

# ELEKTRIFIZIERTE ABLUFTREINIGUNG IN SCHWEINEMASTBETRIEBEN – EIN SCHRITT ZU EINER SAUBEREN ZUKUNFT

## ELECTRIFIED EXHAUST AIR PURIFICATION IN PIG FARMS – A STEP TOWARDS A CLEAN FUTURE

---

Lisa Bertolini, Verena Schallhart & Lukas Möltner  
(MCI Internationale Hochschule GmbH)

---

### KEYWORDS

Ammoniak; Katalyse; Widerstandsheizung; Landwirtschaft; Nachhaltigkeit.

### KURZFASSUNG

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Reduktion von Ammoniak-Emissionen in Schweinemastbetrieben mithilfe von elektrisch beheizter, katalytischer Abluftreinigung untersucht und ausgelegt. Während der modulare Aufbau eine flexible Anpassung an die Stallgröße bietet, garantiert die gezielte Temperaturkontrolle eine präzise Steuerung der Reaktion.

### ABSTRACT

In this article a concept for reducing ammonia emissions in pig farming facilities using electrically heated catalytic air purification is being investigated and designed. The modular design allows flexible adaptation to different stall sizes, while precise temperature control ensures accurate reaction management.

### 1. EINLEITUNG

#### 1.1. Problemstellung

Die Landwirtschaft ist mit 94 % der Hauptemittent von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ). Dabei entstehen ein Viertel der Emissionen aus Mineraldünger- und Gülleausbringung sowie über 70 % aus der Tierhaltung – ein Fünftel davon direkt im Stall durch Schweinehaltung. Gelangt dieses Ammoniak in größeren Mengen in die Atmosphäre, kann es negative Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit der Tiere sowie Menschen der näheren Umgebung haben.  $\text{NH}_3$ -Emissionen beeinträchtigen nicht nur die Biodiversität, sondern haben auch nach ihrer teilweisen Umwandlung in sekundäre Partikel – ebenso wie primäre Partikel – direkte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.<sup>1</sup>

Aktuell sind nachträgliche Umrüstungen von Stallanlagen zur Emissionsminderung mit hohen Kosten verbunden. In

---

<sup>1</sup> Umweltbundesamt, Ammoniak, Geruch und Staub, umweltbundesamt.at vom 22.7.2021, abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/ammoniak-geruch-staub#emissionen-der-landwirtschaft> (Zugriff am 23.4.2024).

diesem Zusammenhang bietet die Implementierung von Abluftreinigungsanlagen auf bereits bestehende Belüftungssysteme eine vielversprechende und kostengünstigere Maßnahme zur Reduzierung von  $\text{NH}_3$ -Emissionen. Obwohl es Empfehlungen für den Einsatz von Abluftreinigungssystemen in Schweineställen gibt, existiert aktuell keine gesetzliche Vorschrift, die den Einsatz solcher Systeme vorschreibt.

Das Emissionsgesetz-Luft 2018 (EG-L 2018)<sup>2</sup> hat das Ziel, die atmosphärischen Emissionen von Luftschadstoffen – einschließlich  $\text{NH}_3$  – dauerhaft zum Schutz von Gesundheit und Umwelt zu reduzieren. Es sieht eine schrittweise Reduktion der  $\text{NH}_3$ -Emissionen vor. Um diese Reduktionsziele auch zu erreichen, ist es von entscheidender Bedeutung, eine effektive und nachhaltige Lösung zur Reduzierung der  $\text{NH}_3$ -Emissionen in Schweineställen zu finden.

## 1.2. Zielsetzung

In dieser Arbeit werden Lösungsansätze zur Reduktion von  $\text{NH}_3$ -Emissionen in der Landwirtschaft untersucht und entwickelt. Konkret wird die Möglichkeit der katalytischen Abluftreinigung in Schweineställen mithilfe elektrisch beheizbarer Katalysatoren erforscht. Außerdem wird eine ausführliche Berechnung zur Dimensionierung einer Abluftanlage für einen spezifizierten Schweinmastbetrieb durchgeführt. Die entwickelte Lösung soll den Anforderungen des EG-L 2018 gerecht werden und gleichzeitig zu einer nachhaltigen sowie umweltfreundlichen Landwirtschaft beitragen.

In Abbildung 1 wird das Konzept für einen zwangsbelüfteten Schweinemastbetrieb mit Unterdrucklüftung dargestellt. Der graue Container symbolisiert den modular aufgebauten Katalysator, dessen Länge variabel an die Tierplatzanzahl angepasst werden kann.

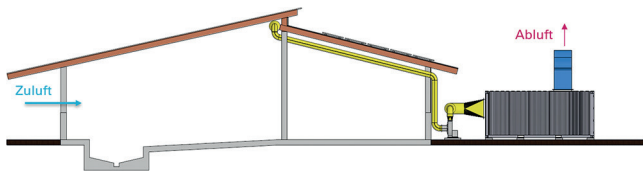


Abbildung 1: Zwangsbelüfteter Schweinmastbetrieb mit Unterdrucklüftung

## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1. Entstehung des Ammoniaks

Die mengenmäßig relevantesten Futterinhaltsstoffe sind Kohlenhydrate, Proteine und Fette. Während der Verdauung werden diese durch spezifische Verdauungsenzyme in niedermolekulare Bestandteile aufgespalten. Grundlage dieser exothermen Oxidation aller drei Hauptnährstoffe ist Kohlenstoff, der in Form von  $\text{CO}_2$  über die Atemluft wieder ausgeschieden wird. Im Fall der „Verbrennung“ von Proteinen fällt jedoch auch Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) an, der auf energetisch aufwendige Weise über Leber und Niere entsorgt werden muss.

Setzt sich das Futter im Verhältnis zum Bedarf des Tiers aus zu viel Protein zusammen, werden diese überschüssigen Proteine auf energetisch aufwendige Weise abgebaut und über Ammonium als Urin (Harnstoff) entsorgt. Mikroorganismen, die sich im Darm befinden, werden zum Teil mit dem Kot ausgeschieden. Diese sind in der Lage, Enzyme zu produzieren, die den  $\text{N}_2$  aus dem Harnstoff lösen und in Carbamid-

säure hydrolysieren. Diese zerfällt anschließend spontan zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{NH}_3$ , die als Gase entweichen (siehe Abbildung 2).<sup>3</sup>

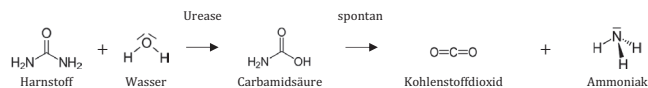


Abbildung 2: Harnstoffabbau durch das Enzym Urease

Auf diesem Weg gehen in Österreich gemäß den Berechnungen der Luftschadstoffinventur OLI jährlich etwa 66 kt  $\text{N}_2$  in Form von  $\text{NH}_3$  verloren, das zur Destabilisierung empfindlicher Ökosysteme beiträgt.<sup>4</sup>

### 2.2. Gesetzliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Grundvoraussetzung für die Minimierung von  $\text{N}_2$ -Überschüssen ist eine umweltgerechte und standortangepasste Landwirtschaft. Die Richtlinie 2001/81/EG (Emissionshöchstmengenrichtlinie; engl. „National Emission Ceilings“)<sup>5</sup> legt die nationalen Emissionshöchstmengen fest, die verbindlich einzuhalten sind. So verpflichtet sich Österreich zwischen 2020 und 2029 zu einer jährlichen Reduktion von einem Prozent gegenüber dem Referenzjahr 2005 und um zwölf Prozent ab dem Jahr 2030. Diese Höchstmengen wurden bis dato jedoch nicht eingehalten, und nach aktuellen Berechnungen besteht die Gefahr, dass die Reduktionsvorgaben ab dem Jahr 2030 verfehlt werden. Demnach bedarf es dringend zusätzlicher Maßnahmen, vor allem im Sektor Landwirtschaft. Neben förderpolitischen sind auch ordnungsrechtliche Instrumente erforderlich, die so konzipiert sind, dass sich die notwendigen Emissionsreduktionen mit möglichst geringen ökonomischen Belastungen für die betroffenen landwirtschaftlichen Betriebe erzielen lassen. Aus diesem Anlass wurde eine  $\text{NH}_3$ -Reduktionsverordnung<sup>6</sup> erlassen. In deren aktueller Fassung wird die Abluftreinigung jedoch noch nicht als Maßnahmenoption erwähnt.

In den BVT-Schlussfolgerungen werden die besten verfügbaren Techniken zur Emissionsminderung beschrieben. Kapitel 2.1. der BVT 30 widmet sich ausschließlich den  $\text{NH}_3$ -Emissionen aus Schweinemastbetrieben und sieht eine Kombination aus unterschiedlichen Techniken vor – unter anderem den Einsatz von Abluftreinigungssystemen. In puncto Anwendbarkeit wird jedoch darauf verwiesen, dass jener Einsatz aufgrund der hohen Umsetzungskosten möglicherweise nicht allgemein anwendbar ist.<sup>7</sup>

3 Schauer Perfect Farming Systems, Weniger Emissionen – mehr Stickstoff auf dem Feld (Bericht 2022) abrufbar unter <https://schauer-agrotronic.com/fileadmin/emissionsminderung-schweinestall-de-0722.pdf> (Zugriff am 23.4.2024).

4 Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Ratgeber für die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft zur Begrenzung von Ammoniakemissionen (2018).

5 Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23.10.2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe, ABl. L 309 vom 27.11.2001, S. 22.

6 Verordnung der Bundesministerin für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie über Maßnahmen im Bereich der Luftreinhaltung zur Erreichung der nationalen Emissionsreduktionsverpflichtungen für Ammoniak (Ammoniakreduktionsverordnung), BGBl. II 2022/395.

7 Durchführungsbeschluss (EU) 2017/302 der Kommission vom 15.2.2017 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Intensivhaltung oder -aufzucht von Geflügel oder Schweinen, ABl. L 231 vom 21.12.2017, S. 43.

2 Bundesgesetz über nationale Emissionsreduktionsverpflichtungen für bestimmte Luftschadstoffe, BGBl. I 2018/75.

### 2.3. Katalysatoren zur stationären Abgasnachbehandlung

Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung bestehen aus einem meist monolithischen keramischen Trägermaterial, einer porösen Oberflächenbeschichtung und einer katalytisch aktiven Komponente, die auf die poröse Oberfläche aufgetragen oder in diese integriert wird. Die bei endothermen Reaktionen notwendige Prozesswärme wird dabei zumeist mittels fossiler Energieträger wie z.B. Erdgas oder Heizöl erzeugt, was zu einem nichtgeschlossenen CO<sub>2</sub>-Kreislauf führt.

Durch die Verwendung eines elektrisch leitfähigen, semi-keramischen Trägermaterials können die Vorzüge der Keramik, wie z.B. höhere Wärmekapazität oder geringere Produktionskosten, gegenüber metallischen Trägern ausgenutzt werden. Der Anteil an leitfähigen metallischen Komponenten in isolierendem Material muss bei den hergestellten Kompositen über einem kritischen Grenzwert liegen, um ein durchgängiges Netzwerk auszubilden und somit die elektrische Leitfähigkeit sicherzustellen.<sup>8</sup> Um einen effektiveren Einfluss auf die Leitfähigkeit der Verbundwerkstoffe zu erzielen, werden Multi-Komponenten-Mischungen hergestellt.<sup>9</sup>

Wird der leitfähige Katalysator schließlich am elektrischen Strom angeschlossen, wird er Teil des Stromkreises und erwärmt sich gleichmäßig mittels Ohm'scher Widerstandserwärmung. Die durch die Widerstandserwärmung erzeugte Wärmemenge, die vom Katalysator auf die Luft übergegangen ist, kann im Nachhinein mittels eines nachgeschalteten Wärmetauschers rückgewonnen werden. Außerdem kann der benötigte Strom mittels erneuerbarer Quellen, etwa Photovoltaikanlagen, gewonnen werden.

## 3. METHODIK

Ziel dieser Forschungsaktivität ist die Untersuchung des Potenzials von elektrisch beheizten katalytischen Reaktoren zur Reduktion von NH<sub>3</sub>-Emissionen in der Landwirtschaft mithilfe numerischer Simulation. Das entwickelte Berechnungsmodell bietet die Möglichkeit, die Abgasreinigungsanlage in Abhängigkeit des katalytisch aktiven Materials und der Tierplatzanzahl zu beschreiben sowie zu bewerten. Dadurch kann spezifisch für die unterschiedlichen Bedarfsanforderungen die Dimensionierung der Anlage erfolgen. Beispielhaft wird in dieser Arbeit die Auslegung für einen Schweinemastbetrieb mit 1.000 Tierplätzen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wird eine Kinetikbestimmung für unterschiedliche katalytisch aktive Materialien durchgeführt. Der nächste Schritt beinhaltet die Erstellung des numerischen Berechnungsmodells. Für die benötigten Eingangsparameter, wie z.B. der Abgaszusammensetzung und dem Volumenstrom, werden unterschiedliche Rahmenbedingungen nach Stallklimanorm angenommen, die die Realität nicht in ihrer ganzen Komplexität abbilden, jedoch der Berechnung zur Schätzung der Größe eines notwendigen Katalysators und damit zur Kostenschätzung sowie dem Vergleich zu herkömmlichen Abluftreinigungsmethoden dienen. Abschließend erfolgt die Dimensionierung der Abgasreinigungsanlagen in Abhängig-

keit von den Tierplätzen. Der forschungslogische Ablauf wird schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

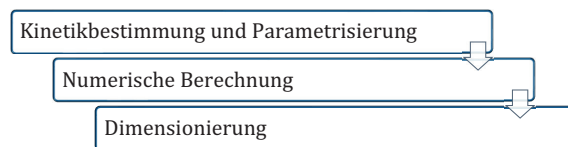


Abbildung 3: Schematische Vorgehensweise

### 3.1. Kinetikbestimmung und Parametrisierung

Die NH<sub>3</sub>-Spaltung zu den unschädlichen Gasen Distickstoff N<sub>2</sub> und Wasser H<sub>2</sub>O ist eine Reaktion, die bei Raumtemperatur nur sehr langsam verläuft und eine hohe Aktivierungsenergie besitzt. Ohne Katalysator müsste die Zersetzung bei sehr hohen Temperaturen durchgeführt werden, was energetisch ungünstig und technisch schwierig umzusetzen ist. Durch den Einsatz von Katalysatoren werden die Reaktionsbedingungen verbessert und somit die Ausbeute sowie Energieeffizienz erhöht.

Die NH<sub>3</sub>-Zersetzung ist eine Zerfallsreaktion erster Ordnung, bei der die Reaktionsgeschwindigkeit proportional der Konzentration des reagierenden Stoffes ist. Über die Reaktionskinetik bzw. -geschwindigkeitsgleichung kann die NH<sub>3</sub>-Konzentration zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden. Die Temperaturabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich durch den Arrhenius-Ansatz beschreiben, der die beiden kinetischen Parameter Stoßfaktor und Aktivierungsenergie beinhaltet.

Da die katalytische Abgasreinigung von Schweinemastbetrieben eine bisher unerforschte Thematik ist, wurden die kinetischen Parameter aus NH<sub>3</sub>-Umsetzungskurven aus Studien über die NH<sub>3</sub>-Zersetzung zur Gewinnung von sauberem Wasserstoff bzw. zur selektiven katalytischen Abgasreinigung in Fahrzeugkatalysatoren extrapoliert.

### 3.2. Numerische Berechnung

Das Ziel der Modellierung ist die Berechnung des NH<sub>3</sub>-Umsatzes als Funktion der Reaktorlänge in Abhängigkeit von der Temperatur und des Katalysators, dies unter Berücksichtigung der Auswirkung sich ändernder Betriebszustände. Die Lösung der einzelnen Differentialgleichungen erfolgt numerisch nach *Euler*.

Der semi-keramische, elektrisch beheizbare Katalysatorträger besitzt eine kubische Form mit einer Zelldichte von 400 CPSI bzw. 620.000 Zellen pro m<sup>2</sup> und variiert in der Länge. Der Wabenkörper selbst wird als ideales Strömungsrohr bzw. Rohrbündel betrachtet, in dem sich die Reaktionsmasse ohne axiale Rückvermischung laminar durch den Wabenkörper bewegt.

In dieser Arbeit wird der konvektive Wärmetransport bzw. -übergang zwischen dem strömenden Fluid (Abluft) und seiner Strömungsberandung (Katalysatorwand) für die Berechnung herangezogen. Da die Strömung durch Ventilatoren erzeugt wird, spricht man von einer erzwungenen Konvektion. Das System wird als perfekt isoliert angenommen, Wärmeverluste an die Umgebung werden vernachlässigt. Des Weiteren wird die benötigte Wärmemenge aufgrund der stattfindenden endothermen Reaktion berücksichtigt. Die Wärmebilanz für dieses System setzt sich somit aus dem konvektiven Wärmeübergang zwischen Abgas und elektrisch beheiztem Katalysator (Wärmeaustauschterm) sowie der benötigten Wärmemenge für die Reaktion (Quell- und Senkterm) zusammen.

<sup>8</sup> Schallhart, Entwicklung semi-keramischer Katalysatorträger für elektrisch beheizbare Reaktoren (2018).

<sup>9</sup> Schallhart et al., Development of Ceramic Composites for Electrically Heated Catalytic Converters, Jahrestreffen Reaktionstechnik von 27. bis 29. Mai 2019, 300.

Der Wärmeaustauschterm beinhaltet den Wärmeübergangskoeffizienten, die innere Austauschfläche des Wärmetauschers und die Temperaturdifferenz zwischen dem Reaktorinhalt und der Katalysatorwand. Der Quell- und Senkterm beinhaltet die Geschwindigkeit der Reaktion und die Menge an Wärme, die pro Mol des entstehenden Produkt frei oder verbraucht wird. Durch das Zusammenführen der einzelnen Komponenten der Wärmebilanz kann in jedem Abschnitt des Katalysators die Temperatur des Rohgases ermittelt werden.

Zusammen mit der zeitlichen Temperaturänderung und der Komponentenbilanz des Edukts ergibt sich ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem, wodurch die Konzentration berechnet werden kann.

### 3.3. Reaktorauslegung und Dimensionierung

	Empfehlung	Richtwerte
Temperatur in K (°C)	292,15 bis 301,15 (19 bis 28)	287,15 bis 299,15 (14 bis 26)
Luftfeuchtigkeit in %	75	60 bis 80
Luftgeschwindigkeit: Tierbereich in $m s^{-1}$ Zuluftbereich in $s^{-1}$	0,2 2,5 bis 3	0,2 2,5 bis 3
Luftqualität: CO <sub>2</sub> in ppm NH <sub>3</sub> in ppm H <sub>2</sub> S in ppm	2.500 15 0	< 3.000 < 20 < 5
Luftraten in $m^3 (h TP)^{-1}$	Max. 80 bis 110 (Sommer) Min. 7 (Winter)	Max. 119 (Sommer) Min. 15,6 (Winter)

**Tabelle 1:** Stallklimaansprüche eines Mastschweins (25kg bis 120 kg); Landwirtschaftskammer Niedersachsen/Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Optimierung des Stallklimas in der Mastschweinehaltung Optimierung des Stallklimas in der Mastschweinehaltung (2016)

Zur Berechnung der Auslegung des Reaktors werden verschiedene Annahmen zur Vereinfachung angenommen und Rahmenbedingungen festgelegt. In den folgenden Absätzen werden diese kurz beschrieben und begründet.

In Tabelle 1 werden die allgemeinen Stallansprüche für ein Mastschwein in der Gewichtsklasse 20 bis 120 kg tabellarisch dargestellt. Die Empfehlungen ergeben sich aus Praxiserfahrungen, die Richtwerte stammen aus der Stallklimanorm DIN 18910 sowie aus der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung.<sup>10</sup>

Die Eingangstemperatur  $T_{10}$  der Abluft in den Katalysator richtet sich ebenfalls nach den Richtlinien der Stallklimanorm. So wird eine gemittelte Stalltemperatur von 293,15 K (20°C) als Anfangstemperatur zum Zeitpunkt  $t = 0$  zur Berechnung herangezogen.

Die gemittelten Richtwerte der maximalen Sommer- und minimalen Winterluftrate ergeben einen Volumenstrom von  $dV dt^{-1} = V = 67,3 m^3 (TP h)^{-1} \hat{=} 1,87 \cdot 10^{-2} m^3 (TP s)^{-1}$ . Die Industrieemissionsrichtlinie<sup>11</sup> regelt ausschließlich große Anlagen ab einer Tierplatzanzahl von mehr als 2.000 Plätzen. Da

<sup>10</sup> Landwirtschaftskammer Niedersachsen/Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Optimierung des Stallklimas in der Mastschweinehaltung Optimierung des Stallklimas in der Mastschweinehaltung (2016).

<sup>11</sup> Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24.11.2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), ABl. L 334 vom 17.12.2010, S. 17.

Betriebsstrukturen in Österreich jedoch in der Regel kleiner sind, wird von einer Stallgröße von  $n_{TP} = 1.000$  Mastschweinen ausgegangen und mit dieser konsequent in der gesamten Arbeit gerechnet. So ergibt sich bei genannter Tierplatzanzahl ein Gesamtvolumenstrom von  $V = 18,69 m^3 s^{-1}$ .

Damit die Startkonzentration an NH<sub>3</sub> berechnet werden kann, wird der Emissionsfaktor von  $EF_{NH_3} = 3,64 kg (TP a)^{-1} \hat{=} 1,15 \cdot 10^{-7} kg (TP s)^{-1}$  herangezogen.<sup>12</sup> Auch der Druck wird konstant als Atmosphärendruck  $p = 1 bar \hat{=} 101.325$  angenommen. Außerdem wird das eintretende Gas als ein ideales Gas mit den Eigenschaften trockener Luft ( $R_{sp} = 287,058 J (kg K)^{-1}$ ) betrachtet. Die Temperaturabhängigkeit der Abluft wird in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Luft}$ , der Wärmekapazität  $c_{p,Luft}$ , der dynamischen Viskosität  $\eta_{Luft}$  und der Dichte  $\rho_{Luft}$  berücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Reaktion bzw. Spaltung von Ammoniak wird angenommen, dass der Katalysator und die Bedingungen innerhalb des Katalysators so ausgelegt sind, dass sie den Zerfall zu N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> begünstigen und sich kein gasförmiges Wasser oder Stickoxide bilden.

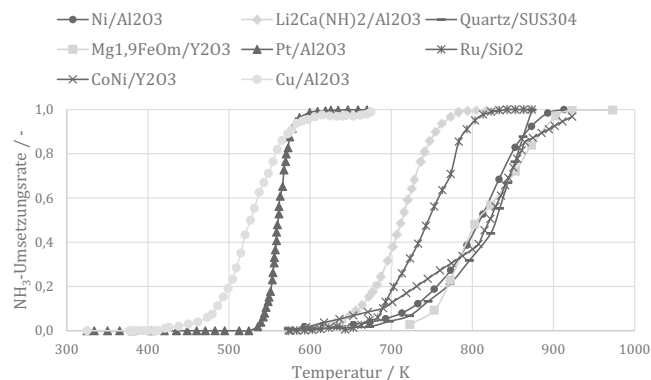
## 4. Diskussion und Ergebnisse

Im Folgenden wird die Auslegung des elektrisch beheizbaren Katalysators zur Reduktion von NH<sub>3</sub>-Emissionen für einen Schweinemastbetrieb mit 1.000 Tierplätzen dargestellt.

### 4.1. Kinetikbestimmung und Parametrisierung

In Abbildung 4 werden die NH<sub>3</sub>-Umsetzungskurven der insgesamt acht untersuchten Katalysatoren dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl Platin- als auch Kupfer-Katalysatoren bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen eine hohe Aktivität aufweisen. Eine niedrigere Temperatur bringt sowohl aus energetischer als auch aus reaktionskinetischer Sicht erhebliche Vorteile mit sich.

Zu beachten ist jedoch, dass sich bei unterschiedlichen Temperaturen auch die Selektivität der Reaktion verändert. So ist Platin zwar hochselektiv bei der NH<sub>3</sub>-Umwandlung, jedoch nur schlecht selektiv für die N<sub>2</sub>-Ausbeute. Bei hohen Temperaturen werden demnach vermehrt unerwünschte Stickoxide emittiert, die in höheren Konzentrationen giftig sein können.



**Abbildung 4:** Ammoniak-Umsetzungskurven der untersuchten Katalysatoren

<sup>12</sup> Gao et al., Advances in selective catalytic oxidation of ammonia (NH<sub>3</sub>-SCO) to dinitrogen in excess oxygen: A review on typical catalysts, catalytic performances and reaction mechanisms, Journal of Environmental Chemical Engineering 2021, 104575.

Anhand der Umsetzungskurven können für die verschiedenen Katalysatoren Arrhenius-Diagramme (Abbildung 5) erstellt werden, aus denen schließlich die kinetischen Parameter Stoßfaktor und Aktivierungsenergie ermittelt werden.

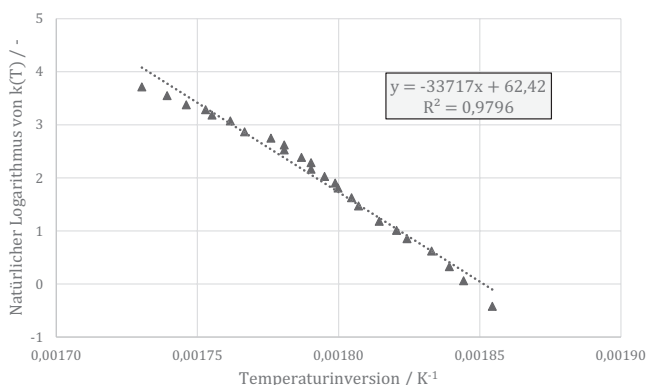


Abbildung 5: Arrhenius-Diagramm an einem Pt-Katalysator

## 4.2. Dimensionierung

Die ermittelten kinetischen Parameter der acht Katalysatoren werden im Folgeschritt in drei konkreten Beispielen verwendet, um die Dimensionierung eines Katalysators für eine Schweinemastanlage mit 1.000 Tierplätzen durchzuführen.

Im ersten Beispiel werden konstante Werte für die Umsatzrate sowie die Temperatur festgelegt und die daraus resultierenden notwendigen Katalysatorlängen dreier verschiedener Katalysatoren (Platin, Ruthenium, Kupfer) analysiert und diskutiert. Aus der Berechnung geht hervor, dass Effizienz und Aktivität erheblich variieren. Die Ergebnisse werden in Tabelle 2 dargestellt. Der Ruthenium-Katalysator erreicht bei einer Temperatur von 633,15 K (360°C) einen Umsatz von 98 % erst bei einer unendlich langen Kanallänge und ist demnach praktisch unmöglich. Die beiden anderen Katalysatoren würden bei gegebener Temperatur nur sehr kurz ausfallen. Da Platin und Kupfer jedoch bereits bei niedrigeren Temperaturen hohe Umsatzraten erreichen, wäre es ratsam, den Energieverbrauch des elektrisch beheizten Katalysators mit den potenziellen Vorteilen hinsichtlich Umsatz und Selektivität abzuwägen.

Im zweiten Beispiel werden die Katalysatorlängen vorgegeben und ein konstanter Wert als Umsatzrate definiert, woraus sich unterschiedlich benötigte Betriebstemperaturen der drei Katalysatoren ergeben (siehe Abbildung 6). Platin besitzt einen sehr hohen Stoßfaktor und demnach eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Reaktion stattfindet. Den-

noch ist auch die Aktivierungsenergie hoch, was bedeutet, dass ein erheblicher Energieaufwand notwendig ist, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Im Gegensatz dazu besitzt Kupfer eine sehr niedrige Aktivierungsenergie und einen geringeren Stoßfaktor. Beide Katalysatoren halten sich demnach mit einer notwendigen Betriebstemperatur von ca. 550 K (277°C) die Waage. Am schlechtesten schneidet auch hier der Ruthenium-Katalysator ab. Dieser besitzt sowohl einen höheren Stoßfaktor als auch eine höhere Aktivierungsenergie als der Kupfer-Katalysator. Bei einer Länge von 2,25 m würde ein Ruthenium-Katalysator demnach eine Betriebstemperatur von 747,55 K (474,4°C) benötigen, um in einem Schweinestall mit 1.000 Tierplätzen 98 % den gesamten  $\text{NH}_3$  abzuscheiden.

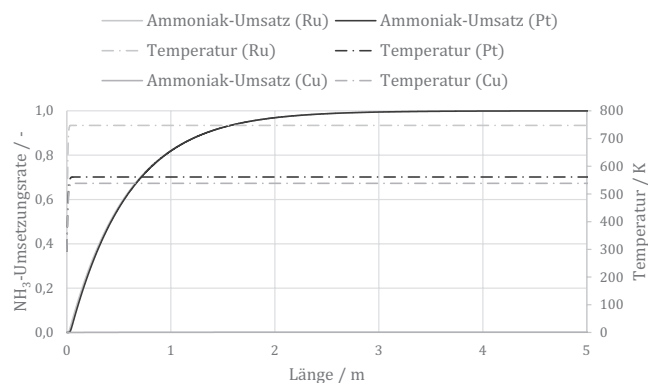


Abbildung 6: Beispiel 2 ( $X = 98\%$ ,  $T_W = \text{variabel}$ ,  $h = 2,25\text{ m}$ )

Das dritte Beispiel wird anhand eines Platin-Katalysators illustriert. Dabei wird ein Diagramm erstellt, in dem die Umsatzrate über die Länge bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen aufgetragen wird. In Abbildung 7 werden die Umsetzungskurven bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Die Temperaturen sind dabei so gewählt, dass optisch ein Unterschied erkennbar ist. Das X-Zeichen kennzeichnet die Länge, bei der ein Umsatz von 98 % erreicht wird.

Es zeigt sich, welchen signifikanten Einfluss die Betriebstemperatur auf die Reaktion und den Reaktor ausübt. So würde ein Katalysator mit einer Temperatur von 563,15 K (290°C) für die vorgegebene Stallgröße eine Länge von etwa zwei Metern erfordern. Wie bereits erwähnt besitzt der Platin-Katalysator keine hohe Selektivität für die gewünschte  $\text{N}_2$ -Bildung. Beim hier dargestellten Temperaturbereich (538,15 – 583,15 K bzw. 265 – 310°C) sinkt die Selektivität sogar unter 50 %, während vermehrt unerwünschte Stickoxide, unter anderem Lachgas, freigesetzt werden.

Bezeichnung	Einheit	Ruthenium	Platin	Kupfer
$E_A$	$\text{J mol}^{-1}$	138.561,12	280.323,14	59.910
$k_0$	$\text{s}^{-1}$	$4,96 \cdot 10^{10}$	$1,28 \cdot 10^{27}$	$6,71 \cdot 10^6$
$T_W = T_E$	K	633,15	633,15	633,15
$c_{p,\text{Luft}}$	$\text{J (kg K)}^{-1}$	1.032,45	1.032,45	1.032,45
$\alpha$	$\text{W (m}^2 \text{K)}^{-1}$	145,00	151,30	151,30
$n_{\text{mono}}$	–	200	200	200
$X_{\text{NH}_3}$	%	98	98	98
$h$	m	$\infty$	0,03	0,32

Tabelle 2: Beispiel 1 ( $X = 98\%$ ,  $T_W = 633,15\text{ K (360}^\circ\text{C)}$ ,  $h = \text{variabel}$ )

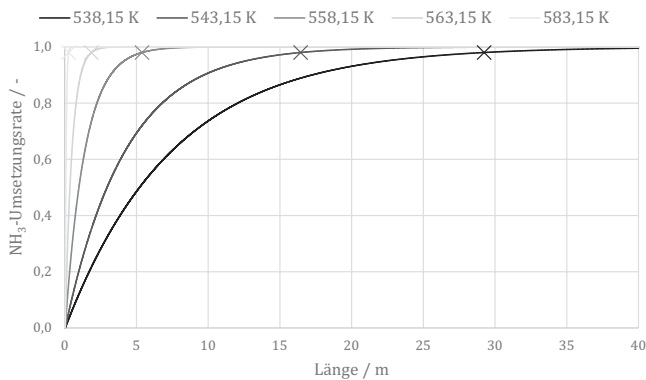


Abbildung 7: Temperatur-Diagramm am Beispiel des Platin-Katalysators

Die Suche nach dem perfekten Katalysator für die  $\text{NH}_3$ -Dissoziation ist somit keine einfache Aufgabe. Es müssen verschiedene Faktoren, z.B. die Betriebstemperatur mit dem damit verbundenen Energiebedarf, die Reaktionskinetik und die Selektivität des Katalysators, in Einklang gebracht werden. In einem nächsten Schritt könnte zudem eine wirtschaftliche Analyse hinsichtlich des Katalysatormaterials durchgeführt werden, um die beste Wahl zu treffen und ein hochwertiges Produkt erfolgreich auf dem Markt zu etablieren.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die Verwendung von katalytischen Abluftreinigungsanlagen mittels elektrisch beheizbarer Katalysatoren eine signifikante Reduktion der  $\text{NH}_3$ -Emissionen aus Schweinemastanlagen ermöglicht. Die untersuchten Katalysatoren weisen eine hohe Aktivität bei der Umwandlung von  $\text{NH}_3$  zu unschädlichen Verbindungen wie  $\text{N}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  auf. Die  $\text{NH}_3$ -Umwandlungsrate kann über die Temperatur und Größe des Katalysators für unterschiedliche Größen an Ställen gelenkt werden.

Die Regierung und andere relevante Institutionen sollten Anreize und Förderprogramme einführen, um landwirtschaftliche Betriebe bei der Installation und dem Betrieb von Filteranlagen zu unterstützen. Finanzielle Anreize, Zuschüsse oder steuerliche Vorteile könnten die Rentabilität und Attraktivität der Investition in diese Technologie erhöhen. So könnten landwirtschaftliche Betriebe  $\text{NH}_3$ -Emissio-

nen effektiv reduzieren und einen Beitrag zur Minimierung der Umwelteinwirkungen leisten. Der Einsatz von elektrisch beheizten  $\text{NH}_3$ -Katalysatoren würde gleichzeitig dazu beitragen, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern und eine nachhaltigere Landwirtschaft zu fördern.

Industrielländer müssen bis Mitte des Jahrhunderts weitgehend auf den Einsatz fossiler Energieträger verzichten, um der Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter  $2^\circ\text{C}$  gemäß Pariser Übereinkommen zu erreichen. Vor dem Hintergrund dieser Herausforderungen ist es von entscheidender Bedeutung, dass Maßnahmen ergriffen werden, um die Treibhausgasemissionen in allen Sektoren zu reduzieren – einschließlich der Landwirtschaft. Dies erfordert eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien, Energieeffizienzmaßnahmen, die Förderung nachhaltiger landwirtschaftlicher Praktiken und den Einsatz innovativer Technologien zur Emissionsminderung. Nur durch eine koordinierte und ambitionierte Vorgehensweise auf nationaler und internationaler Ebene können die Herausforderungen des Klimawandels erfolgreich bewältigt und eine nachhaltige Zukunft für kommende Generationen sichergestellt werden.

## AUTOR:INNEN

**Lisa Bertolini**, BSc

MCI Internationale Hochschule GmbH  
 Universitätsstraße 15  
 6020 Innsbruck  
 l.bertolini@mci4me.at

**Verena Schallhart**, MSc

MCI Internationale Hochschule GmbH  
 Universitätsstraße 15  
 6020 Innsbruck  
 verena.schallhart@mci.edu

Prof. Dr. **Lukas Möltner**

MCI Internationale Hochschule GmbH  
 Universitätsstraße 15  
 6020 Innsbruck  
 lukas.moeltner@mci.edu