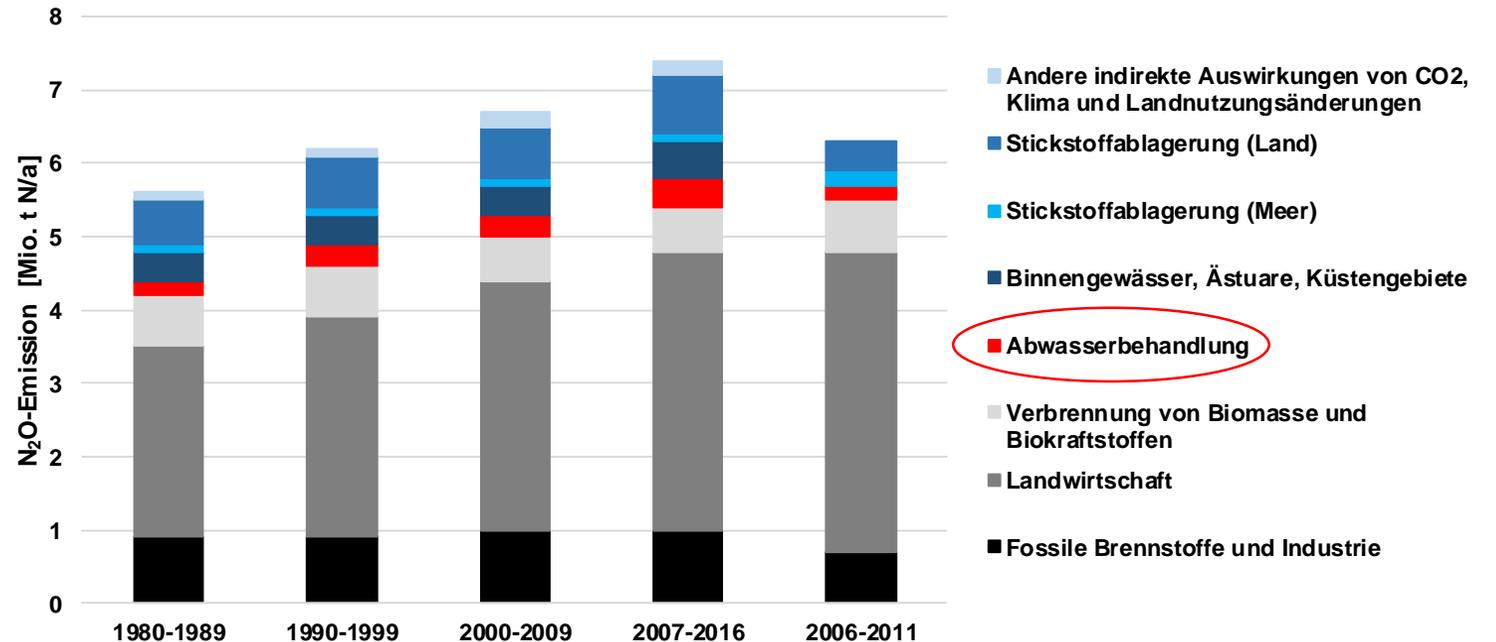
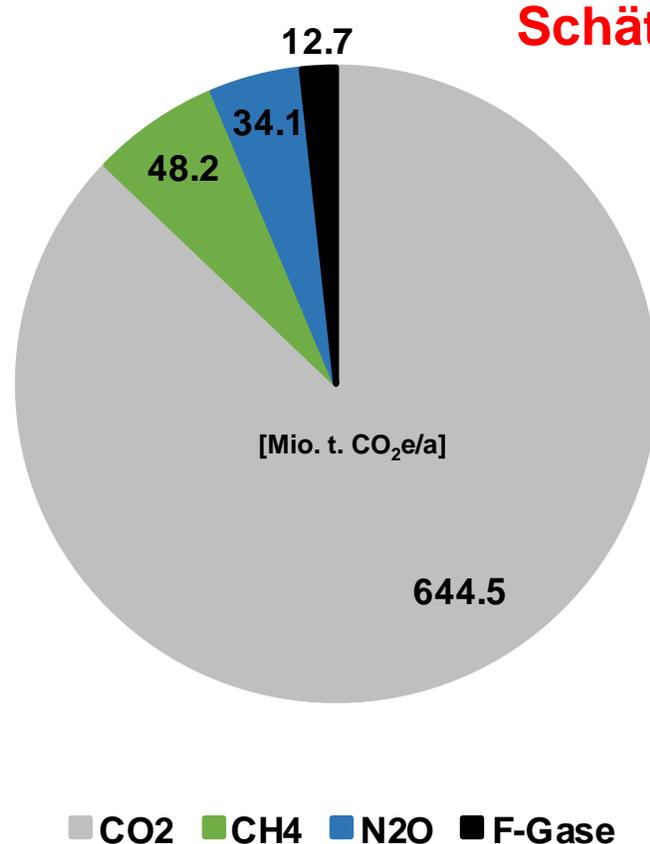


# Minimierung von N<sub>2</sub>O-Emissionen durch angepasste Betriebsstrategien

*Arne Freyschmidt, M.Sc.  
Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik  
der Leibniz Universität Hannover*

# Globale Relevanz von N<sub>2</sub>O-Emissionen

- N<sub>2</sub>O: relevantes Treibhausgas aufgrund hohem Treibhauspotential (265 g CO<sub>2</sub>e/g N<sub>2</sub>O)
- Abwassersektor ist eine N<sub>2</sub>O-Quelle
- N<sub>2</sub>O kann einen wesentlichen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>e-Fußabdruck einer Kläranlage ausüben



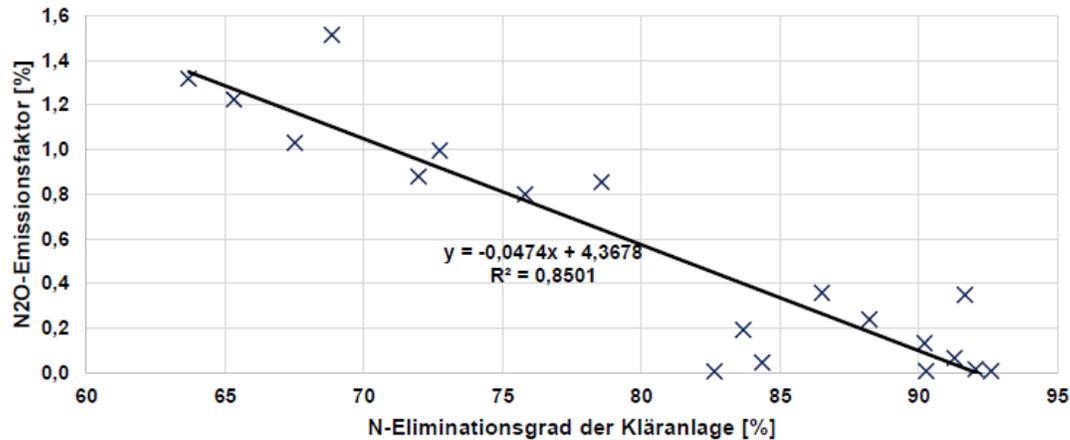
Quelle: IPCC, AR 6, 2022

Quelle: UBA

# Großtechnische Messungen

Hauptstrom-Anlage (ohne Industrie)	N <sub>2</sub> O-N in der Wasserphase [mg/L]
Intermittierende Nitri/Deni	0,03 – 0,07
Vorgeschaltete Deni	0,034 – 0,054
Nitrifikation	0,08 – 0,017
Entgasungszone nach Kaskaden-Deni/Nitri	0,177 – 0,22

Quelle: Quelle: ISAH – Wicht und Beier, 1994



Quelle: Valkova et al., 2021

Anlage im Regelbetrieb: N<sub>2</sub>O-Emissionen < 1%

Anlage	Verfahren	N-Umsatzrate [mg N/g oTS/h]	N <sub>2</sub> O-Bildungsfaktor [% v. N <sub>um</sub> ]
A	Zweistufige Deammonifikation	17,3	6,8 %
B	Einstufige Deammonifikation (SBR)	6,7 – 9,9	8 – 12 %
C	Nitritation/ Denitritation (Ausschwemmreaktor)	10,5	6 %

Quelle: ISAH –  
Abschlussbericht ReNeMo

Aber: hohe N<sub>2</sub>O-Emissionen  
sind möglich!

Kläranlage Nr.	Industriebereich, Herkunft des behandelten Abwassers	Bemerkung zur Verfahrenstechnik bzgl. Stickstoffelimination	N <sub>2</sub> O-N- Emissionsfaktor (%), bezogen auf N-Fracht im Zulauf der Kläranlage
26	Deponiesickerwasser aus 2 Hausmülldeponien	Nitrifikation und Denitrifikation	0,00
27	Deponiesickerwasser	Nitrifikation	14,63
28	Brüdenkondensat aus der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte	Nitrifikation und Denitrifikation	60,67
29	Verarbeitungsbetrieb tierischer Nebenprodukte	Nitrifikation und Denitrifikation	36,71
30	Brüdenkondensat und Blutabwasser aus Verarbeitung tierischer Nebenprodukte	Nitrifikation und Denitrifikation	8,66
31	Verarbeitungsbetrieb tierischer Nebenprodukte	Indirekteinleiter, daher keine vollständige Nitrifikation und Denitrifikation gefordert, Messung erfolgte während mehrwöchiger Betriebsstörung	91,72
32	Fettschmelze	Nitrifikation und Denitrifikation	0,00
33	Kommunale Kläranlage mit Abwasser aus Kartoffelstärkefabrik (Kampagnebetrieb)	Nitrifikation und Denitrifikation	7,23
34	Weizenstärkefabrik	Keine gezielte Nitrifikation und Denitrifikation, da Indirekteinleiter	12,36

Quelle: Quelle: ISAH – Wicht und Beier, 1994

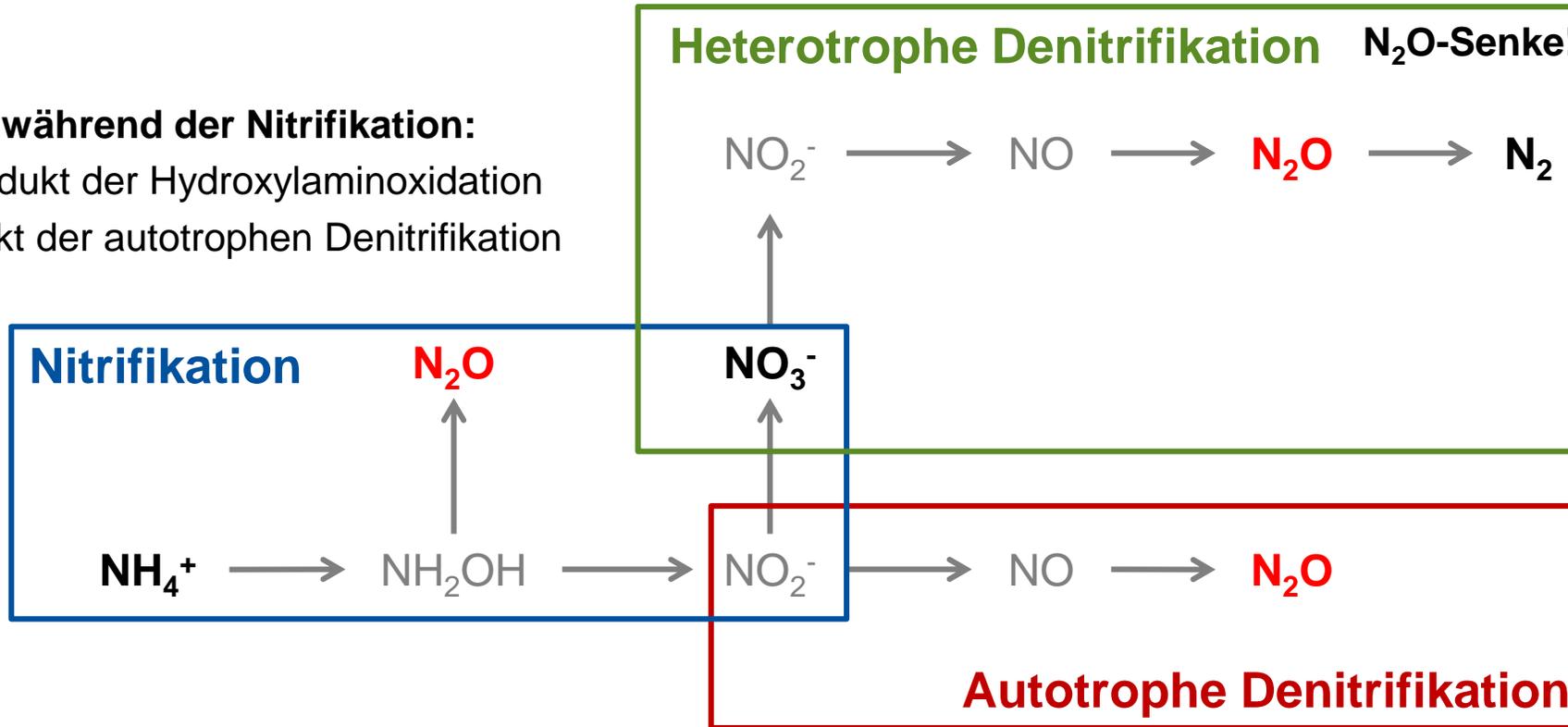


# N<sub>2</sub>O: Bildungs- und Abbaupfade

N<sub>2</sub>O-Bildung und -Abbau während der Denitrifikation:

N<sub>2</sub>O-Bildung während der Nitrifikation:

- Nebenprodukt der Hydroxylaminoxidation
- Endprodukt der autotrophen Denitrifikation



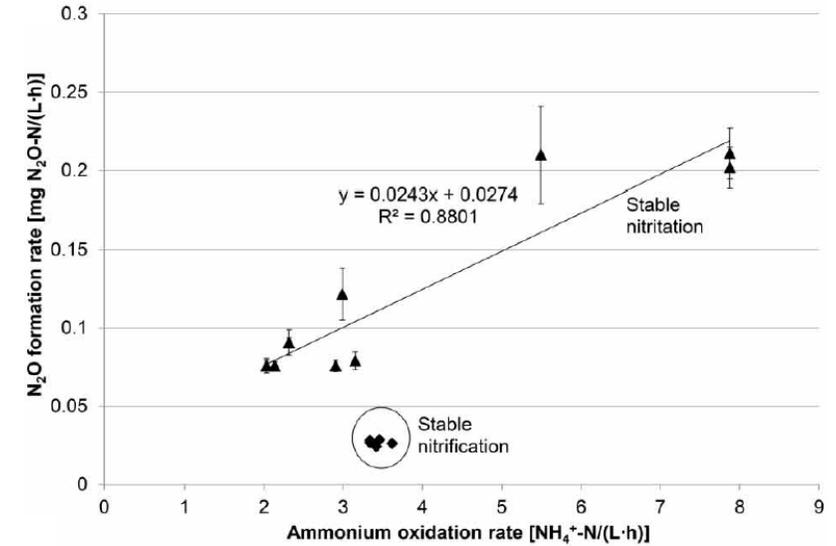
© ISAH

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>: Ammonium    NH<sub>2</sub>OH: Hydroxylamin    NO<sub>2</sub><sup>-</sup>: Nitrit    NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Nitrat    NO: Stickstoffmonoxid    N<sub>2</sub>O: Distickstoffoxid    N<sub>2</sub>: elementarer Stickstoff

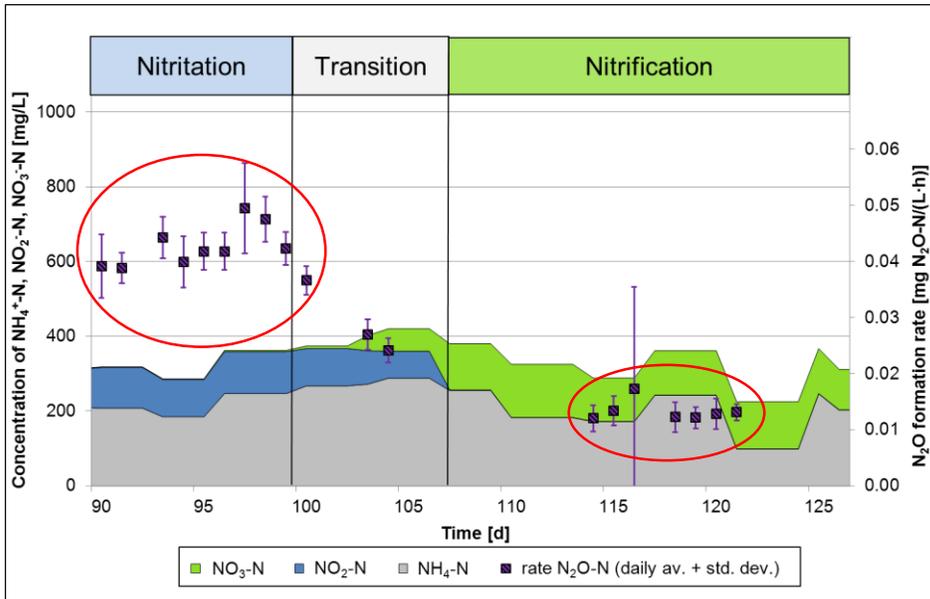
# Einflussfaktoren Nitrifikation

## höhere N<sub>2</sub>O-Bildung bei:

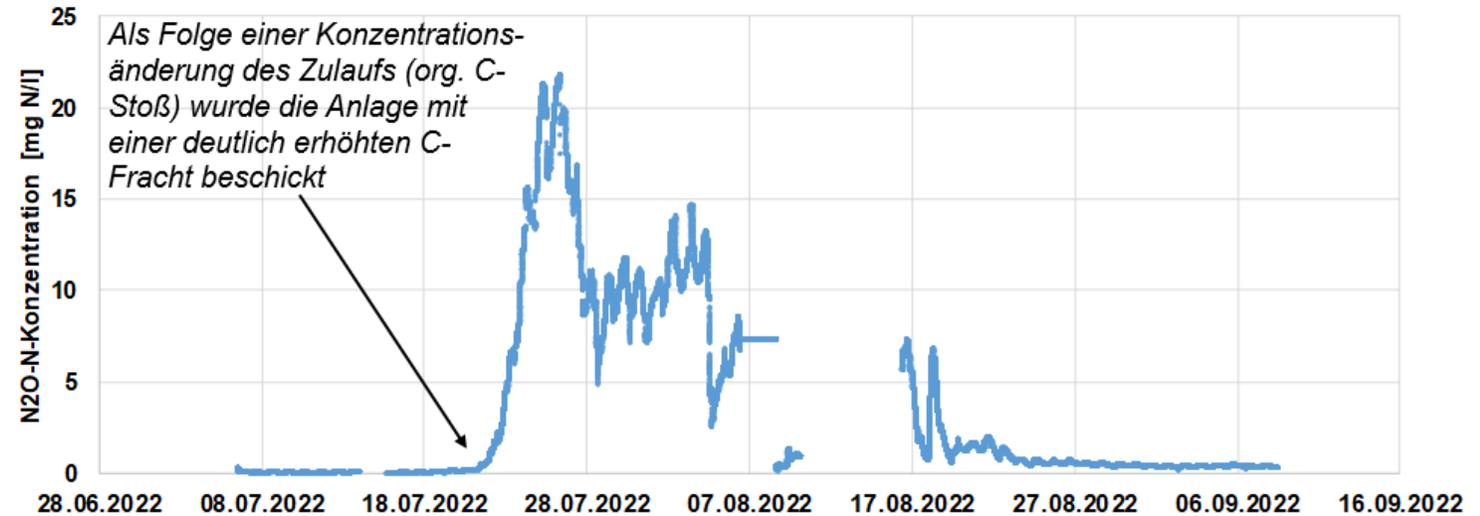
- höherer AOB-Aktivität → hoher Ammoniumumsatz
- schwankender/ stoßartiger Beschickung, instabile Betriebsbedingungen
- geringen O<sub>2</sub>-Konzentrationen (< 0,5 mg/l), wenn O<sub>2</sub> prozesslimitierend
- hohen Nitritkonzentrationen



Quelle: ISAH – Schneider et al., 2013



Quelle: ISAH – Schneider et al., 2013



Quelle: ISAH

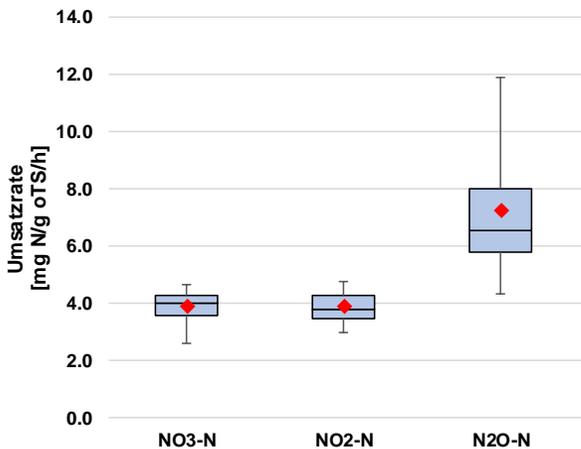


# Einflussfaktoren Denitrifikation

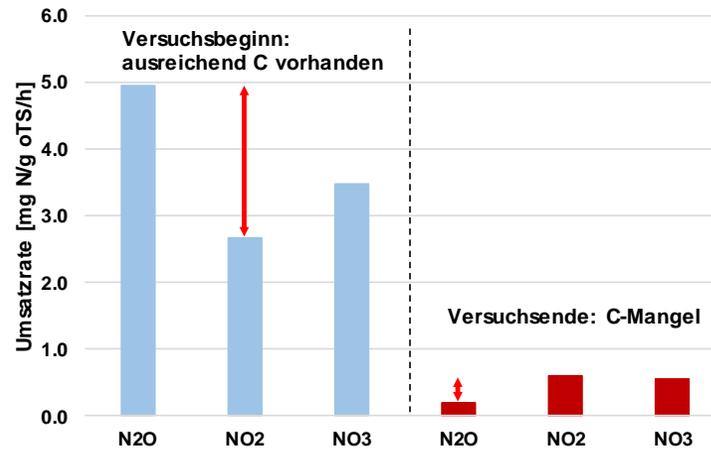
- Unter optimalen Randbedingungen: N<sub>2</sub>O-Reduktion ist der am schnellsten ablaufende Prozessschritt, sodass kein N<sub>2</sub>O akkumuliert. → **Potential als N<sub>2</sub>O-Senke**
- N<sub>2</sub>O-Akkumulation nur dann, wenn die N<sub>2</sub>O-Reduktion stärker als die anderen Prozessschritte gehemmt ist
  - schwankende/ stoßartige Beschickung, instabile Betriebsbedingungen
  - C-Mangel
  - hohen HNO<sub>2</sub>-Konzentrationen (> 0,3 – 1,0 µg HNO<sub>2</sub>-N/l)
  - Vorhandensein von gelöstem Sauerstoff?

$$C_{HNO_2} = \frac{46}{14} \cdot \frac{C_{N_2O-N}}{e^{\left(\frac{-2300}{273+T}\right)} \cdot 10^{pH}}$$

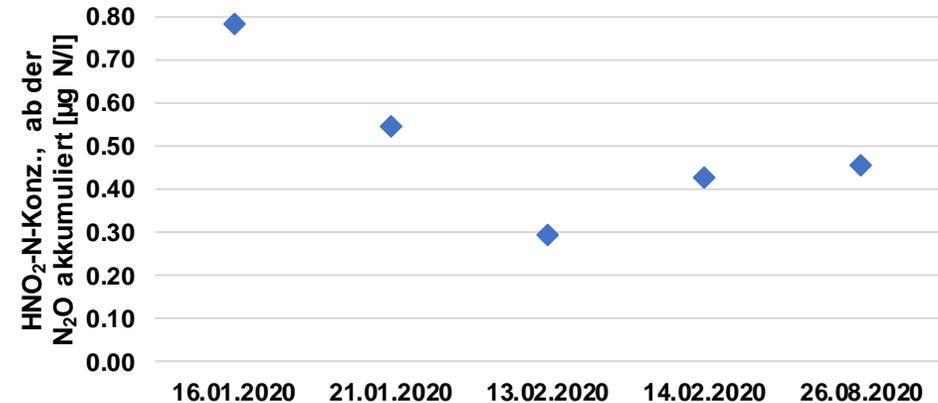
Quelle: Anthonisen et al., 1976



Quelle: ISAH – Abschlussbericht MiNzE



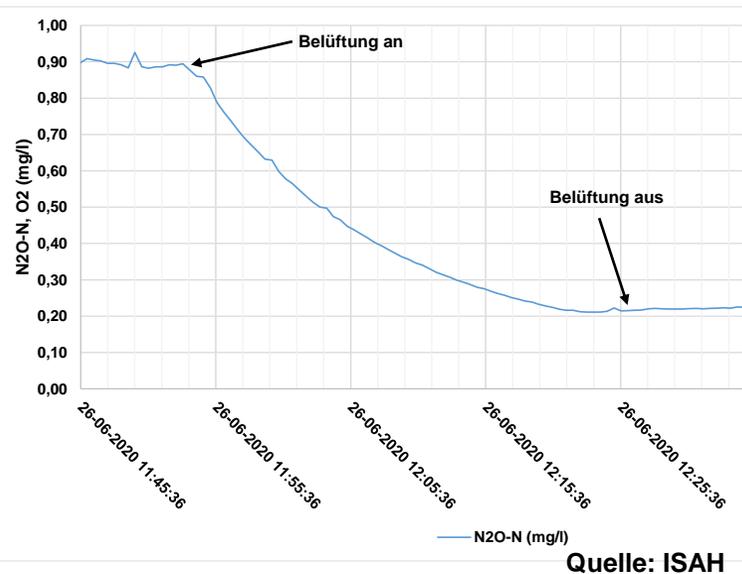
Quelle: ISAH – Abschlussbericht MiNzE



Quelle: ISAH – Abschlussbericht MiNzE

# Von der Bildung zur Emission

- Gastransfer von Wasserphase in Gasphase durch **Gasdiffusion** (Henry) und **belüftungsinduzierte Strippung**
- Belüftung: Erhöhte Gasdiffusion durch Vergrößerung der Grenzschicht zwischen Flüssig- und Gasphase (Luftblasen)
  - Exakter Einfluss ist schwer zu quantifizieren
  - Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass das gebildete N<sub>2</sub>O vollständig ausgetragen wird (Sättigungskonzentration bei Atmosphärendruck ≈ 0,0003 mg N<sub>2</sub>O-N/l)

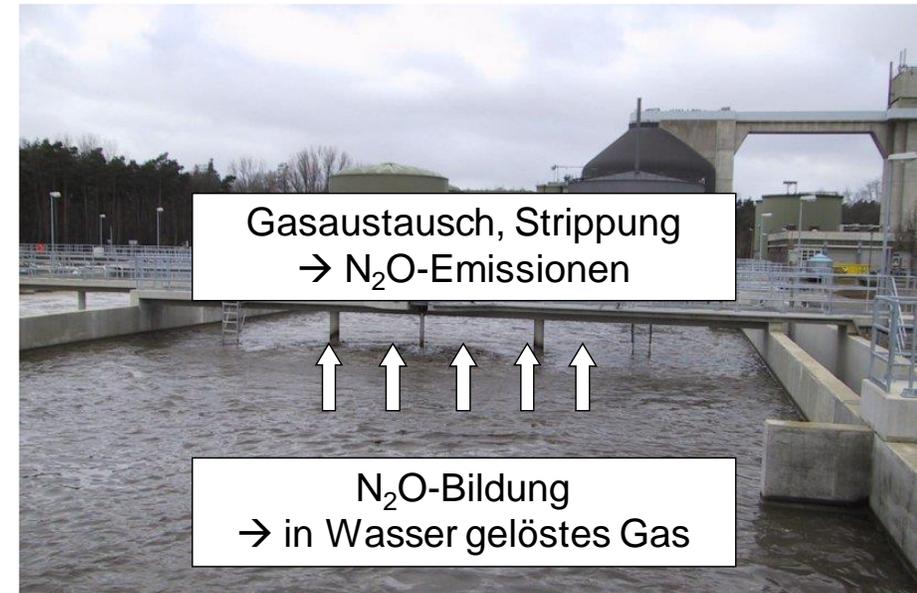


## Gesetz nach Henry:

$$C_{N2O,sat} = H_{cp} \cdot P_{N2O,Gas}$$

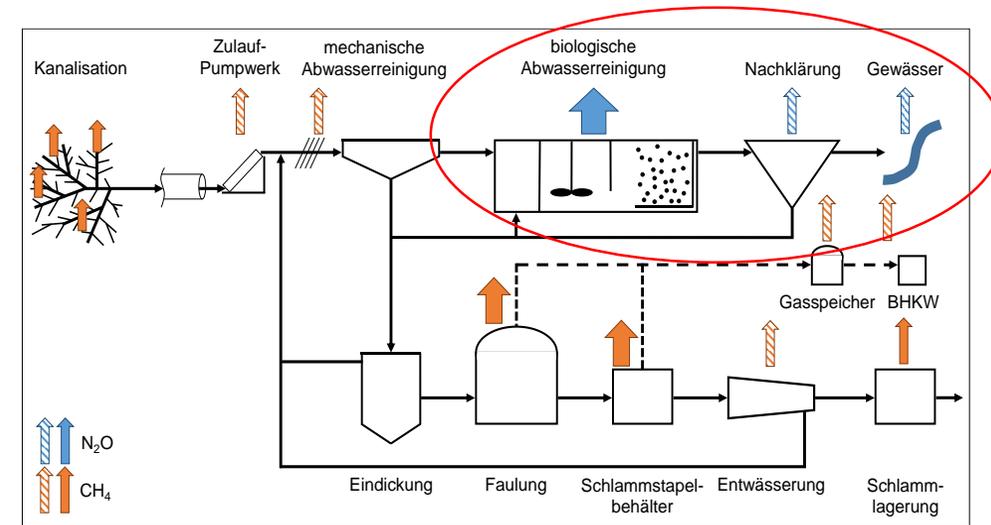
## Gastransferrate

$$r = k_l a_{N2O} \cdot (C_{N2O} - C_{N2O,sat})$$



# Rahmenbedingungen (Hauptstrom)

- Hauptstrom der Abwasserreinigung
  - veränderliche, teils nicht genau bekannte Betriebsbedingungen (zeitlich/ räumlich)
  - Zulauf dominiert



Zusammenfassend:

**Bildungsmechanismen weitgehend bekannt  
aber: lokale Milieubdg. im Becken unklar!**

Messungen zeigen auch

**Minimierungsziel:  $N_2O$ -Emission  $\rightarrow 0$**

# Emissionsminimierung – Vorgehen

Minimierungsziel: N<sub>2</sub>O-Emission → 0

1. Einordnung der Kläranlage nach „Risiko-Gruppe“ und kritischen Prozessbedingungen

2. Überprüfen der Emissionsannahmen durch sondierende Messungen

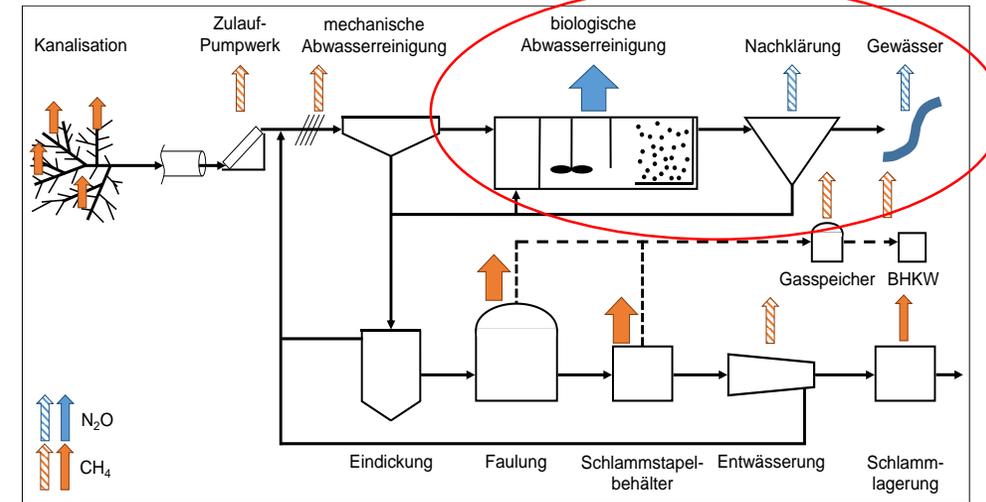
- Messungen in der biologischen Stufe
  - Abluftmessung
  - Messung in der Flüssigphase
- Erfassung des Gesamtemissionsraums: FTIR oder Drohnenmessungen

3. Detaillierte Analyse relevanter Emissionspunkte in Messkampagnen:

- mindestens 4 Wochen, verschiedene Jahreszeiten, verschiedene Stellen
- Parallele Aufnahme von Betriebszuständen und Milieubedingungen

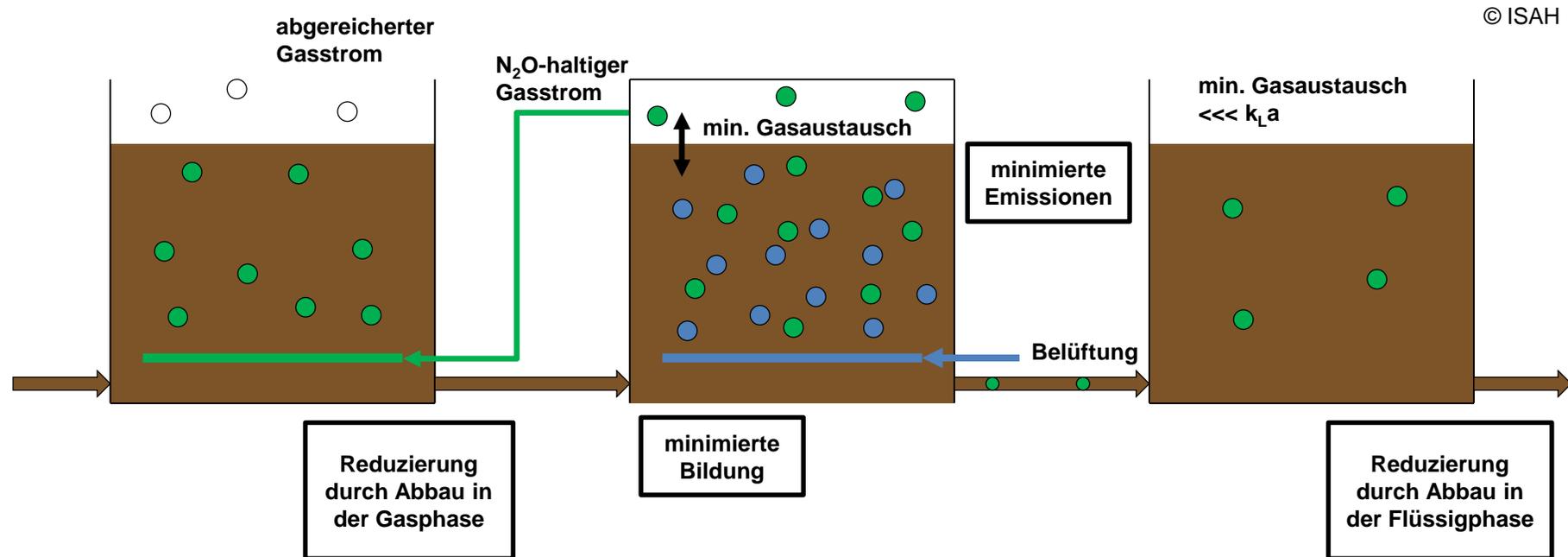
4. Ableitung emissionsreduzierender Betriebsstrategien

- Modellbasierte Strategieentwicklung
- Umsetzung und großtechnische Evaluation



# Emissionsminderung – MiNzE-Konzept

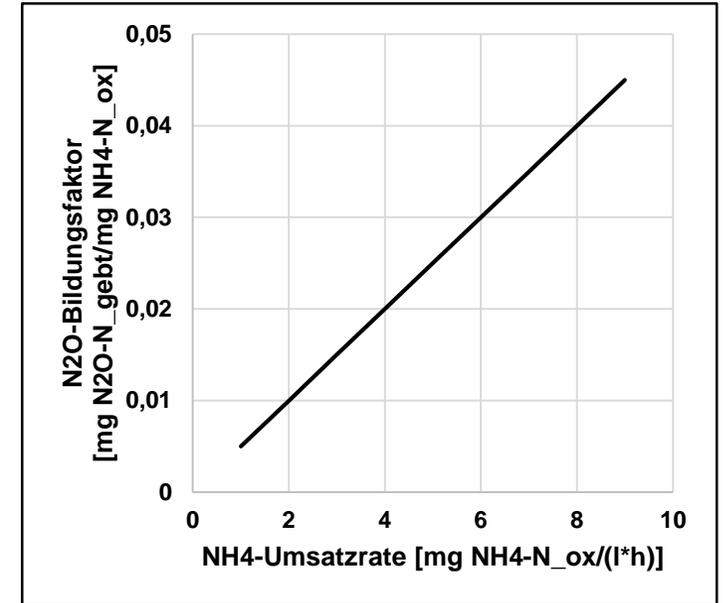
## Minimierung der NzweiO-Emission



# Emissionsminderungsmaßnahmen

## mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der N<sub>2</sub>O-Bildung:

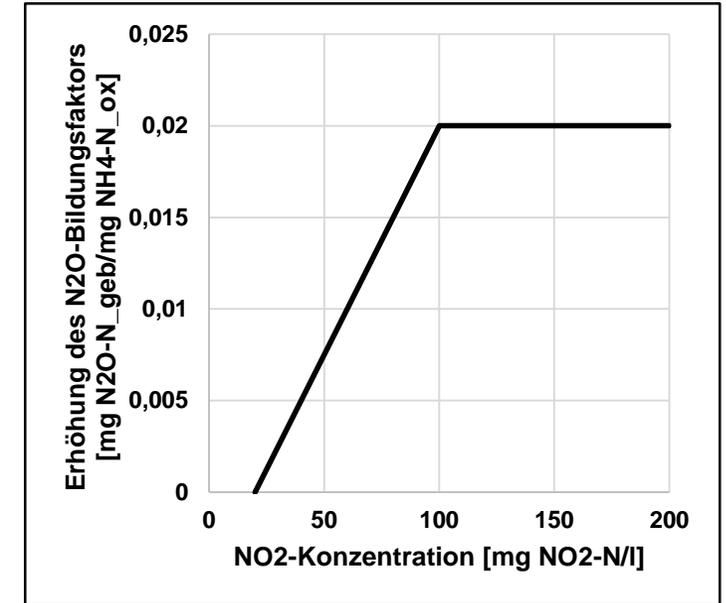
- Sicherstellung eines ausreichenden Schlammalters für die Nitrifikation → geringe spezifische Aktivität
- Vergleichmäßigung der Zulaufkraft bei der Einleitung hochkonzentrierter Teilströme



# Emissionsminderungsmaßnahmen

## mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der N<sub>2</sub>O-Bildung:

- Sicherstellung eines ausreichenden Schlammalters für die Nitrifikation → geringe spezifische Aktivität
- Vergleichmäßigung der Zulaufkraft bei der Einleitung hochkonzentrierter Teilströme
- Vermeidung von hohen Nitritkonzentrationen ←



# Emissionsminderungsmaßnahmen

## mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der N<sub>2</sub>O-Bildung:

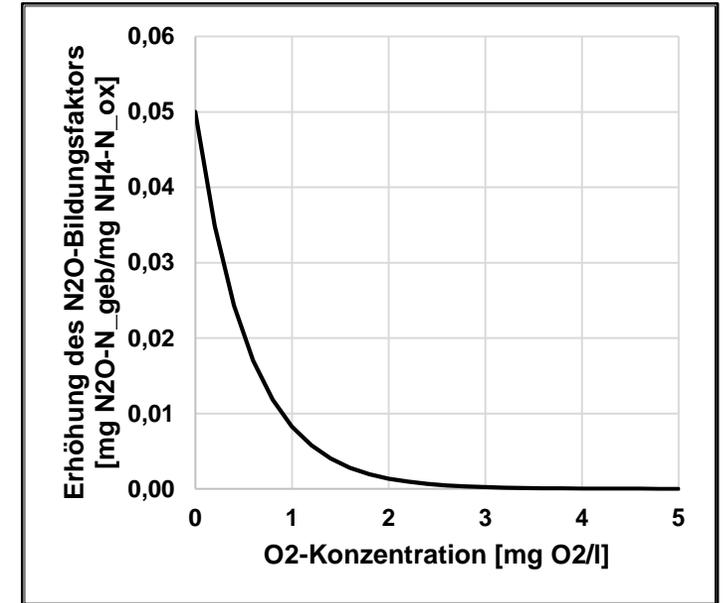
- Sicherstellung eines ausreichenden Schlammalters für die Nitrifikation → geringe spezifische Aktivität
- Vergleichmäßigung der Zulaufkraft bei der Einleitung hochkonzentrierter Teilströme
- Vermeidung von hohen Nitritkonzentrationen
- klares Belüftungsregime, eindeutige aerobe und anoxische Zonen/ Zeiten, Variabilität der Belüftung zur Bereitstellung von an die Belastung angepasste Volumina
- ausreichendes Denitrifikationsvolumen, ausreichende C-Verfügbarkeit

## mögliche Maßnahmen zur Reduzierung des Gastransfers:

- Reduzierung der Gasstrippung/ Abdecken der Reaktoren

## mögliche Maßnahmen zum Abbau des gebildeten N<sub>2</sub>O

- N<sub>2</sub>O-Denitrifikation
- Abluftbehandlung

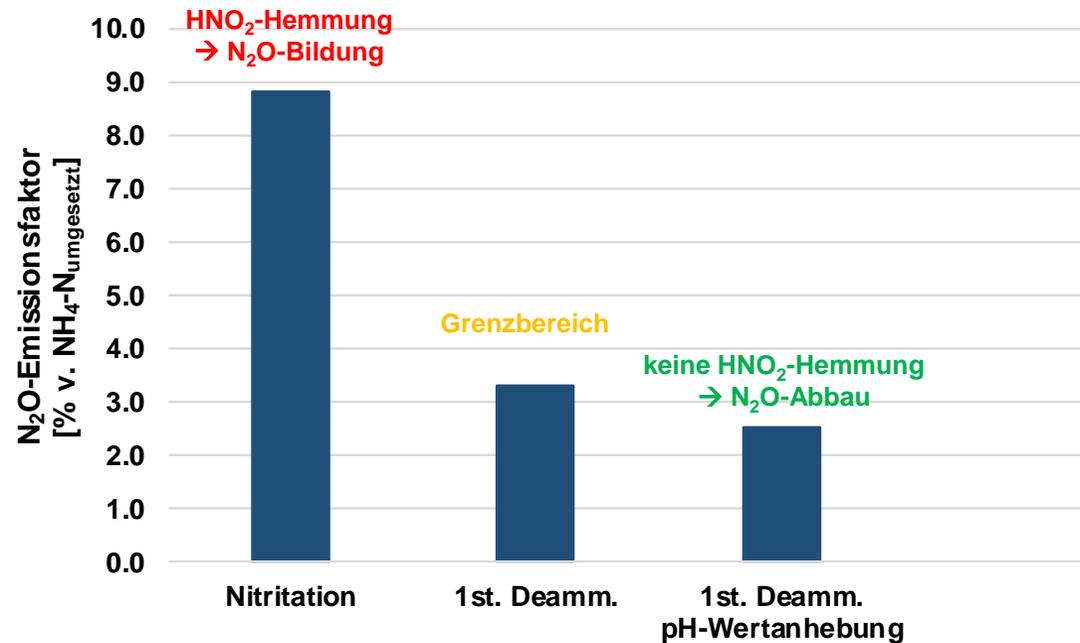


**Erfolg einzelner Maßnahmen ist anlagenspezifisch!**

# Reduzierung N<sub>2</sub>O-Bildung/ Verbesserung N<sub>2</sub>O-Abbau

## Beispiel Versuchsanlage zur Hochlastdeammonifikation (intermittierende Belüftung):

- Reduzierung der HNO<sub>2</sub>-Hemmung → N<sub>2</sub>O-Abbau statt N<sub>2</sub>O-Bildung durch Denitrifikation
- Erhöhung O<sub>2</sub>-Konzentration: geringfügig reduzierte N<sub>2</sub>O-Bildung



Quelle: ISAH – Abschlussbericht MiNzE

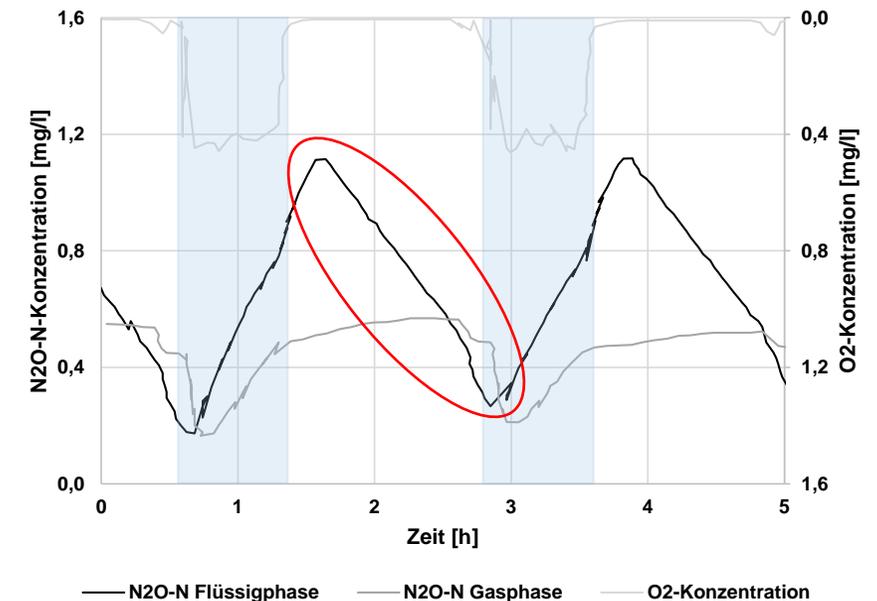
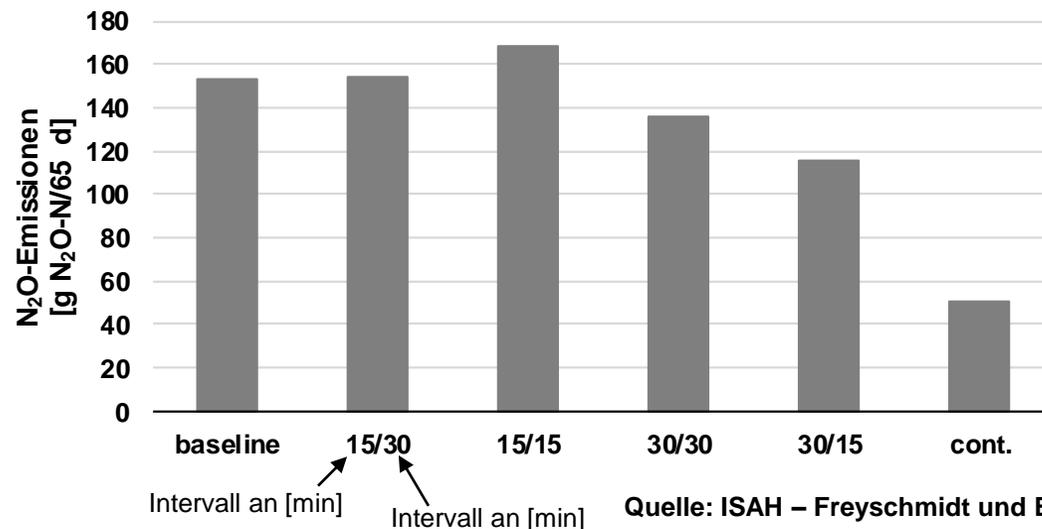
Abnahme HNO<sub>2</sub>-Konzentration

# Reduzierung N<sub>2</sub>O-Bildung/ Verbesserung N<sub>2</sub>O-Abbau

## Beispiel: Festlegung Belüftungseinstellungen

- **Ziel: Vermeidung einer N<sub>2</sub>O-Bildung während der Nitrifikation**
  - kontinuierliche Belüftung, hohe O<sub>2</sub>-Konzentrationen
- **Ziel: simultaner N<sub>2</sub>O-Abbau**
  - intermittierende Belüftung
  - kontinuierliche Belüftung, geringe O<sub>2</sub>-Konzentrationen (ggf. höhere N<sub>2</sub>O-Bildung durch AOB)

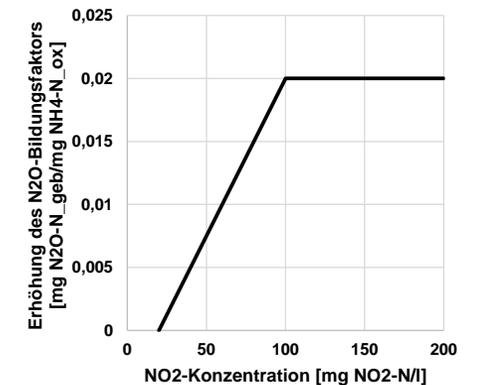
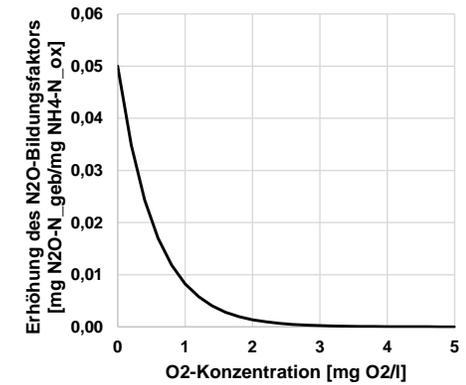
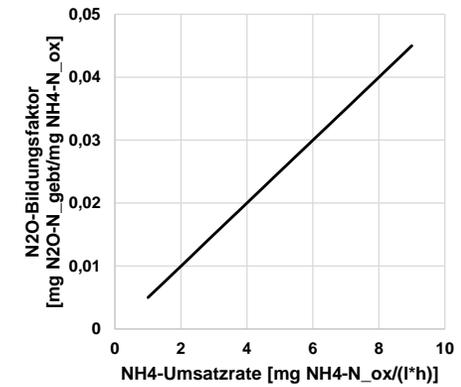
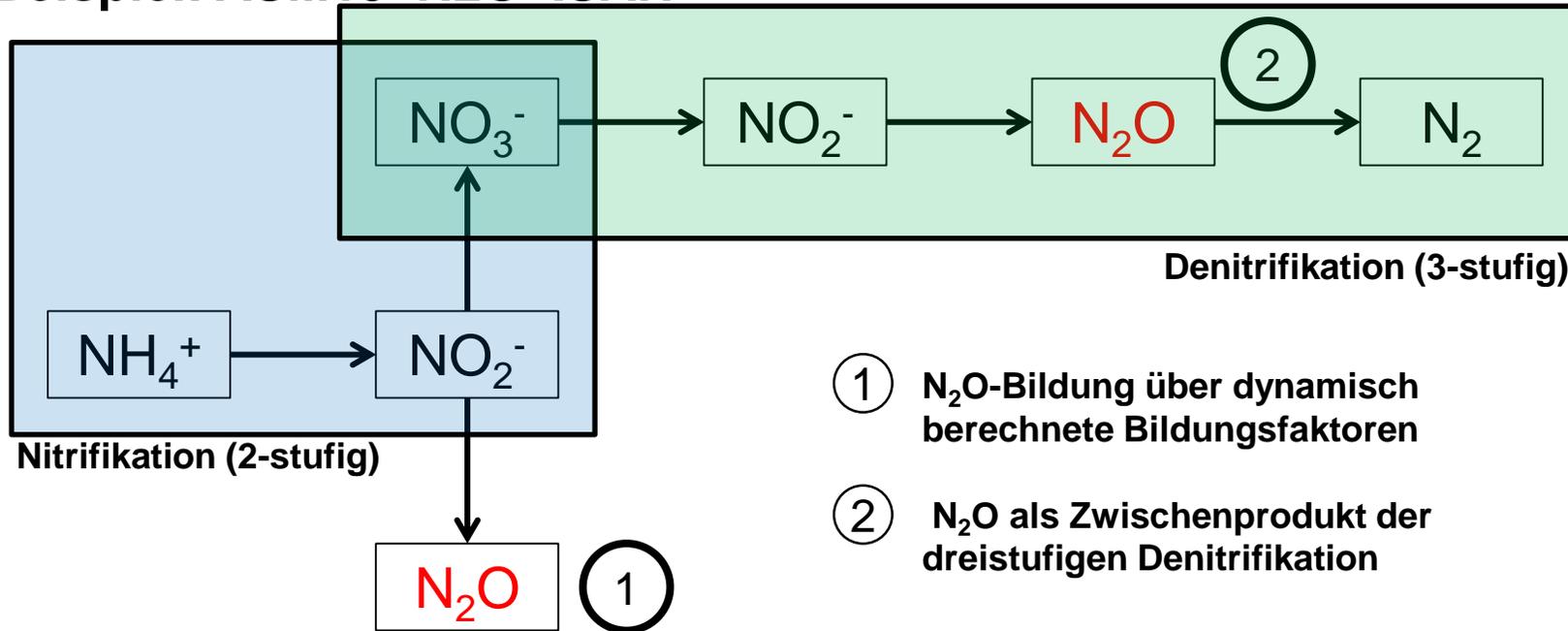
**optimale Belüftungseinstellung ist anlagenspezifisch und abhängig von der Zielstellung!**



# Modellgestützte Maßnahmenplanung

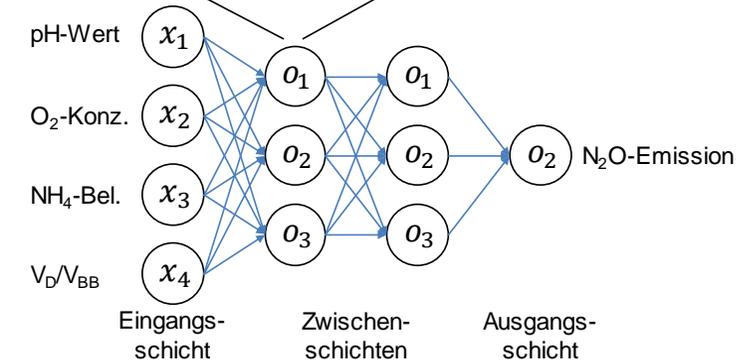
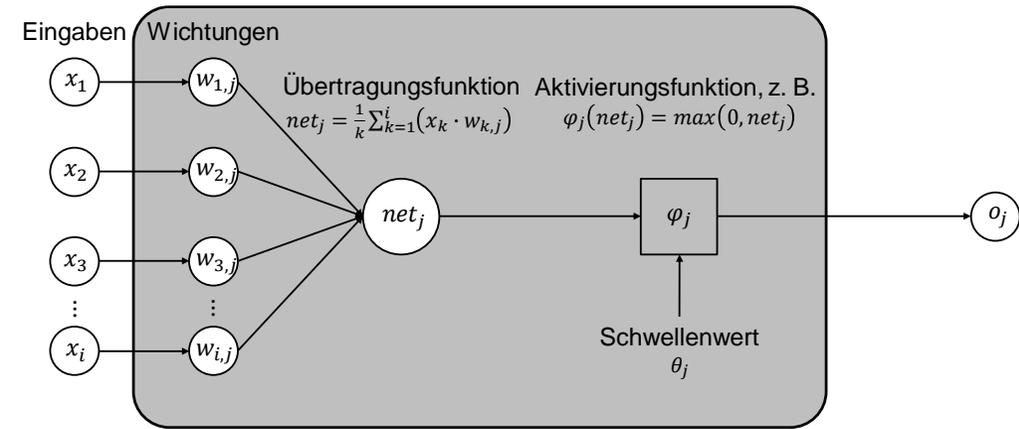
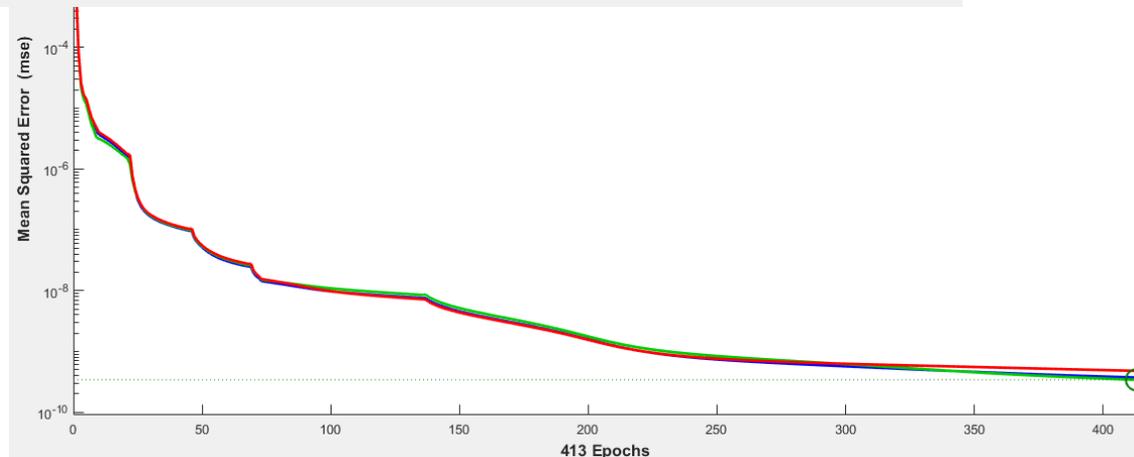
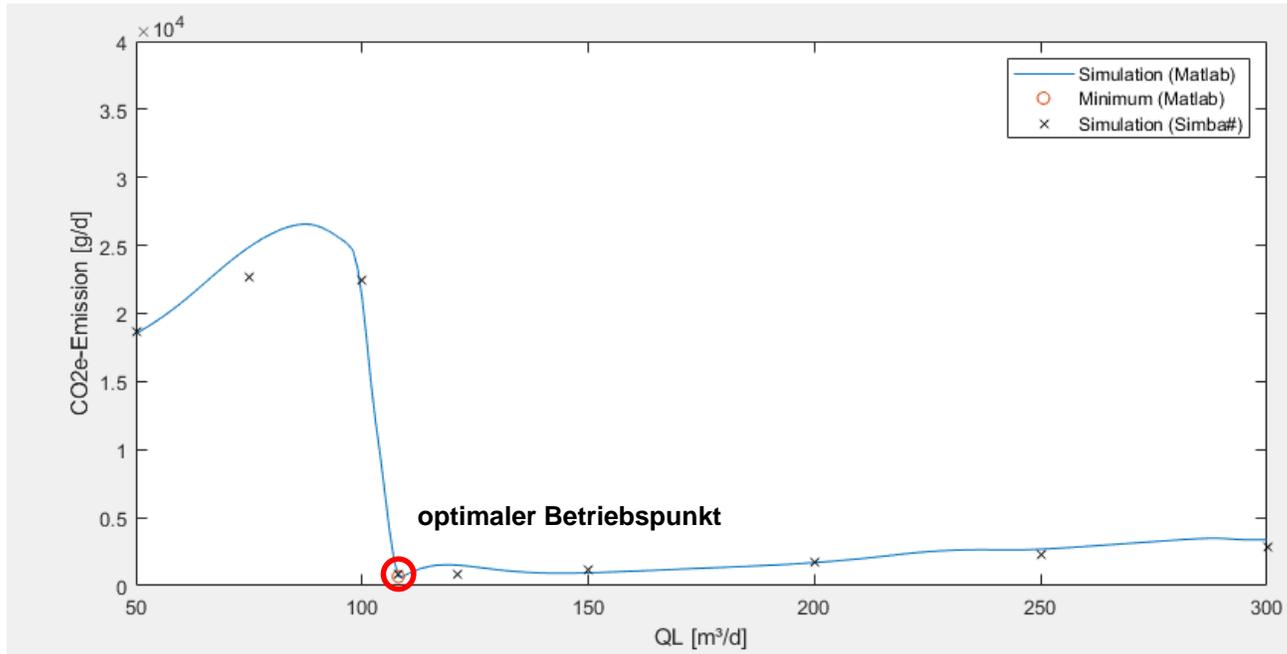
- $N_2O$ -Emissionen unterliegen hohen zeitlichen und räumlichen Schwankungen, umfassende Langzeitmessungen sind jedoch aufwendig und teuer
- $N_2O$ -Messungen alleine geben keinen direkten Aufschluss über Ursachen hoher  $N_2O$ -Emissionen
- Messungen erlauben nur reaktive, keine proaktiven Handlungen!

## Beispiel: ASM13 N2O ISAH



Quelle: ISAH – Beier et al., 2021

# Ausblick: Betriebsoptimierung mit künstlicher Intelligenz





**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

*Arne Freyschmidt, M.Sc.*  
*[freyschmidt@isah.uni-hannover.de](mailto:freyschmidt@isah.uni-hannover.de)*