

Schlussbericht vom 31.12.2025

zum IGF-Vorhaben 01|F22893 N

Thema

Ammoniak als erneuerbar erzeugter Energieträger in der Ziegelindustrie – Untersuchung der Auswirkung auf die Ziegelqualität, Verbrennungsverhalten und Schadstoffemissionen; Kurztitel: NH₃-Ziegel

Berichtszeitraum

01.04.2023 bis 30.06.2025

Forschungsvereinigung

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
Hafenstraße 101
45356 Essen

Forschungseinrichtung(en)

Gas- und Wärme-Institut Essen e. V.
Hafenstraße 101
45356 Essen

Institut für Ziegelforschung Essen e. V.
Am Zehnthof 197
45307 Essen

Platz für ein Logo

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	III
1 Zusammenfassung.....	1
2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund	2
3 Stand der Forschung und Motivation	4
4 Forschungsziele und angestrebte Forschungsergebnisse	7
5 Brenngascharakterisierung von Erdgas, Ammoniak und Wasserstoff.....	9
6 Untersuchung des Laborbrenners für den Einsatz von Ammoniak	18
6.1 Experimentelle und CFD-Untersuchungen am Laborflammenprüfstand (GWI).....	18
6.2 NO _x -, NH ₃ -Schlupf- und N ₂ O-Emissionen	24
6.3 CFD-Simulation des Laborbrenners.....	29
7 Untersuchung kommerzieller Brennersysteme der Ziegelindustrie	33
7.1 Experimentelle Untersuchung ausgewählter und angepasster Brennersysteme im semi-industriellen Maßstab	33
7.2 Numerische Untersuchung der eingesetzten Brennersysteme und notwendige Anpassung der Brennergeometrie und Fahrweise	39
8 Untersuchung der Auswirkungen der Ammoniaknutzung auf die Ziegelqualität	44
8.1 Modellziegelbrand und Bestimmung der Produkteigenschaften	44
8.2 Untersuchungen der Material- und Produkteigenschaften, Analyse	47
8.3 Analyse der Ergebnisse (IZF)	51
8.4 Ökonomische und ökologische Analyse der Ergebnisse	52
9 Ausblick und Handlungsempfehlungen	53
10 Projektplan	56
10.1 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	56
11 Gegenüberstellung von Forschungszielen und Forschungsergebnissen	57
12 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	58
12.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen	58
12.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU.....	58
13 Transfermaßnahmen in die Wirtschaft.....	60
14 Danksagung.....	62
15 Verwendung der Zuwendung.....	62
16 Literaturverzeichnis.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Herstellung von Mauer- und Dachziegeln (vereinfacht) [8]	4
Abbildung 3.2: Prinzipskizze Tunnelofen und prinzipielle Brennkurve (Quelle: IZF)	5
Abbildung 3.3: Einfluss der Atmosphäre auf die Brennfarbe (Quelle: IZF)	6
Abbildung 5.1: Adiabate Flammentemperatur ($\lambda = 1$) und Selbstzündtemperatur von CH_4 , H_2 und NH_3 (Quelle: GWI)	13
Abbildung 5.2: Laminare Flammgeschwindigkeit ($\lambda = 1$), Mindestzündenergie und Zündbereich von CH_4 , H_2 und NH_3 (Quelle: GWI)	13
Abbildung 5.3: Heizwert ($25^\circ\text{C} / 0^\circ\text{C}$), Mindestluftbedarf, Luft- und Gasvolumenstrom ($P = 10 \text{ kW}$, $\lambda = 1$) von CH_4 , H_2 und NH_3 (Quelle: GWI)	14
Abbildung 5.4: Heizwert ($25^\circ\text{C} / 0^\circ\text{C}$) und adiabaten Flammentemperatur ($\lambda = 1$) von CH_4 - NH_3 - und H_2 - NH_3 -Gemischen (Quelle: GWI)	15
Abbildung 5.5: Adiabate Flammentemperatur von CH_4 , H_2 und NH_3 in Abhängigkeit von der Oxidatorzahl (Quelle: GWI)	15
Abbildung 5.6: Nicht-vorgemischte und vorgemischte Brenner (Quelle: GWI)	16
Abbildung 5.7: Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit von CH_4 , H_2 und NH_3 in Abhängigkeit von der Luftzahl (Quelle: GWI)	17
Abbildung 6.1: Laborbrennkammer mit additiv gefertigtem Brenner [18]	19
Abbildung 6.2: Schematischer Versuchsaufbau; Laborbrennkammer [37]	20
Abbildung 6.3: Flammenbilder bei NH_3 -Zumischung in Erdgas (oben) und in Wasserstoff (unten), Drallzahl 1,1, Luftzahl 1,2 (Quelle: GWI)	21
Abbildung 6.4: Fotografische Aufnahme einer 8-kW Wasserstoff-Luft-Flamme mit abweichender Kameraeinstellung (Quelle: GWI)	23
Abbildung 6.5: Beziehung zwischen der Strahlungsintensität E_λ und der Wellenlänge λ von $\phi = 1,0$ bei $P = 0,1 \text{ MPa}$. Das 40-fache des normalisierten Ergebnisses aus der HITRAN-Datenbank wurde als Wert des H_2O -Spektrums in dieser Abbildung dargestellt [39]	23
Abbildung 6.6: NO_x -Emissionen bei der Verbrennung von CH_4 - NH_3 und H_2 - NH_3 -Gemischen (Quelle: GWI)	25
Abbildung 6.7: NO_x -Emissionen bei Verbrennung von NH_3 mit verschiedener Luftzahl (Quelle: GWI)	27
Abbildung 6.8: NH_3 - und N_2O -Emissionen bei Zumischung von NH_3 in CH_4 und H_2 (Quelle: GWI)	28
Abbildung 6.9: NH_3 - und N_2O -Emissionen in Abhängigkeit der Luftzahl (Quelle: GWI)	29
Abbildung 6.10: Geometriemodellierung des Laborbrenners (Quelle: GWI)	31
Abbildung 6.11: CFD-Ergebnisse (Quelle: GWI)	32
Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage am GWI (Quelle: GWI)	33
Abbildung 7.2: Versuchsanlage mit eingebautem Lanzenbrenner (Quelle: GWI)	34
Abbildung 7.3: Industriebrenner für die Ziegelindustrie. Links Brenner 1; Rechts: Brenner 2	34
Abbildung 7.4: NO_x -Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850°C und 1.050°C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)	36
Abbildung 7.5: NH_3 -Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850°C und 1.050°C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)	37

Abbildung 7.6: N ₂ O-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)	39
Abbildung 7.7: CO-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab	39
Abbildung 7.8: Modellierung des semi-industriellen Versuchsofens für CFD-Simulationen (Quelle: GWI)	40
Abbildung 7.9: Temperaturfelder im semi-industriellen Ofen bei Einsatz von CH ₄ , H ₂ und NH ₃ (Quelle: GWI)	42
Abbildung 7.10: Wärmeströme über die Wände und thermischer Wirkungsgrad bei Einsatz von CH ₄ , H ₂ und NH ₃ (Quelle: GWI)	43
Abbildung 8.1: Angepasste Brennkurven der zu untersuchenden Ziegelproben (Quelle IZF)	44
Abbildung 8.2: Gefertigte Prüfkörper für die Versuchsdurchführung (Quelle IZF)	45
Abbildung 8.3: Besatzkonfiguration 1, bestehend aus Dach-, Vormauerziegel und Rundstäben zur Untersuchung der Biegezugfestigkeit (Quelle IZF)	45
Abbildung 8.4: Besatzkonfiguration 2, bestehend aus Hintermauerziegel und Rundstäben (Quelle IZF)	46
Abbildung 8.5: Positionierung des Besatzes im Versuchsofen (Quelle IZF)	46
Abbildung 8.6: Stickoxide während der Vormauer- und Dachziegelbrände	47
Abbildung 8.7: Sauerstoffanteil im Besatz B (Vormauer- und Dachziegel)	48
Abbildung 8.8: Farbdifferenz Delta E der Proben	48
Abbildung 8.9: Vergleich der Produktfarben unter dem Mikroskop (Quelle IZF)	49
Abbildung 8.10: Brennschwindung (links) und Brennverlust (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen	50
Abbildung 8.11: Rohdichte (links) und Druckfestigkeiten (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen	50
Abbildung 8.12: Wasseraufnahme (links) und Biegezugfestigkeiten (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen	51
Abbildung 10.1: Projektzeitplan	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Durchschnittlicher Energiebedarf Gas für Trocknung und Brand nach Produktgruppe (Quelle: IZF)	4
Tabelle 5.1: Qualitative sicherheits- und verbrennungstechnische Eigenschaften von CH ₄ , H ₂ und NH ₃ [26] [27]	11
Tabelle 6.1: Versuchsreihen für den Einsatz des Laborbrenners	20
Tabelle 7.1: Betriebsdaten der Brenner 1 und 2 am semi-industriellen Ofen	35
Tabelle 7.2: Randbedingungen der CFD-Simulation	40
Tabelle 8.1: Prognose der jährlichen Brennstoffkosten [15]	52
Tabelle 13.1: Durchgeführte Transfermaßnahmen während des Projektes	60

1 Zusammenfassung

Zur Erreichung der Klimaziele der Europäischen Union ist es notwendig, den Einsatz fossiler Brennstoffe deutlich zu reduzieren. Die Ziegelindustrie in Deutschland deckt heute noch einen großen Teil ihres Energiebedarfs durch die Verbrennung von Erdgas (teilweise auch anderer fossiler Brennstoffe), vor allem zur Bereitstellung der Prozesswärme für Trocknung und Brennen der Ziegel. Die damit verbundenen CO₂-Emissionen sind für die Branche ein zentrales Thema, da insbesondere Trocknung und Hochtemperaturbrand die energie- und emissionsintensivsten Prozessschritte darstellen [1]. Ziegel bestehen aus natürlichen Rohstoffen – überwiegend tonhaltigen und mineralischen Sedimenten, gegebenenfalls ergänzt durch Zuschlag- und Porosierungsmittel – die überwiegend regional gewonnen und aufbereitet werden [2]. Die Herstellung erfolgt in einem kontinuierlichen Hochtemperaturprozess: Nach Aufbereitung, Formgebung und Trocknung werden die Rohlinge in industriellen Öfen (typischerweise Tunnelöfen) gebrannt [2]. Dabei liegen die maximalen Brenntemperaturen je nach Produkt typischerweise im Bereich von etwa 850 bis 1.250 °C. Tunnelöfen arbeiten als kontinuierliche Anlagen - mit einer prozessbedingten Vorwärm-, Brenn- und Kühlzone [2]. Die Versorgungssicherheit mit Brennstoffen und Strom zur Bereitstellung der Prozesswärme ist deshalb ein existenzielles Thema für die Ziegelindustrie, weil Störungen die Prozessstabilität und damit Produktqualität und Anlagensicherheit beeinträchtigen können [1].

Eine vielversprechende, mögliche Strategie zur Reduktion der CO₂-Emissionen besteht in der Nutzung von Erdgas-Ammoniak-Gemischen oder reinem Ammoniak (NH₃) als H₂-Derivat und CO₂-freiem Brennstoff entlang der gesamten Ziegelherstellungskette. Dies betrifft insbesondere den Brennofenbereich und die zugehörigen Feuerungssysteme, da hier der größte Anteil der energiebedingten Emissionen entsteht [1], [3].

Ein Wechsel des Brennstoffs gestaltet sich jedoch komplex, da Erdgas-NH₃-Gemische bzw. Ammoniak andere thermochemische Eigenschaften aufweisen. Ammoniak besitzt eine geringe Reaktivität, niedrige Flammgeschwindigkeit, einen engen Zündbereich sowie hohe Zündenergie bzw. eine hohe Selbstzündtemperatur und stellt damit andere Anforderungen an Brenner- und Ofenführung [3], [4], [5]. Zusätzlich ist Ammoniak-Verbrennung mit spezifischen Emissionsherausforderungen verbunden, insbesondere erhöhter NO_x-Bildung sowie potenzieller N₂O-Entstehung und möglichem NH₃-Schlupf [3], [4], [5]. Diese Effekte beeinflussen Flammenstabilität, Wärmeübertragung und das Temperatur- sowie Atmosphärenprofil im Ofen – und damit direkt die Produktqualität (z. B. Sintergrad, Farbe, Dichte, Porenstruktur und Maßhaltigkeit). Diese Zusammenhänge sind für typische Tunnelöfen der Keramikindustrie und deren spezielle Prozessführung noch nicht erforscht [1], [2] [3].

Im vorliegenden Forschungsprojekt lag der Fokus auf der Analyse der Auswirkungen von Erdgas-NH₃-Gemischen in industriellen Ziegelbrennöfen. Neben den Effekten auf die Ziegelqualität wurden auch die Auswirkungen auf die Verbrennung, die Ofenatmosphäre und die Emissionscharakteristik untersucht [3], [4]. Die Ergebnisse zeigen, welche Auswirkungen bei der Verwendung von NH₃-reichen Erdgasen bzw. Ammoniak auf Verbrennung, Ofenbetrieb und Produktqualität in der Ziegelindustrie zu erwarten sind. Damit liefern sie eine Grundlage für die sichere, effiziente und qualitätsgerechte Umstellung bestehender Feuerungssysteme und Prozessketten hin zu klimafreundlicheren Brennstoffen [1], [3].

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

2 Wissenschaftlich-technischer Hintergrund

Die deutsche Ziegelindustrie ist ein bedeutender Teil der Baustoffbranche und umfasst die Produktgruppen Pflasterklinker, Vormauer-, Hintermauer- sowie Dachziegel. Im Jahr 2021 erzielte die Branche mit rund 6.500 Beschäftigten einen Umsatz von etwa 1,36 Milliarden Euro [6], [7]. Die „Roadmap für die Ziegelindustrie“ [8] definiert die langfristigen Ziele einer klimaneutralen Produktion bis 2050 sowie die hierfür erforderlichen Maßnahmen. Durch die Anpassung des Klimaschutzgesetzes 2021 wurde dieses Ziel zusätzlich verschärft mit der Verpflichtung, bereits bis zum Jahr 2045 treibhausgasneutral zu produzieren. Diese Vorgabe erfordert von der Branche ein deutlich erhöhtes Maß an technologischer Innovation und Umsetzungsaktivitäten.

Die Herstellung grobkeramischer Produkte wie Hintermauerziegel, Dachziegel oder Klinker ist traditionell ein energieintensiver Prozess. Besonders in den Verfahrensschritten Trocknen und Brennen, letzteres bei Temperaturen von bis zu 1.250 °C, wird bisher überwiegend Erdgas als fossiler Energieträger eingesetzt. Die hierdurch verursachten CO₂-Emissionen sind erheblich: Rund 56 % der gesamten Emissionen der Branche, entsprechend etwa 1,73 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr, entfallen auf den Erdgasverbrauch [8]. Neben Kohlenstoffdioxid treten weitere emissionsrelevante Stoffe wie Gesamtkohlenstoff, Fluorwasserstoff und Schwefeloxide auf, deren Mengen und Zusammensetzung je nach Produktgruppe und Rohstoffzusammensetzung deutlich variieren können.

In den vergangenen Jahren wurden in der überwiegend mittelständisch geprägten Ziegelindustrie (KMU-Struktur) zahlreiche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz umgesetzt. Ein zentraler Ansatz bestand darin, die beim Brennprozess entstehende Abwärme für vorgelagerte Prozessschritte nutzbar zu machen. Der daraus entstandene Ofen-Trockner-Verbund gilt als eine der wichtigsten technologischen Entwicklungen zur Energieeinsparung in der Branche und wird bis heute in vielen Werken erfolgreich betrieben. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Kopplung von Trockner und Ofen betrieblich nicht immer realisierbar ist, insbesondere bei schwankender Produktionsauslastung oder bei spezifischen Produkthanforderungen. Unter aktuellen Rahmenbedingungen gilt dieses Konzept daher nicht mehr als allein zielführend.

Weitere Optimierungsschritte, etwa durch verbesserte Umwälzung der Ofenatmosphäre oder Weiterentwicklung der Brennertechnologie, konnten den Energiebedarf reduzieren, reichen jedoch nicht aus, um eine vollständige Klimaneutralität zu erreichen. Die konsequente Substitution fossiler Brennstoffe durch CO₂-neutrale Energieträger ist daher unverzichtbar.

Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Nutzung von grünen Gasen, insbesondere Wasserstoff und Ammoniak, als alternative Brennstoffe. Beide Energieträger bieten das Potenzial, die CO₂-Emissionen der Branche erheblich zu reduzieren. Kurz- bis mittelfristig bestehen jedoch infrastrukturelle und wirtschaftliche Hürden. So ist bis zum Jahr 2030 keine flächendeckende Versorgung mit grünem Wasserstoff absehbar. Gleichzeitig konkurrieren verschiedene Industriezweige, etwa die chemische Industrie, um die begrenzten verfügbaren Mengen. Aus wirtschaftlicher und technischer Sicht erscheint daher insbesondere der Einsatz von grünem Ammoniak als Brennstoff prüfenswert, da dieser eine deutlich bessere Speicher- und Transportfähigkeit aufweist.

Allerdings bringt der Einsatz von Ammoniak als Brennstoff neue technische Herausforderungen mit sich. Aufgrund seiner unterschiedlichen Verbrennungseigenschaften im Vergleich zu Erdgas können bestehende Ofenbrennsysteme und Regelkonzepte nicht ohne Weiteres übernommen werden. Veränderungen in der Ofenatmosphäre wirken sich unmittelbar auf das Brennverhalten, die thermische

Belastung der feuerfesten Ausmauerung sowie auf die Produktqualität aus. Zudem sind die Auswirkungen auf Schadstoffemissionen, insbesondere Stickoxide (NO_x), die durch den Brennstoff-Stickstoffanteil entstehen, noch nicht hinreichend untersucht. Auch mögliche Wechselwirkungen zwischen der geänderten Atmosphärenzusammensetzung (z. B. erhöhter Wasserdampfgehalt) und rohstoffbedingten Emissionen wie Fluorwasserstoff oder Schwefeloxid sind bislang unzureichend erforscht.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden daher die besonderen Herausforderungen beim direkten Einsatz von Ammoniak als Brennstoff systematisch untersucht. Ziel war es, die Auswirkungen einer schrittweisen oder vollständigen Substitution von Erdgas durch Ammoniak auf die Ofenatmosphäre, die Verbrennungstechnik und die Produkteigenschaften detailliert zu analysieren. Dabei standen insbesondere die Parameter Farbe, Druck- und Zugfestigkeit der keramischen Produkte im Fokus. Parallel dazu wurden kontinuierlich die Emissionen gemessen, um den Einfluss der veränderten Brennstoffzusammensetzung auf das Emissionsverhalten zu erfassen.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die zukünftige Transformation der Ziegelindustrie hin zu klimaneutralen Produktionsprozessen und liefern praxisrelevante Daten für die Anpassung von Brenner- und Ofentechnologien.

3 Stand der Forschung und Motivation

Ziegel werden aus heimischen Rohstoffen wie Ton und Lehm hergestellt und zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer sowie volle Recyclingfähigkeit aus. In **Abbildung 3.1** sind die einzelnen Prozessschritte – vom Rohstoffabbau über Aufbereitung, Trocknen und Brennen bis zum Versand – schematisch dargestellt. Während die meisten Prozessschritte überwiegend elektrische Energie erfordern, sind insbesondere das Brennen und teilweise das Trocknen auf Verbrennungsprozesse mit fossilen Energieträgern angewiesen. Diese gelten als Hauptquelle der CO₂-Emissionen in der Ziegelproduktion und stehen daher im Mittelpunkt aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Dekarbonisierung der Branche.

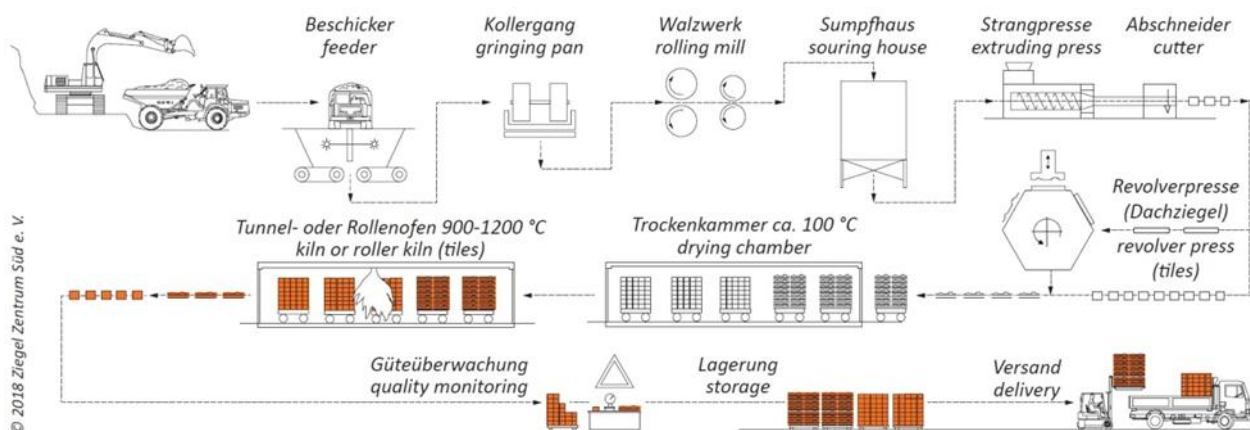


Abbildung 3.1: Herstellung von Mauer- und Dachziegeln (vereinfacht) [8]

Die Trocknung der geformten Rohlinge wird in Kammer- oder Durchlauftrocknern realisiert, die zu einem großen Teil mit der Abwärme des Tunnelofens betrieben werden. Der Gasbedarf der Zusatzheizung wird auf diese Weise so gering wie möglich gehalten. Die Trocknungszeit variiert je nach Format und Rohdichte. Danach werden die getrockneten Rohlinge bei ca. 850 bis 1.250 °C im gasbeheizten Tunnelofen gebrannt. Die wesentlichen Energieträger, die für den Produktionsprozess von Ziegeln zum Einsatz kommen, sind somit Gas und Strom. Lediglich im Produktsegment der Pflasterklinker oder Vormauerziegel kommt zur Farb- und Oberflächengestaltung zusätzlich Kohle zum Einsatz.

Tabelle 3.1: Durchschnittlicher Energiebedarf Gas für Trocknung und Brand nach Produktgruppe (Quelle: IZF)

Produktgruppe	Gasbedarf / kWh/t	Gasbedarf / GJ/t	CO ₂ -Äquivalent / kg/t
Hintermauerziegel	380	1,37	77
Vormauerziegel/Klinker	690	2,48	139
Dachziegel	970	3,49	196

Durch die unterschiedlichen Rohstoffe und Produktionsweisen unterscheidet sich der durchschnittliche Energiebedarf der verschiedenen Produktgruppen erheblich, siehe **Tabelle 3.1**. Die Unterschiede zeigen sich auch in den für den Emissionshandel relevanten CO₂-Benchmarks.

Während des Brandes im Tunnelofen, der als Prinzipskizze in der **Abbildung 3.2** dargestellt ist, durchlaufen die Rohlinge verschiedene Temperaturzonen. Es finden zahlreiche Partikelreaktionen,

chemische Reaktionen, Phasenumwandlungen und -neubildungen sowie Sinterprozesse statt, die zu einer Verfestigung des Rohstoffes und letztlich zu einem gebrannten Scherben führen.

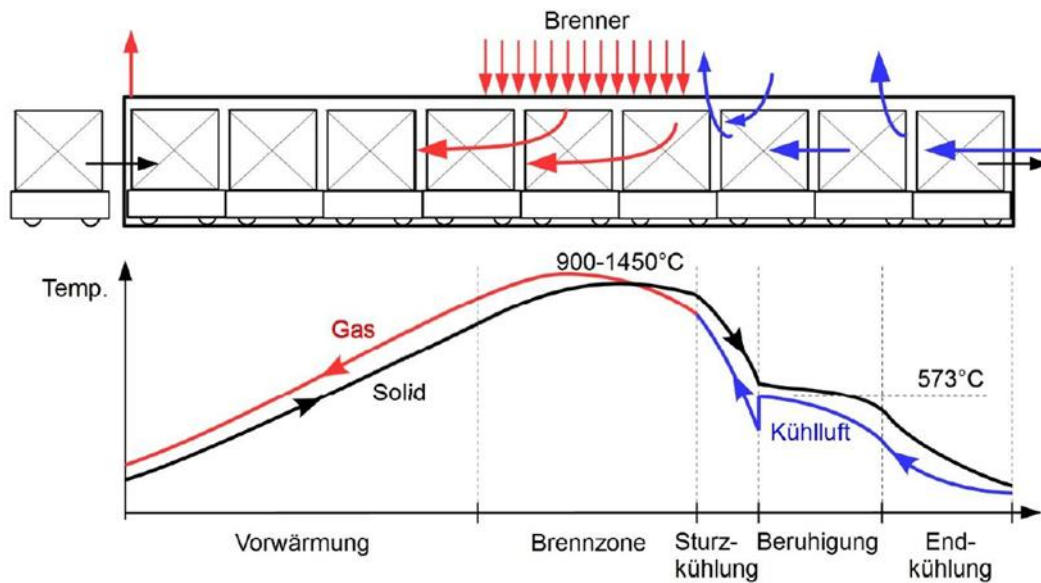


Abbildung 3.2: Prinzipskizze Tunnelofen und prinzipielle Brennkurve (Quelle: IZF)

Da diese Reaktionen mit Dehnungs- und Schwindungsprozessen, wie zum Beispiel dem Quarzsprung verbunden sind, ist es erforderlich eine materialspezifische, optimale Brennkurve einzuhalten, um die Brennbruchquote zu minimieren. Sowohl die Anordnung der Brenner (Seiten- oder Deckenbrenner), als auch deren Betriebsweise ermöglichen eine vergleichmäßigte Temperaturverteilung innerhalb des Ofenquerschnittes. Die Gasströmung sorgt für eine gleichmäßige Erwärmung des dicht gesetzten Brenngutes. Die Brennguterwärmung beruht sowohl auf dem Wärmeübergang an die Produkte über Strahlung und Konvektion als auch auf der Wärmeleitung in die Produkte.

Des Weiteren sind die oben erwähnten Rohstoffreaktionen auch im hohen Maße von der Zusammensetzung der Ofenatmosphäre abhängig. Der Sauerstoffanteil in der Ofenatmosphäre beeinflusst maßgeblich die Farbe der Produkte, wie es in der **Abbildung 3.3** zu erkennen ist, und wird zur gezielten Einstellung gewünschter Farbnuancen genutzt. Der Einfluss des geänderten Wasserdampf- und CO_2 -Anteiles in der Ofenatmosphäre unter Normaldruck auf die Produkte ist bisher in der Literatur nicht belegt. Aufgrund der Wechselwirkung mit Wasserdampf beim Brand und die Aufnahme von Feuchte aus der Raumluft lässt vermuten, dass sich die veränderten Wasserdampfkonzentrationen in der Sinteratmosphäre und im Abgas nachhaltig auf die Keramisierung der Produkte auswirken [9].

Die Dehydroxilationstemperaturen der Tonminerale verschieben sich bei veränderten Wasserdampfanteilen und es kommt zu Lösungserscheinungen und der Bildung von Hydratphasen. In der Literatur finden sich keine Angaben zur Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff für die Herstellung grobkeramischer Produkte. Belegt ist eine intensive Wechselwirkung mit Wasserdampf während der Sinterung beim Cold Sintering [10] dem Hydrothermalsintern [11] oder der hydrothermal unterstützten Verfestigung von Tonkeramik [12].

Aus energetischer Sicht wurden in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten zahlreiche Optimierungen des Tunnelofenprozesses vorgenommen, die dazu geführt haben, dass der Energiebedarf

deutlich reduziert werden konnte. So konnten neben Dämmmaßnahmen zum Beispiel auch Umwälzeinrichtungen [13] im Bereich der Aufheizzone etabliert werden, die für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung im Besatz des Tunnelofenwagens sorgen. Insgesamt handelt es sich jedoch, trotz aller bislang realisierten Maßnahmen, um einen energieintensiven Prozess.

Zur Erzielung der Klimaziele 2045/2050 muss jedoch, neben allen Prozessoptimierungen, die benötigte Prozesswärme aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Der Einsatz rein elektrischer Tunnelöfen ist aufgrund der verfügbaren Technologien und den derzeitigen Beschränkungen bei der Bereitstellung der benötigten Flächenleistung nicht realisierbar. Zudem wäre durch einen kompletten Technologiewechsel ein immenser Investitionsbedarf bei geringeren Produktionsleistungen zu erwarten. Durch den Einsatz von „grünem NH_3 “, könnte dies mit deutlich weniger Aufwand und Kosten geschehen. Die Umstellung des Brennstoffs kann nach vorheriger Prüfung der Auswirkungen auf den Brennprozess und die erzielbaren Produkteigenschaften und die Schadstoffemissionen, in jedem Tunnelofendurch Anpassung der Beheizungseinrichtung und Ofensteuerung, als sogenanntes Retro-Fitting durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit und die höheren sicherheitstechnischen Anforderungen müssen zusätzlich betrachtet werden, waren aber nicht Inhalt dieses Vorhabens. Der Nachweis des prinzipiellen Einsatzes von NH_3 , speziell auf die Produktqualität, ist aber im Vorfeld, auch aus Risiko- und Kostengründen für die Betreiber, zu erbringen.



Abbildung 3.3: Einfluss der Atmosphäre auf die Brennfarbe (Quelle: IZF)

4 Forschungsziele und angestrebte Forschungsergebnisse

Zur Erreichung der Klimaziele der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union muss der Einsatz fossiler Brennstoffe und somit die Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO_2) in den Sektoren Industrie, Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Verkehr deutlich gesenkt werden. Durch die nationale Wasserstoffstrategie [14] wird vor allem dem Energieträger Wasserstoff (H_2) in diesem Zusammenhang eine übergeordnete Rolle in der zukünftigen Energielandschaft zugesprochen. Damit steigt die Notwendigkeit, die anthropogenen CO_2 -Emissionen in Thermoprozessanlagen verschiedener Industriebranchen, wie Glas, Keramik, Eisen und NE-Metall, durch den Einsatz erneuerbarer Gase zu reduzieren. Zudem gewinnen die Themen Speicherung und Versorgungssicherheit zunehmend an Bedeutung. In diesem Kontext gilt regenerativ hergestelltes Ammoniak (NH_3) als vielversprechender Energieträger zur Senkung der CO_2 -Emissionen [15]. Grundsätzlich wird durch die ab 2021 vereinheitlichte und sukzessiv steigende CO_2 -Bepreisung deutlich, dass der Einsatz regenerativer Gase wie H_2 oder NH_3 künftig wirtschaftlich attraktiver sein wird. Es ist daher zu erwarten, dass die NH_3 -Verbrennung insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) einen wichtigen Technologiepfad darstellt, um Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit gleichzeitig zu sichern. Dieses Projekt leistet hierzu einen entscheidenden Beitrag, indem es die energetische Nutzung von Brenngasen erneuerbaren Ursprungs in industriellen Anlagen von KMU untersucht. Dadurch kann deren Wettbewerbsfähigkeit trotz steigender CO_2 -Kosten langfristig erhalten bleiben.

Branchenübergreifend befinden sich viele energieintensive Produktionsanlagen im Besitz kleiner und mittelständischer Unternehmen, die häufig nicht über ausreichende finanzielle und personelle Ressourcen für Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem komplexen Themenfeld verfügen. Mit den im Projekt erzielten Ergebnissen und Handlungsempfehlungen werden daher grundlegende Vorarbeiten geschaffen, die direkt in die Praxis der Anlagenbetreiber zur Herstellung keramischer Materialien einfließen können. Darüber hinaus trägt die Veröffentlichung und Aufbereitung der Ergebnisse zur Steigerung der Akzeptanz für die Nutzung von NH_3 als Brennstoff in der Industrie bei. Besonders für Anlagenbetreiber hat die Abschätzung der Auswirkungen von NH_3 als Brennstoff auf das Nutzgut höchste Priorität, um die Eignung für den praktischen Einsatz zu bewerten. Gleichzeitig müssen Wege aufgezeigt werden, um die Einhaltung der geltenden Schadstoffgrenzwerte (insbesondere NO_x) auch beim Einsatz von NH_3 sicherzustellen.

Neben den Anlagenbetreibern profitieren auch Zulieferfirmen, Komponentenhersteller und Abnehmer von der Entwicklung CO_2 -reduzierter Produkte. Nur durch kontinuierliche Optimierung der industriellen Thermoprozesstechnik und der Energieumwandlung in technischen Verbrennungsprozessen lässt sich langfristig technologische Führungsposition sichern, der Industriestandort Deutschland stärken und eine ökologisch nachhaltige Produktion gewährleisten.

In den kommenden Jahrzehnten werden sich auf dem Weltmarkt neue Absatzmöglichkeiten für H_2 -Technologien eröffnen, zu denen auch die NH_3 -Nutzung als Brennstoff gehört. Gleichzeitig bestehen hohe Übertragbarkeitspotenziale auf andere industrielle Anwendungsfelder, etwa in der Glas- und NE-Metallindustrie. Auch in der chemischen Verfahrenstechnik sowie im Kraftwerks- und Dampferzeugungsbereich werden Anwendungsmöglichkeiten gesehen. Dabei kann ein gezielter Wissens- und Technologietransfer, insbesondere hinsichtlich sicherheits- und regelungstechnischer Konzepte, wertvolle Synergieeffekte erzeugen.

Die im Rahmen dieses Projekts erzielten Vorarbeiten sollen Unternehmen und Forschungseinrichtungen verschiedener industrieller Zweige dazu motivieren, neue Technologien zu entwickeln und weiter voranzutreiben. Durch die aktive Beteiligung der Forschungsstellen in zahlreichen Fachausschüssen und Gremien der Ziegel- und Keramikindustrie sowie in angrenzenden Industriebereichen wird ein schneller und umfassender Ergebnistransfer gewährleistet. Dies schafft eine breite Akzeptanz für den CO₂-neutralen Brennstoff Ammoniak und fördert dessen praktische Umsetzung.

5 Brenngascharakterisierung von Erdgas, Ammoniak und Wasserstoff

Während in der aktuellen politischen Landschaft starkes Interesse an der zunehmenden Verbreitung von grünen Brennstoffen wie Wasserstoff oder Ammoniak besteht, ist die Sichtweite in der thermoprozesstechnischen Industrie teilweise verhaltener [16], [17]. Trotz dieser Zurückhaltung werden sich industrielle Anwender von Gas, auf den Einsatz von grünen Brenngasen einstellen müssen. Gleiches gilt für Anlagenbauer, Hersteller von Anlagenkomponenten, Brennersystemen und Messgeräten, die sich mit der Entwicklung und Anpassung ihrer Produkte auf diese Veränderungen einstellen müssen.

Im Kontext der Energiewende gilt die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse unter Nutzung erneuerbarer Energien aus Wind- und Solarstrom als eine zentrale Option zur Defossilisierung von Industrie, Wärme und Verkehr. Besonders günstige Bedingungen für eine kosteneffiziente Produktion finden sich in Regionen mit hoher und kontinuierlicher Verfügbarkeit von Wind- und Solarenergie, die häufig in äquatornahen oder küstennahen Gebieten liegen. Die großskalige Bereitstellung von grünem Wasserstoff aus solchen Standorten erfordert jedoch robuste Transport- und Speicherketten. Der direkte Transport von Wasserstoff ist aufgrund seiner geringen volumetrischen Energiedichte, der notwendigen hohen Drücke bzw. tiefen Temperaturen sowie des damit verbundenen infrastrukturellen und sicherheitstechnischen Aufwands technisch anspruchsvoll und kostenintensiv. Vor diesem Hintergrund wird die chemische Bindung von Wasserstoff in Form von Derivaten wie Ammoniak (NH_3) als alternativer Energieträger und Transportvektor intensiv diskutiert [18]. Ammoniak kann aus grünem Wasserstoff und Stickstoff über den Haber-Bosch-Prozess synthetisiert, in großen Mengen transportiert und in Deutschland entweder direkt genutzt oder wieder in Wasserstoff und Stickstoff zurückverwandelt („Cracking“) werden. Diese Route eröffnet neue Optionen entlang der internationalen Wasserstoffwertschöpfung, ist jedoch mit spezifischen Vorteilen und Nachteilen verbunden [19].

Vorteile von Ammoniak als Wasserstoffträger

Ein wesentlicher Vorteil von NH_3 liegt in der vergleichsweise hohen volumetrischen Energiedichte gegenüber gasförmigem Wasserstoff. Dadurch können größere Energiemengen pro Transportvolumen bewegt werden, was die Logistik insbesondere über lange Distanzen erleichtert.

Ammoniak lässt sich aufgrund seines niedrigen Siedepunktes von $-33,4\text{ °C}$ bei atmosphärischem Druck mit relativ geringem energetischem Aufwand in den flüssigen Zustand überführen [20]. Neben dieser so genannten Kühlverflüssigung stellt auch die Druckverflüssigung eine technische Option dar. Bei der Druckverflüssigung wird bei einer Temperatur von 20 °C ist und einem Druckniveau von etwa 9 bis 10 bar das Ammoniak verflüssigt. Gegenüber der konventionellen Wasserstoffverflüssigung weist flüssiger Ammoniak als Speichermedium eine signifikant höhere volumetrische Wasserstoffdichte auf. Unter Bedingungen von 10 bar und 27 °C werden etwa 106 kg H_2 pro Kubikmeter erreicht, was einer Erhöhung von über 50 % im Vergleich zu flüssigem Wasserstoff entspricht [21]. Ein weiterer struktureller Vorteil besteht in der vorhandenen globalen Infrastruktur für Ammoniak: Produktion, Lagerung, Schiffstransport, Hafenumschlag und Sicherheitsstandards sind seit Jahrzehnten etabliert, da NH_3 ein zentraler Grundstoff der chemischen Industrie und der Düngemittelproduktion ist. Dadurch lassen sich Skaleneffekte nutzen und Investitionen in völlig neue Transportketten reduzieren. Darüber hinaus ist Ammoniak kohlenstofffrei und kann bei der Anwendung

– je nach Prozessführung – ohne direkte CO₂-Emissionen eingesetzt werden. Direkte Nutzungsoptionen bestehen beispielsweise in der chemischen Industrie, in geeigneten Verbrennungs- oder Gasturbinenprozessen sowie perspektivisch in der maritimen Schifffahrt. In solchen Anwendungen entfällt der Umweg der Rückverwandlung, was Effizienzgewinne ermöglicht [22].

Nachteile und Herausforderungen von Ammoniak

Neben seinen Vorteilen weist Ammoniak jedoch auch mehrere Nachteile auf. Ammoniak ist toxisch, korrosiv und bereits in niedrigen Konzentrationen gesundheitsschädlich. Dies erhöht die Anforderungen an Materialauswahl, Dichtheit, Sensorik, Notfallkonzepte und Genehmigungsverfahren entlang der gesamten Kette. Insbesondere bei großskaligen Importterminals und Verteilnetzen ist ein konsequentes Risikomanagement erforderlich [23].

Energetisch ist die NH₃-Route mit Umwandlungsverlusten verbunden. Sowohl die Synthese von Ammoniak aus H₂ und N₂ als auch gegebenenfalls die spätere Rückverwandlung zu H₂ erfordern zusätzliche Energie. Bei der direkten energetischen Nutzung von Ammoniak ergeben sich zudem prozesstechnische Herausforderungen: NH₃ weist eine geringe Flammgeschwindigkeit und hohe Zündtemperaturen auf, was stabile Verbrennung erschweren kann. Außerdem besteht die Gefahr der Bildung von Stickoxiden (NO_x) sowie von unverbranntem Ammoniak („NH₃-Slip“), sodass aufwändige Brennergeometrien und eine erweiterte Abgasnachbehandlung nötig sein kann [24].

Vor- und Nachteile der Rückverwandlung von NH₃ zu H₂ (Cracking)

Die Rückverwandlung von Ammoniak zu Wasserstoff ermöglicht es, NH₃ als Transportmedium zu nutzen, während am Zielort Wasserstoff in bestehende oder geplante H₂-Anwendungen (z. B. Stahlindustrie, Raffinerien, Mobilität oder Brennstoffzellen) eingespeist werden kann. Das erhöht die Systemflexibilität und erlaubt eine sektorübergreifende Nutzung.

Allerdings ist das Cracking selbst ein energieintensiver Prozess, der typischerweise hohe Temperaturen und Katalysatoren erfordert. Dadurch entstehen zusätzliche Effizienzverluste in der Kette, die sich in höheren spezifischen Strom- bzw. Energiekosten für den resultierenden Wasserstoff niederschlagen. Eine weitere Herausforderung ist die Reinheit des produzierten Wasserstoffs. Für viele Anwendungen – insbesondere PEM-Brennstoffzellen oder Syntheseprozesse mit empfindlichen Katalysatoren – müssen Rest-NH₃-Gehalte extrem niedrig sein. Dies erfordert nachgeschaltete Aufreinigungs- und Trennstufen, die zusätzliche Kosten und Komplexität verursachen. Außerdem ist der Cracking-Prozess technologisch zwar grundsätzlich bekannt, befindet sich aber für sehr große Durchsatzmengen und variable Lastprofile noch in der Optimierungs- und Demonstrationsphase, insbesondere im Hinblick auf Dynamik, Lebensdauer der Katalysatoren und Gesamtsystemintegration [25].

Bezüglich des Einsatzes von NH₃ in der Ziegelindustrie sind vor der Implementierung zwei grundlegende Fragestellungen zu klären, um Betriebsfehler sowie Produktionsausfall- oder -mängel zu vermeiden:

1. Wie beeinflusst der Einsatz von Ammoniak das Verbrennungsverhalten?
2. Welchen Einfluss hat der Einsatz von Ammoniak auf die Produktqualität?

Eine eingehende Analyse der grundlegenden Eigenschaften von Methan, Wasserstoff und Ammoniak, auf die in diesem Kapitel eingegangen wird, ist erforderlich, um die Auswirkungen von Ammoniak besser nachvollziehen können. Die Daten bieten einen Rahmen bei der Interpretation und Bewertung von Ergebnissen, die aus experimentellen Versuchsreihen und/oder CFD-Simulationen (CFD: Computational Fluid Dynamics, dt. numerische Strömungssimulation) gewonnen werden. Eine ausführliche Analyse ermöglicht die Identifikation potenzieller Herausforderungen und Chancen bei der Verwendung von Ammoniak. **Tabelle 5.1** vermittelt einen ersten Eindruck zu den qualitativen sicherheits- und verbrennungstechnischen Eigenschaften von Methan, Wasserstoff und Ammoniak.

Tabelle 5.1: Qualitative sicherheits- und verbrennungstechnische Eigenschaften von CH₄, H₂ und NH₃ [26] [27]

Methan	Wasserstoff
<ul style="list-style-type: none"> - ungiftig - nicht ätzend oder reizend - Treibhausgas - geruchslos - farblos - nicht radioaktiv - leichter als Luft -> flüchtig - verbrennt mit bläulicher Flamme 	<ul style="list-style-type: none"> - ungiftig - nicht ätzend oder reizend - umweltneutral - geruchslos und geschmacksneutral - farblos - nicht radioaktiv - viel leichter als Luft -> sehr flüchtig - verbrennt mit fast unsichtbarer Flamme - (UV-Strahlung im nicht-sichtbaren Spektrum) - nicht korrosiv, aber wirkt auf einige Materialien versprödet
Ammoniak	
<ul style="list-style-type: none"> - giftig - ätzend / stark reizend (v. a. für Augen, Haut und Atemwege) - kein Treibhausgas, aber indirekt klimawirksam über NO_x-/N₂O-Bildung bei Nutzung - farblos - nicht radioaktiv - leichter als Luft, aber stark wasserlöslich → bildet mit Feuchte Aerosole/Nebel; Ausbreitung stark umgebungsabhängig - schwer entzündlich im Vergleich zu H₂/CH₄ (hohe Zündtemperatur, enge Zündgrenzen, geringe Flammgeschwindigkeit) - Verbrennung möglich, jedoch NO_x-Bildung und Gefahr von NH₃-Slip (unverbrannter Ammoniak) → Abgasnachbehandlung nötig - korrosiv gegenüber bestimmten Metallen (z. B. Kupfer, Messing, Zink) → Materialwahl wichtig 	

Hauptenergieträger der Ziegelindustrie ist Erdgas. Es wird hauptsächlich im Tunnelofen zum Brennen und für die gegebenenfalls erforderliche Zuheizung der Trocknerluft eingesetzt. Für die Dekarbonisierung liegt zurzeit das Augenmerk auf der Verwendung von regenerativen Gasen, wie Wasserstoff und Ammoniak. Unabhängig von der Verfügbarkeit wäre eine zentrale Versorgung für den

Industriezweig, entsprechend dem Erdgasnetz, die einfachste Bereitstellung der Gase. Für den Energieträger Ammoniak wird dieser Versorgungsweg nicht zur Verfügung stehen. Eine dezentrale Bereitstellung über Tankwagen, LKW und Zug, wäre denkbar, stellt aber eine hohe logistische Herausforderung bei einem Bedarf von rund 20 t/Tag im Mittel für ein Ziegelwerk dar. Zudem sind die Werke sehr dezentral und ländlich gelegen, so dass weite Transportwege zu erwarten sind. Andererseits ist mit einem Ausbau des Wasserstoffnetzes in diesen Gebieten ebenfalls zeitnah nicht zu rechnen, so dass der Einsatz von H₂-Derivaten wie Ammoniak wieder relevant wird.

Die Verwendung von alternativen Gasen wird intensiv geprüft. Wesentlich sind dabei die Auswirkungen auf die Produktqualität und die keramtechnischen Eigenschaften. Für den Betrieb ist eine Bereitstellung aus Druckbehältern prinzipiell möglich. Die wasserschutzrechtlichen Bedingungen erfordern eine größere Investition und entsprechende Genehmigungsverfahren. Zum jetzigen Zeitpunkt wird die Verwendung von NH₃ in Zumischung zum Erdgas und im Weiteren in Wasserstoff, als zukünftiges Brenngas, geprüft.

Analyse der Verbrennungseigenschaften von CH₄, H₂ und NH₃

Die adiabate Verbrennungstemperatur stellt eine theoretische Größe dar und gibt die maximale Temperatur unter adiabaten Bedingungen im Verbrennungsprozess an [28], [29], [24]. Die adiabate Flammentemperatur beeinflusst die Ofenraumtemperatur und die maximal auftretende Temperatur im Ofen. Während ersteres die Produktqualität beeinflussen kann, spielen die lokal auftretenden maximal Temperaturen in Kombination mit der Anwesenheit von Stickstoff und Sauerstoff eine wichtige Rolle bei der Bildung von thermischen NO_x. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die thermische NO-Bildung unter anderem stark von der maximalen Temperatur abhängt, sodass in erster Instanz von einer erhöhten NO-Emission bei der Verbrennung eines Brenngases mit einer hohen adiabaten Verbrennungstemperatur ausgegangen werden kann. Dies kann anhand zahlreicher Untersuchungen [30] [31] [32] [33] bestätigt werden. Bei der Verbrennung von brennstoffstickstoffhaltigen Brenngasen, wie z. B. NH₃ oder HCN können zudem brennstoffgebundene NO_x-Emissionen entstehen. Daher muss in so einem Fall zusätzlich der Brennstoff-NO-Pfad berücksichtigt werden [34] [28] [29] [24] [35].

Die **Abbildung 5.1** zeigt, dass bei Einsatz von Wasserstoff die adiabate Flammentemperatur um etwa 150 °C ansteigt, während bei einem Wechsel von Erdgas zu Ammoniak die adiabate Flammentemperatur um etwa 150 °C sinkt. Die Selbstzündtemperatur beträgt für Methan 630 °C, für Wasserstoff 520 °C und für Ammoniak 650 °C. Unterhalb dieser Temperaturen können die Gase nicht von allein in einem Gemisch mit Luft zünden. Um eine Zündung bei Umgebungstemperatur zu initiieren, ist Zündenergie erforderlich. Wasserstoff braucht mindestens eine Zündenergie von etwa 0,02 mJ, Erdgas etwa das 15-fache mehr (0,3 mJ) und Ammoniak sogar das 700-fache (14 mJ).

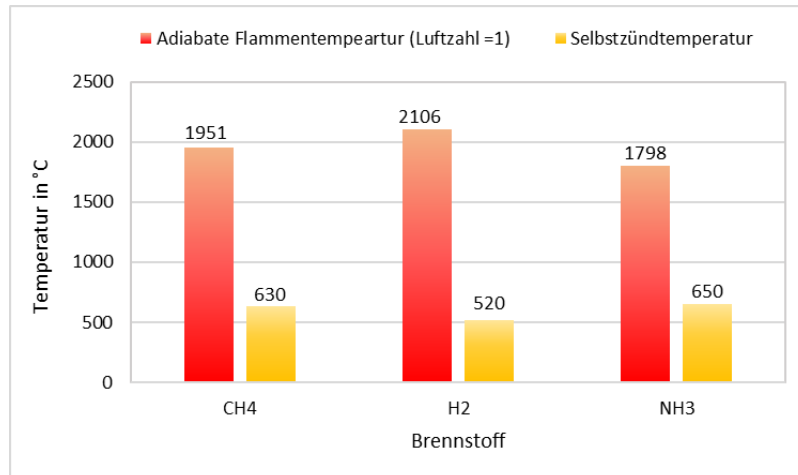


Abbildung 5.1: Adiabate Flammentemperatur ($\lambda = 1$) und Selbstzündtemperatur von CH₄, H₂ und NH₃ (Quelle: GWI)

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Flammenwicklung sowie die anschließende Stabilisierung der Flamme. Diese werden durch Kombination vom Zündbereich, minimale Zündenergie und der laminaren Flammgeschwindigkeit bestimmt. Die Zündgrenzen geben an, welche Brenngaskonzentrationen in der Luft enthalten sein müssen, damit eine stabile Verbrennung des Brenngas-Luft-Gemisches erfolgen kann. Außerhalb dieser Zündgrenzen steht entweder zu wenig Brenngas zur Verfügung, damit sich eine stabile Reaktion etablieren kann, oder es ist zu viel Oxidator vorhanden und die Flamme wird quasi im Ansatz erstickt.

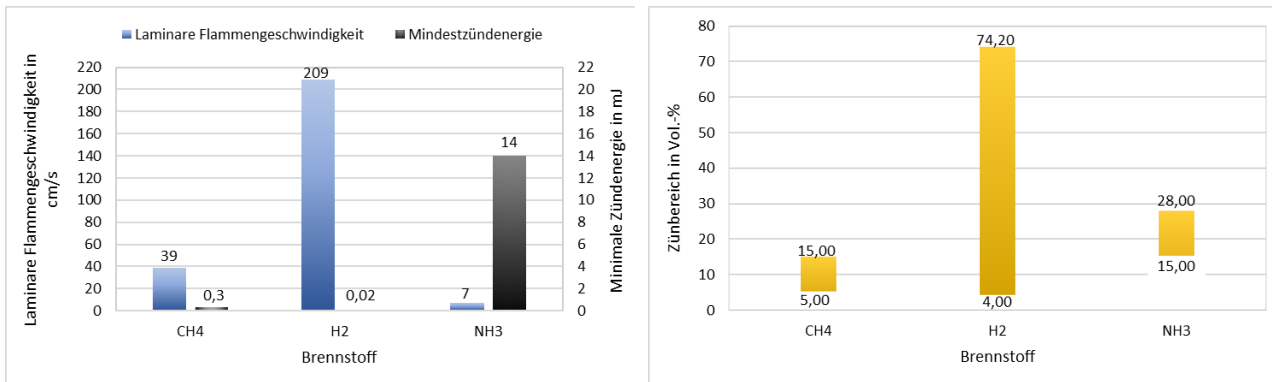


Abbildung 5.2: Laminare Flammgeschwindigkeit ($\lambda = 1$), Mindestzündenergie und Zündbereich von CH₄, H₂ und NH₃ (Quelle: GWI)

Die **Abbildung 5.2** verdeutlicht, dass Wasserstoff-Luft-Gemische unter sehr mageren sowie auch unter sehr fetten Bedingungen, also bei einer weiten Luftzahlspanne, ein brennbares Gemisch bilden. In Kombination mit der niedrigen Zündenergie und der hohen laminaren Flammgeschwindigkeiten ist Wasserstoff insgesamt sehr reaktionsfreudig. Weniger reaktionsfreudig ist Methan. Die laminare Flammgeschwindigkeit von Methan ist um Faktor 5 geringer. Zudem bildet Methan mit Luft bei zu hohem Luftüberschuss kein brennbares Gemisch, da zu viel Luft die Flamme erstickt. Diese Eigenschaften erleichtern den Umgang bzw. den Einsatz von Erdgas in industriellen Anlagen, da die Sicherheitsmaßnahmen geringere Ansprüche benötigen als bei Einsatz von Wasserstoff. Ganz anders sieht es bei Verwendung von Ammoniak aus. Mit einer vergleichsweise sehr geringen laminaren Flammgeschwindigkeit in Kombination mit einer hohen Zündenergie kann ohne konstruktive Maßnahmen wie z. B. einem Drallerzeuger kaum eine stabile Flamme realisiert werden.

Der dritte Aspekt betrifft die Betriebsparameter, also die Brennereinstellungen. Die dabei einzustellenden Drücke für die Realisierung der notwendigen Medienvolumenströme sind abhängig vom Heizwert und dem Mindestluftbedarf. Für den Betrieb mit einer bestimmten Leistung ist der notwendige Gasvolumenstrom direkt antiproportional zum volumetrischen Heizwert des Brennstoffes:

$$\dot{V} = \frac{Q_{th}}{H_{o,vol}} \quad (Gl. 5.1)$$

Für die Auswirkungen auf den Gasvolumenstrom ist also die Kenntnis über den volumetrischen Heizwert des Brennstoffes eine Voraussetzung. Sowohl bei Einsatz von Wasserstoff als auch bei der Verwendung von Ammoniak anstelle von Erdgas muss der Volumenstrom um Faktor 3 bzw. 2,5 angehoben werden, um weiterhin die gleiche Brennerleistung beizubehalten, da der volumetrische Heizwert um genau diese Faktoren 3 bzw. 2,5 sinkt, wenn anstelle von Erdgas Wasserstoff oder Ammoniak zum Einsatz kommt. Die notwendigen Luftmengen unterscheiden sich hingegen um etwa 10 - 20 Vol.-%. Zwar sinkt der Mindestluftbedarf pro m³ Brennstoff bei Verwendung von Wasserstoff um den Faktor 4 und bei Verwendung von Ammoniak um den Faktor 3, aber dafür steigen die notwendigen Brennstoffvolumenströme aufgrund der geringeren Heizwerte deutlich an, sodass insgesamt in beiden Fällen eine Änderung des Luftvolumenstroms von 10 - 20 Vol.-% resultiert.

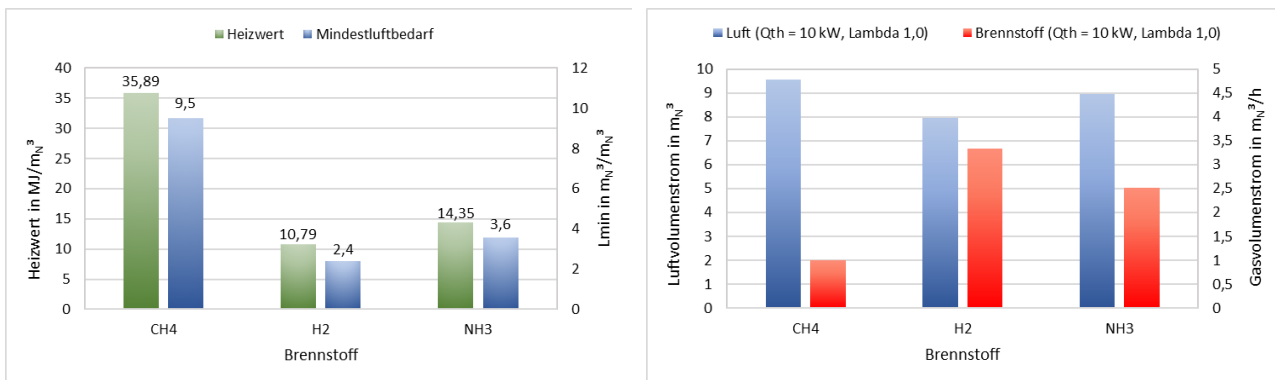


Abbildung 5.3: Heizwert (25°C / 0 °C), Mindestluftbedarf, Luft- und Gasvolumenstrom (P = 10 kW, λ = 1) von CH₄, H₂ und NH₃ (Quelle: GWI)

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich die Eigenschaften verändern, wenn Gemische aus CH₄ (anstelle von Erdgas) und NH₃, sowie Gemische aus H₂ und NH₃, eingesetzt werden.

In **Abbildung 5.4** sind adiabate Flammentemperatur und volumetrischer Heizwert für verschiedene CH₄-NH₃-Gemische und H₂-NH₃-Gemische bei der Verbrennung mit Luft bei der Luftzahl 1,0 dargestellt. Bei CH₄-NH₃-Gemischen ist die Änderungstendenz bei Zumischung von NH₃ gleich, jedoch sind die Änderungen nicht proportional. Bei H₂-NH₃-Gemischen sind die Änderungen gegenläufig. Während der volumetrische Heizwert bei Zugabe von NH₃ ansteigt, sinkt die adiabate Flammentemperatur erheblich.

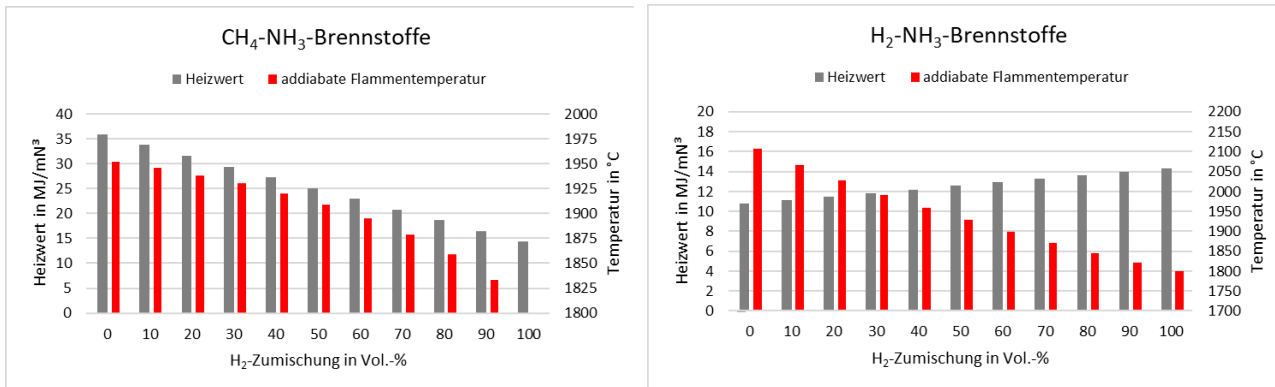


Abbildung 5.4: Heizwert (25°C / 0 °C) und adiabaten Flammentemperatur ($\lambda = 1$) von CH₄-NH₃- und H₂-NH₃-Gemischen (Quelle: GWI)

In **Abbildung 5.5** ist der Zusammenhang zwischen adiabater Flammentemperatur und Luftzahl zu sehen. Die Berechnungen wurden mit Hilfe der Annahme eines isobaren chemischen Gleichgewichtes durchgeführt. Luft und Brennstoff wurden nicht vorgewärmt. Die Medieneingangstemperatur betrug 300 K. Es ist ersichtlich, dass bei der Verbrennung mit Luft die Flammentemperatur bei etwa $\lambda = 1$ am höchsten ist. Im Falle von Oxidationsmangel (links vom Maximum) fehlt es an Sauerstoff, und die im Brennstoff gebundene Wärmeenergie kann nicht vollständig umgesetzt werden, da ein Teil des Brennstoffs nicht oxidieren kann. Bei einem Überschuss an Oxidator (magerer Bereich) wird ein Teil der Reaktionswärme aufgewendet, um den Überschuss an Oxidator zu erhitzen, was zu einer Senkung der Flammentemperatur führt. Dies erklärt auch, warum die Flammentemperatur in Oxy-Fuel-Anwendungen grundsätzlich höher ist als in Air-Fuel-Anwendungen. Bei der Verbrennung mit reinem Sauerstoff muss keine Reaktionswärme aufgewendet werden, um den Stickstoff aufzuheizen. Das Diagramm zeigt, dass bei Verwendung von reinem Sauerstoff die adiabate Flammentemperatur der Brenngase auf ähnlichem Niveau ist. Zudem ist erkennbar, dass der Oxidatorüberschuss in Oxy-Fuel-Anwendungen die adiabate Flammentemperatur deutlich weniger beeinflusst, während er in Air-Fuel-Anwendungen einen deutlichen Einfluss hat. Zum Vergleich: Von $\lambda = 1$ zu $\lambda = 1,5$ sinkt die adiabate Flammentemperatur von Methan (Wasserstoff) um etwa 84 K (66 K) in einer Oxy-Fuel-Verbrennung.

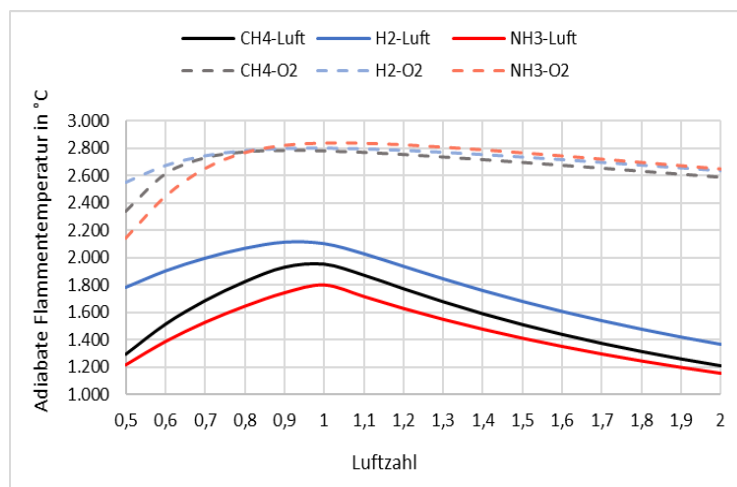


Abbildung 5.5: Adiabate Flammentemperatur von CH₄, H₂ und NH₃ in Abhängigkeit von der Oxidatorzahl (Quelle: GWI)

Laminare Flammengeschwindigkeit

Bei nicht-vorgemischten Brennern wird sich die Flammenfront dort etablieren, wo aufgrund der turbulenten Mischung von Brennstoff und Oxidator ein ungefähr stöchiometrisches Gemisch entsteht ($\lambda_{\text{lokal}} \approx 1$). Bei einem nicht-vorgemischten Brenner finden die wesentlichen Verbrennungsreaktionen daher immer bei näherungsweise stöchiometrischen Bedingungen statt, unabhängig von der globalen Einstellung des λ -Werts.



Abbildung 5.6: Nicht-vorgemischte und vorgemischte Brenner (Quelle: GWI)

Da die (lokale) Luftzahl von zentraler Bedeutung für einen Verbrennungsprozess ist, reagieren nicht-vorgemischte und vorgemischte Brenner entsprechend unterschiedlich. Von besonderer Bedeutung, gerade bei der Verbrennung von NH_3 -haltigen Brennstoffen ist die Verbrennungsgeschwindigkeit. Die laminare Verbrennungsgeschwindigkeit s_L ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Flammenfront in einem ruhenden Brennstoff-Luft-Gemisch fortpflanzt. Sie ist abhängig von den chemischen Zusammensetzungen und den Temperaturen des Brennstoffs und des Oxidators, der anliegenden Luftzahl und dem anliegenden Druck. Die Beimischung von Wasserstoff führt, eine konstante Luftzahl vorausgesetzt, zu einer Erhöhung der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeit, deren Maximum sich immer mehr in den Bereich der unterstöchiometrischen Verbrennung verschiebt.

Abbildung 5.7 zeigt einen Vergleich der laminaren Verbrennungsgeschwindigkeiten als Funktion des Luftzahl λ ($\lambda = 1/\phi$) für Methan, Wasserstoff und Ammoniak.

Für die reaktionskinetische Analyse der betrachteten Brenngase wurden unterschiedliche Reaktionsmechanismen herangezogen. Diese Vorgehensweise ist durch den jeweiligen Gültigkeits- und Abdeckungsbereich der Mechanismen begründet. Der Mechanismus GRI-Mech 3.0 umfasst detaillierte Oxidationspfade für Wasserstoff und Methan, enthält jedoch keine hinreichende Beschreibung der maßgeblichen Reaktionswege der NH_3 -Verbrennung. Zur Modellierung ammoniakhaltiger Systeme wurde daher der im Kontext der Ammoniakverbrennung entwickelte CRECK-Mechanismus verwendet, der zugleich die Wasserstoffoxidation adäquat abbildet. Um eine konsistente Vergleichbarkeit der reaktionskinetischen Untersuchungen über alle Brennstofffälle hinweg sicherzustellen, wurde ergänzend ein universeller Mechanismus ausgewählt. Der KONNOV-Mechanismus umfasst 129 Spezies und mehr als 1.200 Elementarreaktionen und erlaubt damit eine hinreichend genaue Modellierung der Verbrennung von Wasserstoff und Ammoniak ebenso wie von Kohlenwasserstoffen (z. B. Methan).

Im Folgenden soll der Fokus auf den laminaren Verbrennungsgeschwindigkeiten liegen, um einen Eindruck der Auswirkungen zu vermitteln. Die turbulenten Verbrennungsgeschwindigkeiten sind um ein Vielfaches höher [36]. Die turbulenten Verbrennungsgeschwindigkeiten sind nicht nur vom physikalischen Zustand (T , p), den Zusammensetzungen und der anliegenden Luftzahl abhängig, sondern auch vom Strömungsfeld im Brennraum.

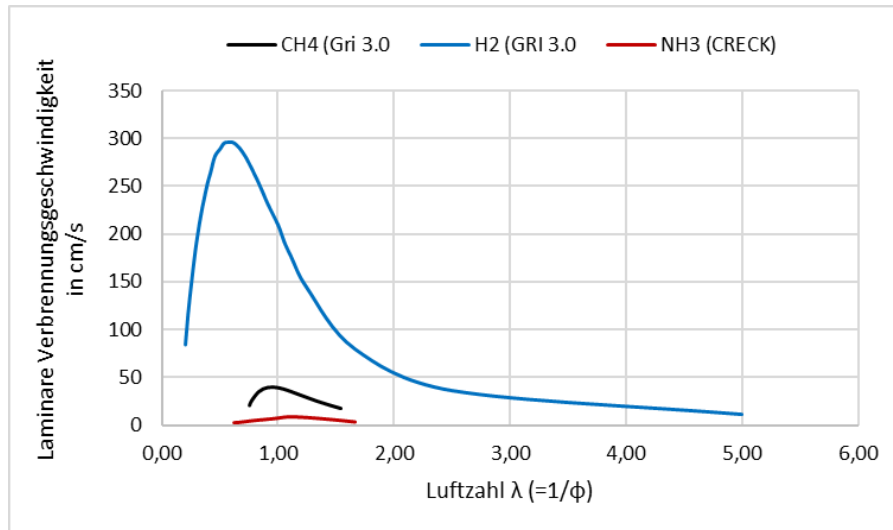


Abbildung 5.7: Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit von CH₄, H₂ und NH₃ in Abhängigkeit von der Luftzahl (Quelle: GWI)

Eine Flamme wird sich dort stabilisieren, wo die lokale Strömungsgeschwindigkeit und die Verbrennungsgeschwindigkeit betragsmäßig gleich, aber im Raum entgegengesetzt orientiert sind. Ist die Verbrennungsgeschwindigkeit höher als die Strömungsgeschwindigkeit, bewegt sich die Flamme stromauf, was zu einem Flammenrückschlag führen kann (flash back), d. h. die Flamme bewegt sich in den Brenner hinein und kann ihn beschädigen. Dies ist ein Problem für vormischende und teilvormischende Brenner, nicht vorgemischte Brenner sind hiervon aufgrund ihrer Funktionsweise nicht betroffen. Falls die Verbrennungsgeschwindigkeit deutlich unterhalb der Strömungsgeschwindigkeit liegt, kann die Flamme sich ebenfalls nicht am Brenner stabilisieren und hebt ab (lift-off). Da die Verbrennungsgeschwindigkeit in der Flammenfront sowohl von der (lokalen) Luftzahl als auch von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffs abhängig ist, kann eine Beimischung von NH₃ in Erdgas oder Wasserstoff sich je nach Verbrennungsform, unterschiedlich auf die Stabilisierung der Flamme auswirken. Verschiedene Phänomene überlagern sich und können sich teilweise kompensieren oder gegenseitig verstärken.

6 Untersuchung des Laborbrenners für den Einsatz von Ammoniak

Zu Beginn der Arbeiten wurden grundlegende Untersuchungen zur Verbrennung von Ammoniak durchgeführt. Hierbei kamen sowohl $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ - als auch $\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Gemische zum Einsatz. Die Untersuchungen erfolgten unter den Aspekten Flammenstabilität, Schadstoffemissionen und Prozesstemperatur. Ziel war es, eine belastbare Grundlage für die weiterführende Analyse von Industriebrennern zur Ammoniakverbrennung in der Ziegelindustrie zu schaffen.

Zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wurde der Einfluss zentraler Betriebsparameter systematisch untersucht. Dazu wurden die Brennerleistung, der Ammoniakanteil im Brenngas sowie die Luftzahl (λ) variiert und deren Auswirkungen auf Flammenstabilität und Emissionsbildung analysiert. Insbesondere wurde evaluiert, wie unterschiedliche Ammoniakzumischungen bei Brennerleistungen von 8 kW, 10 kW und 16 kW das Verbrennungsverhalten beeinflussen. Ergänzend dazu wurde für die Verbrennung von reinem Ammoniak bei einer Leistung von 8 kW der Einfluss der Luftzahl auf die Stabilität und Emissionen untersucht. Hierfür wurde λ im Bereich von 1,01 bis 1,3 variiert.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden zur Vertiefung des Prozessverständnisses numerische CFD-Simulationen ausgewählter repräsentativer Betriebsfälle durchgeführt. Bei konventionellen CFD-Simulationen im RANS-Ansatz (Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen) ist eine direkte Bewertung der Flammenstabilität nur eingeschränkt möglich, da die eingesetzten Modelle überwiegend mischungsbasiert arbeiten und keine expliziten Stabilitätskriterien enthalten. Daher war es erforderlich, die Stabilitätsgrenzen zunächst experimentell zu bestimmen, um den relevanten Parameterraum für die Simulation gezielt einzugrenzen. Die darauf aufbauenden Simulationen konnten erfolgreich umgesetzt werden.

6.1 Experimentelle und CFD-Untersuchungen am Laborflammenprüfstand (GWI)

Die additive Fertigung eröffnet im Vergleich zu konventionellen Fertigungsverfahren neuartige Freiheitsgrade in der konstruktiven Gestaltung, die mit herkömmlichen Methoden nicht realisierbar sind. **Abbildung 6.1** zeigt in der rechten Bildhälfte den schematischen Aufbau des Laborbrenners im Längsschnitt. In die Brennerkonstruktion wurden insgesamt drei Brenngasdüsen integriert, wodurch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Betriebsweise erzielt wird. Diese Flexibilität ermöglicht eine gezielte Variation der Flammenform und -länge und erweitert somit die experimentellen Gestaltungsmöglichkeiten. Für die Strömungsführung der Verbrennungsluft wurden zusätzliche konstruktive Aspekte berücksichtigt, die für einen stabilen und reproduzierbaren Flammenbetrieb während der Versuchsreihen von zentraler Bedeutung sind. Insbesondere moderne Fertigungsverfahren wie der metallische 3D-Druck eröffnen hierbei neue konstruktive Gestaltungsspielräume. Der entwickelte und additiv gefertigte Laborbrenner besteht aus einem Luftplenum, das wahlweise über verschiedene Düsenkränze mit Verbrennungsluft versorgt werden kann. Jeder dieser Düsenkränze weist eine spezifische Anzahl sowie Geometrie der Düsen auf, wodurch sich die Strömungsverhältnisse gezielt beeinflussen lassen. Die Aktivierung des jeweiligen Düsenkranzes erfolgt manuell über einen externen Ventilstock, wodurch eine flexible Anpassung der Betriebsbedingungen ermöglicht wird. Der innerste Düsenkranz überträgt der einströmenden Luft den größten Drehimpuls. Die Düseneintrittswinkel betragen hierbei 50° , woraus eine theoretische Drallzahl von $S = 1,1$ resultiert.

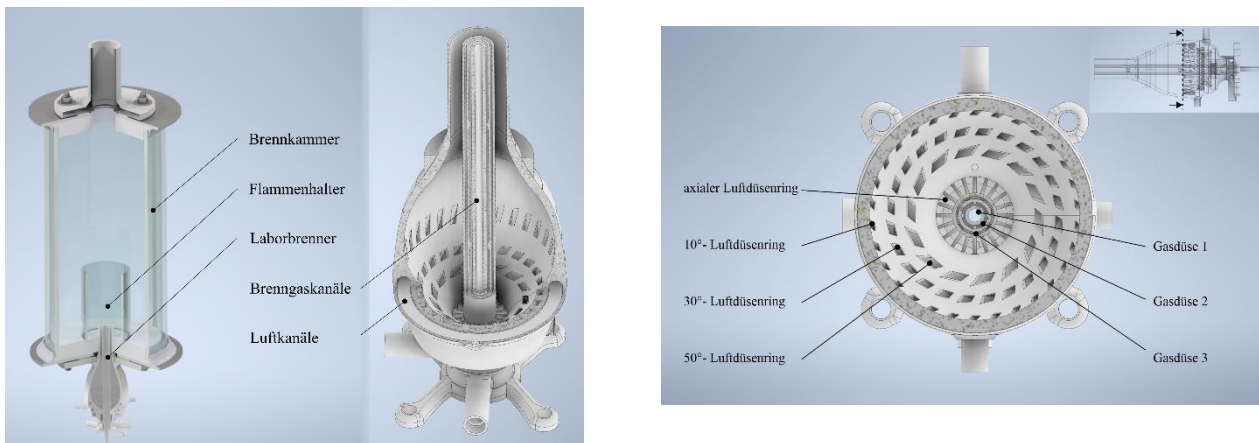


Abbildung 6.1: Laborbrennkammer mit additiv gefertigtem Brenner [18]

Versuchsinfrastruktur

Die **Abbildung 6.2** zeigt schematisch die Integration der oben beschriebenen Brennkammer und des additiv gefertigten Laborbrenners in die Versuchsinfrastruktur des Gas- und Wärme-Instituts Essen e.V. Darüber hinaus zeigt die Abbildung das Funktionsprinzip der nachgeschalteten thermischen Nachverbrennung (TNV), die als sicherheitstechnische und emissionsmindernde Maßnahme in den Versuchsaufbau eingebunden ist. Der Laborbrenner verfügt, wie bereits erläutert, über insgesamt drei Brenngas- und vier Luftzuführungen, deren Zu- und Abschaltung über Kugelhähne realisiert ist. Zur Untersuchung von Vormischflammen wurde zudem eine Brenngasinjektion in die Verbrennungsluft implementiert, um reproduzierbare Mischungsverhältnisse und stabile Flammenbedingungen zu gewährleisten. Es wurden die Brenngase Methan, Wasserstoff und Ammoniak sowohl einzeln als auch als Binärgemische in Kombination mit Druckluft untersucht. Für jedes dieser Gase ist ein Massendurchflussregler (Mass Flow Controller, MFC) vorgesehen, der Mess- und Regelarmaturen in einem Gerät vereint. Diese ermöglichen eine computergesteuerte und hochpräzise Dosierung der Gasströme und dokumentieren die jeweiligen Messwerte automatisch über eine angeschlossene Software. Zur Sicherstellung einer homogenen Durchmischung der Gasgemische sind im Schema mehrere statische Mischer angeordnet. Neben diesen prozessrelevanten Komponenten wurde im Hinblick auf die sichere Handhabung von Ammoniak (NH_3) eine zusätzliche Stickstoffregelstrecke integriert. Diese erfüllt ausschließlich eine sicherheitsgerichtete Funktion: Im Falle eines definierten Störfallszenarios – etwa eines Flammenausfalls – wird automatisch eine Stickstoffspülung der Ammoniakleitung eingeleitet. Die Sicherheitslogik sieht hierbei vor, dass bei Auslösung des Spülvorgangs die Stickstoffversorgung auf die Ammoniakleitung aufgeschaltet wird. Gleichzeitig schließen zwei magnetisch betätigte Ventile den Strömungsweg zum Brenner, während eine gegenseitig geschaltete Ventilstellung eine gefahrlose Ableitung des Spülgases ins Freie gewährleistet. Die erforderliche Spüldauer wurde anhand der Rohrlängen und -durchmesser berechnet und lässt sich über ein Zeitrelais steuern. Zusätzlich zu den Magnetventilen der Spülleitung sind auch Ventile in die Ofen- und Brennersteuerung integriert. Der Betrieb der thermischen Nachverbrennung erfolgt über eine separate Steuerungseinheit, die unabhängig von der Hauptbrennerregelung arbeitet. Zudem ist die Aktivierung der TNV als Betriebsvoraussetzung für die Inbetriebnahme der Laborbrennerstrecke definiert, um einen sicheren und normgerechten Versuchsbetrieb zu gewährleisten.

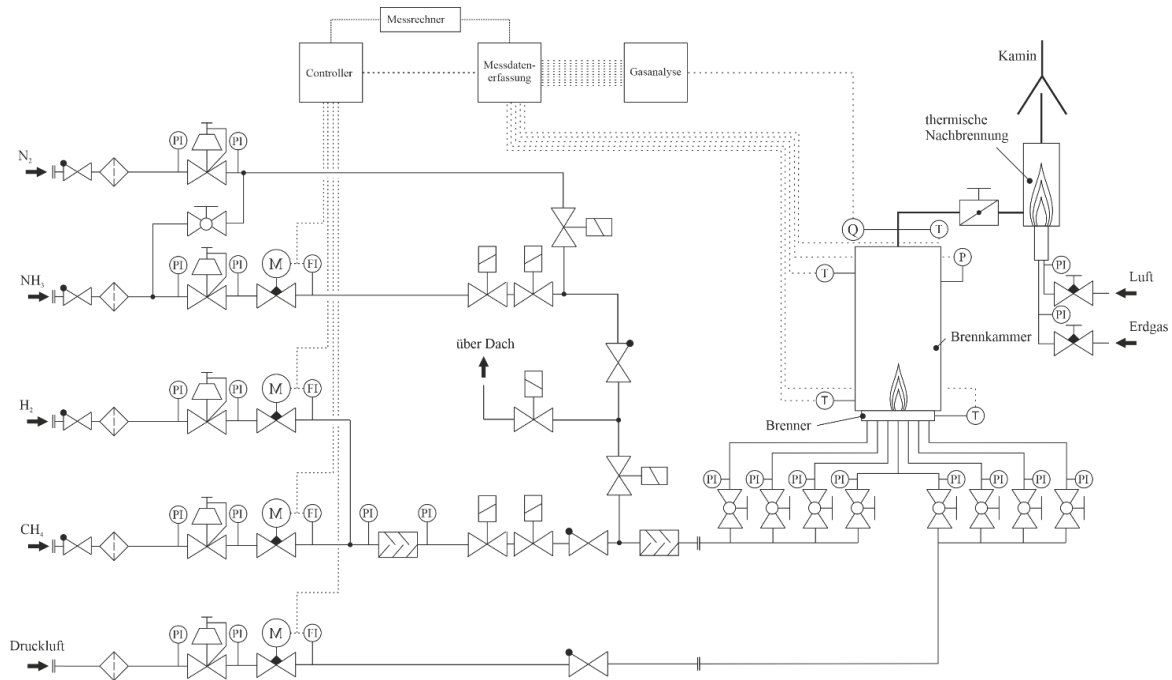


Abbildung 6.2: Schematischer Versuchsaufbau; Laborbrennkammer [37]

Versuchsdurchführung

Der Fokus der Untersuchung lag in der Dokumentation des Verbrennungs- und Schadstoffverhaltens sowie der Flammenstabilität einer nicht-vorgemischten Verbrennung für die verschiedenen Brennstoffe mit Luft als Oxidator. Untersucht werden sollte hierbei die Verbrennung von H_2 , NH_3 sowie unterschiedliche Mischungen dieser Gase. Die Oxidatorzufuhr wurde über die Drallstufe mit einer Drallzahl von 1,1 zugeführt. Die verschiedenen Versuchsreihen sind in der folgenden Tabelle festgehalten.

Tabelle 6.1: Versuchsreihen für den Einsatz des Laborbrenners

Versuchsreihe	Ausgangsbrennstoff	Leistung	Luftzahl	NH_3 -Zumischung
1	H_2	16 kW	1,2	in 10 Vol.-% Schritten
2	H_2	10 kW	1,2	in 10 Vol.-% Schritten
3	CH_4	10 kW	1,2	in 10 Vol.-% Schritten
4	NH_3	8,0 kW	1,01 – 1,35	[keine]

Die sukzessive Zugabe des jeweiligen Zusatzgases ermöglichte die experimentelle Bestimmung der Flammenstabilitätsgrenzen bei der Verbrennung von Brenngasen mit ungünstigen Verbrennungseigenschaften, wie sie beispielsweise für Ammoniak (NH_3) charakteristisch sind. Durch die schrittweise Variation der Gaszusammensetzung konnten somit die Stabilitätsbereiche des Flammenbetriebs des untersuchten Brenners präzise erfasst werden.

Die im weiteren Verlauf verwendete Zumischrate x beschreibt den Volumenstromanteil von NH_3 im Gesamtbrennstoffgemisch. In Gleichung 6.1 ist die Zumischrate x am Beispiel der Zumischung von Ammoniak (NH_3) in Wasserstoff (H_2) definiert.

$$x_{\text{NH}_3} = \frac{\dot{V}_{\text{NH}_3}}{\dot{V}_{\text{NH}_3} + \dot{V}_{\text{H}_2}} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

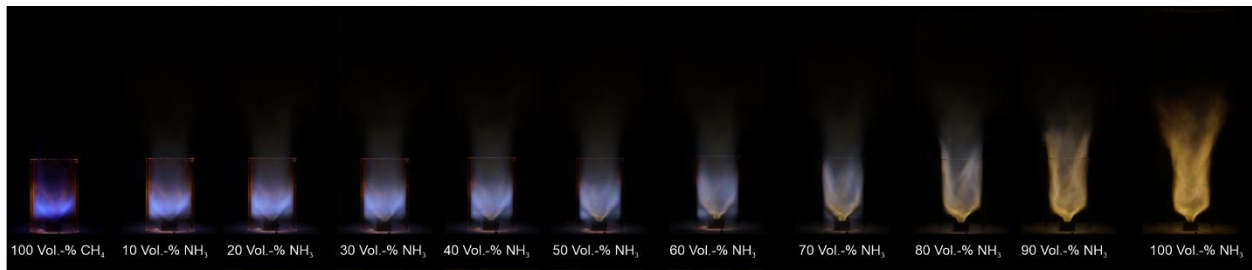
Neben der Flammenstabilität wurde in den experimentellen Untersuchungen auch die Bildung relevanter Schadstoffe betrachtet.

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Aufgrund der inhaltlichen Überschneidungen bei der Verbrennung ammoniakhaltiger Gasgemische werden die Versuchsergebnisse der $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ - sowie $\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Messreihen im nachfolgenden Abschnitt gemeinsam ausgewertet und diskutiert. Wie bereits zuvor dargestellt, stellt die Verbrennung von Ammoniak in mehreren Aspekten ein neuartiges und bislang nur unzureichend untersuchtes Phänomen innerhalb der industriellen Verbrennungstechnik dar.

Die reaktionskinetischen Analysen lieferten erste Hinweise auf die ausgeprägte Komplexität der Flammenstabilisierung bei Brenngasen mit hohem Ammoniakanteil. Zudem zeigte sich, dass $\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Gemische im Hinblick auf die Flammenstabilität gegenüber $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ -Gemischen deutliche Vorteile aufweisen. Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse zur Labormaßstabsverbrennung von Ammoniak in Kombination mit Wasserstoff bzw. Methan vorgestellt. **Abbildung 6.3** zeigt fotografische Aufnahmen der Flammen von $\text{CH}_4\text{-NH}_3$ - und $\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Brenngasgemischen. Die Luftzahl wurde in allen Fällen konstant auf $\lambda = 1,2$ (entsprechend einem Äquivalenzverhältnis von $\phi = 0,833$) eingestellt. Der Ammoniakanteil im jeweiligen Brenngasgemisch wurde schrittweise in 10 Vol.-%-Schritten erhöht.

Erdgas- NH_3 -Gemische



$\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Gemische

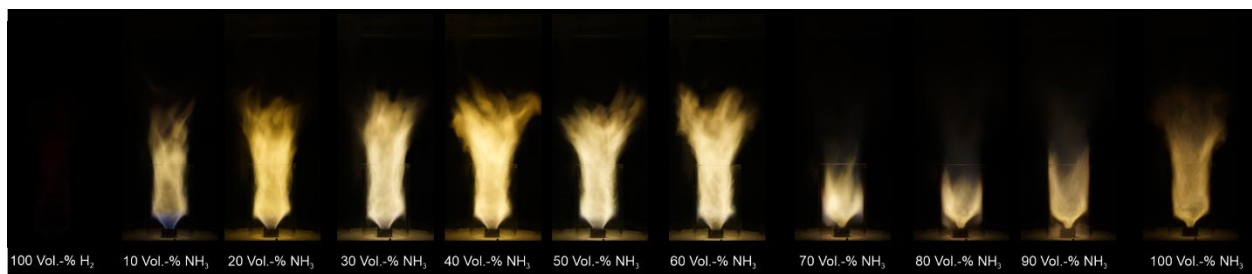


Abbildung 6.3: Flammenbilder bei NH_3 -Zumischung in Erdgas (oben) und in Wasserstoff (unten), Drallzahl 1,1, Luftzahl 1,2 (Quelle: GWI)

Die Ergebnisse zeigen den stabilisierenden Einfluss einer Luftverdrallung mit einer Drallzahl von $S = 1,1$ auf die Verbrennung deutlich. Für alle untersuchten Erdgas- NH_3 und $\text{H}_2\text{-NH}_3$ -Gemische, ein-

schließlich des Betriebs mit reinem Ammoniak, konnte unter diesen Bedingungen eine stabile Flammene Ausbildung erreicht werden. Ergänzend hierzu berichtet Herr Biebl in seiner Dissertation über weiterführende, umfangreiche Untersuchungen, in denen der Einfluss des Dralls auf die Flammstabilität systematisch und detailliert analysiert wurde. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Drallzahl von $S = 0$ – entsprechend einer rein parallelen Beaufschlagung des Brennraums über zwei konzentrisch angeordnete Ringspalten ohne Oxidatorverdrallung – eine stabile Flamme lediglich bis zu einem Ammoniakanteil von 70 Vol.-% in Kombination mit Wasserstoff realisierbar ist. Im Gegensatz dazu ließ sich im Betrieb mit Erdgas-NH₃-Gemischen ohne Oxidatorverdrallung für keine der untersuchten Brenngaszusammensetzungen eine stabile Flammenführung erreichen. [37]

Insgesamt bestätigen die experimentellen Untersuchungen, dass Ammoniakflammen bei hinreichender Drallintensität zuverlässig stabilisiert werden können. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Brenngaszusammensetzung einen erheblichen Einfluss auf Flammgeometrie und Flammenfärbung ausübt. Anzumerken ist, dass die fotografischen Aufnahmen in **Abbildung 6.3** unter identischen Aufnahmeparametern (u. a. Belichtungszeit und Blendenzahl) erstellt wurden. Aus diesem Grund ist die Flamme im Betrieb mit 100 % Wasserstoff in den Abbildungen nicht sichtbar, da Wasserstoffflammen ihre Strahlung überwiegend in Spektralbereichen emittieren, die für das menschliche Auge nur eingeschränkt wahrnehmbar sind. Die weiteren Flammenaufnahmen verdeutlichen Unterschiede in Form und Farbe in Abhängigkeit vom jeweiligen Brenngasgemisch. Während der ammoniakfreie Betrieb die charakteristische blaue Färbung einer gut vorgemischten Methanflamme zeigt, wird diese bereits bei geringer Ammoniakzumischung ($x\text{NH}_3 \geq 10$ Vol.-%) durch eine weißliche bis leicht gelbliche Flammenfarbe ersetzt. Mit zunehmendem Ammoniakanteil nimmt der gelbliche Strahlungsanteil deutlich zu. Ab einem Ammoniakgehalt von etwa $x\text{NH}_3 \geq 60$ Vol.-% tritt eine dunkelgelbe Flamme auf, deren Erscheinungsbild einer Diffusionsflamme ähnelt, wie sie typischerweise bei Heizölfeuerungen beobachtet wird [18]. Während die gelbe Flammenfärbung bei der Verbrennung kohlenwasserstoffhaltiger Brennstoffe überwiegend auf Rußstrahlung kohlenstoffhaltiger Partikel zurückgeführt wird [38], sind im entsprechenden Wellenlängenbereich ($\lambda \approx 600$ nm) auch bei der Ammoniakverbrennung Emissionen mit bloßem Auge nachweisbar. Hayakawa et al. [39] haben anhand detaillierter spektraler Untersuchungen von Ammoniak-Luft-Flammen die Ursachen dieser sichtbaren Emissionen identifiziert. **Abbildung 6.5** fasst die Resultate der genannten Arbeiten für einen vorgemischten Brenner zusammen. Die Spektralanalyse zeigt, dass Ammoniak-Luft-Flammen über einen breiten Wellenlängenbereich Strahlung emittieren. Innerhalb des sichtbaren Spektrums (etwa $380 \leq \lambda \leq 780$ nm) steigt die Strahlungsintensität mit zunehmender Wellenlänge an. Zudem wurden im Bereich von etwa $570 \leq \lambda \leq 630$ nm ausgeprägte Emissionsmaxima an den in **Abbildung 6.5** markierten Wellenlängen festgestellt. Nach Hayakawa et al. [39] sind diese Maxima der NH₂- α -Emissionsbande zuzuordnen. Das Radikal NH₂ entsteht als Zwischenprodukt bei der Oxidation von NH₃ und zählt zu den dominierenden Reaktionspfaden der Ammoniakoxidation [29]. Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen NH₂-Bildung und der NO-Entstehung, der im weiteren Verlauf des Kapitels diskutiert wird.

Vor diesem Hintergrund ist die NH₂-Bildung in den Versuchsreihen mit H₂-NH₃-Brenngasgemischen (vgl. **Abbildung 6.3**) unmittelbar erkennbar: Bereits eine Zumischung von 10 Vol.-% NH₃ führt zu einer ausgeprägten gelblichen Einfärbung der zuvor nahezu transparenten H₂-Flamme. Neben NH₂ wird gemäß Hayakawa et al. [39] auch H₂O als potenziell relevanter Emittier im betrachteten Wel-

lenlängenbereich diskutiert. In **Abbildung 6.5** sind hierzu Referenzspektren von überhitztem Wasserdampf dargestellt. Die intensiven Emissionsanteile im nahinfraroten Bereich $700 \leq \lambda \leq 920$ nm deuten gemäß Hayakawa et al. [39] darauf hin, dass auch H_2O -Spektren zur gelblichen Flammenfärbung beitragen könnten, ergänzend zur NH_2 -Ammoniak- α -Bande. Diese Interpretation wird jedoch durch die in den vorliegenden Untersuchungen beobachteten Eigenschaften reiner Wasserstoffflammen relativiert. **Abbildung 6.4** zeigt anhand einer Aufnahme mit verlängerter Belichtungszeit, dass bei der Wasserstoff-Luft-Verbrennung trotz des alleinigen Vorhandenseins von Wasserdampf als Gasstrahler keine gelbliche Flammenfärbung auftritt. Damit erscheint ein alleiniger Ursprung der Gelbfärbung durch H_2O -Emissionen unter den hier untersuchten Bedingungen unwahrscheinlich.



Abbildung 6.4: Fotografische Aufnahme einer 8-kW Wasserstoff-Luft-Flamme mit abweichender Kameraeinstellung (Quelle: GWI)

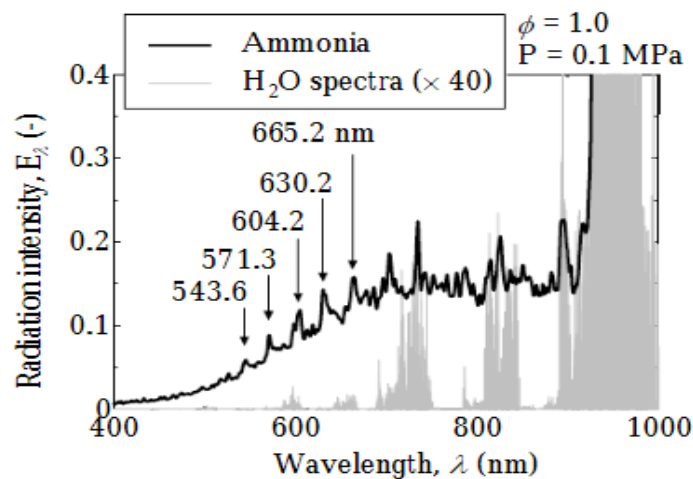


Abbildung 6.5: Beziehung zwischen der Strahlungsintensität $E\lambda$ und der Wellenlänge λ von $\phi = 1,0$ bei $P = 0,1$ MPa. Das 40-fache des normalisierten Ergebnisses aus der HITRAN-Datenbank wurde als Wert des H_2O -Spektrums in dieser Abbildung dargestellt [39]

Der überwiegende Anteil der beobachteten Strahlung manifestiert sich als rötliches Leuchten, das in erster Näherung mit den Emissionsspektren überhitzten Wasserdampfs im Wellenlängenbereich $\lambda \geq 650$ nm übereinstimmt (vgl. **Abbildung 6.5**). Ein hiervon abweichendes bzw. erweitertes Emissionsspektrum zeigt sich bei den in **Abbildung 6.3** dargestellten CH_4 - NH_3 -Versuchen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zusätzlich Strahlungsbeiträge weiterer Verbrennungsprodukte (z. B. CO_2) auftreten können, die an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden.

Bezüglich der Flammenform ist über den gesamten untersuchten NH_3 -Anteil im Brennstoffgemisch keine grundlegende Änderung der Flammenstruktur erkennbar. Sämtliche dokumentierten CH_4 - NH_3 -Flammen weisen den Charakter einer Drallflamme auf. Auffällig ist jedoch eine mit zunehmender NH_3 -Zumischung proportionale Ausdehnung der sichtbaren Reaktionszone: Das bei reiner Methanverbrennung kompakte Reaktionsvolumen vergrößert sich mit steigendem NH_3 -Anteil deutlich, was sich in einem anwachsenden sichtbaren Flammenvolumen äußert.

Im Vergleich zu Erdgas- NH_3 -Gemischen sind Flammenform und Flammencharakteristika bei H_2 - NH_3 -Gemischen deutlich anders ausgeprägt. Es lassen sich zwei Stabilisierungskonzepte bzw. -bereiche unterscheiden: (i) eine primär chemisch stabilisierte Flamme und (ii) eine konstruktionsbedingt stabilisierte Flamme infolge der Oxidatorverdrängung. Bei der Verbrennung von reinem Wasserstoff ist die Flamme optisch nicht detektierbar, da die Emission überwiegend in Spektralbereichen außerhalb der visuellen Wahrnehmung liegt. Bereits geringe NH_3 -Anteile führen jedoch zu einer deutlichen Strahlung im sichtbaren Spektrum; mit weiter steigender NH_3 -Konzentration nimmt die Sichtbarkeit der Flamme kontinuierlich zu. Bis zu NH_3 -Anteilen von etwa 80 Vol.-% bleibt die Flammenform weitgehend konstant. In diesem Bereich tragen die günstigen Verbrennungseigenschaften des Wasserstoffs – insbesondere hohe laminare Flammengeschwindigkeit, breite Zündgrenzen und geringe Mindestzündenergie – maßgeblich zur chemischen Stabilisierung der Flamme bei. Bei höheren Ammoniakanteilen $x\text{NH}_3 \geq 80$ Vol.-% ist dagegen eine sukzessiv einsetzende, jedoch ausgeprägte Veränderung von Flammenform und -beschaffenheit zu beobachten (Phase 2). Diese deutliche Anpassung der Flammencharakteristik ist darauf zurückzuführen, dass die Stabilisierung nun nicht mehr überwiegend durch die vorteilhaften Reaktions- und Zündeigenschaften des Wasserstoffs erfolgt, sondern primär durch die Verdrängung des Oxidators gewährleistet wird. Die Flamme ist in diesem Bereich folglich vorwiegend konstruktionsbedingt stabilisiert.

6.2 NO_x -, NH_3 -Schlupf- und N_2O -Emissionen

Stickoxide (NO_x), bestehend hauptsächlich aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2), gehören zu den relevanten Schadstoffen, die bei thermischen Verbrennungsprozessen entstehen. Aufgrund ihrer umwelt- und gesundheitsschädlichen Wirkungen ist die Reduktion von NO_x -Emissionen ein zentrales Ziel moderner Energietechnik. Mit dem zunehmenden Einsatz alternativer Brennstoffe wie Ammoniak (NH_3) oder NH_3 -haltiger Gemische rückt die Thematik der NO_x -Bildung erneut in den Fokus der Forschung.

Die Bildung von Stickoxiden ist ein komplexer Prozess, der stark von den lokalen Temperaturen, Sauerstoffkonzentrationen und Aufenthaltszeiten der Reaktionsspezies abhängt. NO_x -Emissionen entstehen in konventionellen Verbrennungssystemen primär durch drei Mechanismen:

1. Thermisches NO (Zeldovich-Mechanismus):
Dominant bei hohen Temperaturen (>1300 °C), wobei molekularer Stickstoff (N_2) mit Sauerstoff reagiert.
2. Prompt- NO (Fenimore-Mechanismus):
Entsteht bei niedrigeren Temperaturen in der Flammenfront durch Reaktionen von Kohlenwasserstoffen mit N_2 .
3. Brennstoffgebundenes NO :
Wird durch Stickstoffverbindungen im Brennstoff selbst gebildet, z. B. bei der Verbrennung stickstoffhaltiger Brennstoffe wie Ammoniak.

Die Berücksichtigung von NO_x-Emissionen ist nicht nur aus ökologischer Sicht essenziell, sondern auch für die Optimierung der Verbrennungseffizienz und Einhaltung gesetzlicher Emissionsgrenzwerte. NO_x trägt zur Bildung von bodennahem Ozon und Feinstaub bei und wirkt indirekt als Treibhausgas. Zudem führt NO zu Atemwegserkrankungen und Versauerung von Ökosystemen.

Ammoniak gilt als vielversprechender kohlenstofffreier Energieträger, da bei seiner Verbrennung kein CO₂ entsteht. Dennoch stellt die NO_x-Bildung einen der größten Herausforderungen bei der Nutzung von NH₃ als Brennstoff dar. Die Ursachen liegen am Brennstoffgebundenen Stickstoff (N). Ein erheblicher Anteil des Stickstoffs kann bei ungünstigen Verbrennungsbedingungen zu NO- und N₂O-Bildung führen [28] [24].

Messtechnisch bedingt wird bei Abgasmessungen die Probe vor der Konzentrationsmessung getrocknet. Dies führt zu einer Verringerung der Bezugsgröße, da mit steigendem H₂-Gehalt im Brennstoff der zu kondensierende Wasserdampfanteil im Abgas zunimmt. Dieser Umstand kann zu einer signifikanten Verzerrung der Emissionen führen [40] [41] [42]. Die konventionelle Darstellung in [ppm], bezogen auf das trockene Abgas, ist daher irreführend. An der Stelle erlauben die energiebezogenen NO_x-Emissionen einen fairen Vergleich. **Gleichung 6.2** zeigt die Umrechnung der gemessenen NO_x-Konzentration in [ppm] in energiebezogene Einheiten (mg/MJ oder mg/kWh) auf Basis der EN 267 [43].

$$\text{NO}_x = \text{NO}_{x,\text{ml/m}^3} * 2,056 * \left(\frac{21}{21 - \text{O}_{2,\text{mess}}} \right) * \left(\frac{V_{\text{A,th,tr,min}}}{21 - H_i} \right) \quad (\text{Gl. 6.2})$$

In der **Abbildung 6.6** sind die NO_x-Emissionen für die verschiedenen Messreihen zusammengestellt. Die Drallzahl war auf 1,1 eingestellt und die Luftzahl beträgt 1,2, sofern in der Graphik nicht anders beschrieben.

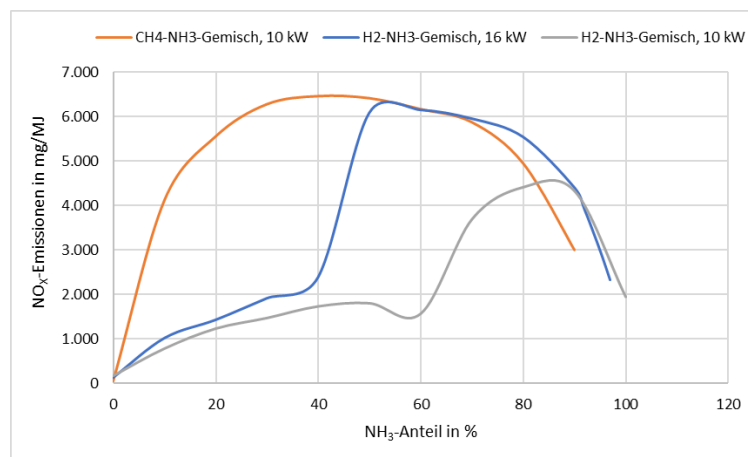


Abbildung 6.6: NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von CH₄-NH₃ und H₂-NH₃-Gemischen (Quelle: GWI)

Die NO_x-Kurve bei Einsatz von Erdgas-NH₃-Gemischen zeigt einen parabolischen Kurvenverlauf mit einem Emissionsmaximum bei ca. 40 Vol.-% NH₃ im Brennstoff. Die NO_x-Emissionsverläufe der H₂-NH₃-Gemische zeigen bis zu einem Anteil von etwa 40 - 60 Vol.-% NH₃ im Brennstoffgemisch eine ähnliche parabelförmige Entwicklung. Abhängig von der Leistung steigen bei 40 bzw. 60 Vol.-% NH₃ im Brennstoff die NO_x-Emissionen sprunghaft an. Der Beginn der degressiven Kurve korrespondiert

gut mit der sichtbaren Veränderung der Flammgeometrie bei einem NH_3 -Gehalt von 60 Vol.-% (bei $\phi = 0,83$). Ab dieser Grenze ist die Flamme unstetig und nicht mehr in ihrer Position fixiert. Die Arbeiten von Mashruk et. al. [44] sowie [45], [46] liefern hierzu eine Erklärung. Die abnehmende NO-Bildung mit steigendem NH_3 -Brenngasanteil resultiert demnach aus einer erhöhten NH_2 -Produktion, die als Schlüsselspezies für den NO-Verbrauch in der Flamme durch die Kettenverzweigungsreaktion (Gl. 5.3) und der Kettenabbruchreaktion (Gl. 5.4) genannt wird.



Laut Mashruk et. al. [44] steigt zusätzlich das Bildungspotential von N_2O bei abnehmender NO-Produktion. Als verantwortlich für Bildung von N_2O in Ammoniakflammen wird die folgende Reaktion genannt:



Das gebildete N_2O wird durch die Reaktion mit H und die Drittkörperreaktion (Gl. 5.6) wieder reduziert [44].



Neben der NH_3 -Beimischungsrate beeinflussen auch weitere Faktoren die NO_x -Emissionen, die allerdings einen hemmenden Einfluss auf die NO_x -Bildung ausüben [18].

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens der Einfluss des globalen Luftverhältnisses auf die NO_x -Emissionen bei der NH_3 -Verbrennung systematisch untersucht. Die Ergebnisse in **Abbildung 6.7** verdeutlichen, dass zwischen der Luftzahl und den resultierenden NO_x -Emissionen kein linearer Zusammenhang besteht. Stattdessen weisen die NO_x -Emissionen im Bereich von $\lambda = 1,00$ bis $\lambda = 1,25$ einen deutlich ausgeprägten parabelförmigen Verlauf auf. Der Emissionspeak liegt zwischen $\lambda = 1,10$ und $\lambda = 1,15$, was auf ein komplexes Zusammenspiel aus Temperaturfeldern, Verweilzeiten und reaktionskinetischen Nebenpfaden schließen lässt. Unter leicht mageren Bedingungen steigt die Flammentemperatur zunächst an, wodurch eine verstärkte Bildung von thermischem NO (Zeldovich-Mechanismus) begünstigt wird. Ab Luftzahlen oberhalb von etwa 1,15 sinkt die Temperatur infolge zunehmender Verdünnung und geringerer Reaktionsenthalpie wieder ab, sodass die NO_x -Emissionen entsprechend zurückgehen. Gleichzeitig nimmt mit erhöhter Luftzahl die Bedeutung kinetisch dominierter Pfade, wie der NH_3 - und HNO -Oxidation, ab, was zur weiteren Reduktion der NO_x -Bildung beiträgt.

Die Ergebnisse unterstreichen, dass die NO_x -Emissionen bei der Ammoniakverbrennung nichtlinear vom Luftverhältnis abhängen und dass ein optimierter Betriebsbereich existiert, in dem die Bildung von Stickoxiden minimiert werden kann. Diese Erkenntnisse sind insbesondere für den Einsatz von NH_3 als alternativer, klimaneutraler Energieträger in thermischen Anlagen von hoher Relevanz.

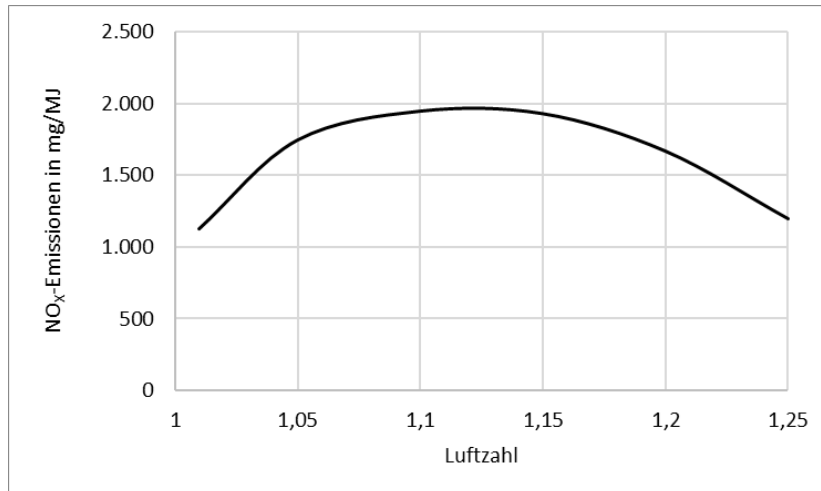


Abbildung 6.7: NO_x-Emissionen bei Verbrennung von NH₃ mit verschiedener Luftzahl (Quelle: GWI)

Neben den brennstoffgebundenen NO_x-Emissionen sind bei der Verbrennung ammoniakhaltiger Brennstoffe insbesondere der NH₃-Schlupf sowie die Emissionen von N₂O von erheblicher technischer, ökologischer und regulatorischer Relevanz. Beide Emissionskomponenten müssen daher bei der Entwicklung und Optimierung von Verbrennungsprozessen mit Ammoniak als Energieträger zwingend berücksichtigt werden.

NH₃-Emissionen (NH₃-Schlupf) und N₂O-Emissionen:

Ammoniak ist ein stark reizender Stoff, der bereits in niedrigen Konzentrationen zu Irritationen der Augen, Schleimhäute und Atemwege führen kann. Aufgrund seines stechenden Geruchs und der niedrigen Geruchsschwelle sind NH₃-Emissionen in industriellen Genehmigungsverfahren streng limitiert. Atmosphärisch trägt freigesetztes Ammoniak wesentlich zur Bildung von sekundärem Feinstaub (PM_{2.5}) bei, indem es mit sauren Gasen wie HNO₃ oder SO₂ zu Ammoniumsalzen reagiert. Dies stellt einen relevanten Beitrag zur regionalen Luftverschmutzung und damit verbundenen Gesundheitsbelastungen dar. Darüber hinaus kann NH₃ in der Umwelt zur Eutrophierung von Böden und Gewässern führen, was natürliche Ökosysteme deutlich beeinflusst.

Auf prozesstechnischer Ebene ist ein erhöhter NH₃-Schlupf ein Indikator für unvollständige Umsetzung des Brennstoffs, unzureichende Durchmischung oder unvorteilhafte Reaktionsbedingungen im Verbrennungssystem. Dies resultiert nicht nur in erhöhten Emissionen, sondern führt auch zu einem Verlust an nutzbarer chemischer Energie und somit zu einer Verringerung des thermischen Wirkungsgrades. Zusätzlich kann Ammoniak unter bestimmten Bedingungen korrosive Prozesse fördern, insbesondere in Anlagen mit feuchter Abgasführung oder bei der Bildung von Ammoniumsalzen in Abgaswegen.

Das Distickstoffoxid (N₂O) spielt sowohl in klimatischer als auch in stratosphärisch-chemischer Hinsicht eine bedeutende Rolle. Aufgrund seines hohen globalen Erwärmungspotenzials (GWP ≈ 273 über 100 Jahre) wirkt es, trotz vergleichsweise geringer Konzentration, stark klimawirksam. Damit zählt N₂O zu den wichtigen anthropogenen Treibhausgasen. Darüber hinaus ist N₂O derzeit der bedeutendste ozonabbauende Stoff chemischen Ursprungs in der Stratosphäre. Die Reduktion von N₂O-Emissionen besitzt daher einen doppelten Nutzen: Klimaschutz und Schutz der Ozonschicht.

Die kontinuierliche Überwachung von NH_3 - und N_2O -Emissionen ist im Kontext der NH_3 -Verbrennung von zentraler Bedeutung, da beide Stoffe maßgeblich zur Umwelt- und Klimabelastung beitragen. **Abbildung 6.8** zeigt auf der linken Seite die N_2O -Emissionen und auf der rechten Seite den NH_3 -Schlupf in Abhängigkeit vom Ammoniakgehalt im Brennstoff bei einer Luftzahl von $\lambda = 1,2$ (Äquivalenzverhältnis von 0,833).

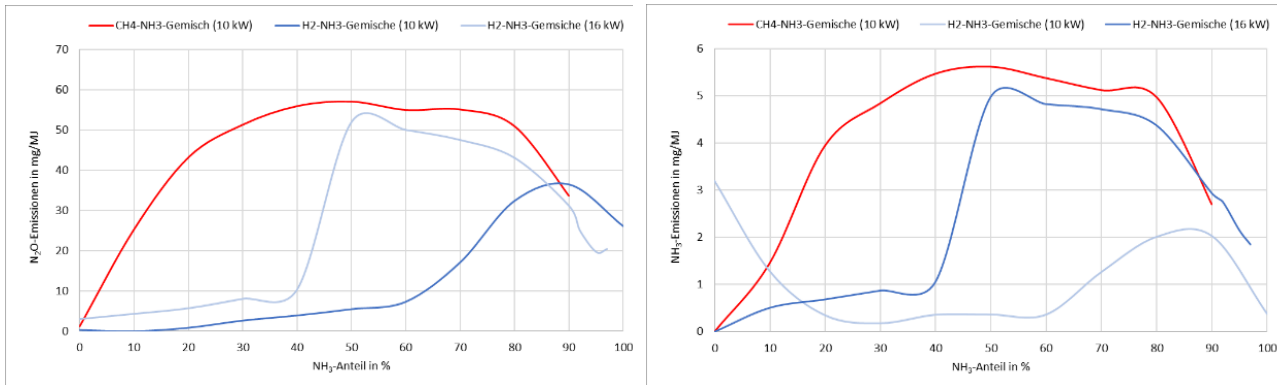


Abbildung 6.8: NH_3 - und N_2O -Emissionen bei Zumischung von NH_3 in CH_4 und H_2 (Quelle: GWI)

Die dargestellten Trends verdeutlichen, dass sowohl die NO_2 -Emissionen als auch der NH_3 -Schlupf ein ähnliches Abhängigkeitsverhalten wie die gesamten NO_x -Emissionen aufweisen. Charakteristisch ist eine parabelförmige Entwicklung über den betrachteten NH_3 -Bereich hinweg. Für die H_2 - NH_3 -Verbrennung zeigt sich bis zu einem NH_3 -Anteil von etwa 40 – 60 Vol.-% im Brennstoff eine vergleichbare, nahezu symmetrisch-parabolische Emissionsentwicklung. Abhängig von der thermischen Leistung tritt ab etwa 40 bzw. 60 Vol.-% NH_3 ein deutlicher sprunghafter Anstieg der Emissionen auf, der auf eine veränderte thermo-chemische Reaktionsdynamik und eine zunehmende Bedeutung von Nebenreaktionen zurückgeführt werden kann. Nach diesem Peak sinken die Emissionen wieder graduell ab, was auf eine Stabilisierung der Flammenstruktur und eine veränderte radikalchemische Zusammensetzung im Hoch- NH_3 -Bereich hindeutet.

Aus **Abbildung 6.9** lässt sich ableiten, dass der NH_3 -Schlupf weitgehend unabhängig von der Luftzahl ist. Dies deutet darauf hin, dass dessen Entstehung primär von unvollständig umgesetztem Brennstoff und der Reaktivität der NH_3 -Oxidationspfade beeinflusst wird. Im Gegensatz dazu steigen die N_2O -Emissionen mit zunehmender Luftzahl signifikant an. Dieser Trend lässt sich mit der verstärkten Bildung von N_2O unter leicht mageren Bedingungen erklären, insbesondere durch kinetisch begünstigte Zwischenpfade wie die rekombinative Reaktion von NH - und NO -Radikalen bei reduzierter Flammentemperatur.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass sowohl der NH_3 -Schlupf als auch die N_2O -Emissionen stark von der Brennstoffzusammensetzung und dem globalen Luftverhältnis beeinflusst werden, wobei besonders im Bereich mittlerer NH_3 -Anteile nichtlineare, durch radikalchemische Mechanismen getriebene Emissionswerte auftreten.

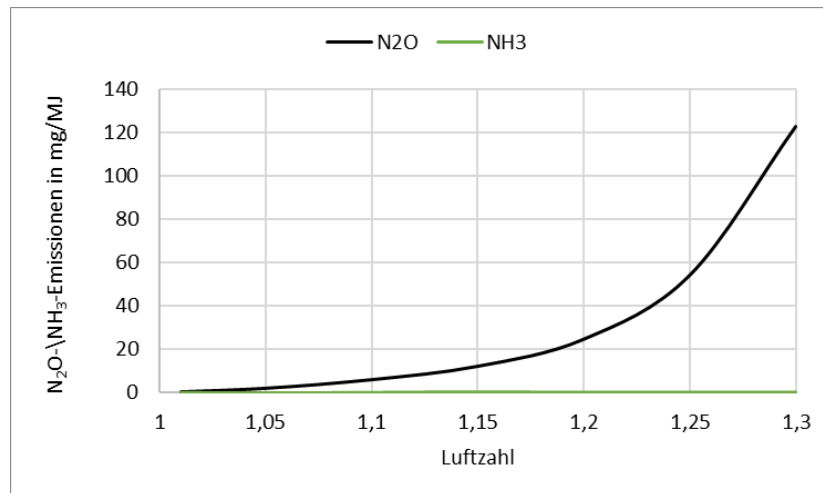


Abbildung 6.9: NH₃- und N₂O-Emissionen in Abhängigkeit der Luftzahl (Quelle: GWI)

6.3 CFD-Simulation des Laborbrenners

Aufbauend auf den experimentellen Untersuchungen, in denen das Strömungs- und Verbrennungsverhalten des Brenners unter realen Betriebsbedingungen erfasst und ausgewertet wurde, folgt nun der numerische Teil. Während die Messungen eine belastbare Datengrundlage liefern und zentrale Phänomene wie Flammenstabilität, Temperaturverteilung und Emissionsbildung sichtbar machen, bleiben einige Prozesse – etwa lokale Mischungszustände, Reaktionszonenstruktur oder kleinräumige Rückströmungen – experimentell nur eingeschränkt zugänglich.

Um diese Bereiche zu ergänzen und die im Versuch beobachteten Effekte detaillierter zu interpretieren, werden im folgenden Kapitel CFD-Simulationen herangezogen. Ziel der numerischen Untersuchungen ist es, die Strömungs-, Mischungs- und Verbrennungsprozesse räumlich hochaufgelöst abzubilden, die Sensitivität gegenüber Modellannahmen zu analysieren und die Ergebnisse systematisch mit den Messdaten zu validieren. Damit ermöglicht der CFD-Teil nicht nur ein tieferes physikalisches Verständnis der Verbrennungsvorgänge, sondern schafft auch eine Grundlage für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf weitere Betriebsfälle und mögliche Optimierungsansätze.

Die numerische Strömungssimulation (CFD: Computational Fluid Dynamics) hat sich durch immer leistungsfähige und dabei kostengünstige Rechnersysteme in den letzten Jahrzehnten zu einem wichtigen Werkzeug zur Analyse, Auslegung, Optimierung und Fehlerbehebung von technischen Systemen aller Art entwickelt, die in fast allen ingenieurtechnischen Anwendungsfeldern eingesetzt wird. Hierbei wird das partielle Gleichungssystem, welches eine Strömung formal vollständig beschreibt, aber analytisch nicht lösbar ist, überführt in ein lineares Gleichungssystem. Dieses lineare Gleichungssystem kann durch numerische Algorithmen effizient iterativ näherungsweise gelöst werden. Grundlage solcher Simulationen ist dabei (fast) immer ein numerisches Gitter, in dem das zu simulierende Rechengebiet diskretisiert wird, d. h. in viele kleine, miteinander verknüpfte Zellen aufgeteilt wird. Die Anzahl der Zellen selbst bei einfachen Geometrien geht dabei oft in die Millionen.

Im Bereich der industriellen Verbrennungstechnik bieten CFD-Verfahren eine Reihe von Vorteilen, gerade bei der Untersuchung der Auswirkungen eines Brennstoffwechsels wie im hier beschriebenen Projekt. Die hohe räumliche Auflösung der dreidimensionalen Simulationsdaten erlaubt umfas-

sende Visualisierungsmöglichkeiten, um die komplexen Prozesse der turbulenten, Strömung, Mischung und Verbrennung mit verhältnismäßig geringem Aufwand zu analysieren und zu optimieren. Zudem sind Simulationsverfahren nicht begrenzt durch messtechnische Einschränkungen, etwa die Zugänglichkeit der Geometrie mit Sonden. Daher eignen sich solche Simulationen auch, um Untersuchungen an großen und/oder schwer zugänglichen Geometrien durchzuführen oder Komponenten wie etwa Brenner in einer Anwendung hoch zu skalieren.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass alle CFD-Simulationen im Kontext der angewandten Verbrennungstechnik nicht nur numerische Näherungslösungen darstellen, sondern auch zwangsläufig modellbasiert sind. Es müssen vereinfachende Annahmen für komplexe physikalische Aspekte wie Turbulenz, Verbrennung und Strahlungswärmeübertragungen getroffen werden, um den numerischen Aufwand (und damit die benötigten Hardware-Kapazitäten und Rechenzeiten) in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Eine vollkommen modellfreie Simulation einer turbulenten Strömung, die sogenannte Direkte Numerische Simulation (DNS), ist zwar prinzipiell möglich, ist aber für die Beschreibung realer technischer Prozesse mit nicht handhabbarem Rechenaufwand verbunden. Die DNS kann nur für akademische Grundlagenuntersuchungen sehr kleiner Geometrien eingesetzt werden.

Die Auswahl geeigneter Modelle für Turbulenz, Verbrennung und Strahlungswärmeübertragung ist daher entscheidend für die Aussagekraft der Simulation eines technischen Verbrennungssystems. Zudem erfordert die Simulation die Angabe geeigneter Randbedingungen. Gerade letzteres kann bei der Simulation von Thermoprozessanlagen eine Herausforderung sein, da manche Randbedingungen, etwa an Wänden in Industrieöfen, oft nur abgeschätzt werden können. CFD-Simulation stellen somit immer eine Beschreibung eines idealisierten Systems mit einigen notwendigen Vereinfachungen dar. Daher ist gerade der Vergleich mit belastbaren Messdaten wichtig, um die Aussagekraft einer Simulation zu validieren. Dies ist vor allem dann von Bedeutung, wenn, wie in diesem Projekt, die Simulation genutzt werden soll, um auf einen größeren Anwendungsfall hin zu extrapolieren.

Beim im Rahmen des Projekts eingesetzten CFD-Code handelt es sich um ANSYS FLUENT 23R2, ein kommerziell erhältliches CFD-Softwarepaket, das in der Thermoprozesstechnik weit verbreitet ist. Zum Einsatz kamen sogenannte stationäre RANS-Simulationen (RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes), d. h. die eigentlich zeitlich abhängigen Navier-Stokes-Gleichungen, die eine Strömung vollständig beschreiben, wurden numerisch überführt in Erhaltungsgleichungen für die Mittelwerte der relevanten Größen. Dies reduziert den Rechenaufwand drastisch und ist auch sinnvoll, da für die Auslegung und Analyse die zeitlichen Mittelwerte hinreichend sind, führt aber zum so genannten Schließungsproblem der Turbulenz, d. h. es werden zusätzliche Gleichungen in Form eines Turbulenzmodells benötigt, um genauso viele Gleichungen wie unbekannte Größen zu haben, so dass sich das System lösen lässt. Hier wurde das weitverbreitete realizable k - ε -Modell verwendet. Die Wechselwirkung von Impuls- und Druckgleichungen wird dabei mit Hilfe eines gekoppelten Ansatzes berücksichtigt.

Die Verbrennungsprozesse stellen, neben der Turbulenz und der Strahlungswärmeübertragung, eine zweite zentrale numerische Herausforderung bei der Simulation reaktiver turbulenter Strömungen dar. In Anbetracht der sehr unterschiedlichen Brenngase, die im Projekt betrachtet werden, war die Verwendung eines stark reduzierten Reaktionsmechanismus zur Modellierung der Verbrennung nicht sinnvoll. Der Einsatz eines umfangreichen detaillierten Mechanismus wäre prinzipiell

möglich, aber numerisch aufwändig. Daher wurde auf ein mischungsbruch-basiertes Verbrennungsmodell mit vor-generierten chemischen Datenbanken zurückgegriffen. Diese Datenbanken werden anhand des nicht-adiabaten chemischen Gleichgewichts vor der eigentlichen CFD-Simulation erzeugt. Dies ist ein in der Praxis erprobter Ansatz, gerade bei der Verwendung ungewöhnlicher Brennstoffe, für die oft keine verlässlichen reduzierten Reaktionsmechanismen vorliegen. Auf die vor-generierten Tabellen wird während der eigentlichen Simulation mit Hilfe von Skalaren wie dem lokalen mittleren Mischungsbruch, der mittleren Mischungsbruch-Varianz, der mittleren Enthalpie zur Beschreibung nicht-adiabater Effekte sowie einer Reaktionsfortschrittsvariable zur Beschreibung der reaktionskinetischen Effekte zugegriffen, um die benötigten Stoffwerte zu ermitteln. Diese werden dann iterativ in die Strömungslösungen eingebunden. Die Chemiedatenbank wird zudem mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion gewichtet, um die Interaktion zwischen Turbulenz und Reaktion zu modellieren. Hierzu wird eine β -PDF (PDF: probability density function, dt. Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion) verwendet, ebenfalls ein industriell gebräuchlicher Modellierungsansatz.

Für Hochtemperaturprozesse spielt die Wärmeübertragung durch Strahlung eine zentrale Rolle. Stand der Technik in der CFD ist hier die Verwendung eines Discrete-Ordinates-Modells (DO-Modell), das parallel zur eigentlichen CFD-Simulation in bestimmten Intervallen durchgeführt wird. Dieses strahlenbasierte Modell ermittelt Quellterme, die in die Energiegleichung der Strömungssimulation eingebunden werden, um auf diese Weise die wechselseitigen Auswirkungen der radiativen Wärmeübertragung und der turbulenten Strömung abzubilden.

Abbildung 6.10 stellt das für die CFD-Simulationen aufbereitete Geometriemodell des Laborbrenners dar, dessen konstruktive Ausführung dem realen Versuchsstand entspricht. Der Brenner ist horizontal in der Stirnwand installiert und weist eine ringförmig umlaufende Drallerzeugerstufe auf, mittels derer ein definiertes Drallfeld generiert wird. Analog zu den experimentellen Randbedingungen erfolgt die Oxidatorzufuhr mit einer Drallzahl von 1,1. Zur Analyse der Simulationsergebnisse werden Konturplots in der YZ-Ebene ausgewertet. Diese Ebene entspricht einer Schnittebene auf Höhe der Brennerachse und gewährleistet damit die unmittelbare Vergleichbarkeit mit den experimentell gewonnenen Flammenaufnahmen.

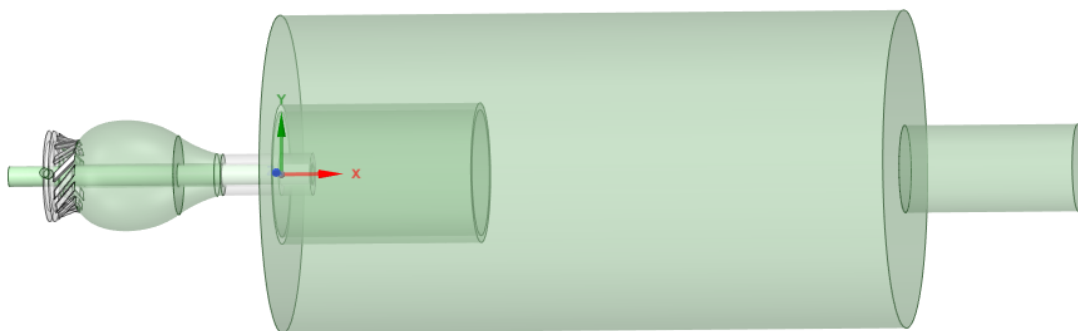
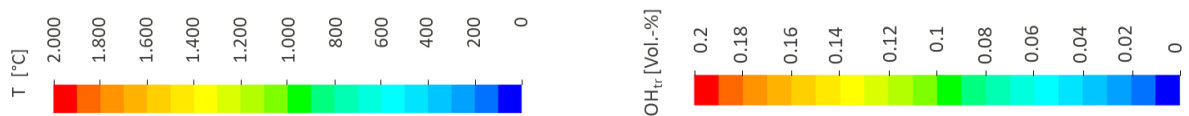


Abbildung 6.10: Geometriemodellierung des Laborbrenners (Quelle: GWI)

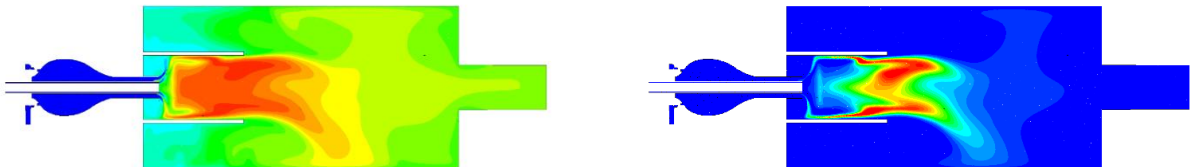
Der Vergleich von CFD-Ergebnissen (**Abbildung 6.11**) mit den experimentellen Flammenbildern (**Abbildung 6.3**) zeigt eine ausgeprägte Konsistenz hinsichtlich des globalen Flammenverhaltens. Die Simulation bildet die charakteristische Flammenstruktur zuverlässig ab. Dabei wird deutlich, dass der Einsatz verschiedener Brennstoffe signifikante Auswirkungen auf das Temperaturniveau der Flamme besitzt. Bei Verwendung von Wasserstoff steigt die Flammentemperatur aufgrund seiner

hohen Reaktivität und seiner adiabaten Verbrennungstemperatur deutlich an. Wird hingegen Ammoniak anstelle von Erdgas eingesetzt, reduziert sich die Flammentemperatur spürbar, was auf die geringere Reaktivität und die niedrigere adiabate Flammentemperatur von Ammoniak zurückzuführen ist. Die simulierten Trends stimmen gut mit theoretischen Berechnungen der adiabaten Flammentemperaturen der eingesetzten Brennstoffe überein.

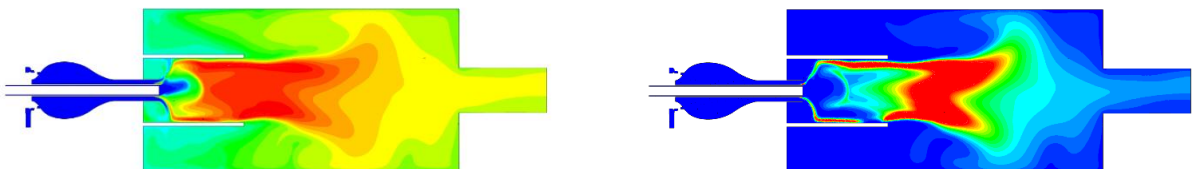
Trotz dieser thermischen Unterschiede weisen die Flammen hinsichtlich ihrer geometrischen Ausbildung eine vergleichbare Struktur auf. Dies wird durch die Analyse der OH-Radikalkonzentrationen (**Abbildung 5.11**) bestätigt, die als Indikator für die Lage und Intensität der Hauptreaktionszone dienen. Die Bildung von OH-Radikalen erfolgt insbesondere bei wasserstoffhaltigen Brennstoffen sehr ausgeprägt, da in der Flammenzone zunächst hohe Konzentrationen an Zwischenradikalen entstehen, die bei hinreichendem Sauerstoffangebot rasch zu Wasserdampf (H_2O) weiterreagieren. Die Höhe der OH-Konzentrationen variiert somit in Abhängigkeit vom Wasserstoffanteil des jeweiligen Brennstoffs. Reiner Wasserstoff führt erwartungsgemäß zu deutlich höheren OH-Spitzenwerten, während bei Ammoniak aufgrund seines weniger reaktiven Abbaupfades geringere Konzentrationen auftreten. Insgesamt zeigen die Simulationen, dass die Flammen trotz unterschiedlicher Reaktivitäten und Temperaturfelder sich in der im Brennraum in einer vergleichbaren Größenordnung verbleiben.



Erdgas: $T_{\max} = 1.895 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{out}} = 1.156 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Wasserstoff: $T_{\max} = 2.102 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{out}} = 1.280 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Ammoniak: $T_{\max} = 1.734 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{out}} = 1.210 \text{ }^{\circ}\text{C}$

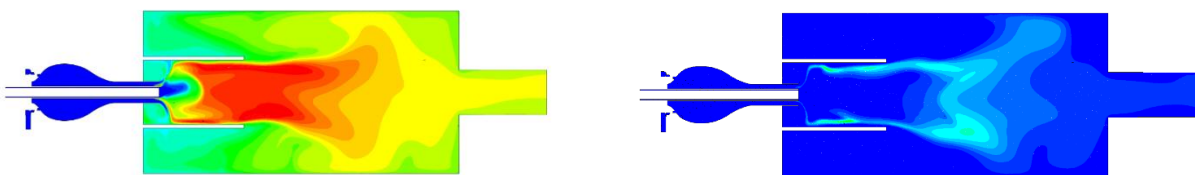


Abbildung 6.11: CFD-Ergebnisse (Quelle: GWI)

7 Untersuchung kommerzieller Brennersysteme der Ziegelindustrie

7.1 Experimentelle Untersuchung ausgewählter und angepasster Brennersysteme im semi-industriellen Maßstab

Die experimentellen Untersuchungen wurden am semi-industriellen Hochtemperaturofen des Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. durchgeführt. Der Ofen ist mit 1,2 m x 1,0 m x 5 m dimensioniert. Die Versuchsofenanlage besteht aus einer Stahlblechkonstruktion, die mit einem feuerfesten Fasermaterial (Al_2O_3) ausgekleidet ist. Es sind insgesamt sieben verschließbare Öffnungen in der Mittelebene des Ofens vorhanden, die einen direkten Zugang zur Brennkammer während des Betriebes ermöglichen. Außerdem kann ein größeres Sichtfenster im vorderen Ofenabschnitt geöffnet werden, welches die Anwendung optischer Verfahren zur Sichtbarmachung und Vermessung von Brennerflammen erlaubt; für die experimentellen Untersuchungen in diesem Projekt allerdings als Zugang für einen sekundären Luftstrom dient, um die Bedingungen eines Tunnelofens möglichst anwendungsnah nachzustellen. Mittels vier gasbeheizter Strahlheizrohre kann zusätzliche Wärme in den Ofenraum eingebracht werden. Vier luftbetriebene Kühlrohre ermöglichen die Darstellung einer Last durch Wärmeabfuhr. Der grundsätzliche Aufbau der Anlage ist aus den **Abbildungen 7.1** ersichtlich.

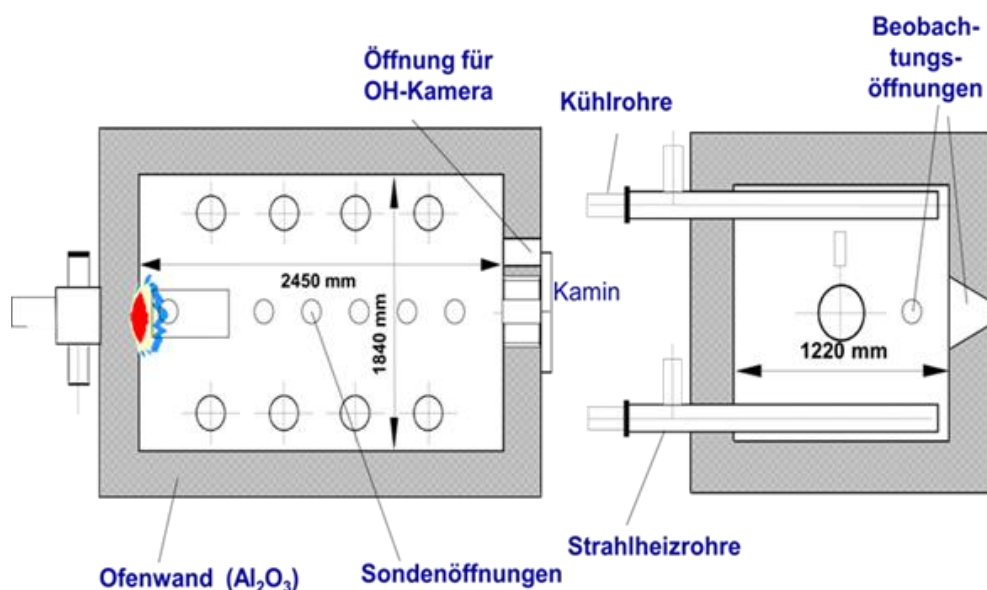


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Versuchsanlage am GWI (Quelle: GWI)

Für die Untersuchungen wird der Testbrenner stirnseitig an den Versuchsofen montiert, wobei aufgrund des vergleichsweise geringen Außendurchmessers des Brenners der verbleibende Raum der Anschlussöffnung des Ofens mit Fasermaterial ausgekleidet wird. **Abbildung 7.2** zeigt den eingebauten Brenner 2 im Ofenrauminnenraum. Die Mündung des montierten Brenners ragt ungefähr 25 cm in den Ofeninnenraum hinein. Ausgewählt wurden typische Lanzenbrenner, wie sie bei Deckenfeuerungen im Tunnelofen eingesetzt werden. Diese Brenner zeichnen sich durch einen hohen Austrittsimpuls aus, um über die gesamte Besatzhöhe eine turbulente Strömung zu erreichen und somit einen gleichmäßigen Wärmeintrag in das Produkt zu realisieren.



Abbildung 7.2: Versuchsanlage mit eingebautem Lanzenbrenner (Quelle: GWI)

Zusätzlich zu der brenngasparallelen Luftführung konventioneller Industriebrenner erfolgt eine seitliche Zuführung der Verbrennungsluft durch die Öffnung in der Ofenseitenwand, da im klassischen Tunnelofen die Brenner mit einer Luftzahl von annähernd 1 betrieben werden. Durch das Gegenstromprinzip im Tunnelofen steht für die Verbrennung aber Luft aus der Kühlzone zur Verfügung und somit stellt sich ein weit überstöchiometrischer Betrieb in der Brennzone ein. Zur Messung der Abgasemissionen kommt ein wassergekühltes Absaugpyrometer zur Anwendung. Die Probennahme erfolgt im Kamin der Ofenanlage. Hierbei kommen unterschiedliche, miteinander verschaltete Abgasanalysatoren zur Anwendung, denen die Abgasprobe über einen Filter und einen Messgaskühler zugeführt wird. Vor der Durchführung der Messung werden die Analysatoren kalibriert. Die zu untersuchenden Brenner 1 und 2 sind für einen Erdgasbetrieb ausgelegt. Im Rahmen der Versuche sollte die Tauglichkeit beider Brenner für den Betrieb mit NH_3 , H_2 sowie CH_4 - NH_3 - und H_2 - NH_3 -Gemischen untersucht werden.

Reingasbrenner 1



Reingasbrenner 2



Abbildung 7.3: Industriebrenner für die Ziegelindustrie. Links Brenner 1; Rechts: Brenner 2

Brenner 1 wurde mit einer Leistung von 80 kW und Brenner 2 mit einer Leistung von 60 kW betrieben. In beiden Fällen wurde die Luftzahl 1,5 eingestellt. Untersucht wurde das Verbrennungsverhalten bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C. Die gewünschten Ofenraumtemperatur wurden mit Hilfe einer definierten Kühlleistung erreicht. Für die Realisierung von verschiedenen Kühlleistungen sind im Ofen Kühlrohre vorhanden, über die bedarfsgerechte Wärme abgeführt

werden kann. Die Brenner wurden im stabilen Grundbetrieb mit Erdgas bzw. mit H₂ gestartet. Anschließend wurde der Ammoniakanteil in 10 Vol.-%-Schritten zu Erdgas bzw. Wasserstoff hinzugegeben.

Tabelle 7.1: Betriebsdaten der Brenner 1 und 2 am semi-industriellen Ofen

		Brenner 1	Brenner 2
Brennerleistung	[kW]	80	60
Luftzahl	[-]	1,5	1,5
Medienvorwärmtemperatur	[°C]	25	25

Wie in **Kapitel 6.2** erläutert, werden bei der folgenden Analyse der Messergebnisse sämtliche Emissionen auf mg/MJ bezogen, um einen fairen Vergleich sicherzustellen und eine Verzerrung durch den variierenden Wasserdampfgehalt im Abgas zu vermeiden.

Für jede Messreihe und jeden Brenner lässt sich aus den dargestellten Ergebnissen folgende generelle Aussage ableiten:

Im jeweiligen NH₃-Zumischungsintervall, für das Messwerte vorliegen, war ein stabiler Brennerbetrieb möglich. Das Abbrechen der Kurven markiert den Punkt, ab dem unter den gegebenen Betriebsparameter kein stabiler Verbrennungszustand mehr realisiert werden konnte und die Messreihe daher beendet werden musste.

NO_x-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab

Abbildung 7.4 zeigt die NO_x-Emissionen in Abhängigkeit vom NH₃-Volumenanteil im Brenngas für Brenner 1 und Brenner 2 bei einer Ofentemperatur von 850 °C und 1.050 °C.

Bei einer Ofentemperatur von 1.050 °C steigen die NO_x-Emissionen mit zunehmender NH₃-Zumischung deutlich an, was die Dominanz von Brennstoff-NO_x aus dem im Ammoniak gebundenen Stickstoff belegt. Im Grundbetrieb mit CH₄ nimmt NO_x bei beiden Brennern nahezu monoton zu und erreicht im NH₃-reichen Mischbereich ausgeprägte Maxima. Brenner 1 zeigt dabei die höchsten Werte mit einem Peak im Bereich von etwa 60 – 70 Vol.-% NH₃, während Brenner 2 ein etwas niedrigeres Maximum aufweist, das zu höheren NH₃-Anteilen (≈ 70 – 75 Vol.-% NH₃) verschoben ist. Diese Verschiebung deutet auf brennerspezifische Unterschiede in Mischgüte, Flammenform oder Luftführung hin, durch die die Umwandlung des NH₃-Stickstoffs zu NO im mittleren Zumischungsbereich stärker begrenzt wird und sich das Emissionsmaximum zu höheren NH₃-Anteilen verschiebt.

Im Grundbetrieb mit H₂ steigen die NO_x-Emissionen bei 1.050 °C ebenfalls mit zunehmender NH₃-Zumischung, jedoch weniger steil und mit später auftretenden Maxima. Brenner 1 erreicht sein Maximum bei ca. 75 – 80 Vol.-% NH₃. Brenner 2 erst bei etwa 85 Vol.-% NH₃. Im nahezu reinen NH₃-Betrieb fallen die NO_x-Werte für beide Brenner wieder deutlich ab. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass sich die Flammencharakteristik im ammoniakdominierten Betrieb verändert, beispielsweise durch lokale Sauerstofflimitierung oder eine reduzierte Oxidationsreaktivität, wodurch ein größerer Anteil des Brennstoffstickstoffs nicht mehr bis zu NO oxidiert wird.

Bei abgesenktem Temperaturniveau von 850 °C liegen die NO_x-Emissionen insgesamt deutlich niedriger und zeigen ein nicht-monotones Verhalten mit klaren Maxima in bestimmten NH₃-Zumischungsbereichen. Im Grundbetrieb mit Erdgas treten bei beiden Brennern frühe NO_x-Peaks auf, die brennerspezifisch verschoben sind: Brenner 1 erreicht ein Maximum bereits bei etwa 15 – 25 Vol.-% NH₃, während Brenner 2 einen Peak bei 30 – 35 Vol.-% NH₃-Anteilen erreicht. Mit weiterer NH₃-Erhöhung sinken die Emissionen stark ab und erreichen im mittleren Zumischungsbereich geringe Werte, bevor im hoch ammoniakreichen Betrieb ein leichter Wiederanstieg beobachtet wird. Diese Verläufe verdeutlichen, dass bei niedriger Temperatur die NH₃-Oxidation kinetisch limitiert ist und gleichzeitig im Bereich geringer bis mittlerer NH₃-Zumischung eine besonders effiziente NO-Bildung stattfinden kann.

Im Grundbetrieb mit H₂ zeigen beide Brenner bei 850 °C zunächst moderate NO_x-Anstiege; nennenswerte Emissionsniveaus stellen sich jedoch erst bei höheren NH₃-Zumischungen ein. Brenner 2 erreicht um etwa 50 Vol.-% NH₃ Werte von ≈ 1.800 mg/MJ während Brenner 1 bei etwa 30 Vol.-% NH₃ im Brennstoff die höchsten Emissionen von ca. 1.700 mg/MJ emittiert. Das Abbrechen der Messreihen weist darauf hin, dass sich die Flamme im ammoniakreicheren Betrieb bei niedriger Temperatur nicht stabilisiert und die Messungen ab diesem Punkt beendet werden mussten.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass im Hochtemperatur-Betrieb Brennstoff-NO_x aus NH₃ die Emissionen dominiert und bei CH₄ als Grundbrennstoff besonders stark ausgeprägt ist, während H₂ als Grundbrennstoff flachere Anstiege und später liegende Maxima erzeugt. Im Niedrigtemperaturbetrieb treten hingegen grundbrennstoff- und brennerabhängige kritische Fenster mit NO_x-Maxima auf, die im Erdgas-Grundbetrieb im niedrigen bis mittleren NH₃-Bereich und im H₂-Grundbetrieb bei höheren NH₃-Anteilen liegen. Die systematisch zu höheren NH₃-Anteilen verschobenen Peaks von Brenner 2 unterstreichen den Einfluss der Brennerauslegung auf Mischung und Reaktionspfad. Daraus folgt, dass eine an Grundbrennstoff und Temperaturniveau angepasste Optimierung von Luftführung, Verweilzeit und Mischgüte erforderlich ist, um NO_x-Spitzen bei Verbrennung von NH₃-Gemischen zu vermeiden und stabile, emissionsarme Flammen auch bei hohen NH₃-Zumischungen sicherzustellen.

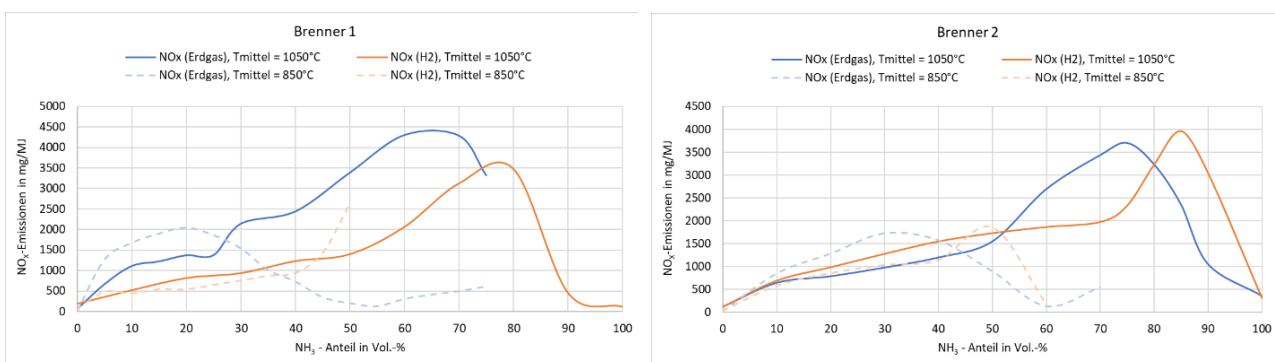


Abbildung 7.4: NO_x-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)

NH₃-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab

Abbildung 7.5 stellt den NH₃-Schlupf in Abhängigkeit vom NH₃-Volumenanteil im Brenngas für Brenner 1 und Brenner 2 dar. Für Brenner 1 zeigt sich bei 1.050 °C über den gesamten Zumischungsbereich eine nahezu vollständige NH₃-Umsetzung. Sowohl im CH₄- als auch im H₂-Grundbetrieb bleiben

die NH_3 -Konzentrationen im Abgas sehr gering und liegen lediglich im hohen NH_3 -Bereich bzw. im mittleren Zumischungsbereich bei wenigen mg/MJ.

Bei abgesenkter Temperatur von 850 °C treten dagegen deutliche, grundbrennstoffabhängige Schlupfphänomene auf. Im H_2 -Grundbetrieb wird bereits bei kleinen NH_3 -Anteilen ein ausgeprägtes Schlupfmaximum erreicht (Peak bei etwa 5 – 10 Vol.-% NH_3), das mit steigender NH_3 -Zumischung rasch abnimmt und ab etwa 50 Vol.-% nahezu verschwindet. Im Erdgas-Grundbetrieb bleibt der Schlupf zunächst gering, steigt jedoch ab ca. 70 Vol.-% NH_3 abrupt auf hohe Werte an. Diese Verläufe verdeutlichen, dass bei niedriger Temperatur einerseits die NH_3 -Oxidation kinetisch limitiert ist und andererseits abhängig vom Grundbrennstoff unterschiedliche Zumischungsbereiche besonders schlupfanfällig sind.

Brenner 2 weist im Vergleich dazu eine deutlich höhere Empfindlichkeit gegenüber NH_3 -Zumischung auf. Bei 1.050 °C treten im CH_4 -Grundbetrieb bereits im niedrigen bis mittleren NH_3 -Bereich hohe NH_3 -Konzentrationen im Abgas auf, mit einem Maximum bei etwa 35 - 45 Vol.-% NH_3 ; bei weiteren Erhöhungen des NH_3 -Anteils sinkt der Schlupf wieder deutlich ab und erreicht im stark NH_3 -reichen Betrieb geringe Werte. Im H_2 -Grundbetrieb steigt der NH_3 -Schlupf hingegen bei 1.050 °C nahezu kontinuierlich mit zunehmender NH_3 -Zumischung an und erreicht im NH_3 -reichen Bereich die höchsten Werte. Bei 850 °C zeigt Brenner 2 im Erdgas-Grundbetrieb ebenfalls einen ausgeprägten Schlupf im niedrigen bis mittleren Zumischungsbereich, der bei höheren NH_3 -Anteilen wieder zurückgeht, während im H_2 -Grundbetrieb auch bei niedrigerer Temperatur ein annähernd monotoner Anstieg des Schlupfs mit dem NH_3 -Anteil beobachtet wird.

Insgesamt deuten die Unterschiede zwischen den Brennern darauf hin, dass brennerspezifische Strömungs- und Mischcharakteristika - insbesondere Mischgüte, Flammenlage und effektive Aufenthaltzeit in heißen, oxidierenden Zonen - maßgeblich bestimmen, ob NH_3 vollständig umgesetzt wird oder als Schlupf im Abgas erscheint. Während Brenner 1 bei hoher Temperatur unabhängig vom Grundbrennstoff eine robuste NH_3 -Umsetzung ermöglicht, erfordert Brenner 2 insbesondere im H_2 -Grundbetrieb und im niedrigen bis mittleren Zumischungsbereich optimierte Misch- und Verweilzeitbedingungen, um NH_3 -Schlupf zuverlässig zu vermeiden. Wie bereits erwähnt, das Abbrechen der Messreihen weist darauf hin, dass sich die Flamme im ammoniakreicheren Betrieb bei niedriger Temperatur nicht stabilisiert und die Messungen ab diesem Punkt beendet werden mussten.

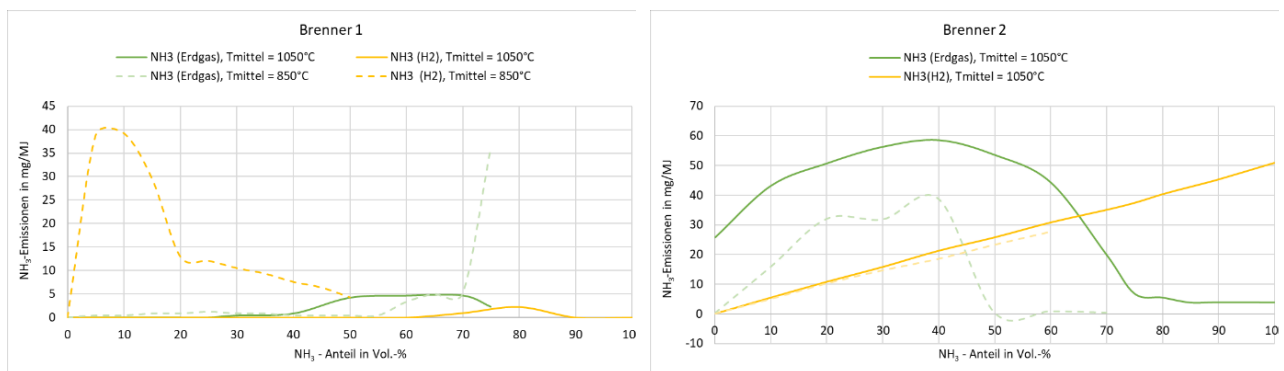


Abbildung 7.5: NH_3 -Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)

N₂O-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab

Abbildung 7.6 zeigt die N₂O-Konzentrationen im Abgas in Abhängigkeit vom NH₃-Volumenanteil im Brenngas für Brenner 1 und Brenner 2. Über beide Brenner hinweg wird ein ausgeprägter Temperatureinfluss auf N₂O-Konzentrationen sichtbar.

Bei 1.050 °C bleiben die N₂O-Emissionen unabhängig vom Grundbrennstoff und vom Zumischungsgrad über weite Bereiche sehr niedrig. Lediglich bei sehr hohen NH₃-Anteilen zeigen sich kleine Anstiege, die jedoch auf einem insgesamt geringen Niveau verbleiben. Dies weist darauf hin, dass N₂O bei hoher Temperatur entweder kaum gebildet oder in der heißen, oxidierenden Flammzone rasch weiter zu NO beziehungsweise N₂ umgesetzt wird.

Demgegenüber treten bei abgesenkter Temperatur von 850 °C deutlich erhöhte N₂O-Konzentrationen auf. Im Erdgas-Grundbetrieb steigt N₂O bei beiden Brennern ab mittleren NH₃-Zumischungsraten stark an. Für Brenner 1 setzt dieser Anstieg bereits ab etwa 30 - 35 Vol.-% NH₃ ein und erreicht im hoch ammoniakreichen Betrieb sehr hohe Werte von über 1.600 mg/MJ. Das deutet auf eine zunehmende Stabilisierung von N₂O als Zwischenprodukt einer unvollständigen NH₃-Oxidation hin, sobald Temperatur und Radikalpool für eine vollständige Weiteroxidation begrenzt sind. Brenner 2 zeigt im Erdgas-Grundbetrieb ebenfalls einen ausgeprägten N₂O-Anstieg, allerdings deutlich moderater: der Peak liegt bei etwa 60 Vol.-% NH₃ und erreicht rund ca. 650 mg/MJ, bevor die Werte im höheren Zumischungsbereich wieder leicht abnehmen. Damit ist Brenner 2 bei 850 °C weniger anfällig für N₂O-Anreicherung, was auf günstigere Misch- und Verweilzeitbedingungen oder heißere Reaktionszonen hindeutet.

Im H₂-Grundbetrieb sind die N₂O-Emissionen bei 850 °C insgesamt geringer als im Erdgas-Grundbetrieb. Bei Brenner 1 bleibt N₂O über den gesamten Zumischungsbereich sehr niedrig, während Brenner 2 einen begrenzten Peak um etwa 60 Vol.-% NH₃ mit maximal rund 330 mg/MJ zeigt.

Zusammenfassend belegen die Ergebnisse, dass N₂O vor allem im Niedrigtemperaturbetrieb als sensibler Indikator für teilreaktive NH₃-Oxidationspfade auftritt. Während bei 1.050 °C in beiden Brennern praktisch keine N₂O-Bildung beobachtet wird, können 850 °C – insbesondere im Erdgas-Grundbetrieb und bei hohen NH₃-Zumischungen die Entstehung von N₂O begünstigen. Als Fazit lässt sich festhalten, dass sowohl die Ofenraumtemperatur als auch das Brennerdesign die N₂O-Bildung maßgeblich beeinflussen. Für die N₂O-Entstehung ist dabei insbesondere das Zusammenspiel aus Mischgüte, Luftführung und effektiver Aufenthaltszeit in heißen, oxidierenden Reaktionszonen entscheidend. Diese Parameter bestimmen die lokalen Reaktionsbedingungen und damit die Stabilität bzw. den Abbau von N₂O als Zwischenprodukt der Ammoniakoxidation.

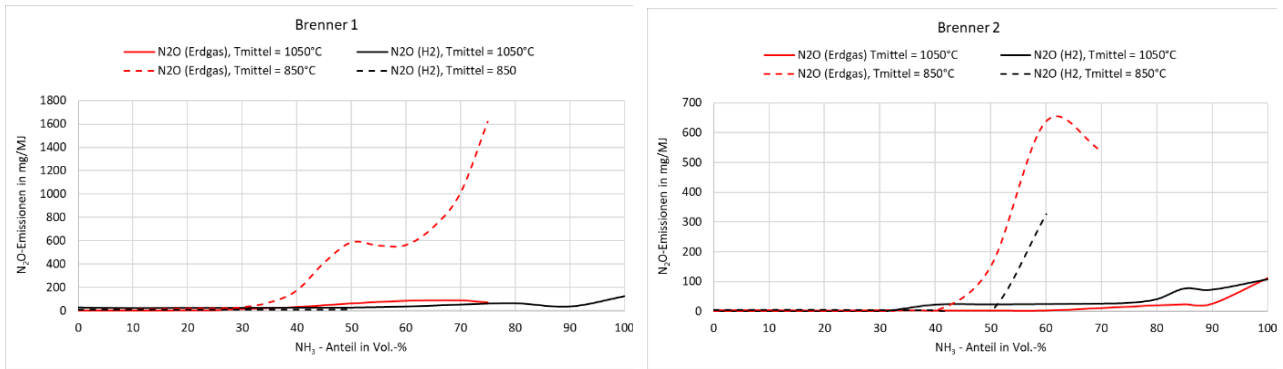


Abbildung 7.6: N₂O-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab (Quelle: GWI)

CO-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab

Abbildung 7.7 zeigt die CO-Emissionen in Abhängigkeit vom NH₃-Volumenanteil im Brenngas für Brenner 1 und Brenner 2. Bei 1.050 °C liegen die CO-Konzentrationen für beide Brenner über den gesamten Zumischungsbereich unabhängig vom Grundbrennstoff nahe der Nachweisgrenze. Dies weist auf eine weitgehend vollständige Oxidation hin, sodass CO als Zwischenprodukt in den oxidierenden Flammenbereichen effektiv zu CO₂ weiterreagiert.

Bei abgesenktem Temperaturniveau von 850 °C zeigt sich dagegen ein grundbrennstoffabhängiges Verhalten. Im Erdgas-Grundbetrieb bleiben die CO-Emissionen zunächst bis zu hohen NH₃-Zumischungen gering, steigen jedoch ab etwa 60 - 70 Vol.-% NH₃ sprunghaft auf Werte um 2.400 mg/MJ-Bereich an. In H₂-NH₃-Gemischen wird aufgrund des fehlenden C-Atoms kein CO emittiert.

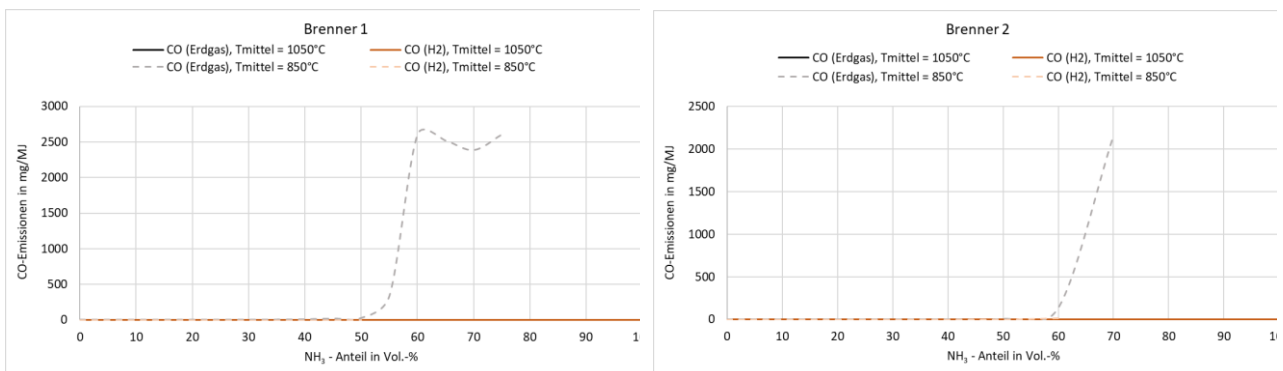


Abbildung 7.7: CO-Emissionen bei einer Ofenraumtemperatur von 850 °C und 1.050 °C im semi-industriellen Maßstab

7.2 Numerische Untersuchung der eingesetzten Brennersysteme und notwendige Anpassung der Brennergeometrie und Fahrweise

Definition der Randbedingungen und des Rechengebiets

Numerische Strömungssimulationen basieren (fast) immer auf Gitternetzen, mit denen das Rechengebiet diskretisiert wird. Die Auflösung, d. h. die Anzahl der Gitterzellen, die für die Beschreibung eines Rechengebiets verwendet wird, ist wichtig hinsichtlich der Qualität und Aussagekraft der Simulation, aber auch dem damit verbundenen Rechenzeit- und Hardwarebedarf. Die Gitter, die im Rahmen der hier vorgestellten Simulationen eingesetzt wurden, bestanden jeweils aus etwa 2,4 Millionen Zellen. Es handelt sich um unstrukturierte Hybridgitter, d. h. Zellen unterschiedlicher Form

wurden kombiniert, um die Geometrien bestmöglich mit einer vertretbaren Zellzahl abzubilden. **Abbildung 7.8** zeigt eine Darstellung des simulierten Rechengebiets. Als Ofenraum wurde der Brennerprüfstand des GWI zugrunde gelegt.

Die Randbedingungen für die Massen- und Impulserhaltungsgleichungen ergeben sich aus den vorgegebenen Feuerungsleistungen und Luftzahlen ($Q_{th} = 80 \text{ kW}$, $\lambda = 1,5$) und werden in Form von Massenströmen für die jeweiligen Brenngas- und Oxidatoreintritte vorgegeben, als Temperaturen werden jeweils 25 °C angesetzt. Für den Austritt des Rechengebiets wurde eine Druckaustrittsrandbedingung gewählt.

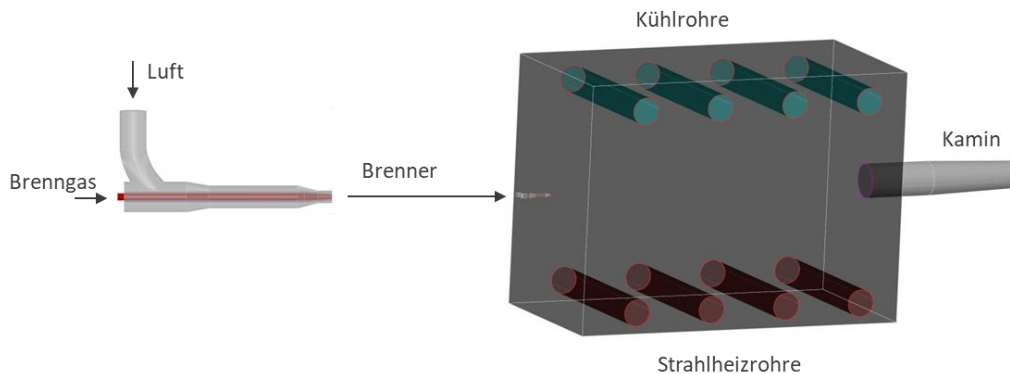


Abbildung 7.8: Modellierung des semi-industriellen Versuchsofens für CFD-Simulationen (Quelle: GWI)

Tabelle 7.2: Randbedingungen der CFD-Simulation

Brennerleistung	[kW]	80
Luftzahl	[-]	1,5
Medienvorwärmtemperatur	[°C]	25

Um eine mögliche Rezirkulation am Austritt zu vermeiden, wurde dort eine Verjüngung des Querschnitts modelliert, die aber keine Auswirkungen auf die Prozesse im Brennraum hat und nur dazu dient, die Konvergenz zu erleichtern.

Der Zustand an den Wänden des Ofens wird mit Hilfe einer gemischten Randbedingung abgebildet. Hierbei werden der konduktive, konvektive und radiative Wärmetransport unter Berücksichtigung von Wandstärke und Wärmeleitfähigkeit des Wandmaterials ermittelt. Der Zustand auf der Innenseite der Wand ergibt sich aus der CFD-Simulation selbst, als Zustand auf der Außenseite werden Umgebungsbedingungen angenommen. Dies ist einfacher und auch realistischer als die explizite Vorgabe von Wandtemperaturen oder Wärmeströmen durch die Wand. Formal handelt es sich somit bei der gemischten Wandrandbedingung um eine von-Neumann-Bedingung, da hier räumlich aufgelöst eine 1D-Wärmeleitungsgleichung durch die Wand gelöst wird. Dem Prüfstand wird in der Realität durch luftgekühlte Rohre eine Wärmelast aufgeprägt. Diese Rohre sind in der CFD-Simulation nicht berücksichtigt, anstelle dessen wird die Wärmeleitfähigkeit durch die Ofenwand höher angesetzt. Da sich ähnliche Abgastemperaturen wie in den Messungen ergeben, sind die Energiebilanzen der vermessenen und simulierten Systeme vergleichbar.

Vergleich der verschiedenen Brenngase mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation

Nachfolgend sollen die Simulationsergebnisse der verschiedenen untersuchten Brenngase in Auszügen durch Konturplots in der vertikalen Mittelebene des Ofens visualisiert werden. Die Simulationen berücksichtigen die vollständigen Brennergeometrien. Die dargestellten Konturplots von Temperaturen und O_2 -Konzentrationen trocken sind typische Indikatoren der Flammenform. Auf andere gängige Darstellungen, etwa CO - oder CO_2 -Verteilungen, wurde hingegen verzichtet, da diese Konzentrationen nicht bei allen Brennstoffen auftreten. So kann beispielsweise bei der Verbrennung von Wasserstoff oder Ammoniak kein CO_2 gebildet werden, da diese Brennstoffe kohlenstofffrei sind. Gleiches gilt für die Wahl einer charakteristischen CO -Konzentration zur Darstellung von Flammen.

In industriellen Thermoprozessanlagen ist die präzise Regelung und Aufrechterhaltung der Temperatur im Ofenraum von zentraler Bedeutung, um einen stabilen und reproduzierbaren Prozessablauf zu gewährleisten. Nur wenn ein definiertes Temperaturniveau erreicht und über die gesamte Prozessdauer konstant gehalten wird, kann die geforderte Produktqualität erzielt werden. Dies gilt insbesondere für kontinuierliche oder diskontinuierliche Prozesse der keramischen Industrie, wie etwa bei der Herstellung von Ziegeln.

Bei der Ziegelproduktion spielt die Temperaturverteilung im Brennofen eine entscheidende Rolle für die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Endprodukts. Während des Brennvorgangs werden die geformten und getrockneten Rohlinge bei Temperaturen von etwa 900 bis 1.250 °C gesintert. Eine homogene Temperaturverteilung ist dabei unerlässlich, um eine gleichmäßige Verdichtung und Mineralphasenbildung innerhalb des gesamten Brennguts zu gewährleisten. Lokale Temperaturunterschiede können zu unvollständigem Sintern, Rissbildungen oder Farbabweichungen führen, was die Produktqualität erheblich beeinträchtigt.

Darüber hinaus beeinflusst die Temperaturverteilung maßgeblich die Energieeffizienz des Brennprozesses. Ungleichmäßige Erwärmung oder Wärmeverluste an bestimmten Ofenbereichen führen zu erhöhtem Brennstoffverbrauch und einer ineffizienten Nutzung der zugeführten Energie. Durch eine detaillierte Analyse der Temperaturverteilung können solche Ineffizienzen erkannt und durch gezielte Anpassungen der Brennerkonfiguration, der Luftzuführung oder der Ofengeometrie minimiert werden.

Eine gleichmäßige und kontrollierte Temperaturführung trägt somit nicht nur zur Sicherstellung konstanter Produktqualität bei, sondern auch zur Reduzierung des Energiebedarfs und zur Verlängerung der Lebensdauer der Ofenauskleidung.

In **Abbildung 7.9** sind die CFD-Ergebnisse für die Temperaturverteilung im Ofen bei der Verbrennung von Erdgas, Wasserstoff und Ammoniak gezeigt.

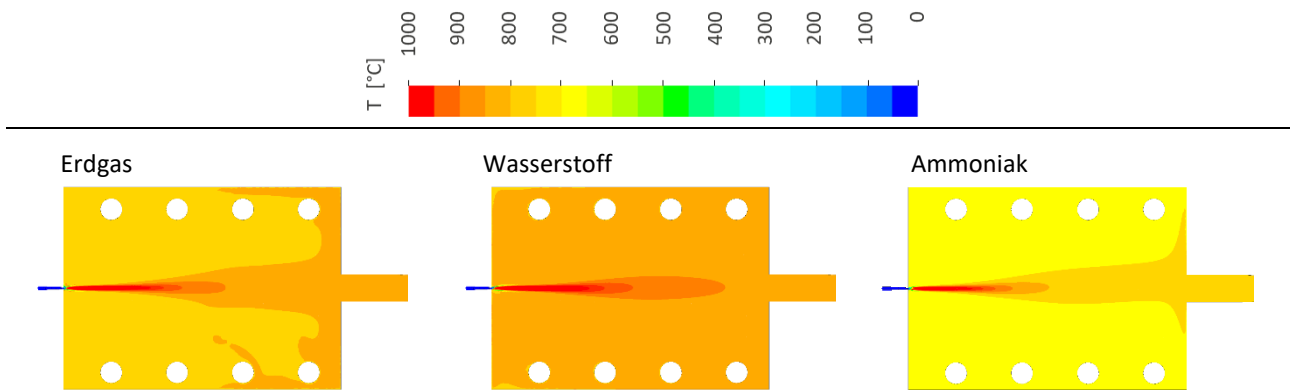


Abbildung 7.9: Temperaturfelder im semi-industriellen Ofen bei Einsatz von CH_4 , H_2 und NH_3 (Quelle: GWI)

Die resultierenden Temperaturfelder weisen jeweils ein ausgeprägtes Temperaturmaximum im zentralen Bereich der Brennerachse auf, welches Rückschlüsse auf die Flammenlänge und die Position der Hauptreaktionszone zulässt. Abhängig vom verwendeten Brennstoff liegen die Spitzentemperaturen im Bereich von etwa 1.700 °C bis 2.100 °C, während in den Randzonen deutlich niedrigere Temperaturen auftreten.

Diese Unterschiede sind auf die spezifischen verbrennungstechnischen Eigenschaften der einzelnen Brennstoffe zurückzuführen. Bei einer stöchiometrischen Verbrennung (Luftzahl $\lambda = 1,0$) beträgt die adiabate Flammentemperatur von Ammoniak etwa 1.798 °C, von Erdgas 1.951 °C und von Wasserstoff 2.106 °C. Diese Kenngröße beschreibt die theoretisch erreichbare Temperatur bei vollständiger Umsetzung ohne Wärmeverluste und verdeutlicht den Einfluss der Brennstoffzusammensetzung auf die thermodynamischen Eigenschaften der Flamme.

Folglich stellt sich bei identischen Betriebsparametern – d. h. gleicher thermischer Leistung und identischer Luftzahl – im Ofenraum eine unterschiedliche Temperaturverteilung ein. Je höher die adiabate Flammentemperatur des Brennstoffs ist, desto höher ist auch das erreichbare Temperaturniveau der Ofenatmosphäre. Diese Beziehung ist von zentraler Bedeutung für die Beurteilung der thermischen Homogenität und Energieeffizienz des Tunnelofens, da sie unmittelbar den Wärmeübergang auf das Brenngut und damit die Gleichmäßigkeit des Sinterprozesses beeinflusst.

Eine weitere zentrale Kenngröße zur Bewertung der energetischen Effizienz eines Ofens ist der feuerungstechnische Wirkungsgrad η . Dieser beschreibt das Verhältnis der nutzbar übertragenen Wärmeleistung zur insgesamt dem Brenner zugeführten Energie.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_{\text{Abgas}}}{\dot{Q}_{\text{Brenner}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Lastwärme}}}{\dot{Q}_{\text{brenner}}} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Ein hoher Wirkungsgrad weist darauf hin, dass ein großer Anteil der eingesetzten Energie in Form von Wärme dem zu beheizenden Medium zugeführt wird, während nur ein vergleichsweise geringer Anteil als Abgasverlust verloren geht.

Im Rahmen der durchgeführten CFD-Analyse befindet sich jedoch kein reales Gut oder Material im Ofen, auf das Wärme übertragen werden könnte. Um dennoch eine Beurteilung und Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird in diesem Fall die Wärmeübertragung über die Ofenwände als maßgebliche Größe herangezogen. Diese wird als äquivalent zur Nutzleistung betrachtet, da sie denjenigen

Anteil der Brennerleistung repräsentiert, der dem System als übertragene Wärme entzogen wird. Hier zeigt sich ein wesentlicher Vorteil der numerischen Strömungssimulation (CFD) bei der Untersuchung von Verbrennungssystemen: Sie erlaubt die Erfassung, Visualisierung und quantitative Auswertung nahezu aller physikalischen und thermochemischen Größen innerhalb des Systems. Die über die Ofenwände abgeführte Wärmeleistung kann in Ansys Fluent direkt ermittelt werden, wodurch sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad präzise berechnen lässt. Die Ergebnisse sind in der **Abbildung 7.10** dargestellt.

Bei gleicher Luftzahl und gleicher Leistung zeigen die Simulationsergebnisse deutliche Unterschiede zwischen den drei untersuchten Brennstoffen Erdgas, Wasserstoff und Ammoniak. Trotz identischer Betriebsbedingungen variiert sowohl die freigesetzte Lastwärme als auch der feuerungstechnische Wirkungsgrad erheblich. Wasserstoff erreicht mit rund 30,5 kW die höchste Lastwärme, gefolgt von Erdgas mit etwa 29,5 kW. Ammoniak weist mit rund 27,3 kW den niedrigsten Wert auf. Diese Unterschiede lassen sich durch die adiabate Flammentemperatur der Brennstoffe erklären. Wasserstoff besitzt die höchste Flammentemperatur, die theoretisch erreicht werden kann. Folglich wird der Ofen insgesamt wärmer und die Wärmefreisetzung fällt intensiver aus. Bei der Verbrennung mit Ammoniak hingegen ist die Flammentemperatur ca. 400 °C geringer, was zu einer niedrigeren Wärmeabgabe führt. Mit analogen Überlegungen lässt sich die Lastwärme von Methan mit einer theoretischen Flammentemperatur von 1.983 °C erklären.

Auch beim feuerungstechnischen Wirkungsgrad zeigt sich ein ähnlicher Trend. Wasserstoff erreicht den höchsten Wert mit etwa 37,8 %, gefolgt von Erdgas mit rund 37 %. Ammoniak weist dagegen mit ca. 34 % den geringsten Wirkungsgrad auf.

Insgesamt zeigen die Simulationen, dass Wasserstoff unter den gegebenen Bedingungen die günstigsten thermischen Eigenschaften aufweist. Erdgas bietet ein stabiles, etabliertes Referenzverhalten, während Ammoniak zwar Potenzial als klimaneutraler Energieträger besitzt, derzeit jedoch noch deutliche Effizienznachteile aufweist.

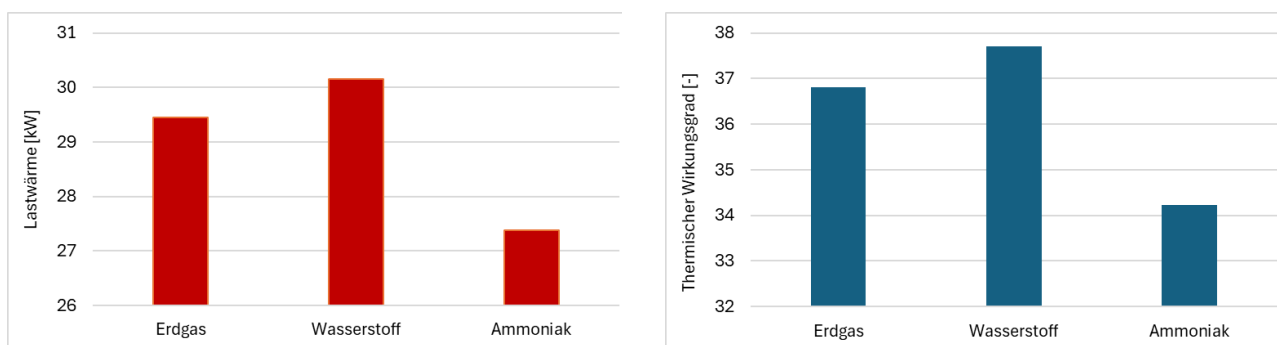


Abbildung 7.10: Wärmeströme über die Wände und thermischer Wirkungsgrad bei Einsatz von CH₄, H₂ und NH₃ (Quelle: GWI)

8 Untersuchung der Auswirkungen der Ammoniaknutzung auf die Ziegelqualität

8.1 Modellziegelbrand und Bestimmung der Produkteigenschaften

Auswahl und Bereitstellung der zu untersuchenden Ziegelproben, Festlegung des Versuchsprogramms

Bei den Versuchsbränden wurden Modellziegel (Probekörper) von Hintermauer-, Vormauer- und Dachziegel untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Brennkurven (siehe **Abbildung 8.1**) der genannten Produkte, wurde der Besatz auf zwei Konfigurationen aufgeteilt. Ferner wurden neben den genannten Produkten Rundstäbe gebrannt, welche ausschließlich zur Untersuchung der Biegezugfestigkeit dienen. Der **Abbildung 8.1** lässt sich entnehmen, dass die Höchsttemperaturen in der Brennzzone, für die Dachziegel (DZ) und Vormauerziegel (VMZ) auf einem vergleichbaren Niveau von etwa 1.050 °C liegen. Die Kurven unterscheiden sich lediglich in der Vorwärmzone. In der Abkühlzone wird die Temperatur kurzzeitig bei etwa 573 °C, dem Quarzsprung, gehalten. Somit sollen Spannungen in den besonders quarzhaltigen Bereichen des Ziegels vermieden werden, welche schließlich zu Rissen führen können. Der Hintermauerziegel (HLZ) hat im Vergleich eine wesentlich kürzere Brennzeit. Des Weiteren liegt die Höchsttemperatur in der Brennzzone bei etwa 950 °C. Bei dem Hintermauerziegel ist vor allem die Dichte und die Druckfestigkeit relevant.

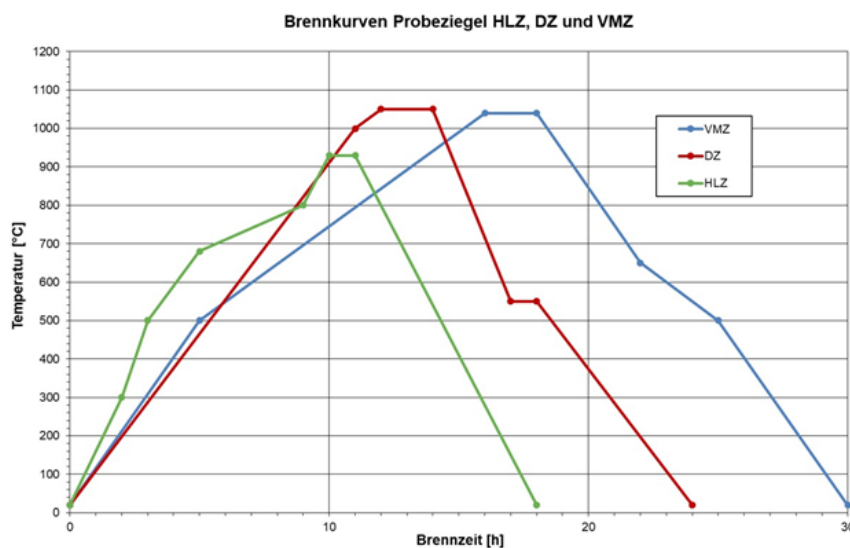


Abbildung 8.1: Angepasste Brennkurven der zu untersuchenden Ziegelproben (Quelle IZF)

Die drei zu untersuchenden Ziegelmassen wurden von Mitgliedern des PA zur Verfügung gestellt und entsprechende Probekörper erstellt, siehe **Abbildung 8.2**.



Abbildung 8.2: Gefertigte Prüfkörper für die Versuchsdurchführung (Quelle IZF)

Aufgrund der Vergleichbarkeit der Brennkurven von Dach- und Vormauer-Ziegeln, wurden die beiden Probeziegel im ersten Besatz gemeinsam gebrannt. Die **Abbildung 8.3** stellt den Aufbau des Besatzes auf dem zur Verfügung stehenden Probenträger dar. Der Probenträger lässt sich mittels eines Hubwagens durch vertikale Auf- und Ab-Bewegungen in den Ofenboden einführen und entfernen.

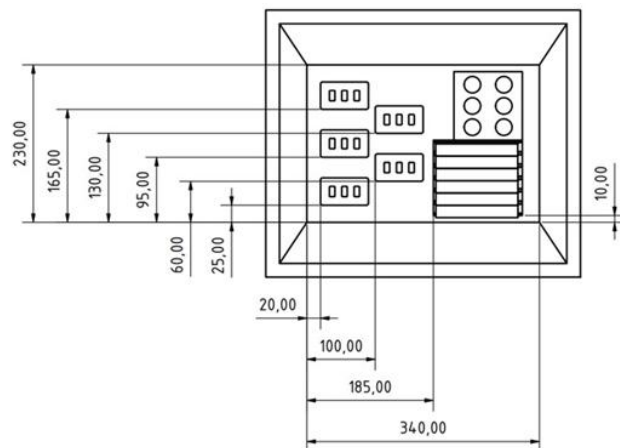
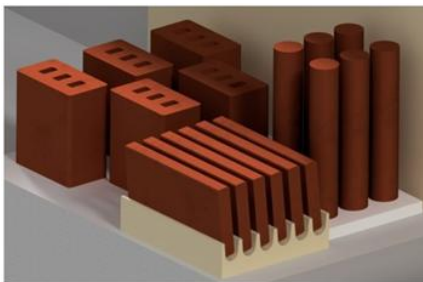


Abbildung 8.3: Besatzkonfiguration 1, bestehend aus Dach-, Vormauerziegel und Rundstäben zur Untersuchung der Biegezugfestigkeit (Quelle IZF)

Der Besatz wird in horizontaler Richtung von rechts angeströmt. Die und Rundstäbe werden in Halterungsvorrichtungen aus feuerfestem Material positioniert. Somit sind die Rohlinge zum einen gegen Kippen gesichert und bieten zum anderen eine möglichst große anströmbare Oberfläche. Die zweite Besatzkonfiguration besteht aus Hintermauerziegel und Rundstäben. Aufgrund der niedrigeren Brenntemperatur von etwa 950 °C, wurden diese separat gebrannt. In **Abbildung 8.4** ist der Besatzaufbau der Hintermauerziegel dargestellt. Auch hierbei ist ein gleichmäßiger Abstand zwischen den Proben ausschlaggebend, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu gewährleisten.

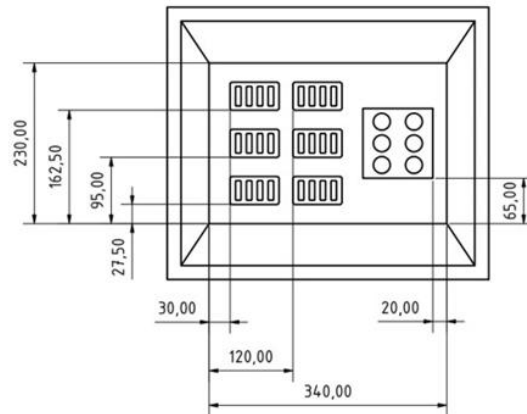
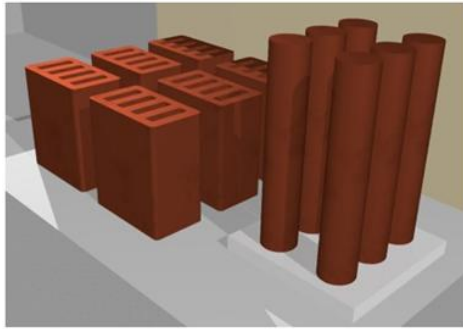


Abbildung 8.4: Besatzkonfiguration 2, bestehend aus Hintermauerziegel und Rundstäben (Quelle IZF)

Umbau Versuchsanlage und Vergleichsbrand

Angehts der begrenzten Oberfläche des Probenträgers ist es erforderlich, die Rohlinge so zu positionieren, dass eine möglichst gleichmäßige Strömung und Temperaturverteilung um jeden Rohling gewährleistet wird. Des Weiteren ist die Bauhöhe des Besatzes durch das Deckenthermoelement im Ofen begrenzt (siehe **Abbildung 8.5**). Dieses ermöglicht eine maximale Besatzhöhe von etwa 170 mm.

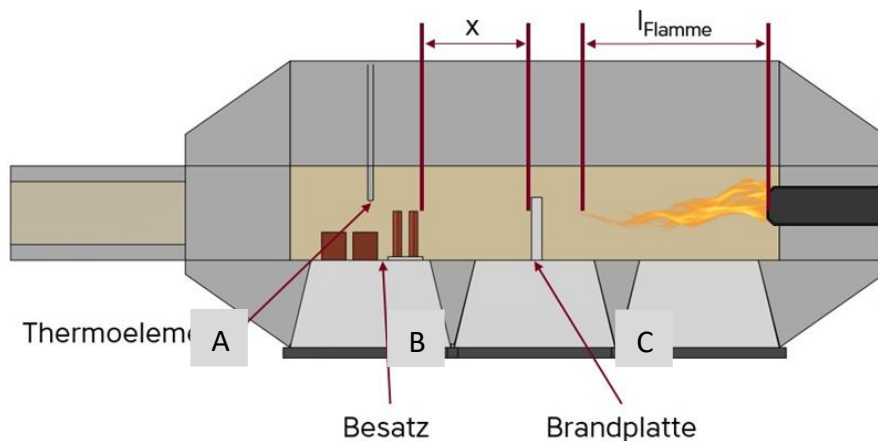


Abbildung 8.5: Positionierung des Besatzes im Versuchsofen (Quelle IZF)

In **Abbildung 8.5** ist zu erkennen, dass der Versuchsofen über insgesamt drei Probenträger verfügt (beschriftet mit A, B und C). Die Probenträger B und C sind aufgrund der Flamme für die Besätze ungeeignet. Die Besätze sollen mittels einer Brandplatte vom direkten Kontakt mit der Flamme geschützt werden. Diese wird auf dem Probenträger B aufgestellt. Der Abstand x der Brandplatte zum Besatz ist abhängig von der Flammenlänge l_{Flamme} .

Um den Temperaturverlauf im Besatz präzise zu überwachen, wurden Thermoelemente an den beiden Enden sowie in der Mitte des Besatzes positioniert. Dadurch ermöglicht sich die Erfassung eines Temperaturprofils entlang des Strömungsweges. Die Leitungen der Thermoelemente können durch eine Nut am Probenträger zu den Datenloggern geführt werden.

Durchführung von Ziegelbrandversuchen mit verschiedenen Ziegelformaten und Gasmischungen

Zur Untersuchung der Auswirkungen von Ammoniak auf die Ziegelqualität wurden zunächst vier Brenngaskonfigurationen festgelegt: 100 Vol.-% Erdgas als Referenzbrand, eine Mischung aus Erdgas und Ammoniak im Volumenverhältnis 50:50, eine Mischung aus Wasserstoff und Ammoniak im Volumenverhältnis 50:50 sowie 100 Vol.-% Ammoniak. Anschließend wurden aus den drei bereitgestellten Tonmischungen Modellziegel für Vormauer, Hintermauer- und Dachziegel geformt. Diese wurden unter Einhaltung der vorgegebenen Brennkurven erfolgreich im Versuchsofen mit den genannten Brenngaskonfigurationen gebrannt. Dabei wurden die in **Abbildung 8.6** dargestellten NO_x-Emissionen für den Besatz B mit Dachziegeln gemessen. Es ist erkennbar, dass die Emissionswerte während der Brennzone zwischen etwa 10 und 14 Stunden bei den Brennstoffvarianten mit 50 Vol.-% Erdgas und 50 Vol.-% Ammoniak sowie bei 100 Vol.-% Ammoniak auf einem vergleichbaren Niveau um rund 1.250 mg/m³ liegen. Beim Brennversuch mit einer Mischung aus 50 Vol.-% Wasserstoff und 50 Vol.-% Ammoniak wurden hingegen deutlich höhere NO_x-Konzentrationen von bis zu 2.500 mg/m³ registriert.

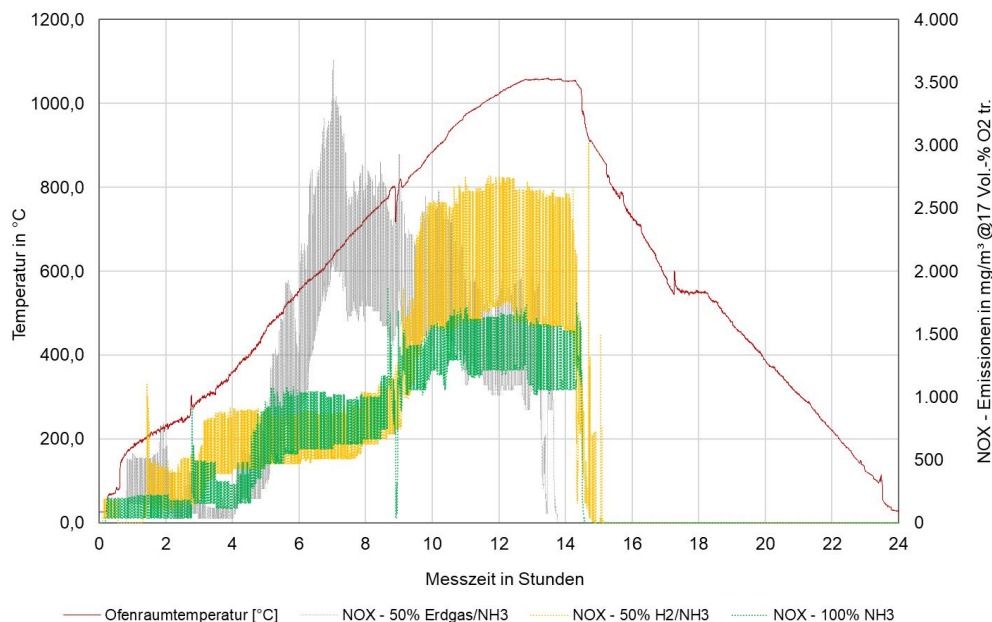


Abbildung 8.6: Stickoxide während der Vormauer- und Dachziegelbrände

8.2 Untersuchungen der Material- und Produkteigenschaften, Analyse

Im Anschluss zu den Versuchsbränden (Referenzbrände mit Erdgas und H₂/NH₃-Mischungen, sowie 100 Vol.-% NH₃) wurden die Produkteigenschaften untersucht. Dazu gehört die Messung per Spektralphotometer zur genauen Ermittlung von Farbunterschieden der gebrannten Proben, die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie die Ermittlung der Schwindung, der Rohdichte und weitere keramtechnisch relevante Eigenschaften.

Ermittlung der Produktfarben

Vor allem bei Vormauer- und Dachziegel, ist die Optik ein wichtiges Qualitätskriterium. Obwohl die Optik bei Hintermauerziegel nicht ausschlaggebend ist, wird dennoch ein rötlicher Farbton erwartet. Mithilfe eines Spektralphotometers lassen sich die wahrnehmbaren Farben im Bereich zwischen

Grün und Rot (a), zwischen Blau und Gelb (b), sowie die Helligkeit (L) genau bestimmen. Aus diesen Parametern lässt sich als Maßstab Delta E berechnen, wodurch die Abweichungen vom Referenzbrand mit Erdgas genauestens ermittelt werden können.

Ein wichtiger Parameter für die Farbgebung, ist der Sauerstoffanteil in der Atmosphäre.

Abbildung 8.7 zeigt den Sauerstoffanteil im Ofen während des Brandes von Besatz B (Vormauer- und Dachziegel). Hierbei ist zu erkennen, dass der Sauerstoffanteil bei allen vier Brenngaskonfigurationen auf einem Level von 6 – 8 Vol.-% liegt. Dieser Bereich ist für die Erzielung der typischen roten Farbe und eines vollständigen Sinterungsprozesses, ideal.

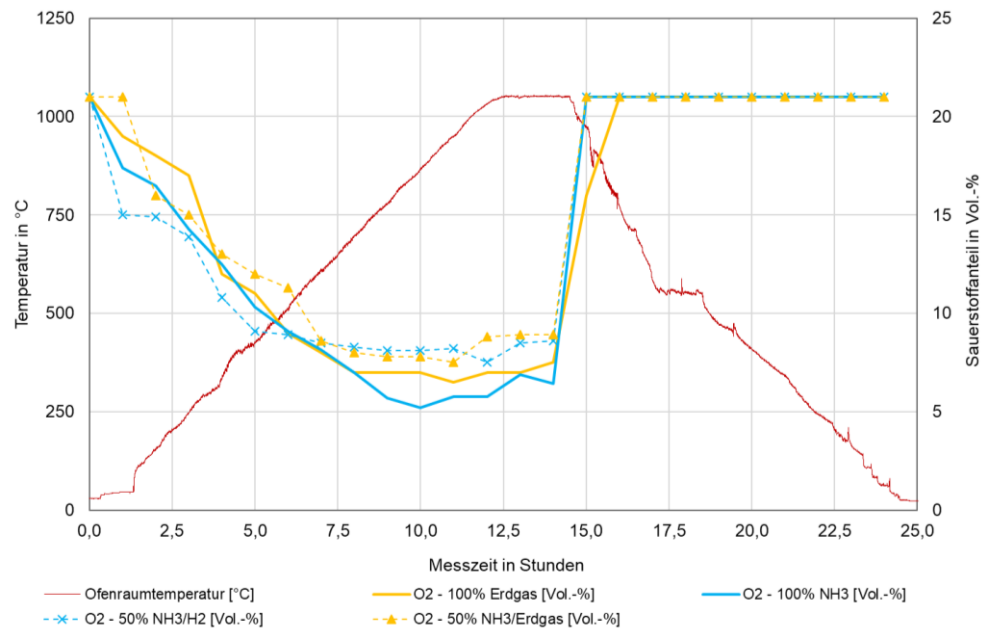


Abbildung 8.7: Sauerstoffanteil im Besatz B (Vormauer- und Dachziegel)

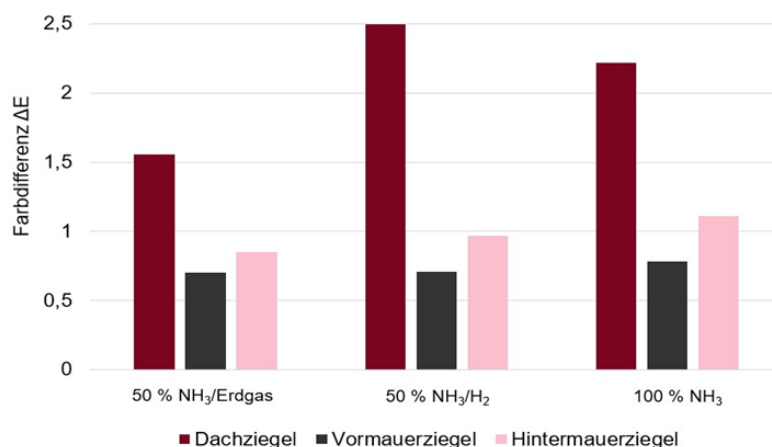


Abbildung 8.8: Farbdifferenz Delta E der Proben

Die ermittelten Farbdifferenzen der Proben sind in der **Abbildung 8.8** dargestellt. Dabei werden Abweichungen bis 0,5 als nicht wahrnehmbar eingestuft. Differenzen im Bereich 0,5 bis 1 sind bei genauer Beobachtung wahrnehmbar. Bei den Vormauer- und Hintermauerziegel ist keine merkliche Veränderung zu verzeichnen. Bei den Dachziegeln hingegen ist eine Differenz von bis zu 2,5 zu er-

kennen. Diese Differenz ergibt sich jedoch aus der Stützstruktur der Dachziegelproben im Versuchsofen, wodurch die Proben nicht vollständig von der Flamme geschützt werden konnten. Insgesamt lassen sich die auftretenden Schwankungen als gering einstufen. Es kann bei allen Produkten keine Abhängigkeit von der Gasmischung abgeleitet werden. Des Weiteren entspricht dieser geringe Farbunterschied den Ergebnissen einer Produktionscharge im Betrieb.

Farbaufnahmen unter dem Mikroskop zeigen für die drei untersuchten Produktgruppen Dachziegel, Vormauerziegel und Hintermauerziegel bei den verschiedenen eingesetzten Brenngasen ebenfalls keine sichtbaren Unterschiede. Die Materialzusammensetzung und die charakteristische Farbgebung bleiben bei allen Produkten unverändert (**Abbildung 8.9**). Zusätzlich weisen die mikroskopischen Strukturen eine gleichbleibende Homogenität auf, was darauf hindeutet, dass der Einsatz unterschiedlicher Brenngase keine Auswirkungen auf die mineralogische Entwicklung der Keramik hatte. Diese Beobachtungen bestätigen die zuvor makroskopisch festgestellte Farbstabilität der Proben.

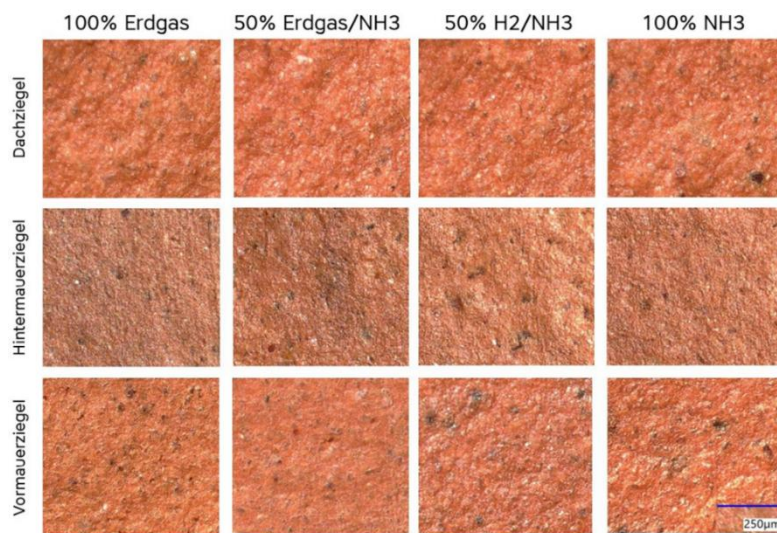


Abbildung 8.9: Vergleich der Produktfarben unter dem Mikroskop (Quelle IZF)

Brennschwindung und Brennverlust

Auch bei den brenntechnischen Eigenschaften wie der Brennschwindung (**Abbildung 8.10, links**) und dem Brennverlust (**Abbildung 8.10, rechts**) sind keine signifikanten Veränderungen erkennbar. Die während des Brandes auftretenden chemischen Umsetzungen durch die Temperaturerhöhung führen zu volumenbezogenen Veränderungen, die vom jeweiligen verwendeten Ton abhängen. Üblicherweise kommt es dabei zu einer Verkleinerung des gebrannten Tons im Vergleich zum Rohling. Aus diesem Grund muss für jeden Ton eine spezifische Brennkurve sowie eine angepasste Brenndauer festgelegt werden. Die Brennschwindung fällt in der Regel beim Hintermauerziegel stärker aus, da zusätzlich die eingesetzten Porosierungsstoffe ausbrennen. Die in den Versuchen gebrannten Hintermauerziegel enthielten jedoch keine Porosierungsstoffe. Ein ähnliches Verhalten zeigt der Brennverlust, der als Massereduktion während des Brandes beschrieben wird. Neben den chemischen und mineralogischen Umwandlungen trägt auch der Austrieb des im Material gebundenen Wassers zu diesem Masseverlust bei. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der eingesetzte Brennstoff keine messbaren Auswirkungen auf diese grundlegenden brenntechnischen Kennwerte hat.

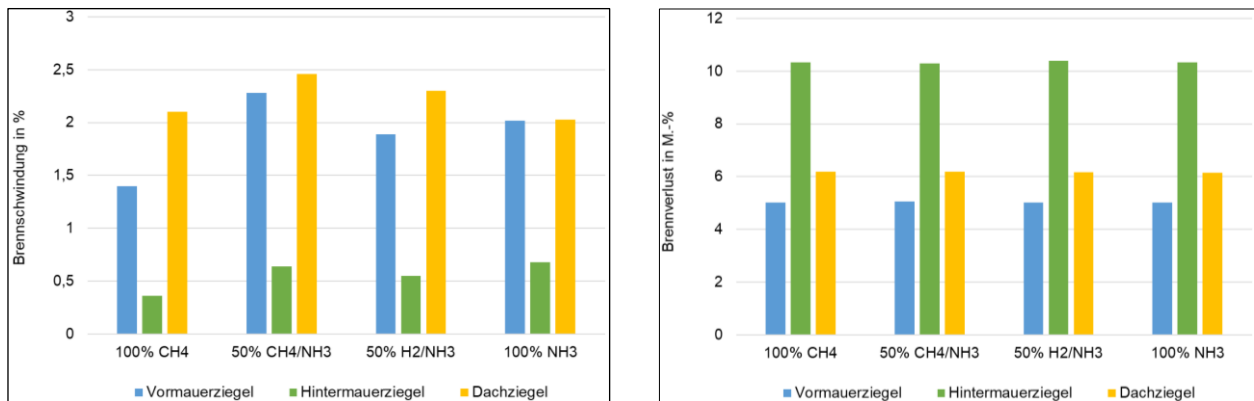


Abbildung 8.10: Brennschwindung (links) und Brennverlust (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen

Rohdichte und Festigkeiten

Bei den Hintermauerziegeln zählen die Ziegelrohndichte und die Druckfestigkeit (**Abbildung 8.11**) zu den wichtigsten Materialkennwerten.

Für diese Produktgruppe werden Mindestrohndichten von 750 kg/m^3 und Druckfestigkeiten von mindestens $12,5 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Klinker und Vormauerziegel weisen aufgrund der höheren Brenntemperaturen eine deutlich dichtere Brennung auf und sind daher gewünscht wasserabweisender mit Wasseraufnahmen unter 6 Massen-%. Dies ist notwendig, da es sich hierbei um Sichtmauerwerk handelt, das dauerhaft Witterungseinflüssen ausgesetzt ist (**Abbildung 8.12**). Entsprechend liegen die Rohdichten dieser Produkte im Mittel zwischen 1.900 und 2.200 kg/m^3 .

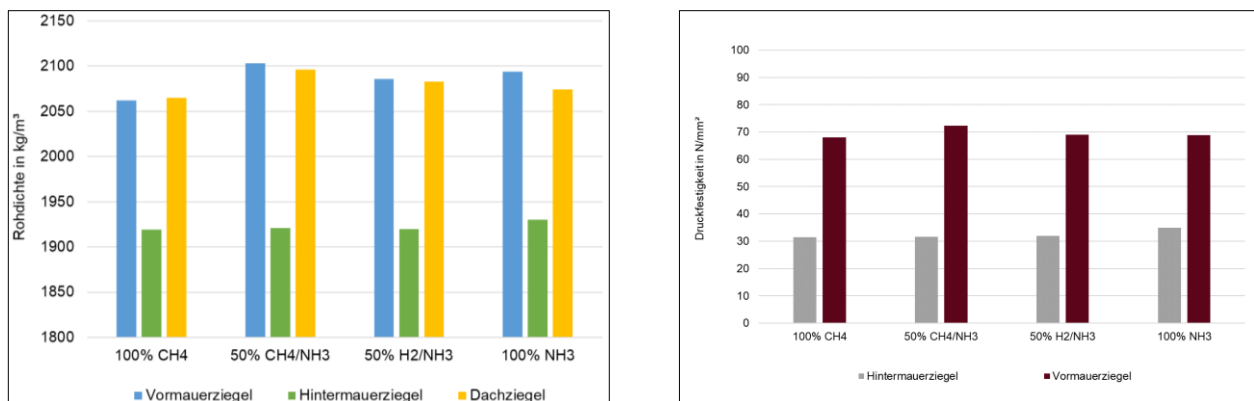


Abbildung 8.11: Rohdichte (links) und Druckfestigkeiten (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen

Durch den hohen Versinterungsgrad erreichen diese Ziegel zugleich hohe Druckfestigkeiten von mindestens 30 N/mm^2 . Auch Dachziegelprodukte können Rohdichten von etwa 2.000 kg/m^3 erreichen. Sie zählen ebenfalls zum Sichtmauerwerk und müssen eine ausreichende Frostfestigkeit aufweisen, die maßgeblich durch eine geringe Wasseraufnahme gesichert wird. Im Gegensatz zu den anderen Ziegelprodukten stellt bei Dachziegeln die Biegezugfestigkeit eine zentrale Kenngröße dar (**Abbildung 8.12**). Dieser Wert sollte im gebrannten Zustand über 15 N/mm^2 liegen.

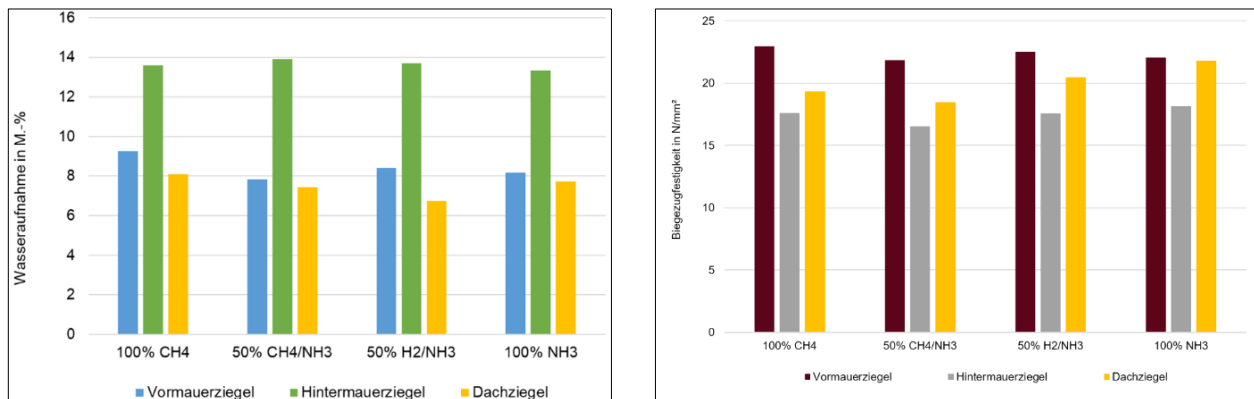


Abbildung 8.12: Wasseraufnahme (links) und Biegezugfestigkeiten (rechts) bei unterschiedlichen Gasmischungen

Alle in den durchgeführten Versuchsbränden erzielten Kennwerte erfüllen die jeweiligen Anforderungen sicher. Die beobachteten Schwankungen entsprechen normalen statistischen Streuungen innerhalb einer Charge und lassen sich nicht eindeutig auf die Zusammensetzung des Brenngases zurückführen. Insgesamt zeigt sich, dass für die im Laborversuch eingesetzten Tone und prozess-technischen Parameter keine Beeinflussung der Materialeigenschaften der hergestellten Ziegel festgestellt werden konnte.

8.3 Analyse der Ergebnisse (IZF)

Im Rahmen der Versuchskampagnen wurden die hergestellten Probeziegel unter kontrollierten Bedingungen in einem Laborversuchssofen gebrannt und anschließend hinsichtlich ihrer produktspezifischen Eigenschaften untersucht. Die Analyse zielte darauf ab, zu bewerten, ob der Einsatz unterschiedlicher Brenngasmischungen, insbesondere unter Beimischung von Ammoniak, Auswirkungen auf die Materialqualität, die Produktgeometrie oder die äußere Erscheinung der Ziegel hat.

Zunächst erfolgte eine visuelle und mikroskopische Bewertung der Farbgebung und Oberflächenstruktur. Die Untersuchungen zeigten, dass sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch keine farblichen Abweichungen gegenüber Referenzbränden mit Erdgas auftraten. Die Farbkonzanz konnte somit eindeutig bestätigt werden.

Im Anschluss wurden die wesentlichen physikalisch-mechanischen Kennwerte ermittelt. Dazu gehörten unter anderem Rohdichte, Brennschwindung, Brennverlust, Druckfestigkeit sowie bei Dachziegeln die Biegezugfestigkeit. Die Messwerte lagen bei allen Produktgruppen innerhalb der materialtypischen Erwartungsbereiche. Auffällige oder systematische Veränderungen in Abhängigkeit der Brenngaszusammensetzung konnten nicht festgestellt werden. Die beobachteten Variationen zwischen den Proben sind als übliche chargenbedingte Schwankungen zu interpretieren.

Zudem wurde die Ofenatmosphäre hinsichtlich möglicher verfahrensbedingter Einflüsse, etwa durch veränderte Schadstoffbildungsmechanismen oder Wasserdampfgehalte, bewertet. Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass die prozessrelevanten Veränderungen während des Brandes keine negativen Einflüsse auf die Produktqualität hatten. Die grundlegenden mineralogischen und strukturellen Eigenschaften der gebrannten Ziegel blieben stabil.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Brennstoffwechsel im Laborofen unter den gewählten Parametern keine Beeinträchtigung der Produktqualität verursachte. Die Ergebnisse bilden damit eine

belastbare Grundlage für die Bewertung eines möglichen Einsatzes alternativer Brenngase in industriellen Brennprozessen.

8.4 Ökonomische und ökologische Analyse der Ergebnisse

Die in **Tabelle 8.1** dargestellten Werte zeigen deutlich, dass der Wechsel von Erdgas auf Wasserstoff oder Ammoniak erhebliche wirtschaftliche Auswirkungen auf die Brennstoffkosten eines typischen Ziegelwerks hat. Grundlage der Analyse bildet ein jährlicher Energiebedarf von kWh, der den üblichen Verbrauch eines mittelgroßen Tunnelofens abbildet. Auf dieser Basis wurden sowohl die erforderlichen Brennstoffmengen als auch die prognostizierten Kosten für und das Jahr 2030 ermittelt.

Für Erdgas ergibt sich aufgrund der hohen volumetrischen Energiedichte der geringste Gasbedarf, während Wasserstoff und Ammoniak aufgrund ihrer unterschiedlichen Heizwerte deutlich höhere Einsatzmengen erfordern. Der Wasserstoffbedarf liegt dabei im Bereich von rund 10 Mio. m³ pro Jahr, Ammoniak bei etwa 7,5 Mio. m³. Diese Differenzen wirken sich unmittelbar auf die jährlichen Brennstoffkosten aus.

Unter der oben genannten Annahme eines Energiebedarfes pro Jahr ergeben sich im Jahr 2025 die prognostizierten Kosten für Erdgas bei rund 1,55 Millionen Euro. Grüner Wasserstoff verursacht mit rund 6,34 Millionen Euro die höchsten Aufwendungen, gefolgt von Ammoniak mit etwa 4,96 Millionen Euro. Für das Jahr 2030 wird ein Preisanstieg bei allen drei Energieträgern erwartet, wobei die Steigerung bei den erneuerbaren Gasen besonders ausgeprägt ausfällt. So erhöhen sich die Kosten für Wasserstoff auf etwa 14,23 Millionen Euro und für Ammoniak auf rund 18,50 Millionen Euro. Auch Erdgas weist mit prognostizierten 2,76 Millionen Euro eine spürbare Kostensteigerung auf, bleibt jedoch weiterhin der günstigste Energieträger [15]. Diese Entwicklung verdeutlicht, dass eine vollständige Umstellung auf alternative Brennstoffe kurzfristig mit erheblichen Mehrkosten verbunden wäre. Langfristig müssen jedoch die ökologischen Aspekte berücksichtigt werden, da Wasserstoff und Ammoniak bei regenerativer Herstellung nahezu CO₂-frei genutzt werden können. Durch nationale Klimaziele, steigende CO₂-Preise und zukünftig mögliche Förderprogramme kann sich das wirtschaftliche Verhältnis zwischen fossilen und erneuerbaren Brennstoffen weiter verschieben [47].

Aus ökologischer Sicht bieten Wasserstoff und Ammoniak einen entscheidenden Vorteil. Während die Verbrennung von Erdgas weiterhin mit einem hohen Ausstoß von CO₂ verbunden ist, weisen beide alternativen Energieträger bei regenerativer Herstellung praktisch keine fossilen Emissionen auf. Eine Umstellung der Ziegelindustrie auf diese Brennstoffe hätte daher einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung industrieller Treibhausgasemissionen zur Folge.

Tabelle 8.1: Prognose der jährlichen Brennstoffkosten [15]

	Erdgas	Wasserstoff	Ammoniak
Gasbedarf [m ³]	2.911.051	10.015.766	7.481.895
Kosten 2025 [€]	1.551.124	6.336.506	4.959.396
Kosten 2030 [€]	2.760.220	14.228.061	18.499.941
Energiebedarf: 30.002.400 kWh			

9 Ausblick und Handlungsempfehlungen

Aktuelle politische Entwicklungen im Rahmen der Energiewende – insbesondere die Verschärfung von Schadstoffgrenzwerten und die Verfolgung ambitionierter Klimaschutzziele – sowie steigende Anforderungen seitens der (End-)Kunden erhöhen den Handlungsdruck auf die Ziegelindustrie, ihre CO₂-Emissionen deutlich zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund ermöglichen die vorliegenden Analysen zur Verbrennung von Ammoniak (NH₃) sowie von Erdgas–NH₃- und H₂–NH₃-Gemischen eine fundierte Beantwortung zentraler Fragestellungen der Branche und erlauben eine Bewertung von Ammoniak als potenzielle Dekarbonisierungsoption.

Der Einsatz von Ammoniak, CH₄-NH₃-, oder H₂-NH₃-Gemischen kann in der Ziegelindustrie im Hinblick auf die Produktqualität implementiert werden. Aus der Darstellung der Forschungsergebnisse ergibt sich konkret für klein- und mittelständische Unternehmen folgender Nutzen:

- Der Einsatz von Ammoniak, CH₄-NH₃-, oder H₂-NH₃-Gemischen kann in der Ziegelindustrie im Hinblick auf die Produktqualität implementiert werden. Für den flexiblen Einsatz der oben genannten Brennstoffkombinationen wird ein geeignetes Regelungskonzept zur Regelung des Brenngases und des Oxidators hinsichtlich konstanter Betriebseinstellungen (konstante Leistung, konstante Oxidatorzahl/Luftzahl) zu entwickeln.
- Brennerhersteller können die gewonnenen Erkenntnisse zur Auslegung und Entwicklung ammoniaktauglicher Brenner heranziehen. Insbesondere wurde gezeigt, dass eine gezielte Oxidatorverdrallung durch geeignete Brennerkonstruktionen eine wirksame Maßnahme zur Stabilisierung von Ammoniakflammen darstellt. Darüber hinaus kann die Flammenstabilität durch die Zumischung von Wasserstoff oder Erdgas als Stützgas verbessert werden, indem deren vorteilhafte Verbrennungseigenschaften genutzt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse können Brennerhersteller nicht nur drallwirksame Geometrien implementieren, sondern ihre Systeme gezielt für den Mehrstoffbetrieb (NH₃/H₂ bzw. NH₃/CH₄) optimieren.
- Die Verbrennung von Ammoniak beziehungsweise der genannten Brennstoffkombinationen zeigt keine nachteiligen Effekte auf die Ziegelqualität. Die experimentellen Brennversuche im Laborofen belegen, dass weder Farbgebung noch Rohdichte, Druckfestigkeit, Brennschwindung oder Brennverlust signifikant von Referenzbränden mit Erdgas abweichen. Auch bei hohen Ammoniakanteilen wurden keine unerwünschten Veränderungen der mineralogischen Gefügestruktur oder der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Produktgruppen festgestellt.

Die dargestellten Aussagen zur zukünftigen industriellen Umsetzung der Forschungsergebnisse richten sich insbesondere an kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die in der Regel nicht über eigene Forschungsabteilungen verfügen. Durch die Nutzung der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können sie dennoch unmittelbar profitieren und damit ihre Standortsicherheit sowie ihre langfristige Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit stärken.

In diesem Projekt wurden die Einsatzmöglichkeiten von Ammoniak in der Ziegelindustrie umfassend untersucht. Dabei wurden verschiedene Betriebs- und Anwendungsszenarien betrachtet, insbesondere der Einsatz von reinem Ammoniak sowie von Erdgas–NH₃- und H₂-NH₃-Gemischen. Der Schwerpunkt lag auf der systematischen Analyse der Auswirkungen dieser Brennstoffe auf das Verbrennungsverhalten sowie auf der Bewertung möglicher Einflüsse auf die Produktqualität.

Auslegung und Optimierung der Brenner

Sowohl die experimentellen Untersuchungen als auch die CFD-Ergebnisse belegen, dass bei der Zumischung von Ammoniak zu Erdgas bzw. Wasserstoff – bis hin zum Betrieb mit reinem Ammoniak – Brennerleistung und Luftzahl über ein geeignetes Regelungskonzept anzupassen sind, um Ofenraumtemperatur und Wärmestrom konstant zu halten (**vgl. Kapitel 6**). Zwar treten beim Einsatz von reinem Ammoniak Herausforderungen hinsichtlich Flammenbildung und -stabilisierung auf, diese können jedoch sowohl chemisch als auch konstruktiv wirksam gelöst werden. Eine chemische Stabilisierung ist durch die Verwendung von Erdgas oder Wasserstoff als Stützgas möglich, indem geringe Anteile dieser Komponenten dem Ammoniak beigemischt werden; abhängig von der Brennerauslegung können bereits kleine Zumischungen eine stabile Flammenführung ermöglichen. Die konstruktive Stabilisierung durch Oxidatorverdrallung stellt jedoch die robustere und betriebssichere Variante dar, da - je nach Brennerdesign - eine Stützgasmischung allein nicht in allen Fällen ausreichend ist, um eine stabile Flamme zu gewährleisten.

Ein zentraler Aspekt betrifft die NO_x -Emissionen. Beim Einsatz von Ammoniak können neben thermisch bedingten NO_x -Emissionen zusätzliche brennstoffbedingte Emissionen über den Brennstoff- NO -Pfad entstehen. Für Brenngase mit Wasserstoffanteil ist dabei eine Bewertung der NO_x -Emissionen bezogen auf die Energieeinheit (z. B. mg/MJ) aussagekräftiger als die Angabe trockener Konzentrationen, da der erhöhte Wasserdampfgehalt im Abgas konventionell trocken bezogene NO_x -Werte signifikant verzerrt.

Die experimentellen Versuche am GWI verdeutlichen zudem, dass die Brennergeometrie die Mischungsintensität von Brennstoff und Luft maßgeblich bestimmt. Dadurch werden lokale Temperaturspitzen sowie das lokale Stickstoff- und Sauerstoffangebot beeinflusst, was unmittelbar die NO_x -Bildung prägt. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass bei Erdgas- NH_3 - und H_3 - NH_3 -Gemischen Betriebsbereiche existieren, in denen höhere NO_x -Emissionen auftreten können als beim Einsatz von reinem Ammoniak. Daraus ergibt sich, dass eine an Grundbrennstoff und Temperaturniveau angepasste Optimierung von Luftführung, Verweilzeit und Mischgüte erforderlich ist, um NO_x -Spitzen bei der Verbrennung ammoniakhaltiger Gemische bzw. von reinem NH_3 zu vermeiden und zugleich stabile, emissionsarme Flammen auch bei hohen NH_3 -Anteilen sicherzustellen.

Hinsichtlich NH_3 -Schlupf- und N_2O -Emissionen konnte gezeigt werden, dass diese bei höheren Ofenraumtemperaturen nur in marginalen Größenordnungen auftreten und damit keinen relevanten Einfluss auf den Gesamtprozess ausüben.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen für die industrielle Umsetzung:

1. Schrittweise Einführung von Ammoniak
Der Einsatz von Ammoniak sollte zunächst über definierte Zumischraten erfolgen. Eine graduelle Erhöhung ermöglicht eine sichere Anpassung der Ofenatmosphäre und erleichtert die kontinuierliche Beobachtung der emissionsrelevanten Parameter.
2. Anpassung der Brennertechnik und Ofenführung
Für einen zuverlässigen und stabilen Anlagenbetrieb sind angepasste Brennergeometrien, eine optimierte Luftführung sowie geeignete Regelungsstrategien erforderlich. Die im Projekt identifizierten Betriebs- und Auslegungsparameter stellen hierfür eine Grundlage dar.
3. Überwachung Tunnelofen

Da die Gefahr von NH_3 Schlupf besteht, bleibt zu prüfen, an welcher Position der Brennzone ein NH_3 -Einsatz sicher erfolgen und ein vollständiger Ausbrand gewährleistet werden kann

4. NO_x -Minderungsstrategien integrieren

Erhöhte NO_x -Emissionen können durch Primärmaßnahmen, etwa eine optimierte Einstellung der Luftzahl oder den Einsatz von Stufenverbrennung, wirksam reduziert werden. Alternativ bzw. ergänzend lassen sich Sekundärmaßnahmen wie Abgasreinigungssysteme frühzeitig in das Anlagenkonzept integrieren, um NO_x -Emissionen weiter zu minimieren

5. Sicherheitstechnische Anforderungen berücksichtigen

Für Lagerung, Transport und Handhabung von Ammoniak müssen geeignete Sicherheitssysteme und Überwachungseinrichtungen installiert werden. Dies betrifft unter anderem Gasdetektion, Leckageüberwachung und die Infrastruktur für Druckspeicher.

6. Qualitätssicherung und Monitoring etablieren

Die Produktkennwerte sollten im industriellen Betrieb regelmäßig überwacht werden, um mögliche Abweichungen frühzeitig festzustellen. Dies schließt werkstofftechnische Prüfungen ebenso ein wie die kontinuierliche Emissionsmessung.

7. Infrastruktur und Logistik planen

Da eine leitungsgebundene Versorgung nicht verfügbar ist, müssen Tankkonzepte und Lieferketten für Ammoniak frühzeitig aufgebaut werden. Die im Projekt ermittelten Bedarfsgrößen liefern hierfür Orientierungspunkte

Zusammenfassend zeigt das Projekt, dass Ammoniak ein technisch realisierbarer und ökologisch vorteilhafter Brennstoff für die Ziegelindustrie sein kann. Die notwendigen Anpassungen sind klar identifiziert und können schrittweise umgesetzt werden. Mit geeigneten technischen Maßnahmen, flankiert durch politische Rahmenbedingungen und Förderinstrumente, bietet Ammoniak eine realistische Perspektive für eine deutliche Reduzierung der CO_2 -Emissionen in der Ziegel- und Keramikindustrie und stellt einen wichtigen Baustein bei der Transformation hin zu einer klimaneutralen Produktion dar.

10 Projektplan

Der Zeitplan für das Projekt „NH₃-Ziegel“ sah eine Projektlaufzeit vom 01.04.2023 bis zum 31.06.2025 vor. Dieser Zeitplan wurde eingehalten.

	2023												2024												2025					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
AP 1 Grundlagenuntersuchung zur Verbrennung von NH₃ und Gemischen und zum Einsatz in den industriellen Anlagen der Ziegelindustrie																														
AP 1.1 Vergleich der verbrennungstechnischen Eigenschaften von Erdgas, Wasserstoff und NH ₃ sowie Erdgas/H ₂ /NH ₃ -Gemischen																														
AP 1.2 Analyse hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten von NH ₃ in der Prozesskette der Ziegelherstellung und Festlegung einer Brenngasmatrix																														
AP 2 Grundlagenuntersuchungen am Laborflammenprüfstand																														
AP 2.1 Experimentelle Untersuchungen am Laborflammenprüfstand unter Verwendung der in AP1.2 erstellten Brenngasmatrix																														
AP 2.2 Numerische Simulation der Laborflammenuntersuchungen																														
AP 2.3 Auswertung und Vergleich der experimentellen und numerischen Untersuchungen																														
AP 3 Untersuchung kommerzieller Brennersysteme der Ziegelindustrie unter Verwendung der festgelegten Brenngasmatrix																														
AP 3.1 Numerische Untersuchung der eingesetzten Brennersysteme und notwendige Anpassung der Brennergeometrie und -fahrweise																														
AP 3.2 Experimentelle Untersuchung ausgewählter und angepasster Brenner im semi-industriellen Maßstab																														
AP 3.3 Auswertung und Vergleich der experimentellen und numerischen Untersuchungen																														
AP 4 Ziegelbrand unter Verwendung der festgelegten Brenngasmatrix und Bestimmung der Produkteigenschaften																														
AP 4.1 Auswahl und Bereitstellung der zu untersuchenden Ziegelproben, Festlegung des Versuchsprogramms																														
AP 4.2 Umbau Versuchsanlage und Vergleichsbrand																														
AP 4.3 Durchführung von Ziegelbrandversuchen mit verschiedenen Ziegelformaten und Gasgemischen																														
AP 4.4 Untersuchungen der Material- und Produkteigenschaften, Analyse																														
AP 5 Analyse der Ergebnisse, Aufzeigen von Lösungsmöglichkeiten, Handlungsempfehlungen																														
AP 5.1 Auswertung und ökonomische und ökologische Analyse der Ergebnisse																														
AP 5.2 Lösungsmöglichkeiten zum Einsatz von NH ₃ im Ziegelherstellungsprozess																														
AP 5.3 Handlungsempfehlungen																														

Abbildung 10.1: Projektzeitplan

10.1 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Für die durchgeführten Arbeiten waren die geplanten Mitarbeiter (studentische Hilfskräfte, Techniker und Ingenieure) im beantragten Umfang tätig. Die geplanten und geleisteten Arbeiten entsprechen dem begutachteten und bewilligten Antrag und sind daher für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

11 Gegenüberstellung von Forschungszielen und Forschungsergebnissen

Forschungsziel	Erzieltes Ergebnis
Grundlagenuntersuchung am Laborprüfstand hinsichtlich Flammenstabilisierung bei der Verbrennung von Ammoniak	Chemische und konstruktive Maßnahmen zur Flammenstabilisierung von Ammoniak und ammoniakhaltigen Brennstoffen wurden erfolgreich geprüft.
Untersuchung der Auswirkung von Erdgas-NH ₃ -Gemischen auf die Verbrennung mit Luft als Oxidator	Experimentelle Untersuchungen bezüglich der Verbrennung von Erdgas-NH ₃ -Gemischen wurden am GWI durchgeführt, analysiert und ausgewertet. Neben den experimentellen Untersuchungen wurden analog numerische Simulationen durchgeführt und ausgewertet.
Untersuchungen der Auswirkung von H ₂ -NH ₃ -Gemischen auf die Verbrennung mit Luft als Oxidator	Experimentelle Untersuchungen bezüglich der Verbrennung von H ₂ -NH ₃ -Gemischen wurden am GWI durchgeführt, analysiert und ausgewertet. Neben den experimentellen Untersuchungen wurden analog numerische Simulationen durchgeführt und ausgewertet.
Untersuchung der Auswirkungen von Erdgas-NH ₃ -Gemischen auf die Ziegelqualität	Experimentelle Untersuchungen von Erdgas/NH ₃ -Gemischen wurden an der Versuchsanlage durchgeführt. Die Proben wurden von IZF analysiert, vermessen und die Ergebnisse ausgewertet.
Untersuchung der Auswirkungen von H ₂ -NH ₃ -Gemischen auf die Ziegelqualität	Experimentelle Untersuchungen H ₂ /NH ₃ -Gemischen wurden an der Versuchsanlage durchgeführt. Die Proben wurden von IZF analysiert, vermessen und die Ergebnisse ausgewertet. Eine Beeinflussung der Produktqualität wurde nicht nachgewiesen.
Erstellung eines Maßnahmenkataloges und von Handlungsempfehlungen bei der Verwendung von Ammoniak und/oder Erdgas-NH ₃ - und H ₂ -NH ₃ -Gemischen	Mögliche Maßnahmen und Handlungsempfehlungen wurden aufgezeigt.

12 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die Zusammenarbeit des Gas- und Wärme-Institut Essen e. V. (GWI), und dem Institut für Ziegelforschung Essen e. V. (IZF) und der Industriepartner gewährleistete eine fach- und branchenübergreifende sowie umfassende Aufarbeitung der Fragestellung bzw. der Zielstellung des Projektes. Über die Beteiligten ist auch ein schneller Transfer der Ergebnisse zu den Betreibern gegeben. Aufgrund der unterschiedlichen und branchenübergreifenden Herangehensweise sind eine maximale Erfolgsquote und ein Transfer der Ergebnisse in diverse Sparten und Industriezweige sichergestellt. Die Forschungspartner haben dabei die theoretischen, labor- und messtechnischen Untersuchungen in enger Abstimmung mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Die Diskussionen sorgten auch dafür, dass erste Ergebnisse den beteiligten Firmen sehr schnell zur Verfügung stehen. Die Gewährleistung der praktischen Umsetzbarkeit wurde durch die beteiligten Firmen aus den unterschiedlichsten Bereichen (Anlagenbetreiber, Brennerhersteller, Anlagenbauer, Gaslieferanten, etc.) und ihre Teilnahme an den Sitzungen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe garantiert.

12.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen zeigen den Einfluss des Ammoniaks und in Erdgas-NH₃- sowie H₂-NH₃-Gemischen auf die Verbrennung. Ferner wurde gezeigt, wie sich die resultierende Ofenatmosphäre auf die Produktqualität auswirkt.

Bezüglich der Verbrennung wurde gezeigt, dass durch konstruktive (Drallerzeugung) oder chemische (Beimischung von Wasserstoff oder Erdgas) eine Ammoniakflame stabilisiert werden kann. Es wurde dargestellt, dass die NO_x-Emissionen aufgrund des NO-Brennstoff-Pfades ansteigen können. Durch geeignete Primärmaßnahmen wie Stufenverbrennung können diese aber gesenkt werden. Ein relevanter NH₃-Schlupf trat nur unter spezifischen Randbedingungen auf und wurde bewertet. N₂O, NH₃-Schlupf-Emissionen sind marginal. Gegebenenfalls können Minderungsmaßnahmen vorgenommen werden.

Auch die Auswirkungen von Ammoniak auf die Ziegelqualität wurden untersucht. Die Versuchsreihen zeigten, dass Ammoniakbetrieb bei geeigneter Prozessführung keine signifikanten negativen Einflüsse auf zentrale Qualitätsmerkmale (z. B. Druckfestigkeit, Rohdichte, Wasseraufnahme, Farbe/Gefüge) verursacht.

12.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Der wirtschaftliche Nutzen dieses Forschungsvorhabens für Anlagenbetreiber, für Hersteller von Anlagen und Komponenten ist direkt mit dem oben genannten technischen Nutzen in Zusammenhang zu bringen.

Der wirtschaftliche Hauptnutzen der Ergebnisse betrifft die Betreiber von Ziegelwerken sowie die Brennerhersteller. Zum einen in dem eine sichere, zuverlässige und schadstoffarme Verbrennung

gewährleistet und zum anderem die Ziegelqualität garantiert werden. Hierdurch werden Risiken bezüglich der Verbrennung sowie Warenausschuss infolge von Produktmängeln vermieden, die einen wirtschaftlichen Verlust für die jeweiligen Unternehmen verursachen würden.

Durch das Aufzeigen der Auswirkungen der NH_3 -Zumischung zum Erdgas oder Wasserstoff wurden chemische Möglichkeiten zur Stabilisierung von ammoniakreichen Brennstoffen vermittelt. Dies verschafft den Unternehmen Wettbewerbsvorteile durch reduzierte CO_2 -Emissionen. Für Anlagenbauer, Anlagenbetreiber und Brennerhersteller bieten sich bei der Möglichkeit, Ammoniak stabil und zuverlässig verbrennen zu können, neue Absatzmöglichkeiten für NH_3 -optimierte Produkte bzw. für eine Umstellung von Bestandsanlagen.

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse verschaffen dem Standort Deutschland, insbesondere den klein- und mittelständischen Unternehmen, welche meist nicht über eine eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilung verfügen, einen deutlichen Vorsprung bezüglich der Sensibilisierung für die Besonderheiten einer NH_3 -Zumischung auf Verbrennungsprozesse und auf die Produktqualität.

Die Anlagenbetreiber sind durch den Knowhow-Gewinn sicher zukünftig bereit, Maßnahmen zur Nutzung von NH_3 -reichen Brenngasen oder reinem Ammoniak zu treffen, um auf die durch die Energiewende gegebenen Herausforderungen reagieren zu können somit auch zukünftig ihre Wettbewerbsfähigkeit durch fundiertes Wissen zu sichern.

Anlagenbauer, Anlagenbetreiber und Brennerhersteller erhalten wichtige Informationen darüber, ob und ggf. in welchem Umfang Änderungen an bestehenden Anlagen notwendig sind und welche Aspekte bei der Anlagenneuplanung zu berücksichtigen sind. Dies sichert den wirtschaftlichen Betrieb.

13 Transfermaßnahmen in die Wirtschaft

Bisherige und zukünftig geplante Tätigkeiten zum Ergebnistransfer:

Es wurden im Laufe des Projektes ein Kick-Off-Meeting und drei weitere Sitzungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss zur Absprache der geplanten Arbeiten und zu Diskussionen der Ergebnisse durchgeführt. Eine abschließende Sitzung im Juni 2025 führte die Teilnehmer der Projektgruppe noch einmal am GWI zusammen, so dass die Forschungsergebnisse des Projekts den unterschiedlichen Unternehmen dargestellt werden konnten. Weiterhin fanden zahlreiche Gespräche mit den beteiligten Industrieunternehmen statt.

In den Tätigkeitsberichten der Jahre 2024 und 2025 des GWI wurde ebenfalls über den Stand der Arbeiten berichtet. Die Aufsichtsgremien des GWI und des IZF wurden regelmäßig über die Arbeiten informiert. Auf der Website des GWI und des IZF ist ein Steckbrief zum Projekt hinterlegt.

Der Abschlussbericht wird ebenfalls auf der Homepage des GWI und des IZF veröffentlicht. Ein Hinweis dazu wird über die GWI und IZF social Media Kanäle erfolgen. Veröffentlichungen zum Thema erfolgten in der Ziegelindustrie International 5/2025 und im Tagungsband des 5. Aachener Ofenbau- und Thermoprozess-Kolloquiums, Sept. 2025. Weiterhin ist eine Veröffentlichung in der „Prozesswärme“ und in der „Heat Processing“ in 2026 geplant. Weiterhin flossen und fließen die Ergebnisse in das Bildungswerk des GWI mit ein, sowie in die IZF-Seminare und weitere Vorträge zum Einsatz von regenerativen Gasen durch beide Forschungsstellen.

Tabelle 13.1: Durchgeführte Transfermaßnahmen während des Projektes

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Projekt begl. Ausschuss	Vorstellung der Ergebnisse	Innerhalb der FSt.	21.06.2023 – Kick-off 23.09.2024 – PbA-Sitzung 14.05.2025 - PbA-Sitzung 02.06.2025 - Abschluss
Fachmessen	Wissenstransfer an Fachpublikum	z. B. Ceramitec	2024
Veröffentlichung in Fachzeitschriften	Wissenstransfer an Fachunternehmen verschiedener Wirtschaftszweige	u.a. ZI	ZI Ausgabe 5/2025 AOTK Sept. 2025
Fachbeirat, Arbeitskreise und Fachausschüsse	Wissenstransfer an Fachpublikum	DVGW,	Fokusgruppe Ammoniak,
Pressemitteilungen, Social Media	Bekanntmachung des Forschungsprojekts	Online, Zeitschriften, LinkedIn	LinkedIn-Post zum Kick-off und Abschluss des Projektes
Berichte in den Aufsichtsgremien der Institute	Aktueller Stand des Vorhabens und erste Ergebnisse werden kommuniziert	Vorstand, Verwaltungsrat, Fachausschusssitzung, etc. Forschungsgemeinschaft der Keramik-Anlagenbauer und der Ziegelindustrie	Jährlich
Website	Information einer breiten Öffentlichkeit	Online	Steckbriefe auf den Homepages des GWI und IZF
Tätigkeitsbericht	Berichte über öffentlich geförderte Projekte	eigene Publikation, Website	Jährlich
Veröffentlichung auf Konferenzen und Tagungen	Vorstellung der jeweils bis dahin erzielten Ergebnisse	z. B. Würzburger Ziegellehrgang, IZF-Seminar, AOTK	Alle 1 – 2 Jahre

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Abschlussbericht	Zusammenfassung der Ergebnisse Veröffentlichung auf der GWI- und IZF-Homepage	PA-Sitzung, Homepage Internet	auf den Homepages des GWI und IZF

Tabelle 13.2: Geplante Transfermaßnahmen nach Ende des Projektes

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Datum / Zeitraum
Newsletter-Beitrag	Information v. Fachfirmen	Online / E-Mail	Bei Vorlage des Abschlussberichtes
Abschlussbericht auf der Website	Information einer breiten Öffentlichkeit	Online	Nach Abschluss des Projektes
Beteiligung an Fachmes- sen/ Kongress	Wissenstransfer an Fachpublikum	z. B. Thermprocess, Ceramitec	Alle 1 – 2 Jahre
Tagungen	Etablierung des Know-hows in Industrieunternehmen	Flammentag, KWK, Würzburger Ziegellehrgang, IZF-Seminar	alle 1 – 2 Jahre
Veröffentlichung in Fachzeitschriften	Wissenstransfer an Fachunternehmen verschiedener Wirtschaftszweige	u. a. heat processing, Ziegelindustrie International	Nach Abschluss des Projektes
Fachbeirat	Ergebnis-Präsentation, Wissenstransfer an Fachpublikum	DVV, VDEh, AWT, VDMA, FOGI, FOKA	Nach Abschluss des Projektes
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten an alle Interessierten	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Online, persönliche Weitergabe	
Weitergabe der Ergebnisse in Fortbildungsveranstaltungen der beiden Forschungsstellen	Verbreitung der Forschungsergebnisse		Jährliche Veranstaltungen
Direkte Beratung	Hilfestellung bei der Umstellung auf den Brennstoff	In den Werken	laufend

14 Danksagung

Die Autoren möchten sich an dieser Stelle bei den Partnern des Projektbegleitenden Ausschusses für deren Mitarbeit und unentgeltliche Bereitstellung von Material, Personal und fachlicher Unterstützung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) für die Bereitstellung der finanziellen Mittel aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE).

15 Verwendung der Zuwendung

GWI			IZF			
A	B	C	A	B	C	F
			14,95	8,75		

16 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V., „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland - Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050“, 2021.
- [2] Frankfurt School, FS-Unep Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance, „Tunnel kiln: Technology overview and project assessment guideline - Technical assistance for financing brick kiln improvements in Bangladesh“, August 2019.
- [3] A. Valera-Medina u. a., „Ammonia combustion in furnaces: A review“, *ELSEVIER*, Bd. Hydrogen Energy, Januar 2024.
- [4] M. Alnajideen und u. a., „Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review“, *Carbon Neutrality*, Bd. 12, 2024.
- [5] J. Sun, N. Zhao und H. Zheng, „A comprehensive review of ammonia combustion: Fundamental characteristics, chemical kinetics, and applications in energy systems“, *Fuel*.
- [6] „Umfrage: Umsatz der deutschen Ziegelindustrie“, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588151/umfrage/umsatz-der-deutschen-ziegelindustrie/>. [Zugriff am 22.01.2025].
- [7] „Umfrage: Beschäftigte der deutschen Ziegelindustrie.“, verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588190/umfrage/beschaeftigte-der-deutschen-ziegelindustrie>. [Zugriff am 22.01.2025].
- [8] G. Roland, L. Johanna und W. Stefan, „Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland“, Berlin: Bundesverband deutsche Ziegelindustrie e.V., 2021.
- [9] M. Izadifar, P. Thissen, A. Steudel, R. Kleeberg, S. Kaufhold und J. Kaltenbach, „Comprehensive examination of dehydroxylation of Kaolinite, disordered Kaolinite, and Dickite. Experimental studies and density functional theory“, *Bd. Clays Clay Miner*, Nr. 68 (4), pp. 319-333.
- [10] C. A. Randal, „Cold Sintering Process“, 2016.
- [11] A. Ndayishimiye, M. Y. Sengul, S. H. Bang, K. Tsuji, T. Hersisson de Beauvoir und K. Takashima, „Comparing hydrothermal sintering and cold sintering process. Mechanisms, microstructure, kinetics and chemistry“, *J. Eur. Ceram. Soc.* 40 4, pp. 1312-1324, 2020.
- [12] H. Hohmann, H. -G. Krüger und J. Geilich, „Die Hydrothermale Verfestigung toniger Massen nach dem Hydritverfahren“, *Silik.* 22 4, 1971.
- [13] C. Gäbelein, „Optimierung der Aufheizzone im Tunnelofen“, *Ziegelindustrie International Brick Tile Ind. Int.*, Nr. Nr. 03/21.
- [14] „Nationale Wasserstoffstrategie“, verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html>. [Zugriff am 16.01.2025].

- [15] S. Joest, M. Fichtner, M. Wietschel, U. Bünger, C. Stiller, P. Schmidt, F. Merten, N. Parker und K. Bomhoff, „Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050“, Abschlussbericht der Studie Germany, 2009. [Online]. Available: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Verkehr/Dokumente/germanHy_Abschlussbericht.pdf.
- [16] S. Spielmann, „Schwankungen im Erdgasnetz und die Auswirkungen auf die industrielle Feuerungsanlage“, *VIK-Mitteilungen*, pp. 17 - 19, 2012.
- [17] B. Slim, H. Darneveil, G. van Dijk, D. Last, G. Pieters, M. Rotink, J. Overdiep und H. Levinsky, „Should we add hydrogen to the natural gas grid to reduce CO2 emissions (Consequences for gas utilization equipment“, *World Gas Conference*, Amsterdam.
- [18] M. Biebl, J. Leicher, A. Giese und K. Görner, „Wasserstoff 2023: Hydrogen“, *Hydrogen*, Bd. 1. Auflage, Nr. IKS-Verlag, Freiberg, 2023.
- [19] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner, „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung“, Springer Verlag, Heidelberg, 2018.
- [20] E. Wiberg, „Anorganische Chemie“, Walter de Gruyter & Co Verlag, 33. Auflage, Berlin, 1953.
- [21] K. Aika und H. Kobayashi, „CO2 free ammonia as an energy carrier: Japan's insights“, Singapur, 1. Auflage, Springer Verlag, 2023.
- [22] B. Bonnet-Cantalloube, M. Espitalier-Noël, P. F. d. Carvalho, J. Fonseca und G. Pawelec, „CLEAN AMMONIA - IN THE FUTURE ENERGY SYSTEM“, March 2023.
- [23] M. Yang und J. S. Lee Lam, „Risk assessment of ammonia bunkering operations: Perspectives on different release scales“, *Journal of Hazardous Materials*, Bd. 468, 2024.
- [24] J. Warnatz, U. Maas und R. W. Dibble, Verbrennung: Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung, Springer Verlag, 3. Auflage, Heidelberg, 2001
- [25] E. Spatolisano, L. A. Pellegrini, A. R. d. Angelis, S. Cattaneo und E. Roccaro, „Ammonia as a Carbon-Free Energy Carrier: NH3 Cracking to H2“, *I&EC Research*, Bd. 62, 2023.
- [26] ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V., „Energieträger Wasserstoff“, verfügbar unter: <https://www.asue.de/medien/asue/publikationen/2020/asue-energietraeger-wasserstoff-2020-04.pdf>.
- [27] Deutsche Umwelthilfe e.V., verfügbar unter: http://www.duh.de/uploads/tx_duhdownloads/DUH_Hintergrundpapier_Methan.pdf. [Zugriff am 23.08.2025].
- [28] F. Joos, „Technische Verbrennung: Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen“, Springer Verlag, 1. Auflage, Berlin, 2006.
- [29] I. Yetter, R. Glassman, „Combustion“, Academic press, 4. Auflage, London, 2008.

- [30] T. Nowakowski, „Wasserstoff-Zumischung ins Erdgasnetz Auswirkung auf Feuerungsprozesse“, Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Essen, Abschlussbericht AiF-Forschungsprojekt IGF-Vorhaben Nr. 18518 N / 1, 2017.
- [31] A. Huber, „Auswirkung von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoffgemischen auf Gebläsebrenner“, Prozesswärme, Vulkan Verlag, Essen, Apr. 2020.
- [32] L. Sankowski, C. Wünning, H. Kaiser, N. Schmitz und H. Pfeifer, „Experimentelle Untersuchungen zur Verbrennung von Wasserstoff und Wasserstoff-Erdgas-Gemischen in einem vorindustriellen Hochgeschwindigkeitsbrenner im Flammen- und flammlosen Betrieb“, gehalten auf dem 31. Deutschen Flammentag, Berlin, 2023.
- [33] M. Philipp, N. Schmitz, H. Pfeifer und A. Kowert, „Entwicklung eines emissionsarmen Verbrennungskonzeptes für Wasserstoff in Mehrstoffbrennern“, gehalten auf dem 31. Deutschen Flammentag, Berlin, 2023.
- [34] J. Kolar, Stickstoffoxide und Luftreinhaltung: „Grundlagen, Emissionen, Transmission, Immissionen, Wirkungen“, Springer Verlag, 1. Auflage, Berlin, 1990.
- [35] S. MacLean, J. Leicher, A. Giese und J. Irlenbusch, „NOX-arme Nutzung von Oxy-Fuel-Verbrennung mit stark N₂-haltigem Sauerstoff in der NE-Metallurgie“, Gaswärme International, Nr. 04, Art. Nr. 04, 2012..
- [36] T. Poinso, „Turbulent combustion (Vorlesung)“, Princeton (USA), 2015.
- [37] M. Biebl, „Entwicklung und Untersuchung eines schadstoffarmen Brennersystems zur Dekarbonisierung von industrieller Prozesswärme durch eine flexible Nutzbarkeit von erneuerbar erzeugten Brenngasen und Prozessgasen“, Dissertation, 2025.
- [38] J. Lamort, „Der Industrieofen in Einzeldarstellung“, Bd. VII: Glasschmelzöfen“, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1932.
- [39] A. Hayakawa, T. Goto, R. Mimoto, T. Kudo und H. Kobayashi, „NO formation/reduction mechanisms of ammonia/air premixed flames at various equivalence ratios and pressures“, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, Nr. 1, 2015.
- [40] J. Leicher und A. Giese, „Comparability of Nitrogen Oxides Emissions from Hydrogen and Natural Gas Combustion, heat processing“, No. 4, pp. 35-40 , 2023.
- [41] C. Baukel und P. B. Eleazer, „Quantifying NO_x for Industrial Combustion Processes, Journal of the Air & Waste Management Association“, Journal of the Air & Waste Management Association, Vol. 1, Issue 48, pp. 52-58, 1998.
- [42] N. Schmitz, L. Sankowski, E. Busson, T. Echterhof und H. Pfeifer, „NO_x Emission Limits in a Fuel-Flexible and Defossilized Industry - Quo Vadis?“, Energies, Vol. 16, Issue 15, 2023.
- [43] EN 267:2020 DIN e. V., „Forced draught burners for liquid fuels“, Beuth-Verlag, 2021.
- [44] S. Mashruk., E. Okafor, M. Kovaleva, A. Alnasif, D. Pugh, A. Hayakawa und A. Valera-Medina, „Evolution of N₂O production at lean combustion conditions in NH₃/H₂/air premixed flames“, Combust. Flame, Bd. 244, 2022..

- [45] S. Mashruk, H. Xiao und A. Valera-Medina, „Rich-Quench-Lean model comparison for the clean use of humidified ammonia/hydrogen combustion systems“, International Journal of Hydrogen Energy, Bd. 46, 2020.
- [46] D. Pugh, P. Bowen, A. Valera-Medina, A. Giles, J. Runyon und R. Marsh, „Influence of steam addition and elevated ambient conditions of NO_x reduction in a staged premixed swirling NH₃/H₂ flame“, Proceedings of the Combustion Institute, Bd. 37, 2019.
- [47] J. R. Bartels, „A feasibility study of implementing an Ammonia Economy“. *Statistisches Bundesamt*.