

# POWER-TO-X-KONZEPTE ZUR HERSTELLUNG VON SYNTHETISCHEN KRAFTSTOFFEN



Dipl.-Ing. Florian Möllenbruck, Dr.-Ing. Gerd Oeljeklaus, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Görner

Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik (LUAT), Universität Duisburg-Essen, 45141 Essen

## Grundlagen

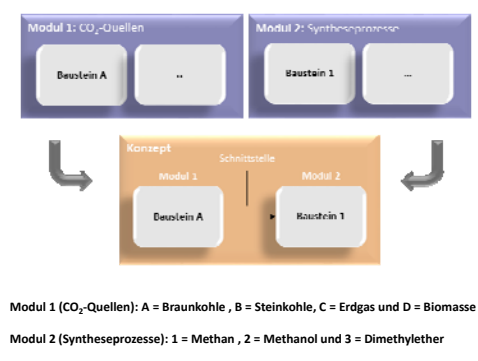
### Ausgangssituation und Zielsetzung

- Um die ambitionierten Klimaziele der Politik zu erreichen, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in den nächsten vier Jahrzehnten weltweit um 50 Prozent (%) gesenkt werden, in den Industriestaaten um mindestens 85 Prozent
- Ein vielversprechender **Ansatz** zur Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen im Verkehr ist die intelligente Kopplung der Sektoren Strom, Gas und Wärme. Unter dem Begriff Power-to-X (P2X) werden Technologien zusammengefasst, die auf eine Umwandlung von elektrischer Energie in stoffliche Energiespeicher, synt. Kraftstoffe und energieintensive Chemieprodukte zielen
- Ziel** dieser Arbeit ist eine ganzheitliche, d.h. technische, ökologische und ökonomische Analyse von ausgewählten, modular aufgebauten Power-to-X-Konzepten zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

### Methodik

- Jedes **Modul** besteht aus internen **Bausteinen**
  - Modul 1** repräsentiert CO<sub>2</sub>-Quellen
  - Modul 2** sind chemische Syntheseprozesse
- Bausteine sind beliebig kombinierbar und können fortlaufend ergänzt werden
- Das einzelne **Konzept** besteht folglich aus der Kopplung von zwei Modulen durch Bausteine über definierte **Schnittstellen (CO<sub>2</sub>-Abscheidung ...)**
- Abbildung der Basiskraftwerke als CO<sub>2</sub>-Quelle erfolgt mit dem Simulationsprogramm **EBSILON®Professional**
- Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Programm zur Simulation der Syntheseprozesse ist **Aspen Plus®**

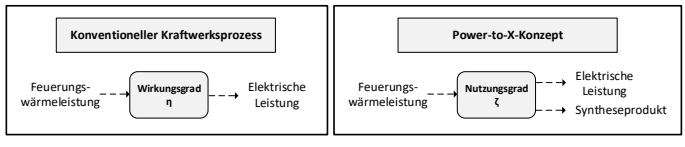
### Aufbau



## Kopplung der Sektoren Energie und Chemie

### Definition Nutzungsgrad

Für klassische Kraftwerksprozesse wird zur Bewertung der Wirkungsgrad verwendet. Durch die Integration einer Syntheseinheit verändert sich jedoch der Nutzen. Neben der elektrischen Leistung wird zusätzlich ein Syntheseprodukt hergestellt



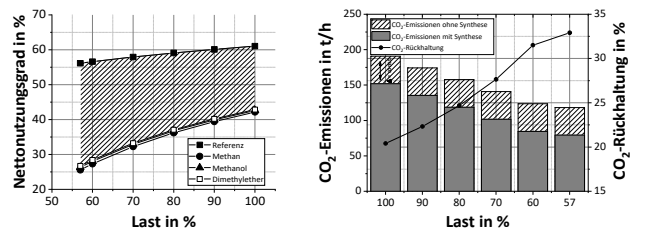
Der **Nutzungsgrad xi** für den Kraftwerksprozess mit integrierter Synthese kann wie folgt beschrieben werden:

$$\xi_{Netto} = \frac{P_{el,Netto} + \dot{m}_{Syn} \cdot H_{i,Syn}}{\dot{m}_{BR} \cdot H_{i,BR}}$$

### Nutzungsgrad und CO<sub>2</sub>-Emissionen

#### Beispiel Erdgaskraftwerk und chemische Synthesen:

- Leistungsbedarf der P2X-Synthese wird vom Kraftwerk gedeckt

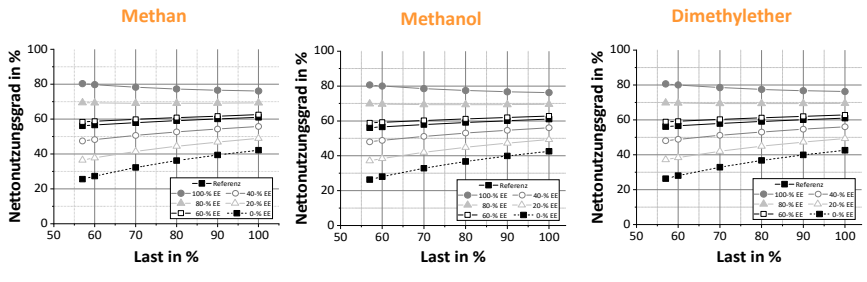


- **Reduktion des Nettonutzungsgrad** um:
  - 18,9 %-Punkte (Methan) bzw. 18,5 %-Punkte (Methanol) und 18,2 %-Punkte (DME) in Vollast
  - 30,6 %-Punkte (Methan) bzw. 29,8 %-Punkte (Methanol) und 29,4 %-Punkte (DME) in Minlast
- **Reduktion der prozentualen CO<sub>2</sub>-Emissionen** um 20,16 % in Vollast und 32,6 % in Minlast

## Integration Erneuerbare Energien (EE) und Perspektive

### Erneuerbare Energien

Einbindung von Erneuerbaren Energien zur Deckung des Leistungsbedarfs der P2X-Synthesen

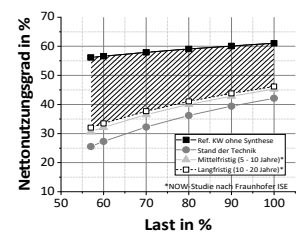


Break-Even Punkt: 55,7 % EE      Break-Even Punkt: 54,8 % EE      Break-Even Punkt: 54,0 % EE

### Perspektive

Variation des elektrischen Leistungsbedarfs der Elektrolyse entsprechend der NOW-Studie des Fraunhofer ISE:

- Vergleich Stand der Technik vs. Mittelfristiges Szenario vs. Langfristiges Szenario



- **Mittelfristig**, kann der Nettonutzungsgrad um 4,08 % auf durchschnittlich 37,90 % gesteigert werden
- **Langfristig**, d.h. in den nächsten 10 bis 20 Jahren, ist eine Steigerung von 5,22 % möglich.

### Zusammenfassung:

- Durch die Integration und entsprechende Skalierung einer Power-to-X-Synthese in einen bestehenden Kraftwerksprozess kann der Leistungsbereich eines Kraftwerks signifikant erweitert werden
- Weiterhin werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu 32,6 % gesenkt bei simultaner Produktion eines Wertstoffes bzw. Kraftstoffes
- Durch die Einbindung von Strom aus Erneuerbaren Energien kann die CO<sub>2</sub>-Emission und die Flexibilität eines Kraftwerks deutlich erhöht werden

### Ausblick:

- In den nächsten Schritten sollen mit Hilfe des gekoppelten Simulationsmodells weitere Untersuchungen hinsichtlich der Ökonomie und Ökologie durchgeführt werden:
  - Ökonomie: Vergleich der Fahrweise eines Kraftwerks mit und ohne Synthese
  - Ökologie: Vergleich der konventionellen und der CO<sub>2</sub>-basierten Herstellung der Syntheseprodukte

# POWER-TO-X- KONZEPTE ZUR HERSTELLUNG VON SYNTHETISCHEN KRAFTSTOFFEN

Name: Florian Möllenbruck  
Institut: Universität Duisburg-Essen  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik  
Fachrichtung Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik  
Adresse Leimkugelstr. 10; 45141 Essen  
Telefon 0201 183 7520  
Email: [florian.moellenbruck@uni-due.de](mailto:florian.moellenbruck@uni-due.de)

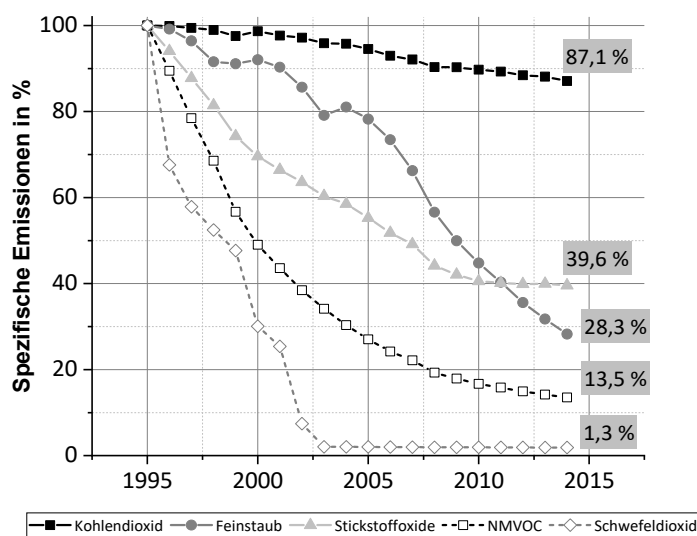
# POWER-TO-X- KONZEPTE ZUR HERSTELLUNG VON SYNTHETISCHEN KRAFTSTOFFEN

## Motivation und Einleitung

Um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs in den nächsten vier Jahrzehnten weltweit um 50 Prozent (%) gesenkt werden, in den Industriestaaten um mindestens 85 Prozent [6][7]. Im Schnitt belasten Pkw in Deutschland heute Umwelt und Klima weniger als in der Vergangenheit.

Das hat vor allem zwei Gründe: Der Gesetzgeber hat stufenweise Abgasvorschriften für neu zugelassene Pkw verschärft, woraufhin Autohersteller Motoren und Abgastechnik technisch verbessert haben. Des Weiteren verpflichtete der Gesetzgeber dazu, die Qualität des in den Verkehr gebrachten Kraftstoffes zu verbessern. Dadurch verringerten sich u.a. die spezifischen Emissionen pro Verkehrsaufwand an Schwefeldioxid bis zum Jahr 2014 gegenüber dem Ausgangsniveau im Jahr 1995 um rund 98 Prozent. Die spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des Pkw-Verkehrs nahmen allerdings nur um 13 % ab (siehe **Abbildung 1**), mit der Konsequenz, dass die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Verkehrssektor zwischen 1990 (163 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq.) und 2014 (160 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq.) nahezu konstant geblieben sind [6][8][9].

Ein vielversprechender Ansatz zur Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen im Verkehr ist die intelligente Kopplung der Sektoren Strom, Gas und Wärme. Unter dem Begriff Power-to-X (P2X) werden Technologien zusammengefasst, die auf eine Umwandlung von elektrischer Energie in stoffliche Energiespeicher, Energieträger und energieintensive Chemieprodukte zielen [9]. Diese Konzepte beinhalten eine direkte Verknüpfung zwischen energetischer und stofflicher Wertschöpfungskette und haben damit gleichzeitig ein besonderes Potenzial für die Verringerung des Einsatzes von fossilen Rohstoffen in den für den Wirtschaftsstandort Deutschland essentiellen Sektoren Energiewirtschaft, Chemie und Transport/Verkehr.

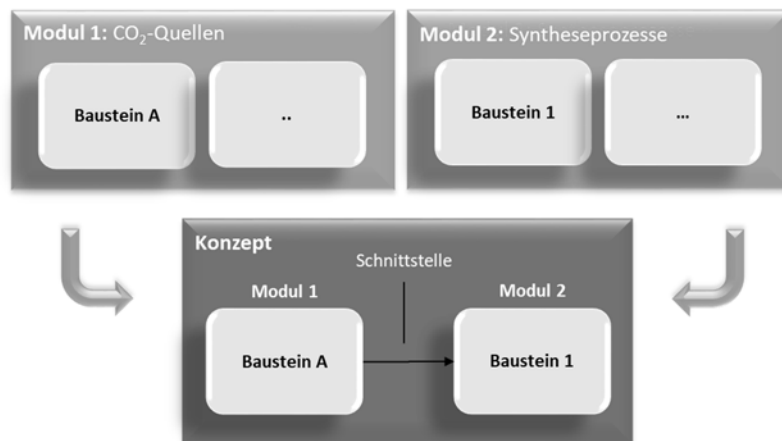


**Abbildung 1:** Spezifische Emissionen Pkw (Emissionen Pkw / Verkehrsaufwand Pkw) in Deutschland nach [6]

Ziel dieser Arbeit ist eine ganzheitliche, d.h. technische, ökologische und ökonomische Analyse von ausgewählten Power-to-X-Prozessen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen mittels modular aufgebauten Konzepten. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der CO<sub>2</sub>-basierten Herstellung der Syntheseprodukte Methan (CH<sub>4</sub>), Methanol (CH<sub>3</sub>OH) und Dimethylether (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH).

Die Arbeit soll einen Beitrag dazu liefern, die Effekte der Kopplung von Stromerzeugungsanlagen wie z.B. Erdgaskraftwerken mit chemischen Synthesen zu verstehen um die vorhandene Lücke in der Literatur zu schließen.

Der Aufbau der modularen Architektur dieser Arbeit ist in **Abbildung 2** gezeigt. Jedes Modul besteht aus internen Bausteinen. Diese Bausteine repräsentieren im Fall von Modul 1 CO<sub>2</sub>-Quellen wie z.B. ein Kohlekraftwerk oder im Beispiel von Modul 2 Syntheseprozesse wie die chemische Methanisierung. Die Bausteine von Modul 1 sind beliebig mit Bausteinen aus Modul 2 innerhalb eines Konzeptes kombinierbar und können fortlaufend ergänzt werden. Für diese Arbeit werden die folgenden Bausteine für Modul 1 (CO<sub>2</sub>-Quellen) und Modul 2 (Syntheseprozesse) ausgewählt:



**Abbildung 2:** Modulare Architektur zur systematischen Analyse von ausgewählten Power-to-X-Prozessen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

- Modul 1 (CO<sub>2</sub>-Quellen): A = Braunkohle , B = Steinkohle, C = Erdgas und D = Biomasse
- Modul 2 (Syntheseprozess): 1 = Methan , 2 = Methanol und 3 = Dimethylether

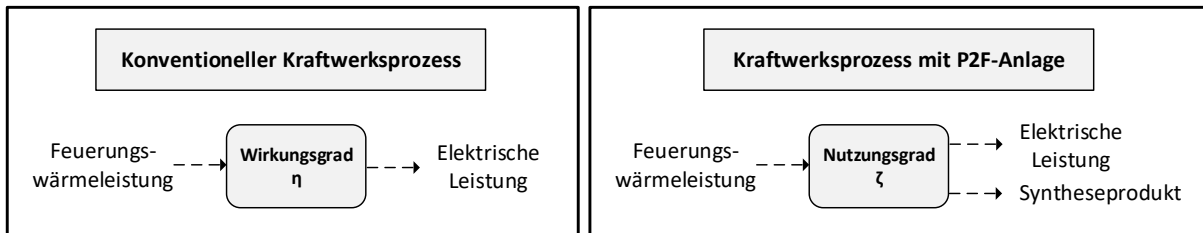
Die CO<sub>2</sub>-Quellen sind dabei, ausgehend von aktuellen politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen, nach ihrer erwartungsgemäßen Perspektive der Anwendung sortiert. Während kohlebefeuerte Anlagen bereits marktbedingt aus dem Netz genommen werden, stehen Erdgas- und Biomassekraftwerke langfristig als Quellen für Kohlenstoffdioxid zur Verfügung [18]. Das einzelne Konzept besteht folglich aus der Kopplung von zwei Modulen durch Bausteine über definierte Schnittstellen. Die technischen Schnittstellen im Rahmen der betrachteten Konzepte in dieser Arbeit sind zum einen die CO<sub>2</sub>-Abscheidung über eine chemische Wäsche zur Bereitstellung des Eduktes Kohlenstoffdioxid und zum anderen die Wasserelektrolyse zur Bereitstellung des Eduktes Wasserstoff. In der Konsequenz ergeben sich zwölf (vier CO<sub>2</sub>-Quellen und drei Synthesen) unterschiedliche Konzepte, die im Rahmen dieser Arbeit miteinander verglichen werden. Die energetische Bewertung der betrachteten CO<sub>2</sub>-Quellen erfordert es, einheitliche und eindeutig definierte Basiskraftwerke für die Prozessanalysen zu verwenden. Die Abbildung der Basiskraftwerke für Braun- und Steinkohle sowie für Erdgas und Biomasse erfolgt dabei mit Hilfe des Simulationsprogramms EBSILON®Professional, eine Software für die Simulation thermodynamischer Kreisprozesse sowie zur Anlagenplanung, -auslegung und -optimierung. Die Integration der Syntheseprozesse in Stromerzeugungsanlagen zur thermodynamischen Bewertung erfordert weiterhin die Erstellung von verfahrenstechnischen Berechnungsmodellen, welche die in den Syntheseprozessen ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse charakterisieren. Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Programm zur Simulation der Syntheseprozesse ist Aspen Plus®, eine kommerziell erwerbliche Software der Firma Aspen Technology Inc. Der folgende Auszug fokussiert sich auf die Kopplung eines Erdgaskraftwerks mit den genannten Synthesen.

### Erste Zwischenergebnisse

Um eine größtmögliche Flexibilisierung eines Kraftwerks zu erreichen wird eine Mindestlast von 0 MW<sub>el</sub> angestrebt. Daher ist es sinnvoll die Syntheseprozesse so zu dimensionieren, dass diese exakt die Mindestlast eines Kraftwerks als Nennlast abführen können und die Anlage dadurch theoretisch

einen stetig fahrbaren Lastbereich von 0 – 100 % aufweist. Darüber hinaus kann das Kraftwerk durch diese Dimensionierung den elektrischen Bedarf für die Synthesen in allen Lastpunkten mit der erzeugten Leistung zur Verfügung stellen.

Neben einer einheitlichen Dimensionierung ist es notwendig Prozessparameter zu definieren, um die unterschiedlichen Synthesen miteinander vergleichen zu können. Für klassische Kraftwerksprozesse wird hierzu der Wirkungsgrad verwendet. Durch die Integration einer Syntheseinheit verändert sich jedoch der Nutzen, wie **Abbildung 3** zeigt. Neben der elektrischen Leistung wird zusätzlich ein Syntheseprodukt hergestellt.

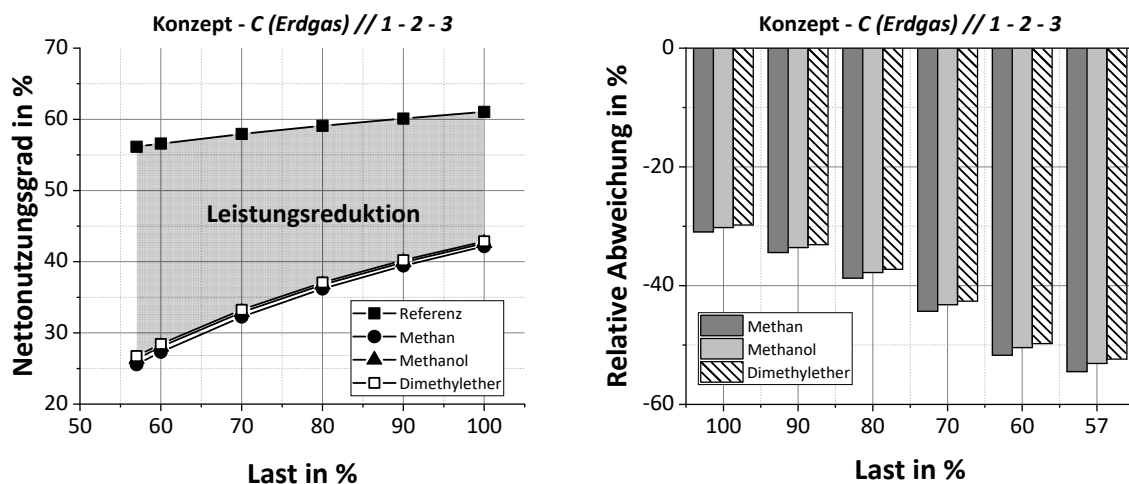


**Abbildung 3:** Vergleich klassischer Kraftwerksprozess und Kraftwerksprozess mit P2X-Anlage

Der Nutzungsgrad  $\xi$  für den Kraftwerksprozess mit integrierter Synthese kann dann wie folgt beschrieben werden:

$$\xi_{Netto} = \frac{P_{el,Netto} + \dot{m}_{Syn} \cdot H_{i,Syn}}{\dot{m}_{Br} \cdot H_{i,Br}} \quad (Gl. 1)$$

In **Gleichung 1** ist  $P_{el,Netto}$  die elektrische Nettoleistung des Kraftwerks,  $\dot{m}_{Br}$  der Brennstoffmassenstrom und  $H_{i,Br}$  der untere Heizwert des Brennstoffs. Weiterhin charakterisieren die Synthesemenge  $\dot{m}_{Syn}$  und der Heizwert des Syntheseprodukts  $H_{i,Syn}$  den Nutzen der Synthese.



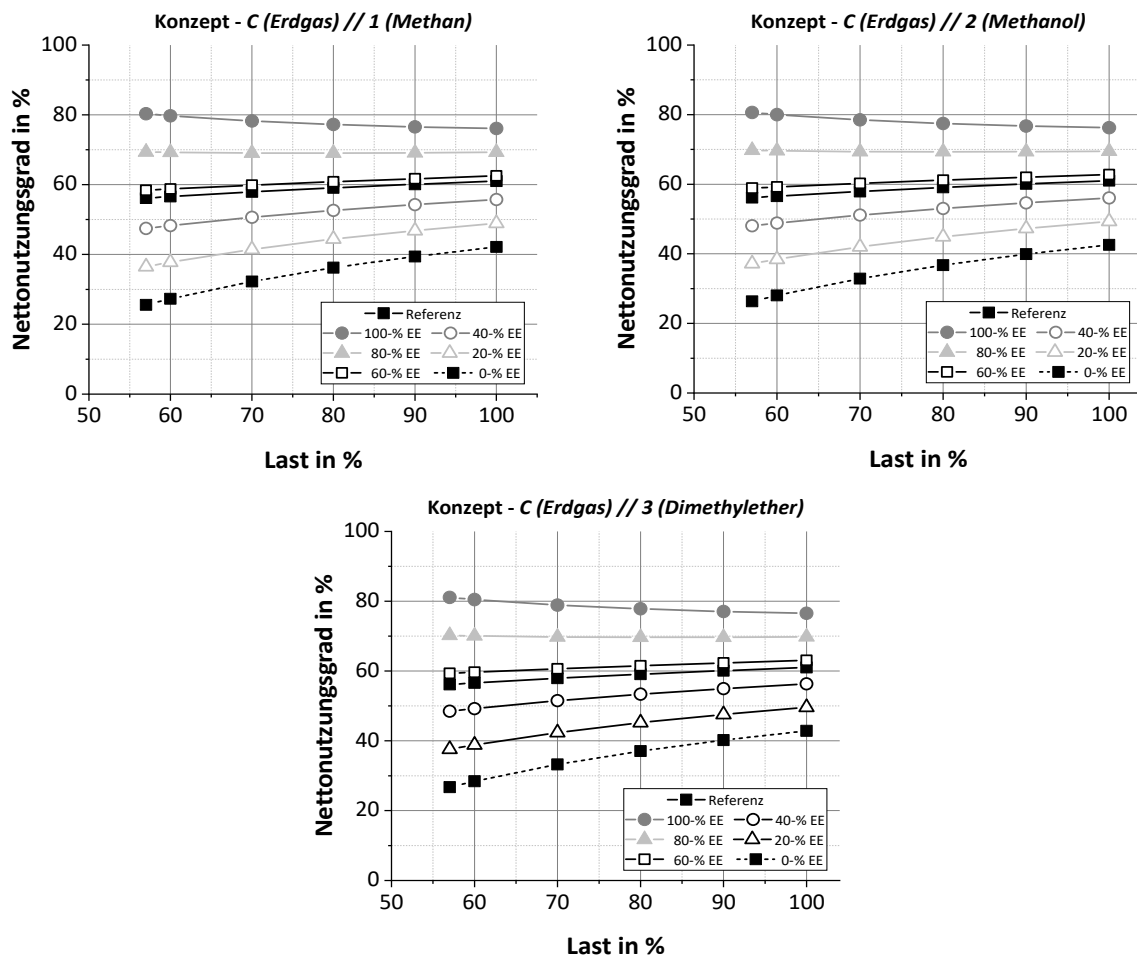
**Abbildung 4:** Nettonutzungsgrad eines Erdgaskraftwerks mit Synthese und Schnittstellen (Konzept C1 bis C3)

In **Abbildung 4** ist der Nettonutzungsgrad der Konzepte C1, C2 und C3 für verschiedene Lasten dargestellt. Für den Referenzzustand Ref. KW ohne Synthese entspricht der Verlauf dem Nettowirkungsgrad des Kraftwerks. Die hervorgehobene Fläche zeigt den Leistungsverlust durch die Synthesen und Schnittstellen.

Für die gezeigten Konzepte reduziert sich der Nettonutzungsgrad um minimal 18,9 %-Punkte (Methan) bzw. 18,5 %-Punkte (Methanol) und 18,2 %-Punkte (Dimethylether) in Volllast und maximal 30,6 %-Punkte (Methan) bzw. 29,8 %-Punkte (Methanol) und 29,4 %-Punkte (Dimethylether) in Mindestlast. In Mindestlast ist der Wert ausschließlich durch die Nutzung der Synthese charakterisiert, da der Teil der Stromnutzung aus **Gleichung 1** entsprechend der Dimensionierung gleich null ist.

Durch die Dimensionierung auf Mindestlast kann das Kraftwerk den elektrischen Bedarf für die Synthesen einschließlich Elektrolyse und CO<sub>2</sub>-Abscheidung in allen Lastpunkten mit der erzeugten Leistung zur Verfügung stellen. Um den Verlust jedoch zu minimieren, sind externe Ressourcen erforderlich. Hier bietet sich der Einsatz von erneuerbaren Energien an.

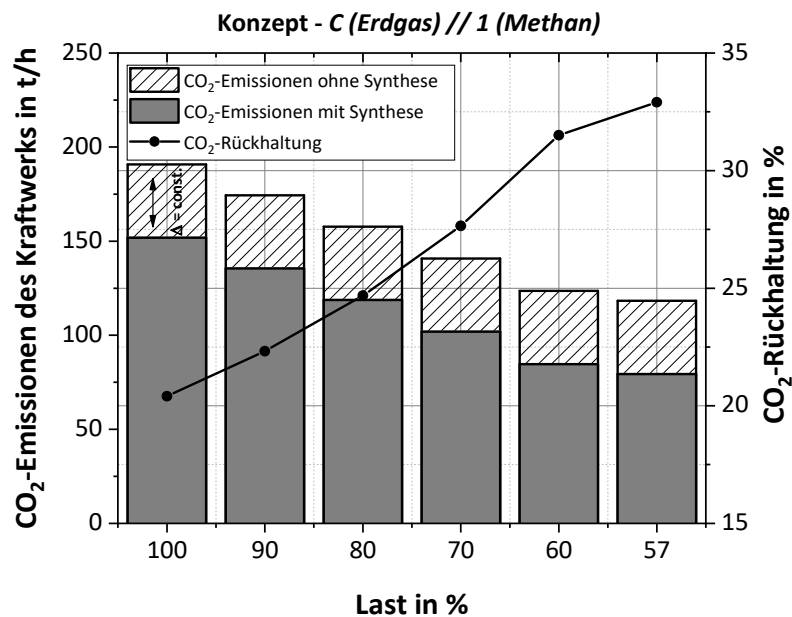
**Abbildung 5** zeigt den Verlauf des Nettonutzungsgrads bei Variation des Anteils erneuerbarer Energien (EE) zur Deckung des elektrischen Leistungsbedarfs. Die schwarz gestrichelten Linien zeigen dabei den Verlauf für 0 % EE. Der Break-Even Punkt zur Erreichung des Referenzzustandes liegt bei 55,7 % EE für Konzept C1, 54,8 % EE für Konzept C2 und 54 % EE für Konzept C3. Für EE-Anteile unterhalb des Break-Even-Punktes ergibt sich weiterhin ein Nutzungsdefizit, für Punkte oberhalb jedoch eine Steigerung des Nutzens.



**Abbildung 5:** Nettonutzungsgrad mit Variation der erneuerbaren Energien (Konzept C1 bis C3)

In **Abbildung 6** sind beispielhaft die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen und die CO<sub>2</sub>-Rückhaltung für das Konzept C1 dargestellt. In Volllast (100 %) werden 20,16 % und in Mindestlast (57 %) 32,6 % abgeschieden und zur Herstellung von Methan genutzt. Im Vergleich zu kohlebefeuelten Konzepten ist die prozentuale Rückhaltung deutlich höher.

Dies hat zwei wesentliche Gründe. Zum einen ist die Mindestlast des Erdgaskraftwerks deutlich größer als die Mindestlast von Steinkohle- und Braunkohlekraftwerken. Zum anderen ist der CO<sub>2</sub>-Anteil im Rauchgas von Erdgaskraftwerken deutlich geringer.



**Abbildung 6:** CO<sub>2</sub>-Emissionen und CO<sub>2</sub>-Rückhaltung am Beispiel von Konzept C1

### Zwischenfazit

Durch die Integration und entsprechende Dimensionierung einer Power-to-X-Anlage in einen bestehenden Kraftwerksprozess kann der Leistungsbereich eines Kraftwerks signifikant erhöht werden. Weiterhin werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu 32,6 % (siehe **Abbildung 6**) gesenkt bei simultaner Produktion eines Wertstoffes bzw. Kraftstoffes.

Die Bereitstellung der benötigten Betriebsmedien für die Synthesen hat einen deutlichen Einfluss auf den Kraftwerksprozess. Der thermische Leistungsbedarf resultiert im Wesentlichen aus der CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Desorption des Lösungsmittels), während der elektrische Leistungsbedarf der Synthese von der Elektrolyse (96 %) dominiert wird. Dies führt zu einer Reduktion des Nutzungsgrades entsprechend **Abbildung 4**. Diese kann durch die Einbindung erneuerbarer Energien signifikant minimiert bzw. ab einem sogenannten Break-Even Point gesteigert werden (siehe **Abbildung 5**).

In den nächsten Schritten sollen mit Hilfe des gekoppelten Simulationsmodells weitere Untersuchungen hinsichtlich der Ökonomie und Ökologie durchgeführt werden. Durch den vergrößerten Leistungsbereich kann das Kraftwerk auch betrieben werden, wenn der Strompreis entsprechend niedrig ist.