

# **Wasserstoffspeicherung in LOHC-Systemen als Basis für industrielle Energiespeicheranwendungen**

der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

zur  
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

**Martin Thomas Eypasch**  
aus Köln

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.2016

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr. Peter Greil

Gutachter:  
Prof. Dr. Peter Wasserscheid  
Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing

Berichte aus der Energietechnik

**Martin Eypasch**

**Wasserstoffspeicherung in LOHC-Systemen als Basis  
für industrielle Energiespeicheranwendungen**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4946-6

ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Dieser Dissertation liegen die Forschungsarbeiten während meiner Zeit als Mitarbeiter der BMW AG sowie als Mitarbeiter des Lehrstuhls für Chemische Reaktionstechnik der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg unter der wissenschaftlichen Betreuung von Herrn Prof. Peter Wasserscheid zu Grunde.

Mein ganz besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater. Prof. Dr. Peter Wasserscheid betreute meine Dissertation und unterstützte mich stets durch intellektuelle und aufschlussreiche Diskussionen sowie intensive wissenschaftliche Begleitung. Er war mir durch seine Einsatzbereitschaft und Hingabe zur Wissenschaft und zu meinem Forschungsthema stets ein Vorbild. Ich verdanke Ihm sehr großen persönlichen Rückhalt und Vertrauen.

Zusätzlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Wensing für Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr. Gregor Zöttl für die Bereitschaft als externes Mitglied an der Prüfung teilzunehmen. Bei Herrn Prof. Dr. Martin Hartmann möchte ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission bedanken.

Mein Dank gilt außerdem meinen Kollegen bei der BMW AG. Ich möchte mich ganz speziell bei meinem Betreuer Torsten Frank, der mir ein hohes Maß an Eigenverantwortung und Freiheit zugestanden hat, für die fachliche Betreuung, persönliche Unterstützung und sein Vertrauen bedanken. Bei meinen Betreuern Michael Zenner und Dr. Jennifer Dungs bedanke ich mich für interessante Diskussionen sowie stete Unterstützung. Durch Scherze und Aufmunterungen haben mir meine Teamkollegen Torsten, Flo, Alex, Thomas, Michael, Philipp und Steve geholfen die stressigeren Arbeitsphasen leichter zu überstehen. Zusätzlich möchte ich mich bei meinen ehemaligen Vorgesetzten Matthias Kliez, Dr. Carsten Spengler, Dr. Christian Schmidt und Dr. Marco Di Piero für die stets gute Zusammenarbeit und Projektunterstützung bedanken.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinen Kollegen am Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik für die fachliche Unterstützung, die umfangreichen Diskussionen die Umsetzung der Prototypenkonzepte. Hier sind vor allem Andreas Bösmann, Marcus Koch, Willi Peters, Nicole Brückner, Michael Schmacks und Achim Manke zu nennen.

Meinen Diplom- und Masterarbeitsstudenten Mario, Thobias, Michael, Marcus, Robert und Aastha gilt mein Dank für die interessante Zeit beim Laborbetrieb und bei den Systembetrachtungen. Mir hat die Zeit mit Euch viel Spaß gemacht.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, Ursula und Ernst Eypasch, und meinen Geschwistern, Christian, Moritz und Julia, für die immerwährende Unterstützung und die Möglichkeit der freien Entscheidung, die ich nicht nur während meiner Promotionszeit erfahren durfte.

# Kurzfassung

Heutzutage decken fossile Energieträger einen Großteil des weltweiten Primärenergiebedarfs und tragen somit stark zum globalen Klimawandel bei. Dies macht einen Energiewandel und eine Umstellung auf erneuerbare Energien unabdingbar. Aufgrund des verstärkten Ausbaus regenerativer Energien, v. a. in Deutschland, und deren volatilen Charakters ist der Einsatz geeigneter Energiespeichersysteme erforderlich, um eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Wasserstoff stellt mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten und besonderen Eigenschaften einen guten Energieträger für zukünftige Langzeitspeicher dar. Aufgrund seiner geringen Dichte und schwierigen Handhabbarkeit ist die Speicherung von Wasserstoff jedoch nur mit großem Aufwand möglich.

Flüssige Organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carrier - LOHC) bieten eine kostengünstige, sichere und einfach handhabbare Speichermethode für Wasserstoff bei Umgebungsbedingungen. Durch eine katalytische Hydrierung und Dehydrierung erfolgt die Speicherung des Wasserstoffs an geeigneten Trägersubstanzen wie Dibenzyltoluol mit Energiedichten von etwa 2 kWh/kg. In der vorliegenden Arbeit wird für dieses LOHC-System die Dehydrierung experimentell und verschiedene Speicheranwendungen simulativ untersucht.

Der experimentelle Fokus liegt auf der Untersuchung der katalytischen Dehydrierung für relevante industrielle Anwendungen. Dibenzyltoluol (Handelsname: Marlotherm SH) dient hierbei als flüssiges Trägermaterial. Ein kontinuierlich betriebener Festbettreaktor, gefüllt mit Platin auf Aluminium als Katalysator, wird zur Analyse der Wasserstofffreisetzung herangezogen. Das Ziel liegt in der Ermittlung optimaler Reaktionsbedingungen, der Untersuchung einer Dehydrierung gegen Druck für industrielle Anwendungen, der Demonstration des Dauerbetriebs der Wasserstofffreisetzung und der Analyse der Reaktionsverteilung über die Reaktorlänge zur Optimierung von Reaktorkonzepten.

Die Reaktion beginnt ab einer Temperatur von 280 °C und bei weiterer Temperaturerhöhung steigen der Wasserstoffvolumenstrom und die Wasserstoffausbeute. Die maximal erreichte Katalysatorproduktivität des verwendeten Aufbaus liegt bei 3 g<sub>H<sub>2</sub></sub>/min/g<sub>Pt</sub>. Die Evaluation der Dehydrierung zeigt eine problemlose Anwendbarkeit bis zu einem Reaktionsdruck von ca. 5 bar mit verhältnismäßig geringen Umsatzeinbußen. Der Dauerbetrieb sowie die Ergebnisreproduktion sind ohne sichtbare Degradation durchführbar.

Der system-analytische Fokus liegt auf der Modellierung und Simulation relevanter Speicheranwendungen zur Analyse und Evaluation der Machbarkeit sowie Wettbewerbsfähigkeit von LOHC als Wasserstoffspeichertechnologie. Die Modelle dienen der Ermittlung wirtschaftlich optimierter Einsatzszenarien der LOHC-Technologie unter konservativen, realistischen Randbedingungen. Ein grundlegender Vergleich von LOHC mit konventionellen gasförmigen (GH<sub>2</sub>) und flüssigen (LH<sub>2</sub>) Wasserstoffspeichern bildet die Basis der Anwendungsszenarien. Ein Einsatzszenario bewertet die Energiespeicherung in einem nachhaltigen, autarken Versorgungssystem eines industriellen Produktionsstandortes in Deutschland. Die weiteren Szenarien sind die Bereitstellung von Wasserstoff für eine Wasserstofftankstelle und der Transport des Wasserstoffs in LOHC. Zielanwendung ist die direkte Wasserstoffnutzung in Mobilitätsanwendungen.

In einem industriellen Energieversorgungssystem ist der Einsatz von LOHC als Energiespeicher erst ab einer Eigenversorgung von über 75 % wirtschaftlich. Die vollständige Eigenversorgung ist unter heutigen Marktbedingungen nicht wettbewerbsfähig und es besteht Entwicklungsbedarf zur Reduktion der Investitionskosten. Dennoch bietet diese Anwendung ein bedeutendes Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung. Die direkte Nutzung des Wasserstoffs in Kombination mit LOHC ist bereits heute ökonomisch wettbewerbsfähig. Die lokale Wasserstoffherstellung aus regenerativen Energien als auch der Transport von Wasserstoff mithilfe von LOHC stellt die wirtschaftlichsten Methoden der Bereitstellung dar. Zusätzlich bietet LOHC durch seine Kompatibilität mit der bestehenden Mineralölinfrastruktur die Möglichkeit einer inkrementellen Implementierung von Wasserstoff als Energieträger für eine emissionsfreie Energiewirtschaft.

# Abstract

Today, a majority of carbon dioxide emissions origins from fossil fuels, which currently still fulfill up to 80 % of the global primary energy demand. Climate change and rising public awareness have prompted many countries to transition to low-carbon energy systems. That often includes the intensified use of renewable energy sources (RES) like wind and solar. But these energy sources are volatile leading to an increasing spatio-temporal decoupling of supply and demand profiles. To ensure supply security and reliability of energy systems with high shares of variable RES, short and long term energy storage at large-scales are vital. Hydrogen with its diverse applications and special characteristics represents a good opportunity for future long-term storage. However, the storage of hydrogen requires great expenses due to its low density and difficult handling.

Liquid organic hydrogen carriers (LOHC) offer an opportunity for hydrogen storage at ambient conditions that is inexpensive, safe and easy to handle. A reversible catalytic hydrogenation and dehydrogenation of suitable carrier substances, such as dibenzyltoluene, are substantial for the storage at energy densities around 2kWh/kg. In the present thesis this LOHC system is experimentally and theoretically examined.

The experimental focus is on the investigation of the dehydrogenation for relevant industrial applications. dibenzyltoluene (trade name: Marlotherm SH) is selected as a carrier material. A continuously operated fixed bed reactor, filled with platinum on alumina as catalyst, is used as hydrogen release unit to identify optimized reaction conditions, investigate the dehydrogenation against pressure for industrial applicatoins, demonstrate continuous operation of the hydrogen release unit and analyze the reaction distribution within the reactor for the optimization of reactor concepts.

The reaction starts at a temperature of 280 °C. With further increase of temperature, the H<sub>2</sub>-flow rate and H<sub>2</sub>-yield rise. The determined catalyst productivity of the current set-up reached up to 3<sub>GH<sub>2</sub></sub>/min/g<sub>PT</sub>. The dehydrogenation is smoothly applicable up to a reaction pressure of 5 bar with relatively low impact on the output parameters. The continuous operation as well as the reproduction is feasible with no visible degradation of the H<sub>2</sub>-output.

The second focus of this thesis is the modelling and simulation of relevant energy storage applications to analyze and evaluate the feasibility and competitiveness of the LOHC technology as hydrogen storage technology. The models are used to determine economically optimized scenarios of LOHC technology with realistic and conservative boundary conditions. A comparison of LOHC with conventional hydrogen storage in gaseous (GH<sub>2</sub>) and liquified (LH<sub>2</sub>) form is the foundation for further investigations of different scenarios. The application scenario assesses the energy storage in a sustainable self-sufficient energy supply system of an industrial production site in Germany. The other investigated scenarios are the supply of hydrogen for a decentralized filling station and the transport of hydrogen in LOHC. The target application of the second and third scenario is the direct usage of hydrogen in mobility applications.

An energy storage system based on LOHC becomes economical if the goal is to provide a majority (> 75 %) of the electricity demand with on-site renewable energy. Today, the completely self-sufficient system is not competitive, and still requires development to reduce investment costs of LOHC-components. Nevertheless, it offers significant potential to reduce CO<sub>2</sub> emissions. The direct usage of hydrogen in combination with LOHC is economically competitive today. The local hydrogen production from renewable energy sources as well as the transport of hydrogen using LOHC represent the most economical methods for hydrogen supply. In addition LOHC with its compatibility with the existing petroleum infrastructure offers a promising opportunity of an incremental implementation of hydrogen as an energy carrier for an emission-free energy sector.

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Martin Thomas Eypasch, dass ich die beiliegende Doktorarbeit zum Thema *LOHC-Wasserstoff-Speichertechnologie als Basis für industrielle Energiespeicheranwendungen* selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie alle wörtlichen und sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet und die entsprechende Quelle angegeben habe. Vom Lehrstuhl und seinen Mitarbeitern zur Verfügung gestellte Hilfsmittel, wie Modelle oder Programme, sind ebenfalls angegeben. Diese Hilfsmittel sind Eigentum des Lehrstuhls bzw. des jeweiligen Mitarbeiters. Ich werde sie nicht über die vorliegende Arbeit hinaus weiter verwenden oder an Dritte weitergeben.

Ich habe diese Arbeit noch nicht zum Erwerb eines anderen Leistungsnachweises eingereicht.

---

München, 16. November 2016

Bearbeiter: Eypasch, Martin

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung und Motivation . . . . .	1
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	2
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Wasserstoff als Energieträger . . . . .	4
2.2 Stand der Technik heutiger Wasserstoffspeichertechnologien . . . . .	5
2.2.1 Wasserstofferzeugung . . . . .	6
2.2.2 Wasserstoffspeicherung . . . . .	10
2.2.3 Wasserstofftransport . . . . .	20
2.2.4 Wasserstoffnutzung . . . . .	23
2.3 LOHC als Wasserstoffspeicher . . . . .	25
2.3.1 Das LOHC-Konzept . . . . .	25
2.3.2 Charakterisierende Parameter einer chemischen Reaktion . . . . .	26
2.3.3 Eigenschaften und Anforderungen an LOHC . . . . .	28
2.3.4 Vielversprechende LOHC-Systeme: N-Ethylcarbazol und Dibenzyltoluol . . . . .	31
2.4 Das LOHC-Speichersystem . . . . .	39
2.4.1 Struktur eines stationären LOHC-Speichersystems . . . . .	39
2.4.2 Anwendungsszenarien für LOHC-Speichersysteme . . . . .	40
<b>3 Dehydrierung von LOHC</b>	<b>45</b>
3.1 Versuchsaufbau und Vorbereitung . . . . .	45
3.1.1 Versuchsaufbau . . . . .	45
3.1.2 HRU für die H18-DBT-Dehydrierung . . . . .	48
3.1.3 Fehlerbetrachtung der Mess- und Regelungstechnik . . . . .	53
3.2 Methodik der experimentellen Untersuchung . . . . .	57
3.2.1 Messprozedur . . . . .	58
3.2.2 Durchführung der experimentellen Dehydrierung . . . . .	59
3.2.3 Versuchsplan . . . . .	60

3.3	Ergebnisse der kontinuierlichen Dehydrierung von H18-DBT . . . . .	66
3.3.1	Einfluss der Verweilzeit auf die Dehydrierung . . . . .	67
3.3.2	Einfluss des Drucks und der Temperatur auf die Dehydrierung . . . . .	70
3.3.3	Dauerbetrieb der HRU . . . . .	74
3.3.4	Einfluss der LOHC-Verdünnung auf die Dehydrierreaktion . . . . .	77
3.3.5	Einfluss der Katalysatorkonzentration auf die Reaktion . . . . .	86
3.3.6	Reaktionskinetische Untersuchungen der H18-DBT-Dehydrierung . . . . .	93
3.3.7	Einfluss der Reaktionszonenlänge auf die kontinuierliche Dehydrierung . . . . .	99
3.3.8	Analyse der Reaktionsverteilung . . . . .	106
3.4	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchung der H18-DBT-Dehydrierung	107
<b>4</b>	<b>Techno-Ökonomische Bewertung der LOHC-Speichertechnologie</b>	<b>111</b>
4.1	Das LOHC-System . . . . .	111
4.1.1	Methodik der ökonomischen Bewertung des LOHC-Systems . . . . .	111
4.1.2	Aufbau eines LOHC-Systems zur Wasserstoffspeicherung . . . . .	114
4.1.3	Energieverbrauch und Wirkungsgrad des LOHC-Wasserstoff-Speicher- systems . . . . .	115
4.1.4	Investitionskosten der LOHC-Komponenten . . . . .	117
4.1.5	Vergleich des LOHC-Systems mit konventionellen H <sub>2</sub> -Speichern für de- zentrale Anwendungen . . . . .	120
4.2	Autarke Energieversorgung eines industriellen Produktionsstandortes . . . . .	124
4.2.1	Systemstruktur und Modellierung . . . . .	124
4.2.2	Ökonomische Systembewertung . . . . .	133
4.2.3	Ökonomische Sensitivitäten eines teilautarken Energieversorgungssystems	137
4.2.4	Ökonomisches Zukunftspotenzial einer autarken Energieversorgung . . . . .	143
4.2.5	Zwischenfazit zur teilautarken Energieversorgungssystem . . . . .	144
4.3	Dezentrale autarke H <sub>2</sub> -Bereitstellung für Logistik- und Fahrzeuganwendungen . . . . .	146
4.3.1	Systemstruktur und Modellierung . . . . .	146
4.3.2	Ökonomische Systemevaluation . . . . .	155
4.3.3	Ökonomische und technologische Sensitivitäten der H <sub>2</sub> -Bereitstellung . . . . .	158
4.3.4	Zwischenfazit zur dezentralen Wasserstoffbereitstellung . . . . .	165
4.4	LOHC als Wasserstofftransportmedium . . . . .	166
4.4.1	Systemabgrenzung und Struktur . . . . .	166
4.4.2	Ökonomische Bewertung des H <sub>2</sub> -Transports . . . . .	179
4.4.3	Sensitivitätsanalyse des Wasserstofftransports . . . . .	184
4.4.4	Zwischenfazit zum wirtschaftlichen Potential des Wasserstofftransports mittels LOHC . . . . .	189
4.5	Zusammenfassung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zu unterschiedlichen LOHC-Anwendungen . . . . .	190

<b>5 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>193</b>
5.1 Zusammenfassung . . . . .	193
5.2 Ausblick . . . . .	195
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>197</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>211</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>219</b>
<b>A Anhang</b>	<b>224</b>
A.1 Stoffdaten . . . . .	224
A.1.1 Stoffdaten Wasserstoff . . . . .	224
A.1.2 Stoffdaten Perhydro-Dibenzyltoluol . . . . .	226
A.1.3 Dibenzyltoluolstoffdaten . . . . .	228
A.2 Kostenfunktionen der LOHC-KomponentenTechnologie . . . . .	230
A.3 Technische Details des experimentellen Prüfstands . . . . .	231
A.4 Ergebnisdiagramme der DBT-Vermessung . . . . .	235
A.4.1 Temperaturprofile der DBT-Vermessung . . . . .	235
A.4.2 Weitere Versuchsergebnisse der Dehydrierreaktion bei LOHC-Verdünnung	240
A.5 Ergebnistabellen der Dehydrierreaktionsvalidierung . . . . .	242
A.6 Ergebnisse der Integrationsuntersuchungen . . . . .	260
A.6.1 Sensitivitäten des Energieversorgungssystems. . . . .	260
A.6.2 Sensitivitäten der dezentralen H <sub>2</sub> -Bereitstellung. . . . .	262
A.6.3 Sensitivitäten der Wasserstofftransportanwendung . . . . .	268

# Abkürzungen und Formelzeichen

## Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
AEL	alkalische Elektrolyse
AKF	Aktivkohlefilter
ANF	Annutätenfaktor
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BMW	Bayerische Motorenwerke AG
BT	Benzyltoluol, Marlotherm LH
C	Kohlenstoff
CCH <sub>2</sub>	kaltverdichteter gasförmiger Wasserstoff (Cryo Compressed H <sub>2</sub> )
CGH <sub>2</sub>	gasförmiger Wasserstoff (Gaseous Compressed H <sub>2</sub> )
CRT	LEHRSTUHL FÜR CHEMISCHE REAKTIONSTECHNIK, FAU
DBT	Dibenzyltoluol, Marlotherm SH
DOE	US-Department of Energy
EAM	Exzellenzcluster Advanced Materials
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
E.W.	Endwert
FAU	FRIEDRICH-ALEXANDER UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle, Brennstoffzellenfahrzeug
FIR	Flow Indicating Record
gew.-%	Gewichtprozent
GGW	Gleichgewicht
GH <sub>2</sub>	gasförmiger Wasserstoff (Gaseous H <sub>2</sub> )
H	Wasserstoff
H0-DBT	Dibenzyltoluol
H18-DBT	Perhydro-Dibenzyltoluol
H12-BT	hydriertes Benzyltoluol
H0-NEC	N-Ethylcarbazol
H4-NEC	Tetra-N-Ethylcarbazol
H8-NEC	Octa-N-Ethylcarbazol

---

Abkürzung	Bezeichnung
H12-NEC	Perhydro-N-Ethylcarbazol
HB	Hinterer Reaktorbereich
HC	Kohlenwasserstoff-Verbindung
HD	Hochdruck
HHV	Brennwert, Higher Heating Value
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse
HRU	Wasserstoff-Freisetzungseinheit, Hydrogen Release Unit
ISL	Industrie Strompreis Level-System
KKR	Katalysatorkonzentrationsreduktion
Komp.	Kompressor
KP	Katalysator-Produktivität
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LHV	Heizwert, Lower Heating Value
LH <sub>2</sub>	flüssiger Wasserstoff (Liquid H <sub>2</sub> )
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
LKW	Lastkraftwagen
MCH	Methylcyclohexan
M.W.	Messwert
NEC	N-Ethylcarbazol
Netz	Netzsystem mit Netzbezug
Netz+Sp	Netzsystem mit Netzbezug und LOHC-Speicher
NG	Erdgas, Natural Gas
O	Sauerstoff
O&M	Betrieb und Wartung, Operation & Maintenance
Pd	Palladium
PEMEL	Polymer Electrolyte Membrane Elektrolyse
PIR	Pressure Indicating Record
Pt	Platin
PtF	Power-to-Fuel
PtH	Power-to-Heat
PV	Photovoltaikanlage
R1, R2	Reaktor 1, Reaktor 2
RE	Regenerative Energien, erneuerbare Energien
RE+Sp	Regenerative Energien-System mit LOHC-Speicher
Reku.	Rekuperation
RZV	Reaktionszonenverkürzung
SBE	Storage Break Even-System
SF	Skalierungsfaktor

## Abkürzungen und Formelzeichen

---

Abkürzung	Bezeichnung
SMR	Dampfreformierung, Steam Methan Reformation
SOP	State of pressure
SOC	State of charge
T	Toluol
TIC	Temperature Indicating Control
TIR	Temperature Indicating Record
Tr.	Transport
UEG	Untere Explosionsgrenze
US	Vereinigte Staaten von Amerika, United States
V	Ventil
VB	Vorderer Reaktorbereich
VDI	Verein deutscher Ingenieure
Verbr.	Verbraucher
Verf.	Verflüssigung
verf.	verfügbar
vol-%	Volumenprozent
WEA	Windenergieanlage
ZK	Zusatzkosten

## Formelzeichen

Formelzeichen (groß)	Bezeichnung	Einheit
$\Delta H$	molare Reaktionsenthalpie	[J/mol]
$\Delta h$	spezifische Reaktionsenthalpie	[J/kg]
A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
ANF	Annuitätenfaktor	[-]
C	Integrationskonstante	
D	Durchmesser, außen	[ mm]
E	Energie	[J]
$E_a$	Aktivierungsenergie	[kJ/mol]
$E_{a,D}$	Aktivierungsenergie, diffusionskontrolliert	[kJ/mol]
$E_{a,R}$	Aktivierungsenergie, reaktionskontrolliert	[kJ/mol]
F	Faraday Konstante	[As/mol]
H	Enthalpie	[J]
$H_u$	Heizwert	[J/kg]
$H_s$	Brennwert	[J/kg]
K	Kosten	[€]

---

Formelzeichen (groß)	Bezeichnung	Einheit
M	molare Masse	[kg/mol]
$N_{m^3}$	Normkubikmeter	[m <sup>3</sup> ]
P	Leistung	[W]
PD	Packungsdichte	[%]
$P_{Kat}$	Katalysatorproduktivität	[kg/s]
$\dot{Q}$	Wärmestrom	[W]
R	spezifische Gaskonstante	[kJ/(kg · K)]
S	Entropie	[J]
T	Temperatur	[K, °C]
$T_R$	Reaktionstemperatur	[K, °C]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
X	Umsatz	[-]
Y	Ausbeute	[-]
Z	Messergebnis	[-]

Formelzeichen (klein)	Bezeichnung	Einheit
c	Konzentration	[%]
$c_p$	spezifische isobare Wärmekapazität	[J/kg]
$c_v$	spezifische isochore Wärmekapazität	[J/kg]
d	Durchmesser, innen	[mm]
$\delta_{Hub}$	Wasserstoff-Hub	[%]
e	spezifischer Energieverbrauch	[J/kg]
$\epsilon$	Porosität	[%]
$\Delta g_r$	freie Enthalpie	[kJ/mol]
h	spezifische Enthalpie	[J/kg]
$\Delta h_r$	spezifische Reaktionsenthalpie	[kJ/mol]
$\Delta H_r$	molare Reaktionsenthalpie	[kJ/mol]
i	interner Zinssatz	[%]
$k_{H_2}$	spezifische Kosten für Wasserstoff	[€/kg H <sub>2</sub> ]
$k_{Reaktor}$	spezifische Reaktorkosten	[€/kW]
k	spezifische Kosten	[€/kW]
k	Geschwindigkeitskonstante	[1/s]
$k_0$	Stofffaktor	[1/s]
m	Masse	[kg]
$\dot{m}$	Massenstrom	[kg/s]
n	Abschreibungsdauer	[a]
n	Reaktionsordnung	

## Abkürzungen und Formelzeichen

---

Formelzeichen (klein)	Bezeichnung	Einheit
n	Stoffmenge	[mol]
p	Druck	[Pa]
q	spezifische Wärmeenergie	[J/kg]
r	Reaktionsgeschwindigkeit	[-]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
t	Zeit	[s]
u	Messabweichung	[%]
$\tau$	Verweilzeit	[s]
$\eta$	Wirkungsgrad	[%]
$\eta_{\text{grav}}$	gravimetrische Speicherdichte	[kg/kg]
$\eta_{\text{hyd}}$	Beladegrad des LOHC	[kg/kg]
$\eta_{\text{vol}}$	volumetrische Speicherdichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega_{\text{grav}}$	gravimetrische Energiedichte	[J/kg]
$\omega_{\text{vol}}$	volumetrische Energiedichte	[J/m <sup>3</sup> ]
$\xi$	Reaktionslaufzahl	[-]
$\nu$	Stöchiometrischer Koeffizient	[-]
$\psi$	Stoffanteil	[-]
w	spezifische Arbeit	[J/kg]

## Indices

Indices	Bezeichnung
0	Basiszustand
1	Zustand 1, Eingang
2	Zustand 2, Ausgang
a	außen
a	absolut
D	Diffusionskontrolliert
Dehyd	Dehydrierung
el	elektrisch
exp	experimentell
f	frei
grav	gravimetrisch
h	halb gefüllter Reaktor
H0-DBT	H0-Dibenzyltoluol
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> -LOHC	Wasserstoff im LOHC gebunden

---

Indices	Bezeichnung
H18-DBT	H18-Dibenzyltoluol
HA	Hauptanlage, Reaktor
HD	Hochdruck
HT	Hochtemperatur
Hyd	Hydrierung
H <sub>n</sub>	Heizwert
i	Zeitschritt
i	Komponente, Spezies, Stoff
i	innen
inkl. ZK	inklusive Zusatzkosten
Invest	Investition
Kat	Katalysator
Kat,h	Katalysator, halb gefüllt
Kat,v	Katalysator, voll gefüllt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LOHC	LOHC
max	maximal
min	minimal
n	Normalzustand
NT	Niedertemperatur
O&M	Betrieb und Wartung, Operation & Maintenance
Pt	Platin
R	Reaktion
R	Reaktor
R	Reaktionskontrolliert
TF	Thermoelement-Führungsrohr
th	thermisch
v	voll gefüllter Reaktor
vol	volumetrisch
WT	Wärmetauscher

## Chemische Zeichen

Chemische Zeichen	Bezeichnung
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
C	kohlenstoff
CO	Kohlenmonoxid

## Abkürzungen und Formelzeichen

---

Chemische Bezeichnung	Bezeichnung
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
$\text{CO}_n\text{H}_{2n+2}$	Kohlenwasserstoffverbindung
$\text{C}_{14}\text{H}_{13}\text{N}$	N-Ethylcarbazol
$\text{C}_{14}\text{H}_{25}\text{N}$	Perhydro-N-Ethylcarbazol
$\text{C}_{21}\text{H}_{38}$	Perhydro-Dibenzyltoluol
$\text{C}_{21}\text{H}_{20}$	Dibenzyltoluol
$\text{C}_7\text{H}_{14}$	Methylcyclohexan
$\text{C}_7\text{H}_8$	Toluol
$\text{C}_6\text{H}_{12}$	Cyclohexan
$\text{C}_6\text{H}_6$	Benzol
$\text{C}_{10}\text{H}_{18}$	Decalin
$\text{C}_{10}\text{H}_8$	Naphtalin
$\text{H}_2$	Wasserstoff
$\text{H}_2\text{O}$	Wasser
$\text{O}_2$	Sauerstoff
Pd	Palladium
Pt	Platin
R/R'	Restkette