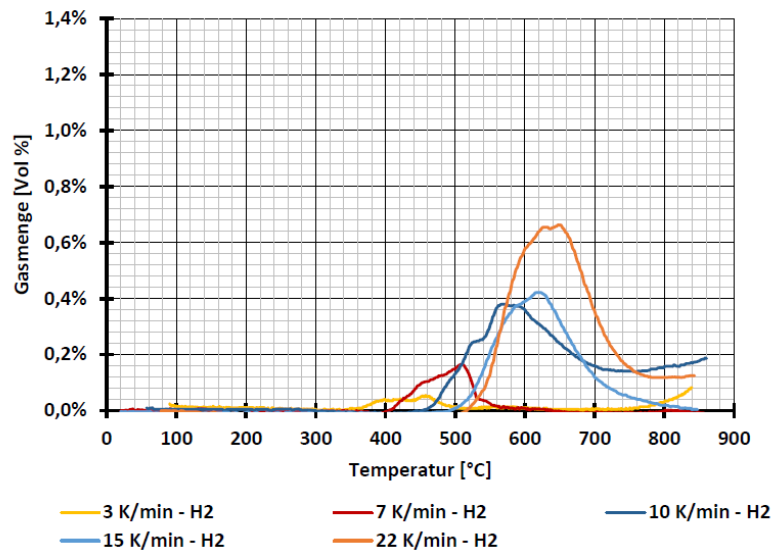


Abbildung 6.1-3: H₂-Gehalt bei unterschiedlichen Aufheizgradienten

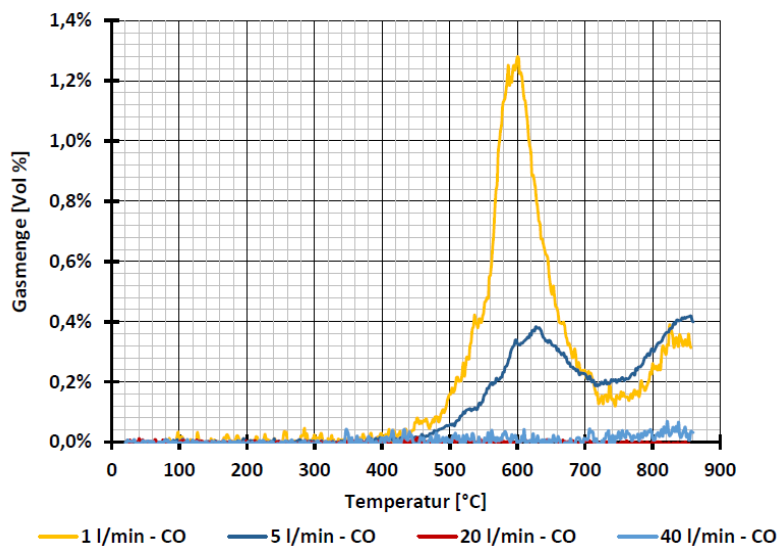


Abbildung 6.1-4: CO-Gehalt bei unterschiedlichem Stickstoffvolumenstrom

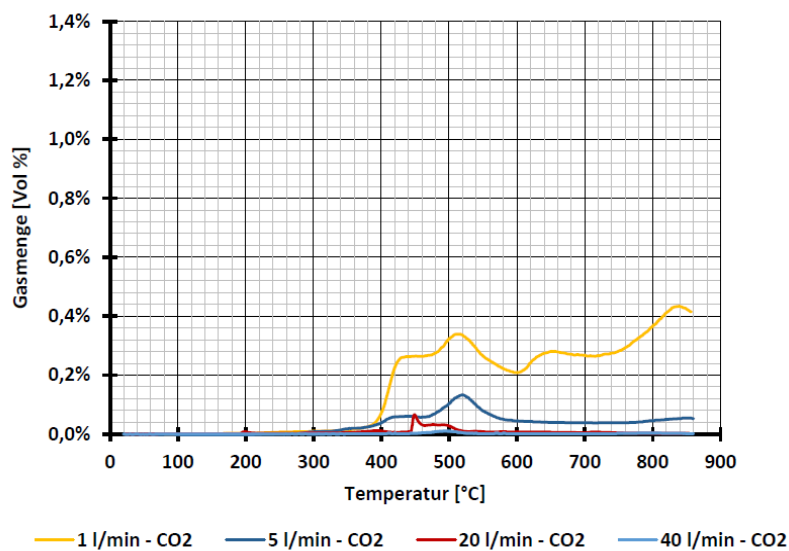


Abbildung 6.1-5: CO₂-Gehalt bei unterschiedlichem Stickstoffvolumenstrom

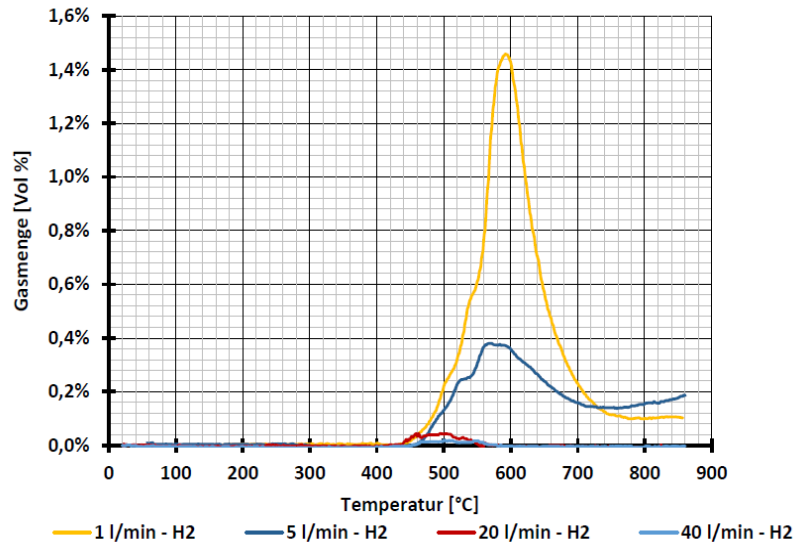


Abbildung 6.1-6: H₂-Gehalt bei unterschiedlichem Stickstoffvolumenstrom

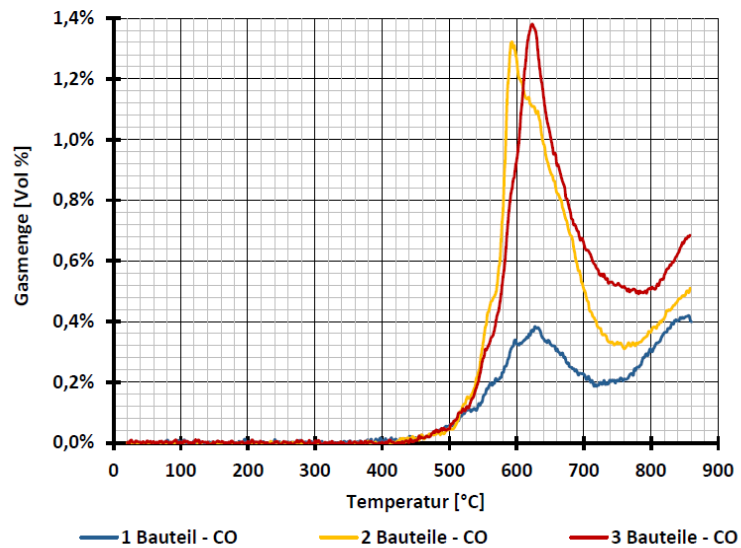


Abbildung 6.1-7: CO-Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilanzahl

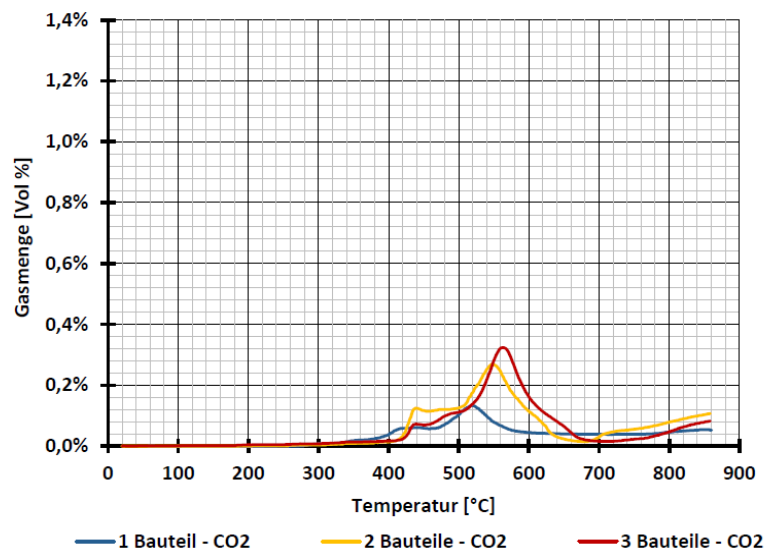


Abbildung 6.1-8: CO₂-Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilanzahl

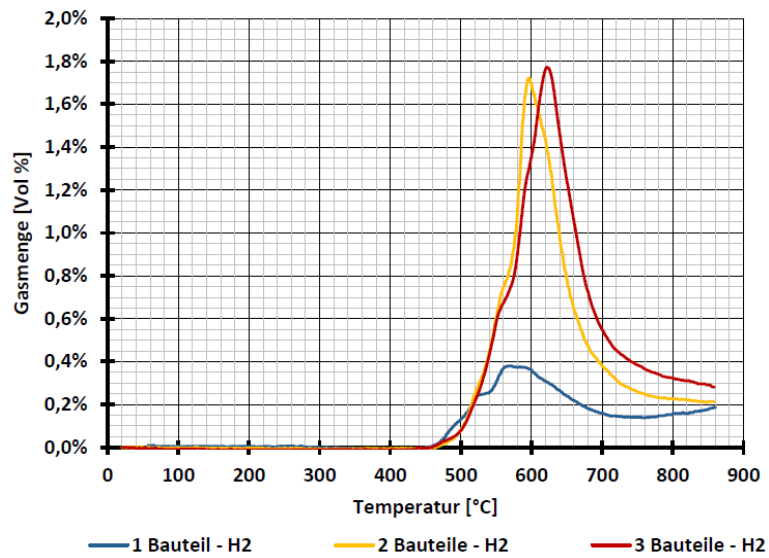


Abbildung 6.1-9: H_2 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilanzahl

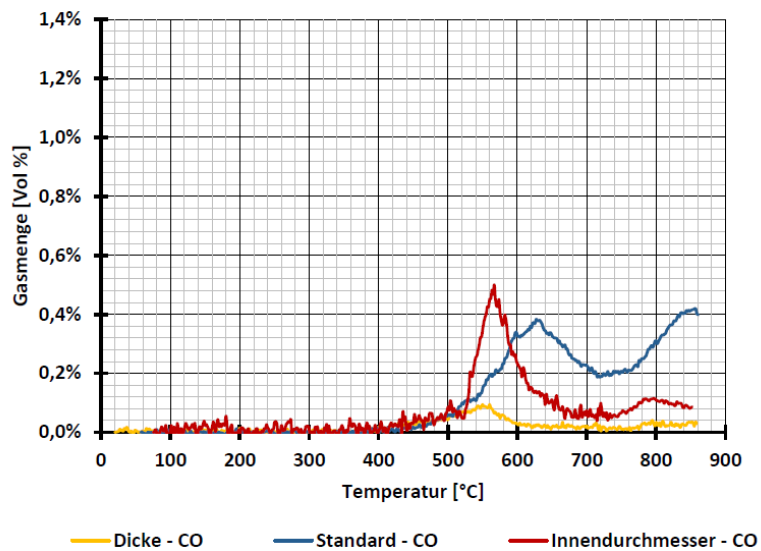


Abbildung 6.1-10: CO-Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie

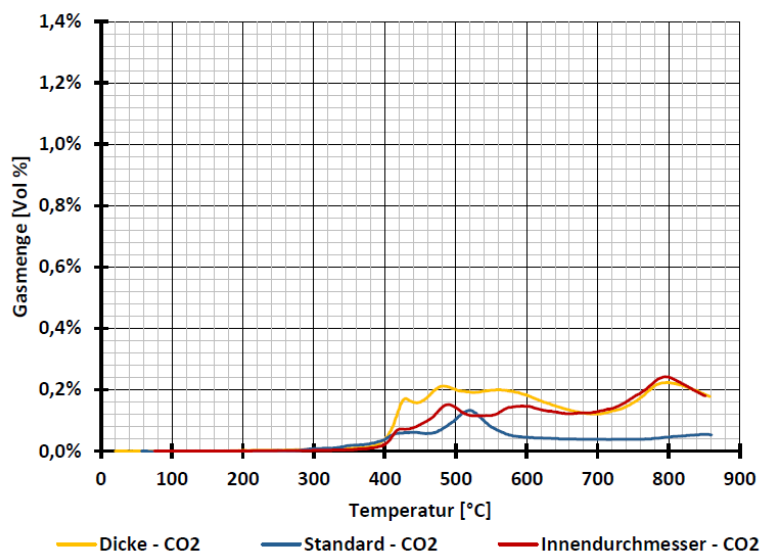


Abbildung 6.1-11: CO_2 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie

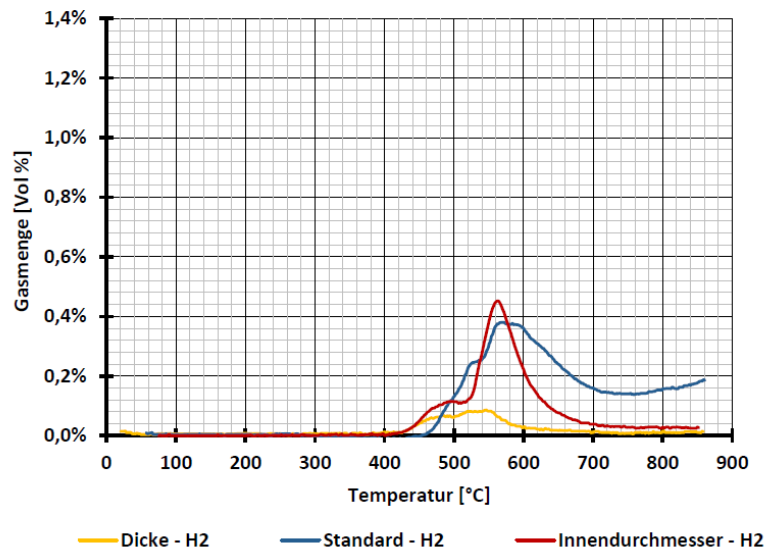


Abbildung 6.1-12: H_2 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteilgeometrie

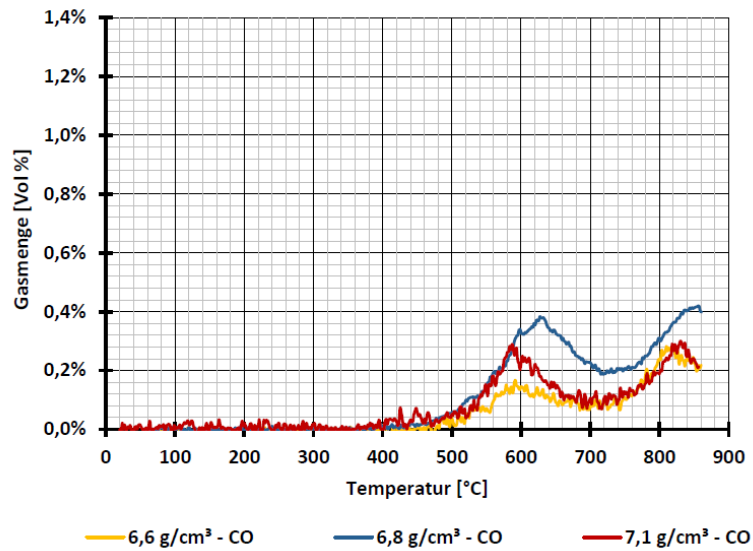


Abbildung 6.1-13: CO-Gehalt bei unterschiedlicher Bauteildichte

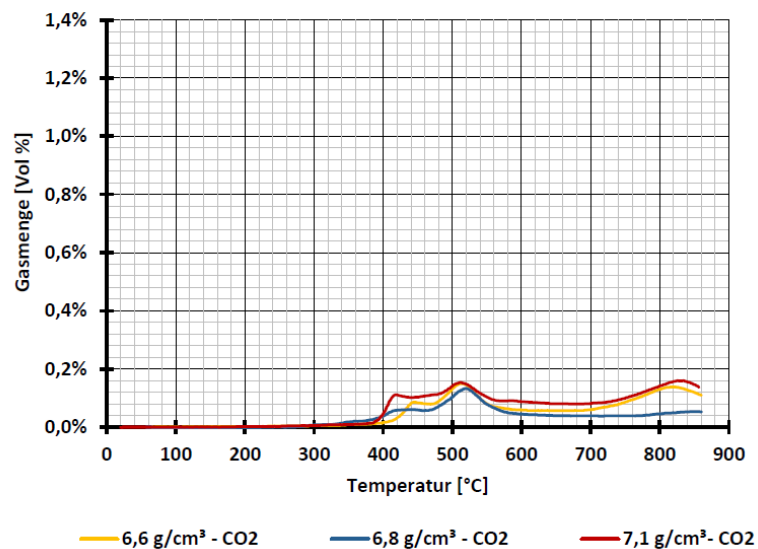


Abbildung 6.1-14: CO_2 -Gehalt bei unterschiedlicher Bauteildichte

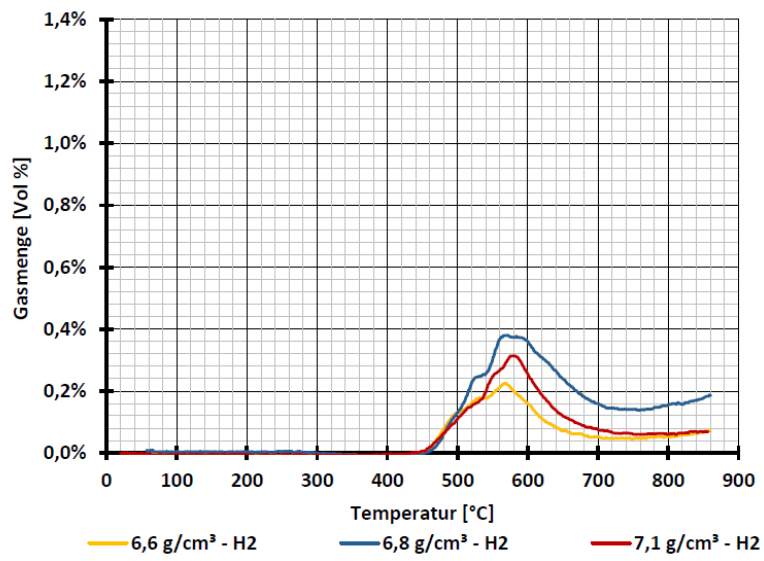


Abbildung 6.1-15: H₂-Gehalt bei unterschiedlicher Bauteildichte

6.2 Anhang B – Gasanalyse am Produktionsofen

Nachfolgend sind die Gasanalysemessungen für die einzelnen Beladungsszenarien und Messstellen für zwei Messkampagne detailliert dargestellt.

6.2.1 Darstellung der Messergebnisse aus 08-2019

Werte Schlitten – Längsprofil unten-mitte

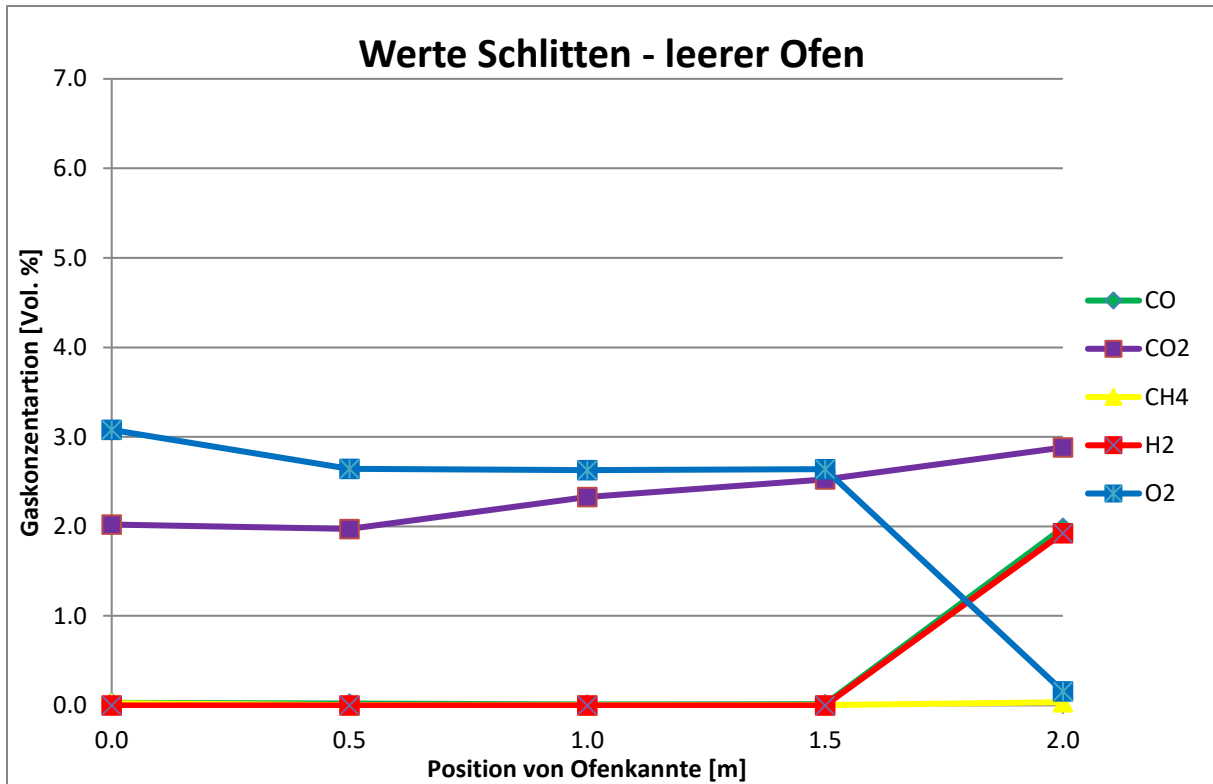


Abbildung 6.2.1-1: Ergebnisse Messschlitten – leerer Ofen

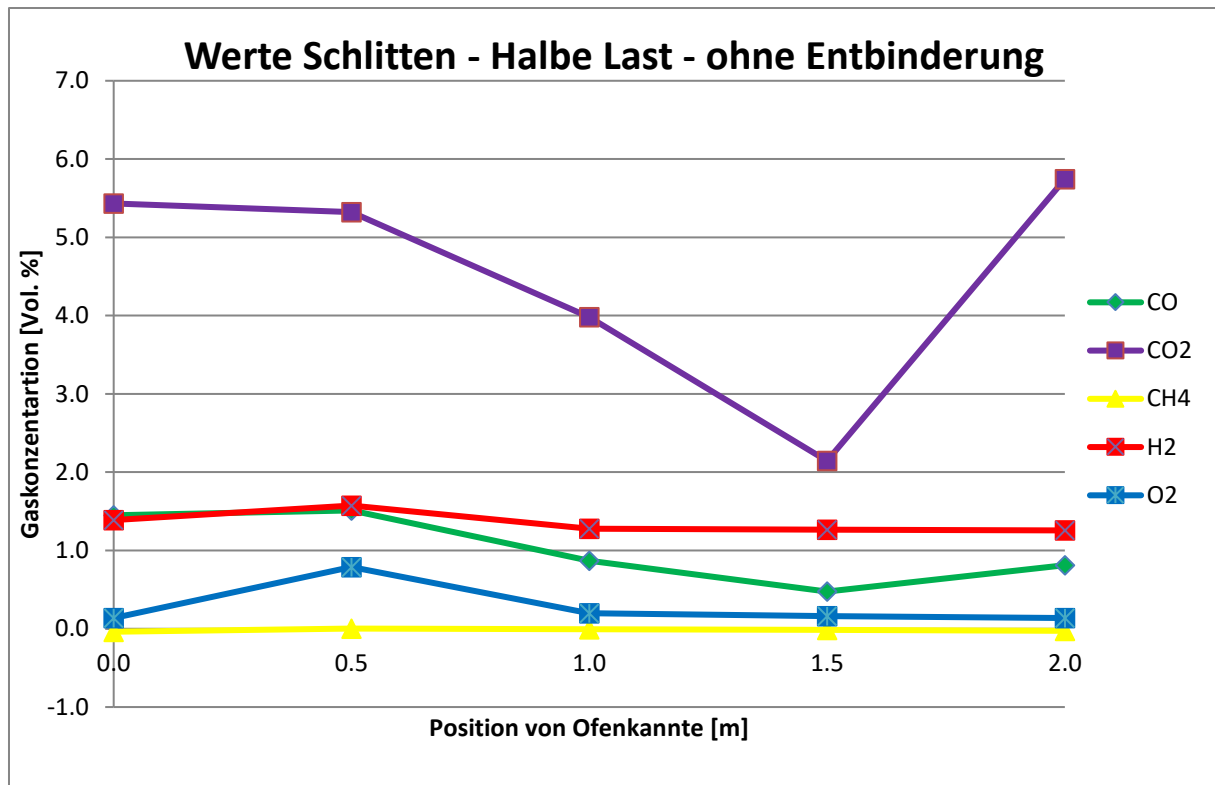


Abbildung 6.2.1-2: Ergebnisse Messschlitten – halbe Beladung – ohne Entbinderung

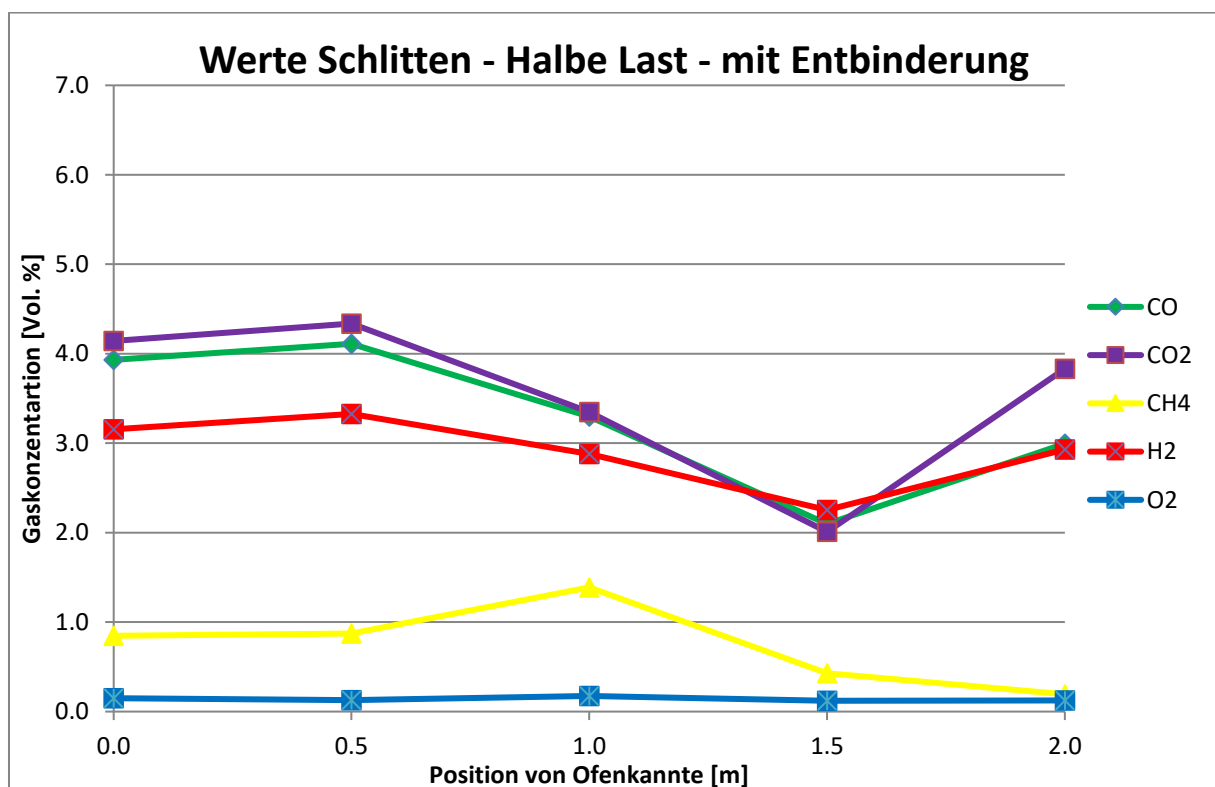


Abbildung 6.2.1-3: Ergebnisse Messschlitten – halbe Beladung – mit Entbinderung

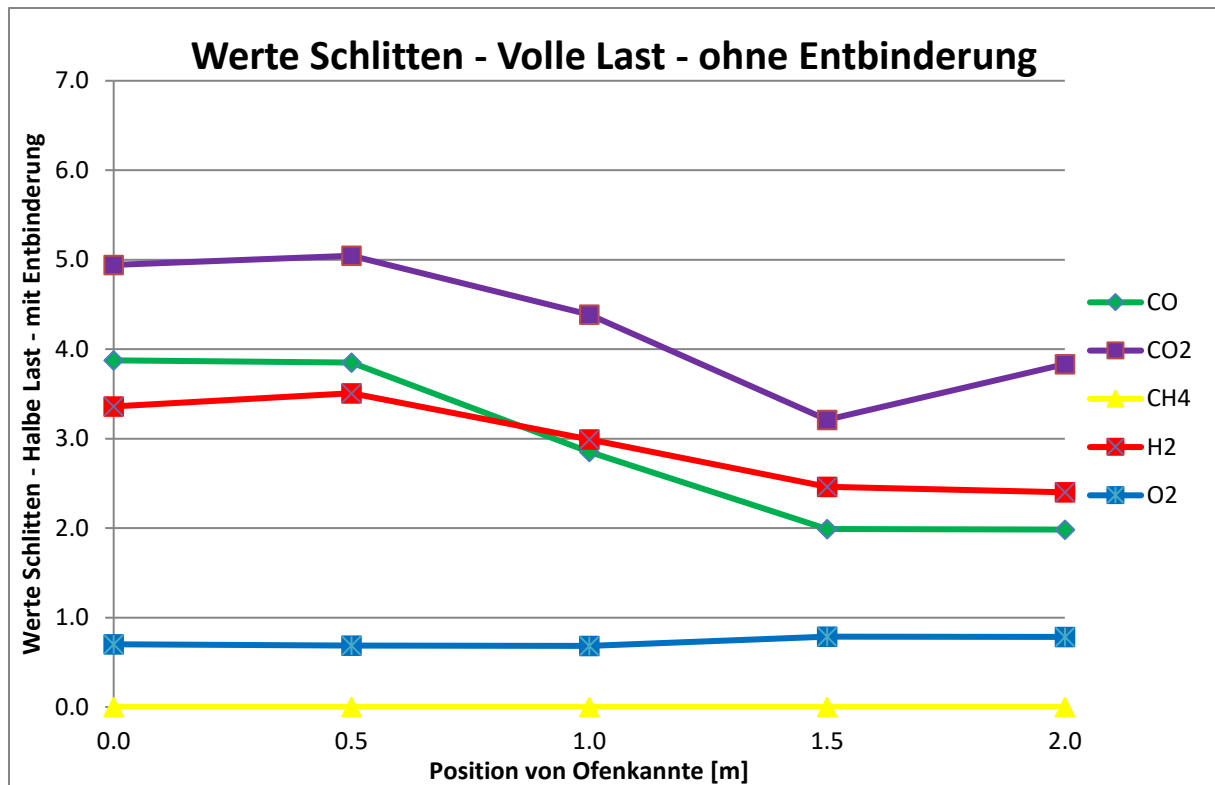


Abbildung 6.2.1-4: Ergebnisse Messschlitten – volle Beladung – ohne Entbinderung

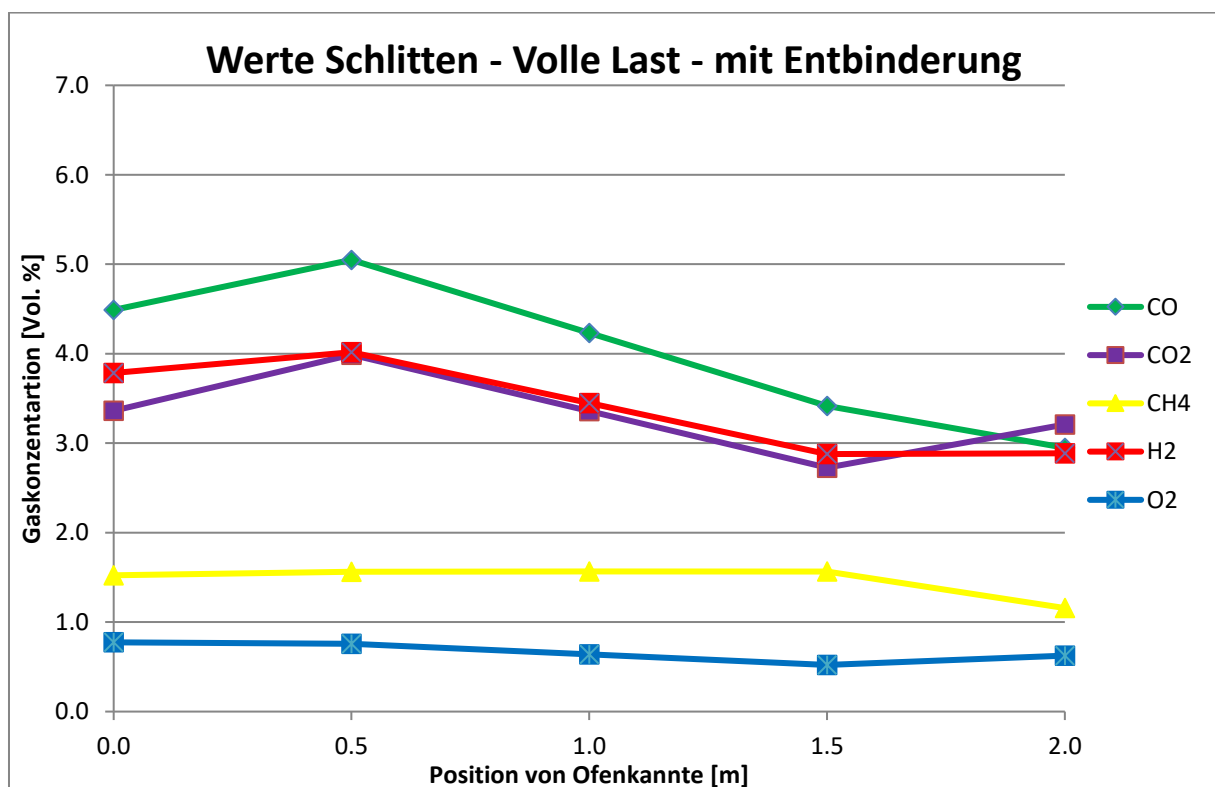


Abbildung 6.2.1-5: Ergebnisse Messschlitten – volle Beladung – mit Entbinderung

Längsprofil oben-mitte

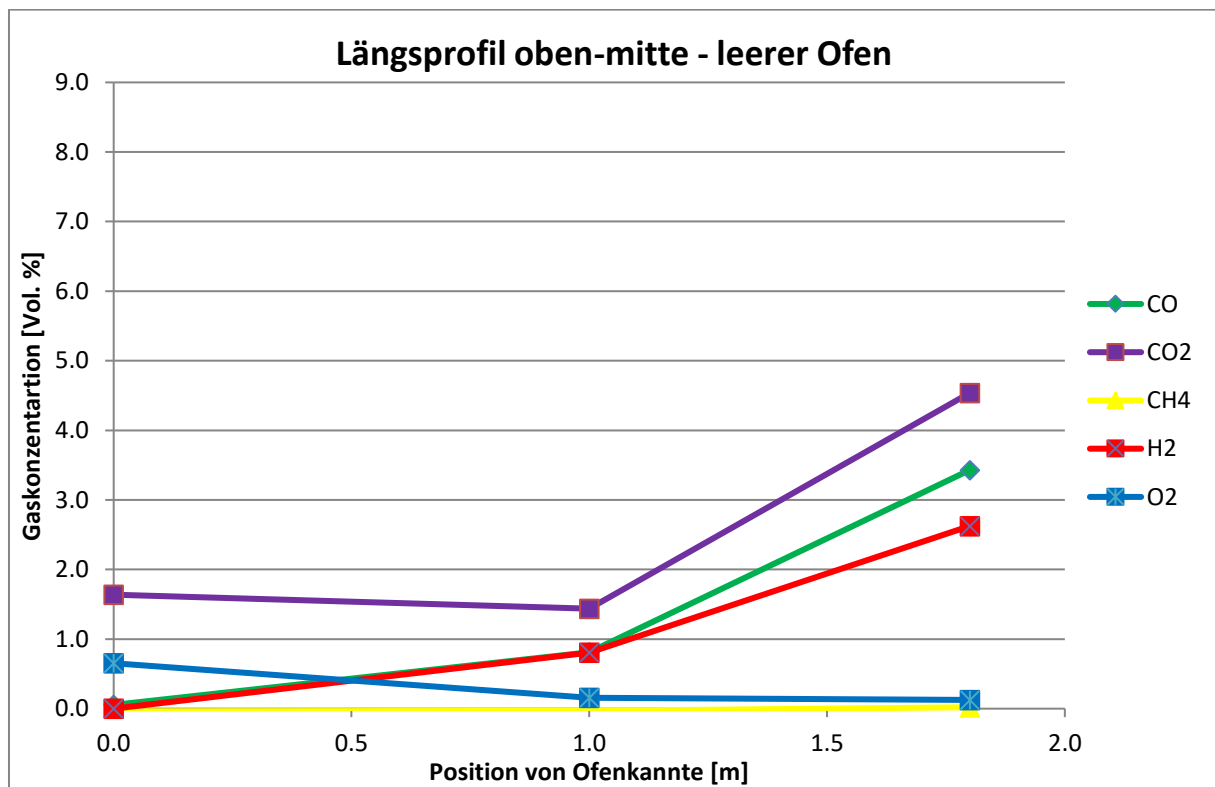


Abbildung 6.2.1-6: Längsprofil oben-mitte - Leerer Ofen

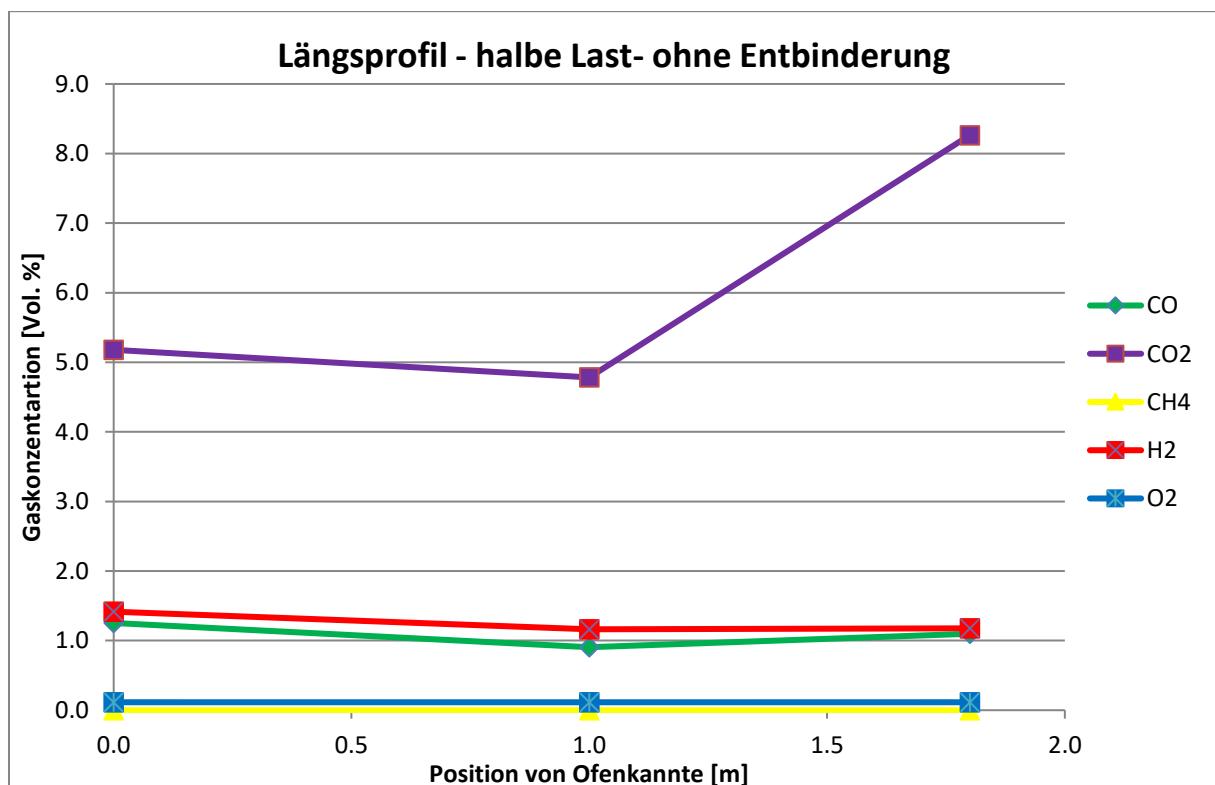


Abbildung 6.2.1-7: Längsprofil oben-mitte - halbe Last - ohne Entbinderung

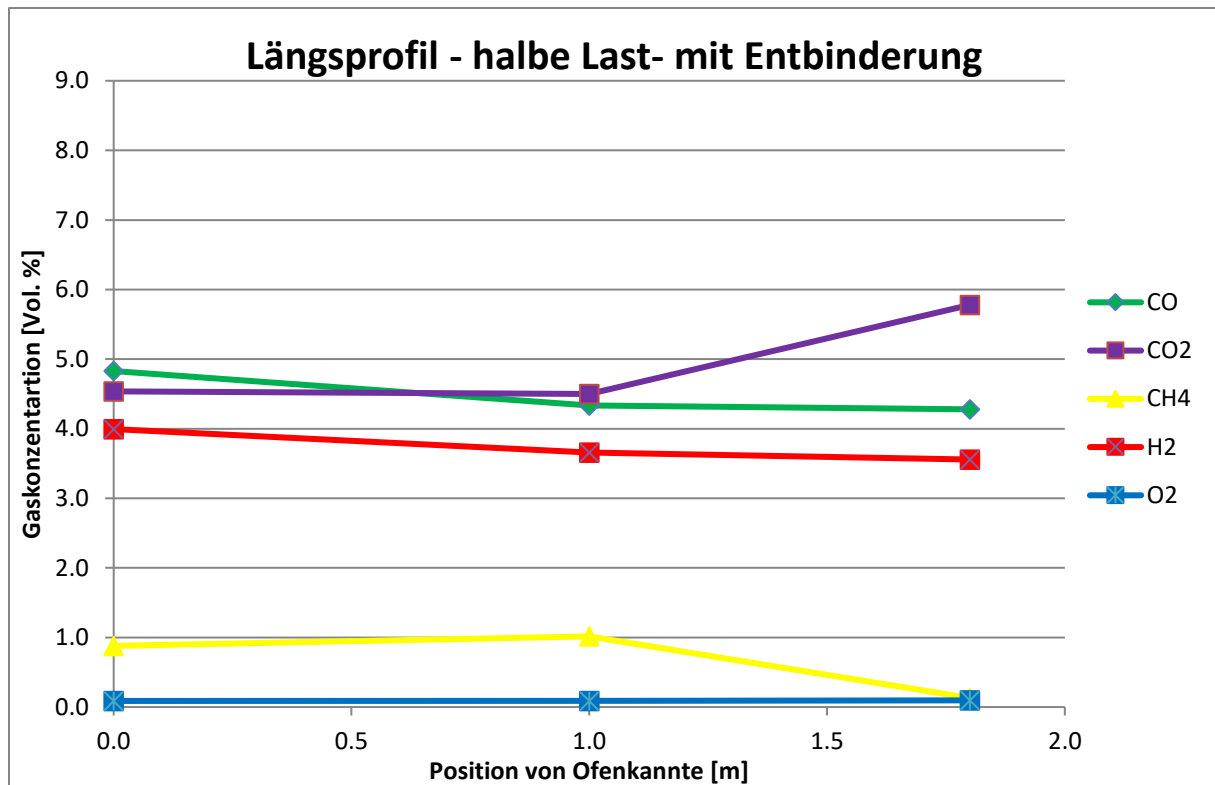


Abbildung 6.2.1-8: Längsprofil oben-mitte - halbe Last mit Entbinderung

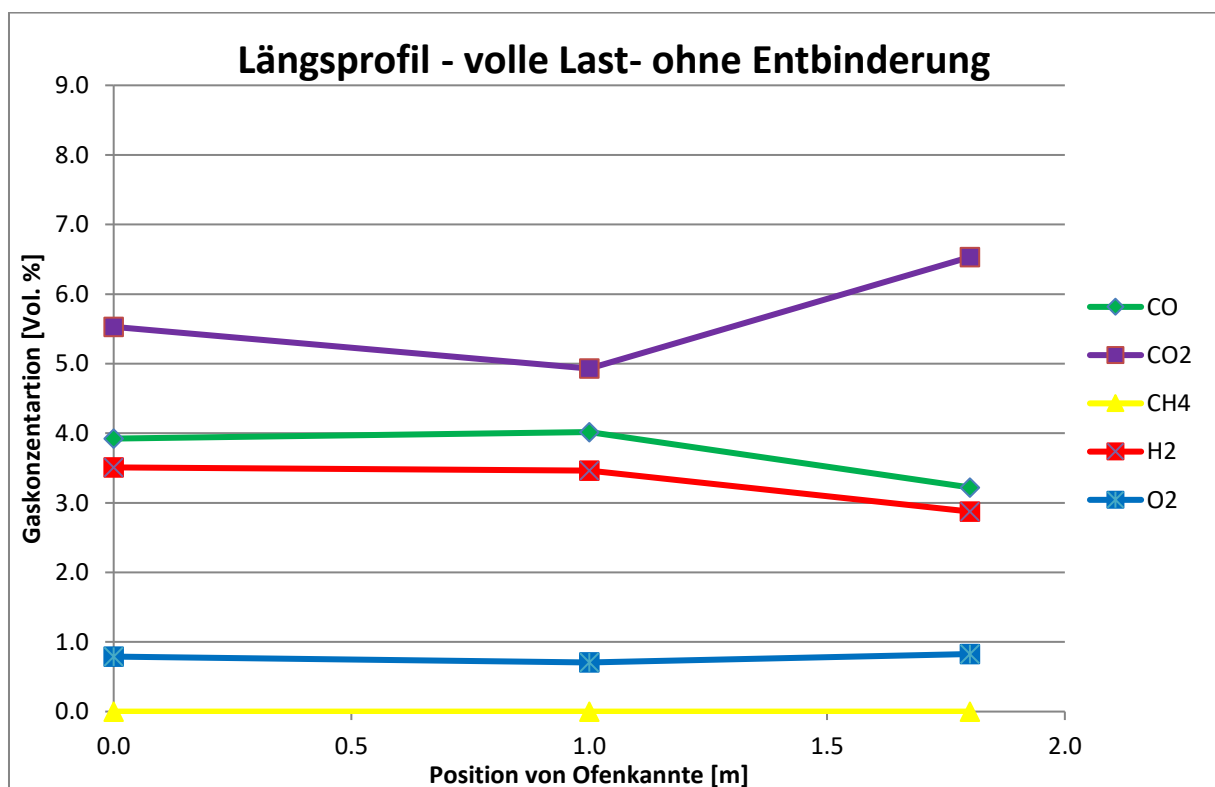


Abbildung 6.2.1-9: Längsprofil oben-mitte - volle Last - ohne Entbinderung

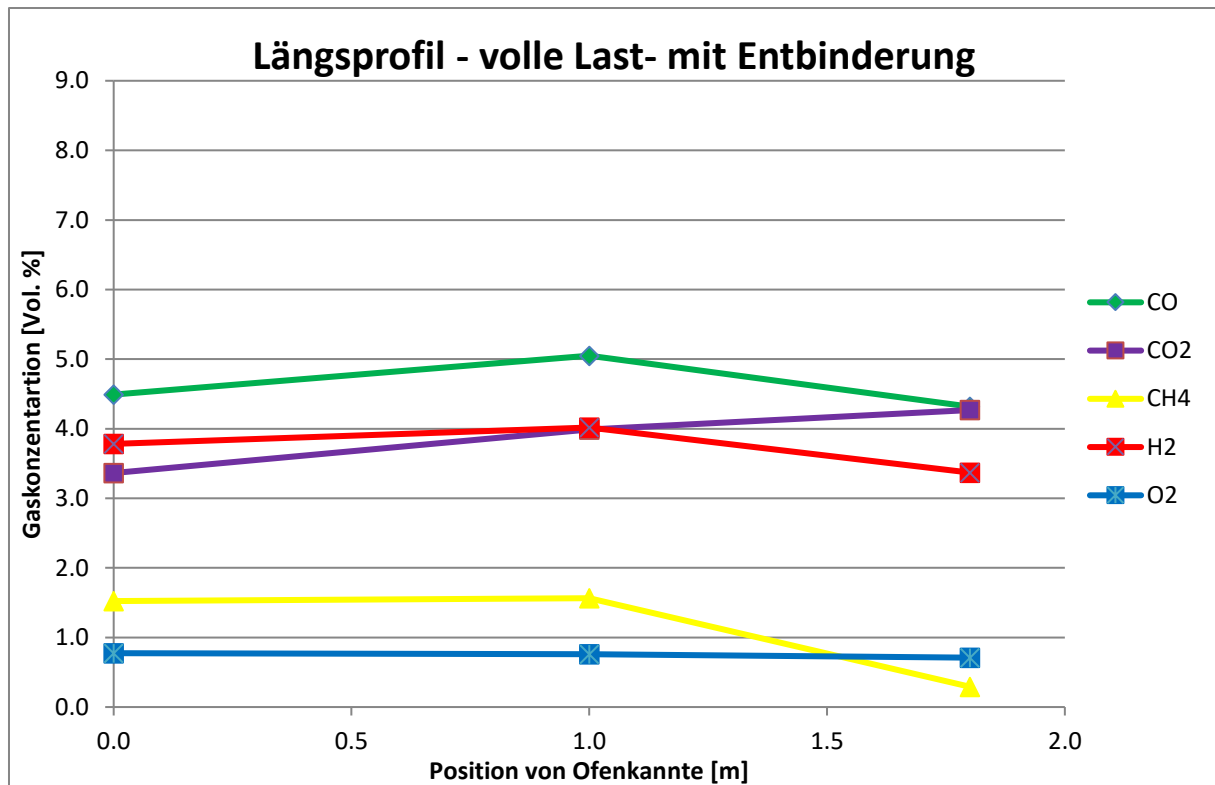


Abbildung 6.2.1-10: Längsprofil oben-mitte - volle Last mit Entbinderung

Querprofile

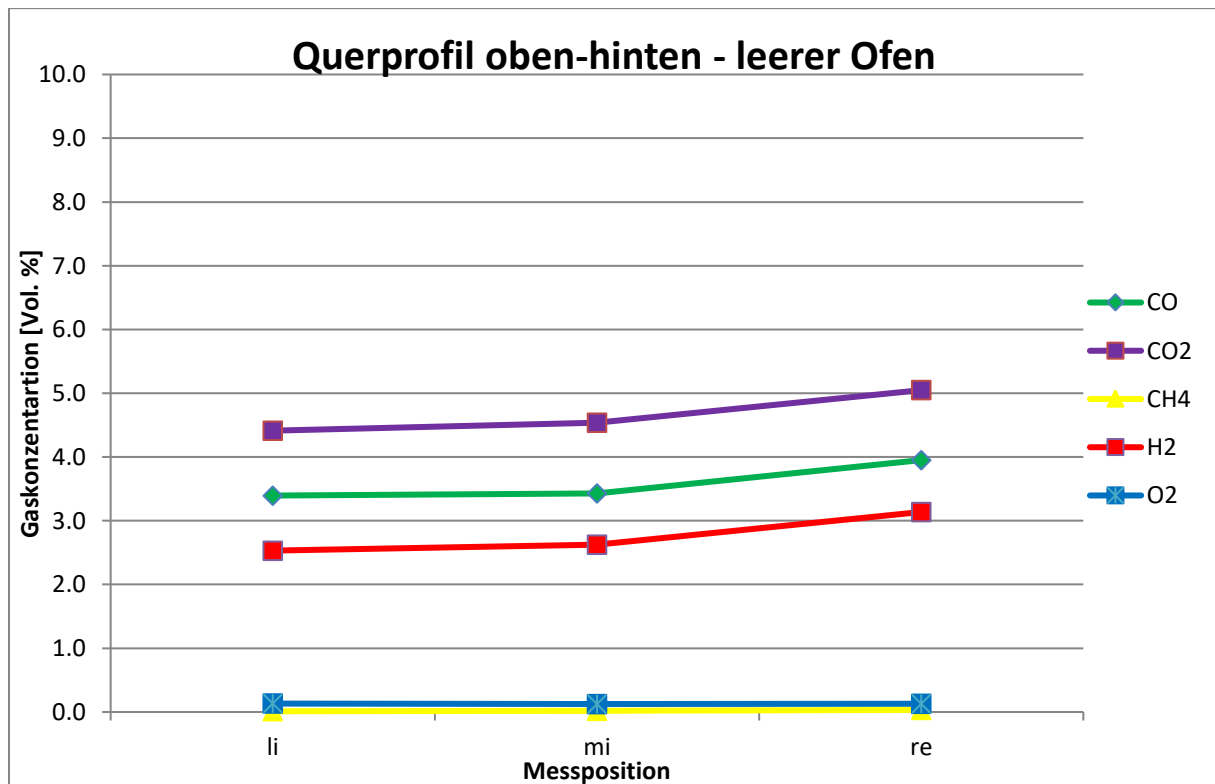


Abbildung 6.2.1-11: Querprofil oben-hinten - leerer Ofen

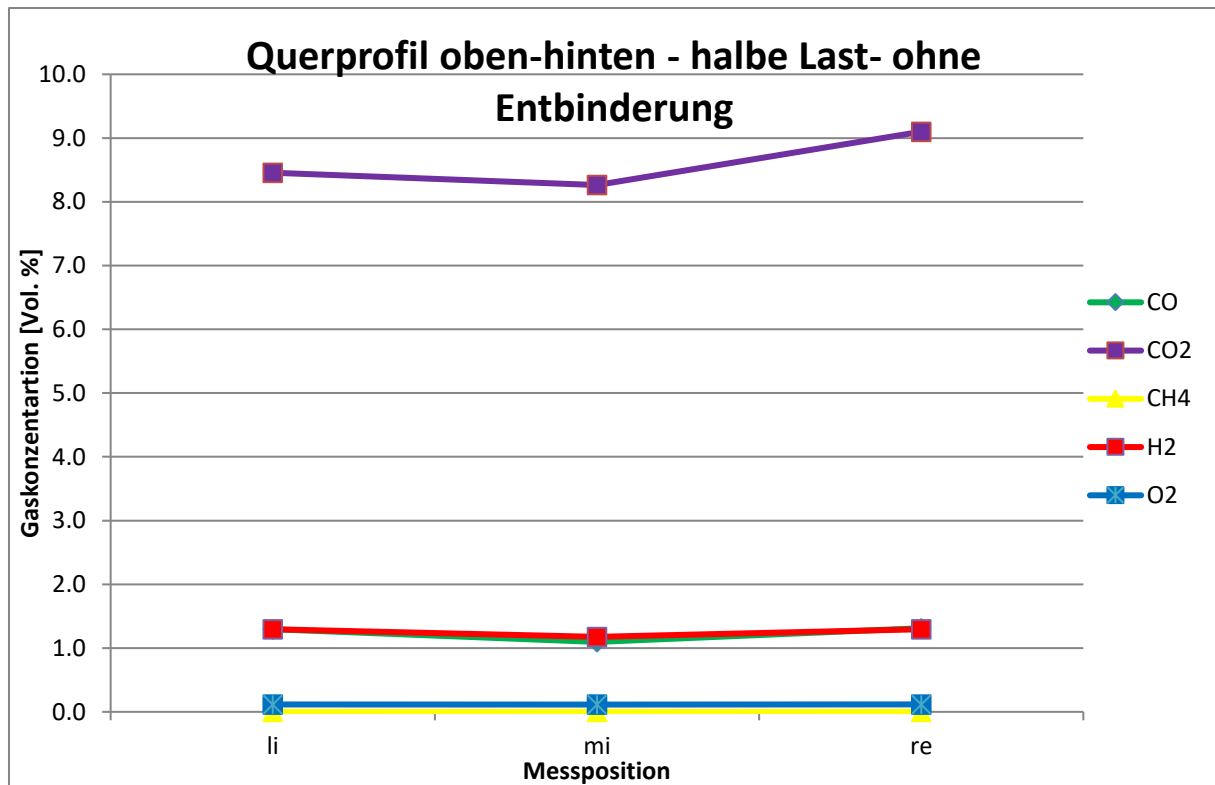


Abbildung 6.2.1-12: Querprofil oben-hinten - halbe Last - ohne Entbinderung

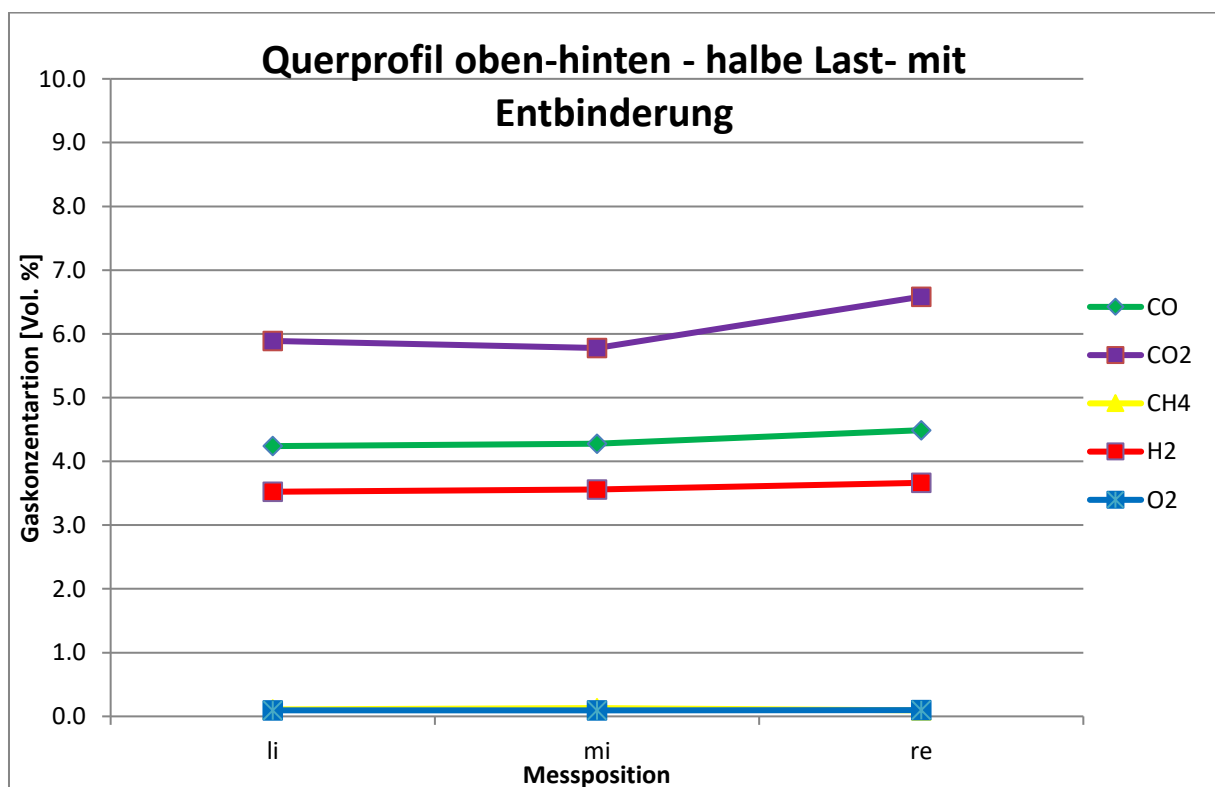


Abbildung 6.2.1-13: Querprofil oben-hinten - halbe Last mit Entbinderung

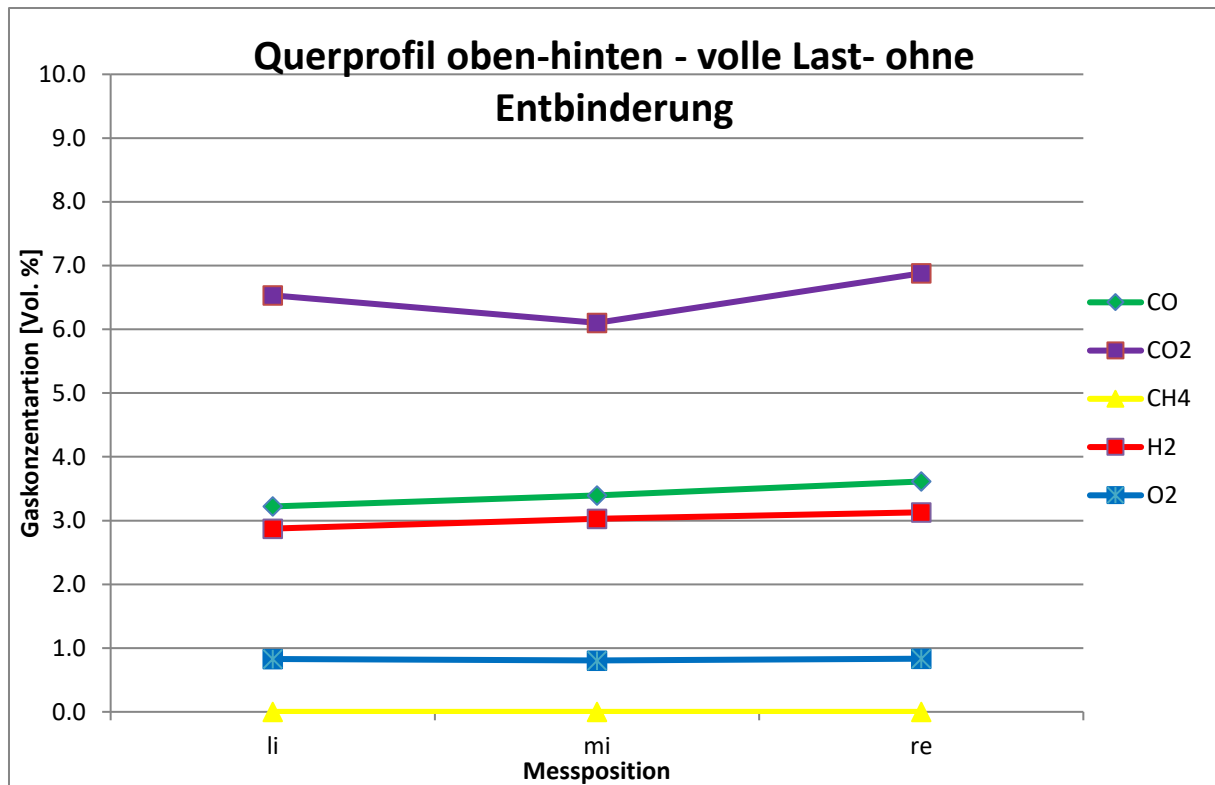


Abbildung 6.2.1-14: Querprofil oben-hinten - volle Last ohne Entbinderung

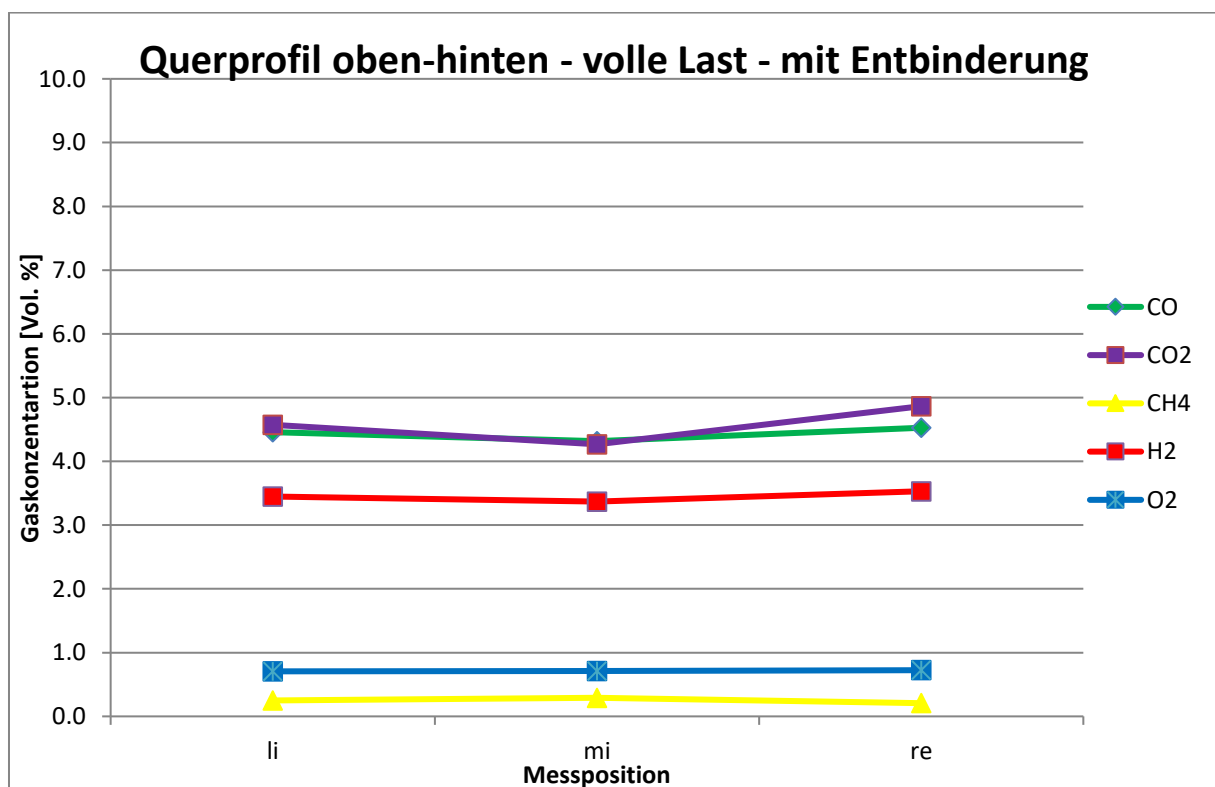


Abbildung 6.2.1-15: Querprofil oben-hinten - volle Last - ohne Entbinderung

6.2.2 Darstellung der Messergebnisse aus 06-2021

Werte Schlitten – Längsprofil unten-mitte

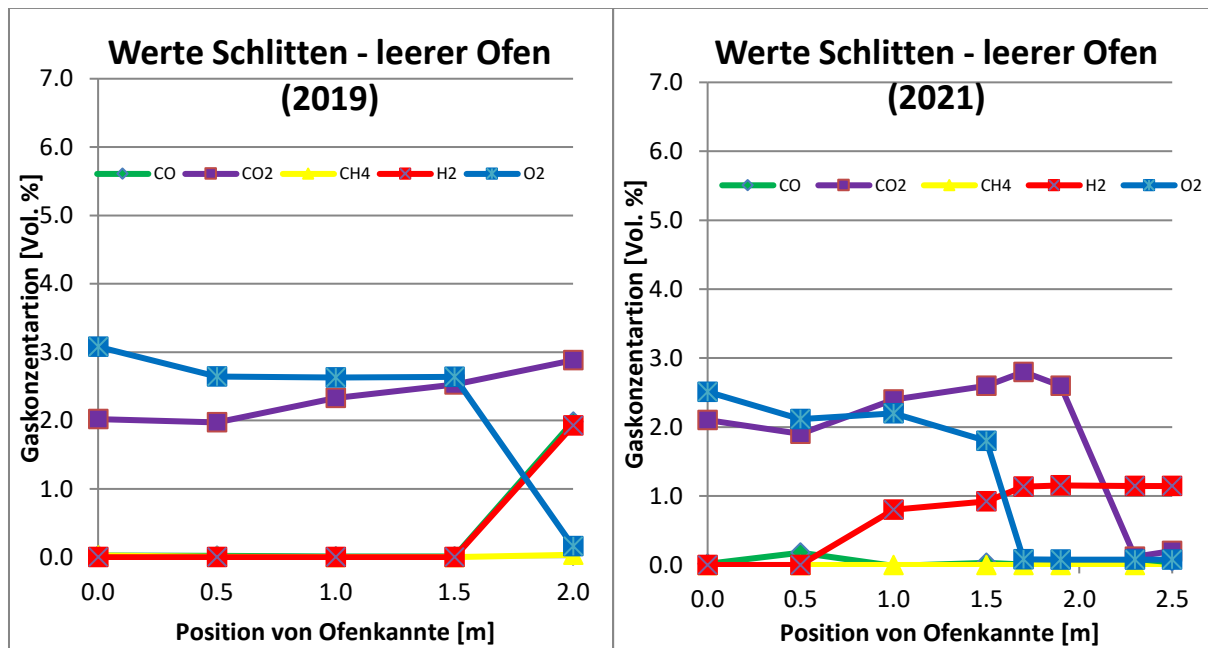


Abbildung 6.2.2-1: Ergebnisse Messschlitten – leerer Ofen

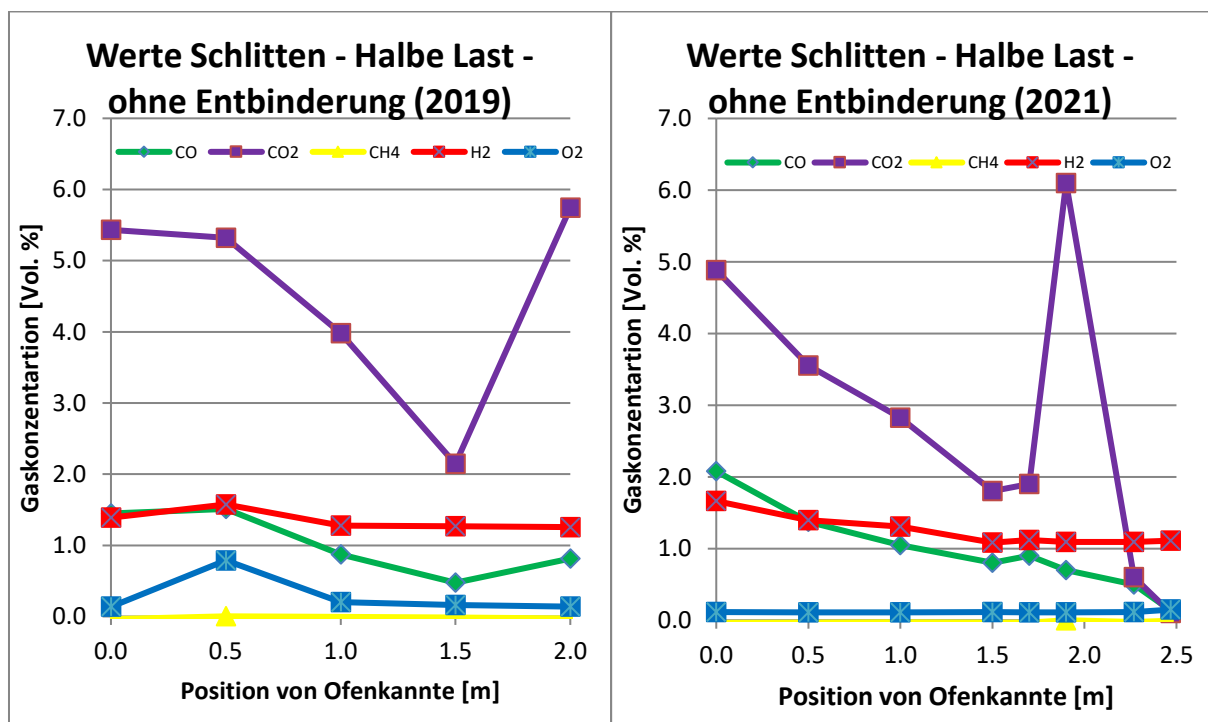


Abbildung 6.2.2-2: Ergebnisse Messschlitten – habe Beladung – ohne Entbinderung

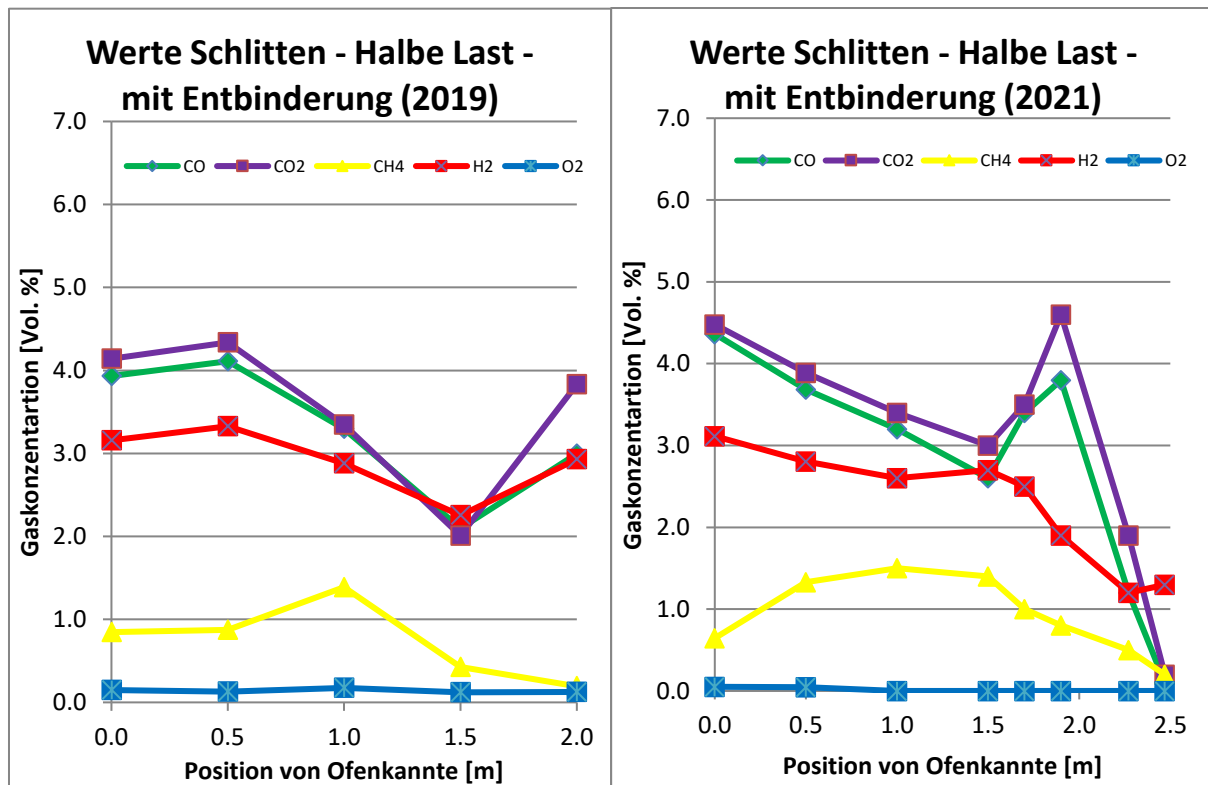


Abbildung 6.2.2-3: Ergebnisse Messschlitten – halbe Beladung – mit Entbinderung

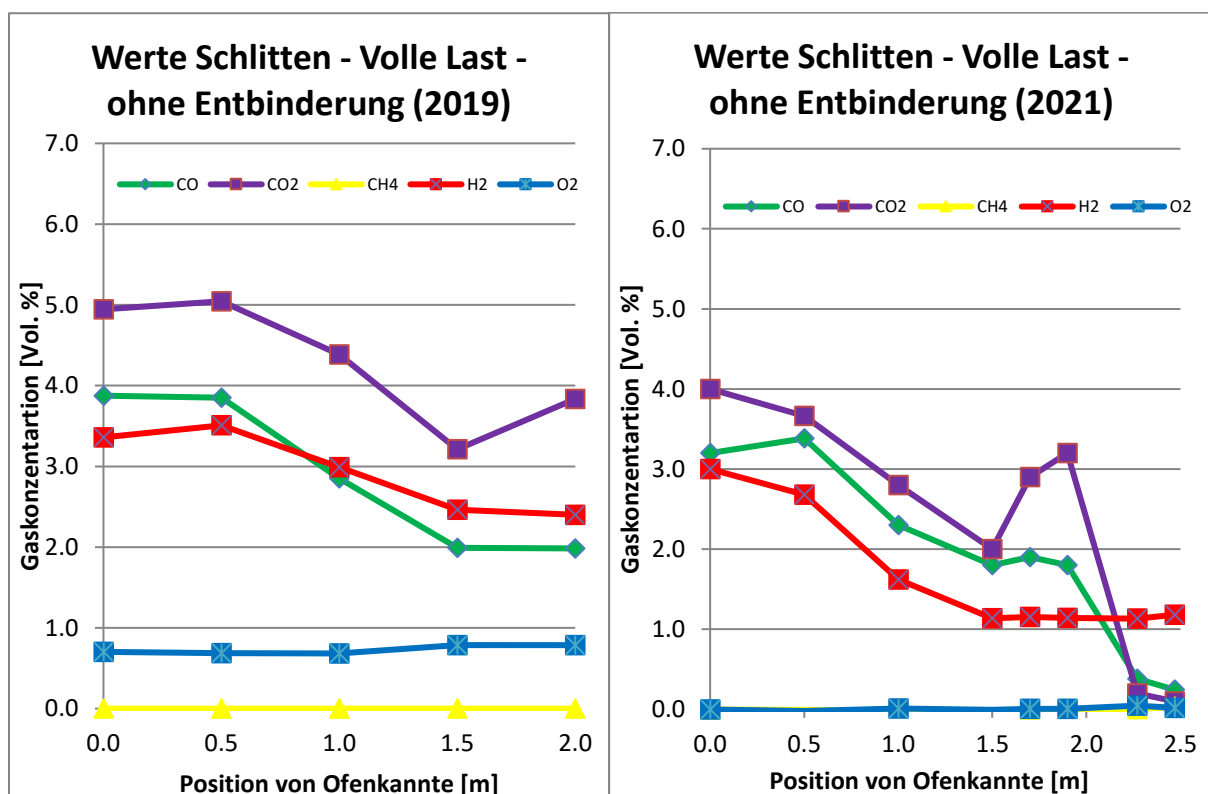


Abbildung 6.2.2-4: Ergebnisse Messschlitten – volle Beladung – ohne Entbinderung

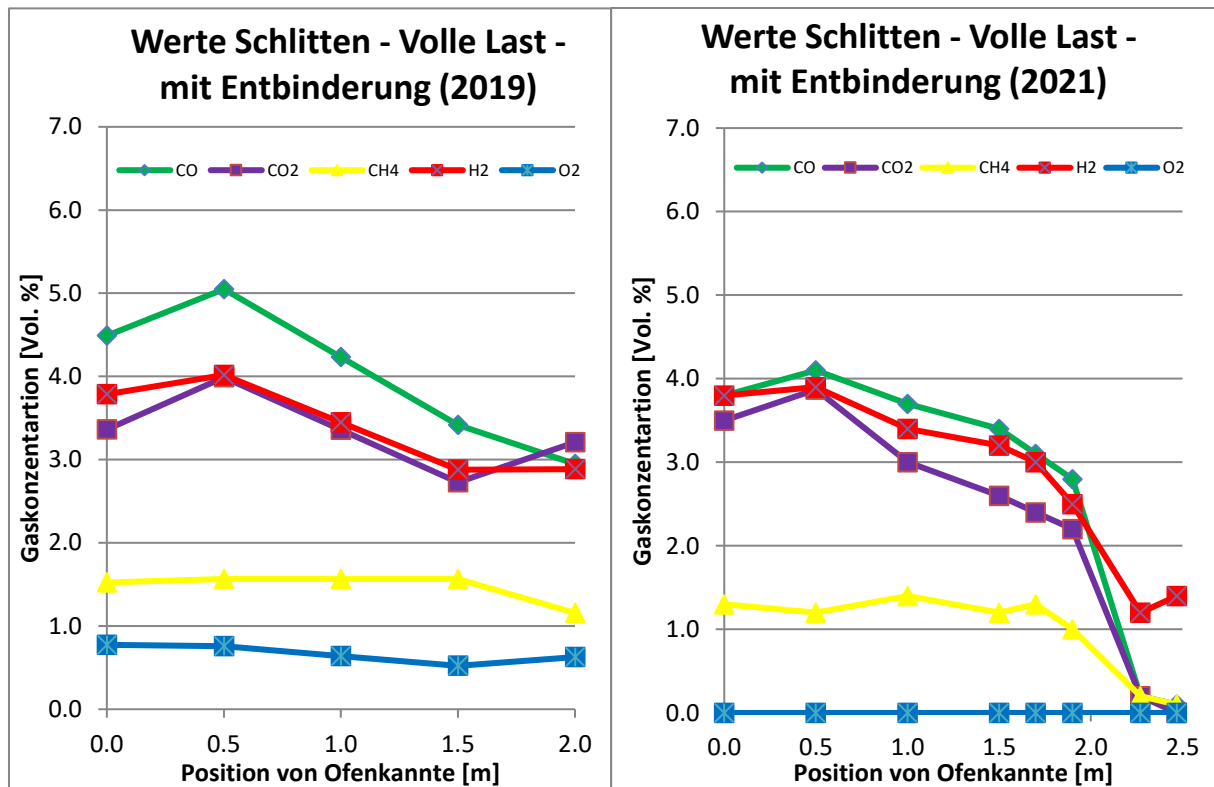


Abbildung 6.2.2-5: Ergebnisse Messschlitten – volle Beladung – mit Entbinderung