



Dokumentation

Wasserstoffträgersysteme

Einzelfragen zu Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)

Wasserstoffträgersysteme

Einzelfragen zu Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 058/20
Abschluss der Arbeit: 21. Oktober 2020
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und
Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Wasserstoffträger - Systeme	5
3.	Forschungsaktivitäten	8

1. Einleitung

Flüssige, organische Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHC) sind chemische Energiespeicher für Wasserstoff. Diese organischen Verbindungen können durch chemische Reaktionen Wasserstoff aufnehmen und abgeben und deshalb als Speichermedien für Wasserstoff dienen. Sie ermöglichen die Langzeitspeicherung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff unter Umgebungsdruck und -temperatur. LOHC können in der Wasserstofflogistik und in Verbindung mit anderen Technologien der Wasserstoffherstellung und Wasserstoffnutzung als Energiespeicher zum Einsatz kommen.¹

Die Wasserstoffbeladung (Hydrierung) erfolgt katalytisch in der Regel bei einem Druck zwischen 30 und 50 bar und im Temperaturbereich zwischen 200°C und 250°C. Die dabei entstehende Wärme kann für Beheizung oder Dampferzeugung genutzt werden. Die gesättigte, wasserstofffreie Verbindung kann bei Umgebungsbedingungen flüssig gelagert werden. Zur Wasserstofffreisetzung (Dehydrierung) wird der Träger auf Temperaturen zwischen 260°C und 310°C erwärmt und katalytisch dehydriert. Dafür ist eine Wärmezufuhr notwendig.²

Komponenten und Verfahrensschritte für die Speicherung der elektrischen Energie in LOHC-Tanks sind die „Elektrolyse, je nach Elektrolysetechnologie eine Trocknung des Wasserstoffs, ein Hydrierreaktor, je ein Tank für den hydrierten und den dehydrierten LOHC (es kann auch ein gemeinsamer Tank genutzt werden), ein Dehydrierreaktor, eine Reinigungseinheit für den gebildeten Wasserstoff und eine Rückverstromungstechnologie, wie beispielsweise eine Brennstoffzelle. Das organische Trägerfluid wird während dieser Lade- und Entlade-Prozesse selbst nicht verbraucht.“³

Mit Hilfe der LOHC kann zum Beispiel Wasserstoff in hoher Energiedichte in Form einer Diesel-ähnlichen Flüssigkeit unter Umgebungsbedingungen in existierenden Infrastrukturen für Kraftstoffe gespeichert, transportiert und auch an Bord von Fahrzeugen bereitgestellt werden. Forscher arbeiten daran, die Technologie mobil an Bord von größeren Fahrzeugen wie zum Beispiel Schiffen, Zügen oder Lkw zu realisieren.⁴

1 Teichmann, D. et al. (2012). „Stabile Energieversorgung trotz unsteter Erzeugung : Konzept zur Speicherung und Nutzung von Erneuerbarer Energie durch flüssige Wasserstoffträger“ in Solarzeitalter : Politik, Kultur und Ökonomie erneuerbarer Energie. - 24 (2012), 1, Seite 70 – 77

Energie Campus Nürnberg (2020). „Wasserstoffspeicher“, <https://www.encn.de/forschung/energiespeicher/wasserstoffspeicher/>

2 VDI-Statusreport (2017). „Energiespeicher“, Kapitel 3.4.4

Ausführliche Beschreibung der Ein- und Ausspeicherung mit flüssigen Wasserstoffträgern s.a.: Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5

3 VDI-Statusreport (2017). „Energiespeicher“, Kapitel 3.4.4

4 Ilg, P., Die Zeit (2019). „Wasserstoff in Dieselform“, <https://www.zeit.de/mobilitaet/2019-05/brennstoffzelle-wasserstoff-elektroautos-energiespeicher-mobilitaetswende-forschung>

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Einzelfragen zu den Eigenschaften von Wasserstoffträgern.

2. Wasserstoffträger - Systeme

Eine schematische Darstellung der LOHC - Technologie als stationärer Stromspeicher mit hoher Speicherkapazität und als Transportmedium für Wasserstoff zeigt die nachfolgende Grafik beispielhaft. Der mobile Wasserstoffspeicher wird mit Wasserstoff aus fossiler Herstellung oder Elektrolyse beladen und zur entsprechenden Verwendung überführt.⁵ „Durch Hydrierung von Dibenzoltoluol unter Nutzung eines geeigneten Katalysators könnten 6,2 Massen-% Wasserstoff gespeichert werden, was einer Energiedichte des Speichers von 2,5 kWh/kg (bezogen auf den unteren Heizwert des gespeicherten Wasserstoffs) entspricht. Die Reaktionswärme der Hydrierung bzw. Dehydrierung von rund 65 kJ/mol H₂ ergibt sich aus der Differenz der Bindungsenergien im aromatischen System gegenüber den Einfachbindungen.“⁶

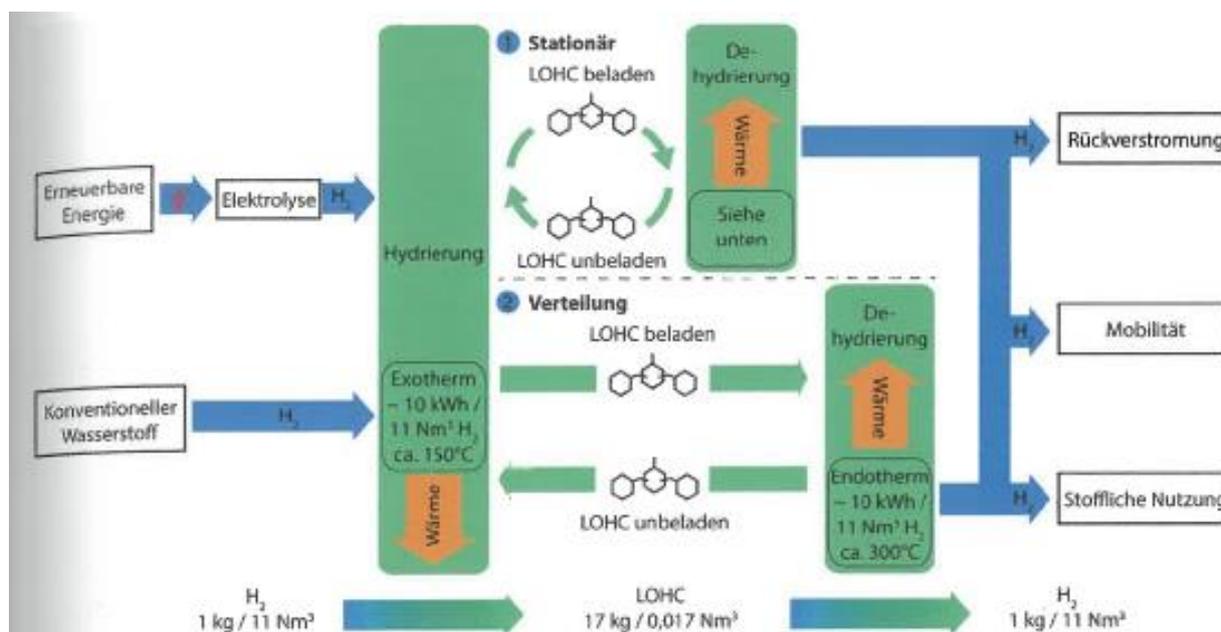


Abb. 8.61 Die LOHC-Technologie als stationärer Stromspeicher und als Transportmedium für Wasserstoff, nach [17]

5 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 427 nach: Brückner, N. et al. (2013). „Evaluation of Industrially Applied Heat-Transfer Fluid as Liquid Organic Hydrogen Carrier System“, CHEMSUCHEM 7:229-235, <https://chemistry-europe.online-library.wiley.com/doi/full/10.1002/cssc.201300426>

6 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 426

Die Systemspeicherdichte von Wasserstoff in LOHC ist im Vergleich zu molekularer Druckspeicherung sehr hoch.⁷ Die Speicherdichte beträgt für LOHC ~ 2 kWh/l bzw. 2 kWh/kg. Im Vergleich dazu hat Diesel eine Speicherdichte von etwa ~ 8 kWh/l bzw. 11 kWh/kg und Benzin etwa 7 kWh/l bzw. 11 kWh/kg.⁸

Im Laufe der Forschungsaktivitäten haben sich Toluol, N-Ethylcarbazol und Dibenzyltoluol als die bekanntesten Trägersysteme, die weltweit untersucht werden, etabliert. Experten bewerten die einzelnen Trägersysteme hinsichtlich ihrer Eigenschaften wie folgt:

„Toluol/Methylcyclohexan ist das einfachste angewandte LOHC-System. Nur Benzol/Cyclohexan wäre noch einfacher, es ist jedoch aus toxischen Gründen inakzeptabel. Der Einsatz von Toluol/Methylcyclohexan als Wasserstoffträgersystem wird durch die Kennzeichnung von Toluol als gesundheitsschädliche Substanz und den vergleichsweise hohen Dampfdruck aller Komponenten eingeschränkt. Der Normsiedepunkt von Toluol liegt bei 111°C. [...] Toluol wird jedoch deutlich ungefährlicher eingestuft als heutiger fossiler Otto-Kraftstoff. [...]

Bei N-Ethylcarbazol/Perhydro-N-Ethylcarbazol [...] ist aufgrund des heteroaromatischen Charakters die Reaktionsenthalpie der Dehydrierung im Vergleich zu Toluol um knapp 30 % abgesenkt. Damit kann ein höherer Wirkungsgrad der Wasserstoffauslagerung erreicht werden. Als nachteilig erweist sich jedoch die schlechte Verfügbarkeit von N-Ethylcarbazol sowie die Tatsache, dass N-Ethylcarbazol einen Schmelzpunkt von 69°C aufweist.

[...] Die Entwicklung der LOHC-Technologie verdichtet sich auf Dibenzyltoluol/Perhydro-Dibenzyltoluol.“⁹ Dibenzyltoluol ist als wassergefährdend eingestuft.

Die nachfolgende Tabelle stellt die Eigenschaften der drei bekanntesten Wasserstoffträgersysteme gegenüber.¹⁰

7 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 426

8 Energie Campus Nürnberg (2020). „Wasserstoffspeicher“, <https://www.encln.de/forschung/energiespeicher/wasserstoffspeicher/>

9 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 426

Untersuchungen zur chemischen Stabilität des N-Ethylcarbazol-basierten LOHC-Systems „H0-NEC/H12-NEC“: Obesser, K. (2016). Dissertation „Synthese und Charakterisierung von heterogenen Katalysatoren zur Wasserstofffreisetzung aus Dodecahydro-N-Ethylcarbazol“, <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/8107/DissertationKatharinaObesser.pdf>

10 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 425

Tab. 8.29 Eigenschaften der derzeit drei bekanntesten flüssigen Wasserstoffträgermaterialien (LOHC)

	Toluol	N-Ethylcarbazol	Dibenzyltoluol
Wasserstoffreiche Spezies	Methylcyclohexan	Perhydro-N-Ethylcarbazol	Perhydro-Dibenzyltoluol
Molare Masse	91,2 g/mol	195,3 g/mol	272,38 g/mol
Dichte bei 20 °C	0,87 g/cm ³	1,16 g/cm ³	1,04 g/cm ³
Schmelzpunkt	-95 °C	69,25 °C	-39—32 °C
Normalsiedepunkt	111 °C	348 °C	390 °C
Flammpunkt	6 °C	186 °C	212 °C
Wasserstoffspeicherdichte	6,2 Massen-%	5,8 Massen-%	6,2 Massen-%
Reaktionsenthalpie	72 kJ/mol	53 kJ/mol	65 kJ/mol
Wärmekapazität	1,71 J/(g K)	1,16 J/(g K)	1,56 J/(g K)
Toxikologie und Ökotoxikologie (Kennzeichnungselemente nach Richtlinie 67/548/EWG)	leicht entzündlich gesund- heitsschädlich reizend reproduktionstoxisch	hautreizend augen- reizend	wassergefährdend

Auch der Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) sieht Dibenzyltoluol im Fokus der Forschung. Die Experten meinen, dass sich dieses Trägersystem durch höhere Stabilität und bessere Handhabbarkeit als die Träger Toluol und N-Ethylcarbazol auszeichnet. In ihrem Statusbericht geben sich Parameter für chemische Speichersysteme bzw. flüssige organische Wasserstoffträger folgende Daten an: Die Energiedichte [Wh/kg] beträgt 1600 Wh_{H₂}/kg bis 2200 Wh_{H₂}/kg, 800 Wh_{el}/kg bis 1200 Wh_{el}/kg und der Heizwert [Wh/m³] ca. 1500 kWh_{H₂}/m³ und 750 kWh_{el}/m³. Die Energiespeicherleistung einer Anlage wird mit 1 kW_{H₂} bis 10 MW_{H₂} für die Aufnahme und 1 kW_{H₂} bis 6 MW_{H₂} für die Abgabe beziffert. Die Anzahl der Ladezyklen bzw. die Zyklenlebensdauer wird mit unbekannt und die Selbstentladungszahl [%/Zeit] mit null angegeben. Die Skalierbarkeit erfolgt nach Angaben der Experten nur über die Leistung und nicht über die gespeicherte Menge. Sie ist ab einer Anlagengröße von ca. 5 kW beliebig und die Anlagen sind modularisierbar.¹¹

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft für das LOHC-System Dibenzyltoluol (H₀-LOHC)/Perhydrodibenzyltoluol (H₁₈-LOHC) typische Bedingungen des Belade- und Entladeprozesses und die dabei freigesetzten bzw. benötigten Wärmemengen.¹²

11 VDI-Statusreport (2017). „Energiespeicher“, Kapitel 3.4.4 und Tabelle A4 „Zusammenfassung der wichtigsten Kenngrößen chemischer Speicher“, ab Seite 88

12 Sterner, M., Stadler, I. (2016). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, Kapitel 8.4.2.5, Seite 424 nach: Brückner, N. et al. (2013). „Evaluation of Industrially Applied Heat-Transfer Fluid als Liquid Organic Hydrogen Carrier System“, CHEMSUCHEM 7:229-235, <https://chemistry-europe.online-library.wiley.com/doi/full/10.1002/cssc.201300426>

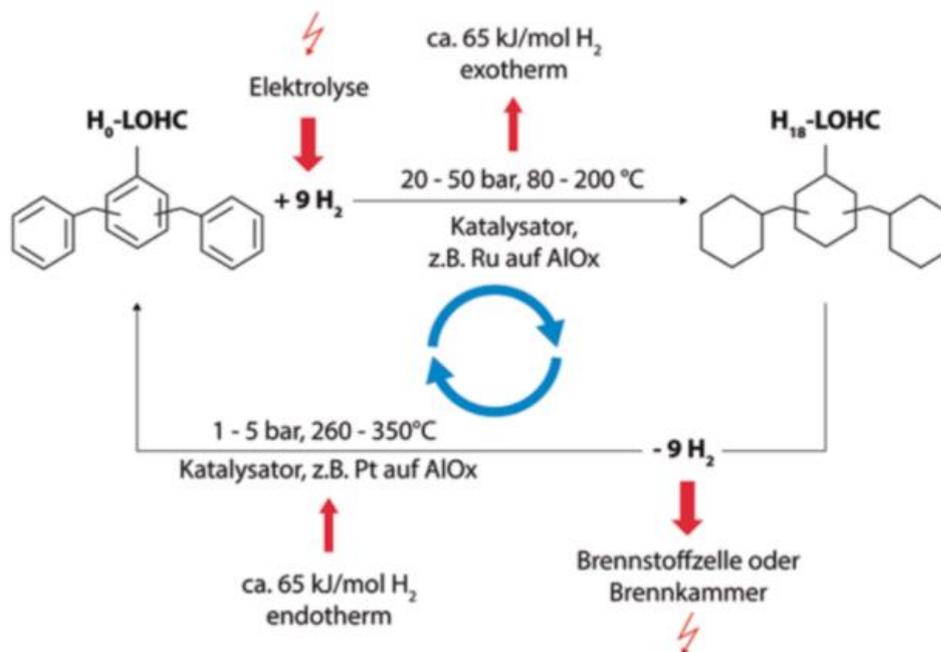


Abb. 8.59 Das LOHC-System Dibenzyltoluol/Perhydrodibenzyltoluol - typische Bedingungen des Belade- und Entladeprozesses sowie die dabei freigesetzten bzw. benötigten Wärmemengen, nach [17]

Die Experten des Energie Campus Nürnberg schätzen den Wirkungsgrad wie folgt ein: „Der Wirkungsgrad der LOHC Freisetzung liegt bei etwa 70 %. Das bedeutet, 30 % der in Form von gespeichertem Wasserstoff eingebrachten Energie wird für den Betrieb benötigt. Genauer gesagt, zum Beheizen des Freisetzungsreaktors. Die Rückverstromung in einer Brennstoffzelle weist einen Wirkungsgrad von etwa 50 % auf.“ Für das untersuchte System sind derzeit bis zu 100 Zyklen möglich. Das Trägermaterial kann danach aufgearbeitet und erneuert werden. Weitere Forschungen sollen bis zu 1000 Zyklen ermöglichen.¹³

3. Forschungsaktivitäten

Die Forscher des Energie Campus Nürnberg setzen als Trägermaterial beispielsweise ein „Isomengemisch“ von Dibenzyltoluol ein. Das Gemisch ist unter dem Markennamen Marlotherm SH oder Dowtherm seit Jahrzehnten in der Industrie im Einsatz. Die Gefahreinstufung beschreiben die Forscher wie folgt: „Zwar wird Dibenzyltoluol nicht als Gefahrstoff klassifiziert und darf somit in unbegrenzter Menge in herkömmlichen, drucklosen Tanks gelagert und transportiert werden. Es wird jedoch als gewässergefährdend eingestuft, da es nur schwer biologisch abgebaut

13 Energie Campus Nürnberg (2020). „Wasserstoffspeicher“, <https://www.encn.de/forschung/energiespeicher/wasserstoffspeicher/>

werden kann. Dibenzyltoluol und dessen Gemische sind nur sehr schwer entzündlich und ansonsten ungiftig.“¹⁴

Weitere Parameter LOHC-Systeme sind im Rahmen von Forschungsarbeiten zusammengestellt worden.

Ein Projekt des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat in einer umfangreichen Untersuchung die technologische, ökonomische und ökologische Eignung der LOHC-Technologie für den Einsatz im Schwerlastverkehr bewertet. Die Experten zeigen die Realisierbarkeit eines LOHC-basierten Antriebsstrangs und einer LOHC-Infrastruktur auf. Rechtliche Vorgaben und die Handhabung der Abrechnungsmöglichkeiten des Energieträgers LOHC stehen dabei auch im Fokus der Untersuchungen.¹⁵ Ein weiteres Projekt bewertet die Produktionskosten für die Schiene und die grundsätzliche Umsetzung der LOHC-Technologie für den Schienenverkehr.¹⁶

Eine Dissertation befasst sich unter anderem ausführlich mit den ausgewählten LOHC-Systemen Benzol, Toluol, N-Ethylcarbazol, Benzyltoluol und Dibenzyltoluol und stellt den Stand der Forschung dar. Im Fokus der Untersuchungen standen die Einflussfaktoren Methan, Wasser, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid und ihr Einfluss auf die Hydrierung von Dibenzyltoluol (H₀-DBT) und die Frage, ob das Konzept der Mischgashydrierung unter Verwendung kommerzieller Ru-, Rh-, Pt- und Pd-Katalysatoren umsetzbar ist. In der ersten folgenden Tabelle stellt der Wissenschaftler fünf ausgewählte LOHC-Stoffsysteme hinsichtlich ihrer Wasserstoffspeicherkapazität, der Reaktionsenthalpie, ihres Schmelz- und Siedepunktes sowie den wichtigsten Sicherheitshinweisen gegenüber. In der zweiten Tabelle vergleicht der Autor die LOHC-Systeme Benzyltoluol und Dibenzyltoluol hinsichtlich ihrer thermophysikalischen Eigenschaften.¹⁷

14 Energie Campus Nürnberg (2020). „Wasserstoffspeicher“, <https://www.encn.de/forschung/energiespeicher/wasserstoffspeicher/>

15 Arlt, W., Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (2019). „Machbarkeitsstudie - Wasserstoff und Speicherung im Schwerlastverkehr“, https://www.tvt.tf.fau.de/files/2018/11/lohc-lkw_bericht_final_teil_2.pdf

NOW GmbH (2019). „Steckbrief zum Projektfortschritt LOHC -LKW“, https://www.now-gmbh.de/content/2-bundesfoerderung-wasserstoff-und-brennstoffzelle/3-projektfinder/20191007-verkehr/20170201-lohc-lkw/lohc-lkw_steckbrieffortschritt.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2019). Abschlussbericht „Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen“, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-03-12_cc_03-2019_sektorkopplung.pdf, Seite 281 f

16 Wasserscheid, P., Forschungszentrum Jülich (2019). „Neue Optionen für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstoffzügen durch Nutzung der LOHC-Technologie?“, http://juser.fz-juelich.de/record/861708/files/Energie_Umwelt_453.pdf

17 Jorschick, K. H. (2019). Dissertation „Ein-Reaktor-Konzept und Mischgashydrierung als Verfahrensvarianten zur Effizienzsteigerung in der LOHC-basierten Wasserstoffspeicherung“, <https://d-nb.info/1197304541/34> ab Seite 37

Tabelle 2.8: Ausgewählte LOHC-Stoffsysteme in ihrer wasserstoffarmen und wasserstoffreichen Form, [17, 263–268].

Stoffsystem	w_{H_2} Gew.-%	ΔH_R kJ mol ⁻¹	T_{Sch} °C	T_{Sied} °C	Sicherheit -
Benzol (B)	7,1	68,7	6	80	F, T, Xn, Xi
Cyclohexan			7	81	
Toluol (T)	6,1	68,3	-91	111	F, Xn, Xi
Methylcyclohexan (MCH)			-127	101	
<i>N</i> -Ethylcarbazol (H0-NEC)	5,8	53,2	69	270	Xi
Perhydro- <i>N</i> -Ethylcarbazol (H12-NEC)			n.b.	n.b.	
Benzyltoluol (H0-BT)	6,2	63,5	-70	280	Xi, N
Perhydro-Benzyltoluol (H12-BT)			n.b.	n.b.	
Dibenzyltoluol (DBT)	6,2	65,4	-34	386	N
Perhydro-Dibenzyltoluol (H18-DBT)			-58	351	

Die Gefahrensymbole F, T, Xn, Xi und N stehen für: F = Leicht entzündlich, Xn = Gesundheitsschädlich, Xi = Reizend, T = Giftig, N = Umweltverträglich.¹⁸

Müller, M. (2018). Dissertation „Entwicklung und Betrieb einer Anlage zur kontinuierlichen Hydrierung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern im Technikumsmaßstab“, <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/10025/MichaelMuellerDissertation.pdf>

Tabellen sind zusammengestellt aus:

Müller, K. et al. (2015). „Liquid Organic Hydrogen Carriers: Thermophysical and Thermochemical Studies of Benzyl- and Dibenzyltoluene Derivatives“, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2015, 54 (32), 7967–7976, https://kpfu.ru/staff_files/F1293976109/2015_Liquid_Organic_Hydrogen_Carriers_Thermophysical_and_Thermochemical_Studies_of_Benzyl.pdf

K. Müller, J. Völkl und W. Arlt, Thermodynamic Evaluation of Potential Organic Hydrogen Carriers, *Energy Technology* 2013, 1 (1), 20–24, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.201200045>

GESTIS-Stoffdatenbank des IFA - Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Stand 2018. Für Benzol, Cyclohexan, Toluol und Methylcyclohexan, [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestisdeu:sdbdeu\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu$3.0)

18 Chemie.de „Gefahrensymbol“, <https://www.chemie.de/lexikon/Gefahrensymbol.html>

Die Schwerentflammbarkeit zweier LOHC - Produkte zeigt experimentell ein Video. Hydrogenious LOHC Technologies (2018). „LOHC - safe and efficient hydrogen storage“, https://www.youtube.com/watch?v=9LnrNiHC_34&feature=youtu.be

Tabelle 2.9: Gegenüberstellung der LOHC-Systeme Benzyltoluol und Dibenzyltoluol hinsichtlich ihrer thermo-physikalischen Eigenschaften.

Eigenschaft		Benzyltoluol		Dibenzyltoluol	
Wasserstoffspeicherkapazität, [17]	Gew.-%	6,2		6,2	
Gravimetrische Energiedichte, [17]	kWh kg ⁻¹	2,1		2,1	
Volumetrische Energiedichte, [17]	kWh m ⁻³	1800		1900	
Reaktionsenthalpie, [17]	kJ mol ⁻¹	63,5		65,4	
		H0-BT	H12-BT	H0-DBT	H18-DBT
Molare Masse	g mol ⁻¹	182,36	194,36	272,36	290,36
Schmelzpunkt, [322, 323]	°C	-70	n.b.	-34	-58
Siedepunkt, [322, 323]	°C	280	n.b.	386	351
Dichte (20 °C), [17, 322, 323]	g l ⁻¹	0,99	0,88	1,04	0,91
Viskosität (20 °C), [17, 322, 323]	mPa s	3,94	6,97	49	424
Spezifische Wärmekapazität (20 °C), [17]	JK ⁻¹ g ⁻¹	1,52	1,72	1,56	1,53
Wärmeleitfähigkeit (40 °C), [17, 322, 323]	W m ⁻¹ K ⁻¹	0,132	n.b.	0,128	0,128
Löslichkeit von H ₂ (20/90 °C), [326]	bar	n.b.	n.b.	1703/1182	1214/744
Löslichkeit von N ₂ (56 °C), [327]	bar	n.b.	n.b.	1020	1263
Löslichkeit von CH ₄ (56 °C), [327]	bar	n.b.	n.b.	407	261
Löslichkeit von CO ₂ (62 °C), [327]	bar	n.b.	n.b.	140	144

Eine Masterarbeit untersucht die Machbarkeit von verfahrenstechnischen Anlagen für die reversible Hydrierung und Dehydrierung eines gewählten Stoffsystems. Der Autor ermittelte spezifische Produktionskosten von Wasserstoff-Produkten der Hydrierungs- und Dehydrierungsanlagen. Die Arbeit enthält auch Stoffdaten der verschiedenen Systeme.¹⁹

Untersuchungen zu wirtschaftlichen Faktoren verschiedener Prozessketten, Schiffstransport von Wasserstoff (5000 km, Pipeline-basiert), zeigen unter anderem, dass Methanol²⁰ vor Dibenzyltoluol und Toluol die günstigste Variante für Lagerung und Transport ist. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass bei einer Speicherdauer von 60 Tagen die LOHC-Varianten wirtschaftliche

19 Piehl, F. (2019). Masterarbeit „Machbarkeitsstudie zur Herstellung von flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHC) - Prozessentwicklung, Schätzung der Investitionsausgaben und Produktionskosten sowie Analyse der technischen und wirtschaftlichen Risiken“, https://epb.bibl.th-koeln.de/frontdoor/deliver/index/docId/1374/file/MA_Piehl_LOHC_48_20190610.pdf, Tabelle mit Daten zur Design Basis für die Hydrierung bzw. Dehydrierung, Seite 58, 70 und 100

20 Methanol ist ein Energieträger, der auch als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen verwendet werden kann. „Methanol selbst ist nur von geringer Toxizität, wohl giftig sind aber seine Metabolite, so der durch die Alkoholdehydrogenase (ADH) gebildete Formaldehyd und die daraus entstehende Ameisensäure.“ Aus: chemie.de „Methanol“, <https://www.chemie.de/lexikon/Methanol.html>

Vorteile gegenüber komprimiertem Wasserstoff (CGH₂) aufweisen.²¹ Weitere ökonomische Betrachtungen finden sich beispielsweise in einem Artikel zu theoretischen Überlegungen eines Dibenzyltoluol-Systems.²²

Zur Gefährdungsbewertung von LOHC-Systemen untersuchten Forscher der Universität Bremen die potenziellen Auswirkungen der LOHC auf die Umwelt und menschliche Gesundheit. Sie erstellten ein erstes toxikologisches Profil, weitere Forschungen sollen folgen. Dabei geben die Forscher zu bedenken, dass die Konzentration auf die Bewertung von CMR-Aspekten (CMR = karzinogen, mutagen oder reproduktionstoxisch) liegen sollte. Die Experten meinen, dass die LOHC-Systeme durch eine Vermeidung von CMR-Chemikalien einen Wettbewerbsvorteil im Vergleich zu fossilen Brennstoffen, die karzinogene Stoffe enthalten, bekommen würden.²³

Die Kosteneffizienz betrachten Forscher der Universität Nürnberg-Erlangen anhand von theoretischen Modellen für Fischer-Tropsch-Diesel, Methanol und flüssigen organischen Wasserstoffträgern. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung von Wasserstoff, der vorübergehend an flüssige organische Wasserstoffträger gebunden ist, eine günstige Alternative zu den weiter verbreiteten synthetischen Diesel- und Methanolkraftstoffen darstellt.²⁴

Eine Bewertung zur Zuverlässigkeit der Energiespeicherung mittels eines flüssigen organischen Wasserstoffträgers (LOHC) sollte eine Abschätzung ermöglichen, die die verschiedenen Komponenten im Hinblick auf die jeweiligen Ausfallursachen, Folgen, Milderungs- und Wiederherstellungsstrategien bewertet, um eine Einschätzung zur Belastbarkeit des Systems zu gewinnen. Die Wissenschaftler berechneten eine Funktionalität bzw. Teilfunktionalität für mehr als 97 bzw. ca. 98 % der Betriebszeiten.²⁵

Der Forschungscluster B1 „Dezentrale Wasserstoff-Logistik – Speicherung und Verteilung über flüssige Wasserstoffträger (LOHC)“ des Kopernikus-Projekts „Power-to-X“ erforschte unter anderem neue Apparate-Technologien und Katalysatoren. Schwerpunkt der Arbeiten ist die Integration der LOHC-Technologie in bekannte Wasserstofftankstellen. Dabei wird der Wasserstoff in chemisch gebundener Form mittels LOHC an eine Wasserstofftankstelle geliefert und dort in ei-

-
- 21 Niermann, N. (2019). „Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain“, *Energy Environ. Sci.*, 2019, 12, 290-307, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2019/ee/c8ee02700e>
 - 22 Eipasch, M. (2017). „Model-based techno-economic evaluation of an electricity storage system based on Liquid Organic Hydrogen Carriers“, *Applied Energy* Volume 185, Part 1, 1 January 2017, Pages 320-330, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916315094>
 - 23 Markiewicz, M. et al. (2015). „Environmental and health impact assessment of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems – challenges and preliminary results“, <https://pubs.rsc.org/en/content/article-landing/2015/EE/C4EE03528C#!divAbstract>
 - 24 Runge P., et al. (2019). „Economic comparison of different electric fuels for energy scenarios in 2035“, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918315782?via%3Dihub>
 - 25 Rüde, T. et al. (2017). „Resilience of Liquid Organic Hydrogen Carrier Based Energy-Storage Systems“, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.201700446>

nem sogenannten Dehydrierer freigesetzt. „Das Projekt umfasst die Entwicklung und Demonstration der Prozessketten von bereitgestelltem „grünen“ Elektrolysewasserstoff bis hin zur Wasserstoffabgabe an einer 700 bar Wasserstofftankstelle bzw. zur Nutzung in der chemischen Industrie.“ Die speziellen Anwendungsszenarien dieses Projekts erfordern nach Aussage der Wissenschaftler „noch erheblichen Forschungsbedarf in den technischen Anforderungen hinsichtlich Wasserstoffreinheit, Abgabemenge und Dynamik an einer Wasserstofftankstelle bzw. bei einer Verwendung in der chemischen Industrie, um eine möglichst wirtschaftliche Nutzung der Technologie zu ermöglichen.“²⁶

26 Fraunhofer ISE (2020). „Kopernikus-Projekte Power-to-X“, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/kopernikus-projekt-power-to-x.html>

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2018). „Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-To-X Technologien“, https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/91CCA671751B049BE0539A695E86710C/live/document/P2X_Roadmap_2.pdf

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2018). „Erneuerbare Energien vielfältig nutzen“, https://www.kopernikus-projekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/70DD404D5C7F3879E0539A695E8697E6/current/document/Kopernikus_P2X_Brosch%C3%BCre_April_2018_2_.pdf, Seite 8