

Bewertung von Energieeffizienztechnologien mit der Methodik EDUAR&D an zwei Beispielen

Bernhard Schäfer^{1,*}, Felipe Andrés Toro Chacón², Thorsten Brinkmann³, Anja Drews⁴, Eberhard Jochem² und Jörg Sauer¹

DOI: 10.1002/cite.202000251

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Supporting Information
available online

Die Methodik EDUAR&D, kurz für Energiedaten und -analyse R&D, wird zur Bewertung von Energieeffizienztechniken genutzt. Es handelt sich um einen strukturierten Such- und Analyseprozess, der verschiedene methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Techniken miteinander verbindet. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen, z. B. bzgl. thematischer Schwerpunktsetzung, für die zukünftige Energieforschung im Rahmen der Forschungsförderung und für die Energiepolitik abzuleiten. Die Methodik wird hier am Beispiel der organophilen Nanofiltration und der Latentwärmespeicher vorgestellt.

Schlagwörter: EDUAR&D-Methode, Energieeffizienz, Latentwärmespeicher, Organophile Nanofiltration

Eingegangen: 02. Dezember 2020; *revidiert:* 19. Februar 2021; *akzeptiert:* 22. April 2021

Evaluation of Energy Efficiency Technologies with the EDUAR&D Method on Two Exemplary Technologies

The EDUAR&D methodology, short for energy data and analysis R&D, is used to evaluate energy efficiency technologies. It is a structured research and analysis process, which combines various methodological approaches for the presentation, analysis, and evaluation of the technologies. The aim is to derive recommendations for action, e.g., with regard to thematic priorities, for future energy research within the framework of research funding and recommendations for energy policy. The methodology is presented here using the examples of organic solvent nanofiltration and latent heat storage.

Keywords: EDUAR&D method, Energy efficiency, Latent heat storage, Organic solvent nanofiltration

1 Einleitung

Die mittel- und langfristigen Herausforderungen der Prozessindustrie in den Jahren bis 2030 bzw. bis 2050 werden in der Literatur beschrieben und diskutiert [1–4]. Der Handlungsbedarf ergibt sich aus der politischen Weichenstellung, um die Klimaschutzziele zu erreichen [5, 6]. Die

Gestaltung der Transformation der chemischen Industrie mit ihren zwangsläufig kohlenstoffbasierten Produkten und Wertschöpfungsketten in Richtung einer Treibhausgas (THG)-neutralen Wirtschaft ist nicht leicht zu bewältigen. Eine nahezu THG-neutrale Chemieproduktion bis 2050 ist jedoch technologisch denkbar [3]. Es erfordert zielgerichtetes Vorgehen, um negative soziale und wirtschaftliche

¹Dr. Bernhard Schäfer, Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer
Bernhard.Schaefer@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Katalyseforschung & -technologie (IKFT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland.

² Dr. Felipe Andrés Toro Chacón, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Jochem
IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, Schönfeldstraße 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

³Dr. Thorsten Brinkmann

Helmholtz-Zentrum Hereon, Institut für Membranforschung, Max-Planck-Straße 1, 21505 Geesthacht, Deutschland.

⁴Prof. Dr.-Ing. Anja Drews

HTW Berlin, Fachbereich 2 – Technik und Leben, Verfahrenstechnik in Life Science Engineering, Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin, Deutschland.

Auswirkungen zu begrenzen. Dabei ist der Trend der Circular Economy die Stoffkreisläufe zu schließen, die Prozesse effizienter zu machen, zu defossilisieren und zu elektrifizieren, d. h. Wertschöpfungsketten z. B. aus CO₂ und grünem Strom aufzubauen [3,7,8]. Das Optimierungspotenzial der Materialien, wie z. B. der Elektroden und der Katalysatoren, sowohl auf Reaktions- als auch Prozessskala sowie die Abwärmenutzung müssen gehoben werden, um nachhaltige Prozesse zu ermöglichen [9]. Der Fokus der Umgestaltung kann jedoch nicht nur auf den Basischemikalien liegen. Es müssen auch die Verfahren zur Herstellung und Aufarbeitungstechniken im Bereich der Spezialchemie sowie deren Energieeffizienz verbessert werden. Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms haben die Akteure die Herausforderungen für die Forschungsförderung der Bundesregierung adressiert, die heute und zukünftig gemeinsam von Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Verbundprojekten gelöst werden sollen [10]. Ein wichtiger Aspekt ist dabei Schwerpunkte zu setzen und vielversprechende Technologieoptionen zu bewerten, um durch die industrielle Anwendung und Entwicklung der besten Optionen erheblich zur Senkung des Energiebedarfs oder der THG-Emissionen beizutragen. Zu diesem Zweck wurde im Auftrag des BMWi die EDUAR&D-Methodik entwickelt [11]. Sie ermöglicht in einem strukturierten Analyseprozess, den Stand einer für die Senkung des Energieverbrauchs geeigneten Technik im Technikzyklus zu bestimmen und eine Liste bezüglich zukünftiger FuE-Maßnahmen, thematischer Schwerpunktsetzungen sowie Handlungsempfehlungen aufzustellen. Hier werden Methodik und Vorgehen an zwei Beispielen vorgestellt.

2 Bewertung von Technologien mit der EDUAR&D-Methode

Die verwendete Methode dient der Informationsbeschaffung für Förderentscheidungen im Bereich der Forschung und Entwicklung; bisher wurde sie ausschließlich im Bereich der Energieforschung eingesetzt [11]. Die Methode gliedert sich in drei Schritte, wovon der zweite der aufwendigste Analyseschritt ist:

1) Marktkontexturierung: Zunächst wird der betrachtete Technikbereich anhand dreier wirtschaftlicher Kriterien einer bestimmten Merkmalskategorie zugeordnet; dies dient dazu, Arbeitsschritte in der darauffolgenden dreigliedrigen Analyse mit besonderem Fokus und spezifiziertem Umfang durchzuführen. Die drei Kriterien sind: die Regionalität der in Zukunft absehbaren Märkte (regional/in Europa/global), die überwiegende Marktform der Technikproduktion und -anwendung (Polypol/Oligopol bei den Herstellern oder Vielfalt der Abnehmer) und die Wettbewerbsintensität durch bestehende oder potenzielle/absehbare technische Alternativen der betrachteten Technik.

Eine frühzeitige erste Einschätzung, in welcher der sechs Phasen (Entdeckung, Euphorie, Ernüchterung, Reorien-

terung, Aufstieg und Diffusion) des Technikzyklus (Abb. 1) sich die betrachtete Technik befindet, ist sehr nützlich für die weiteren Arbeiten; allerdings sollte man offen für Revisionen oder Spezifizierungen (z. B. Technikvarianten, Anwendungsmärkte) sein.

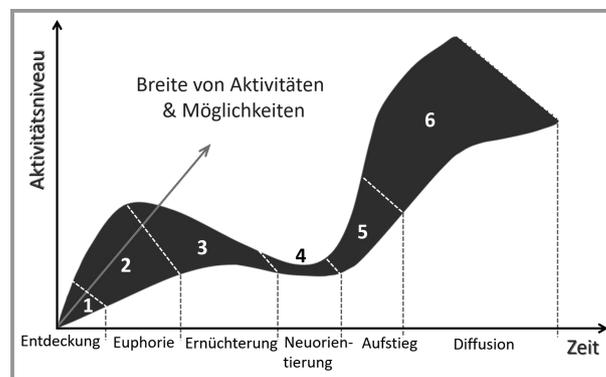


Abbildung 1. Technikzyklus [12].

2) Dreigliedrige Analyse:

- Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Abschätzung der erreichbaren Energieeffizienz und Emissionsminderung durch die neue Technik mit einem Zeithorizont von 20 bis 30 Jahren. Dabei gilt es, die unterstellte Marktdurchdringung in diesem Zeitraum, die unterstellte Kostendegression der neuen Technik anhand von Erfahrungskurven, die technischen und Kosten-Benchmarks der traditionellen oder sich zeitlich simultan entwickelnden alternativen technischen Lösungen (auch hier inkl. möglicher Kostendegressionen) und denkbare zukünftige Energiepreise zu beachten.
- Technikzyklusanalyse: Patent- und Publikationsanalyse sollten möglichst genau spezifiziert sein, eventuell durch Ausschluss von Anwendungsgebieten (z. B. Plattenwärmetauscher ohne Anwendungen im Kälte- und Kühlbereich, ohne Fahrzeuge). Als Ergebnis wird u. a. die Zahl der internationalen Patente/englischsprachigen Publikationen im Zeitverlauf und ihre Häufigkeit nach Ländern und Anmeldern/Autoren, d. h. auch der Unternehmen oder Forschungseinrichtungen, erhalten. Ihre inhaltliche Analyse gibt Aufschluss über Anwendungsbereiche.
- Innovationssystemanalyse: Die Akteure im Innovationssystem (FuE-Förderer, Forschungseinrichtungen, Hersteller, Intermediäre (Venture Capital, Standardisierung und Normengebung)) sowie Erstanwender sind zu identifizieren, einschließlich der Akteurskonstellationen. Dies bestimmt die Auswahl der Interviewpartner, bei der die Ergebnisse der Patent- und bibliometrischen Analysen helfen. Die Interviews mit den Akteuren des Innovationssystems führt zu Hinweisen bzgl. technischer und Kostenprobleme und damit zu weitergehenden FuE-Arbeiten, zu antizipierten Hemmnissen bei der Markteinführung und -diffusion.

Es sollten alle drei Analysebereiche möglichst simultan bearbeitet werden, denn so werden eine gegenseitige Befruchtung durch die Analyseinformationen und -ergebnisse sowie meist eine Beschleunigung der Arbeiten durch schnellere Erkenntnis über Kernfragen und schnelle Rückkopplungen (z. B. geeignete Interviewpartner, geeignete Publikationsjournale oder Patentklassen) erzielt.

- 3) Policy-Empfehlungen: Es werden die FuE- und innovations- und marktfördernden Maßnahmen identifiziert und bewertet, die als wesentlich angesehen werden, um gemäß der Position im Technikzyklus identifizierte Engpässe oder Hemmnisse zu beseitigen und fördernde Faktoren zu nutzen bzw. zu unterstützen. Adressaten der Empfehlungen können sein: FuE- sowie Innovationspolitik auf Bundes- und EU-Ebene, betroffene Hersteller und deren Verbände, rechtzeitige Normung und Standardisierung sowie berufliche Fortbildung.

3 Bewertung der organophilen Nanofiltration

3.1 Technologie-Beschreibung

Als organophile Nanofiltration (OSN) werden Membrantrennverfahren (MTV) bezeichnet, bei denen gelöste Stoffe im Molmassenbereich von 200–1000 g mol⁻¹ von organischen Lösungsmitteln (LM) abgetrennt werden. In der Regel ist keine thermische Energie erforderlich, da der Transport durch die Membranen über eine Druckdifferenz erreicht wird und eine Verdampfung des LM nicht erforderlich ist. Der Ersatz von thermischen Trennverfahren (TV) wie Destillation oder Rektifikation ermöglicht es, hohe Energieeinsparungen von bis zu 90 % zu erzielen [13–15]. Allerdings ist ein Strombedarf zur Erzeugung der Druckdifferenz erforderlich.

Es gibt mehrere gute Gründe für den Einsatz in der industriellen Praxis. Zum einen kann die OSN entweder alleine oder in Kombination mit traditionellen TV wie z. B.

Destillation oder Chromatographie eingesetzt werden. Auf diese Weise können Prozesse intensiviert werden. Die Integration in Hybridprozesse mit Kristallisation und Destillation ist beschrieben [16–18]. Verbunden damit ist ein deutlich sinkender spezifischer Energiebedarf der traditionellen Prozesse bei gleichzeitig hoher Trennleistung [15, 19–21]. Die direkte Trennung von organischen Gemischen über Membranen hat das Potenzial, den Energie- und CO₂-Ausstoß drastisch zu reduzieren, da ein Phasenwechsel von Flüssigkeit zu Dampf vollständig vermieden wird.

3.2 Industrielle Anwendungen

Es sind drei Betriebsarten im Einsatz: Aufkonzentrierung, LM-Austausch und Reinigung (in Pharma-, Fein- und Petrochemie). Studien und Anwendungen wurden zu folgenden Themen publiziert (Abb. 2): Produktaufkonzentrierung [22, 23], Abtrennung homogener Katalysatoren [24–27], LM-Recycling [28–31], Produktreinigung (z. B. Trennung von Zwischen-, Neben- oder oligomeren Produkten aus Reaktionsgemischen) [32–35], LM-Austausch [36, 37]. Schonendere Prozessbedingungen können zu höheren Qualitäten u. a. bei temperaturempfindlichen Produkten führen. Abb. 2 zeigt die Konkurrenztechnologien der OSN.

3.3 Marktkontexturierung

Grundsätzlich werden Verfahren unter Verwendung von organischen LM weltweit in der Chemie- und Pharmaindustrie betrieben. Der Markt für OSN ist dementsprechend groß. Heute machen nichtwässrige Anwendungen von MTV in diesen Branchen mehr als 25 % des globalen Gesamtmembranmarktes aus [39]. Um die potenzielle Bedeutung der MTV für nichtwässrige Lösungen zu verdeutlichen, sei angemerkt, dass konventionelle Trennprozesse immer noch bis zu 70 % der Investitions- und Betriebskosten dieser Branchen ausmachen [39, 40]. Die



Abbildung 2. Links: OSN beseitigt Engpässe einer thermischen Entwachsungsanlage [38]; rechts: Anwendungen, Konkurrenztechnologien.

Entwicklung von MTV, die effizienter und kostengünstiger sein können als thermische TV ist für die Prozessindustrie ein wichtiges Forschungsfeld von großem Interesse, um Energiekosten zu reduzieren. Natürlich müssen sich neue MTV in einem konservativen Produktionsumfeld erst gegen optimierte etablierte Konkurrenztechnologien durchsetzen. Vor dem Hintergrund schnell wechselnder Rahmenbedingungen, welche die beschleunigte globale Innovation hervorrufen [4], ist aber bisher nicht endgültig klar, wie schnell Unternehmen bereit sind, thermische Trenntechniken durch energiesparende MTV im Bereich der Abtrennung organischer LM einzusetzen. Trotz einer großen Anzahl von Veröffentlichungen über die Entwicklung neuer Polymere Membranen für die OSN ist die Anzahl der kommerzialisierten Membranen begrenzt (s. Tab. S1 in der Supporting Information).

3.4 Energiewirtschaftliche Bewertung

Der Großteil der industriellen Produktsynthesen in der organischen Chemie erfolgt durch Reaktion von Stoffen in Lösung. Die Produktabtrennung und LM-Rückgewinnung spielen eine große Rolle. Sie sind wichtige Aufgaben der Prozessindustrie und ihre Relevanz ist vergleichbar mit dem Syntheseprozess selbst [15]. Der Energiebedarf für die Trennung von Chemikalien ist enorm, dabei werden heute ca. 10 % der weltweit produzierten Energie verbraucht [14]. Spezifisch werden 80 % der Energie, die zur Trennung von Chemikalien benötigt wird, für die Destillation/Rektifikation verwendet [14]. Eine im Rahmen des OPHINA-Projektes durchgeführte Abschätzung für ein Marktpotenzial der OSN von konservativen 4 % ermittelt jährliche Einsparungen von 24,7 Mio. t CO₂e, 2,2 Mrd. m³ rückgewonnenes LM sowie Kosteneinsparungen von 3 Mrd. € (OPEX) [41]. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass in den nächsten 10 Jahren in Deutschland durch OSN-MTV ca. 16 bis 30 PJ pro Jahr eingespart werden könnten (Details s. Abschn. S8 in der Supporting Information (SI)).

3.5 Innovationssystem

Das Innovationssystem OSN ist in Abb. 3 dargestellt. In den letzten 15 Jahren wurde die Technologie in vier Verbundprojekten gefördert (Tab. S2). Zentrale Akteure sind neben Membranherstellern, Modul- und Anlagenbauer, Universitäten und Forschungsinstitute sowie die industriellen Anwender. Die Politik kann durch die regulierenden Randbedingungen und die Vergabe von Fördermitteln für FuE-Projekte, Pilot- und Demonstrationsvorhaben ebenfalls einen bedeutenden Einfluss ausüben.

3.6 Identifikation von technischen und Markthemmnissen

Die SWOT-Analyse OSN ist in Abb. 4 gezeigt. Die OSN-Technik kann nicht im Sinn von „plug-and-play“ in bestehende Verfahren integriert werden. Meist ist eine neue Prozessführung nötig. Für die Firmen ist die Umstellung eines laufenden Produktionsprozesses immer ein Risiko, da Produktqualität und Liefersicherheit entscheidende Kriterien der Produktion sind. Das gilt besonders in Zeiten von sich schnell ändernden Randbedingungen, die den Trend der beschleunigten globalen Innovation hervorrufen [4]. Die Bedeutung von Schnelligkeit und Flexibilität im Produktionssystem nimmt zu. Geringe Änderungen des Trennsystems, z. B. geringe Änderungen der LM-Zusammensetzung/eines Hilfsstoffes, dürfen nicht mit einem langen Optimierungprozess verbunden sein.

Eine erfolgreiche OSN-Einführung erfolgt sicher da, wo ein Zusatznutzen wie Optimierung oder Prozessintensivierung ein intrinsisches Problem löst, z. B. Katalysatorverlust bei der Abtrennung hochsiedender Nebenprodukte im Fall der Hydroformylierung [42]. Dieser Zusatznutzen kann ein Türöffner sein, der die Anwendungen der OSN in Unternehmen fördert.

Ein weiteres Hemmnis ist das Denken in traditionellen Grundoperationen. Die OSN muss als neue Standardoperation neben den etablierten Techniken aufgenommen werden, um bei der Lösung eines Trennproblems schon während des Prozessdesigns berücksichtigt zu werden. Hierzu gehört die Einbindung geeigneter Modelle in die Bibliotheken der heute verwendeten Fließbildsimulatoren für die



Abbildung 3. Innovationssystem der OSN.

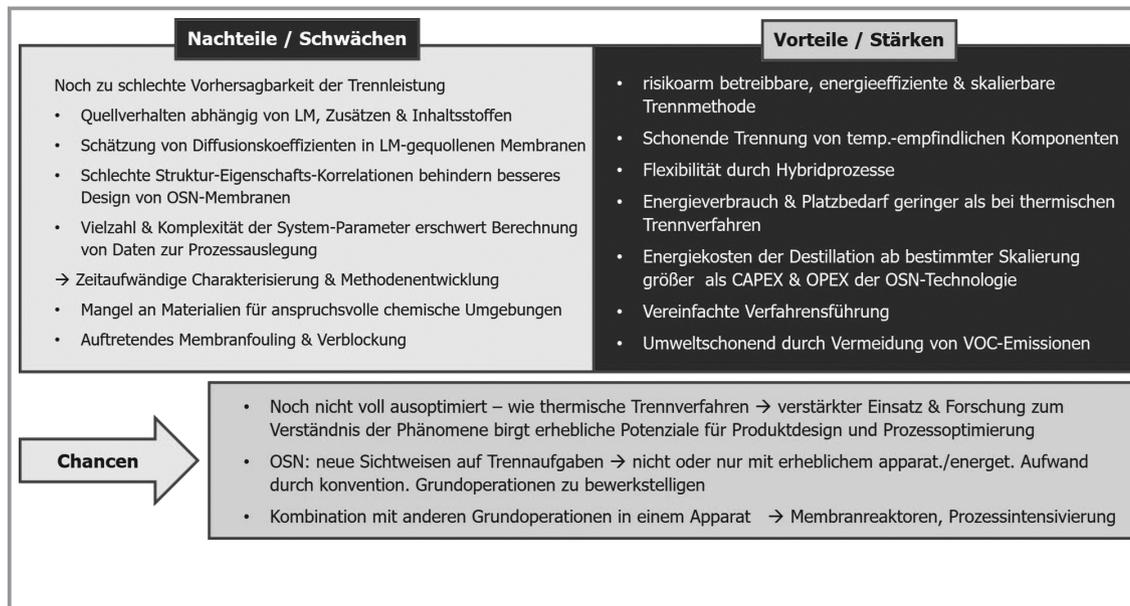


Abbildung 4. SWOT-Analyse OSN.

Prozessauslegung. Diese Problematik wurde im Verbundvorhaben ESIMEM thematisiert [43]. Die geringe Einbindung der OSN in die universitäre Ingenieurausbildung ist eine weitere typische Barriere für neue Techniken am Markt. Fehlende Erfahrungen/Kenntnisse bei beratenden Ingenieuren/Anwendern sind durch geeignete Maßnahmen zu überwinden.

3.7 Stand im Technikzyklus und Empfehlungen

Die EDUAR&D-Analyse und die durchgeführte Technikzyklusanalyse (Abschn. S7 in der SI) erlauben eine Einordnung der OSN in Phase 5 des Technikzyklus (Abb. S3, Phase des Aufstiegs). Die OSN befindet sich vielfach im Stadium der Markterschließung. Es gibt erfolgreiche (Erst-)Anwendungen in (Nischen-)Märkten ohne Subventionen.

Aufgrund der erörterten Potenziale, Chancen und Hemmnisse werden folgende FuE-Maßnahmen und Policy-Empfehlungen bzgl. der Entwicklungsziele für die OSN

abgeleitet (Tab. S3): eine gezielte grundlagenorientierte Förderpolitik, eine verstärkte marktorientierte Technologieförderung und Investitionen sowie spezifisch zugeschnittene Qualifizierungskonzepte.

4 Bewertung der Latentwärmespeicher

4.1 Technologiebeschreibung

Energiespeicher erhöhen die Zuverlässigkeit der Energiesysteme, indem überschüssig (fluktuierend) anfallende Energie für eine spätere Nutzung verfügbar wird [44]. Latentwärmespeicher (*latent heat storages*, LHS) sind thermische Speicher und nutzen den Phasenübergang der Speichermaterialien, um Wärmeenergie aufzunehmen oder abzugeben (Abb. 5) [44, 45]. Die eingesetzten Phasenwechselmaterialien (*phase change materials*, PCM) besitzen hohe spezifische Speicherkapazitäten, die vom Enthalpieumsatz beim Phasenwechsel (*phase change*, PC) herrühren. Der PC

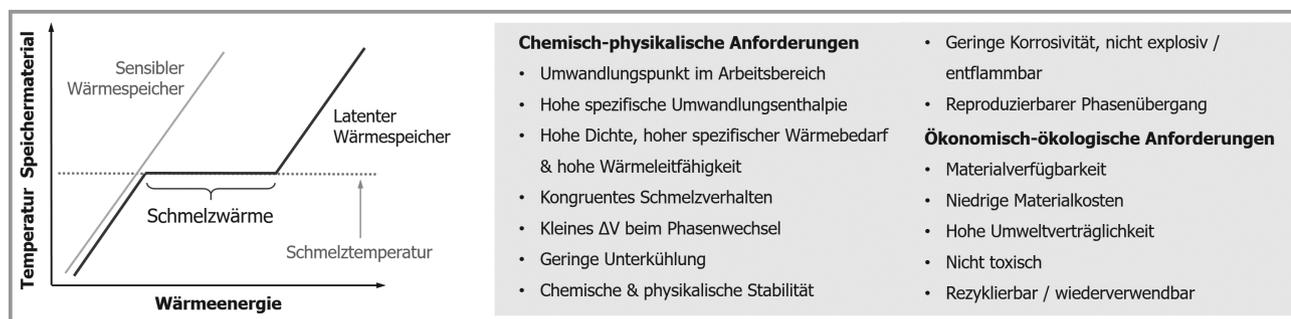


Abbildung 5. Links: Speicherkapazität eines PCM beim PC fest/flüssig (mit Vergleich zu sensiblen Speichern ohne PC), rechts: Anforderungen an PCMs.

findet in einem engen Temperaturbereich statt und ist fast isotherm. Zumeist wird der Fest/Flüssig-PC von PCM in LHS genutzt. Vorteilhaft sind die kleinen Volumenänderungen/Kompaktheit, die einfache Handhabung sowie die vergleichsweise niedrigen Kosten. Es wird unterschieden zwischen anorganischen (Wasser, Salze, Salzhydrate) und organischen PCM (Paraffine, Fettsäuren, Zuckeralkohole), die einen Temperaturbereich von -50 bis über $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ abdecken (Tab. S8) [46]. Welches PCM Anwendung findet, ist prozessspezifisch und abhängig von den chemisch-physikalischen und ökonomisch-ökologischen Eigenschaften (Abb. 5). Typische Nachteile von PCM sind Unterkühlung, Phasentrennung und geringe Wärmeleitfähigkeit (WLF) [47]. Letztere resultiert in einer geringen PC-Geschwindigkeit und kann durch PCM-Verkapselung [48–50], die PCM-Imprägnierung poröser Materialien [51, 52], Partikeldispersion [53, 54] und Integration metallischer Körper in PCM [55] sowie vergrößerte Wärmeaustauschflächen verbessert werden [46, 56, 57]. Ein LHS besteht aus drei Komponenten: einem geeigneten PCM, einem stabilen PCM-Gehäuse und einer Fläche, die ausreichende Wärmetübertragung zwischen PCM und Wärme-/Kältequelle gewährleistet [57, 58].

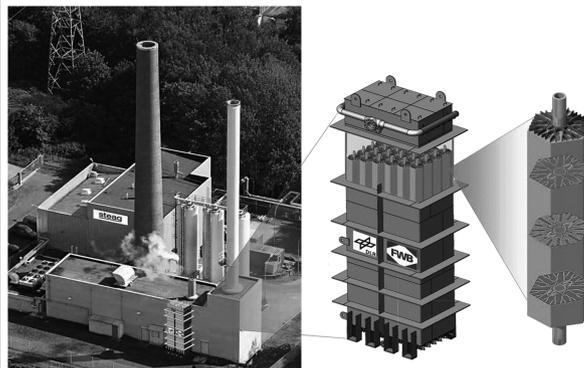
4.2 Erste industrielle Anwendungen

LHS sind bisher als Kühl-/Pufferspeicher in Gebäuden und als Speicher für Prozesswärme und in Kraftwerksanwendungen mit Dampf zu finden [47, 59]. LHS mit integrierten Rippenrohrwärmeübertragern wurden für Temperaturen zwischen 140 und $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ weiterentwickelt, aufgebaut und betrieben. Ihr Leistungsspektrum beträgt bis zu $700\text{ kW}/700\text{ kWh}$ mit Kapazitäten im Stundenbereich (demonstriert im industriellen Umfeld) [57]. Pilot-Anwendungen von LHS finden sich in der Automobilindustrie oder in der Versorgungswirtschaft in Kombination mit Anlagen zur Kraftwärmekopplung (KWK) oder für die Speicherung von industrieller Abwärme. LHS auf Salz- oder Paraffinbasis werden eingesetzt, um bspw. überschüssige Motorwärme zu speichern und diese beim Kaltstart wieder freizusetzen. Das DLR Stuttgart entwickelt aktuell LHS-Systeme auf Basis von metallischen PCM für industrielle Hochtemperatur (HT)-Anwendungen (Abb. 6) sowie für die Heizung in E-Fahrzeugen [60].

4.3 Marktkontexturierung

Der Einsatz von LHS steigert die Effizienz thermischer Prozesse, da anfallende Abwärme gespeichert und später genutzt werden kann. Der Markt für Wärmespeicher (*heat storage*, HS) konzentriert sich aufgrund der vorhandenen Abwärmepotenziale auf hochindustrialisierte Regionen der Industrieländer. Die verschiedenen Hersteller für LHS bilden einen Polypolmarkt. Die Hauptproduzenten in

Fallbeispiel: TESIN Projekt - FKZ: 03ESP011 A-C Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie und im Versorgungsbereich (Wärme) durch den Einsatz thermischer Energiespeicher.



- Speicherkapazität: $1,5\text{ MWh}$
- Speicherzeit: Mittel (Wochen bis Monate)
- Zyklenzahl: Variabel – wöchentlich bis monatlich
- Ladetemperatur: Bis $350\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Entladetemperatur: 300 bis $350\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Energiespeicherdichte: $\sim 180\text{ MJ/m}^3$

Abbildung 6. Heizkraftwerk Wellesweiler mit LHS, Details zur Auslegung. © DLR, STEAG und F. W. Brökelmann GmbH & Co. KG, 2020 Bilderrechte an IREES für CIT-Publikation weitergegeben.

Deutschland sind Rubitherm und Axiotherm GmbH (s. Abschn. 4.5) [61, 62]. HT-Speicher auf Basis von Salzen, Salzmischungen und -hydraten können in energieintensiven Industrien, wie z. B. der Eisen- und Stahlerzeugung, der chemischen Industrie oder der Steine- und Erden-Industrie, bei Abwärmepotenzialen von ca. 130 bis $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ angewandt werden. Der Einsatz von Wärmespeichern ermöglicht kombiniert mit KWK-Anlagen eine Wärmebereitstellung zum Zeitpunkt der industriellen Produktion [45, 63].

4.4 Energiewirtschaftliche Bewertung

Wettbewerbsfähigkeit und Kosten der unterschiedlichen Wärmespeicheroptionen ändern sich mit der Speicherdichte der eingesetzten PCM. Mit größerer Speicherdichte steigt die Komplexität der Systeme und damit der technische Aufwand und die Kosten [64]. LHS zeigen gute Wirkungsgrade (von bis zu 98%) [57], allerdings liegen die Kosten/kWh deutlich höher als bei sensiblen Speichern (s. Tab. S12). Im Mitteltemperaturbereich zwischen 100 und $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen die nutzbaren industriellen Abwärmepotenziale in Deutschland bei rund 150 PJ a^{-1} (s. Abb. S7) [65]. Die Wirtschaftlichkeit von industriellen Kurzzeitwärmespeichern wurde mittels Top-down-Ansatz berechnet [66]. Die für Investoren maximal akzeptablen Kosten für 300 Speicherzyklen betragen $20\text{--}28\text{ € kWh}^{-1}$, während sie für 1000 Zyklen zwischen 67 und 160 € kWh^{-1} liegen (s. auch Tab. S13). In einer Mehrheit der beobachteten Fälle macht das Speichermate-

rial (PCM) bei LHS bis zu 25 % der Investitionssumme aus [61, 66].

4.5 Innovationssystem

In den letzten 15 Jahren wurden die LHS in mehreren Verbundprojekten gefördert (Abschn. S10 in der SI). Zentrale Akteure sind neben Herstellern von LHS und PCM, Forschungseinrichtungen sowie industrielle Anwender (vgl. Abb. 7).



Abbildung 8. SWOT-Analyse LHS.

4.6 Identifikation von technischen und Markthemmnissen

Technologische Engpässe der HT-LHS sind die komplexe Wärmeübertragung und der unzureichende Wärmetransport zwischen PCM und Wärmetauscher (vgl. Abb. 8) [67, 68]. Hohe Material- und Herstellungskosten wirken hemmend auf den großflächigen Markteintritt. Das Wissen über Größe/Art stationärer HT-Abwärmeströme der Prozessindustrie ist unzureichend und behindert eine effektive Integration von LHS. Die Langzeitstabilität spielt bei der Speicherung von Abwärme durch die Anwender eine wichtige Rolle [69]: verbesserte Performance von PCM und Wärmetauscher (Korrosion, mechanische Verformung) [62]. LHS sind attraktiv, da standortspezifische Sicherheitsanforderungen (Brennbarkeit, Gasentwicklung) kein Risiko darstellen. Das nötige Kostensenkungspotenzial könnte durch Geometrieoptimierung der Wärmeübertragung und Massenfertigung von Komponenten realisiert werden [69].

4.7 Stand im Technikzyklus und Empfehlungen

Nach durchgeführter Patent- und Bibliometrieanalyse (Abschn. S11 in der SI) erfolgt die Einordnung der LHS in

die Endphase der Euphorie/Neuorientierung des Technikzyklus (vergl. Abb. 1) [70]. HT-LHS sind bisher kommerziell nicht verfügbar. HT-LHS mit anorganischen PCM wie Salzhdraten (Firma Axiotherm) oder Nitratsalzen befinden sich in der Phase der Neuorientierung und des Aufstiegs. Speicher mit organischen PCM wie Paraffine und Kunststoffe befinden sich am Beginn der Aufstiegsphase. Neue aktive Speicherkonzepte in Entwicklung bei FH ISE und DLR sind im Laborstadium (TRL 4) [57].

Folgende FuE-Maßnahmen und Policy-Empfehlungen können aus der SWOT-Analyse abgeleitet werden (Tab. S14):

- Ein wichtiger Schritt für die weitere FuE-Förderung der LHS ist der Aufbau von Demo-Projekten in den Anwendungsindustrien.
- Der Einsatz von LHS auch als Nachrüstoption ist ein Beitrag zur Flexibilisierung von KWK-Anlagen und fossilen Kraftwerken für Strom- und Wärmelieferung.
- Investitionsförderung für LHS im aktuellen KWK-Gesetz und in Förderprogrammen: positive Wirkung eines Investitionskostenzuschusses (z. B. 30 + X %) auf eine akzeptable Rentabilität. Damit gewinnt die Zyklenzahl an Bedeutung.
- Gezielte Beratung von geeigneten Standorten zu individuell angepassten LHS-Piloten.

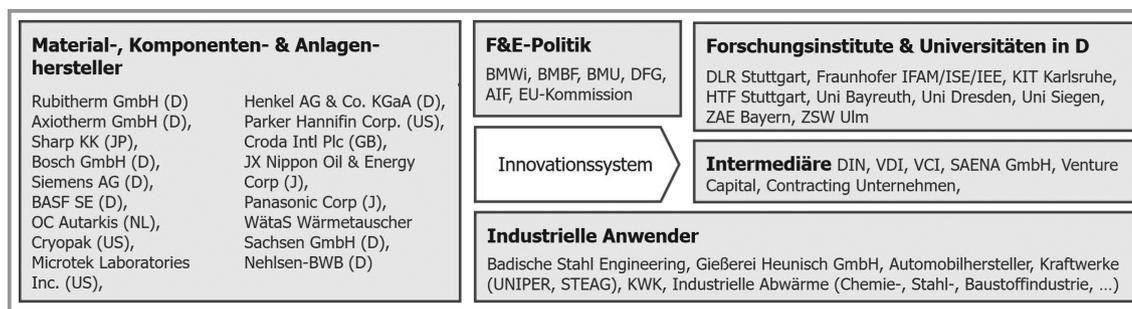


Abbildung 7. Innovationssystem LHS.

5 Fazit und Ausblick

Die Methodik EDUAR&D dient der Bestimmung einer neuen Technik in ihrem Technikzyklus. Dabei wird eine Gesamtschau über die Marktkontexturierung, die energie-technische und -wirtschaftliche zukünftige Bedeutung der Technik, ihre Marktchancen und eventuelle Alternativtechniken, über Patent- und bibliografische Analysen sowie das Innovationssystem der untersuchten Technik aufgestellt. Die Position im Technikzyklus und der Einbezug von Einschätzungen verschiedener Interviewpartner (Hersteller, Anwender und Wissenschaftler) bzgl. zu beobachtender Engpässe oder Hemmnisse führen dann zu Empfehlungen für weitere Forschungsarbeiten und weitere Politikmaßnahmen wie z. B. Pilotvorhaben, berufliche Fort- oder Ausbildung, finanzielle Förderung der Erstinvestitionen oder Normung, Standards oder Vorschriften. An zwei Beispielen, OSN und LHS, konnte die Methode hier in Kürze für die zwei Energieeffizienz-Optionen vorgestellt werden.

Supporting Information

Weiterführende Informationen zu diesem Artikel (Supporting Information) finden Sie unter DOI: 10.1002/cite.202000251. Sie beinhalten zusätzliche Literaturstellen in Zusammenhang mit dieser Arbeit [71–87].

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi.IIC6) für die Unterstützung der Begleitforschung des Forschungsnetzwerkes Energie in Industrie und Gewerbe (EE4InG, FKZ: 03ET1630A, 03ET1630B) sowie allen beteiligten Kollegen und Kooperationspartnern. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Abkürzungen

HS	Wärmespeicher (heat storage)
HT	Hochtemperatur
KWK	Kraftwärmekopplung
LHS	Latentwärmespeicher
LM	Lösungsmittel
MTV	Membrantrennverfahren
OSN	organophile Nanofiltration
PC	Phasenwechsel
PCM	Phasenwechselmaterial
THG	Treibhausgas
TRL	Technologiereifegrad
WLF	Wärmeleitfähigkeit

Literatur

- [1] *Die deutsche chemische Industrie 2030*, Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt am Main 2017.
- [2] *Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch*, Verband der Chemischen Industrie, Frankfurt am Main 2017.
- [3] *Roadmap Chemie 2050*, DECHEMA, Frankfurt am Main 2019.
- [4] B. Schäfer, J. Sauer, *Chem. Ing. Tech.* **2020**, 92 (3), 183–191. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201900178>
- [5] P. Gerbert, P. Herhold, J. Burchardt, S. Schönberger, F. Rechenmacher, A. Kirchner, A. Kemmler, M. Wunsch, *Klimapfade für Deutschland*, The Boston Consulting Group GmbH, München 2018.
- [6] *Transformation unserer Welt: Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*, United Nations, New York 2015. www.un.org/Depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf
- [7] *ProcessNet Strategie-Workshop Circular Economy*, Wiesloch, Oktober 2019.
- [8] F. Ausfelder et al., *Diskussionspapier Elektrifizierung chemischer Prozesse*, DECHEMA, Frankfurt am Main 2015.
- [9] *Roadmap Chemical Reaction Engineering*, 2nd ed., DECHEMA, Frankfurt am Main 2017.
- [10] *7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung – Innovationen für die Energiewende*, BMWi, Berlin 2018.
- [11] *Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies* (Ed: E. Jochem), Physica-Verlag, Heidelberg 2009.
- [12] F. Meyer-Krahmer, C. Dreher, in *Forschungs- und Technologie-management*, Hanser, München 2004.
- [13] A. Boam, A. Nozari, *Filtr. Sep.* **2006**, 43 (3), 46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(06\)70819-9](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(06)70819-9)
- [14] R. Lively, D. Sholl, *Nat. Mater.* **2017**, 16 (3), 276. DOI: <https://doi.org/10.1038/nmat4860>
- [15] P. Marchetti et al., *Chem. Rev.* **2014**, 114 (21), 10735. DOI: <https://doi.org/10.1021/cr500006j>
- [16] S. Ferguson et al., *Cryst. Growth Des.* **2014**, 14 (2), 617. DOI: <https://doi.org/10.1021/cg401491y>
- [17] J. Micovic, K. Werth, P. Lutze, *Chem. Eng. Res. Des.* **2014**, 92 (11), 2131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.02.012>
- [18] K. Werth et al., *Comput.-Aided Chem. Eng.* **2015**, 37, 1277. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63577-8.50058-9>
- [19] L. S. White, *J. Membr. Sci.* **2006**, 286 (1–2), 26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.09.006>
- [20] B. van der Bruggen, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2013**, 52 (31), 10335. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie302880a>
- [21] G. Szekely et al., *Green Chem.* **2014**, 16 (10), 4440. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4GC00701H>
- [22] J. Geens et al., *Sep. Sci. Technol.* **2007**, 42 (11), 2435. DOI: <https://doi.org/10.1080/01496390701477063>
- [23] D. Peshev et al., *Chem. Eng. Res. Des.* **2011**, 89 (3), 318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.07.002>
- [24] D. Nair et al., *Tetrahedron Lett.* **2001**, 42 (46), 8219. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-4039\(01\)01734-8](https://doi.org/10.1016/S0040-4039(01)01734-8)
- [25] D. Nair et al., *Desalination* **2002**, 147 (1–3), 301. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00556-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00556-8)
- [26] M. Priske et al., *J. Membr. Sci.* **2010**, 360 (1–2), 77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.05.002>
- [27] J. M. Dreimann et al., *ChemCatChem* **2016**, 8 (21), 3330. DOI: <https://doi.org/10.1002/cctc.201601018>
- [28] L. S. White, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2006**, 45 (26), 9136. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie060450l>
- [29] E. M. Rundquist et al., *Green Chem.* **2012**, 14 (8), 2197.

- [30] K. Werth et al., *J. Membr. Sci.* **2017**, 528, 369–380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.01.021>
- [31] D. Zedel, M. Kraume, A. Drews, *J. Membr. Sci.* **2017**, 544, 323–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.09.041>
- [32] S. Han et al., *Chem. Eng. Res. Des.* **2005**, 83 (3), 309. DOI: <https://doi.org/10.1205/cherd.04247>
- [33] A. Cano-Odena et al., *Chemistry* **2010**, 16 (3), 1061. DOI: <https://doi.org/10.1002/chem.200901659>
- [34] G. Székely et al., *J. Membr. Sci.* **2011**, 381 (1–2), 21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.07.007>
- [35] A. R. S. Teixeira et al., *Sep. Purif. Technol.* **2014**, 135, 243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.007>
- [36] A. Livingston et al., *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2003**, 984, 123. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2003.tb05996.x>
- [37] J. C.-T. Lin et al., *Chem. Eng. Sci.* **2007**, 62 (10), 2728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.004>
- [38] R. M. Gould et al., *Environ. Prog.* **2001**, 20 (1), 12. DOI: <https://doi.org/10.1002/ep.670200110>
- [39] *Membranes Market by Type, by Technology, by Region, and by Application – Global Forecast to 2020*, Report Code: CH 2635, MarketsandMarkets, Northbrook, IL **2015**.
- [40] *Global Water Market 2017*, Global Water Intelligence, Oxford **2016**.
- [41] *Verbundvorhaben: Organophile Nanofiltration für energieeffiziente Prozesse (OPHINA)*, Bericht, BMWi, Berlin **2013**.
- [42] *Organophile Nanofiltration für die nachhaltige Produktion in der Industrie*, Bericht, FKZ: 01 RI 05110, BMBF, Bonn **2009**. DOI: <https://doi.org/10.2314/GBV:659044595>
- [43] *Energieeffiziente Stofftrennung in der chemischen und pharmazeutischen Industrie durch Membranverfahren (ESIMEM)*, Bericht, FKZ: 03ET1279A, BMWi, Berlin **2019**. DOI: <https://doi.org/10.2314/KXP:1671691857>
- [44] M. Sterner, I. Stadler, *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*, 2nd ed., Springer, Berlin **2017**.
- [45] D. Oertel, *Energiespeicher – Stand und Perspektiven: Bericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“*, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin **2008**. www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf
- [46] K. Ghaib, *Chem. Ing. Tech.* **2017**, 89 (9), 1115. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201600094>
- [47] H. Mehling, L. F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM, Heat and Mass Transfer*, Springer, Berlin **2008**.
- [48] A. Felix Regin, S. C. Solanki, J. S. Saini, *Renewable Energy* **2009**, 34 (7), 1765. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.012>
- [49] Y. Rao et al., *Heat Mass Transfer* **2007**, 44 (2), 175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0232-0>
- [50] S. Jegadheeswaran, S. D. Pohekar, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2009**, 13 (9), 2225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.024>
- [51] J.-L. Song et al., *New Carbon Materials* **2012**, 27 (1), 27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(12\)60002-X](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(12)60002-X)
- [52] W. Q. Li et al., *Energy* **2013**, 55, 846. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.064>
- [53] H. Tian et al., *Appl. Energy* **2015**, 148, 87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.020>
- [54] X. Xiao et al., *Energy Convers. Manage.* **2013**, 73, 86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.007>
- [55] R. Velraj et al., *Sol. Energy* **1999**, 65 (3), 171. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00128-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00128-5)
- [56] F. P. Incropera, *Introduction to Heat Transfer*, 5th ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ **2007**.
- [57] A. Seitz et al., *Technologiebericht 3.3b Energiespeicher (thermisch, thermo-chemisch und mechanisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende*, Wuppertal Institut, Wuppertal **2018**.
- [58] R. Tamme et al., *Speicherung für Hochtemperaturwärme, FVEE Themenheft* **2005**, 126. www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2005/th2005_06_02.pdf
- [59] A. Waqas, Z. Ud Din, *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2013**, 18, 607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.034>
- [60] *Projekt „DuoTherm“: Wärmespeicher-Konzept erhöht die Reichweite von Elektrofahrzeugen im Winter*, DLR, Köln **2017**. www.dlr.de/content/de/artikel/news/2017/20171019_waermespeicher-konzept-erhoeht-die-reichweite-von-elektrofahrzeugen-im-winter_24651#/gallery/28836%202017
- [61] a) *IREES-Workshop Thermische Speicher*, online, April **2020**;
b) Expertengespräch mit T. Seidel, Fraunhofer IFAM, 09.04.2020.
- [62] Expertengespräch mit Dr. S. Hilber, ZAE Bayern, 06.03.2020.
- [63] A. Wörner et al., *Thermische Energiespeicher als sektorenübergreifende Querschnittstechnologie*, in *Forschung für die Wärmeenergie: Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2015*, ForschungsVerbund Erneuerbare Energien, Berlin **2016**.
- [64] *Technologien der Abwärmenutzung*, 2nd ed., Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH, Dresden **2016**.
- [65] *Energie in Zahlen: Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen*, AGE, Berlin **2019**.
- [66] C. Rathgeber, *Wirtschaftlichkeit Thermischer Energiespeicher*, 5. Fachforum *Thermische Energiespeicher*, Neumarkt in der Oberpfalz, Juni **2016**.
- [67] *VDI-Statusreport Energiespeicher*, VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt, Düsseldorf **2017**.
- [68] S. Lassacher, *Technische Aspekte der Forcierung von Primärenergieeffizienz an oberösterreichischen Produktionsstandorten durch Nutzung von Wärmespeichern*, Johannes Kepler Universität Linz, Linz **2018**.
- [69] A. Hauer, S. Hiebler, M. Reuß, *Wärmespeicher*, 5th ed., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart **2013**.
- [70] U. Schmoch, *Bibliometrische Analyse (World Patent Index WPI & Scopus) für LHS vom FH ISI im Auftrag von IREES*, Karlsruhe **2020**.
- [71] P. Silva et al., *J. Membr. Sci.* **2005**, 262 (1–2), 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.03.052>
- [72] S. Darvishmanesh et al., *Chem. Eng. Sci.* **2009**, 64 (17), 3914. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.05.032>
- [73] S. Darvishmanesh et al., *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, 49 (19), 9330. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie101050k>
- [74] P. Schmidt et al., *J. Membr. Sci.* **2013**, 429, 103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.11.031>
- [75] L. Hesse et al., *J. Membr. Sci.* **2013**, 428, 554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.10.052>
- [76] F. P. Cuperus, *Chem. Ing. Tech.* **2005**, 77 (8), 1000. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200590068>
- [77] B. van der Bruggen et al., *J. Phys. Chem. B* **2006**, 110 (28), 13799. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp0608933>
- [78] L. G. Peeva, M. Sairam, A. G. Livingston, in *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Elsevier, Oxford **2010**.
- [79] J. Geens et al., *J. Membr. Sci.* **2006**, 281 (1–2), 139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.03.028>
- [80] P. Vandezande et al., *Chem. Soc. Rev.* **2008**, 37 (2), 365. DOI: <https://doi.org/10.1039/b610848m>
- [81] U. Schmoch, *Bericht zur Patentanalyse „Organophile Nanofiltration (OSN)“ in der Datenbank „World Patent Index (WPI)“*, Karlsruhe **2019**.
- [82] J. L. Humphrey, A. F. Seibert, *Chem. Eng. Prog.* **1992**, 88 (3), 32.
- [83] W.-D. Steinmann et al., *EVA – Thermische Energiespeicher zur Verstromung diskontinuierlicher Abwärme*, Bericht, FKZ:

BWE27006/BWE27007, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Stuttgart 2010.

- [84] M. Papapetrou et al., *Appl. Therm. Eng.* **2018**, 138, 207.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043>
- [85] M. Pehnt et al., *Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung*,

Bericht, FKZ 03KSW016A und B, Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 2010.

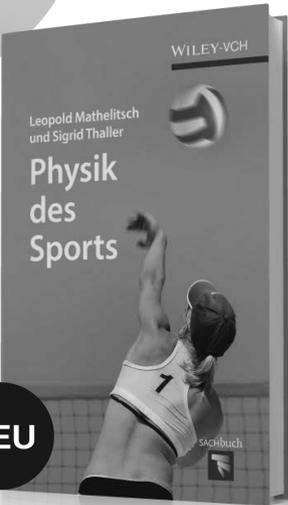
- [86] *Energiespeichertechnologien am Markt*, Bundesverband Energiespeicher (BVES), Berlin 2021. www.bves.de/technologien-final/
- [87] Expertengespräch mit Dr. Dan Bauer, DLR, 26.02.2020.



Neugierig?



Erlebnis Wissenschaft



NEU

LEOPOLD MATHELITSCHE
und SIGRID THALLER
Physik des Sports
ISBN: 978-3-527-41304-1
September 2015 168 S. mit 100 Abb.
Gebunden € 24,90

Kenntnisse aus Physik und Sport haben zwar auf den ersten Blick nicht viel gemeinsam, sind aber bei genauerer Betrachtung untrennbar. Für das Verständnis von sportlichen Bewegungen braucht man Wissen aus der Physik!
In diesem Buch werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten offenbart, die über Erfolg oder Misserfolg entscheiden.
Folgende Sportarten werden behandelt: Fußball, Tennis, Golf, Volleyball, Baseball, Geräteturnen, Schwimmen, Tauchen, Skifahren, Skispringen, Eishockey, Kampfsport und Reiten.



Auch als
E-Books unter:
www.wiley-vch.de/ebooks/

www.wiley-vch.de/sachbuch

Irrtum und Preisänderungen vorbehalten. Stand der Daten: August 2015.

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61 • D-69451 Weinheim
Tel. +49 (0)6201-606400 • e-mail: service@wiley-vch.de

WILEY-VCH