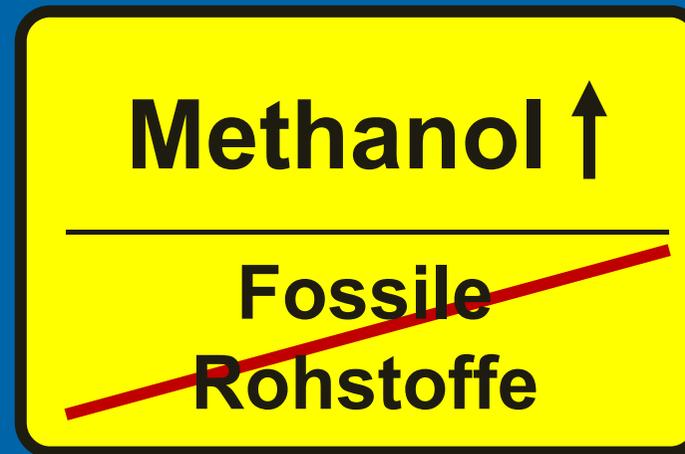




TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Methanol – Energie- und Chemierohstoff der Zukunft



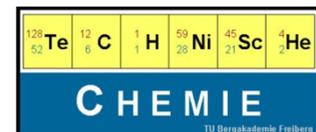
Martin Bertau
TU Bergakademie Freiberg



Die Energiewende

- Historische Chance
- Strategisches Konzept fehlt
- Planloser Aktionismus
- Weltanschauliche Überprägung
- Nicht wissenschaftsgetrieben
- Lagerdenken Methan vs. Methanol
- Unüberschaubare Kosten
- Folge: Mangelnde Akzeptanz in der Bevölkerung

→ Dabei ist die ‚Technische Photosynthese‘ in greifbare Nähe gerückt



Sozioökonomische Faktoren

- Eine Energiewende muß volkswirtschaftlich verträglich sein
- D.h. die bestehende Infrastruktur muß weitestgehend weiterverwendet werden können
- Eine Energiewende darf nicht zu sozialen Ungleichheiten führen
- Der kostengünstige Zugang zu Energie ist ein Menschenrecht
- Er steht dem Menschenrecht auf Zugang zu sauberem Wasser in nichts nach
- Hohe Energiepreise verletzen dieses Grundrecht
- Günstige Strompreise für Industriekunden erhöhen die globale Wettbewerbsfähigkeit und sichern so Arbeitsplätze und Wohlstand
- Gleichzeitig muß der Zugang zu günstiger Energie umweltverträglich erfolgen
- Ausweg: Erneuerbare Energien



Anforderungen an ein Energiewende-Konzept II

Speichersysteme

- Ausreichend Speicherkapazitäten für EE benötigt
- Die Auswahl der Speichersysteme hat nach streng wissenschaftlich-technischen Regeln zu erfolgen
- Forderung nach der Bezahlbarkeit einer Speicherung von EE



Integrationsfähigkeit

- Eine Energiewende *ex cathedra* ist zum Scheitern verurteilt
- Die Entfossilierung unserer Energieversorgung ist ein kontinuierlicher, schrittweiser Prozeß
- Die Energiewende wird volkswirtschaftlich nur erfolgreich umgesetzt werden können, wenn das Energiewende-Konzept über ausreichend Schnittstellen zur gegenwärtigen Energieversorgung führt
- Der Energiespeicher mit der höchsten Speicherdichte ist die chemische Bindung
- Die in Frage kommenden Energiespeichersysteme sind C-basiert
- Speichertechnologien für EE müssen Schnittstellen zur C-basierten Energierzeugung aufweisen
- Eine Substitution fossiler Energien kann nur über eine schrittweise Integration von EE erfolgen

Integrationsfähigkeit

- Input: Diversifizierte Rohstoffbasis liefert identische Intermediate
- Output: Identische Produkte ungeachtet der Rohstoffbasis
- Energie: Solarenergie muß sich zwanglos in die bestehende Energieversorgung integrieren lassen

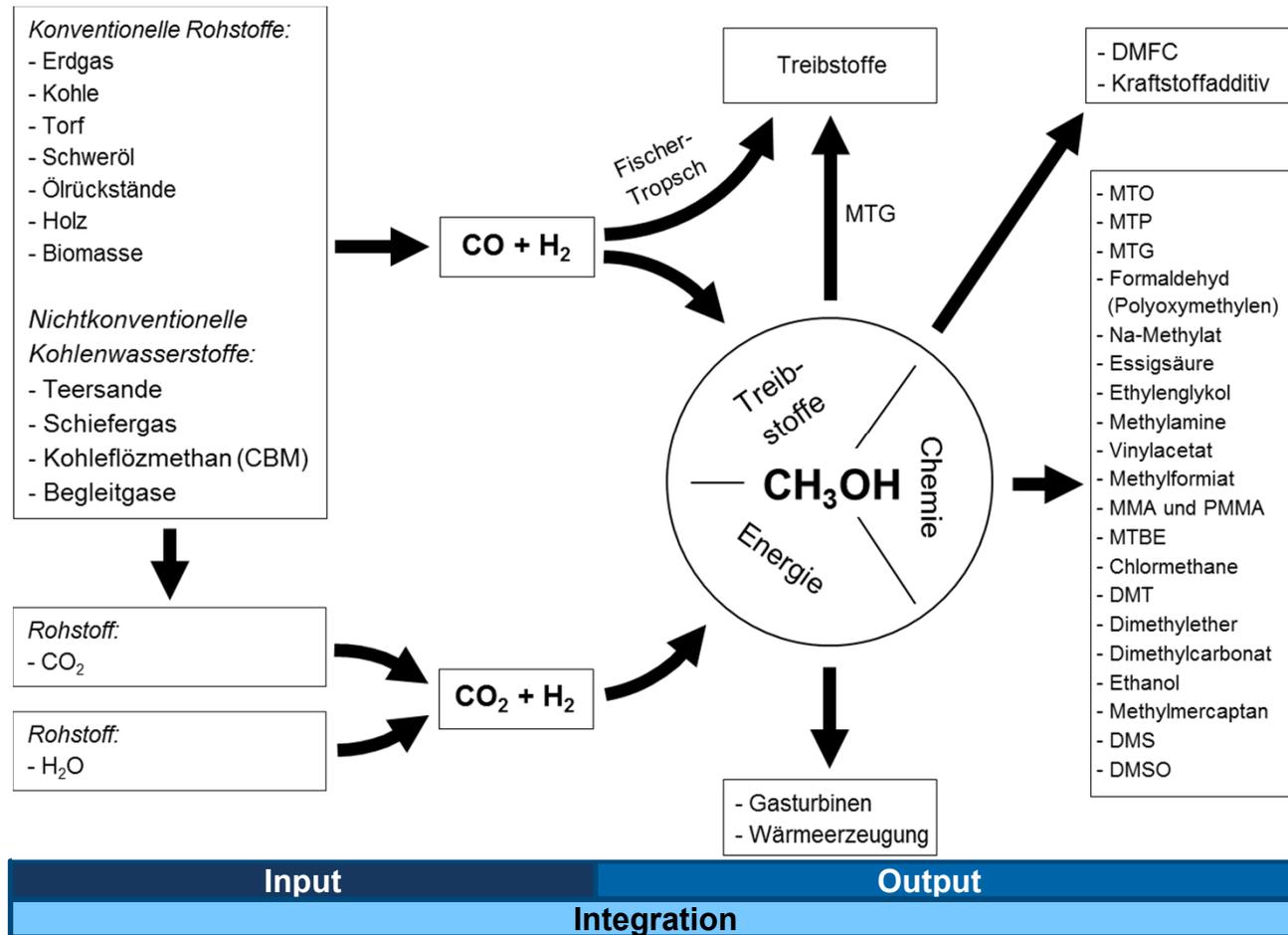
Die Integrierung der Solarenergie kann

– elektrisch (PV, Solarthermie, Wind, Wasserkraft)

– stofflich (Biomasse, SNG, Methanol)

erfolgen

Integrationsfähigkeit: Rohstoffe, Energie, Produkte



Modifiziert nach:
 M. Bertau, H. Offermanns, L. Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke: Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future, Springer Verlag Heidelberg, 2014. ISBN 978-3642397080

Integrationsfähigkeit

- Hochspannungsnetz
 - Produktion und Verbrauch müssen sich zu jeder Zeit ausgleichen
 - ≤ 80 GW
 - Gesichert:
 - Fossil ≥ 90 %
 - EE ≤ 20 %
 - Regionale Stromversorgung: Kraftwerke decken Radius von 50 km ab
 - Zukunft: Zentrale Stromversorgung
 - PV: Süd \rightarrow Nord
 - Wind: Nord \rightarrow Süd

Integrationsfähigkeit

- Einspeisung von EE ins Hochspannungsnetz
 - Hohe Fluktuation (Tag/Nacht, Jahreszeiten)
 - Bereits jetzt: 20 netzstabilisierende Eingriffe pro Tag (früher: 20 pro Jahr)
 - EU-weite Netzintegration
 - Wir exportieren
 - EE-Überschußstrom ins Ausland
 - Unsere Probleme mit EE-Überschußstrom ins Ausland
 - Netzausbau hinkt um Jahre hinterher
 - Fragen der Offshore-Technik ungelöst
 - Die Wirkung des Smart Grid wird mittlerweile kritisch eingeschätzt
- Lösung: Entkopplung des Energietransports vom Hochspannungsnetz
 - Stofflicher Energietransport über Pipelines (Methanol, SNG)



Energiespeicher – Status quo

- EE kann Deutschlands täglichen Energiebedarf decken innerhalb:
 - Wind 1 d
 - PV 1 h
- Problem oder Chance?
 - Problem:
 - Hohe Überschußströme
 - Hohe Fluktuation
 - Chance:
 - Instantane Konversion des Überschußstroms in stoffliche Energiespeicher
 - Grundlastabdeckung über das gesamte Jahr
 - Überregionale Distributionsfähigkeit
- Fazit:
Über transportable stoffliche Energiespeicher offenbaren sich EE als Chance!



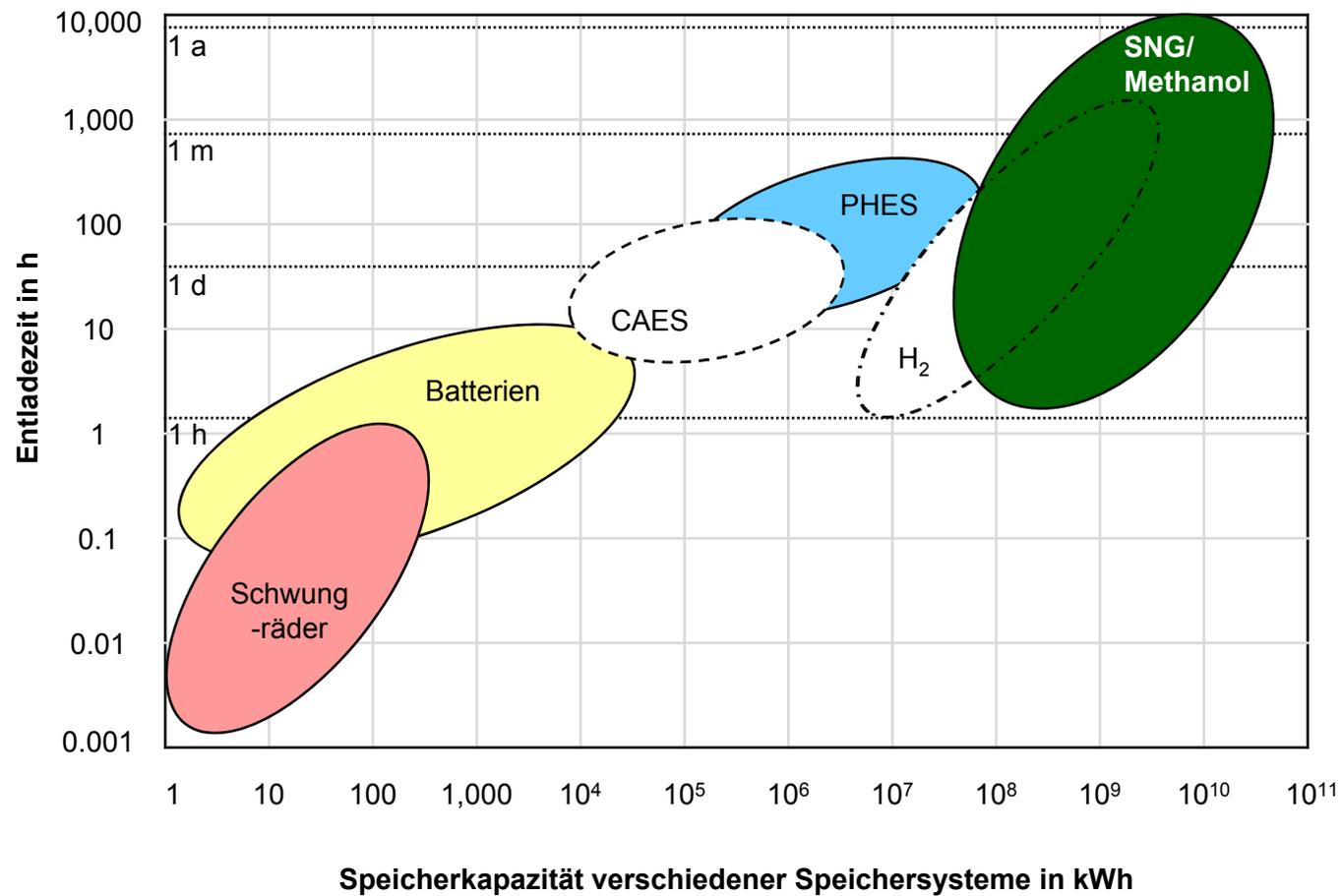


Energiespeicher – Status quo

- Die Belastung des Stromnetzes durch Überschußstrom führt derzeit zu durchschnittlich 3 % Abschaltung von Kraftwerksleistung
- Durch die regionale Ungleichverteilung der EE-Erzeuger kommt es aber zu regionalen Spitzen von bis zu 40 % Abschaltung regional
- Dringender Bedarf für eine tragfähige Lösung zur Energiespeicherung
 - Spätestens ab 2025 benötigt



- Allein stoffliche Energiespeicher können Energie langfristig vorhalten



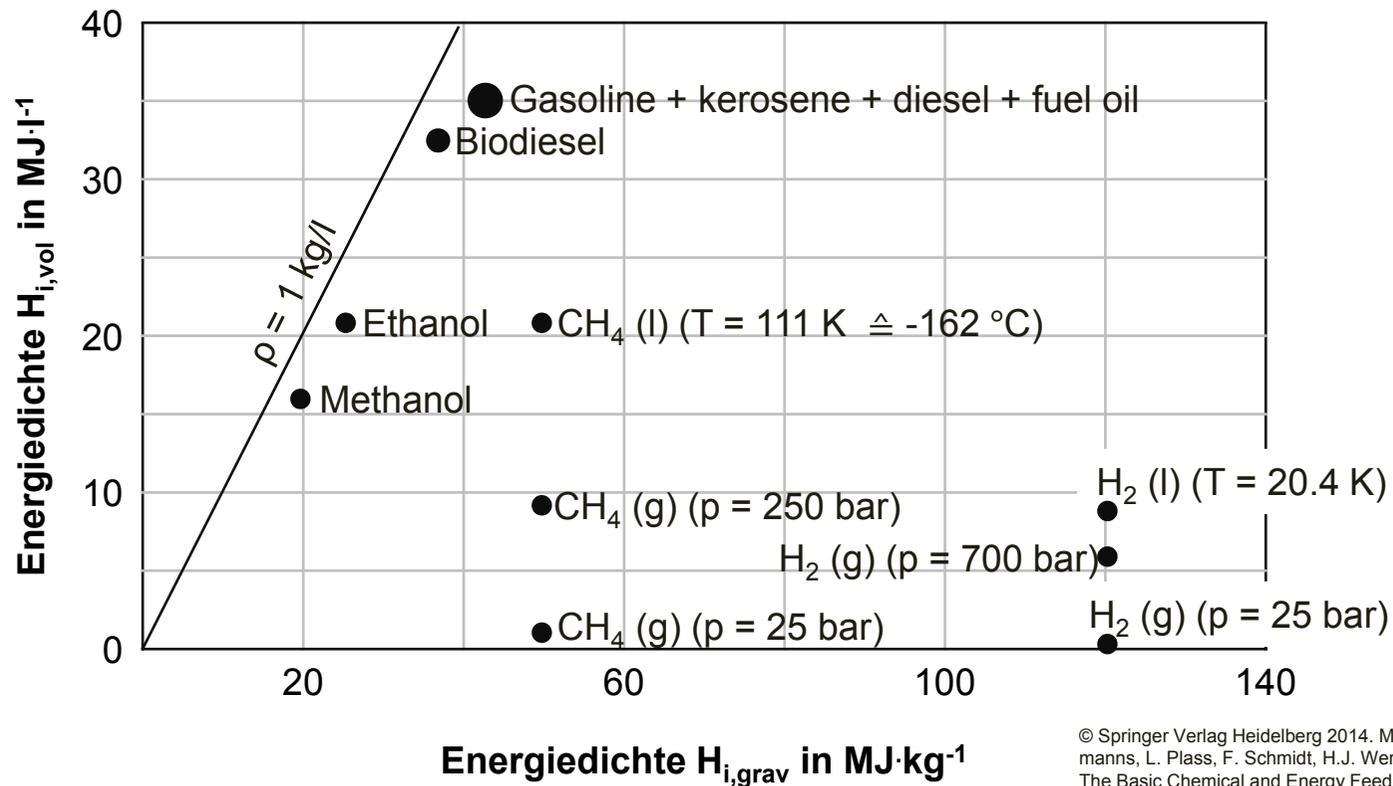
Modifiziert nach:
M. Bertau, H. Offermanns, L.
Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke:
Methanol: The Basic Chemical and
Energy Feedstock of the Future,
Springer Verlag Heidelberg, 2014,
ISBN 978-3642397080 und dort
zitierte Literatur.

- Situation in Deutschland
- Die gesamte Speicherkapazität kann eine Grundlast von 60 GW max. 30 min. aufrechterhalten
 - + Mittellast 75 GW
 - + Spitzenlast 80 GW
- Benötigte Speicherkapazität für 90 Tage:
 - 175 TWh_{el}
 - Davon Grundlast: 130 TWh_{el}
- Es gibt keine Alternative zur großmaßstäblichen stofflichen Energiespeicherung
- In Frage kommen ausschließlich:
 - Methan (SNG)
 - Methanol

Energiedichten verschiedener Energieträger

- Konventionelle Energieträger haben eine hohe volumetrische *und* gravimetrische Energiedichte
- Die Energiedichte von Methanol und Ethanol liegt bei nur ~50 % davon
- Aber: Als Flüssigkeiten können sie leicht und sicher gespeichert und transportiert werden
- Methan und Wasserstoff dagegen benötigen Hochdruckspeicher
- Für Wasserstoff existieren keine technisch brauchbaren mobilen Anwendungen

Energiedichten verschiedener Energieträger



© Springer Verlag Heidelberg 2014. M. Bertau, H. Offermanns, L. Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke: Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future, ISBN 978-3642397080

Vergleich Methan ↔ Methanol

- Die Frage nach dem optimalen Speichermedium ergibt sich u.a. aus:
 - Produktionskosten je GJ elektrischer Energie
 - Gesamtwirkungsgrad der Produktion
 - Energiedichte
 - Integrationsfähigkeit
 - Sozioökonomische und volkswirtschaftliche Verträglichkeit
 - Rückverstrombarkeit
 - Verwendungsvariabilität

Vergleich Methan ↔ Methanol

- Für Methan als gasförmigem Speichermedium ergeben sich Besonderheiten
- Im Gegensatz zu Methanol ist Methan kompressibel
- D.h. die Verdichtung und Entspannung sind energieintensive Prozesse
- Dies geht zu Lasten des Gesamtwirkungsgrades
- Folge: Trotz seiner formal höheren Energiedichte ist Methan gegenüber Methanol nicht der beste Energiespeicher

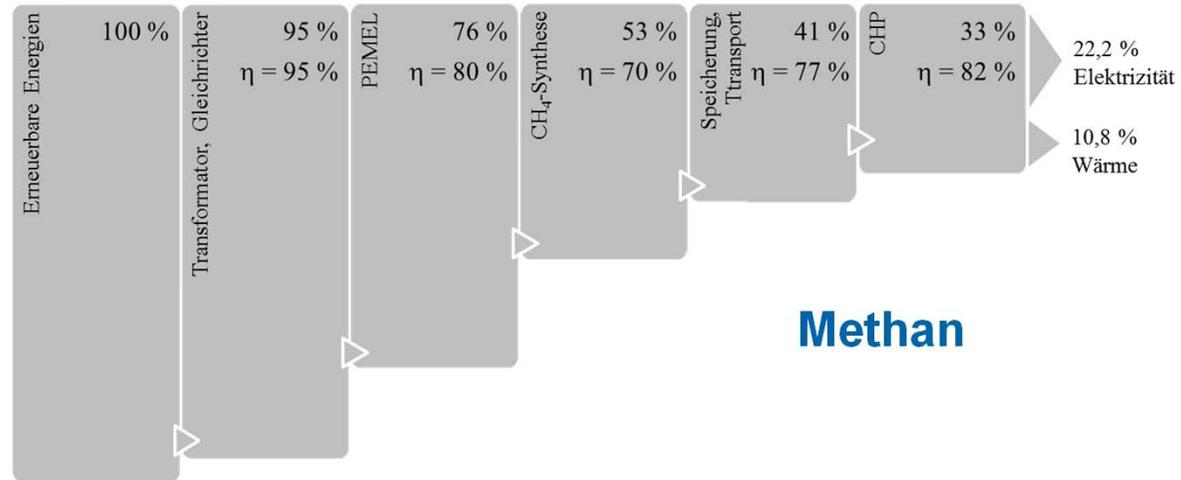
Energieverluste in % des Energieinhaltes von Methan

- Stromkonversion:
 - 4% im Wechselrichter,
 - 10...15% im Gleichrichter
 - zzgl. Transportverluste
- Druckelektrolyseur: Bei 80 bar nicht signifikant
- Kompression auf 20 MPa (200 bar) (aus Synthese): 8,3 %
 - Zum Vergleich: H₂ 7,5 %
- Transport:
 - ~0,2 % Antriebsgasverbrauch je 100 km, teils aber auch höher
 - Grund: Alle 100...250 km muß nachverdichtet werden
 - Abfuhr der Kompressionswärme: ~1 %

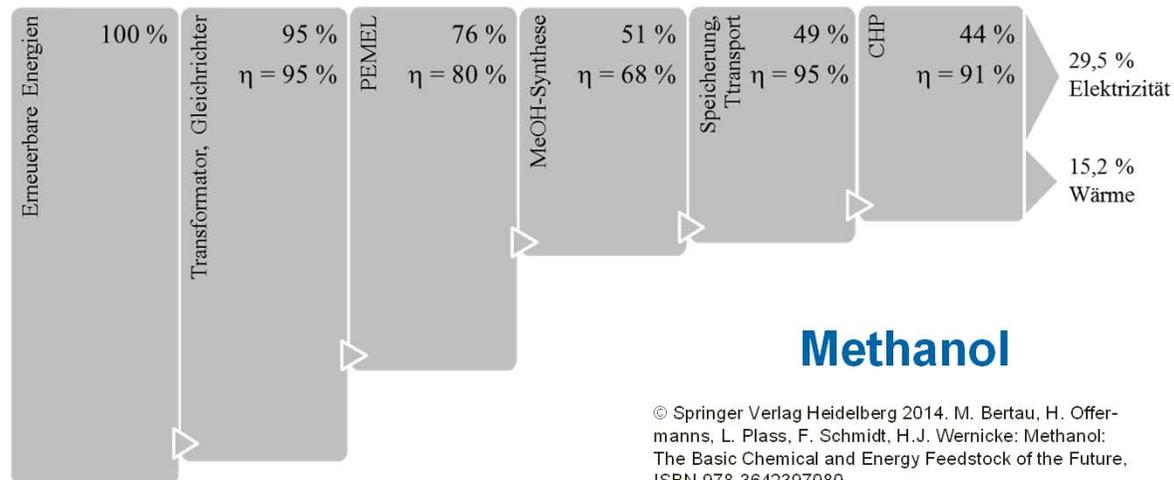
Energieverluste in % des Energieinhaltes von Methan

- Dekompression
 - ~1 %
 - Grund: Zuheizung, um Entspannungskälte zu kompensieren
 - Räumlich getrennt von Kompression
 - Daher keine Reintegration der Kompressionswärme möglich
- Fazit:
 - Methan besitzt einen höheren gravimetrischen Energieinhalt als Methanol
 - Methanol hat einen höheren volumetrischen Energieinhalt als Methan
 - Methanol ist bereits kondensiert, daher keine Kompressionsverluste
 - Die Energieverluste durch Kompression reduzieren den Gesamtwirkungsgrad der Methanisierung gegenüber Methanol

Vergleich der Wirkungsgrade: Szenario Lurgi /TUBAF

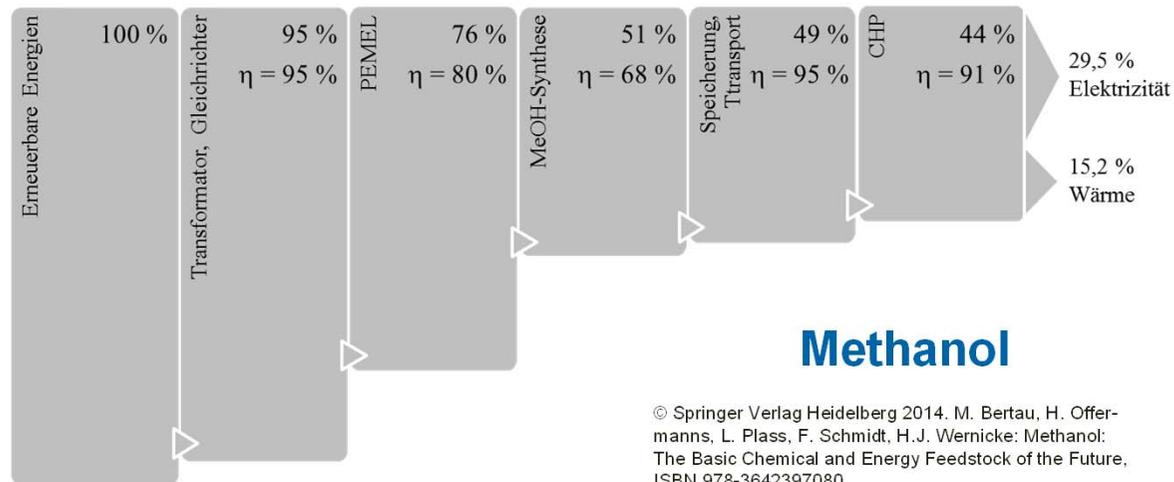
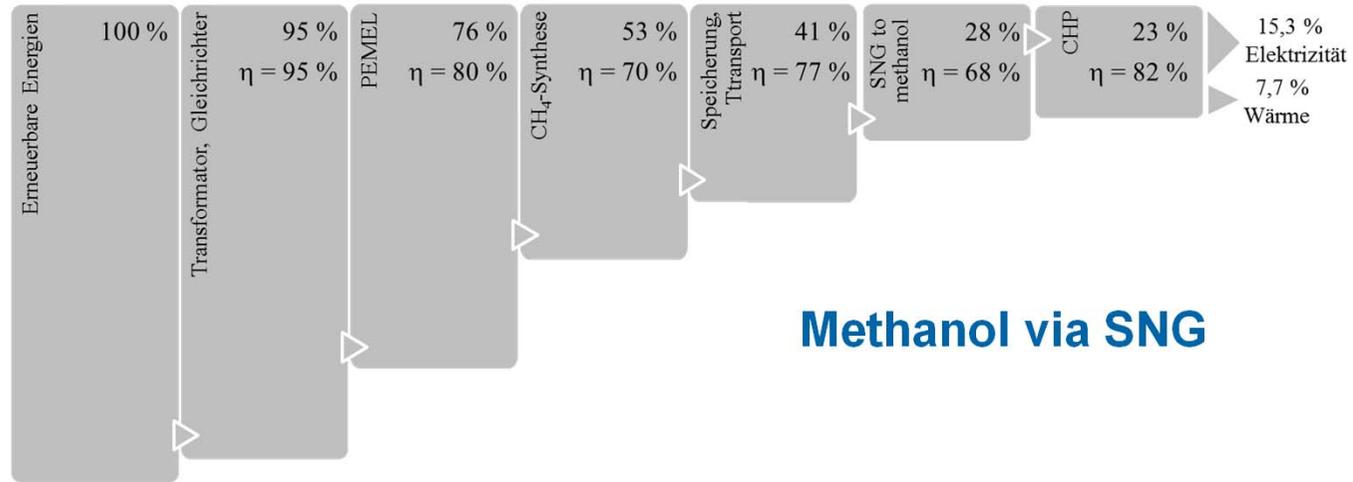


Methan



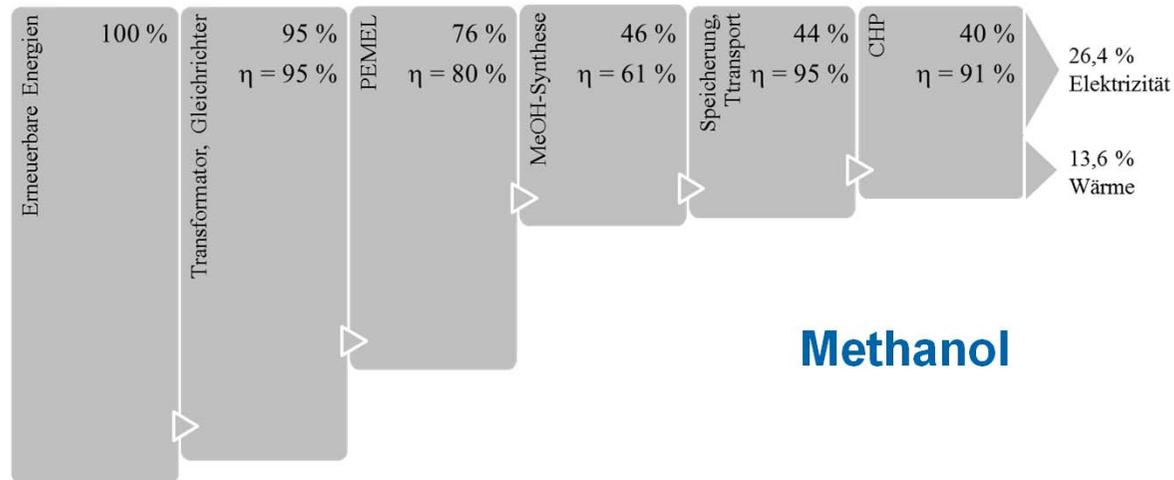
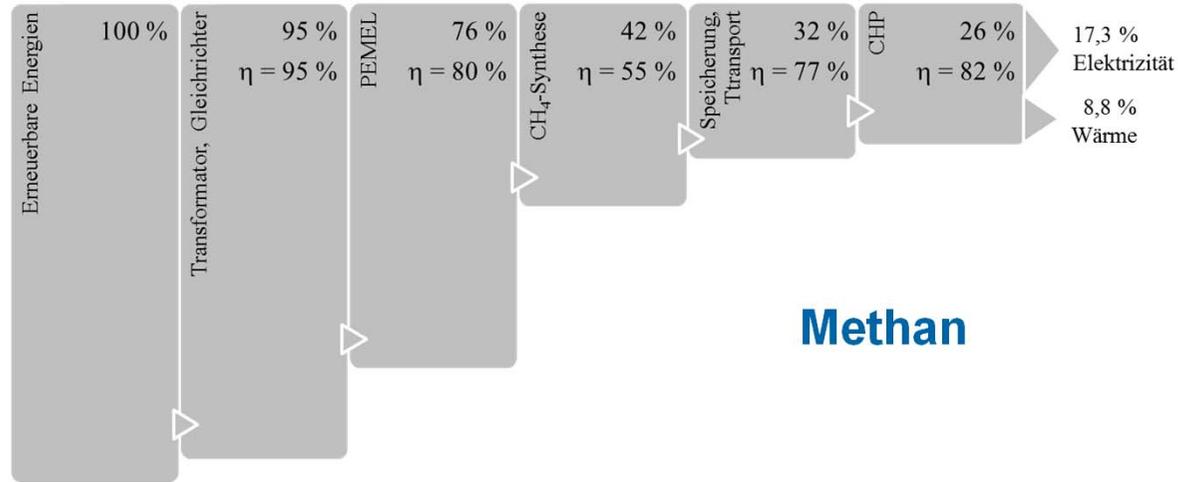
Methanol

Vergleich der Wirkungsgrade: Szenario Lurgi /TUBAF

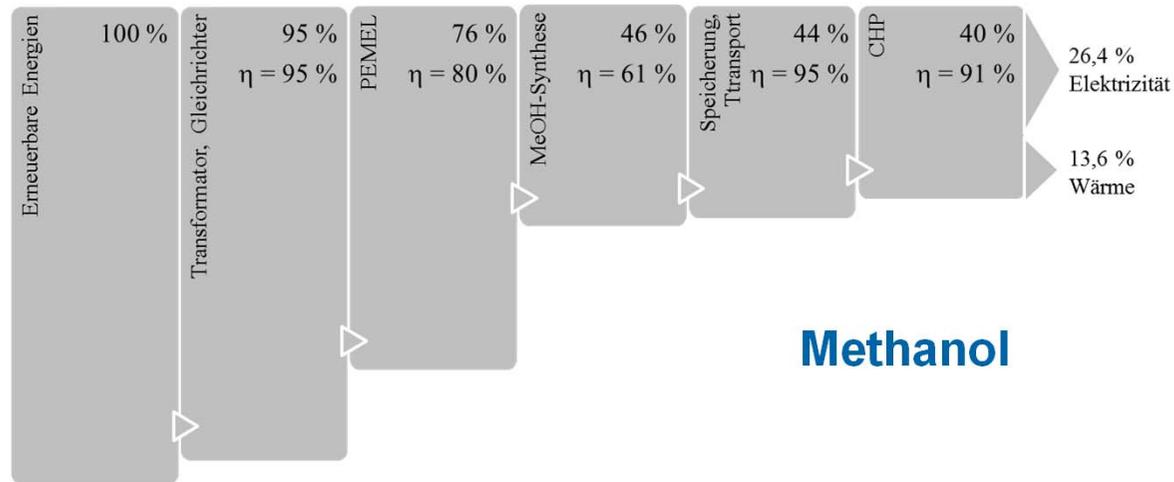
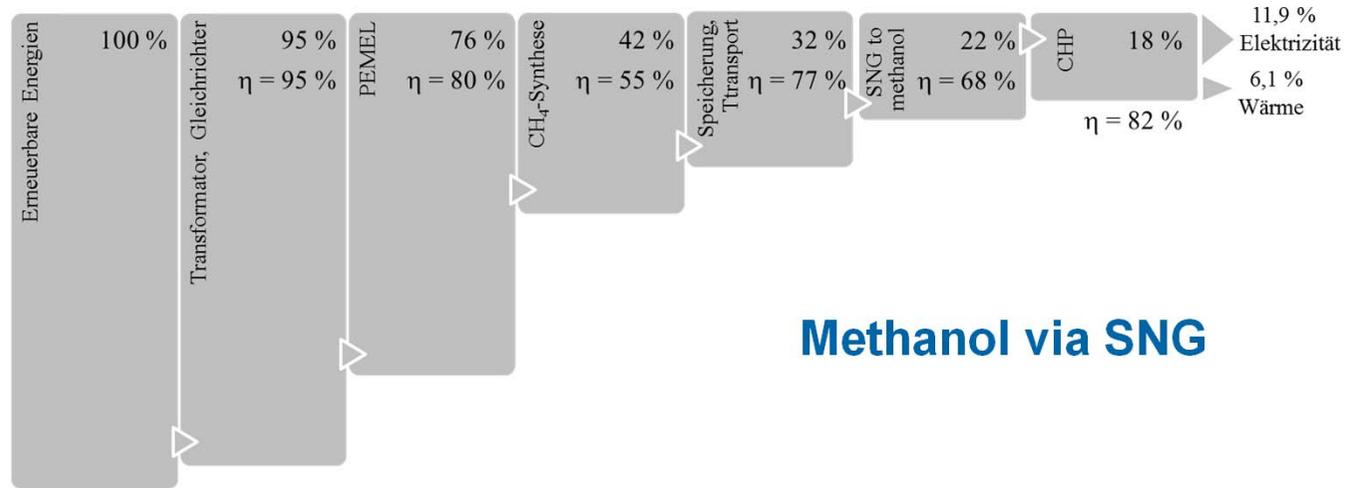


© Springer Verlag Heidelberg 2014. M. Bertau, H. Offermanns, L. Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke: Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future, ISBN 978-3642397080

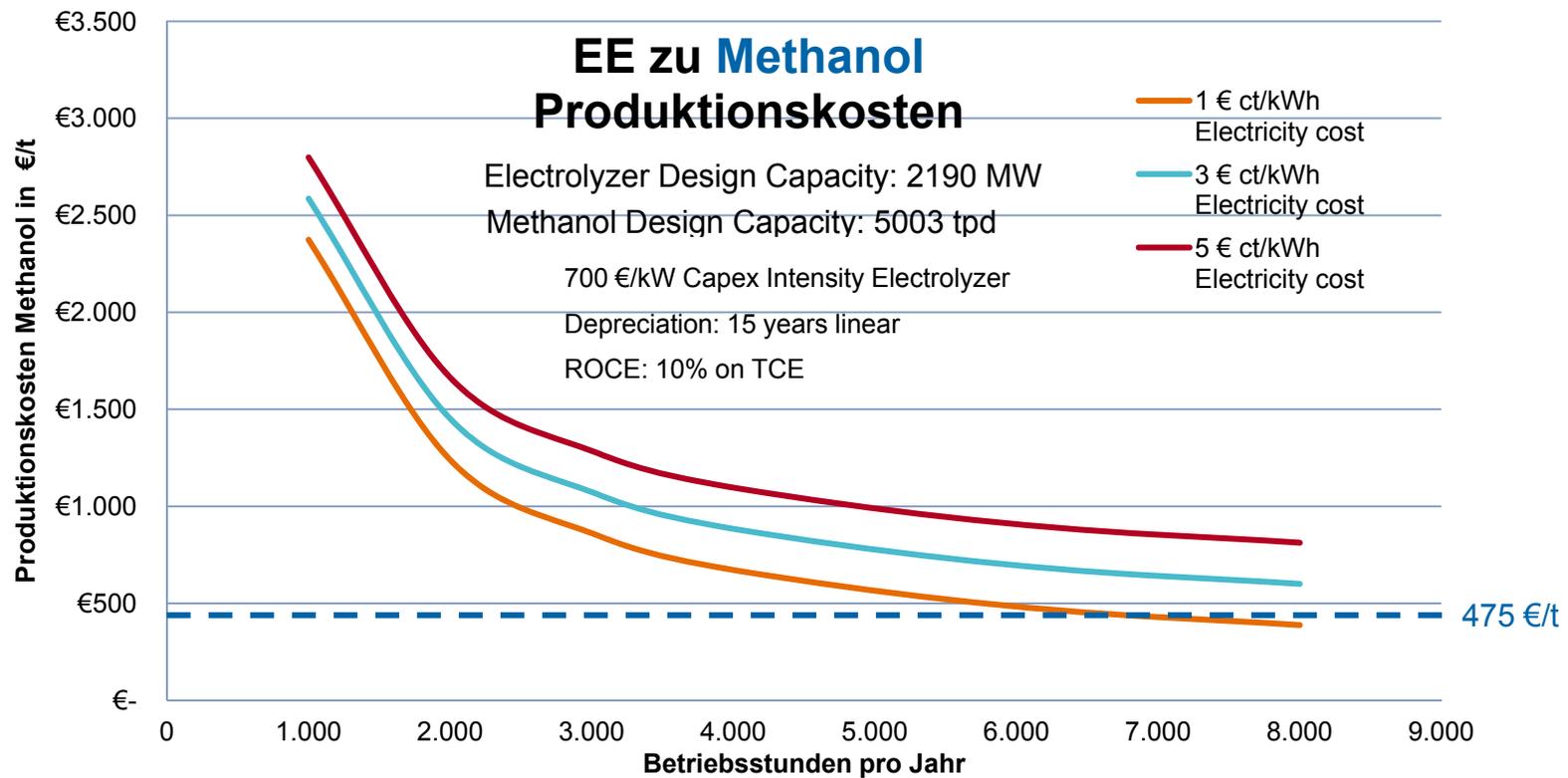
Vergleich der Wirkungsgrade: Szenario Siemens



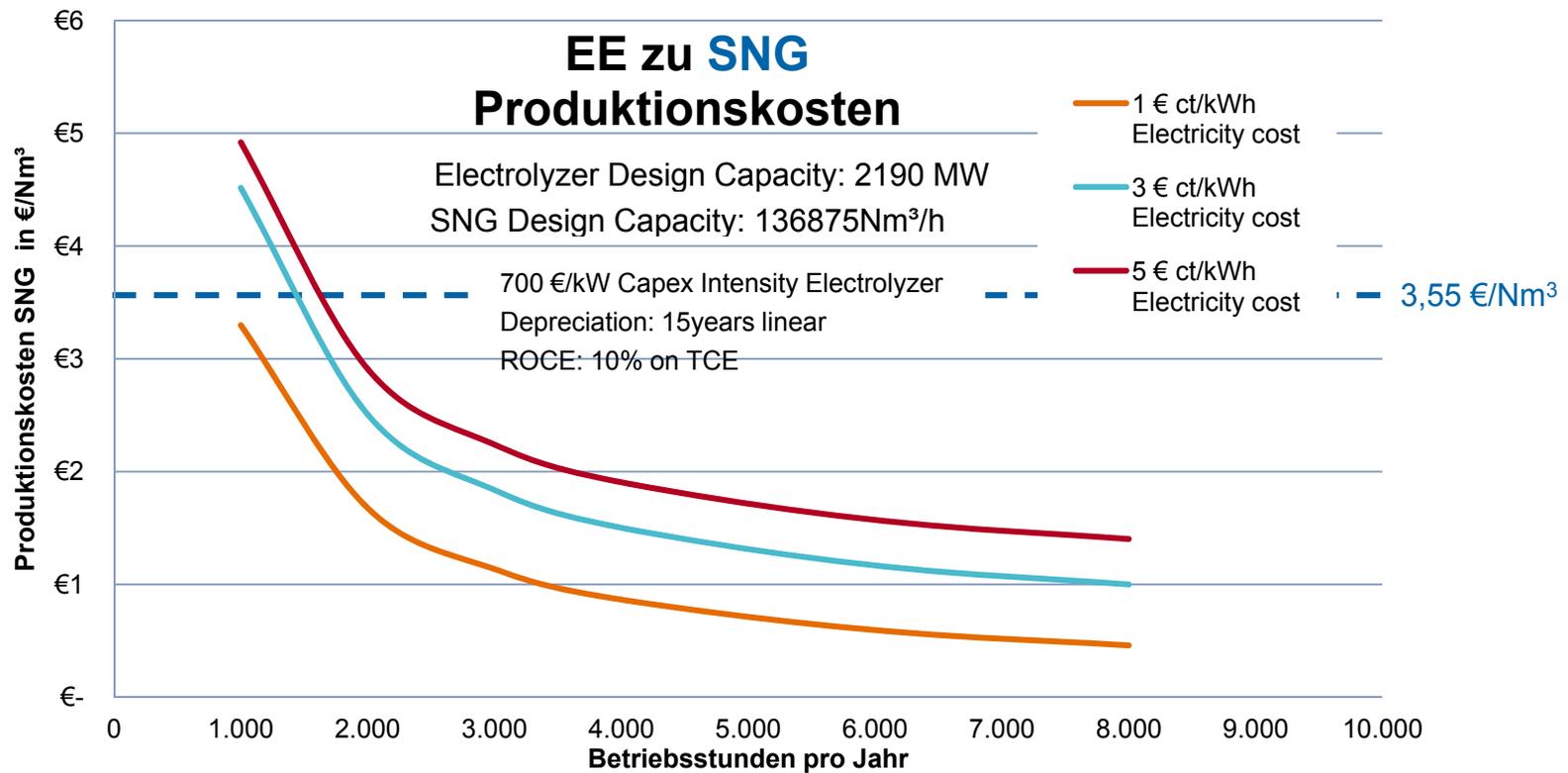
Vergleich der Wirkungsgrade: Szenario Siemens



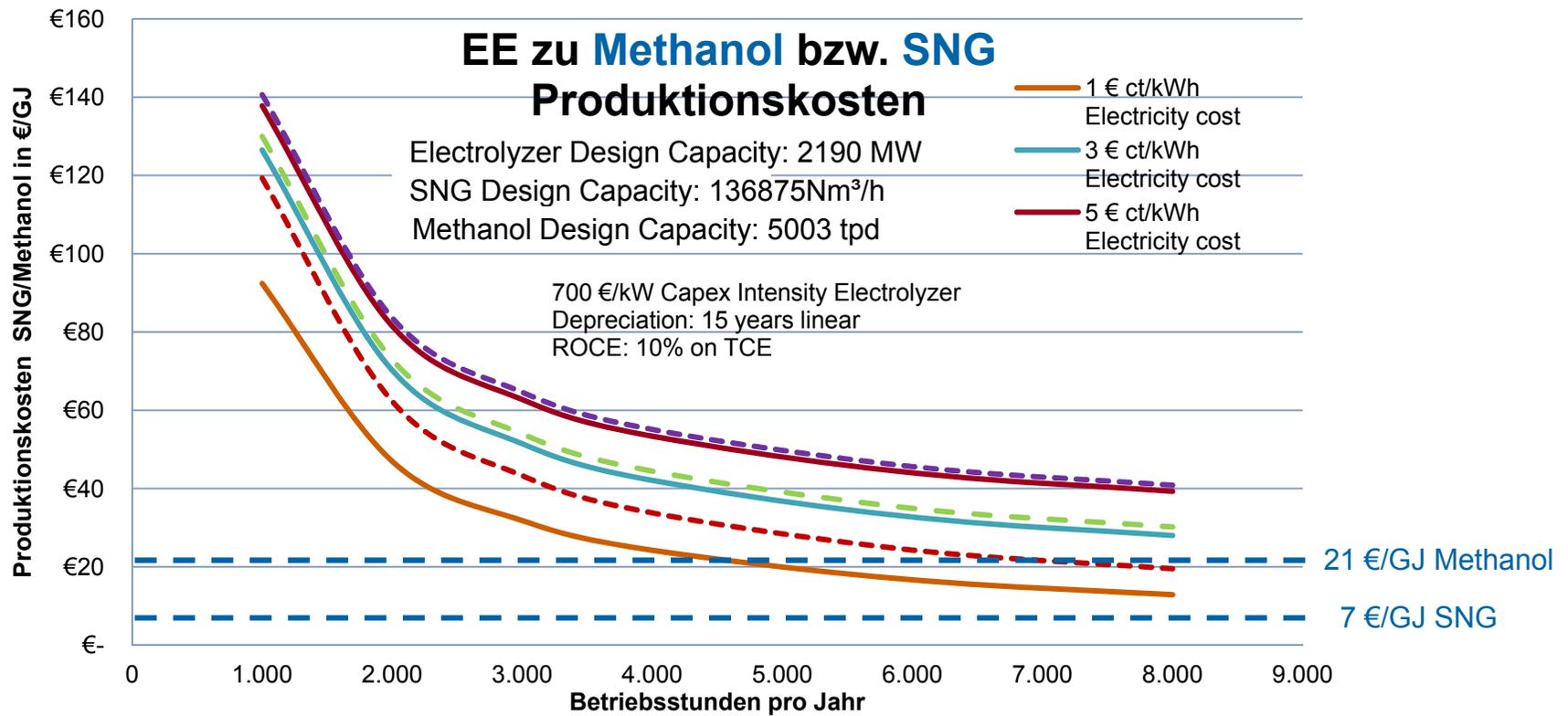
Kostenvergleich (Lurgi/TUBAF-Szenario)



Kostenvergleich (Lurgi/TUBAF-Szenario)



Kostenvergleich (Lurgi/TUBAF-Szenario)





Methan und Methanol als Energiespeicher

Kostenvergleich (Lurgi/TUBAF-Szenario)

- SNG und Methanol lassen sich zu in etwa gleichen Kosten produzieren
- Besonders interessant wird es, wenn die Öl- und Gaspreise weiter steigen
- Dann ist Grüner Methanol billiger als Schwarzer Methanol
- Gegenwärtig verursacht die Elektrolyse 75 % der Kosten
- Ziel: 5 → 4 kWh/Nm³ H₂, i.e. -20 %
- Unter diesen Umständen kann die Energiewende ihr Potential voll ausspielen



Szenario: 100 Twh_{el} Überschußstrom

- Der Überschußstrom wird vollständig in H₂ konvertiert
- Speicherszenario 1
 - 7 MegaMethanol[®]-Anlagen mit jeweils 5.003 t/d Methanolproduktion
- Speicherszenario 2
 - 7 SNG-Anlagen mit jeweils 109.500 Nm³/ h SNG-Produktion
 - i.e. 2.628 t/d



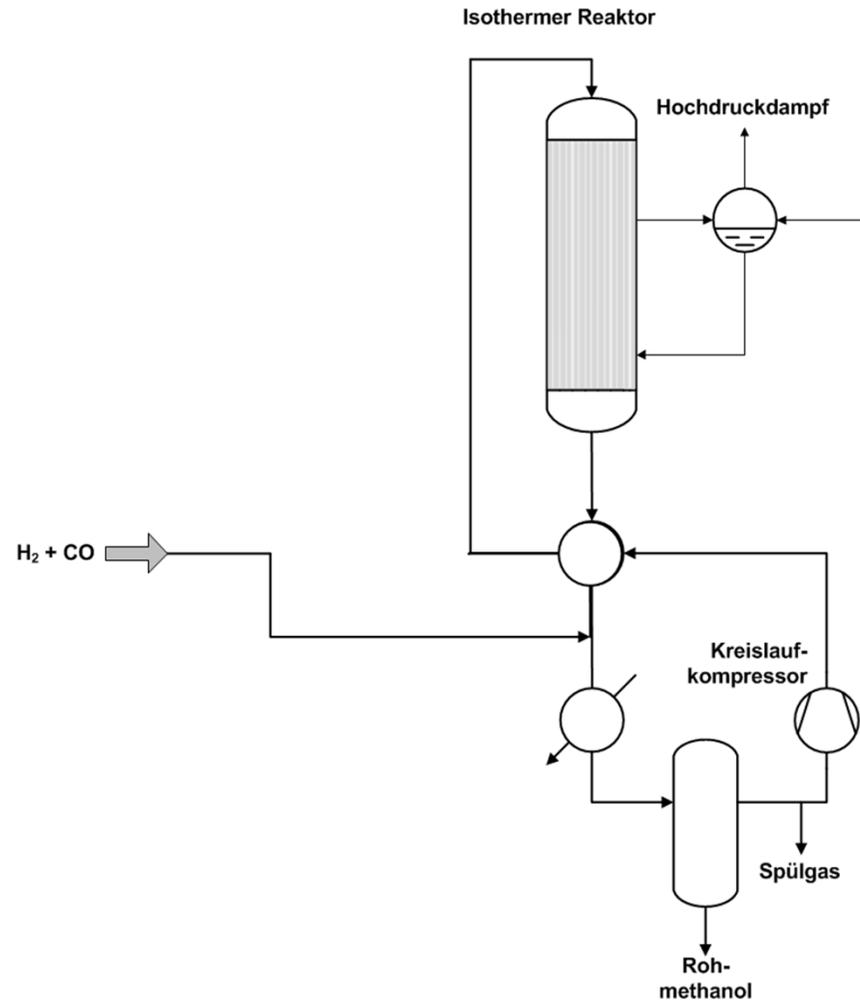
Methanol - der molekulare Universalist

- Methanol ist das einzige Energiespeichermolekül, welches auch als Chemierohstoff eingesetzt werden kann
 - Voraussetzung für eine erfolgreiche Verwendung als Energie- und Chemierohstoff:
 - Zwanglose Integrationsfähigkeit in etablierte Produktionsprozesse
 - Für Methan gelingt dies nur über den Umweg von
 1. Steamreforming zu Synthesegas
 2. Methanolsynthese aus Synthesegas
- Dabei gehen ~32 % der im Methan gespeicherten Energie verloren!
- Bereits heute läßt sich ein Großteil der klassischen petrochemischen Produkte aus Methanol erzeugen
 - Vorteile:
 - Chemierohstoffe und Treibstoffe auf Basis von CO_2 + Sonnenlicht
 - Entkopplung der Erneuerbaren Energien vom Stromnetz



Infrastrukturelle Umsetzbarkeit

- Beispiel: Umrüstung einer Synthesegaskonverters



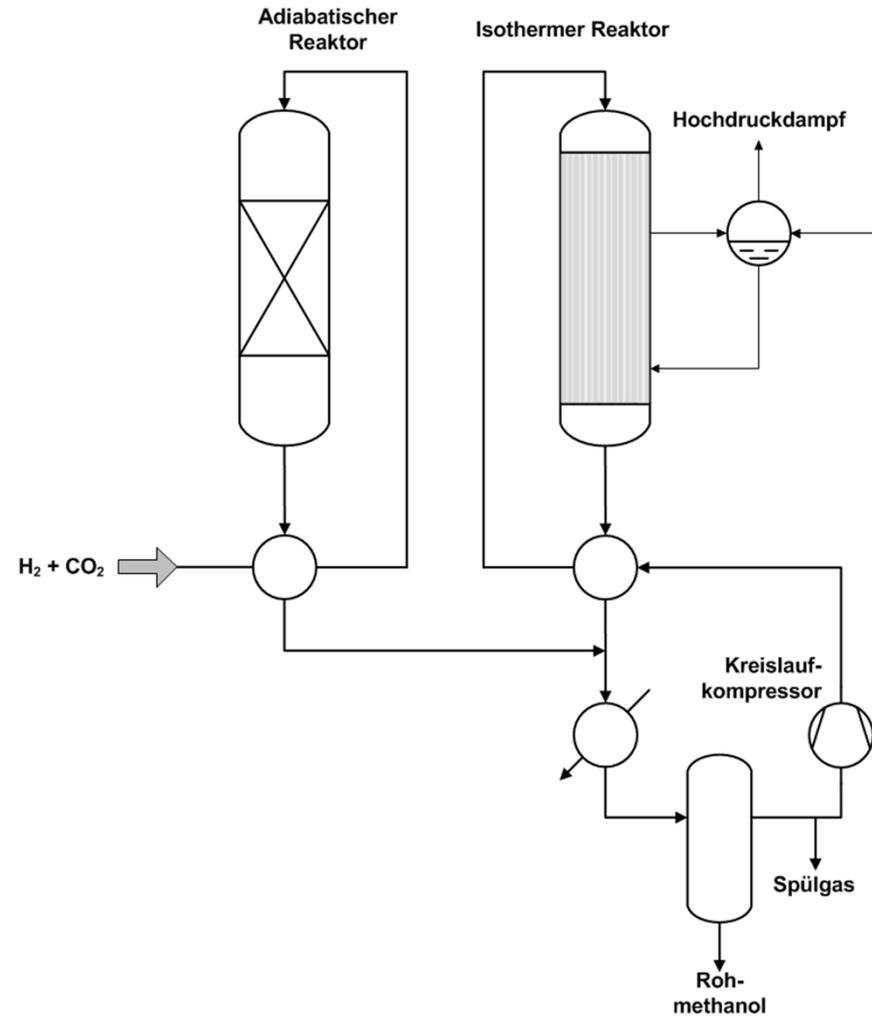
Infrastrukturelle Umsetzbarkeit

- Beispiel: Umrüstung einer Synthesegaskonverters

Das Problem wird gelöst durch Vorschalten eines Reaktors zur CO₂-Reduktion

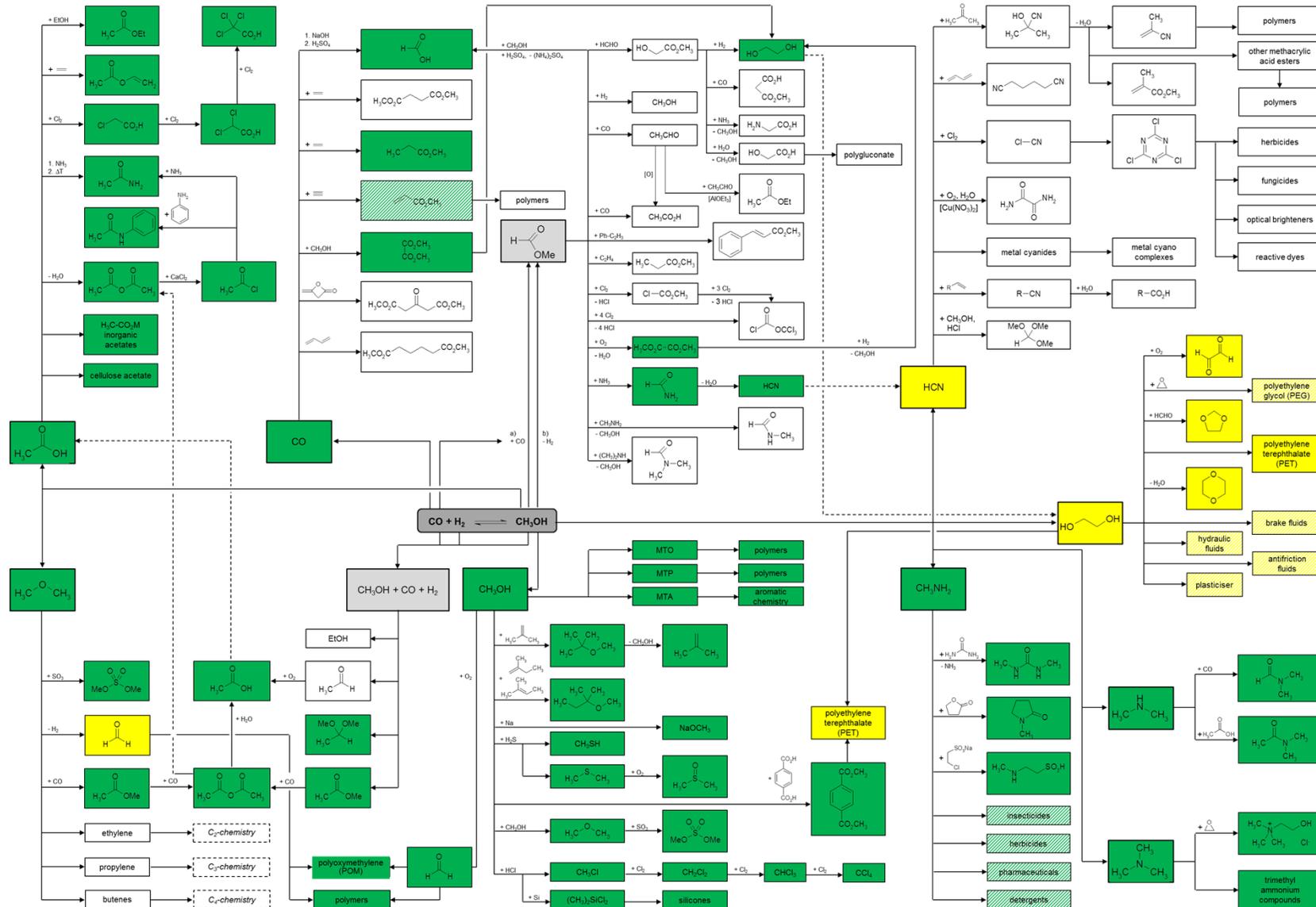


Ermöglicht Umstellung von Syngas auf CO₂ + H₂



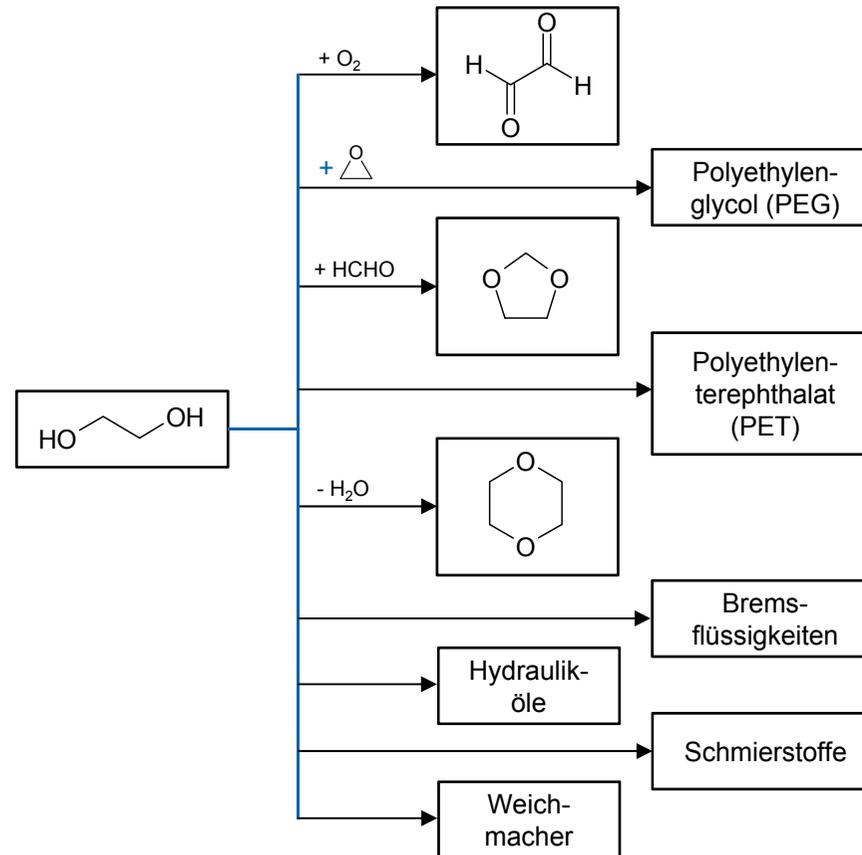
Methanol - der molekulare Universalist

Modifiziert nach:
 M. Bertau, H. Offermanns, L. Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke:
 Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future,
 Springer Verlag Heidelberg, 2014.
 ISBN 978-3642397080



Rohstoffbasis Methanol: Das Beispiel Monoethylenglycol (MEG)

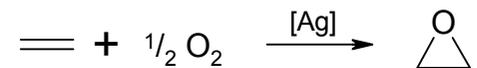
- MEG: Verwendung



Modifiziert nach:
 M. Bertau, H. Offermanns, L.
 Plass, F. Schmidt, H.J. Wernicke:
 Methanol: The Basic Chemical and
 Energy Feedstock of the Future,
 Springer Verlag Heidelberg, 2014.
 ISBN 978-3642397080

Rohstoffbasis Methanol: Das Beispiel Monoethylenglycol (MEG)

- MEG ist das größte Folgeprodukt des Ethylens
- Produktion 2013: 25,11 Mio t
- Preis: ~1.000 USD/t
- Derzeitiger Syntheseweg:



- Optimierungsbedarf:
 - Vermeidung von Totaloxidation
 - Reduktion von Nebenprodukten
 - Energiekosten (Entwässerung des MEG)

Alternativrouten zu MEG

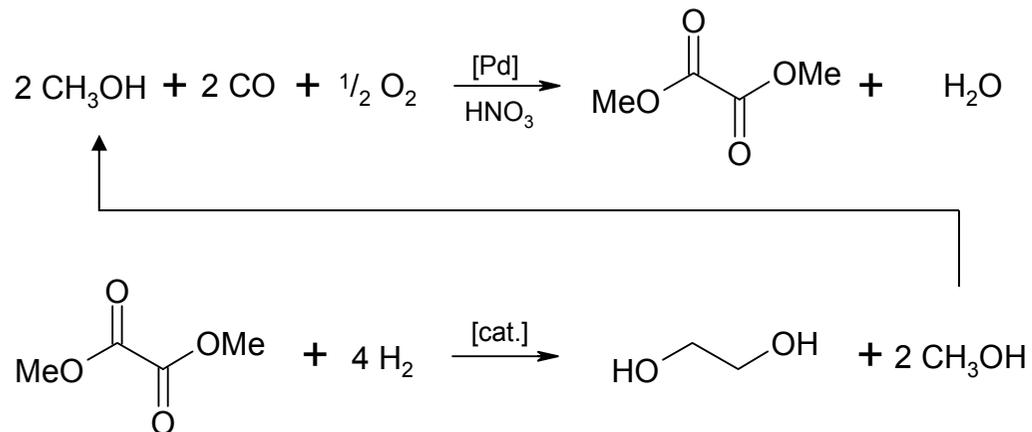
1. Auf Ethylenbasis

- Indirekte EO-Hydratisierung über Ethylencarbonat
 - Aus Ethylen + CO₂ und nachfolgende Hydrolyse
 - 90 % MEG, 10 % DEG
 - Mitsubishi:
 - 99,3 % MEG
 - 15.000 jato
 - Seit 2001, Pilotanlage
 - Texaco, Shell and Shenghua Chemical Group:
 - Methanolyse
 - Coprodukt: Dimethylcarbonat
 - Kommerziell

Alternativrouten zu MEG

2. Auf C₁-Basis

- Direkte CO-Hydrierung zu MEG
- Indirekt über Methanol, Formaldehyd, Methylformiat
- Sämtliche Wege derzeit nicht wirtschaftlich
- Aktuelle Entwicklung: Dimethylglyoxalat-Verfahren



Ube

1. 110 °C, 9 MPa, 97 %
 2. Ru-Kat, 90 %
- Kommerziell seit 1978

Union Carbide

- Weiterentwicklung St. 2
- Testanlage

Alternativrouten zu MEG

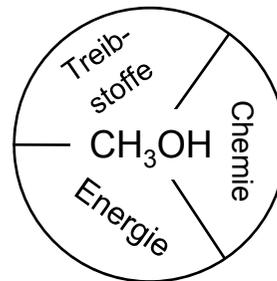
3. Die Situation in China

- Coal-to-Syngas-Chemie
- MEG über Dimethylglyoxalat-Verfahren
- Globale EO-Produktion unter Nachfrage
- Green EO (Taiwan) unwirtschaftlich (1.350 USD/t)
- China installierte 2013 MEG-Produktionskapazität i.H.v. 1.3 Mio jato
- Im 1. Quartal 2014 kamen weitere 1.1 Mio jato hinzu

➔ Die Umstellung auf C₁-Chemie hat in China bereits begonnen!

Rohstoffbasis Methanol: Hand in Hand mit der Petrochemie?

- Die methanolbasierte Chemie wird durch Großanlagen wirtschaftlich
- Lösung: Großmaßstäbliche Produktion von Kohlenwasserstoffgemischen
- Prozesse: MTG, MTO, MTP, MTA
- Dadurch Schnittstellen an klassische Petrochemie gegeben:



- Forderung an Integrationsfähigkeit der methanolbasierten Chemie erfüllt
- Kosten für Basis Green Methanol derzeit noch zu hoch
- Lösungsansatz: Optimierung der Elektrolyse

Die Gretchenfrage: Methan oder Methanol

Gesucht wird das optimale Speichermolekül für ein “Energiespeicherszenario 2040+”

1. Kein signifikanter Unterschied in den Herstellkosten für Methan und Methanol.
2. Skaleneffekte (Economy of scale) sind kein maßgeblicher Faktor für die Auswahl der Technologie.
3. Sowohl Methan als auch Methanol lassen sich im Großmaßstab aus EE + CO₂ herstellen.
4. Die Menge an Überschußstrom übersteigt schon jetzt die Speicherkapazität deutlich, spätestens ab 2040 massiv.
5. Überschußstrom wird durch das EEG nicht belastet und wird zu geringen Preisen abgegeben (1...3...5 cts/kWh bei 8.000 h/a Produktion). Produktionskosten für SNG von 17...39 €/GJ bzw. Methanol von 19...40 €/GJ erscheinen für 2040+ realistisch. Für ein Energiespeicherszenario in der geplanten Weise wird eine Verfügbarkeit mit graduellem Ausbau bereits ab 2025 gefordert.

Die Gretchenfrage: Methan oder Methanol

6. Hohe Verluste durch Kompression/Dekompression bei Methan, geringe bei Methanol
7. Die Kosten für eine Anpassung einer Kraftwerksgasturbine (GT) an Methanol als Brennstoff sind moderat: ~2,25 Mio €
8. Der Wirkungsgrad einer Gasturbine ist für Methanol 9 % höher als für Methan
9. Methanol kann Ottokraftstoffen bis zu 3% zugemischt werden. Bei einem Verbrauch von 120 Mio t/a in der EU entspricht dies
 - 3,6 Mio t Methanol pro Jahr
 - 5,4 Mio t CO₂-Einsparung pro Jahr

Moderne Motoren können mit bis zu 20 % Methanol betrieben werden.

10. Methanol hat zwar nur die halbe Energiedichte von Benzin. Durch eine höhere Kompression des Benzin/Luft-Gemisches wird dies überkompensiert. Es resultiert eine deutlich höhere spezifischere Leistung des Motors.



Die Gretchenfrage: Methan oder Methanol

11. Grünes Methanol kann maßgeblich dazu beitragen, das EU-weite Ziel von 10 % EE bis 2020 zu erreichen.
12. Grünes Methanol kann technisch Ethanol in Ottomotoren ersetzen. Bis zu einem Preis von 800 €/t ist Methanol sogar wirtschaftlicher.
13. Grünes Methanol aus Überschußstrom trägt zu Versorgungssicherheit und Preisstabilität bei.
14. Methanol kann leicht transportiert werden: Straße, Schiene, Pipeline, Schiff. Auf diese Weise kann ein effektiver Transport von EE über große Distanzen sichergestellt werden. Auf diese Weise lassen sich die Probleme beim Netzausbau lösen.
15. Methanol ist sowohl Energie- als auch Chemierohstoff. Die Speicherung von EE in Methanol, der aus CO₂ hergestellt wurde, schließt den C-Zyklus höchsteffizient. Auf diese Weise wird die Abhängigkeit vom Öl reduziert, zugleich verbleibt mehr Biomasse für Nahrungsmittel anstelle von Treibstoffen. Die öffentliche Mobilität auf Basis von CO₂ und Sonnenlicht rückt in greifbare Nähe.





Danksagung

TU Bergakademie Freiberg

Dr. K. Räuchle

M. Kraft

T. Lorenz

M. Seifert

Air Liquide

Dr. L. Plass,

Dr. T. Wurzel

Dr. M. Linicus

Finanzielle Unterstützung

SMWA: „SYNKOPE“, FKZ 100108351

