

Konzept zur Optimierung der Ammoniak-Verbrennung für industrielle Brennersysteme

B. Feller^{*,1}, M. Biebl¹, A. Giese¹ und C. Wieland^{1,2}

*bernd.feller@gwi-essen.de

¹ Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., Hafenstraße 101, 45356 Essen, Deutschland

² Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik und Energiesysteme, Universität Duisburg-Essen, Leimkugelstraße 10, 45141 Essen, Deutschland

Inhalt

Abstract	1
1. Hintergrund	2
2. Herausforderungen zur direkten Nutzung von Ammoniak als Brenngas.....	3
3. Partielles, thermisches Cracken von Ammoniak durch neuartiges Brennerkonzept.....	4
4. Experimentelle Untersuchung des entwickelten Brennerkonzepts	7
5. Technologietransfer auf ein industrielles Brennersystem	9
6. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse.....	11
7. Literatur	12

Abstract

Im Kontext einer großskaligen, dekarbonisierten Energieversorgung erscheint neben der Nutzung von Wasserstoff mittlerweile auch die direkte Nutzung von Ammoniak als Brenngas zukünftig als eine interessante Option zur Bereitstellung von Prozesswärme mit großem Potenzial, insbesondere für dezentrale Industriestandorte ohne direkten Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz. Trotz zahlreicher verbrennungstechnischer Herausforderungen, die mit Ammoniak als Brennstoff einhergehen, wurden inzwischen verschiedene Ansätze zur Stabilisierung von NH₃-Flammen untersucht. Gleichzeitig führt die Verbrennung von Ammoniak zu deutlich höheren Stickoxid-Emissionen als bei Wasserstoff oder Erdgas. In der Praxis zeigt sich dabei häufig eine Diskrepanz zwischen der sicheren Flammenstabilisierung und einem gleichzeitig schadstoffarmen Betrieb. Um Ammoniak dennoch als klimafreundlichen Energieträger in der Industrie zu etablieren, braucht es innovative Brennerkonzepte, die sowohl emissionsarm als auch industrietauglich sind. In diesem Beitrag

wird ein solches Brennerkonzept vorgestellt, das darauf abzielt, Ammoniak im Brenner thermisch zu cracken. Dabei wird der Ammoniak vor der eigentlichen Verbrennung ohne Verwendung eines zusätzlichen Katalysators in ein Synthesegasgemisch aus NH_3 , H_2 und N_2 überführt. Der dabei freigesetzte Wasserstoff wirkt sich positiv auf die Flammenstabilität aus und ermöglicht einen deutlich stabileren und kontrollierbaren Verbrennungsprozess.

Nachdem die Funktionsweise des vorgestellten Konzepts durch grundlegende Untersuchungen an einem Laborprüfstand erfolgreich nachgewiesen werden konnte, wurde das Brennerkonzept in ein industrielles, additiv gefertigtes Rekuperatorbrennersystem integriert. Erste Versuche unter semi-industriellen Bedingungen lieferten vielversprechende Ergebnisse: Durch eine interne Vorwärmung gelang es, Ammoniak teilweise in Wasserstoff und Stickstoff zu spalten. Dies führte zu einer deutlich erhöhten Reaktivität des Brenngases und damit zu einer signifikanten Stabilisierung der Flamme. Gleichzeitig konnten die NO_x -Emissionen dank primärer Minderungsmaßnahmen um rund 70 % reduziert werden - auf ein Niveau, das mit konventionellen Erdgasbrennern vergleichbar ist.

1. Hintergrund

Die Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesregierung rückt Wasserstoff (H_2) als klimafreundlichen Energieträger zunehmend in den Fokus. Ein bedeutender Schritt zum Hochlauf der H_2 -Infrastruktur wurde im Oktober 2024 durch die Genehmigung des Wasserstoff-Kernnetzes getan. Mittlerweile ist allerdings klar, dass der Großteil des inländischen Bedarfs an grünem H_2 vor allem kurz- und mittelfristig in Form von Wasserstoff-Derivaten, wie Ammoniak (NH_3), Methanol (MeOH) oder flüssigen Wasserstoff (LH_2), importiert werden muss [1]. Aufgrund der Tatsache, dass Ammoniak, besonders für die Düngemittelindustrie, schon heute im großskaligen Bereich hergestellt und transportiert wird, erscheint NH_3 als Wasserstoffderivat besonders geeignet. So existieren beispielsweise bereits globale Produktionskapazitäten mit einer Kapazität von über 220 Mio. Tonnen [2]. Die für den Import notwendigen nationalen und europäischen Importterminals befinden sich aktuell, wie in Wilhelmshaven oder Rotterdam, im Aufbau und sollen bereits ab 2026 in Betrieb gehen. Durch die ersten abgeschlossenen, internationalen Lieferverträge für grünes NH_3 zwischen der Bundesregierung und Ländern wie Ägypten wird der Import von Ammoniak zusätzlich beschleunigt [3]. Während die meisten Strategien nach dem Import die Abspaltung des Wasserstoffs aus dem Ammoniak und dessen Einspeisung ins Netz vorsehen, birgt die direkte Nutzung von NH_3 in der Industrie, der Schifffahrt und bei der Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme großes Potenzial. Insbesondere für dezentrale

Industriestandorte ohne direkten Zugang zum Wasserstoff-Kernnetz bietet NH_3 eine vielversprechende Option für eine großskalige, dekarbonisierte Energieversorgung.

2. Herausforderungen zur direkten Nutzung von Ammoniak als Brenngas

Während Ammoniak hinsichtlich der Transport- und Speichereigenschaften erhebliche Vorteile gegenüber Wasserstoff aufweist und bei Umgebungsdruck schon bei -33 °C anstatt bei -252 °C verflüssigt werden kann, sind die Trends hinsichtlich der Verbrennungseigenschaften völlig gegensätzlich. Anders als H_2 ist NH_3 ein äußerst reaktionsträges Brenngas, welches sich nicht nur schwerer entzünden lässt, sondern die Stabilisierung von technisch relevanten Flammen erheblich erschwert. **Tabelle 1** zeigt eine Gegenüberstellung der relevanten Größen bei der Verbrennung der genannten Brenngase mit Luft.

Tab. 1: Vergleich der Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff und Ammoniak [4]

	H_2	NH_3
Unterer Heizwert (MJ/m^3)	10,8	14,35
Zündgrenzen in Luft (λ)	0,14 - 10	0,71 – 1,59
Adiabate Flammentemperatur in Luft bei $\lambda = 1$ (°C)	2.110	1.800
Selbstzündtemperatur (°C)	520	650
Mindestzündenergie (mJ)	0,019	14
*Laminare Flammengeschwindigkeit bei $p = 1\text{ bar}$, $\lambda = 1$ (cm/s)	227,31	6,9
*Zündverzugszeit bei $p = 1\text{ bar}$, $T_{\text{in}} = 1.200\text{ K}$ (ms)	0,04	59,45

* berechnet mit dem NH_3 -Reaktionsmechanismus nach Shrestha [5]

Neben den deutlich engeren Zündgrenzen weist NH_3 eine um 130 °C höhere Selbstzündtemperatur sowie eine um mehr als 700-fach höhere Mindestzündenergie auf, sodass sich brennbare Gemische nicht nur seltener einstellen, sondern schwieriger zu entzünden sind. Für industrielle Brennersysteme ist zusätzlich besonders die Kombination aus niedriger laminarer Flammengeschwindigkeit und hoher Zündverzugszeit herausfordernd, da die Gefahr zur Entstehung von instabilen Verbrennungszuständen oder das Abheben der Flamme wesentlich höher ist. Trotz dieser vielfältigen verbrennungstechnischen Herausforderungen gibt es mittlerweile vielfältige Ansätze zur Stabilisierung von NH_3 - bzw. NH_3 -haltigen Flammen. Neben der Zumischung von reaktionsfreudigeren Gasen wie beispielsweise H_2 oder Erdgas (NG), erscheint vor allem die Flammenstabilisierung über Drall als geeignete Methode zur Stabilisierung von Ammoniak-Flammen [6]. In diesem Zusammenhang zeigte sich, dass die Flammenform bei der Verbrennung von Ammoniak einen entscheidenden Einfluss auf die gemessene Konzentration an NO ausübt. So wiesen im Rahmen der Untersuchungen besonders stabile, drall-stabilisierte Flammen ein hohes NO-Bildungspotenzial auf. Im Gegensatz dazu

fürten gestreckte Reaktionszonen (lange Flammen) zu einem deutlich geringeren NO_x -Emissionsbildungsverhalten. Allerdings stellte sich in diesen Fällen die Flammenstabilität als begrenzender Faktor dar [6], [7]. Im Zuge der Instabilität ist darüber hinaus die Bildung einer weiteren Spezies kritisch zu sehen: Distickstoffoxid (N_2O) kann bei der Verbrennung von Ammoniak und ammoniakhaltiger Brenngase entstehen und ist mit einem GWP von 310 (120 Jahre Verweildauer in der Atmosphäre) [8] in erheblichem Maße klimaschädlicher als CO_2 . Wie auch schon NO , ist N_2O im Kontext der NH_3 -Verbrennung zudem nicht nur eine Abgasemission, die es zu vermeiden gilt, sondern auch ein Zwischenprodukt während der Verbrennung. Über **Gleichung 1** besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Reduzierung von NO und der Bildung von N_2O .



Das gebildete N_2O wird bei ausreichender Anwesenheit der reaktiven Spezies H über **Gleichung 2** wiederum zu N_2 reduziert [4].



Durch eine gezielte Verbrennungsführung lassen sich die Konzentration der Schadstoffe NO und N_2O massiv beeinflussen und zu N_2 reduzieren. Eine besonders wirksame Methode zur Vermeidung von NO und N_2O ist hierbei die gestufte Verbrennung (fett-magere Verbrennung), die bei bisherigen reaktionskinetischen und experimentellen Untersuchungen am GWI zu NO_x -Reduktionsraten von bis zu 80 % führten [6], [7]. Aufgrund der reduzierten Luftmenge im primären Verbrennungsbereich ergibt sich dort allerdings auch eine reduzierte Wärmefreisetzung, sodass bei zu starker Luftstufung Instabilitäten innerhalb der Flamme auftreten können, die wiederum zu hohen Konzentrationen an unverbranntem NH_3 und N_2O führen. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass eine gezielte Erhöhung der Flammenstabilität entscheidend ist, um das Potenzial primärer NO_x -Minderungsmaßnahmen voll ausschöpfen zu können. Nachfolgend wird hierfür ein innovatives Verbrennungskonzept vorgestellt.

3. Partielles, thermisches Cracken von Ammoniak durch neuartiges Brennerkonzept

Da die Anwesenheit eines reaktiveren Gases innerhalb des Brenngasgemisches die Flammenstabilität ammoniakhaltiger Brenngasgemische signifikant verbessert, erscheint das partielle Cracken des Ammoniaks als eine weitere geeignete Methode zur Flammenstabilisierung. Das Cracking von Ammoniak stellt die Umkehrreaktion zur NH_3 -Herstellung dar und ist ein endothermer Prozess bei dem NH_3 unter Energieeinsatz zu H_2 und

N_2 aufgespalten wird. Aufgrund der Endothermie des Prozesses beträgt der Energieverlust heutiger industrieller Cracker etwa 15 % des eingesetzten Wasserstoffs. Bei Anlagen mit geringer Wärmerückgewinnung zur Vorwärmung des NH_3 und der Berücksichtigung der internen Wasserstoff- und Wärmeverluste kann dieser Energieverlust auf bis zu 30 % ansteigen [2]. Zur Reduzierung dieses hohen Energieverlustes wird beim nicht-katalytischen, partiellen Cracken bei Temperaturen von $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur ein gewisser Anteil des Ammoniaks aufgespalten, sodass sich die Verbrennungseigenschaften durch die Anwesenheit von H_2 verbessern. Für die industrielle Nutzung von Ammoniak als Brenngas wäre mit den heutigen Systemen allerdings trotzdem zusätzliche Peripherie für das partielle Cracken notwendig.

Um dennoch die Vorteile des partiellen Crackens zur Stabilisierung der NH_3 -Verbrennung nutzen zu können, wurde am GWI gemeinsam mit der Firma Kueppers Solutions GmbH ein Laborbrennerkonzept entwickelt, dass eine interne Vorwärmung und damit einhergehend eine teilweise Aufspaltung des Ammoniaks vorsieht. **Abbildung 1** zeigt schematisch neben den temperaturbedingten Konzentrationsverläufen von NH_3 , H_2 und N_2 über die Länge einer solchen Vorwärmzone (rechts) zudem den Versuchsaufbau inklusive des installierten Laborbrenners (links). Das Brennerdesign basiert auf einem bereits detailliert untersuchten Laborbrenner [6], welcher um eine interne Vorwärmzone sowie eine integrierte Luftstufung erweitert und im SLM-Verfahren (Selective Laser Melting) als ein monolithisches Bauteil additiv gefertigt wurde.

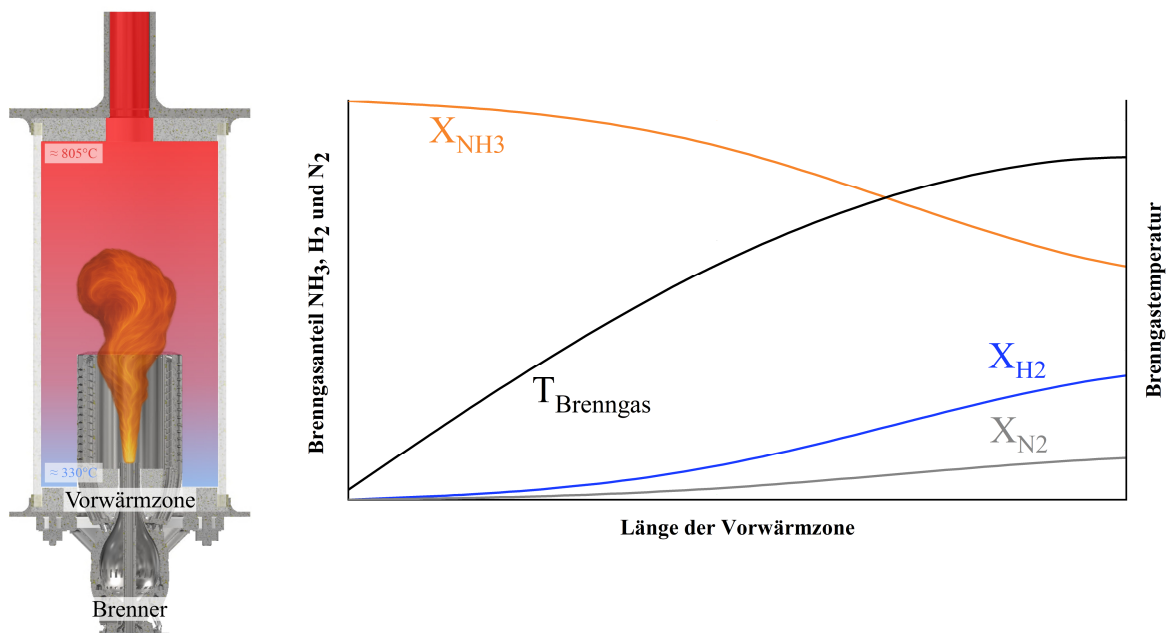


Abb. 1: links: Versuchsaufbau des Laborbrennerprüfstands mit interner Vorwärmzone und integrierter Luftstufung, rechts: Qualitativer, volumetrischer Konzentrations- und Temperaturverlauf über die Länge der Vorwärmzone

Wie in **Abbildung 1** (links) zu erkennen ist, ist die sogenannte Vorwärmzone als Flammenrohr ausgeführt, mit der Absicht, die durch den Verbrennungsprozess freigesetzte Energie zu nutzen, um über einen wendelförmigen Wärmeübertrager das Ammoniak intern vorzuwärmen und, je nach erreichtem Temperaturniveau innerhalb der Vorwärmzone, partiell aufzuspalten (siehe **Abbildung 1**, rechts). Neben dem Temperaturniveau ist hierbei vor allem der für den Wärmeübertrager verwendete Werkstoff entscheidend, da die Berücksichtigung der reinen, homogenen Gasphasenreaktion das Spaltverhalten unterschätzt. Um aussagekräftige Ergebnisse hinsichtlich der Cracking-Raten zu erhalten, ist es daher notwendig die heterogene Reaktion des Ammoniaks in der Gasphase und an den Wärmeübertragerwänden zu berücksichtigen, da beispielsweise bei Edelstählen, die Anwesenheit von Eisen zur Bildung von Eisennitrid auf der Oberfläche führt, welches wiederum katalytisch wirkt, die Aktivierungsenergie der Spaltreaktion herabsetzt und die NH_3 -Spaltung somit signifikant erhöht [9].

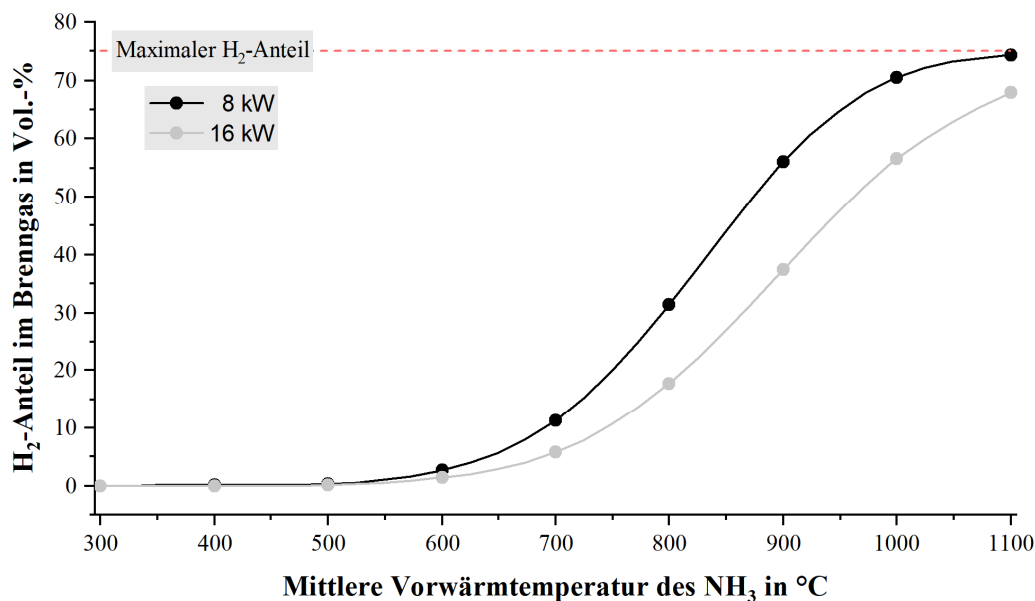


Abb. 2: H_2 -Anteil im Crackinggas in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur

Auf Basis der experimentellen und numerischen Arbeiten von Feng et al. [9] wurde ein reaktionskinetisches Berechnungsmodell aufgesetzt, welches das thermische Cracking von Ammoniak innerhalb eines Plug-Flow-Reaktors (PFR) über einen heterogenen Oberflächenreaktionsmechanismus abbildet. Über den Durchmesser und die Länge des Rohrreaktors, sowie den Brennstoffvolumenstrom bzw. die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb des PFR lassen sich so, in Abhängigkeit von der mittleren Vorwärmtemperatur des Ammoniaks, die erreichbaren H_2 -Anteile innerhalb des Spaltgases für eine gegebene Wärmeübertragergeometrie berechnen. Die Ergebnisse der Berechnungen zum integrierten

Wärmeübertrager sind in **Abbildung 2** für zwei unterschiedliche Brennerleistungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei höheren Brennerleistungen der H_2 -Anteil im Brenngas bei gleicher mittlere Vorwärmtemperatur abnimmt. Während bei einer Vorwärmtemperatur von $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 8 kW Brennerleistung schon etwa $11,3\%$ Wasserstoff im Crackinggas enthalten sind, beträgt der Wasserstoffanteil bei 16 kW nur $5,9\%$. Die Ursache für die geringere Crackingrate ist auf den doppelten Brenngasvolumenstrom zurückzuführen, wodurch die Verweilzeit des NH_3 innerhalb des PFR halbiert wird. Neben den durchgeführten Simulationen war es für den Funktionsnachweis des Brennerkonzeptes unumgänglich hinreichende Untersuchungen am Laborprüfstand durchzuführen.

4. Experimentelle Untersuchung des entwickelten Brennerkonzeptes

Da eine exakte Bestimmung der mittleren Vorwärmtemperatur nicht ohne weiteres möglich war, konnte im Rahmen der Untersuchungen die erreichte Cracking-Rate nur anhand einer gemessenen Temperatur am Austritt der Vorwärmzone und der Annahme eines qualitativen Temperaturprofils über die Gesamtlänge der Vorwärmzone abgeschätzt werden. **Abbildung 3** zeigt den ungestuften Betrieb des Laborbrenners mit 100% NH_3 . Zu erkennen ist hierbei deutlich, dass die obere Hälfte des Flammenrohres intensiv glüht. In diesem Bereich werden schätzungsweise Temperaturen von $850 - 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Gemäß der Arbeiten von Feng et al. [9], kann so in erster Näherung von H_2 -Anteilen von $9,9 - 15,1\text{ Vol.-%}$ im NH_3 -/ H_2 -/ N_2 -Gemisch ausgegangen werden. Im Zuge dessen zeigte sich zusätzlich, dass



Abb. 3: Labordemonstrator mit Vorwärmzone im Betrieb mit 100% NH_3 ($P_{\text{Brenner}} = 8\text{ kW}$, $\lambda = 1,1$, $S = 1,1$)

sich stets ein thermisches Gleichgewicht zwischen der vom NH_3 aufgenommenen Wärme und der von der NH_3 -Flamme abgegebenen Wärme einstellt und das Bauteil somit nicht überhitzt. Die Lage des thermischen Gleichgewichtes und somit auch der Grad des partiellen Crackens ist dabei stark von der Brennerleistung, der globalen Stöchiometrie und der eingestellten Luftstufung abhängig, da eine Wechselwirkung, mit der sich ausprägenden Flammenform besteht. Durch die Vorwärmung und den Wasserstoff im Brenngas wechselt der dominierende Stabilisierungsmechanismus von einer drall-stabilisierten in eine chemisch-stabilisierte Flamme, wodurch die ursprünglich, kompakte Reaktionsfront in die Länge gezogen und weniger NO gebildet wird. In Kombination mit der integrierten Luftstufung können die NO -Emissionen, bei gleichzeitig niedrigen N_2O -Emissionen und vollständigem Ausbrand,

zusätzlich reduziert werden. **Abbildung 4** zeigt den Einfluss der Luftstufung auf die gemessenen Konzentrationen im feuchten bzw. trockenen Abgas. Der Sekundärluftanteil $X_{L,sek}$ ist dabei nach **Gleichung 3** als volumetrischer Anteil an der gesamten Luftmenge definiert.

$$X_{L,prim} + X_{L,sek} = 1 \quad (3)$$

Die Eindüsung der Sekundärluft erfolgt über eine Vielzahl an Düsen, die am Ende der Vorwärmzone innerhalb des Bauteils integriert sind, sodass der vollständige Ausbrand im gestuften Brennermodus erst innerhalb der Brennkammer stattfindet.

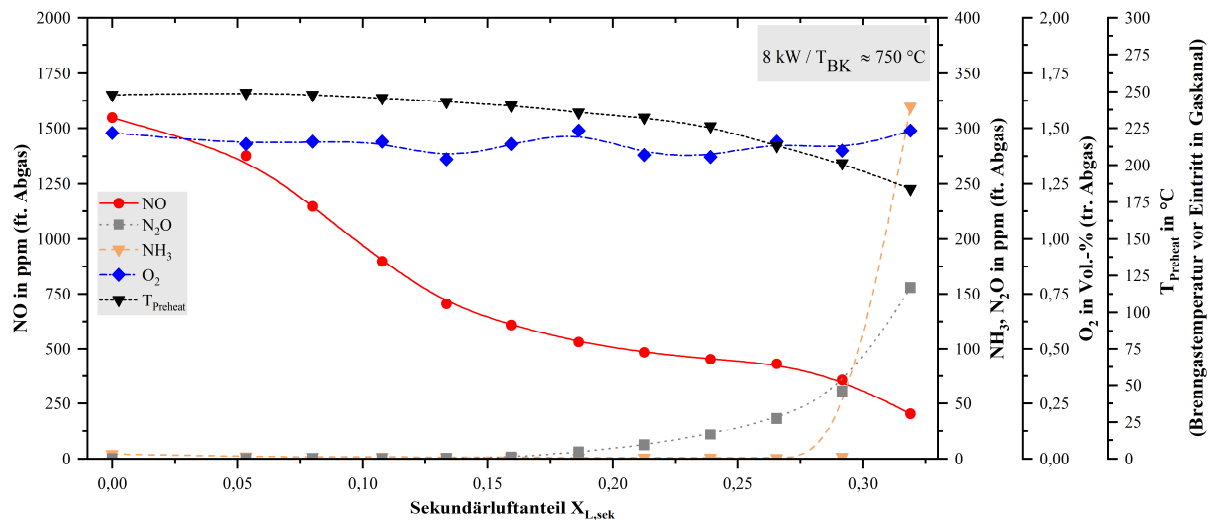


Abb. 4: Einfluss der Luftstufung auf die Konzentrationen an NO, N₂O, NH₃ und O₂ sowie die Vorwärmtemperatur des Ammoniaks, $Q_{th} = 8 \text{ kW}$, $\lambda \approx 1,07$

Wie in der **Abbildung 4** zu erkennen ist, konnten die NO-Konzentrationen im gestuften Betrieb um bis zu 70 % ($X_{L,sek} = 0,21$) reduziert und gleichzeitig niedrige Konzentrationen an N₂O und NH₃ von unter 10 ppm erzielt werden. Darüber hinaus war zwar ein weiterer Abfall der NO-Konzentrationen zu verzeichnen, allerdings stiegen die N₂O-Konzentrationen stetig auf bis zu 61 ppm bei $X_{L,sek} = 0,29$ an. Bei einer weiteren Steigerung des Sekundärluftanteils ($X_{L,sek} = 0,32$) konnte ein sprunghafter Anstieg an N₂O sowie an unverbranntem NH₃ beobachtet werden. Der exponentielle Anstieg der N₂O- und NH₃-Konzentrationen lässt sich im Rahmen der Ammoniakverbrennung als deutliches Anzeichen für wachsende Flammeninstabilitäten interpretieren [6], [7] und zeigte sich in der Form, dass die Flamme durch eine zusätzliche Erhöhung des Sekundärluftanteils nach erheblichen Instabilitäten erlosch.

Des Weiteren ist anhand der **Abbildung 4** zu beobachten, dass die gemessene Vorwärmtemperatur, vor Eintritt in die Brenngasdüsen, mit zunehmender Luftstufung abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich mit steigendem Sekundärluftanteil die Hauptreaktionszone mehr und mehr in die Brennkammer verschiebt, sodass weniger Wärme

zur NH_3 -Vorwärmung zur Verfügung steht und der Anteil des aufgespaltenen NH_3 abnimmt. Sobald nicht mehr ausreichend H_2 im Brenngas vorhanden ist, treten lokale Instabilitäten in der Flammenfront auf, die schließlich zum Erlöschen der Flamme führten.

An dieser Stelle sei zusätzlich erwähnt, dass sich aufgrund der Kompaktheit des Brennkammervolumens innerhalb der Brennkammer ein inhomogenes Temperaturfeld einstellt, welches qualitativ in **Abbildung 1** dargestellt ist. Besonders bei stark gestuften Betriebszuständen mit längerer Flamme bleibt somit nicht mehr ausreichend Verweilzeit für den vollständigen Ausbrand. Die grundsätzliche Funktionsweise der Vorwärmzone sowie das Potenzial zur NO -Reduktion durch die integrierte Luftstufung konnten allerdings nachgewiesen werden, sodass das entwickelte Brennerkonzept anschließend auf eine industrielle Brennergröße übertragen werden konnte.

5. Technologietransfer auf ein industrielles Brennersystem

In einer Vielzahl von Wärmebehandlungsöfen der Stahlindustrie werden Brenner mit einer thermischen Leistung von 30 kW eingesetzt, die mit einem Luft-Abgas-Wärmeübertrager zu kompakten, sogenannten Rekuperatorbrennern kombiniert werden. Das entwickelte Verbrennungskonzept für Ammoniak wurde auf einen solchen Brennertyp übertragen und mit Hilfe des metallischen 3D-Drucks nahezu vollständig als ein zusammenhängendes Bauteil gefertigt und ist in **Abbildung 5** dargestellt.

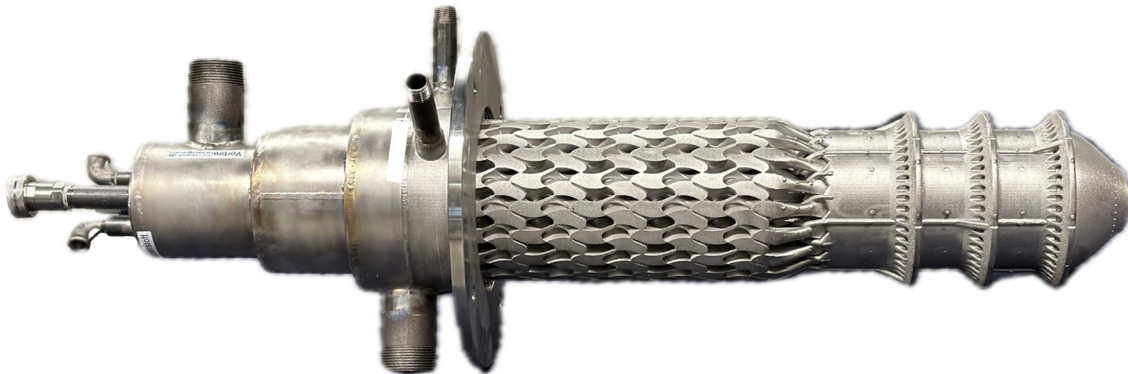


Abb. 5: Additiv gefertigter 30 kW Ammoniak-Rekuperatorbrenner (Quelle: Kueppers Solutions GmbH)

Abgesehen vom Brennergehäuse wurde der gesamte Rekuperatorbrenner sowie das Flammenrohr mit Vorwärmzone als ein monolithisches Bauteil additiv gefertigt, was ein absolutes Novum innerhalb der Brennertechnik ist. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurde der Prototyp allerdings zunächst ohne die Nutzung des Rekuperators im semi-industriellen Hochtemperaturversuchsofen des GWI betrieben, um die Funktionsweise der Vorwärmzone separat bewerten zu können. Während der Messkampagnen wurden die

Betriebsparameter Brennerleistung, Luftstufung, globales Lambda und Ofenraumtemperatur variiert. In Abhängigkeit der mittleren Ofenraumtemperatur konnten so für einen Temperaturbereich von 850 – 965 °C und im Betriebszustand mit sichtbarer Flamme, NO-optimierte Betriebspunkte experimentell ermittelt werden. Die gemessenen Abgas-Konzentrationen in Abhängigkeit der Ofenraumtemperatur sind in **Abbildung 6** für den Teillastbetrieb bei 18 kW dargestellt.

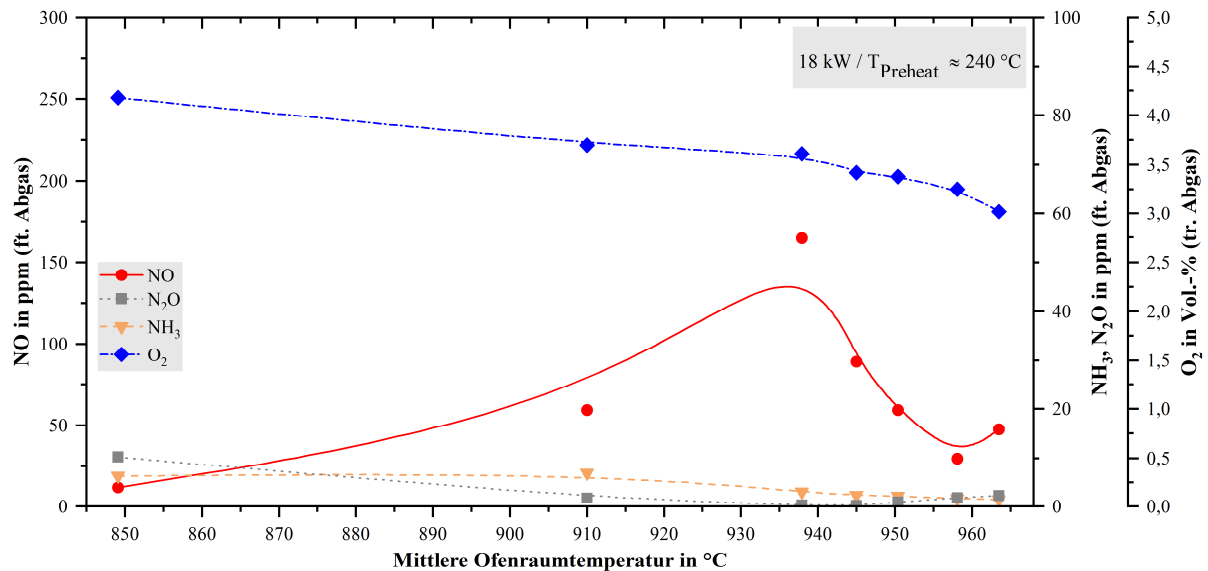


Abb. 6: Optimale Arbeitspunkte im Ammoniak-Betrieb bei 18 kW Brennerleistung und variabler Ofenraumtemperatur

Für nahezu alle Ofenraumtemperaturen konnte ein Betriebspunkt mit einer gemessenen NO-Konzentration unterhalb von 100 ppm, teilweise sogar unterhalb von 30 ppm, eingestellt werden, abgesehen vom Messpunkt bei 937 °C. Gleichzeitig sind die Konzentrationen an N₂O und NH₃ nahe null bzw. unterhalb von 10 ppm. Durch das partielle Cracken des NH₃ und die Anwesenheit von H₂ etabliert sich eine lange, stramme Flamme innerhalb des Ofens. Trotz stark gestufter Betriebszustände ($X_{L,sek} > 0,2$) treten durch die chemische Stabilisierung keine Flammeninstabilitäten auf, was durch die geringen Konzentrationen an N₂O und NH₃ bestätigt wird. Begünstigt werden die niedrigen NO-Konzentrationen, neben der starken Luftstufung, unter anderem auch durch das verhältnismäßig große Ofenraumvolumen und die hohen Temperaturen innerhalb des Ofens, da so ideale Bedingungen für den NO-Reduktionspfad des thermischen DeNO_x vorliegen. Ausschlaggebend ist hierbei, über die **Gleichungen 4 und 5** [4], die Reaktion von NO mit NH₂ zu N₂ oder NNH, welches bei der NH₃-Verbrennung überwiegend zu molekularem Stickstoff reagiert [7].



Nach Miller et al. [10] findet die Reduktion von NO über NH_2 vor allem im Temperaturfenster von 730 – 1.130 °C statt und wird durch leicht, überstöchiometrische Bedingungen sowie längere Verweilzeiten zusätzlich begünstigt. Durch die Anwesenheit von H_2 im Brenngas verschiebt sich zudem das Temperaturfenster für eine optimale NO-Reduktion zugunsten niedrigerer Temperaturen, was darauf zurückzuführen ist, dass die für die Umwandlung von NH_3 in NH_2 notwendigen reaktiven Spezies, wie OH, O und H, nicht erst über verzweigte Kettenreaktionen produziert werden müssen, sondern dass diese Konzentrationen bereits zu Beginn der Verbrennung drastisch erhöht sind [10]. Wie bereits beim Brennersystem im Labormaßstab stellte sich während des Brennerbetriebs ein thermisches Gleichgewicht innerhalb der Vorwärmzone ein, sodass keine Überhitzung des Bauteils festgestellt werden konnte. Der Technologietransfer vom Labor- in den industriellen Maßstab kann für den Brennerbetrieb ohne vorgewärmte Verbrennungsluft somit als erfolgreich bewertet werden.

6. Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Zur Stabilisierung von nicht-vorgemischten Ammoniak-Luft-Flammen wurde ein Brennerkonzept entwickelt, bei dem mit Hilfe des partiellen, nicht-katalytischen Crackens die Stabilität der NH_3 -Verbrennung signifikant erhöht wurde. Über eine integrierte Luftstufung konnten die NO_x -Emissionen zudem deutlich reduziert werden. Neben der experimentellen Untersuchung eines Laborbrenners und der Ermittlung der erreichten Cracking-Raten anhand von heterogenen, reaktionskinetischen Berechnungen konnte die Funktionsweise des entwickelten Brennerkonzeptes erfolgreich nachgewiesen werden. Durch den gelungenen Transfer der Technologie vom Labormaßstab in ein industrielles Brennersystem konnten im Rahmen von experimentellen Messkampagnen weitere Potenziale des partiellen Crackens und relevante NO-Reduktionsmechanismen im Kontext der NH_3 -Verbrennung identifiziert werden. Für verschiedene Ofenraumtemperaturen wurden experimentell optimale Arbeitspunkte des Brenners ermittelt, bei denen im reinen Ammoniakbetrieb NO_x -Emissionen erreicht wurden, die auf bzw. unterhalb des Niveaus konventioneller Erdgasbrenner liegen. Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich daher wie folgt zusammenfassen:

- Das partielle, nicht-katalytische Cracken ist eine geeignete Stabilisierungsmaßnahme zur Verbrennung von Ammoniak und erhöht die Reaktivität innerhalb der Reaktionszone bereits bei moderaten H_2 -Anteilen im Brenngas signifikant.
- Die NO-Reduktion über den thermischen DeNO_x -Mechanismus wird durch die partielle NH_3 -Spaltung positiv beeinflusst.

- Experimente zeigten je nach Betriebsbedingungen trotz des hohen NO-Bildungspotentials der NH₃-Verbrennung sehr geringe NO_x-Konzentrationen.

Durch das entwickelte Brennerkonzept ist dementsprechend eine stabile und NO_x-optimierte Verbrennung von Ammoniak nicht nur möglich, sondern bietet ein immenses Potenzial für die Anwendung von NH₃ als Brenngas in der Industrie. Mit einer nachgewiesenen NO_x-Konzentration von 61,5 mg/m³ bezogen auf 3 Vol.-% O₂ im trockenen Abgas unterschreitet das Brennersystem den aktuellen Grenzwert von 100 mg/m³, der gemäß TA-Luft [11] für Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas durch den Einsatz von gasförmigen Brennstoffen mit einer Feuerungsleistung von < 50 MW gilt, deutlich und stellt damit bereits heute eine innovative, schadstoffarme Dekarbonisierungsoption für die Bereitstellung von Prozesswärme dar.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten ZIM-Kooperationsprojekt mit der Kueppers Solutions GmbH (Förderkennzeichen: KK5554301MP3). Die Autoren möchten sich an dieser Stelle herzlich für die Unterstützung bedanken.

7. Literatur

- [1] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: *Wasserstoff: Bedarf und Beschaffungswege*, Bonn, Februar 2024.
- [2] Weltenergierat – Deutschland e.V.: *Ammoniak als Energieträger*, Berlin, Dezember 2023.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: *H2Global: Erst Wasserstoff-Importe kommen aus Ägypten*, Pressemitteilung, Juli 2024, URL: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2024/07/20240711-h2global.html (Stand: 01.06.2025).
- [4] Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somaratne, K.D., Okafor, E.: *Science and technology of ammonia combustion*, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 37, Issue 1, p. 109 – 133, 2018.
- [5] Shrestha, K.P.: *Detailed Kinetic Modeling of Ammonia Combustion*, Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2021.
- [6] Biebl, M., Leicher, J., Giese, A., Wieland, C.: *A comprehensive study of non-premixed combustion of ammonia and its blends: Flame stability and emission reduction*, Fuel, Vol. 386, 134501, April 2025.

- [7] Feller, B., Biebl, M., Giese, A., Wieland, C.: *Low-NO_x Ammonia Combustion: Chemical Reactor Network Simulations vs Experiments*, ECOS-Konferenz, Rhodos, 2024.
- [8] Joos, F.: *Technische Verbrennung. Verbrennungstechnik, Verbrennungsmodellierung, Emissionen*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006.
- [9] Feng, P., Lee, M., Wang, D., Suzuki, Y.: *Ammonia thermal decomposition on quartz and stainless steel walls*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, Issue 75, p. 29209 – 29219.
- [10] Miller, J., Branch, M. C., Kee, R. J.: *A Chemical Kinetic Model for the Selective Reduction of Nitric Oxide by Ammonia*, Combustion and Flame 43, p. 81 – 98, 1981.
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft)*, August 2021.