Institut für Wasser und Umwelt (IWU)

Wassergütewirtschaft

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT - Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität in der Abwasserbehandlung II

Tagungsband der 36. Karlsruher Flockungstage 2025

Herausgegeben von: Mohammad Azari
Stephan Fuchs

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT - Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Tagungsband der 35. Karlsruher Flockungstage 2025;
M. Azari, S. Fuchs (Hrsg.); Schriftenreihe SWW (Bd. 166)
Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe

Alle Rechte vorbehalten

Satz: Institut für Wasser und Umwelt (IWU)
Wassergütewirtschaft
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT - Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Vorwort

Trotz des erreichten hohen Ausbaustandards der Abwasserreinigung tragen die Einleitungen aus kommunalen Kläranlagen in relevantem Umfang zur Belastung der Oberflächengewässer und der mit ihnen verbundenen Ökosysteme bei. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer quasi stetigen Weiterentwicklung der Abwasserbehandlung. Innovative verfahrenstechnische Ansätze zeichnen sich heute jedoch nicht nur durch eine hohe Verfahrenswirksamkeit, sondern auch durch den Nachweis ihrer Energie- und Ressourceneffizienz aus. Dabei wird immer deutlicher, dass die Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft und des Klimawandels nicht isoliert betrachtet werden können, sondern integraler Bestandteil moderner Abwasserbehandlungskonzepte sein müssen. Nur durch die Kombination von Wertstoffrückgewinnung, direkte und indirekte Emissionsreduktion und andere innovative Technologien können nachhaltige Lösungen für die Zukunft geschaffen werden.

Unter dem Titel "Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität in der Abwasserbehandlung" haben wir ein vielfältiges Programm zu aktuellen Themen der Abwasserwirtschaft zusammengestellt. Im Fokus stehen die neue Europäische Kommunalabwasserrichtlinie (KARL), die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) und das Klimaschutzgesetz als Impulsgeber für energie- und kosteneffiziente Innovation und Technologieentwicklung in diesem Bereich.

Die Themenschwerpunkte dieses Jahres lauten:

Kreislaufwirtschaft: Ressourceneffiziente Technologien und Rückgewinnung von Wertstoffen und Energie aus Abwasser und Klärschlamm

Klimaneutrale Kläranlagen: Direkte Treibhausgasemissionen (N_2O und CH_4) sowie indirekte Treibhausgasemissionen (Energieeffizienz)

Ihrem Feedback folgend haben wir das Programm dieses Jahr so aufgebaut, dass ein Übersichtsvortrag immer von einem oder mehreren Praxisbeispielen begleitet wird. Auf diese Weise wollen wir einen intensiven Austausch fördern und sicherstellen, dass Sie Hinweise zu ihrer eigenen spezifischen Fragestellung bekommen.

Wir bedanken uns bei allen, die zum Gelingen der Karlsruher Flockungstage beitragen. Dies schließt alle Vortragenden ebenso wie alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer ein, die durch ihre Teilnahme den aktiven fachlichen Austausch möglich machen. Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachbereiches, ohne die diese Veranstaltung nicht möglich wäre.

Karlsruhe, November 2025

Mohammad Azari und Stephan Fuchs

Inhaltsverzeichnis

Die Umsetzung der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie aus der Sicht des Bundes. 9

Die energiepositive Kläranlage – Herausforderungen, Synergien, Chancen. 13

Klimaneutrales Deutschland - Status, Perspektiven, Herausforderungen und Chancen 23

Methanemission auf Kläranlagen unter Einbeziehung der Klärschlammtrocknung. 50

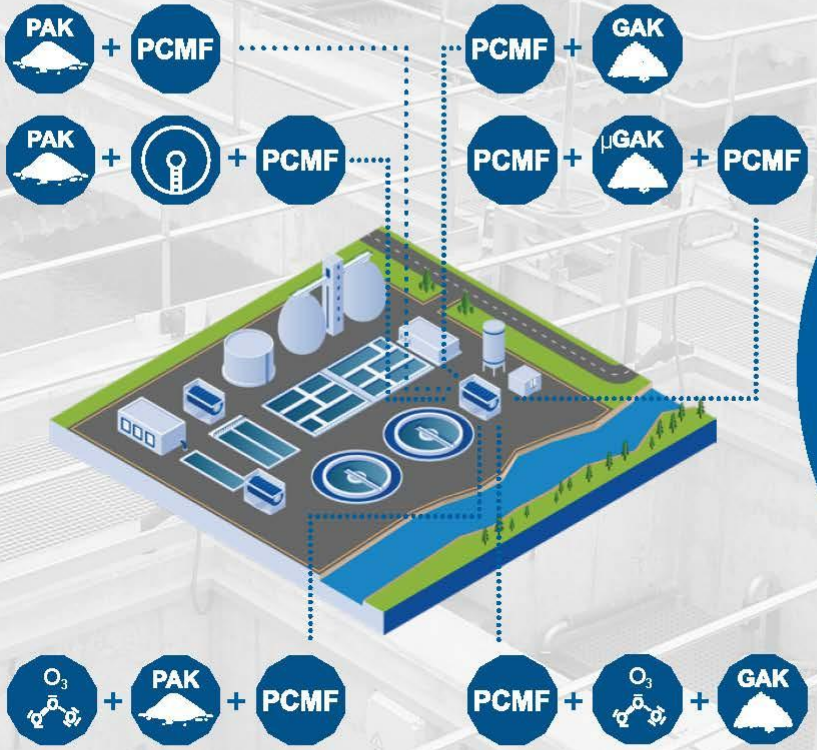
Praxisnahe N_2O-Überwachung – Vom Messwert zur Emissionsminderung. 55

Optimierung der Flockungsmitteldosierung und Reduktion polyacrylamidbasierter Flockungsmittel durch Dualflockung und Künstliche Intelligenz (KI) – ClearWater. 64

Schriftenreihe SWW – Karlsruhe 76

POLSTOFFFILTRATION - PCMF

MEHR ALS 10 JAHRE ERFAHRUNG IN DER 4. REINIGUNGSSTUFE



MECANA
A Metawater Company

OPTIFIBER® - MIKRO- UND ULTRAFASERN

- Wirtschaftlicher und sicherer Betrieb von Aktivkohlefiltern und Ozonung
- Effizienter Rückhalt von Pulveraktivkohle
- Simultane Phosphor- und Mikroplastikentfernung

Engineered
Water Solutions

Seit · Depuis · Since · 1964

www.mecana.ch

Die Umsetzung der neuen EU-Kommunalabwasserrichtlinie aus der Sicht des Bundes

Christof Mainz **Referat W I 3**

Gewässerschutz, Schutz der Oberflächengewässer und des Grundwassers; Gewässerökologie und Wasserressourcen

BMUKN

1 Einleitung: Wesentliche Inhalte der Neufassung der Kommunalabwasserrichtlinie

Die novellierte EU-Kommunalabwasserrichtlinie setzt neue Maßstäbe für die Wasserwirtschaft. Die Novellierung der über 30 Jahre alten EU-Richtlinie musste an Am 26. Oktober 2022 hat die EU-Kommission ihren Vorschlag zur Überarbeitung der Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG vorgelegt. Nach intensiven Diskussionen im Rat der Europäischen Union, mit der EU-Kommission und dem Europäischen Parlament wurde zwischen den Beteiligten ein Kompromiss gefunden, der im Oktober/November 2024 vom Europäischen Parlament und den Mitgliedstaaten verabschiedet wurde. Die Neufassung der Richtlinie (EU) 2024/3019 vom 27. November 2024 ist am 1. Januar 2025 in Kraft getreten und innerhalb von 30 Monaten bis zum 31. Juli 2027 in nationales Recht umzusetzen.

Wesentliche Ziele der Neufassung der Richtlinie sind:

- Anpassung der Reinigungsleistung für Nährstoffe (Phosphor und Stickstoff) in der 3. Reinigungsstufe bei Einleitungen in oberirdische Gewässer (bis 2039/45)

- Einführung einer 4. Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffreduzierung für relevante Kläranlagen (bis 2045) sowie Finanzierung durch Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung für pharmazeutische und kosmetische Produkte (mind. 80 % Finanzierung der Investitions- und Betriebskosten)
- Energieneutralität des Sektors bis 2045
- Erweiterte Anforderungen an die Niederschlagswasserbehandlung durch Einführung von Managementkonzepten
- Messung gesundheitsrelevanter Parameter (z. B. SARS-CoV-2, Influenza, AMR)
- Umstellung des Berichtswesens (nationale Berichte) und der Information der Öffentlichkeit

2 Umsetzung der Richtlinie

Für die Umsetzung der Richtlinie ist festzuhalten, dass es für Deutschland zunächst von Bedeutung ist, dass durch die Verschiebung des Geltungsbereichs der Richtlinie von 2.000 EW auf jetzt 1.000 EW (statt wie bisher rd. 4.400 Anlagen) zukünftig rund 5.200 Anlagen von den Anforderungen der Richtlinie erfasst werden. Dies ist insbesondere bedeutsam für das Berichtswesen Deutschlands an die EU-Kommission.

Darüber hinaus ist jedes der o. a. Ziele eine besondere Herausforderung, da die Umsetzung wesentliche Änderungen im bestehenden Wasserrecht bedingen. Die EU-Richtlinie sieht bei vielen dieser Aufgaben konkrete Zwischenziele vor, die die Mitgliedstaaten erfüllen müssen. Beispielsweise ist die Erreichung der Energieneutralität an einen Zeitplan mit Zwischenzielen gekoppelt – bis 2030: 20 % / bis 2035: 40 % / bis 2040: 70 % / bis 2045: 100 %. Hier sind Bund und Länder im Austausch über die Vorgehensweise, da die Ziele für den gesamten Mitgliedstaat Deutschland gelten.

Für die Reinigungsleistung von Nährstoffen sieht die Richtlinie geänderte Grenzwerte vor. Die neuen EU-Mindestanforderungen für Stickstoff und Phosphor sollen dabei insbesondere die Anstrengungen zur Erreichung der Ziele der Gewässergüte flankieren. Bei den Grenzwerten der EU-Richtlinie handelt es sich um 24-h-Mischproben, die im Jahresmittel bei einer Abwassertemperatur von >12°C einzuhalten sind. Bei der 1:1-Umsetzung der EU-Grenzwerte ist insbesondere zu berücksichtigen, dass eine Regelung zu den Mindestanforderungen im Anhang 1 AbwV eine Kompatibilität mit dem bestehenden Abwasserabgabengesetz sicherstellt.

Für die Einführung der 4. Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffreduzierung ist für die Umsetzung ebenfalls ein Stufenplan vorgesehen:

- Große Kläranlagen ≥ 150.000 EW (obligatorischer Ausbau):

  bis 2033: 20 % / bis 2039: 60 % / bis 2045: 100 % der Anlagen

- Mittlere Kläranlagengrößen: 10.000 - < 150.000 EW (optionaler Ausbau):

  bis 2033: 10 % / bis 2036: 30 % / bis 2039: 60 % / dann 2045: 100 %

Für die mittleren Kläranlagengrößen hat der (optionale) Ausbau nach einem risikobasierten Ansatz zu erfolgen. Die Liste der Risikogebiete ist bis 2030 zu erstellen; 2033 ist sie zu überprüfen und anschließend alle 6 Jahre zu aktualisieren. Wünschenswerte wäre, dass die Vollzugsbehörden hier schnellstmöglich zu einer Ausweisung und einem Ausbauplan kommen, um Planungssicherheit für die Betreiber zu erhalten. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich bei Änderung des Risikogebietes die nach der Richtlinie auszubauenden Kläranlagen auch noch ändern können. Zwar wurde in Deutschland im Rahmen des Spurenstoffdialogs ein Orientierungsrahmen erarbeitet, dieser entspricht aber nicht dem risikobasierten Ansatz der Richtlinie. Nach Möglichkeit sollte hier sowohl in Deutschland als auch in Europa einheitlich bei der Beurteilung der Risikogebiete vorgegangen werden. Wie der europäische Ansatz aussieht, kann auch von der EU-Kommission noch näher festgelegt werden. Die Kommission arbeitet hier bereits an entsprechenden Leitplanken. Deutschland sollte sich hier möglichst in die Diskussionen einbringen.

Zur Finanzierung der 4. Reinigungsstufe ist in der Richtlinie vorgesehen, dass diese durch die Einführung einer erweiterten Herstellerverantwortung flankiert wird. Der Aufbau und die Organisation der erweiterten Herstellerverantwortung ist bis spätestens Ende 2028 einzurichten. Zu klären sind hier insbesondere Fragen der Gestaltung einer Organisation zur erweiterten Herstellerverantwortung. Zur Erarbeitung dieser Grundlagen wurde ein Gutachten vergeben, bei dem die Länder und Stakeholder einbezogen werden. Erste Ergebnisse werden Ende 2025 erwartet.

Für die Kommunen und Kanalnetzbetreiber werden die integrierten Abwassermanagementpläne eine Herausforderung darstellen, da hier neue Pflichten für die Kommunen enthalten sind.

- Bis 31.12.2033 ist für Gemeinden mit 100.000 EW und mehr ein integrierter Plan für die kommunale Abwasserbewirtschaftung aufzustellen

- Für mittlere Gemeindegrößen (Gemeinden mit 10.000 bis 100.000 EW) ist eine Liste zu erstellen, bei denen Regenüberläufe eine Gefahr für die Umwelt oder die menschliche Gesundheit darstellen

Die Richtlinie gibt dabei einen Zielwert vor, wonach Regenwasserüberläufe nicht mehr als 2 % der jährlichen, gesammelten kommunalen Abwasserfracht bei Trockenwetter ausmachen soll. Dieses (nicht verbindliche) Ziel von 2 % muss bis 2039/2045 eingehalten werden (Überprüfung der Pläne alle 6 Jahre). Hier kann der Nachweis über Messungen und Modellierung erfolgen.

Maßnahmen und Investitionen einer Kommune bzw. der Betreiber sind nach Artikel 23 (1) und Art. 24 (2) der Richtlinie transparent darzustellen und der EU-Kommission auf Anforderung zur Verfügung zu stellen. Eine der Herausforderungen hierbei ist, dass ein entsprechendes Berichtssystem erarbeitet werden muss, für das die Kommission befugt ist, Inhalte erst zu einem späteren Zeitpunkt festzulegen. Bedeutsam ist bei den Abwassermanagementkonzepten auch, dass nach Art. 5 (5) der Richtlinie ein “Vorrang grün-blauer Infrastrukturlösungen, wann immer dies möglich ist” einzuräumen ist. Wie dies umzusetzen und nachzuweisen sein wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch unklar.

3 Weitere Schritte und Umsetzung

Die EU-Kommunalabwasserrichtlinie muss innerhalb von zweieinhalb Jahren nach Inkrafttreten, also bis zum 31.07.2025 in nationales Recht umgesetzt werden. Der genaue Zeitplan für die Umsetzung wird von verschiedenen Faktoren abhängen. Wesentliche Ziele und erste Überlegungen zur Umsetzung der Richtlinie in Deutschland werden zwischen den beteiligten Akteuren besprochen.

Die energiepositive Kläranlage

– Herausforderungen, Synergien, Chancen

Konrad Koch

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft

TUM School of Engineering and Design

Technische Universität München

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Die energiepositive Kläranlage – Herausforderungen, Synergien, Chancen

Konrad Koch



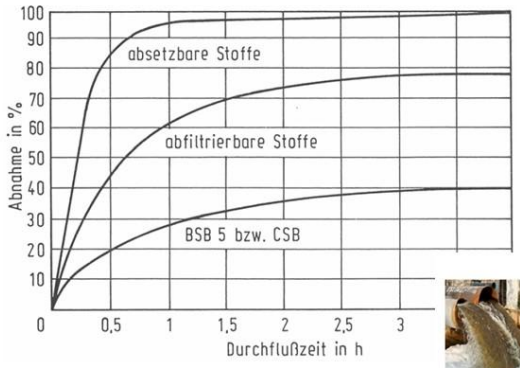
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Novellierte Kommunalabwasserrichtlinie der EU („KARL“)

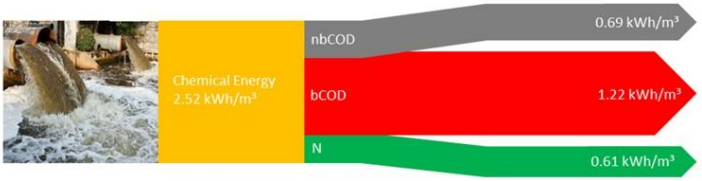


Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 1: Intensivierte Vorklärung







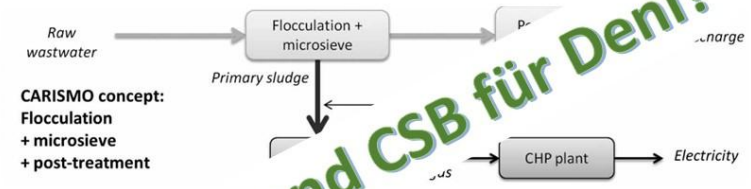
Horstmeyer, Weißbach, Koch, Drewes; *J. Water Reuse Desalin.*, 2018, 8(4), 455-467.

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 1: Intensivierte Vorklärung



CARISMO concept:
Flocculation
+ microsieve
+ post-treatment



Aber: ausreichend CSB für Deni?

Table 1 | Influent and effluent quality of pilot plant for direct filtration of raw wastewater while dosing

Parameter	Influent Mean			Relative elimination Mean (%)
Suspended solids (mg SS/L)	465		4–26	96
Total COD (mg O_2/L)			133–281	78
COD particulate (mg O_2/L)		20	1–38	97
COD soluble (mg O_2/L)		192	146–262	30
Total phosphorus		2.0	1.1–3.4	86
P particul.		0.5	0–1.8	94
P soluble		1.8	0.8–2.8	76
Total nitrogen	90	75	59–89	17
NH_4-N (mg NH_4	68	61	51–67	10

Mean values of composite s



40 % mehr Methan

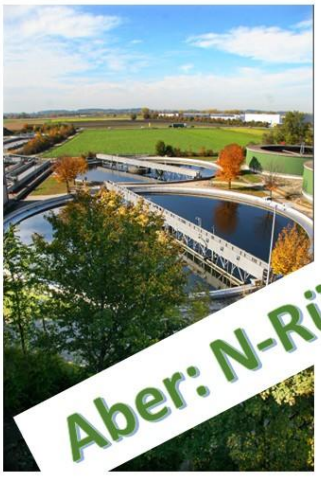


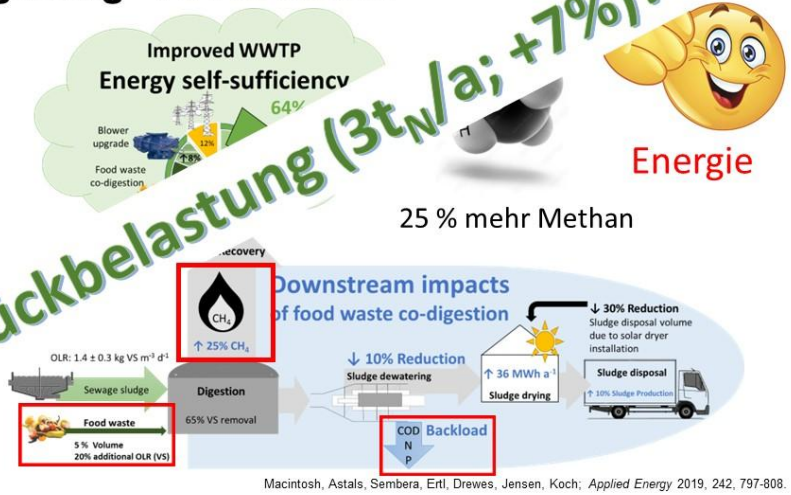
Energie

Remy, Boulestreau, Lesjean; *Water Sci. Technol.*, 2014, 70(10), 1709-1716.

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 2: Co-Vergärung - KA Grüneck

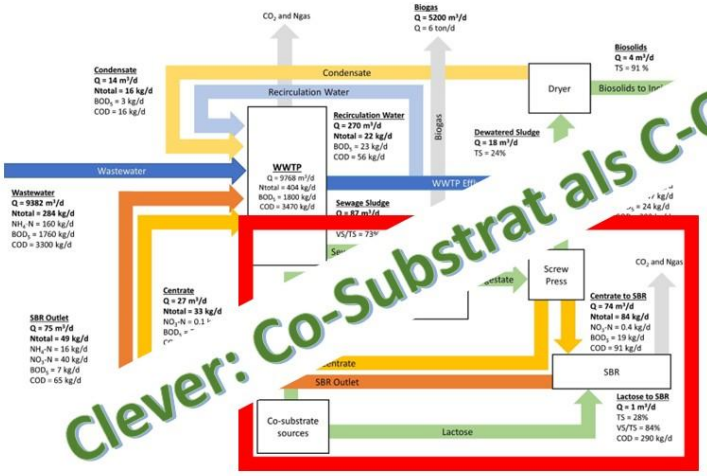


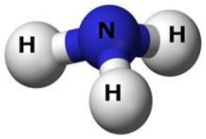


Macintosh, Astals, Sembera, Ertl, Drewes, Jensen, Koch; *Applied Energy* 2019, 242, 797-808.

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 2: Co-Vergärung - KA Moosburg





Sembera, Macintosh, Astals, Koch; *Waste Manage.* 2019, 95, 217–226.

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 3: Seitenstrom-Deammonifikation

Influencing factors X_j:
- pH value
- Feeding strategy
- Aeration strategy

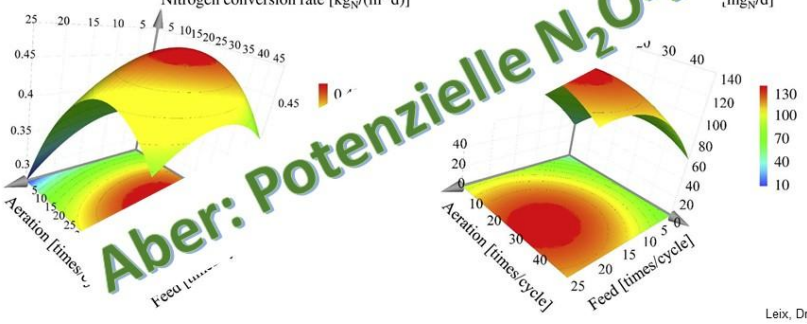
Design of experiment (DoE)

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^{n} \beta_j X_j + \sum_{j=1}^{n} \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^{n} \beta_{jk} X_j X_k \pm \varepsilon$$

Response variables Y
- Nitrogen con…
- N_2O em…

Exemplary at pH 7.5:

Nitrogen conversion rate [$kg_N/(m^3 \cdot d)$]



Aber: Potenzielle N_2O-Emissionen?



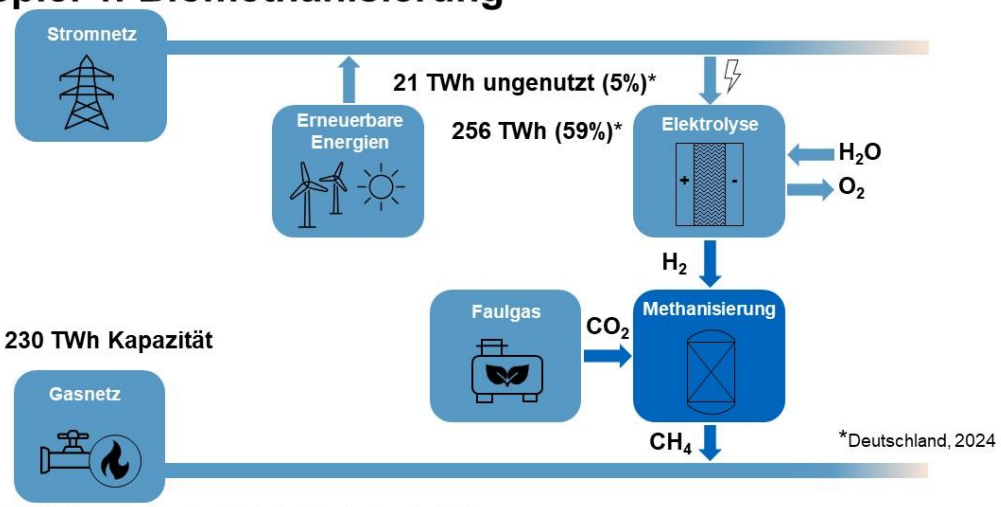


Energie + N-Elimination

Leix, Drewes, Ye, Koch; *Bioresource Technol.*, 2017, 236, 174–185.

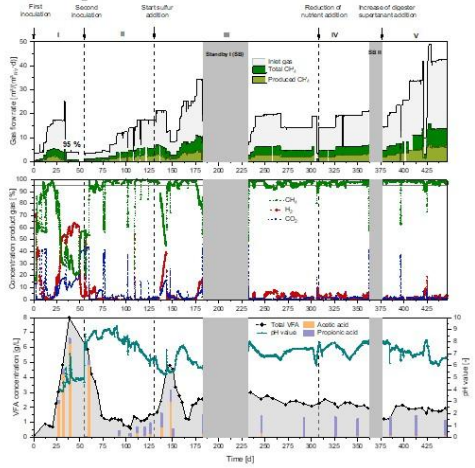
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 4: Biomethanisierung



Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 4: Biomethanisierung - *DemoMeth*



Feickert Fenske, Kirzeder, Strübing, Koch; *Bioresource Technol.*, 2023, 376, 128868.

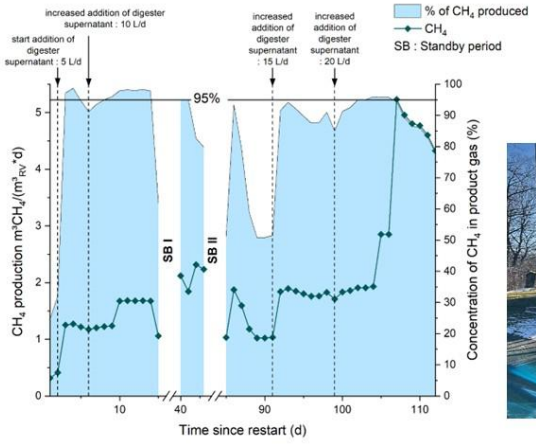
- Methanproduktivität von über 6 $m^3_{CH4}/(m^3_{RV}\cdot d)$ @ > 96% CH_4
- einfaches, druckloses System
- Nutzung von Zentrat als Rieselmedium
- nur Spurenelementzugabe nötig
- ca. $\frac{1}{20}$ des Faulbehältervolumens





Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 4: Biomethanisierung - *KomMeth*



Wenzel, Niebauer, Koch; *Appl. Energy*, 2025, *in preparation*.

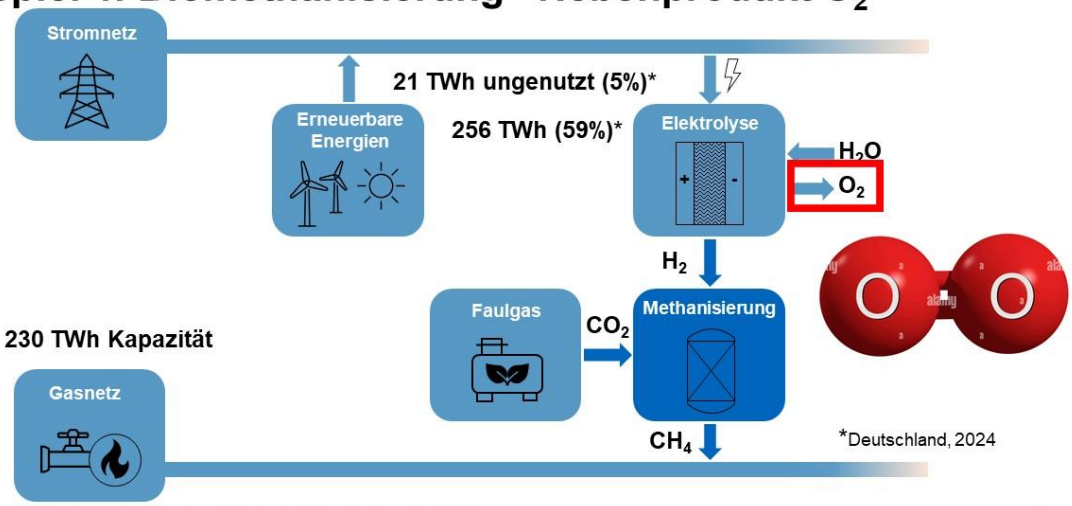
- Erfolgreiche Wiederinbetriebnahme
- Methanproduktivität noch steigerbar
- zus. Nährstoffgabe deutlich reduziert





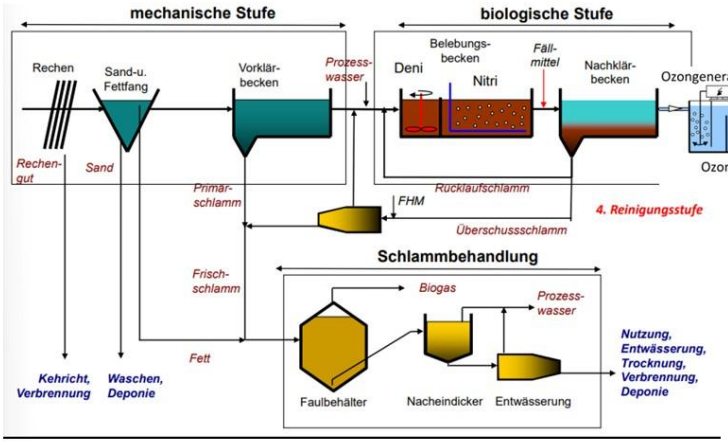
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 4: Biomethanisierung - Nebenprodukt O_2



Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 4: Biomethanisierung - Nebenprodukt O_2





Synergie

Einsatzmöglichkeiten:

- Belebung / Nitrifikation
- Ozonbereitstellung
- „Microaeration“ im FB
- Oxidationsmittel BHKW
- Prozesswasserbehandlung
- …

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Beispiel 5: „Pippi-Motor“







CH_4

Harnstofflösung (*AdBlue*)

Nachbehandlung
$2NO + O_2 \rightarrow NO+NO_2$

SCR-System
$NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$

Synergie

Fall A (“NO_x-optimierte Fahrweise”):
η_e = 40 % CH_4-Verbrauch: 230 g/kWh → NO_x-Emission: 10 g/kWh → NH_3-Verbrauch: 5,7 g/kWh → CH_4/NH_3 = 43

Fall B (“Energieoptimierte Fahrweise”):
η_e = 42 % CH_4-Verbrauch: 219 g/kWh → NO_x-Emission 13 g/kWh(*) → NH_3-Verbrauch: 7,4 g/kWh → CH_4/NH_3 = 30

(*) geschätzt

Fall B vs. Fall A:
1,7 g NH_3 spart 11 g CH_4

Heizwert von 1,7 g NH_3: 32 kJ
Heizwert von 11 g CH_4: 550 kJ

→ Indirekte NH_3-Nutzung is 18x effektiver als thermische Nutzung

Verhältnis im Klärschlamm ≈ 4 m^3_{CH4}/m^3_{NH3} → N mehr als ausreichend

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Zusammenfassung & Ausblick



- „KARL“ ist eine Herausforderung, bietet aber auch Chance und potenzielle Synergien
- Digitalisierung kann ein wichtiges Tool dabei sein
- Vernetzung und Austausch essenziell zur weiteren Optimierung

Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!



Klimaneutrales Deutschland -
Status, Perspektiven, Herausforderungen und Chancen

Manfred Fischedick

Präsident und wissenschaftlicher Geschäftsführer

Wuppertal Institut

Wissenschaftlicher Vorstand Johannes Rau Forschungsgemeinschaft

36. Karlsruher Flockungstage

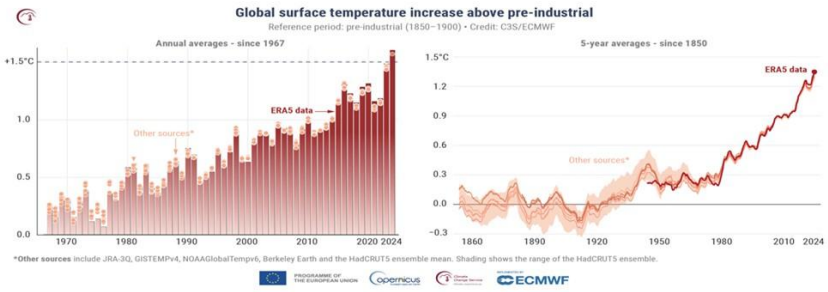
Klimaneutrales Deutschland - Status, Perspektiven, Herausforderungen und Chancen

19. November 2025

Prof. Dr. Manfred Fischedick

Präsident und wissenschaftlicher Geschäftsführer Wuppertal Institut
Wissenschaftlicher Vorstand Johannes Rau Forschungsgemeinschaft

Klimawandel – eine globale Herausforderung und bisher zu geringe Gegenmaßnahmen



Die globale Perspektive
Zentrale Entwicklungen in der Übersicht

Wuppertal Institut

- *Die globalen Klimaschutzziele sind auf der Pariser Klimaschutzkonferenz vor 10 Jahren von der Staatengemeinschaft klar formuliert worden (die Erhöhung der Weltmitteltemperatur soll 1,5° C gegenüber dem vorindustriellen Niveau nicht überschreiten, in jedem Fall aber „well below 2°C" gehalten werden)*
- **Paris 2015:** Zum ersten mal wurde im Rahmen int. Verhandlungen ein **Vertrag abgeschlossen, der Klimaschutzaktivitäten aller (!) Länder umfasst** (u.a. durch Fokussierung auf freiwillige Maßnahmen (INDC: intended national determined contribution)
- Zielsetzung **Begrenzung der Klimaerwärmung auf deutlich unter (!) 2°C** (inkl. Vereinbarung Anstrengungen zu unternehmen, die Erwärmung auf 1,5°C zu begrenzen)





COP21 · CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE

3

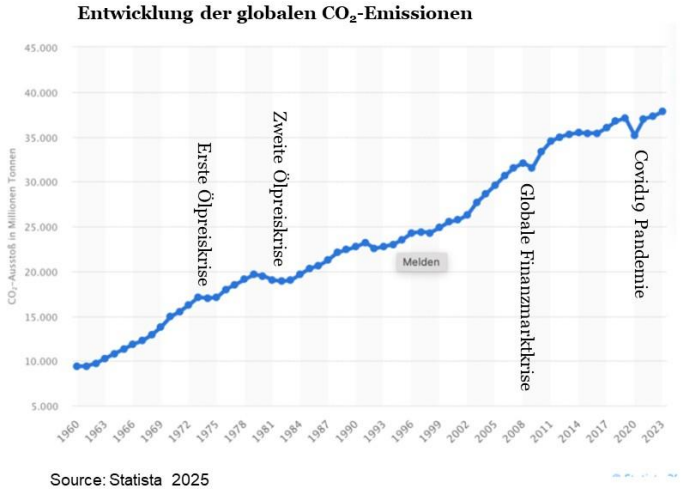
Die globale Perspektive
Zentrale Entwicklungen in der Übersicht

Wuppertal Institut

...und wie sieht die Realität aus?

Entwicklung der globalen Treibhausgasemissionen geht nach wie vor in die falsche Richtung wenn auch zeitweise (relativ) langsamer als in früheren Jahrzehnten

Fortgesetzter Emissionsanstieg führt zu Verstärkung des Klimawandels – **Trendumkehr dringend notwendig**



Source: Statista 2025

4

Die globale Perspektive
Zentrale Entwicklungen in der Übersicht

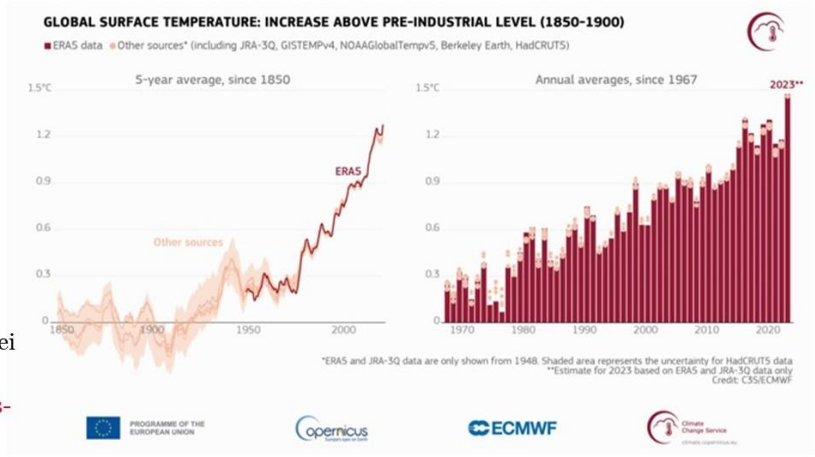
Wuppertal Institut

...und wie sieht die Realität aus?

2024 war das wärmste Jahr seit mindestens 100.000 Jahren – die globale Mitteltemperatur lag um mehr als 1,5 °C oberhalb des vorindustriellen Niveaus und überschritt damit zum ersten Mal eine der Zielmarken des Pariser Klimaschutzabkommens

2025 wird vermutlich unter den drei bisher wärmsten Jahren liegen

Die durchschnittliche Erwärmungsrate liegt derzeit bei 0,27° pro Jahrzehnt und damit doppelt so hoch wie in den 1970er Jahren



Source: EU Copernicus 2024

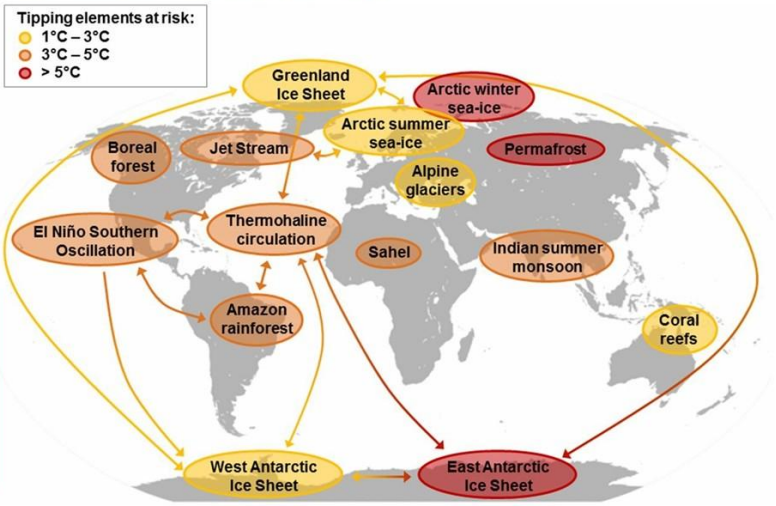
5

Die globale Perspektive
Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel und die Folgen

Wuppertal Institut

Setzt sich der Klimawandel ungehindert fort, besteht die hohe Wahrscheinlichkeit unumkehrbarer Entwicklungen (Kippmomente) und von Verstärkungsmechaninsmen

Der **erste systemische Kipppunkt ist bereits überschritten:** Die für die Artenvielfalt so wichtigen **tropischen Warmwasserkorallen** sterben global und unumkehrbar ab.



Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., Lenton, T. M., Folke, C., Liverman, D., Summerhayes, C. P., Barnosky, A. D., Cornell, S. E., Crucifix, M., Donges, J. F., Fetzer, I., Lade, S. J., Scheffer, M., Winkelmann, R., & Schellnhuber, H. J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(33), 8252–8259. https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115

6

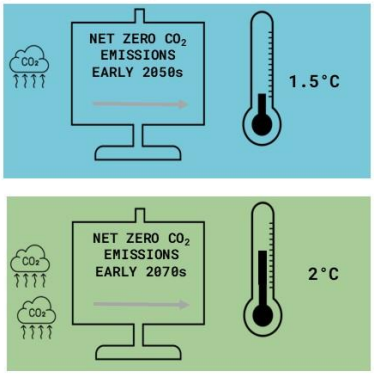
Die globale Perspektive

Weltklimarat (IPCC übersetzt Temperaturziele in notwendige Minderungspfade

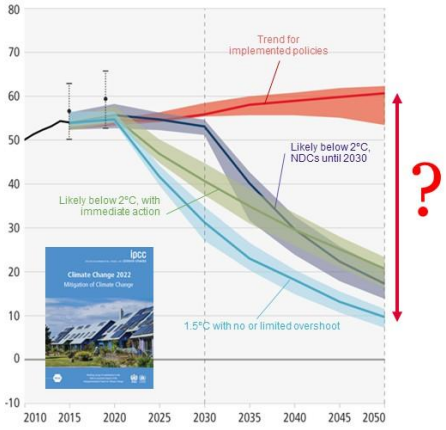
Wuppertal Institut

- Zum Erreichen der internationalen Klimaschutzziele (Paris Agreement 2015), die auf einen „verträglichen" Minderungspfad einschwenken, braucht es eine drastische Minderung der Treibhausgasemissionen

When reaching net zero carbon dioxide emissions is necessary to limit increase of global surface temperature



Source: IPCC WG III Assessment Report 2022



7

Die globale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel und die Akteure

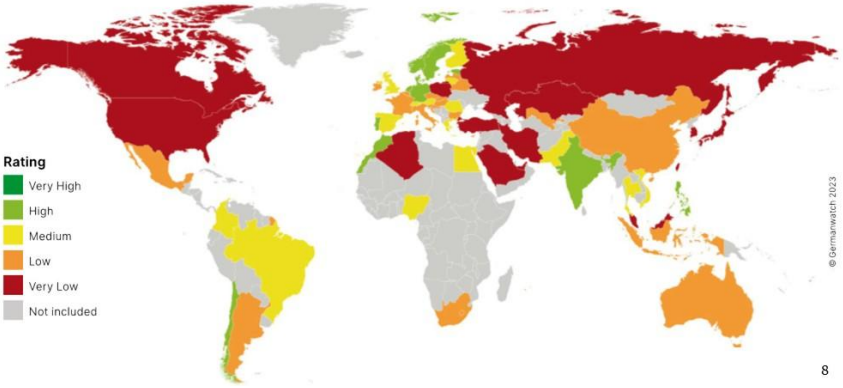
Wuppertal Institut

- Auf der Basis der heute implementierten Politikinstrumente sind wir noch **deutlich von der Zielerreichung entfernt** - Ambitionssteigerung erforderlich - aktuell liegen wir mit 2,6 bis 2,8°C deutlich (!) über einem 2°C-Kurs und **es gibt eigentlich keinen ausreichend ambitionierten Klimaschutzvorreiter**
- **Gerade die größten Emittenten bleiben hinter den Erwartungen zurück** und sind nicht ambitioniert genug, selbst für das Erreichen einer „well below 2°C" Zielsetzung

Laut Climate Action Tracker gibt es kaum wirkliche Klimaschutzvorreiter weltweit

COP30 BRASIL AMAZÔNIA BELÉM 2025

Auf der COP 30 müssen die Länder ambitioniertere Ziele (NDCs) vorlegen – bisher sind die Signale aber eher schwach



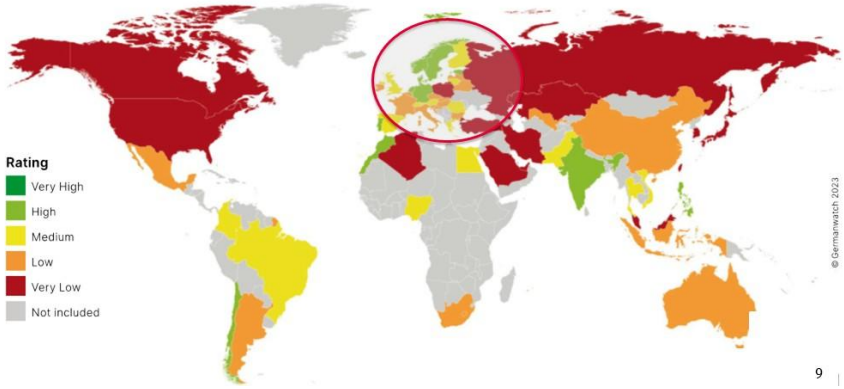
8

Die globale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel und die Akteure

Wuppertal Institut

- Mit den Entscheidungen zum Klimaschutzziel 2040 und dem darauf basierenden NDC 2035 hat auch die **EU (EU Umweltministerrat)** am 05. November 2025 **nicht das erhoffte positive Signal gesetzt** und zudem **verschiedene Schlupflöcher** eingebaut
- Bis 2040 sollen die Treibausgasemissionen um 90% sinken, davon dürfen aber 5% Punkte über den Zukauf von internationalen Emissionszertifikaten erfüllt werden, die sich in der Vergangenheit als nicht glaubwürdig erwiesen haben.
- Hinzu kommen Überprüfungsschleifen bezogen auf den Minderungsbeitrag natürlicher Senken (z.B. Wälder), die zu einer Abschwächung der Ziele führen können, wenn er nicht erreicht werden kann.
- Grundsätzlich wollen die Staaten das 2040 Ziel alle zwei Jahre überprüfen.



9

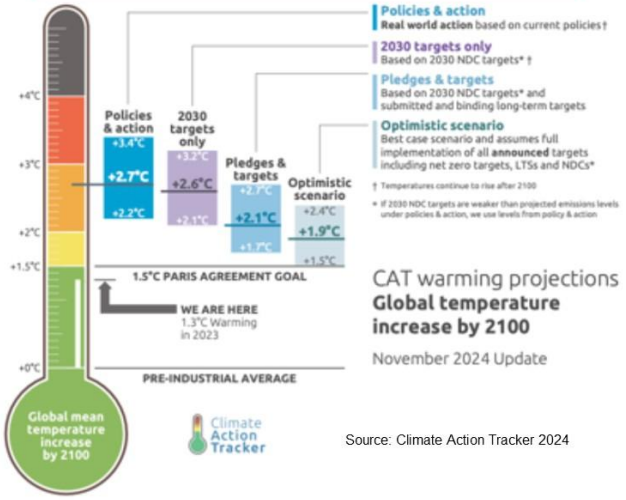
Die globale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel und die Akteure

Wuppertal Institut

- Im Rahmen der bisherigen internationalen Klimakonferenzen haben mehr **als 130 Länder formale Minderungsfahrpläne** (NDCs) für das Jahr 2030 eingereicht – das führt auf einen 2,6 Grad Pfad
- Viele Länder haben **zusätzlich langfristige THG-Neutralitätsziele vorgelegt** (für 2050 – EU, US, 2060 – China, 2070 Indien) → dies wird (falls die Vorgaben vollständig und erfolgreich umgesetzt werden) den Temperaturanstieg bestenfalls auf 1,9°C begrenzen*.
- Im Rahmen der COP 30 müssen die Länder **neue NDCs für 2035** vorlegen – **Ambitionsniveau** wird mit hoher Wahrscheinlichkeit **deutlich zu gering sein**

Kann die COP 30 ein Signal für die Trendumkehr aussenden – NDC-Bilanz bisher enttäuschend



Source: Climate Action Tracker 2024

* Bandbreite ist auf Unsicherheiten zurückzuführen (z. B. hinsichtlich der Bezugsbasis, d. h. CO_2- oder THG-Neutralität).

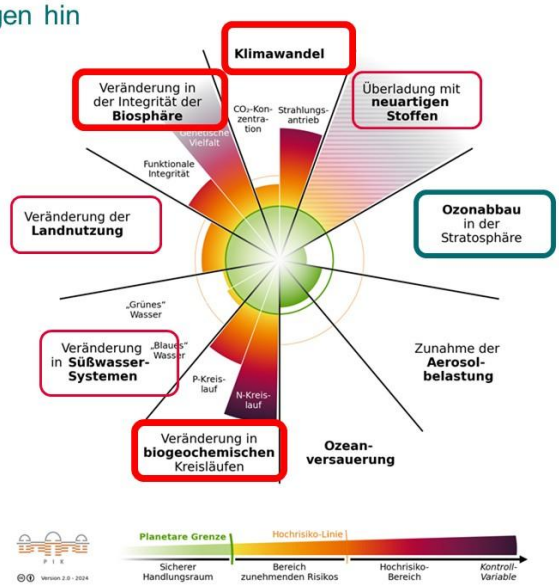
10

Die globale Perspektive

Auch das Konzept der planetaren Grenzen weist deutlich auf die Problemlagen und Grenzüberschreitungen hin

Wuppertal Institut

Sechs (!) der neun planetaren Grenzen werden aktuell (zum Teil deutlich) überschritten



Der aktuelle Stand der neun Systeme und Prozesse mit Planetaren Grenzen. Daten aus dem Planetary Health Check 2024. Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., Bloh, W. von, Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. Science Advances, 9(37), eadh2458. https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458

11

Die globale Perspektive

Neben den ökologischen Grenzen gibt es eine Vielzahl an weiteren bestimmenden Risikofaktoren

Wuppertal Institut

- Ergänzend zu den (ökologischen) "planetaren Grenzen" ist eine Vielzahl weiterer Faktoren zu beachten (z.B. geopolitische Risiken, ges. Polarisierung, Re-Nationalisierungstendenzen)
- Hinzu kommen für die Wirtschaft weitere Problemfaktoren wie
  - Wettbewerbsfähigkeit
  - Beitrag zur (nationalen) Versorgungssicherheit
  - Sicherung von Beschäftigung
  - .....

und für die Gesellschaft

- soziale Problemlagen wie zunehmende soziale Ungleichheiten



Source: WEF Global Risk Report 2025

Global Risk Report 2025 des World Economic Forums - WEF befragt regelmäßig Entscheidungsträger*innen nach ihrer aktuellen Risikoeinschätzung

12

Die globale Perspektve

Ausgewählte Problemlagen – Verdrängungseffekte und Leugnen wissenschaftlicher Erkenntnisse

- **Beispiel:** Leugnen oder mindestens Verharmlosen des Klimawandels der US Regierung: die **US-Umweltschutzbehörde (EPA) hat Ende Juli 2025 offiziell vorgeschlagen, Treibhausgasemissionen nicht mehr als gesundheitsschädlich einzustufen**.
- Der Leiter der EPA will die sogenannte **„Gefährdungsfeststellung" (Endangerment Finding) aus dem Jahr 2009 kippen** – die Folge wäre eine „riesige" Deregulierungswelle und das Aussetzen von wichtigen ökologischen Standards, anders ausgedrückt ein Anstieg der Treibhausgasemissionen.
- Hier gilt es mit robusten wissenschaftlichen Erkenntnissen gegenzuhalten, die Herausforderungen aufzunehmen **aber auch und gerade die Chancen zu betonen, die mit den anstehenden Transformationsprozessen verbunden sind**. Durch den Inflation Reduction Act (IRA) sind in der letzten Legislaturperiode zehntausende in den USA „grüne" Jobs geschaffen worden.



U.S. INTERNATIONAL CANADA ESPAÑOL 中文

The New York Times

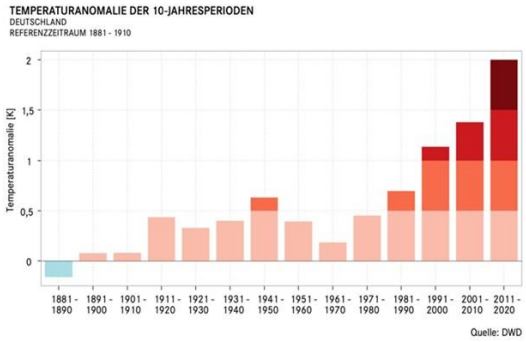
An E.P.A. Plan to Kill a Major Climate Rule Is Worrying Business Leaders

Some carmakers and energy executives say the plan would trigger costly litigation and spur individual states to create a patchwork of tighter rules.

Source: Bericht der NY Times vom 25.10.2025

13

Der Klimawandel ist längst auch in Deutschland angekommen



14

Die nationale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel

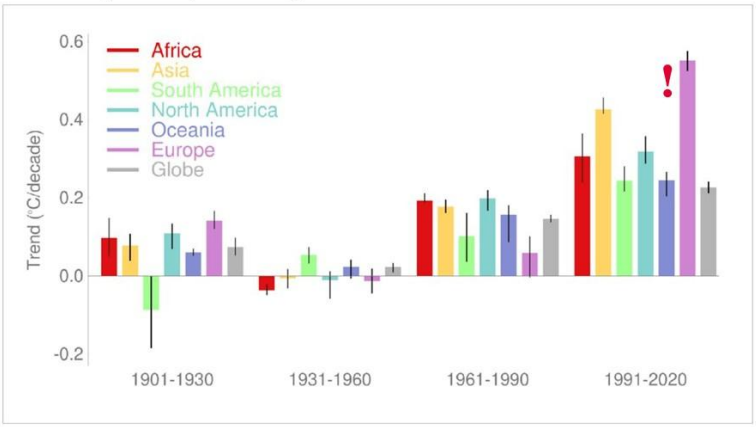
Wuppertal Institut

Besonders schnell erwärmen sich die Temperaturen an Land, auch wenn die Ozeane rund 91% der zusätzlichen Energie aufnehmen

Rückgang der großen Schnee- und Eismassen führen zu einer höheren Strahlenabsorption (daher starke Erwärmung im Norden Europas)

Klimawandel ist daher auch längst in Deutschland und Europa angekommen und zeigt sich z. B. in einer gegenüber dem globalen Mittel überproportionalen Temperatur-erhöhung (in Deutschland liegt diese bei rund 2°C)

Änderung der globalen Mitteltemperatur im kontinentalen Vergleich über vier Klimaperioden (WMO 2025)



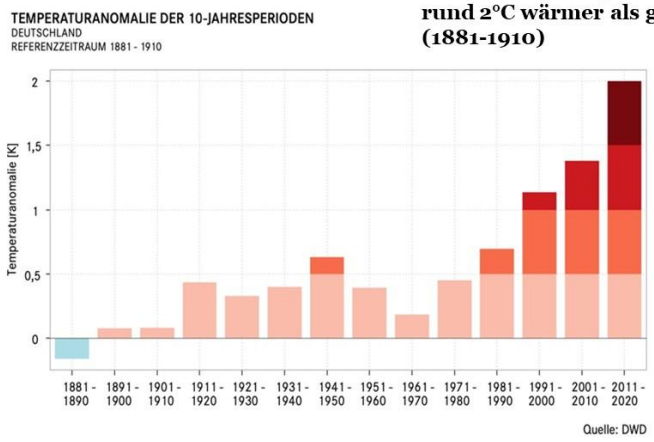
© World Meteorological Organization, WMO (2022)

15

Die nationale Perspektive

Der Klimawandel ist längst auch in Deutschland angekommen

Wuppertal Institut



Die mittlere Temperatur ist in Deutschland bereits heute rund 2°C wärmer als gegenüber der Referenzperiode (1881-1910)

- Seit der systematischen und flächendeckenden Wetteraufzeichnung (ab 1881), hat sich die mittlere Temperatur der bodennahen Luft in Deutschland deutlich erhöht.
- So war das zurückliegende Jahrzehnt (2011-2020) circa 2 °C wärmer als die ersten Jahrzehnte der Aufzeich-nungen. Tendenz in den 2020er Jahren weiter steigend!
- Seit den 1960er Jahren war jedes Jahrzehnt in Deutschland deutlich wärmer als das vorherige.

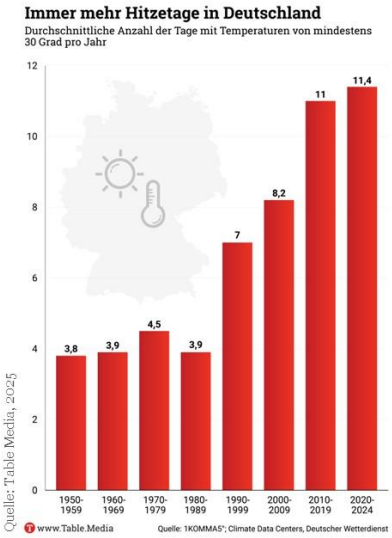
16

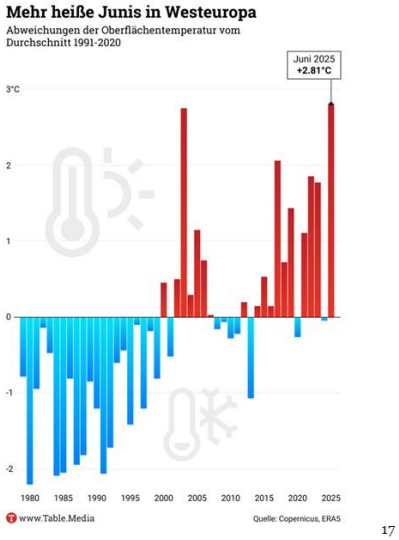
Die nationale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel

Wuppertal Institut

Die Folgen des Klimawandels werden auch in Deutschland und Europa immer deutlicher und lassen sich längst auch aus Statistiken ablesen





17

Die nationale Perspektive

Ausgewählte Problemlagen – der Klimawandel und die Folgen - auch Unternehmen sind durch den Klimawandel längst mit erheblichen Risiken konfrontiert

Wuppertal Institut

	MATERIELL	IMMATERIELL
DIREKT	 • Zerstörte Gebäude und Infrastrukturen • Produktionseinbußen wegen Ausfall von Arbeitnehmenden • Ernteausfälle in der Landwirtschaft • Ertragseinbußen in der Forstwirtschaft • Gesundheitskosten	 • Tote • Gesundheitliche Beeinträchtigungen • Beeinträchtigung des Wohlbefindens • Verlust der heimischen Artenvielfalt • Beeinträchtigung von Ökosystemen
INDIREKT	 • Produktionseinbußen wegen Problemen bei Zulieferern • Absatzeinbußen wegen Nachfragerückgang	 • Verlust globaler Artenvielfalt • Beeinträchtigung des Landschaftsbilds • Psychische Belastungen durch Verlust oder Belastung von Angehörigen • Politische Instabilität

Quelle: Hirschfeld et al. (2021a)

18

Wuppertal Institut

Wo stehen wir heute mit Energiewende und Klimaschutz in Deutschland – ist das Glas halb voll oder halb leer?



19

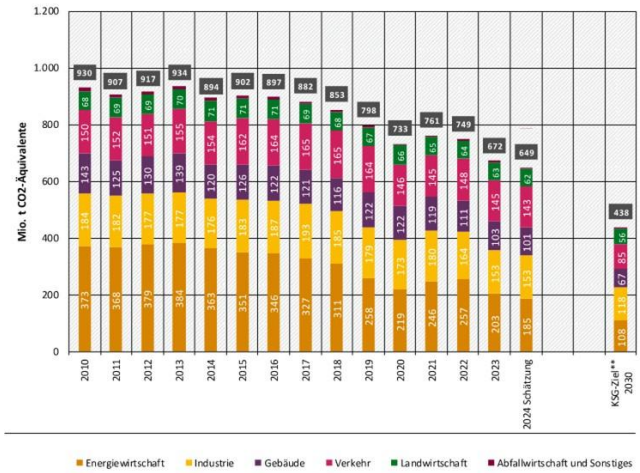
Herausforderung Klimaschutz in Deutschland

Wuppertal Institut

Wo stehen wir heute mit der Energiewende und dem Klimaschutz in Deutschland – ist das Glas halb voll oder halb leer?

Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland

in der Abgrenzung der Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG) *



Von 1990 bis 2024 konnten die THG-Emissionen um ca. 48% gg. 1990 gesenkt werden – damit ist in etwa die Hälfte des Weges zur gesetzlichen Zielvorgabe THG-Neutralität 2045 erreicht

Ist das Glas halb voll oder halb leer – 48% Minderung in 34 Jahren und jetzt zusätzliche 52%-Punkte in 21 Jahren -> drastische Beschleunigung notwendig

Quelle: Umweltbundesamt, März 2025

20

Herausforderung Klimaschutz in Deutschland

Wuppertal Institut

Wo stehen wir heute mit der Energiewende und dem Klimaschutz in Deutschland – ist das Glas halb voll oder halb leer?

Tabelle 1: Entwicklung der Emissionen in den Sektoren

KSG Sektor	Emissionen 2024 in Mio. t CO_2-Äqui.	Differenz ggü. Vorjahr in Mio. t & %	Über- bzw. Unterschreitung in Mio. t CO_2-Äqui.
Energiewirtschaft	185	-17,6 (-8,7%)	./.
Industrie	153	+0,08 (+0,1%)	-15,8
Gebäude	100,5	-2,4 (-2,3%)	+4,7
Verkehr	143,1	-2,1 (-1,4%)	+18,1
Landwirtschaft	62,1	-0,8 (-1,3%)	-4,9
Abfallwirtschaft und Sonstiges	5,4	-0,1 (-2,5%)	-3
GESAMT (JEGM)	649	-23 (-3,4%)	-44,3

- In 2024 sind die THG-Emissionen um etwas mehr als 3% gesunken, vor allem aufgrund eines erneuten Rückgangs der THG-Emissionen in der Energiewirtschaft (Hintergrund: Ausbau erneuerbarer Energien, Rückgang Kohleverstromung, geringerer Stromverbrauch und deutlich erhöhter Stromimport-/export-Saldo, konjunkturelle Schwächephase etc.)

Quelle: Umweltbundesamt, März 2025

21

Herausforderung Klimaschutz in Deutschland

Wuppertal Institut

Wo stehen wir heute mit der Energiewende und dem Klimaschutz in Deutschland – ist das Glas halb voll oder halb leer?

Tabelle 2: Entwicklung der Treibhausemissionen (ohne LULUCF) seit 2015 in Prozent

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Veränderung ggü. 1990	-28,0	-28,4	-29,6	-31,9	-36,3	-41,5	-39,2	-40,2	-46,3	-48,2
Veränderung ggü. Vorjahr	+0,9	-0,5	-1,7	-3,3	-6,4	-8,2	+3,9	-1,7	-10,3	-3,4

Quelle: Umweltbundesamt, März 2025

- Die Treibhausgasemissionen sind vor allem im Jahr 2020 (Effekt der Covid19-Pandemie) und 2023 (Effekt hoher Energieträgerpriese und schwacher Konjunktur) sehr deutlich gesunken (dauerhaft wirkte der Ausbau erneuerbarer Energien emissionsreduzierend)
- Für das **Erreichen des im Klimaschutzgesetz festgelegten THG-Minderungsziels** für 2030 (65% gg. 1990) ist eine **deutliche Beschleunigung (Verdopplung) der durchschnittlichen jährlichen absoluten Minderung erforderlich**
  - 17,7 Mio t CO_{2eq}/a zwischen 1990 und 2024
  - 35,2 Mio t CO_{2eq}/a zwischen 2025 und 2030 und dann von rund 30 Mio. t CO_{2eq}/a von 2030 bis 2045 (und Achtung – je näher man an die Nulllinie herankommt desto schwerer erreichbar werden im Allgemeinen die Minderungseffekte)
- Der **Projektionsbericht des UBA** (März 2025) geht auf der Basis der aktuellen und absehbaren Maßnahmen **von einer Verfehlung des 2030 Klimaschutzziels** aus und erwartet eine Minderung von 63% statt 65%

22

Wuppertal Institut

Was sind die zentralen nächsten Schritte für das Erreichen der Klimaschutzziele



23

Herausforderung Klimawandel - in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut

Die fünf großen Transformationsstudien der letzten Jahre („big five“) zeigen mögliche Wege zur Zielerreichung – alle Studien kommen trotz unterschiedlicher Auftraggeber zu ähnlichen (robusten) Ergebnissen








Titel der Studie	Klimaneutrales Deutschland 2045	dena-Leitstudie – Aufbruch Klimaneutralität	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3	Klimapfade 2.0
Erscheinungsdatum	April 2021 **und Oktober 2024**	Oktober 2021	Mai 2021	Oktober 2021
Auftraggeber	Agora Energiewende, Agora Verkehrswende, Stiftung Klimaneutralität	dena	BMWi	BDI
Bearbeitung durch	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut	dena	Consentec, Fraunhofer ISI, ifeu, TU Berlin	BCG
Klimaschutzszenarien	KN2045*	KN100* sowie vier Varianten	TN-Strom*, TN-H2*, TN-PtG/PtL	Zielpfad*
THG-Neutralität bis	**2045**	**2045**	**2050**	**2045**

** Diese Szenarien sowie weitere Analysen vom Ariadne, UBA, Kopernikus Projekt und Forschungszentrum Jülich sind in die vorliegende Metaanalyse eingeflossen.*

24

Herausforderung Klimawandel - in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Die Studie Klimaneutrales Deutschland – eine der „big five“ Transformationsstudien zeigt einen denkbaren Weg (Oktober 2024)

Wuppertal Institut



Studie **„Klimaneutrales Deutschland 2045“**, gemeinsam in Auftrag gegeben von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität

Durchgeführt von Prognos/Öko-Institut/ Wuppertal-Institut (Oktober 2024)

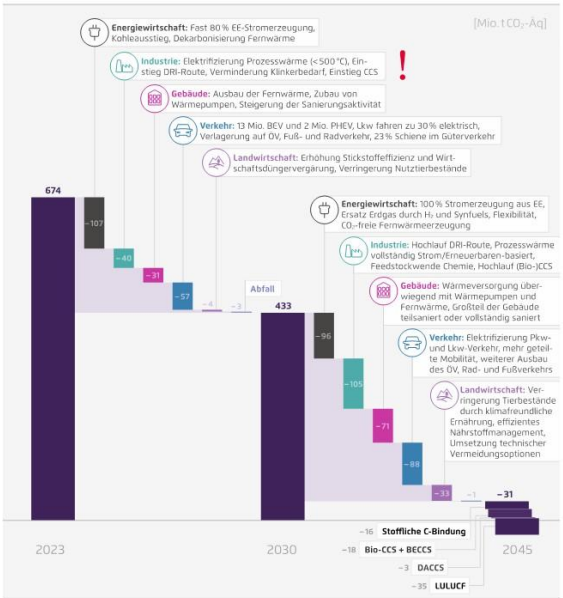
Auftrag: Analyse der Umsetzbarkeit einer Ambitionssteigerung im Bereich Klimaschutz der Bundesregierung (Klimaneutralität 2045) in Ergänzung zu der Mitte 2020 erschienenen Studie

Ziel: Vorlegen eines Pfads in Richtung Klimaneutralität unter Berücksichtigung von Kosteneffizienz und Akzeptanz

Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

25

Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland 2024



Agora Energiewende, Prognos, Wuppertal Institut, Öko-Institut und Universität Kassel (2024). BEV = Batterieelektrische Fahrzeuge, C = Kohlenstoff, CCS = Carbon Capture and Storage, DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage, DRI = Stahlproduktion: Direktreduktion von Eisenerz durch Wasserstoff und Erdgas, EE = Erneuerbare Energien, H_2 = Wasserstoff, LULUCF = Land Use, Land Use Change, and Forestry, ÖV = Öffentlicher Verkehr, PHEV = Plugin-Hybride

Herausforderung Klimawandel

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut



Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

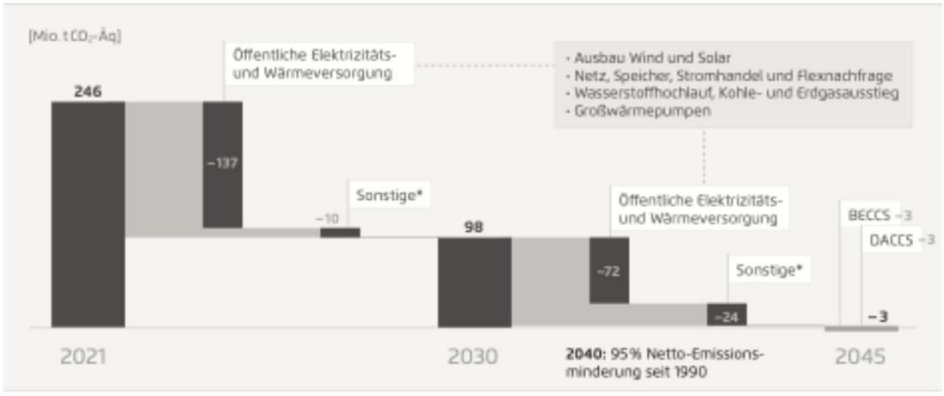
26

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut

Energiewirtschaftssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen → Abb. C



Agora Energiewende und Prognos (2024). *Mineralölraffinerien (CRF 1.A.1.b), Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (CRF 1.A.1.c), diffuse Emissionen (1.B), Pipelinetransporte (1.A.3.e); BECCS = Bioenergy with Carbon Capture and Storage; DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage

Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

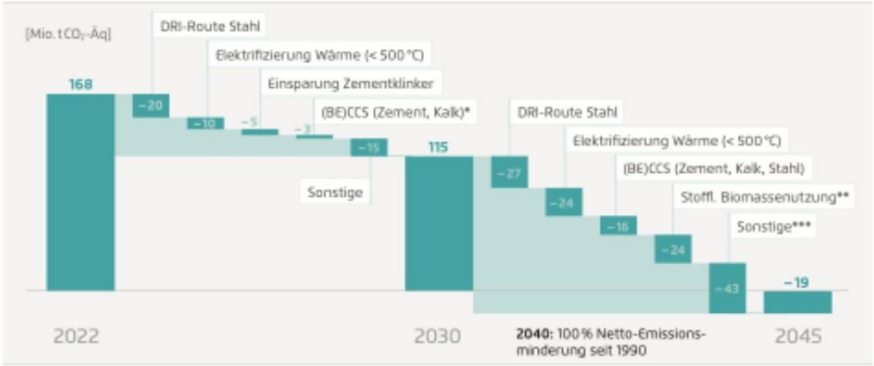
27

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut

Industriesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen → Abb. E



Agora Industrie, Wuppertal Institut, Universität Kassel und Prognos (2024). *(BE)CCS = Abscheidung und Speicherung von Prozessemissionen und von CO_2 aus der Nutzung von Bioenergie; **stoffliche Biomassenutzung umfasst auch die Abscheidung und Speicherung überschüssiger CO_2-Mengen in der Biomasseverarbeitung; ***Sonstige: Elektrifizierung > 500°C sowie weitere Energieträgerwechsel und Maßnahmen zur Treibhausgasvermeidung

Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

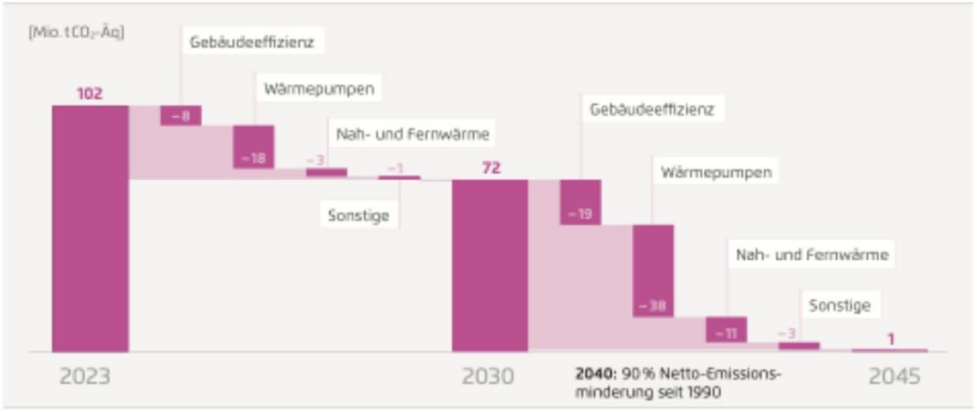
28

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut

Gebäudesektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen → Abb. F



Agora Energiewende und Prognos (2024)

Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

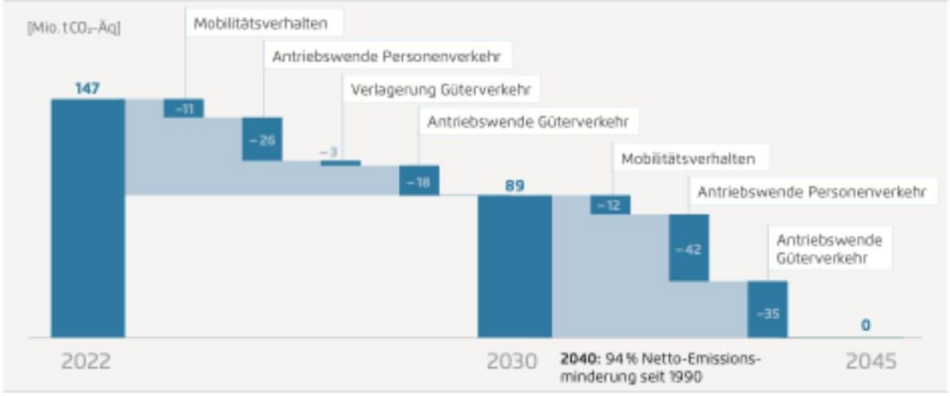
29

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut

Verkehrssektor – Reduktion der Treibhausgasemissionen → Abb. G



Agora Verkehrswende und Öko-Institut (2024)

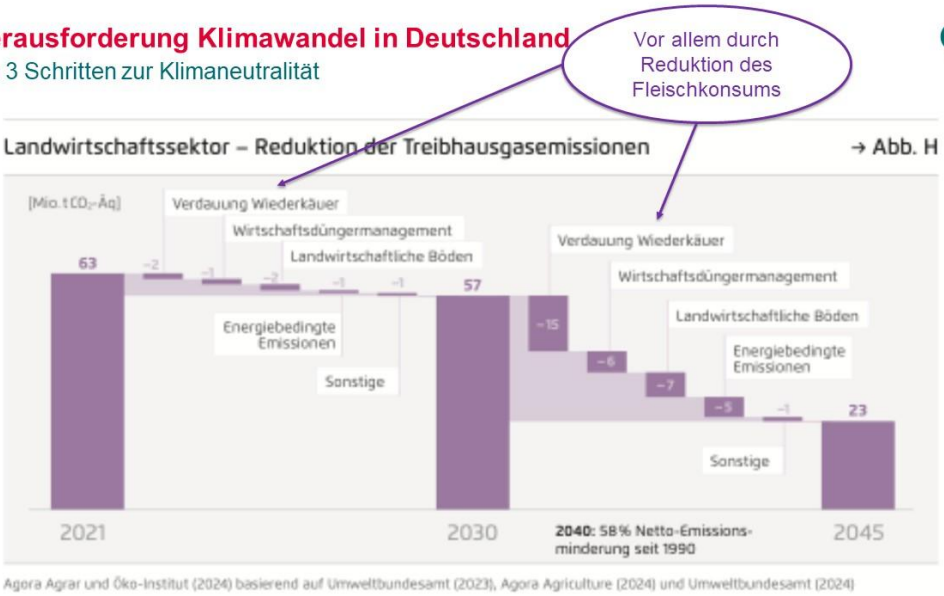
Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

30

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Wuppertal Institut



Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

31

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität – was sind zusammengefasst die zentralen Strategien

Wuppertal Institut

SEKTOR	STRATEGIE
Energiewirtschaft	• Weiterer Ausbau der Photovoltaik • Weiterer Ausbau der Windenergie • Stärkere Nutzung klimaneutraler Energien in der Nah- und Fernwärme
Wärme und Gebäude	• Austausch von Heizungen im Gebäudebestand • Erhöhung der Sanierungsraten und -tiefen im Gebäudebestand
Verkehr	• Modal Shift im Personenverkehr • Hochlauf der E-Mobilität (E-Pkw und E-Nutzfahrzeuge) • Verringerung der Personen- und Tonnenkilometer
Wirtschaft/Industrie	• Transformation der Primärstahlerzeugung hin zu Direktreduktionsanlagen • Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung • CO_2-Abscheidung und -Speicherung (CCS) im Industriesektor
Landwirtschaft & LULUCF	• Veränderung von Ernährungsstilen und Reduktion der Tierbestände • Wiedervernässung trockengelegter Moorböden • Erhalt und Steigerung der Kohlenstoffbindung des Waldes
Sektorübergreifend	• Energetische Nutzung von klimaneutralem Wasserstoff (ohne Primärstahl) • Stärkung der Kreislaufwirtschaft

Quelle: Wuppertal-Institut (2025)

32

Ausgewählte Kernelemente der Transformation

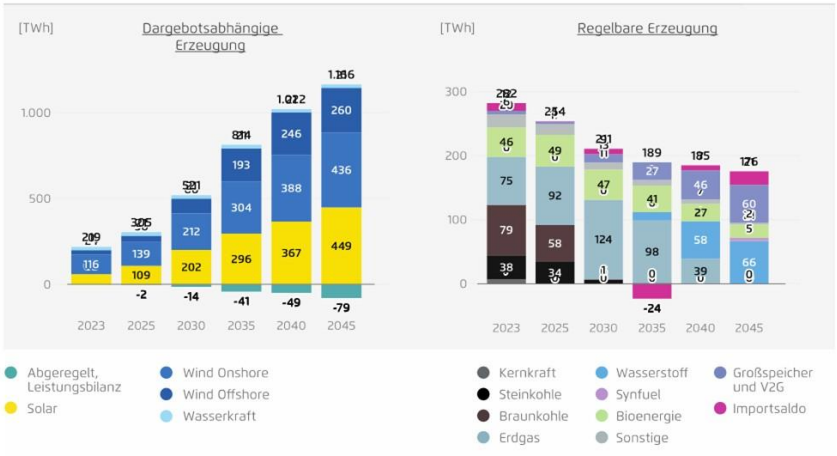
33

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Szenarien zeigen unabhängig von kurzfristigen Entwicklungen mittel- bis langfristig einen deutlichen EE-Ausbaubedarf

Nettostromerzeugung und Importsaldo



Agora Energiewende und Prognos (2024), historische Daten 2023: AGEE Stat (2024), AGEB (2023). V2G = Vehicle to Grid

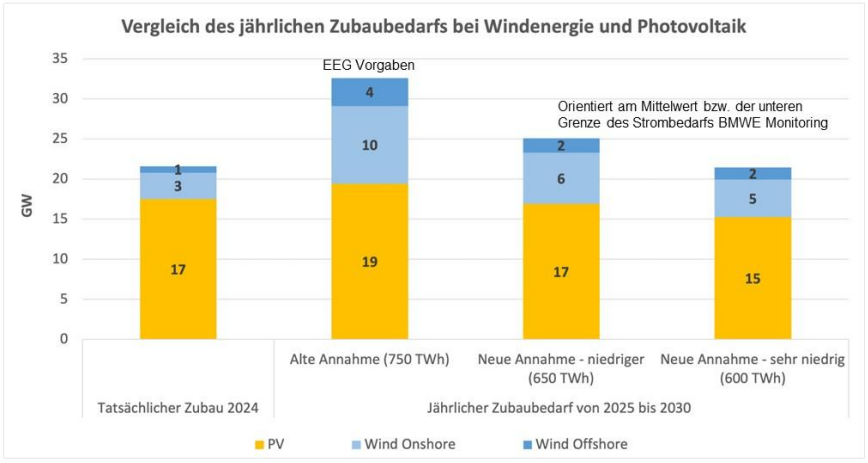
34

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Weiterer dynamischer Ausbau erneuerbarer Energien notwendig - ungeachtet der aktuellen politischen Diskussion um das Monitoring der Energiewende (September 2025) und die Frage der Stromnachfrage in 2030



- Selbst bei einer Orientierung an der unteren Grenze der Strombedarfserwartungen des BMWE ergibt sich ein mindestens so hoher EE-Ausbaubedarf wie heute
- Aber Achtung: der aktuell niedrigere als erwartete Strombedarf kann nicht (!) fortgeschrieben werden
- Mit Konjunkturerholung, zunehmender Ausbaudynamik el. Wp und E-Fzg sowie KI ist die Bedarfszunahme nur verschoben

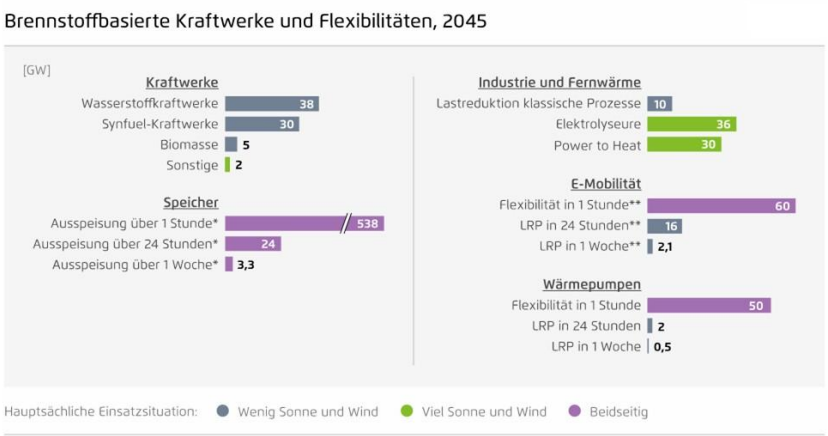
35

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Flexibilitätsoptionen (inkl. systematisches Lastmanagement) kommt eine zentrale Bedeutung zu (-> es braucht mehr als neue Kraftwerke – Kapazitätsmarkt muss entsprechend technologieoffen gestaltet werden)



Agora Energiewende und Prognos (2024). *Großspeicher und Heimspeicher; **durchschnittlicher Ladestand der E-PKW nach der Woche 20 %; LRP = Lastreduktionspotenzial

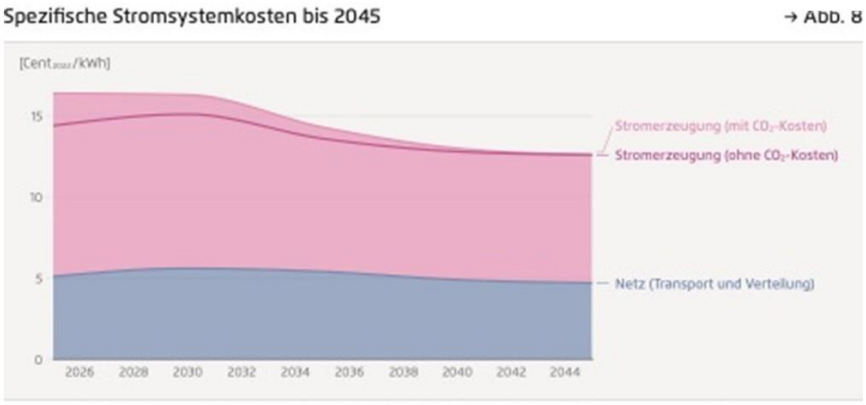
36

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

Wuppertal Institut

- Positive Entwicklung der Stromkosten über den Zeitverlauf durch weiteren dynamischen EE-Ausbau zu erwarten durch sinkende Kosten erneuerbarer Energien und Verteilung der Stromnetzkosten auf eine deutlich größere (ca. Faktor 2) Stromverbrauchsmenge



Agora Energiewende und Prognos (2024). H_2-Netzkosten sind anteilig in den Brennstoffkosten der Stromerzeugung enthalten.

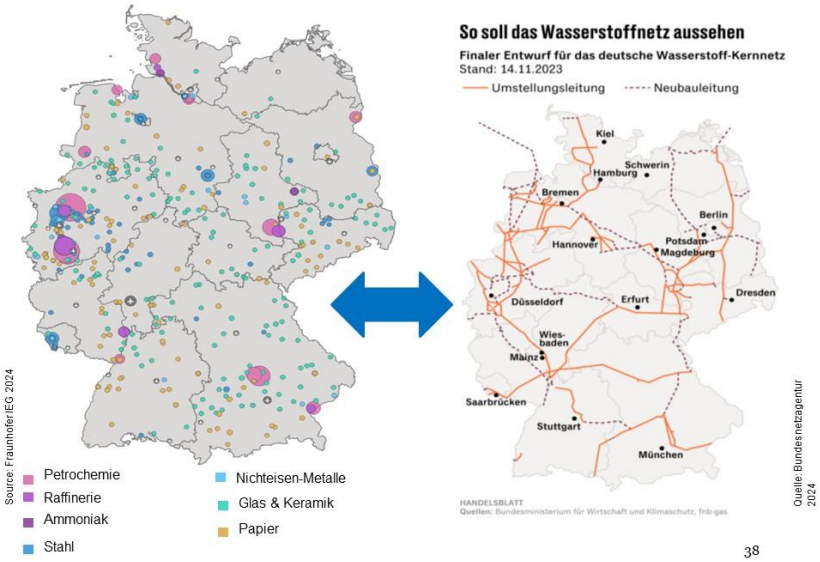
37

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

Wuppertal Institut

- Weiterer dynamischer Ausbau erneuerbarer Energien
- Konsequente Umsetzung einer sektorübergreifenden Elektrifizierungsstrategie
- Sukzessive Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft (inkl. Aufbau von tragfähigen, resilienten Importstrukturen)
- …



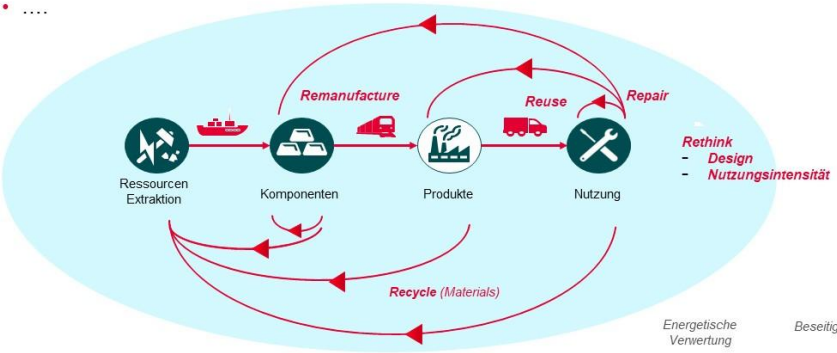
38

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

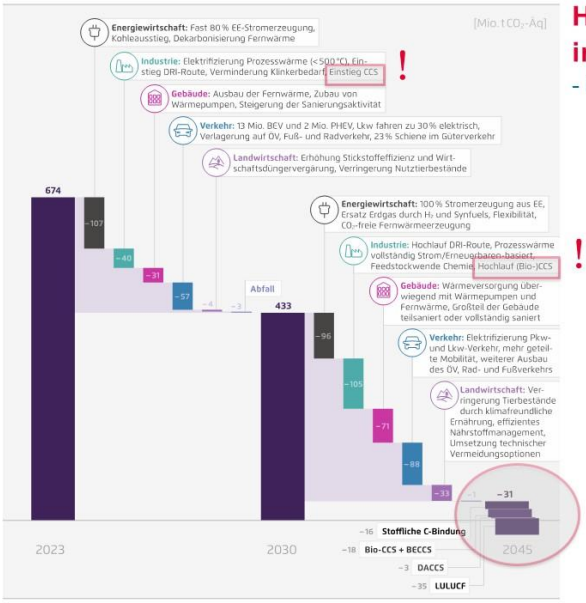
Was sind die nächsten zentralen Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Weiterer dynamischer Ausbau erneuerbarer Energien
- Konsequente Umsetzung einer sektorübergreifenden Elektrifizierungsstrategie
- Sukzessive Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft (inkl. Aufbau von tragfähigen, resilienten Importstrukturen)
- Umsetzung einer Carbon Management Strategie (CCS, CCU, CDR, C-Quellen in einem postfossilen Zeitalter) und Aufbau CO_2-Infrastruktur, Kohlendioxidspeichergesetz
- Umsetzung einer weitgehenden Kreislaufwirtschaftsstrategie
- ….



39

Maßnahmen im Szenario Klimaneutrales Deutschland 2024



Agora Energiewende, Prognos, Wuppertal Institut, Öko-Institut und Universität Kassel (2024). BEV = Batterieelektrische Fahrzeuge, C = Kohlenstoff, CCS = Carbon Capture and Storage, DACCS = Direct Air Carbon Capture and Storage, DRI = Stahlproduktion: Direktreduktion von Eisenerz durch Wasserstoff und Erdgas, EE = Erneuerbare Energien, H_2 = Wasserstoff, LULUCF = Land Use, Land Use Change, and Forestry, ÖV = Öffentlicher Verkehr, PHEV = Plugin-Hybride

Herausforderung Klimawandel in Deutschland

Wuppertal Institut

- in 3 Schritten zur Klimaneutralität

Selbst wenn alle Maßnahmen in allen Sektoren umgesetzt werden bleiben „nicht vermeidbare“ Emissionen in erheblicher Größenordnung übrig – die

- über **Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Capture and Use (/CCU)** Ansätze vermieden werden müssen
- oder über **Carbon Dioxide Removal** (CDR) Technologien kompensiert werden müssen

40

Was sind überhaupt nicht oder nur schwer vermeidbare THG-Emissionen?

Für diese Emissionen braucht es Kompensationsmaßnahmen um Treibhausgasneutralität zu erreichen

Wuppertal Institut



Quelle: Stiftung Wissenschaft und Politik 2023

41

Wuppertal Institut

Klimaschutz ist nicht zum Nulltarif zu haben – rechnet sich aber vor allem dann wenn man vermiedene Kosten und Risiken gegenrechnet



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

42

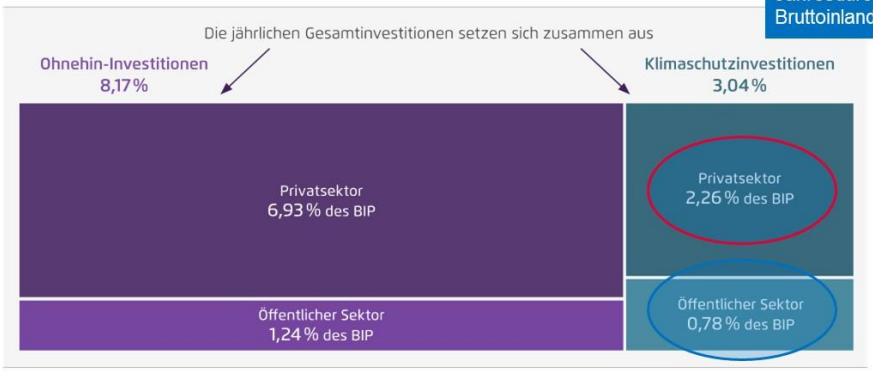
Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

Was sind wichtige flankierende Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Klares Bekenntnis zu den Zielen des Klimaschutzgesetzes und klarer Umsetzungskurs (Planungssicherheit statt Zick Zack Kurs) – Finanzierungsanreize sicherstellen (Sondervermögen 2025 – 2037 hilfreich aber nicht ausreichend)

Das Investitionsvolumen liegt im Jahresdurchschnitt bei 11,2 % des Bruttoinlandsprodukt



Die zusätzlich für den Klimaschutz nötigen Investitionen belaufen sich von 2025 bis 2045 auf rund 3 Prozent des BIP beziehungsweise auf 147 Milliarden Euro jährlich. Davon sind der Großteil private Investitionen; ein Viertel – rund 38 Milliarden – entfallen auf die öffentliche Hand (eigene Gebäude, Förderprogramme).

Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

43

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

Was sind wichtige flankierende Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Klares Bekenntnis zu den Zielen des Klimaschutzgesetzes und klarer Umsetzungskurs (Planungssicherheit statt Zick Zack Kurs) – Finanzierungsanreize sicherstellen (Sondervermögen 2025 – 2037 hilfreich aber nicht ausreichend)

Das Investitionsvolumen liegt im Jahresdurchschnitt bei 11,2 % des Bruttoinlandsprodukt

Wichtig: Zusatzinvestitionen sind nicht (!) Zusatzkosten – Einsparung durch Minderverbrauch fossiler Energieträger (Einfuhr von fossilen ET kostete in 2024 rund 83 Mrd. €) und positive volkswirtschaftliche Effekte (Versorgungssicherheit, Innovations- und Beschäftigungsdynamik) und (!) vermiedene Schadens- und Anpassungskosten berücksichtigen



Die zusätzlich für den Klimaschutz nötigen Investitionen belaufen sich von 2025 bis 2045 auf rund 3 Prozent des BIP beziehungsweise auf 147 Milliarden Euro jährlich. Davon sind der Großteil private Investitionen; ein Viertel – rund 38 Milliarden – entfallen auf die öffentliche Hand (eigene Gebäude, Förderprogramme).

Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

44

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Spätestens nach den verheerenden Folgen des Extremwetterereignisses im Ahrtal wissen wir wie hoch die Schadenskosten sein können



Quelle: Bundesregierung, 2023

Die Flut im Ahrtal und der Erft im Juli 2021 war mit 40,5 Milliarden Euro das Extremwetterereignis mit den größten Schäden in der deutschen Geschichte. Laut späteren Berichten machte der Klimawandel die Flut wesentlich wahrscheinlicher und trug zudem zu erhöhtem Niederschlag bei.

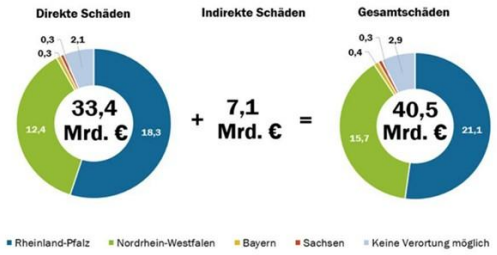


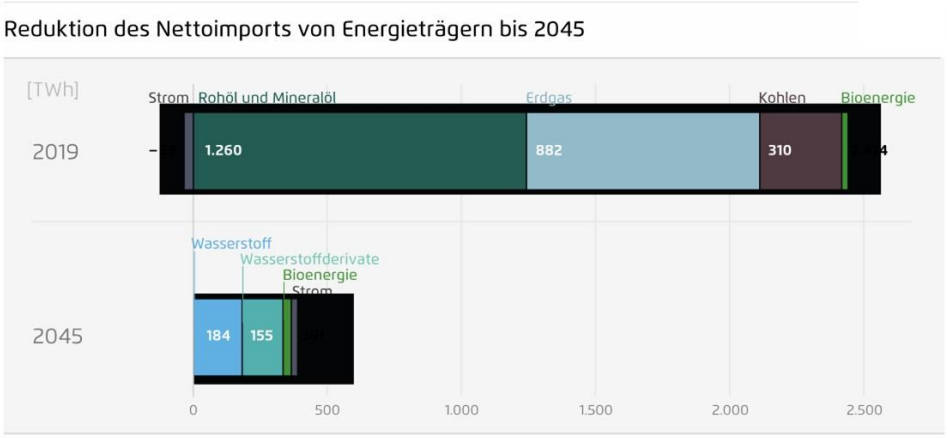
Abb.: Aufteilung der direkten und indirekten Gesamtschäden nach Bundesländern (Mrd. €), Quelle: Prognos, 2022.

45

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Deutlich positive Beiträge zu erwarten – Transformationspfad (Studie „Klimaneutrales Deutschland") führt zu geringerer physischer Importabhängigkeit - bei ökonomischer Gesamtbewertung ist dies zu beachten





Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024), historische Daten: AG Energiebilanzen (2024). Positiver Wert ist Nettoimport, negativer Wert ist Nettoexport.

Quelle: Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut und Universität Kassel (2024)

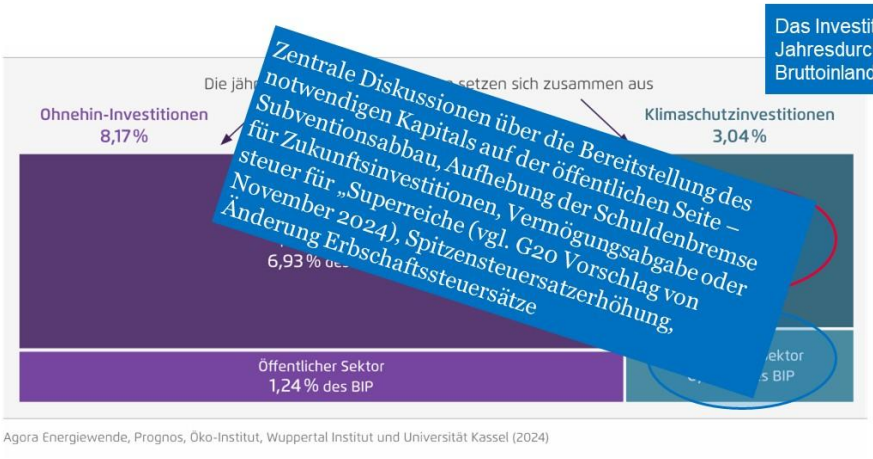
46

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Wuppertal Institut

Was sind wichtige flankierende Maßnahmen um den Transformationspfad gehen zu können

- Klares Bekenntnis zu den Zielen des Klimaschutzgesetzes und klarer Umsetzungskurs (Planungssicherheit statt Zick Zack Kurs) – Finanzierungsanreize sicherstellen (Sondervermögen 2025 – 2037 hilfreich aber nicht ausreichend)



Agora Energiewende, Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut und Universität Kassel (2024)

Die zusätzlich für den Klimaschutz nötigen Investitionen belaufen sich von 2025 bis 2045 auf rund 3 Prozent des BIP beziehungsweise auf 147 Milliarden Euro jährlich. Davon sind der Großteil private Investitionen; ein Viertel – rund 38 Milliarden – entfallen auf die öffentliche Hand (eigene Gebäude, Förderprogramme).

Wuppertal Institut

Ausblick – Energiewende und Klimaschutz sind eine multi-dimensionale Gestaltungsaufgabe

Herausforderung Energiewende und Klimaschutz

Multi-dimensionale Gestaltungsaufgabe

Wuppertal Institut

- **Technologische Herausforderung** (z.B. Systemintegration volatiler erneuerbarer Energien)
- **Infrastrukturherausforderung** (Weiterentwicklung bestehender und Aufbau neuer Infrastrukturen: H_2, CO_2)
- **Marktliche Herausforderung** (Weiterentwicklung der Marktstrukturen und Anreizsysteme u.a. für Flexibilitätsmechanismen)
- **Ressourcenherausforderung** (Substitution oder Recycling von kritischen Rohstoffen)
- **Stakeholderherausforderung** (Überwindung von Beharrungskräften)
- **Politisch-/institutionelle Herausforderung** (Umsetzung der Ziele im politischen Mehrebenensystem)
- **Gesellschaftliche Herausforderung** (gesellschaftliche Akzeptanz, Teilhabe, Verteilungsgerechtigkeit, Diskurs, Empowerment, positive, motivierende Narrative)
- **Innovationsherausforderung** (Verbindung von technischen und sozialen Innovationen zu Systemlösungen)
- **Investitionsherausforderung** (hohe Investitionsmittel über langen Zeitraum erforderlich – Berücksichtigung konkurrierender Anforderungen)
- **Zeitliche Herausforderung** (Gestaltung des Transformationsprozesses über Dekaden – Durchhaltevermögen – Überwindung von Zeitkonstanten)

49

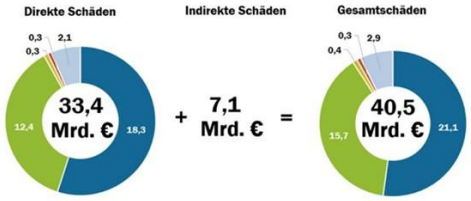
Herausforderung Klimaschutz in Deutschland

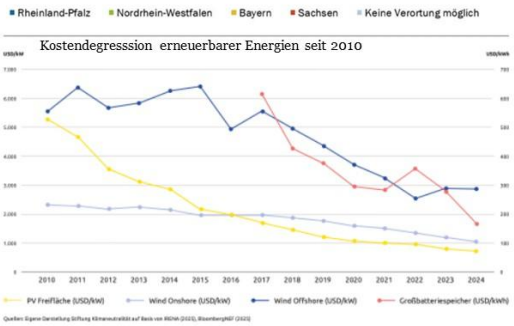
Wie lässt sich die Klimaschutzlücke schließen

Wuppertal Institut

- Bisher **fehlte offensichtlich der politische und gesellschaftliche Mut**, die bestehenden und nicht erst seit heute bekannten Herausforderungen anzugehen
  - trotz zunehmender Wetterextreme und damit verbundener Schäden auch bei uns
  - trotz zunehmender sozialer Spannungen und Ungleichheit auch bezogen auf die Auswirkungen des Klimawandels
  - trotz des Wissens über die notwendigen Gestaltungsoptionen und deren Verfügbarkeit (Beispiel: erneuerbare Energien sind dramatisch günstiger geworden und längst wettbewerbsfähig)

Aufteilung der direkten und indirekten Gesamtschäden der Ahrtal-Katastrophe im Juli 2021 nach Bundesländern (Mrd. €), Quelle: Prognos, 2022.





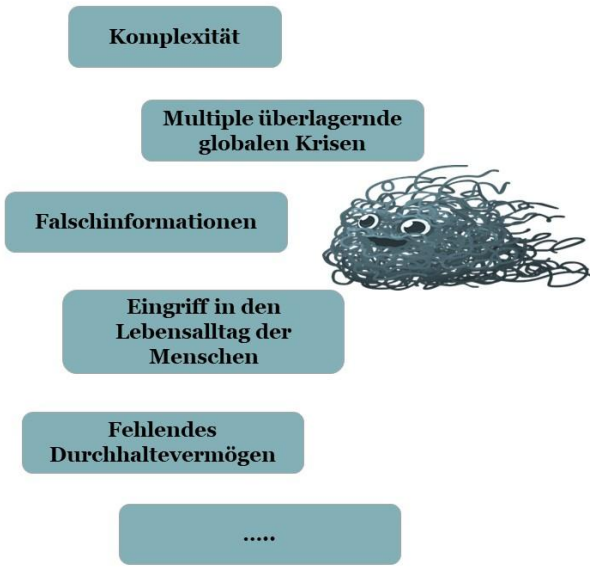
50

Herausforderung Klimaschutz in Deutschland

Wie lässt sich die Klimaschutzlücke schließen

- Bisher **fehlte offensichtlich der politische und gesellschaftliche Mut zu handeln** – aber warum u.a. vermutlich
  - wegen der **hohen Komplexität** der politischen und gesellschaftlichen Gestaltungsaufgabe?
  - wegen der **notwendigen Kontinuität und dem Durchhaltevermögen** über Jahrzehnte?
  - wegen der die Transformationsanforderungen **überlagernden multiplen globalen Krisen** (Pandemie, geo-politische Spannungen und Kriege, hohe Inflation)?
  - wegen der zunehmenden Notwendigkeit **Maßnahmen** umsetzen zu müssen, **die in den Lebensalltag der Menschen eingreifen** (Heizwärmeversorgung, Mobilität)?
  - wegen der gezielten Streuung von Falschinformationen (**fake news**) und damit verbundenen Unsicherheiten?

Wuppertal Institut



51

Wuppertal Institut

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

53

Methanemission auf Kläranlagen unter Einbeziehung der Klärschlammtrocknung

Dr.-Ing. Albert Heindl

HUBER SE
Technologiezentrum
Leiter F & E Klärschlammbehandlung
Berching

1 Einleitung

An verschiedenen Stufen der Abwasserbehandlung kommt es zu Methanemissionen, welche aus anaeroben Abbauvorgängen von organischen Stoffen im Abwasser stammen. Methan ist ein Treibhausgas mit einem gegenüber CO_2 um den Faktor 26 höherem Potential, seine mittlere Lebensdauer in der Atmosphäre liegt bei 10 bis 12 Jahren (Liu 2024). Anhand einer Modellkläranlage für 100.000 EW werden die abgeschätzte Verteilung der Methanemissionen auf die einzelnen Prozessschritte vorgestellt und auch die Klärschlammtrocknung mit einbezogen. Hieraus erschließt sich, an welchen Stellen des Klärprozesses mit anaerober Schlammstabilisierung das höchste Einsparpotenzial zu erwarten ist. Im Sinne der europäischen Abwasserrichtlinie KARL ist die weitere Reduzierung der Emission des Treibhausgases Methan auf Kläranlagen eine wichtige Aufgabe in den kommenden Jahren.

2 Methanquellen bei der Abwasserbehandlung und Abschätzung des Anteils an der Gesamtmethanemission einer Kläranlage mit 100.000 EW

Hierbei wird angenommen, dass die Kläranlage mit dem Stand der Technik vor 20 bis 25 Jahren ausgeführt ist. Bei neueren Kläranlagen können die Methanemissionen an einzelnen Stellen durch geeignete Maßnahmen durchaus schon reduziert worden sein. In Summe konnte unter den getroffenen Annahmen eine Emission von rund 600 g CH_4/(E*a) errechnet werden. Dies entspricht in etwa 16,5 Massen-% des mit der Faulung produzierten Methans. Die Aufteilung auf die einzelnen Emissionspunkte ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Prozentuale Aufteilung der Methanemission auf einer Modellkläranlage mit 100.000 EW, erstellt mit Beratung durch Dr. Roediger (Heindl Roediger 2025)

Kläranlagen-Prozessstufe	Anteil an Methanemission in %
Einlauf + Rechen + Belebung	3,43
Eindickung	12,29
Faulung	5,45
BHKW	6,06
Schlammstapelbehälter	38,77
Entwässerung	0,83
Dickschlamm-Bunkerung (max. 4 Tage)	2,06
Bandtrocknung	1,11

Der Anteil der Lagerung und der Trocknung von Klärschlamm liegt bei rund 3 Massen-%. Das größte Einsparpotential ist bei der Eindickung, bei der Faulung und vor allem beim Schlammstapelbehälter vorhanden. Die Optimierung der Faulung erniedrigt die Emissionen in den nachgeschalteten Stufen, sondern reduziert auch die in den nachfolgenden Stufen auftretenden Ausgasungen an Methan und erleichtert die Einhaltung der TA Luft bei Emissionsmessungen am Kamin der Klärschlamm-trocknungsanlage.

Folgende Annahmen zur Abschätzung wurden getroffen:

- EW = 100.000 E
- Entwässerung im Mischsystem
- Abwasserzulauf Q_{TW} = 0,2 m³/(E*d)
- Abwasservorbehandlung über Feinrechen und Sandfang mit Sandwäscher
- Vorklärung mit 1 h Durchflusszeit bei Trockenwetter
- N-Elimination, P-Fällung mit Eisensalz
- Statische Eindickung Primärschlamm 2 d, maschinelle Eindickung Überschussschlamm
- Spez. Schlamm-TM-Anfall 70 g/(E*d)
- GV Rohschlamm ca. 80 %
- TR Rohschlamm ca. 5 %
- EW = 100.000 E
- Entwässerung im Mischsystem
- Abwasserzulauf QTW = 0,2 m³/(E*d)

- Abwasservorbehandlung über Feinrechen und Sandfang mit Sandwäscher
- Vorklärung mit 1 h Durchflusszeit bei Trockenwetter
- N-Elimination, P-Fällung mit Eisensalz
- Statische Eindickung Primärschlamm 2 d, maschinelle Eindickung Überschussschlamm
- Spez. Schlamm-TM-Anfall 70 g/(E*d)
- GV Rohschlamm ca. 80 %
- TR Rohschlamm ca. 5 %

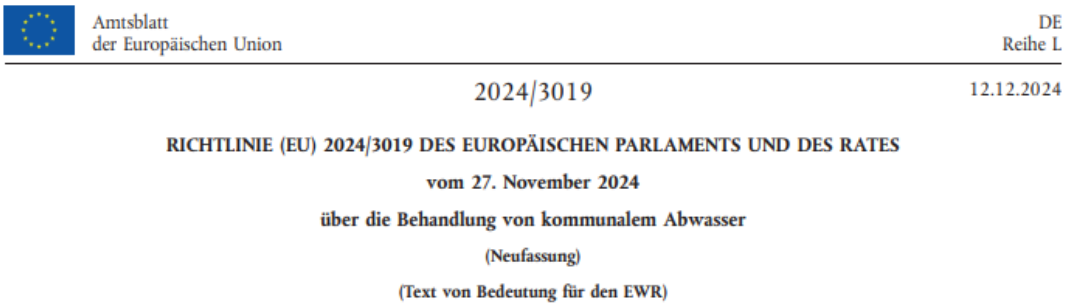
3 Möglichkeiten der Betriebsoptimierung und Nachrüstung zur Reduzierung der Methanemissionen

Folgende Möglichkeiten der Betriebsoptimierung und Nachrüstung auf Kläranlagen können aufgeführt werden, wobei projektspezifisch der Aufwand zum Nutzen unter Einbeziehung des Umweltaspektes der Reduzierung der Methanemissionen abgewogen werden muss:

- Maschinelle Voreindickung,
- Schlammdesintegration,
- Zweistufigkeit der Faulung,
- Möglichst kontinuierlicher Betrieb der Schlammentwässerung zur Verringerung des Volumens zur Schlammspeicherung,
- Vermeidung von Spitzenlasten durch Co-Substrate,
- Integration der Schlammspeicherung in den Faulbehälter,
- Gasdichte Ausführung von Bauwerken (z.B. Überlauf Faulbehälter, FS-Stapelbehälter) und Anschluss an das Faulgas-System,
- Unterdruck-Entgasung von FS nach der Schlammspeicherung und Zufuhr des freigesetzten Gases in das FG-System,
- Methanschlupf-Reduktion bei BHKWs (Teillastbetrieb mit Aufteilung auf mehrere BHKWs, Abgasnachbehandlung).

4 Methanemission und europäische Abwasserrichtlinie KARL

Die europäische Abwasserrichtlinie KARL (Abbildung 2) legt das Ziel in Hinblick auf die Reduzierung des Treibhausgases Methan fest wie ein Ausschnitt dazu eindeutig zeigt (Abbildung 3).



Amtsblatt
der Europäischen Union

DE
Reihe L

2024/3019

12.12.2024

RICHTLINIE (EU) 2024/3019 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES

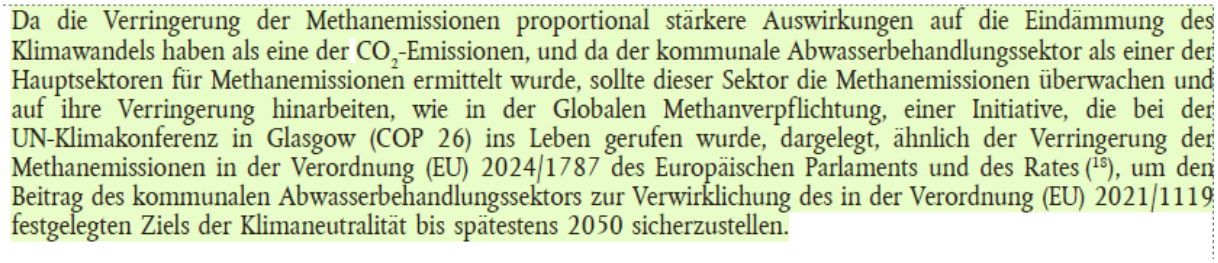
vom 27. November 2024

über die Behandlung von kommunalem Abwasser

(Neufassung)

(Text von Bedeutung für den EWR)

Abbildung 2 Titel der europäischen Abwasserrichtiline KARL



Da die Verringerung der Methanemissionen proportional stärkere Auswirkungen auf die Eindämmung des Klimawandels haben als eine der CO_2-Emissionen, und da der kommunale Abwasserbehandlungssektor als einer der Hauptsektoren für Methanemissionen ermittelt wurde, sollte dieser Sektor die Methanemissionen überwachen und auf ihre Verringerung hinarbeiten, wie in der Globalen Methanverpflichtung, einer Initiative, die bei der UN-Klimakonferenz in Glasgow (COP 26) ins Leben gerufen wurde, dargelegt, ähnlich der Verringerung der Methanemissionen in der Verordnung (EU) 2024/1787 des Europäischen Parlaments und des Rates ([18]), um den Beitrag des kommunalen Abwasserbehandlungssektors zur Verwirklichung des in der Verordnung (EU) 2021/1119 festgelegten Ziels der Klimaneutralität bis spätestens 2050 sicherzustellen.

Abbildung 3 Ausschnitt aus der europäischen Abwasserrichtlinie KARL betreffend Verringerung der Methanemission.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Reduzierung der Methanemissionen auf Kläranlagen ist ein entscheidendes Gebot im Sinne des Umweltschutzes auch in Hinblick auf die europäische Abwasserrichtlinie KARL. Essentiell für den Weg zu einer möglichst energieautarken Kläranlage ist die optimierte Ausnutzung des chemischen Energieinhaltes des Schlammes, ebenfalls eine Forderung in der seit 2025 geltenden europäischen Abwasserrichtlinie KARL nach einem möglichst energieautarken Kläranlagenbetrieb. Diese verbessert auch die Entwässerung und erleichtert die Trocknung des entwässerten Klärschlammes vor allem in Hinblick auf die Einhaltung der TA Luft. Bereits seit mehreren Jahren wir die Schlammfaulung auch für kleinere Kläranlagen ab 10.000 EW propagiert und teilweise auch umgesetzt. Eine Optimierung der Faulung bzw. Klärschlammstabilisierung auf den Kläranlagen unter staatlich geförderter Beratung muss angegangen werden. In Zukunft könnte auch eine Definition einer Qualität für entwässerten Klärschlamm in Hinblick auf Nachausgasung während der Lagerung und Trocknung sinnvoll sein. Als Referenz für die Bewertung dient die DIN EN ISO 11734:1998-11 Bestimmung der vollständigen anaeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Verbindungen im Faulschlamm (DIN 1998). Es wird versucht, parallel zum Restausgasungstest einen Schnelltest für entwässerten Klärschlamm zu entwickeln.

Literatur

DIN (1998) DIN EN ISO 11734:1998-11 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung der vollständigen anaeroben biologischen Abbaubarkeit organischer Verbindungen im

Faulschlamm - Verfahren durch Messung der Biogasproduktion (ISO 11734:1995); Deutsche Fassung EN ISO 11734:1998

Unterlagen der HUBER SE

Heindl A Roediger M (2025) Abschätzung der Methanemissionen auf einer Modellkläranlage unter Beratung durch Dr. Markus Roediger

Liu M et al (2024) Enhanced atmospheric oxidation toward carbon neutrality. Nature Communications, 15, 2245. https://doi.org/10.1038/s41467-024-12345-x

Praxisnahe N_2O-Überwachung – Vom Messwert zur Emissionsminderung

Lukas Neumann **Unisense Environment A/S**

Abstrakt

Lachgas (N_2O) ist rund 273-mal klimaschädlicher als Kohlendioxid (CO_2) und kann bis zu 80 % der direkten Treibhausgasemissionen kommunaler Kläranlagen ausmachen. Mit der neuen EU-Kommunalabwasser-Richtlinie (KARL) werden die Überwachung und Minderung von N_2O künftig verpflichtend und zu einem zentralen Bestandteil des Ziels der Klimaneutralität für den Abwassersektor.

Der Beitrag beschreibt praxisnahe Ansätze zur Erfassung und Reduktion von N_2O Emissionen auf Basis mehrjähriger Online-Messungen. Anhand der Anlagen Avedøre (Kopenhagen), Odense und Flensburg werden typische Emissionsmuster, Einflussfaktoren und wirksame Minderungsstrategien dargestellt. Die Messungen erfolgten direkt im Belebungsbecken mittels gelöster N_2O-Sensorik und erlaubten eine kontinuierliche Erfassung dynamischer Prozessvorgänge.

Die Ergebnisse zeigen, dass N_2O-Emissionen häufig in wenigen, klar abgegrenzten Betriebsphasen entstehen – insbesondere bei Lastspitzen, Temperaturwechseln oder unausgewogener Sauerstoffsteuerung. Durch gezielte Prozessanpassungen wie die Absenkung des O_2-Sollwerts, eine saisonale Erhöhung des TS-Gehalts konnten die Emissionen um bis zu 75 % reduziert werden, ohne Einbußen bei der Stickstoffelimination.

Die Untersuchungen belegen, dass Online-N_2O-Monitoring sowohl zur Emissionsbilanzierung als auch zur prozessintegrierten Regelung geeignet ist. Die kontinuierliche Messung gelösten N_2O liefert eine verlässliche Abbildung der relevanten Prozessdynamik und stellt belastbare Daten für kommunale Klimaberichte sowie für die Optimierung der Stickstoffelimination bereit. N_2O-Messung ist technologisch etabliert; ihr systematischer Einsatz ermöglicht heute eine robuste, datenbasierte Prozess- und Klimasteuerung und leistet damit einen wirksamen Beitrag zur wissenschaftlich fundierten Dekarbonisierung der Abwasserbehandlung.

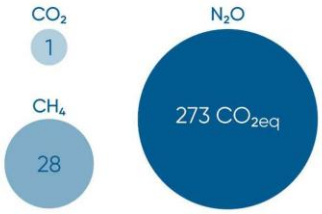
Praxisnahe N_2O-Überwachung – Vom Messwert zur Emissionsminderung

Dr. Lukas Neumann
Karlsruhe | November 2025

measure to kN_2Ow

UNISENSE ENVIRONMENT

Die Lachgasproblematik





*direkte Emissionen (Scope 1 & 2)

Kläranlagen produzieren 1-2% der THG Emissionen.
Das ist die Grössenordnung des globalen Luftverkehrs!

N_2O ist 273× klimaschädlicher als CO_2 – macht bis zu 90 % der direkten Emissionen einer Kläranlage aus.

UNISENSE ENVIRONMENT

Methodik der Emissionsbestimmung

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3
Standardwert IPCC EF_{N2O} 1.6% World	Landesspezifischer EF_{N2O} DK EF_{N2O} 0,84% Niederlande, UK, Schweiz	Standortspezifischer EF_{N2O} Basiert auf Langzeitmessungen

Fundiert und glaubwürdig

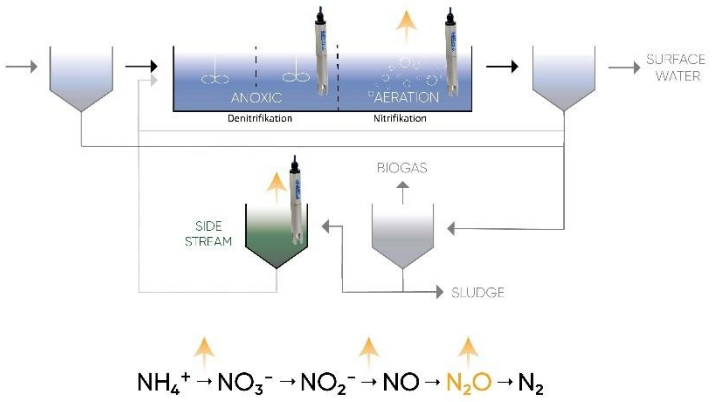
UNISENSE ENVIRONMENT

Rahmenbedingungen EU Abwassersektor

- EU: Kommunalabwasser-Richtlinie
  - Reduktion der THG aus Abwasserreinigung (N_2O, CH_4)
- Dänemark: Vorreiter für Klimaneutralität
  - Grenzwert/Abgabe für Anlagen >30k EW
- Niederlande: Nationales Messprogramm gestartet
  - N_2O-Sensor ist Technologie der Wahl
- Deutschland:
  - Merkblattreihe M 230 (FA KA-2; Klimaschutz und Treibhausgase)
  - Wichtigkeit der Messung & Potential der Prozessoptimierung

UNISENSE ENVIRONMENT

N_2O auf der Kläranlage ist … ein Nebenprodukt der Biologie



$NH_4^+ \rightarrow NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$

Nitrifikation
- Sauerstoffmangel
- Hohe Nitrit-Konzentration

Denitrifikation
- BSB-Mangel (C/N Verhältniss)
- Rest-Sauerstoff
- Potentielle Senke

Allgemein
- Belastungsschwankungen
- Temperaturänderungen

UNISENSE ENVIRONMENT

Das Messsystem in Kürze – robust, integriert, einfach zu warten



- **Direkte Messung** von gelöstem N_2O im Belebungsbecken – 24/7 in Echtzeit
- **Controller** mit 4–20 mA, Modbus-TCP oder Profibus-DP → volle SCADA-Integration
- **Ein bis zwei Sensoren** decken aerobe und anoxische Zonen ab (Kabel bis 100 m)
- **Zuverlässige Daten** für Emissionsberechnung, Prozesssteuerung und Nachhaltigkeits-Reporting
- **Einfache Wartung:** 2-Punkt-Kalibrierung alle 2 Monate, Sensorkopfwechsel halbjährlich

UNISENSE ENVIRONMENT

Sensor-Positionierung

- Ein Sensor reicht oft aus, da gelöstes N_2O im aeroben Becken weitgehend homogen verteilt ist
- **Ziel**: repräsentativen Punkt finden – nicht den Hotspot
- **Aerobe Zone:** Sensor ca. 1/3 in das Belüftungsfeld hinein positionieren
- **Anoxische Zone:** optional zweiter Sensor am Ende des Umlaufs



Controller
Primary sensor locations
Range to scout

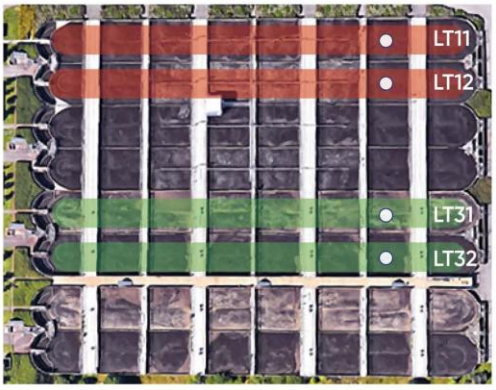
UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 1: Kopenhagen

Varga

- 350.000 EW Anlage Avedøre
- 4 Jahre durchgehende Messungen
- 4 x 10.000m^3 Beckenvolumen
- Alternierende, NH_4 basierte Belüftung
- Stickstoff-Entfernung >90%

MUDP DET MILJØTEKNOLOGISKE UDVIKLINGS OG DEMONSTRATIONSPROGRAM
BIOFOS EnviDan
UNISENSE ENVIRONMENT
arc omegn ressource center
DTU Miljø Institut for Vand og Miljøteknologi



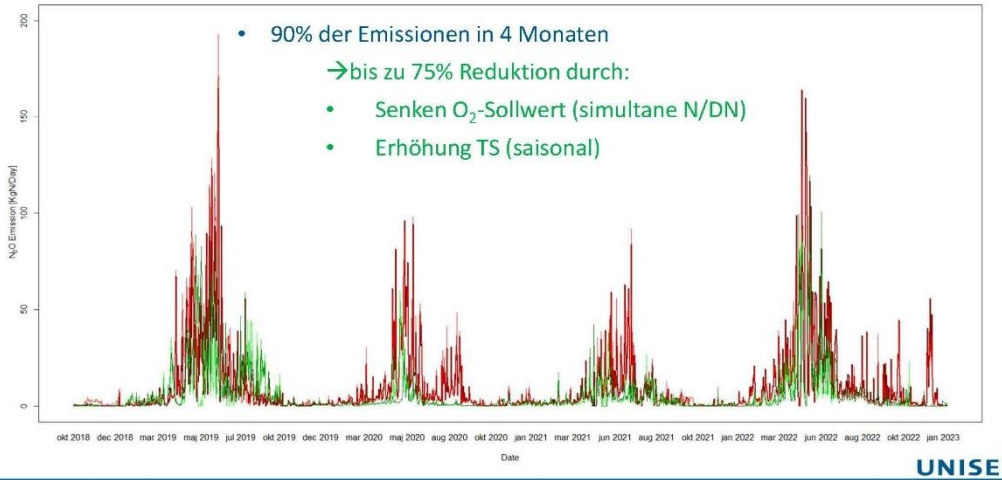
○ N_2O sensors — Reference lanes — Optimized lanes

UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 1: Kopenhagen

Der Wert von Langzeitmessungen

BIOFOS



- 90% der Emissionen in 4 Monaten
  - →bis zu 75% Reduktion durch:
  - Senken O_2-Sollwert (simultane N/DN)
  - Erhöhung TS (saisonal)

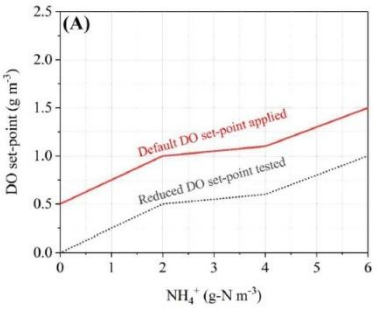
UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 1: Kopenhagen

Mitigation – O_2 Sollwert

BIOFOS

- Reduktion des O2-Sollwertes (simultane N/DN)
- Verlängerung der unbelüfteten Phasen (DN Kapazität)
- N2O Emission um 60% reduziert



Environmental Science & Technology

Article

Assessment of Full-Scale N_2O Emission Characteristics and Testing of Control Concepts in an Activated Sludge Wastewater Treatment Plant with Alternating Aerobic and Anoxic Phases

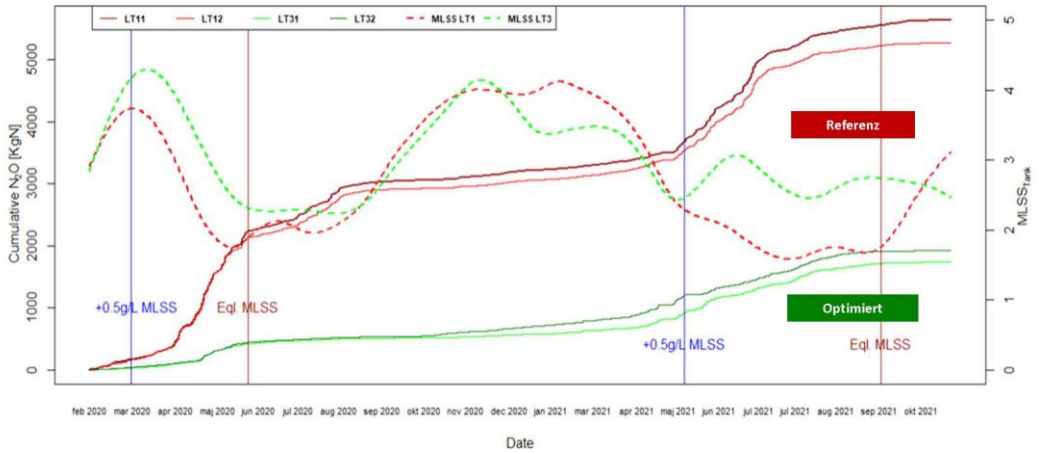
Varga

UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 1: Kopenhagen

Saisonale Erhöhung TS

BIOFOS



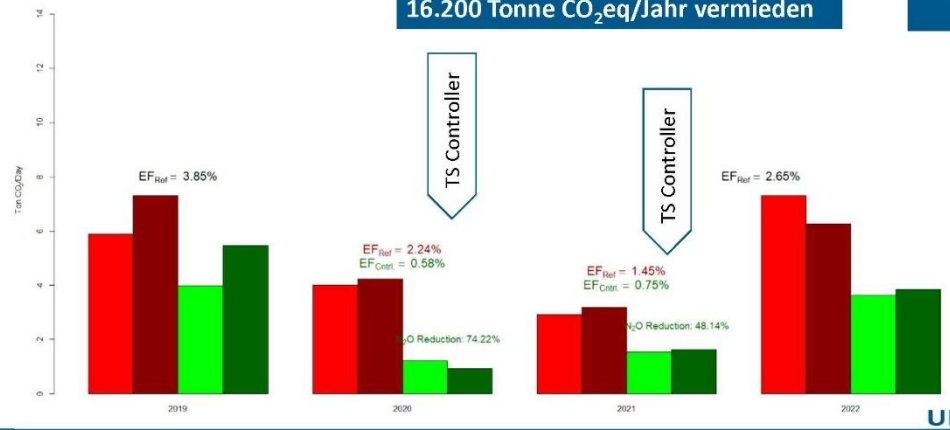
UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 1: Kopenhagen

Emissionen in CO_2-Äquivalenten

Nationaler EF 0.84%

16.200 Tonne CO_2eq/Jahr vermieden



UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 2: Odense

Prozesswasser/ Deammonifikation

Grundzustand

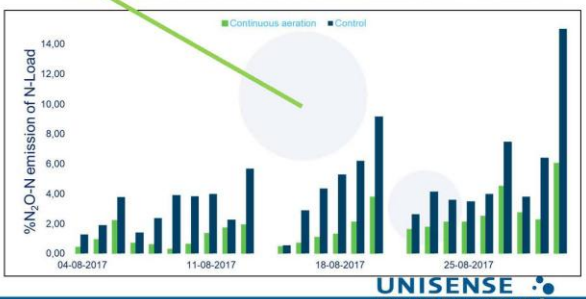
- Nitrit-basierte intermittierende Belüftung
- N2O Steuerung
- Modifizierte Dauerbelüftung

50% weniger N_2O
15% weniger Energie

- Minimale Grundbelüftung + Zuluft
- Basierend auf N2O Grenzwert

- N2O basierte Beschickung





VCS Denmark

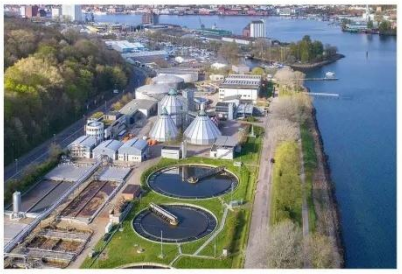
Ref: VUPD Nerea Uri Carreño, Andersen et al. 2018

UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudie 3: Flensburg

N_2O-Daten für die Klimabilanz

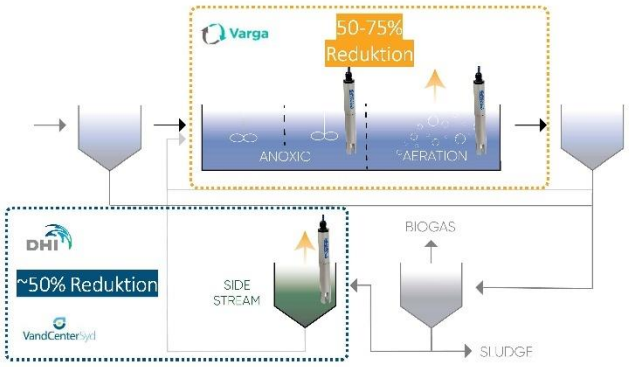
- **Ziel**: Integration direkter Emissionen in die städtische Klimabilanz
- **Vorgehen**: 7 Messpunkte, 24/7-Online-Erfassung
- **Erkenntnis**: Nebenstrom dominant
- **Nutzen**: Realistische CO_2-Äquivalente



UNISENSE ENVIRONMENT

Fallstudien Wrap-up

Möglichkeiten der N_2O Reduktion



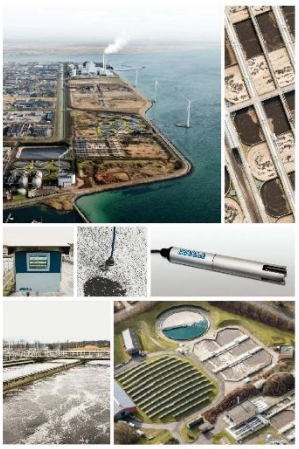
Betriebs-Info 01|25

- Starklast vermeiden
- Hoher TS und Schlammalter
- Angepasste Belüftung
- Denitrifikation ungehemmt (Kohlenstoff)
- Prozesswasserbehandlung
- Langzeitmessungen für Klimafussabdruck
- Identifikation der Auslöser

UNISENSE ENVIRONMENT

Zusammenfassung





N_2O Abwasser Sensor:

- N_2O-Messung ermöglicht gezielte Prozessoptimierung und verlässliche CO_2-Bilanzierung.
- Ein Sensorpaar reicht für eine belastbare Emissionsabschätzung
- Daten werden zunehmend in Klimastrategien und Förderprogramme integriert
- Validiert und weltweit im Einsatz

Ministry of Environment of Denmark
Environmental Protection Agency

UNISENSE ENVIRONMENT

Optimierung der Flockungsmitteldosierung und Reduktion polyacrylamidbasierter Flockungsmittel durch Dualflockung und Künstliche Intelligenz (KI) – ClearWater

Martin Pfaff
Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V., Berlin

Sofía Andrés-Zapata
Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen e.V., Aachen

1 Einleitung

In der Wasseraufbereitung werden oft synthetische Polymere auf Basis von Polyacrylamid (PAM) eingesetzt, um Aggregation und Sedimentation von Partikeln zu induzieren (Research and Markets 2024; straits research 2024). So auch in der Kieswaschwasserreinigung im Kiestagebau. Aufgrund ihres Ursprungsstoffes Acrylamid (AM) – eine Substanz, die im Verdacht steht, kanzerogen und neurotoxisch zu wirken – geraten die PAM zunehmend in den Fokus umwelttechnischer und regulatorischer Diskussionen. Infolge des chemischen Herstellungsprozesses verbleiben unvollständig polymerisierte Anteile von AM in den Flockungsmitteln. (Athing et al. 2017; Bratby 2016; Kothe und Lenk 2019; Lapointe und Barbeau 2017; WHO 2022)

Da ein vollständiger Verzicht auf Flockungsmittel aus verfahrenstechnischen Gründen i.d.R. nicht realisierbar ist, gewinnt diese Thematik mit Blick auf Umwelt- und Gesundheitsaspekte zunehmend an regulatorischer Bedeutung. Zudem bestehen neben stofflichen Risiken häufig Defizite in der Prozessführung. In der Praxis erfolgt die Dosierung oft erfahrungsbasiert und unabhängig vom aktuellen Verschmutzungsgrad des Abwassers. Dies führt meist zu Überdosierungen, die sowohl die Betriebskosten erhöhen, als auch ökologische und prozesstechnische Nachteile verursachen – etwa eine erhöhte Resttrübung. Eine bedarfsgerechte, adaptive Dosierung könnte diese negativen Effekte und zugleich den Ressourceneinsatz erheblich reduzieren.

1.1 Hintergründe

Kiese und Sande zählen, mit einem jährlichen Umsatz von rd. 3,6 Mrd. €/a (Statista, 2017) zu den wichtigsten mineralischen Rohstoffen Deutschlands und bilden eine wesentliche Grundlage für die Bauwirtschaft und zahlreiche industrielle Anwendungen.

Die Aufbereitung erfolgt üblicherweise direkt im Gewinnungsbetrieb: der Rohkies wird gewaschen, um abschlämmbare Bestandteile wie Tone und Schluffe zu entfernen und nach Korngrößen fraktioniert (Haus, 2015). Das eingesetzte Waschwasser wird im Kreislauf geführt und muss kontinuierlich aufbereitet werden. Dies geschieht überwiegend durch Sedimentation und unter Zugabe polymerer Flockungsmittel, meist auf Basis von PAM (Haus, 2015; Kothe und Lenk, 2019).

Die Sedimentation erfolgt in Absetzbecken oder Schrägklärern. Die gebildeten Schlammflocken sedimentieren, während das abgezogene Klarwasser wieder dem Prozesskreislauf zugeführt wird. Verluste werden durch Frischwasser aufgefüllt. (Leiblein GmbH, 2022b, 2022a)

Flockungsmittel verbessern die Sedimentationseigenschaften der suspendierten Feststoffe, verkürzen die notwendige Absetzzeit, reduzieren die Trübung des Klarwassers und ermöglichen eine effizientere Schlammentwässerung (Kothe und Lenk, 2019; Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2021).

In der Praxis wird meist eine einmalige Dosierung (Monoflockung) angewendet. Bei der Dualflockung hingegen wird zeitversetzt zur ersten Dosierung ein zweites Flockungsmittel hinzugegeben, wodurch synergetische Effekte entstehen können, die den Flockungsmittelbedarf und damit die Betriebskosten reduzieren können. (Petzold et al. 2002; Ribeiro et al. 2017; Vu et al. 2020)

Die Verfahrenstechnik der Dualflockung wurde in einigen Studien mit verschiedenen Abwasserarten erforscht. Diese zeigten Vorteile und weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich synergetischer Effekte und verbesserter Flockungseffizienz auf (Andrés-Zapata, 2019; Krentz, 2001; Lapointe und Barbeau, 2017; Oelmeyer, 2001; Petzold et al. 2002; Sang und Xiao, 2008; Shirzad-Semsar und Kulicke, 2008; Sievers et al. 2016). Angesichts der zunehmend strenger werdenden Anforderungen an den Betrieb von Kiestagebauen sowie an den Umwelt- und Gewässerschutz wurde das Projekt “ClearWater” initiiert.

1.2 Zielstellung

Das Forschungsprojekt „ClearWater – Entwicklung eines KI-basierten optischen Messsystems für eine Überwachung und Steuerung des Flockungsmitteldosierprozesses im Abwasser und Untersuchung von Reduktionsmöglichkeiten PAM-basierter Flockungsmittel bei Einsatz von Dualflockung“ adressiert die beschriebenen Herausforderungen mit dem Ziel, den Einsatz PAM-haltiger Flockungsmittel bei der Aufbereitung von Kieswaschwasser signifikant zu reduzieren und durch alternative, umweltverträglichere Flockungsmittel zu substituieren. Dies soll durch die Optimierung der Flockungsmitteldosierung und durch Einsatz bildverarbeitender Algorithmik und Methoden künstlicher Intelligenz (KI) verfolgt werden. Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden zwei Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

1. Optimierung des Flockungsprozesses durch die Anwendung einer Dualflockung und den Einsatz alternativer Flockungsmittel

2. Entwicklung eines bildbasierten und KI-gestützten Systems zur Erkennung von Über- und Unterdosierung von Flockungsmitteln. Hierbei sollen optische Flockeneigenschaften und onlineanalytische Prozessgrößen erfasst, mittels neuronaler Netze bewertet und in Echtzeit zur Regelung der Dosierung verwendet werden können.

Die gewonnenen Erkenntnisse werden zusammengeführt und in einem Demonstrator für den Bereich des Kiestagebaus in einem nutzbaren System vereint werden.

2 Bisherige Arbeiten und erste Ergebnisse

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten werden verschiedene Prozessparameter (Tabelle 1), Flockungsmitteltypen und Dosierstrategien getestet, um die Wechselwirkungen zwischen den relevanten Parametern systematisch zu erfassen. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die Entwicklung eines lernfähigen Algorithmus, der eine situationsabhängige Anpassung der Dosierung im laufenden Prozess ermöglichen soll. Im Folgenden werden bisherige Arbeiten und erste Erkenntnisse dargestellt.

Tabelle 1: Zu untersuchende Verfahrensparameter

Verfahrensparameter	**Prozessvariablen**		
Zeiten	Einmischzeiten	Kontaktzeiten	Sedimentationszeiten
Rührgeschwindigkeiten	Unterschiedliche Geschwindigkeiten (G-Werte)		
Dosis	Variation der Anteile der ersten und zweiten Dosierung	Gesamtdosis	
Flockungsmittel-kombinationen	Reihenfolge d. Zugabe		

2.1.1 Projektinhalte und Lösungsansätze

Zur Schaffung einer Verfahrensgrundlage wurden erste Versuchsphasen und Untersuchungen im Labor durchgeführt. Vor jeder Versuchsdurchführung erfolgt stets eine Charakterisierung des Rohwassers, um Schwankungen in pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Feststoffgehalt zu erfassen. Diese kontinuierliche Analyse ermöglicht eine Anpassung der Flockungsmitteldosierung an die aktuelle Abwasserqualität und schafft die Grundlage für eine reproduzierbare Bewertung der Versuchsergebnisse.

Darüber hinaus wurden bereits Algorithmen zur bildbasierten Erfassung und Bewertung der Flockeneigenschaften entwickelt. Diese sollen künftig die Grundlage für eine KI-gestützte Bewertung der Dosierung bilden. Die angelegten Versuchsreihen sind für insgesamt 18 Monate konzipiert und kombinieren Laboruntersuchungen mit praxisnahen Untersuchungen auf dem Kiestagebau zur Optimierung der Flockungsmitteldosierung. Dabei werden sowohl die Effekte unterschiedlicher Dosierstrategien im Rahmen der Dualflockung als auch die Anwendbarkeit der entwickelten bildbasierten Algorithmen zur Erfassung von Flockenstrukturen und ihrer KI-basierten Klassifikation untersucht.

2.1.2 Prozessoptimierung durch Dualflockung

In Laborversuchen wurden bisher erste Reihenrührversuche (Jartests) durchgeführt. Jeder Jartest besteht aus den Phasen Einmischung, Kontakt- und Sedimentationsphase. Da für Dualflockungen keine standardisierten Richtwerte existieren, dienen die Vorgaben der DVGW und ASTM (DVGW 1998; ASTM International 2013), wie Rührgeschwindigkeiten und Rührertypen, als Orientierung. Nach Abschluss der Versuche werden die Klarwasser- und Schlammphasen analytisch untersucht. Gemessen werden pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Zeta-Potenzial, der chemische Sauerstoffbedarf (CSB), Partikelgrößenverteilung, Trockenrückstand und Trübung. Die Bewertung der Effizienz der Flockungsmittel und Dosierstrategien erfolgt u.a. auf Grundlage der gemessenen Trübungsreduktion und Absetzzeit, wobei insbesondere der Einfluss der Zugabereihenfolge sowie die Aufteilung der Flockungsmittelmenge zwischen erster und zweiter Dosierstufe berücksichtigt wird.

Im Rahmen bisher erfolgter Dualflockungsversuche konnte gezeigt werden, dass die Reihenfolge und Verteilung der Flockungsmittelzugabe einen Einfluss auf die Prozessleistung haben. Die Bestimmung der o.g. Bewertungskriterien zeigte, dass trotz gleicher Gesamtkonzentration unterschiedliche Verhältnisse der Dosierstufen zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich Trübungsreduktion der Klarwasserphase und Flockenbildung führen. Dies ist exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt. Hier werden Trübungswerte einer Monoflockung mit einem stärkebasierten Flockungsmittel (Produkt PolySepar SA 3 der Firma Separ Chemie GmbH) bei einer Dosis von 0,37 g_{FM}/k_{gTR} mit denen von Dualflockungsversuchen mit demselben stärkebasierten Flockungsmittel verglichen. Die gewählte Gesamtdosis der Dualflockungsversuche lag ebenfalls jeweils bei 0,37 g_{FM}/kg_{TR}, die niedrigste erreichte Trübung betrug 21 FNU und ist somit 44 % geringer im Vergleich zur Trübung der Klarwasserzone bei Monoflockung. Somit zeigt sich, dass durch Anwendung einer Dualflockung eine Prozessoptimierung erreicht werden kann und Flockungsmittel effizienter eingesetzt werden können. Dies wird in weiteren Versuchen im Rahmen des Projektes ClearWater noch weitergehend untersucht.

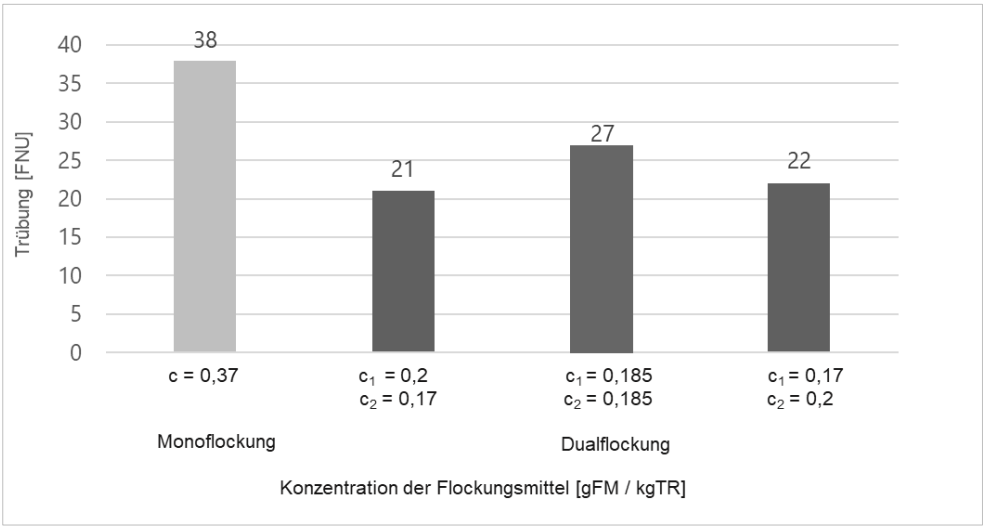


Abbildung 1: Vergleich der Trübung der Klarwasserphasen für Monoflockung und Dualflockungsversuche mit einem stärkebasierten Flockungsmittel bei gleicher Gesamtkonzentration von 0,37 g_{FM}/kg_{TR} © FiW e.V. an der RWTH Aachen

2.1.3 Visuelle Erfassung der Partikel und Flocken und Ermittlung der visuellen Flockeneigenschaften

Für die Erfassung der im Wasser befindlichen Partikel und Flocken wurden zunächst geeignete Konfigurationen aus Kameras und Objektiven ermittelt. Bei einer erwarteten Flockengröße von 10 – 30 µm soll so gewährleistet sein, dass die Partikel und Flocken für eine morphologische Bewertung ausreichend groß und scharf erfasst werden.

Für verschiedene Kombinationen bestehend aus Kamera und Objektiv wurden Aufnahmen von Testmustern angefertigt. Anhand dieser Testmuster konnte zunächst die räumliche Auflösung berechnet werden, um die Fähigkeit zur Erfassung der Zielobjekte zu prüfen. Anschließend wurde mit Hilfe des Laplace-Operators vom Bildmittelpunkt ausgehend die Bildschärfe auf konzentrischen Ringen mit gleichmäßig zunehmendem Radius berechnet und normiert (vgl. Abbildung 2). Dies ermöglicht eine Bewertung und den Vergleich der Bildschärfe (0: unscharf, 1: scharf) für jede Kamera-Objektiv-Kombination mit dem Verlauf der Schärfe vom Bildzentrum (Messpunkt 1) zum Bildrand (Messpunkt 18). Dabei zeigten sich bei allen Kombinationen sinkende Schärfewerte im Bereich der feinen Bildstrukturen im Zentrum des Bildes sowie vereinzelt inhomogene Schärfeverteilungen innerhalb eines Bildes. Ein Messsetup mit telezentrischem Objektiv setzte sich hinsichtlich der mittleren Bildschärfe mit 0,90 deutlich von den übrigen Kombinationen ab, deren mittlere Bildschärfen zwischen 0,03 und 0,48 lagen. Auch der Abbildungsmaßstab fiel mit 6,41 µm/px gegenüber den übrigen Werten (8,61 µm/px – 46,2 µm/px) vergleichsweise niedrig aus.

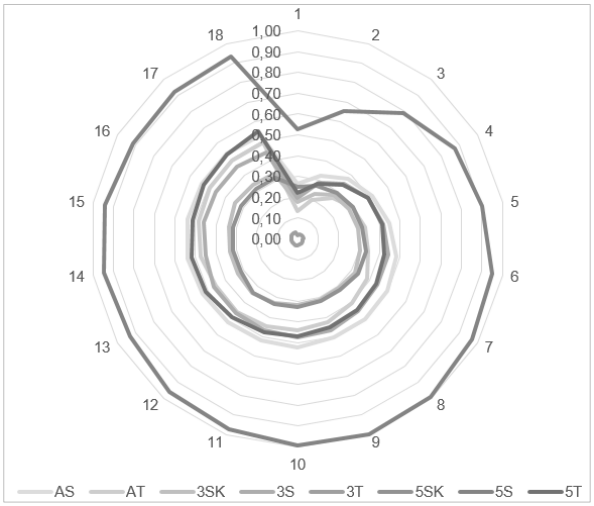


Abbildung 2: Verlauf der Schärfe (0: unscharf, 1: scharf) der Kamera-Objektiv-Kombinationen über 18 Messringe (1: innen, 18: außen) auf dem Testmuster © GFaI e.V.

Des Weiteren wurde eine Durchflusszelle mit planparallelen Sichtfenstern entworfen und gefertigt, mit deren Hilfe die geflockten Wasserproben im Labor kontrolliert am gewählten Kamerasetting vorbeigeführt werden können (vgl. Abbildung 3**Error! Reference source not found.**). Dieser Aufbau ermöglicht die Erfassung des Wassers sowohl mit Durch- als auch mit Auflicht. Dabei zeigte sich, dass die Partikel- und Flockendichte im Kieswaschwasser ein Niveau erreichen kann, das jegliches Licht durch das Waschwasser absorbiert, wodurch eine Durchlichtaufnahme nicht möglich ist. Wird hingegen eine Aufnahme mittels Auflicht gewählt, sind die Flocken erkennbar. Eine automatisierte visuelle Trennung bei hoher Flockenkonzentration ist jedoch weiterhin unpräzise.

Um eine Trennung und visuelle Erfassung zu ermöglichen, wurde in weiteren Versuchen das Verhältnis der Flockendichte nach durchgeführter Flockung angepasst, so dass weniger Objekte bei gleicher Wassermenge durch die Durchflusszelle strömten. Dabei zeigten sich im Bild Partikel und Flocken verschiedener Größen ohne störende Überlagerungen oder Berührungen, deren digitale Erfassung und somit Berechnung ihrer morphologischen Parameter möglich ist (Abbildung 4). Zudem zeigte sich, dass Flocken bei hohen Bildraten über mehrere Bilder verfolgbar sind.

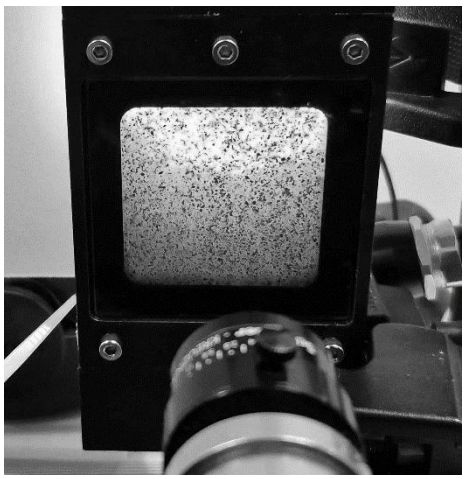


Abbildung 3: Durchströmte Durchflusszelle mit Kamera und Durchlicht © GFaI e.V.

Für die bildoptische Detektion der Objekte im Wasser wurden, auf Basis erster Flockenbilder, zunächst verschiedene Binarisierungsalgorithmen umgesetzt und verglichen, damit auch bei inhomogenen Lichtverhältnissen eine hohe Erkennungsrate von Objekten erreicht werden kann. Dabei zeigte sich, dass die lokaladaptive Schwellwertberechnung in dunkleren Randbereichen inhomogen beleuchteter Aufnahmen eine hohe positive Erkennungsrate erreicht, während die globale Schwellwertberechnung hier zu deutlichen Fehlerkennungen führt. Nimmt die Flockendichte jedoch ab, kann es bei der lokaladaptiven Schwellwertberechnung zu Fehlklassifizierungen in Bereichen ohne erkennbare Objekte aufgrund von Bildrauschen kommen. Um auch bei inhomogenen Ausleuchtungen mittels der globalen Binarisierung gute Ergebnisse zu erzielen, wurde daher die Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) implementiert, die mittels Unterteilung eines Bildes in Teilbilder eine lokale Anpassung der Kontraste mit eingeschränktem Verstärkungsgrad ermöglicht (Pizer et al. 1990).

Parallel zur klassischen Bildverarbeitung wurden zudem verschiedene Machine Learning Architekturen ausgewählt, um für vergleichende Untersuchungen die Segmentierung mittels künstlicher Intelligenz durchzuführen. Dafür wurden die Modelle UNet, DeepLabv3+ und SegFormer anhand von Flockenbildern trainiert. Für eine Vergrößerung der Datenbasis und um Variationen zu erzeugen, wurden die Datensätze zusätzlich augmentiert. Erste visuelle Vergleiche der Binärbilder zeigen dabei nur geringe Unterschiede zwischen den trainierten Modellen und der Trainingsmenge. Eine detaillierte Auswertung zur Genauigkeit, Performance und Adaptierbarkeit erfolgt im weiteren Verlauf des Projektes, ebenso wie das Training Neuronaler Netze für die Klassifikation des Dosierstatus.

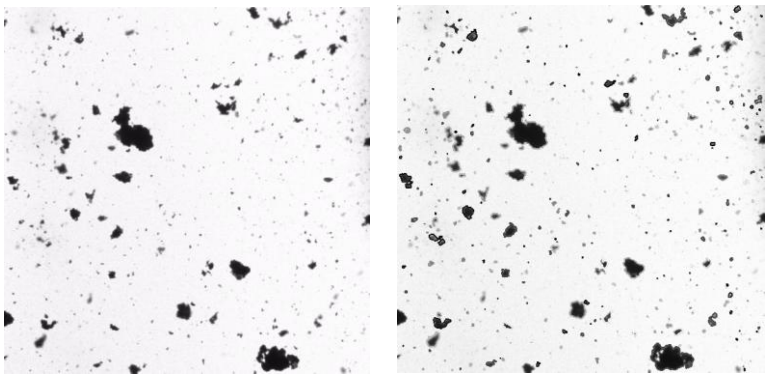


Abbildung 4: Geflockte Partikel im Kieswaschwasser wurden in der Durchflusszelle erfasst (links) und durch Bildverarbeitungsroutinen detektiert und für eine bessere Sichtbarkeit mit zufälligen Farben umrandet (rechts) © GFaI e.V.

Für die auf Bildverarbeitung basierende Klassifikation des Dosierstatus wurden bereits erste Berechnungen morphologischer zweidimensionaler Parameter der erfassten Objekte, u.a. Fläche, Konturlänge, Rundheit und Kompaktheit, integriert. Diese ermöglichen eine Erfassung visueller Eigenschaften einzelner Partikel und Flocken und liefern statistische Werte über Einzelbilder oder Messreihen (Abbildung 5).

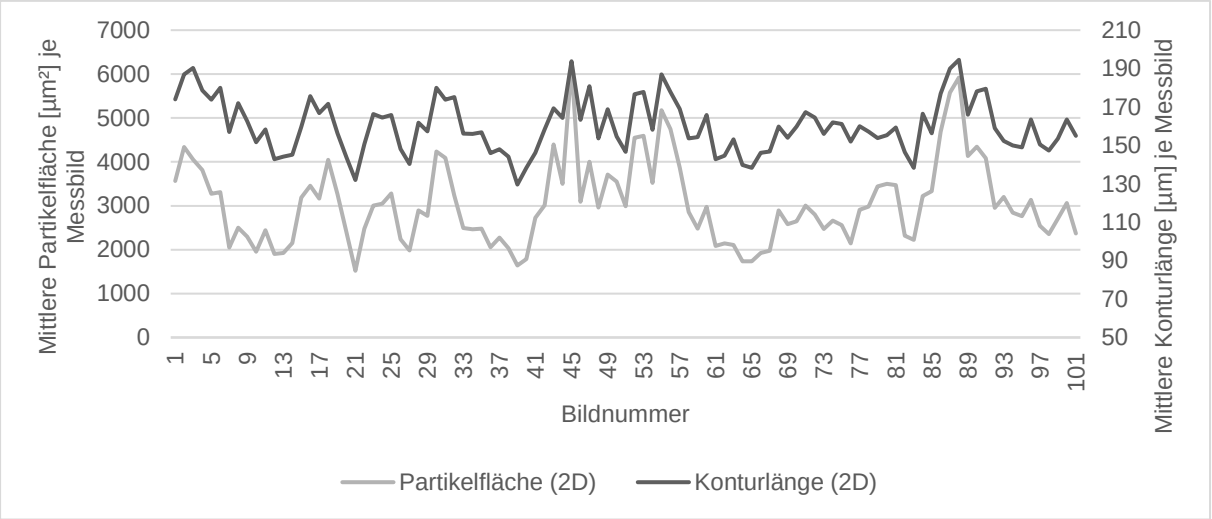


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der Mittelwerte berechneter zweidimensionaler morphologischer Parameter aus einer Bildreihe © GFaI e.V.

3 Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden weitere Kombinationen aus Flockungsmitteln und Dosierstrategien vertieft untersucht. Der Fokus liegt dabei weiterhin auf Identifizierung der Parameter, die den größten Einfluss auf die Wirksamkeit des Flockungsprozesses aufweisen und als Stellschrauben zur Prozessoptimierung identifiziert werden können.

Ein zentraler Bestandteil der kommenden Arbeiten ist zudem die quantitative Bestimmung der Reduktionspotenziale von PAM-basierten Flockungsmitteln. Gleichzeitig wird bewertet, ob und inwieweit der Einsatz alternativer, biobasierter Flockungsmittel ggf. einen Mehrverbrauch bei einer vollständigen Substitution von PAM erfordert und welche betrieblichen oder ökologischen Konsequenzen sich daraus ergeben würden. Weiterhin werden Absetzgeschwindigkeiten, das mögliche Einsparpotenzial an Flockungsmitteln durch Anwendung einer Dualflockung sowie wesentliche Entwässerungsparameter (z.B. Time to Filter) bestimmt.

Zudem erfolgt die Weiterentwicklung der Durchflusszelle, um künftig eine Separierung der Flocken für eine adäquate Bildanalyse ohne Probenverdünnung zu erreichen.

Im Bereich der Bildverarbeitung wird die KI implementiert und auf Basis neuer, auf den gewonnenen Erkenntnissen basierenden, Datensätzen trainiert und schließlich validiert. Darüber hinaus wird die Algorithmik so erweitert, dass eine Sequenzverfolgung einzelner Flocken möglich wird, wodurch sowohl eine präzisere Erfassung von Geometrieparametern als auch eine zuverlässige Erkennung von Flockenüberlagerungen erzielt werden soll.

Die Skalierbarkeit der Laborergebnisse wird zudem bewertet und zur Weiterentwicklung des Demonstrators genutzt, der im Projektverlauf für die Langzeitversuche im Kiestagebau eingesetzt wird, um die Praxistauglichkeit der KI-gestützten Dosierstrategie zu überprüfen.

4 Förderung

Das Projekt „ClearWater“ wird im Rahmen des Programms „Industrielle Gemeinschaftsforschung“ (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Förderkennzeichen 01IF23192N.

Wir bedanken uns bei dem Fördermittelgeber für die Unterstützung unserer Projektidee.

5 Literaturverzeichnis

Andrés-Zapata, S. (2019): „Dualflockung mit alternativen, stärkebasierten Flockungsmitteln zur Reinigung von Kieswaschwasser im Kiestagebau“. Masterarbeit. RWTH Aachen.

ASTM International (2013): „Standard Practice for Coagulation-Flocculation Jar Test of Water“. 13. Aufl. ASTM International (D2035).

Athing, M.; Brauer, F.; Duffek, A.; Ebert, I.; Eckhardt, A.; Hassold, E. et al. (2017): „Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern“. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_pos_mikroverunreinigung_final_bf.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2025.

Bayrisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2021): „Anforderungen an die Verfüllung von Gruben und Brüchen sowie Tagebauen (Verfüll-Leitfaden)“. Online verfügbar unter https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/grundwasser/doc/verfuell.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2022.

Bratby, J. (2016): „Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment“. 3nd ed. London: IWA Pub.

Chen, L.-C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H. (2018): Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation. Hg. v. Google Inc. Online verfügbar unter https://arxiv.org/pdf/1802.02611.

DVGW (1998): „Arbeitsblatt W 218: Flockung in der Wasseraufbereitung - Flockungstestverfahren“. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.

Haus, M. (2015): „Neuartige Kieswaschanlage zur Verminderung von Umweltbelastungen“. Abschlussbericht.

Kothe, M.; Lenk, S. (2019): „Einsatz alternativer, biologisch abbaubarer Flockungsmittel auf Basis nachwachsender Rohstoffe zur Reinigung von Kieswaschwasser in Kiestagebauen“. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Hg. v. Erftverband. Bergheim.

Krentz, Dirk-Oliver (2001): „Untersuchung des Flockungsverhaltens von Polyelektrolyten an technischen Trüben Modellsuspensionen“.

Lapointe, M.; Barbeau, B. (2017): „Dual starch-polyacrylamide polymer system for improved flocculation“. In: *Water research* 124, S. 202–209. DOI: 10.1016/j.watres.2017.07.044.

Leiblein GmbH (2022a): „Lösungen zur Wasseraufbereitung in Kies- und Sandwerken“. Online verfügbar unter https://www.leiblein.de/loesungen/kies-und-sandindustrie, zuletzt geprüft am 08.12.2022.

Leiblein GmbH (2022b): „Wasseraufbereitung in der Kies- und Sandindustrie“. Online verfügbar unter https://www.leiblein.de/loesungen/kies-und-sandindustrie, zuletzt geprüft am 08.12.2022.

Oelmeyer, Gert (2001): „Flockungsuntersuchungen im Labor- und technischem Maßstab beim Einsatz von Polyelektrolyten an Hafenschlick-Suspensionen“.

Petzold, G.; Schwarz, S.; Lunkwitz, K. (2002): „Flockungsmittelkombinationen zur Steigerung der Effektivität von Flockungsprozessen“. In: *Chemie Ingenieur Technik* 74 (4), S. 438–442. DOI: 10.1002/1522-2640(200204)74:4<438::AID-CITE438>3.0.CO;2-#.

Pizer, S. M.; Johnston, R. E.; Ericksen, J. P.; Yankaskas, B. C.; Muller, K. E. (1990): „Contrast-limited adaptive histogram equalization: speed and effectiveness“.

Research and Markets (2024): „Europe Polyacrylamide - Market Share Analysis, Industry Trends & Statistics, Growth Forecasts 2019 - 2029“. Online verfügbar unter https://www.researchandmarkets.com/report/europe-polyacrylamide-market?, zuletzt geprüft am 13.11.2025.

Ribeiro, E. A. M.; Rodrigues Filho, G.; Rozeno, N. S.; Nogueira, J. M. B. A.; Resende, M. A.; Thompson Junior, J. P. et al. (2017): „Polymeric polyelectrolytes obtained from renewable sources for biodiesel wastewater treatment by dual-flocculation“. In: *Express Polym. Lett.* 11 (6), S. 504–517. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.47.

Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015): U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Hg. v. Computer Science Department and BIOSS Centre for Biological Signalling Studies. Online verfügbar unter https://arxiv.org/pdf/1505.04597.

Sang, Y.; Xiao, H. (2008): „Clay flocculation improved by cationic poly(vinyl alcohol)/anionic polymer dual-component system“. In: *Journal of colloid and interface science* 326 (2), S. 420–425. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.06.058.

Shirzad-Semsar, M.; Kulicke, W.-M. (2008): „Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Prüfung und Optimierung von ionischen Flockungshilfsmitteln auf Stärkebasis in technischen Prozessen unter Einbeziehung eines online Sensors zur Flockungsanalyse“. Berichtszeitraum 01.12.2005 bis 28.02.2008. Gefördert durch das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) Förderkennzeichen 22018605. Hg. v. Universität Hamburg.

Sievers, Michael; Niedermeiser, Michael; Döring, Ulrich; Lehmann, Karsten; Schmid-Bonde, Lars (2016): „Entwässerung von Elbsedimenten_Ein Beispiel für nachhaltigen Ressourceneinsatz“.

Statista (2017): Kies-, Sand-, Ton- und Kaolingewinnung in Deutschland - Umsatz bis 2020 | Statista. Online verfügbar unter https://de.statista.com/prognosen/400120/kies--sand--ton--und-kaolingewinnung-in-deutschland---umsatzprognose, zuletzt aktualisiert am 11.07.2025, zuletzt geprüft am 14.11.2025.

straits research (2024): „Polyacrylamid-Markt Größe und Ausblick, 2024-2032“. Marktgröße, Marktanteil und Trendanalyse für Polyacrylamid nach Produkttyp (anionisch, kationisch, nichtionisch), nach Anwendungen (Wasseraufbereitung, verbesserte Ölrückgewinnung, Zellstoff und Papier, Mineralverarbeitung, sonstige) und nach Region. Online verfügbar unter https://straitsresearch.com/de/report/polyacrylamide-market, zuletzt geprüft am 13.11.2025.

Vu, Hang P.; Nguyen, Luong N.; Lesage, Geoffroy; Nghiem, Long D. (2020): „Synergistic effect of dual flocculation between inorganic salts and chitosan on harvesting microalgae Chlorella vulgaris“. In: *Environmental Technology & Innovation* 17, S. 100622. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100622.

WHO (2022): „Guidelines for Drinking-Water Quality“. Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda. 4th ed. Online verfügbar unter https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064.

Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J.M., Luo, P. (2021): egFormer: Simple and Efficient Design for Semantic Segmentation with Transformers. Hg. v. he University of Hong Kong, Nanjing University, NVIDIA, Caltech. Online verfügbar unter https://arxiv.org/pdf/2105.15203.

Anschrift der Verfasser*innen:

Martin Pfaff, M.Eng.

Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V.

Volmerstraße 3
12489 Berlin-Adlershof

Tel.: +49 30 814 563 414
E-Mail: pfaff@gfai.de

Sofía Andrés-Zapata, M.Sc.

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und Klimazukunft an der RWTH Aachen e.V.

An der Ölmühle 4
52074 Aachen

Tel.: +49 241 80 26841
E-Mail: andres-zapata@fiw.rwth-aachen.de

Schriftenreihe SWW - Karlsruhe

Bisher aus der Arbeit am Institut erschienen

[1] KARPE, H.-J.: Zur Wirtschaftlichkeit bei der Planung von Fernwasserversorgungen. Karlsruhe 1969 (Eigenverlag des Verfassers).

[2] PÖPEL, J.: Schwankungen von Kläranlagenabläufen und ihre Folgen für Grenzwerte und Gewässerschutz. GWF, Schriftenreihe Wasser - Abwasser, 16. Oldenbourg Verlag, München 1971.

[3] MEIER, P.M.: Möglichkeiten zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung von Zweckverbänden. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 4. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1972.

[4] ABENDT, R.; AHRENS; W.; CEMBROWICZ, R.G.; HAHN, H.H.; KNOBLAUCH, A.; ORTH, H.: Operations Research und seine Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft I. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 5. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1972.

[5] NOLL, K.: Untersuchungen zur Grundwasserentnahme aus den pleistozänen Sedimenten des Rheintalgrabens im Rhein-Neckar-Raum. Karlsruhe 1972 (Eigenverlag des Verfassers).

[6] NEIS, U.: Experimentelle Bestimmung der Stabilität anorganischer Schwebstoffe in natürlichen Gewässern. Karlsruhe 1974 (Eigenverlag des Verfassers).

[7] AHRENS, W.: Optimierungsverfahren zur Lösung nichtlinearer Investitionsprobleme - angewandt auf das Problem der Planung regionaler Abwasserentsorgungssysteme. Quantitative Methoden der Unternehmens-planung, Bd. 4. Verlag Meisenheim/Glan 1975.

[8] ORTH, H.: Verfahren zur Planung kostenminimaler regionaler Abwasserentsorgungssysteme. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 9. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1975.

[9] MOSEBACH, K.G.: Phosphatrücklösung bei der Ausfaulung von Simultanschlämmen. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 11. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1975.

[10] AHRENS, W.; CEMBROWICZ, R.G.; DEHNERT, G.; HEISS, H.-J.; HAHN, H.H.; HENSELEIT, H.J.; ORTH, H.; SENG, H.J.: Operations Research und seine Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft II. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 12. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.

[11] DEHNERT, G.: Regionale Planung der Standorte für Abwasser-behandlungsanlagen mit Hilfe graphentheoretischer Algorithmen. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 1. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.

[12] HAHN, H.H. (Hrsg.): Umweltschutz im Bereich des Wasserbaus. Wasser und Abwasser in Forschung und Praxis, Bd. 14. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1976.

[13] JØRGENSEN, S.E.: Reinigung häuslicher Abwässer durch Kombination eines chemischen Fällungs- und Ionenaustauschverfahrens. Karlsruhe 1976 (Eigenverlags des Verfassers).

[14] RUF, J.: Gewässergütesimulation unter Berücksichtigung meteorologischer Einflüsse. Prognostisches Modell Neckar, Bericht 16. Dornier System. Friedrichshafen 1977.

[15] AHRENS, W.; DEHNERT, G.; DURST, F.; GERBER, J.; HAHN, H.H.; PAESSENS, H.; WEUTHEN, H.K.: Tourenplanung bei der Abfallbeseitigung. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Bd. 3. Erich Schmidt Verlag, Bielefeld 1977.

[16] KLUTE, R.: Adsorption von Polymeren an Silikaoberflächen bei unterschiedlichen Strömungsbedingungen. Karlsruhe 1977 (Eigenverlag des Verfassers).

[17] KNOBLAUCH, A.: Mathematische Simulation des Phosphorkreislaufs in einem gestauten Gewässer. GWF, Schriftenreihe Wasser- Abwasser, Bd. 17. Oldenbourg Verlag, München 1978.

[18] ABENDT, R.: Aussagefähigkeit von Sauerstoffhaushaltsrechnungen. Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft, Wasserwirtschaft, Bd. 1. Hochschulverlag, Stuttgart 1978.

[19] SENG, H.J.: Systematische Beurteilung der Umweltverträglichkeit bei Abfalldeponiestandorten. Hochschulsammlung Ingenieurwissenschaft, Abfallwirtschaft, Bd. 2. Hochschulverlag, Stuttgart 1979.

[20] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Fortschritte bei der Anwendung von Flockungsverfahren in der Abwassertechnologie. 2. Verfahrenstechnisches Seminar. Karlsruhe 1979 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[21] HAHN, H.H. (Hrsg.): Von der Abfallbeseitigung zur Abfallwirtschaft, Fachkolloquium zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Hans Straub, Karlsruhe 1980 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[22] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Planung und Organisation von Einzelkläranlagen und Gruppenkläranlagen, 6. Planungstechnisches Seminar. Karlsruhe 1980 (Eigenverlag des Instituts).

[23] KÄSER, F.: Transport suspendierter Feststoffe in Fließgewässern. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[24] EPPLER, B.: Aggregation von Mikroorganismen. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[25] INSTITUT FÜR SIEDLUNGSWASSERWIRTSCHAFT: Fortschritte bei der Anwendung des Flotationsverfahrens in der kommunalen Abwasserreinigung, 3. Verfahrenstechnisches Seminar. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts).

[26] PAESSENS, H.: Tourenplanung bei der regionalen Hausmüllentsorgung. Karlsruhe 1981 (Eigenverlag des Instituts).

[27] KIEFHABER, K.P.: Versuchsanlagen zur Entspannungsflotation von Abwasser - Vergleich von Versuchsergebnissen. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[28] HAHN, H.H.; SENG, H.J. (Hrsg.): Wirtschaftlichkeit in der Abfallwirtschaft. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).

[29] HAHN, H.H.; PAESSENS, H. (Hrsg.): Tourenplanung in der Abfallwirtschaft II. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).

[30] DICKGIESSER, G.: Betriebssichere und wirtschaftliche Klärschlamm-entsorgung. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[31] HAHN, H.H. (Hrsg.): Wasserversorgung und Abwasserbehandlung in Entwicklungsländern. Karlsruhe 1982 (Eigenverlag des Instituts).

[32] HAHN, H.H. (Hrsg.): Schlämme aus der Abwasserfällung/-flockung. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).

[33] v. FALKENHAUSEN, K.: Planung eines Entsorgungssystems für die Klärschlamm-behandlung. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).

[34] HEISS, H.-J.: Stabilität kostenminimaler Lösungen bei der Planung von Abwasserentsorgungssystemen. Karlsruhe 1983 (Eigenverlag des Instituts).

[35] HAHN, H.H. (Hrsg.): Planung im Gewässerschutz unter besonderer Berücksichtigung von Flussgebietsmodellen. Karlsruhe 1984 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[36] BANTZ, I.: Ein Rechenverfahren zur Darstellung der Auswirkungen von Stoßbelastungen auf die Qualität von Fließgewässern. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[37] LÖHR, J.: Einfluss der Tiefendurchmischung auf die Entwicklung von Phytoplankton - dargestellt am Beispiel des Maines. Karlsruhe 1984 (Eigenverlag des Instituts).

[38] TROUBOUNIS, G.: Strukturorientierte Simulation des Kohlenstoff-, Stickstoff-, Phosphor- und Sauerstoffhaushaltes flacher Gewässer. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[39] DITTRICH, A.: Transport und Sedimentation organischer Stoffe in Abwasserteichen. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[40] GROHMANN, A.; HAHN, H.H.; KLUTE, R. (Hrsg.): Chemical Water and Wastewater Treatment. Practical Experience and New Concepts. Proceedings

of the 1st Gothenburg Symposium 1984. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 1985 (vergriffen).

[41] HAHN, H.H.; NEIS, U. (Hrsg.): Belastungsschwankungen auf Kläranlagen: Auswirkungen und Möglichkeiten zur Reduktion, insbesondere durch Chemikalieneinsatz. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts).

[42] SCHMITT, T.G.: Der instationäre Kanalabfluss in der Schmutzfrachtmodellierung. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).

[43] IOSSIFIDIS, V.: Die Rolle der Ablagerungen bei der Schmutzfrachtberechnung in Kanalisationsnetzen. Karlsruhe 1985 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).

[44] SCHMITT, T.G.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schmutzfrachtberechnung für Kanalisationsnetze. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).

[45] DÖLL, B.: Die Kompensation der Oberflächenladung kolloidaler Silika-Suspensionen durch die Adsorption kationischer Polymere in turbulent durchströmten Rohrreaktoren. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts).

[46] MERTSCH, V.: Sedimentation, Eindickung und Entwässerung von Fällungs-/ Flockungsschlämmen. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[47] KORDES, B.: Berechnung der Energiebilanz von Kläranlagen unter Berücksichtigung zeitlicher Schwankungen. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[48] GEPPERT, B.: Tourenplanung bei der innenstädtischen Hausmüllentsorgung. Karlsruhe 1987 (Eigenverlag des Instituts).

[49] GUTEKUNST, B.: Sielhautuntersuchungen zur Einkreisung schwermetall-haltiger Einleitungen. Karlsruhe 1988 (Eigenverlag des Instituts).

[50] HAHN, H.H.; KLUTE, R.; BALMER, P. (Hrsg.): Recycling in Chemical Water and Wastewater Treatment. Proceedings of the 2nd Gothenburg Symposium. Karlsruhe 1986 (Eigenverlag des Instituts).

[51] HAHN, H.H.; PFEIFER, R.; (Hrsg.): Abwasserreinigung in Entwicklungs-ländern mit besonderer Berücksichtigung der Industrie. Karlsruhe 1987 (Eigenverlags des Instituts).

[52] HOFFMANN, E.: Strömungsstrukturen in Flockungsreaktoren. (in Vorbereitung).

[53] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Fällung/Flockung - Erfahrungen aus Labor und Praxis. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).

[54] KRÜGER, E.M.: Stabilität mineralischer Basisabdichtungen von Hausmülldeponien bezüglich des Ausbreitungsverhaltens anorganischer Schadstoffe. Karlsruhe 1989 (Eigenverlag des Instituts).

[55] SISKOS, D.: Kläranlagenauslegung für stehende Vorfluter. Karlsruhe 1989 (Eigenverlag des Instituts).

[56] HOU, R.: Kontrollstrategien für Fällung und Flockung auf Kläranlagen mit einem Vorhersagemodell der Zu- und Ablauffracht. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).

[57] XANTHOPOULOS, C.: Methode für die Entwicklung von Modellregenspektren für die Schmutzfrachtberechnung. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).

[58] HAHN, H.H.; XANTHOPOULOS, C. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss aus städtischen Gebieten - Präsentation eines BMFT - Verbundprojektes. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[59] LEE, C.-M.: Tone zur physikalisch-chemischen Abwasserreinigung. Karlsruhe 1990 (Eigenverlag des Instituts).

[60] HARTMANN, K.-H.: Anaerobe Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien. Karlsruhe 1991 (Eigenverlag des Instituts).

[61] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Vor-, Simultan- oder Nachfällung? - Entscheidungskriterien für Planung, Entwurf und Betrieb. Karlsruhe 1991 (Eigenverlag des Instituts).

[62] LEONHARD, D.: Eindickung und Entwässerung als Konsolidierungsvorgang. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts).

[63] WEISSER, M.: Untersuchungen zur Belastung kommunaler Klärschlämme durch organische Schadstoffe - Abschlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben 02 WS 464/8. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).

[64] HAHN, H.H.; XANTHOPOULOS, C. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss II. Präsentation des BMFT-Verbundprojektes. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts, 2. Auflage).

[65] HAHN, H.H.; PFEIFER, R. (Hrsg.): Sanierung von Kläranlagen. Karlsruhe 1992 (Eigenverlag des Instituts).

[66] DÜRETH-JONECK, S.: Entwicklung eines naturnahen, praxisorientierten. Mobilitätstests für Schwermetalle und Arsen in kontaminierten Böden. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts).

[67] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Fällungs-/Flockungschemikalien. Anforderungen, Angebot, Auswahl und Qualität. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts, vergriffen).

[68] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Wechselwirkungen der biologischen und chemischen Phosphorelimination. Karlsruhe 1993 (Eigenverlag des Instituts).

[69] LANGER, S.J.: Struktur und Entwässerungsverhalten polymergeflockter Klärschlämme. Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).

[70] MÜLLER, N.: Gewässergütemodellierung von Fließgewässern unter Berücksichtigung qualitativer, quantitativer, flächenhafter und sozioökonomischer Informationen. Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).

[71] HAHN; H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe 1994 (Eigenverlag des Instituts).

[72] MIHOPULOS, J.: Wechselwirkung Flockenbildung - Flockenabtrennung unter Berücksichtigung der Durchströmungsmuster in Sedimentations- und Flotationsbecken. München 1995 (Oldenbourg Verlag).

[73] XANTHOPOULOS, C.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schadstoffe im Regenabfluss III. München 1995 (Oldenbourg Verlag).

[74] HAHN, H.H.; TRAUTH, R. (Hrsg.): Wirtschaftlichkeitsfragen in der Abwasserreinigung. München 1995 (Oldenbourg Verlag).

[75] SCHMID, K.: Tensidunterstützte und biologische Sanierung der Feinkornfraktion aus der Bodenwäsche bei kohlenwasserstoffhaltigen Altlasten. München 1996 (Oldenbourg Verlag).

[76] HÖLZER, D.: EDV-gestützte Planung von Belebtschlammanlagen unter Berücksichtigung betrieblicher Aspekte. München 1996 (Oldenbourg Verlag).

[77] HARITOPOULOU, T.: Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle in urbanen Entwässerungssystemen - Aufkommen, Transport und Verbleib. München 1996 (Oldenbourg Verlag).

[78] HAHN, H.H.; TRAUTH, R.: Wechselwirkung zwischen Einzugsgebiet und Kläranlage. München 1996 (Oldenbourg Verlag).

[79] FUCHS, S.: Wasserwirtschaftliche Konzepte und ihre Bedeutung für die Ökologie kleiner Fließgewässer - Aufgezeigt am Beispiel der Mischwasserbehandlung. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[80] BEUDERT, G.: Gewässerbelastung und Stoffaustrag von befestigten Flächen in einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[81] WITT, P.CH.: Untersuchungen und Modellierungen der biologischen Phosphat-elimination in Kläranlagen. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[82] PSCHERA, S.: Abwasserbehandlung mit Ozon: Klassifizierung von Abwasser zur optimierten Verfahrensgestaltung in der Kreislaufwirtschaft. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[83] TRAUTH, R.: Lokalisierung von Grundwasserschadstoffquellen in urbanen Räumen. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[84] JAKOBS, J.: Quantifizierung der Wirkung von Kanalnetzbewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe des detailliert hydrodynamischen Schmutzfrachtmodells HAuSS. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[85] XANTHOPOULOS, C.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 1 - Oberfläche. München 1998 (Oldenbourg-Verlag).

[86] SCHMITT, T.G.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 2 - Kanalisation. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[87] SEYFRIED, C.F.: Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 3 - Kläranlage. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[88] HAHN, H.H.; SCHÄFER, M. (Hrsg.): Stoffströme in der Urbanhydrologie Teil 4 - Emission/Immission. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[89] HAHN, H.H.; WILHELMI, M.: Abwasserreinigung - Reststoffproblem oder Sekundärrohstoffquelle. München 1997 (Oldenbourg Verlag).

[90] SCHULZ, ST.: Der Kanal als Reaktor: Neubildung von AOX durch Wirkstoffe in Reinigungsmitteln. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[91] WOLTER, CH.: Steuer- und Regelkonzepte der Vorklärung unter Einbeziehung der Vorfällung/Flockung und Schlammhydrolyse. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[92] PFEIFER, R.: Schmutzstoffrückhalt durch chemisch/physikalische Regenwasserbehandlung im Trennsystem. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[93] LIN, L.Q.: Entstabilisierung und Aggregation von Silika und Huminsäure mit Aluminiumsalzen in turbulenten Rohrströmungen. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[94] HAHN, H.H.; WILHELMI, M. (Hrsg.): Abwasserfällung und Flockung. München 1998 (Oldenbourg Verlag).

[95] HUPPERT, N.: Elimination von Ibuprofen und NBBS in kommunalen Kläranlagen analysiert mittels Festphasenmikroextraktion. München 1999 (Oldenbourg Verlag).

[96] FUCHS, S.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schadstoffstoffe im Regenabfluss IV. Abschlusspräsentation des BMBF-Verbundprojektes NIEDERSCHLAG. München 1999 (Oldenbourg Verlag).

[97] SCHÄFER, M.: Regionalisierte Stoffstrombilanzen in städtischen Einzugsgebieten - Möglichkeiten, Probleme und Schlussfolgerungen.

[98] HAHN, H.H.; KRAUS, J. (Hrsg.): Technologische Aspekte der Wasser-, Abwasser- und Schlammbehandlung. Karlsruhe 1999 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[99] KISHI, R.T.: Einzugsgebietseigenschaften und Fließgewässergüte (Modellierung stofflicher Parameter mit Hilfe raumbezogener Daten). Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[100] NAUDASCHER, I.: Kompostierung menschlicher Ausscheidungen durch Verwendung biologischer Trockentoiletten - mit besonderer Berücksichtigung des Kleingartenbereichs. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[101] ANDERS, G.: Der Einsatz von Scheibentauchkörpern zur Güllebehandlung mit dem Ziel der weitergehenden Nährstoffreduktion. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[102] WITTLAND, C.: Angepasste Verfahren zur Industrieabwasserreinigung - Modell zur Verfahrensauswahl. Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[103] HAHN, H.H.; KRAUS, J. (Hrsg.): Projektmanagement, Maschinentechnik und gesetzliche Vorgaben. Karlsruhe 2000 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[104] SCHMID-SCHMIEDER, V.: Vergleich der Leistungsfähigkeit von Biofilmverfahren bei Sanierungen bzw. Erweiterungen von kommunalen Kläranlagen. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[105] HAHN, H.H.; KRAUS, J.: Geruchsemissionen. Karlsruhe 2001 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[106] ANTUSCH, E.: Lokalisierung organischer Schadstoffemissionen durch Sielhautuntersuchungen. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[107] OBERACKER, F.E.: Verwendung und Entsorgung arsenhaltiger Wasserwerksschlämme. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[108] HAHN, H.H.; KRAUS, J.: Bläh- und Schwimmschlamm. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[109] HITZLER, A.: Beurteilung und Optimierung von Sandwaschanlagen auf Kläranlagen. Karlsruhe 2002 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[110] KLINGEL, M.: Prozess-Simulation in der Abwasser- und Abfallbehandlung. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[111] SONG, Y.: Precipitation Chemistry of Calcium Phosphate for Phosphorous Recovery. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[112] KRAUS, J.: Herstellung von Leichtzuschlagstoffen aus Klärschlamm. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[113] ZHANG, P.: Herstellung und Charakterisierung und Wirksamkeit polymerer anorganischer Flockungsmittel. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[114] HAHN, H. H.; KRAUS, J.: Wertschöpfung durch Betriebsoptimierung. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[115] LUCAS, S.: Auftreten, Ursachen und Auswirkungen hoher Fremdwasserabflüsse - eine zeitliche und räumliche Analyse. Karlsruhe 2003 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[116] SCHWARZ, M.: Mikrobielle Kolmation von abwasserdurchsickerten Bodenkörpern: Nucleinsäuren zum Nachweis von Biomasse und Bioaktivität. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasser-wirtschaft).

[117] HOLZ, A.: Immissionsorientierte Bilanzierung punktueller und diffuser Schwer-metallfrachten. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasserwirtschaft).

[118] HAHN, H.H.; KEGEBEIN, J.: Auf dem Weg zur Kläranlage von morgen. Karlsruhe 2004 (Universität Karlsruhe - Institutsverlag Siedlungswasser-wirtschaft).

[119] BUTZ, J.: Stoffstrombilanzen für Phosphor und sechs Schwermetalle am Beispiel des oberen Kraichbachs. Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungswasser-wirtschaft Karlsruhe).

[120] MAHMUTSPAHIC, Z.: Projektfinanzierung - ein PPP Modell für internationale siedlungswasserwirtschaftliche Projekte. Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungs-wasserwirtschaft Karlsruhe).

[121] HAHN, H.H.; FRIEDRICH, K.: Chemikalien in der Abwasserbehandlung - was haben wir dazugelernt? Karlsruhe 2005 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).

[122] KEGEBEIN, J.: Die Verwendung von Küchenabfallzerkleinerern (KAZ) aus abwasser- und abfallwirtschaftlicher Sicht. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).

[123] HAHN, H.H.; HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Abwasserproblemstoffe - Erfahrungen mit neuen Produkten und Technologien. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).

[124] KPONGBENGA, K.: Wasserver- und Entsorgung in der Stadt Lomé/Togo: Analysen, Beiträge und Konzepte. Karlsruhe 2006 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe).

[125] BEKKER, M.: Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen. Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[126] DUTTA, S.: Mathematical Modeling of Rotating Biological Contactor for Process Optimisation in Wastewater Treatment. Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[127] HAHN, H.H.; HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Die optimierte Kläranlage - Vision oder Realität? Karlsruhe 2007 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[128] FUCHS, S.; FACH, S.; HAHN, H.H.: Stoffströme in Flussgebieten - Von der Bilanzierung zur Bewirtschaftung. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[129] SCHERER, U.: Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion in einer Lösslandschaft. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[130] BECHTEL, A.: Abschätzung regionaler Nitrateinträge in das Grundwasser unter Verwendung von N_{min}-Daten. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[131] SCHEER, M.: Ermittlung und Bewertung der Wirkung der Abflusssteuerung für Kanalisationssysteme. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[132] LITTY, K.: User-Oriented Wastewater Treatment Technology in Developing and Newly Industrialising Countries. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[133] HOFFMANN, E., BLANK, A.: Nachhaltigkeit in der Abwasserreinigung - Der Weg ist das Ziel. Karlsruhe 2008 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[134] HILLENBRAND, T.: Analyse und Bewertung neuer urbaner Wasserinfrastruktursysteme. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[135] BLANK, A.: Einfluss der Abwassertemperatur auf Bemessung, Auslegung und Reinigungsleistung von Scheibentauchkörpern. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[136] TURKOVIĆ, R.: Sauerstoffregime in abwasserdurchsickerten Filtersanden. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[137] HOFFMANN, E., BLANK, A.: Abwasserreinigung - Perspektiven, Hilfsstoffe und neue Technologien. Karlsruhe 2009 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[138] HOMA, J.: Biofilmaktivität in Scheibentauchkörpern - Grundlagen, Anpassung und Anwendung des Dehydrogenasentests. Karlsruhe 2010 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[139] HOFFMANN, E., Blank, A.: Ökoeffizienz und Abwasserreinigung - Strategien und Lösungen für die Herausforderungen von Morgen. Karlsruhe 2010 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[140] MORCK, T.: Stickstoffelimination aus Schlammwasser mittels Ionenaustauscher und Elektrodialyse. Karlsruhe 2011 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[141] HOFFMANN, E.; BLANK, A.: Innovation und Flexibilität - Systemoptimierung und Systemerweiterung. Karlsruhe 2011 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[142] ORB, R.K.: Rückhalt hygienerelevanter Bakterien in mischwasserbeschickten Retentionsbodenfiltern - Konstruktive Hinweise. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[143] HOFFMANN, E., HOMA, J.: Zukunftsfähige Abwasser- und Schlammbehandlung - Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale. Flockungstage 2012. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[144] WEINGÄRTNER, D.E.: Greywater - Characteristics, Biodegradability and Reuse of some Greywaters. Karlsruhe 2013 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[145] FACH, S.: Bewertung der Abwasserbehandlung in Entwicklungs- und Schwellenländern. Karlsruhe 2012 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[146] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Strategien, Analysen, Kennwerte und Qualitätsaspekte. Flockungstage 2013. Karlsruhe 2013 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[147] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Bewährte und neue Techniken für die Aufgaben von Morgen. Flockungstage 2014. Karlsruhe 2014 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[148] HOFFMANN, E.; LEICHT, M.: Betriebliche Probleme, Lösungs- und Optimierungsstrategien. Flockungstage 2015. Karlsruhe 2015 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[149] HILGERT, S.: Analysis of spatial and temporal heterogeneities of methane emissions of reservoirs by correlating hydro-acoustic with sediment parameters, URN: urn:nbn:de:swb:90-469573, Karlsruhe 2015

[150] KEMPER, M.: Strömungsverhalten und Sedimentationswirksamkeit in Regenbecken mit Schrägklärer-Einbauten, DOI 10.5445/IR/1000068909, Karlsruhe 2016

[151] HOFFMANN, E., MORCK; T.: Dreißig Jahre Flockungstage. Flockungstage 2017. Karlsruhe 2017 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[152] WANDER, R.: Ableitung adäquater Daten für die Modellierung von urbanen Stoffeinträgen in die Gewässer auf Flussgebietsebene, DOI 10.5445/IR/10000 86653, Karlsruhe 2018

[153] ANGGRAINI, A.K.: Optimization of Slow Sand Filtration Design by Understanding the Influence of Operating Variables on the Physical Removal Mechanisms, DOI: 10.5445/IR/1000082692, Karlsruhe 2018

[154] MORCK, T.; HILLER, J.; FUCHS, S. (Hrsg.): Gegenwärtige Einsichten für zukünftige Entscheidungen. 31. Karlsruher Flockungstage 2018. Karlsruhe 2018 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[155] MORCK, T.; RAMASWAMI, S.; FUCHS, S. (Hrsg.): Siedlungswasserwirtschaft mit Weitblick - Von der Auslegung bis zur Rückgewinnung. 32. Karlsruher Flockungstage 2019. Karlsruhe 2019 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[156] WAGNER, A.: Event-Based Measurement and Mean Annual Flux Assessment of Suspended Sediment in Meso Scale Catchments, DOI 10.5445/IR/1000104223, Karlsruhe 2020

[157] MEULER-LIST, S.: Foulingverhalten einer kommunalen MBR-Anlage, DOI 10.5445/IR/1000120245, Karlsruhe 2020

[158] SOTIRI, K.: Integrated Sediment Yield and Stock Assessment for the Passaúna Reservoir, Brazil, DOI: 10.5445/IR/1000127716, Karlsruhe 2020

[159] AZARI, M.; FUCHS, S. (Hrsg.): Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung: Tagungsband der 33. Karlsruher Flockungstage 2022; DOI: 10.5445/IR/1000153905. Karlsruhe 2022 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[160] NCKEL, J.P.: Micropollutant Emissions from Combined Sewer Overflows, DOI: 10.5445/IR/1000156862, Karlsruhe 2023

[161] AZARI, M.; FUCHS, S. (Hrsg.): Moderne Ansätze in der Abwasserbehandlung - Volume II : Tagungsband der 34. Karlsruher Flockungstage 2023; DOI: 10.5445/IR/1000166033. Karlsruhe 2023 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

[162] AZARI, M.; FUCHS, S. (Hrsg.): Kreislaufwirtschaft und Klimaneutralität in der Abwasserbehandlung: Tagungsband der 35. Karlsruher Flockungstage 2024; https://doi.org/10.5445/ir/1000178590. Karlsruhe 2024 (Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe)

Bestellanschrift:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT - Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Institut für Wasser und Umwelt (IWU)
Wassergütewirtschaft
Abteilung: Schriftenreihe
Gotthard-Franz-Str. 3, Geb. 50.31
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721/608-42457
Fax: 0721/608-44729
E-Mail: irmtraud.kaupa@kit.edu