

Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 8

Technologische Trends und Entwicklungen bei alternativen Energiesystemen



M.Sc. Stefanie Hoffmann
B.Eng. Kevin Thomas
Univ.-Prof. Ing. Mag. Dr. Herwig Winkler



Cottbus, September 2023

Impressum

Hoffmann, Stefanie / Thomas, Kevin / Winkler, Herwig: Technologische Trends und Entwicklungen bei alternativen Energiesystemen

Schriftenreihe: Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 8

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
IKMZ – Universitätsbibliothek

Cottbus, 15. September 2023

DOI: <https://doi.org/10.26127/BTUOpen-6484>

Die vorliegende Studie entstand im Rahmen des Forschungsprojekts SpreeTec neXt, einem der größten Strukturwandelprojekte an der BTU. Das Forschungsprojekt **SpreeTec neXt** nimmt die Themenbereiche **Energiewende und Dekarbonisierung** in den Fokus. Ziel ist die Entwicklung **neuer Fertigungstechnologien** für hocheffiziente Komponenten und Systeme der zukünftigen Energietechnik in Kooperation mit der Industrie in der Lausitz. Es wird eine Plattform zur Herstellung dieser Komponenten und Anlagen angestrebt, die optimierte Bauweisen, Werkstoffsysteme und digitalisierte Produktionstechniken integriert. Der Fokus liegt auf der ressourceneffizienten Entwicklung von Komponenten, insbesondere lokalen Energieerzeugern und -speichern, wasserstoffbasierten Turbinen und Brennstoffzellen sowie hybriden Photovoltaik- und Solarthermie-Systemen. Das Projekt betrachtet sowohl reale als auch virtuelle Technologieketten und legt Wert auf ein nachhaltiges Life-Cycle-Assessment. Teilnehmer des Projektes sind neben der **BTU Cottbus-Senftenberg** das **Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS**, das sich auf metallbasierte Systeme mit photonischen Technologien fokussiert sowie das **Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP** mit dem Fokus auf die Entwicklung von Leichtbaustrukturen und Recyclingverfahren. Des Weiteren umfasst das Projekt mehr als 70 assoziierte Partnerunternehmen aus der Industrie.



Im Rahmen des Projektes SpreeTec neXt bearbeitet der **Lehrstuhl für Produktionswirtschaft** verschiedene Arbeitspakete. Der vorliegende Studienbericht ist Teil des ersten Arbeitspaketes „**Studien zur geplanten Technologieentwicklung**“. Ziel des Arbeitspaketes ist es den Status quo und die Einsatzbedingungen aktueller dezentraler, „grüner“ Energiesysteme zu erfassen, zukünftige Rahmenbedingungen und Trends zu analysieren und Anforderungen an die Komponenten-, Produkt- und Prozessentwicklung zu identifizieren. Um diese Ziele zu erreichen, werden verschiedene **Forschungsmethoden** angewendet. Dieser Bericht beschreibt die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse von durchgeführten **Experteninterviews**.



Viele Unternehmen sind aktuell im krisenhaften Umfeld von beträchtlichen Problemen betroffen. Zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit und Profitabilität ist u.a. eine ständige Weiterentwicklung der technologischen Basis unter Klima- und Umweltgesichtspunkten zwingend notwendig. Produkt- und Serviceinnovationen, angestrebte Effizienzsteigerung, Kostenreduktionen und die Steigerung der Versorgungssicherheit erfordern den zunehmenden Einsatz „grüner“ Technologien. Die Optimierung technischer Systeme und Komponenten der erneuerbaren Energien ist ein Schlüsselfaktor, um die Herausforderungen im Zusammenhang mit Klimawandel, Ressourcenknappheit und Energiesicherheit anzugehen und eine nachhaltigere Energiezukunft zu gestalten. Gleichzeitig werden durch Emissionsminderung sowie nachhaltigere Materialien und Fertigungstechnologien wichtige Schritte hin zur Klimaneutralität realisiert, die zahlreiche Chancen für Unternehmen eröffnen.

Angesichts der Dringlichkeit dieses Themas lässt sich innerhalb dieses Forschungsbereichs bereits eine umfangreiche Anzahl an Studien identifizieren. Diese fokussieren beispielsweise auf zukünftigen Ausbauszenarien, die Zusammensetzung der erneuerbaren Energien am Energiemarkt sowie Nutzungspotenziale. Auch im technologisch orientierten Forschungsfeld gibt es zahlreiche Studien, die sich auf die Verbesserung der Systeme durch Material- und fertigungstechnische Forschungsansätze konzentrieren.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie erlauben einen holistischen Blick auf Entwicklungspotenziale von erneuerbaren Energien und dessen Komponenten und Systeme. Sie stellen u.E. ein Bindeglied zwischen der makroskopischen Sicht vieler Trendstudien der regenerativen Energien und den mikroskopischen technologiefokussierenden Studien dar. Durch die Identifikation aktueller Einsatzbedingungen und zukünftiger Nutzungstrends lassen sich wirtschaftliche, materialspezifische und fertigungstechnische Entwicklungspotenziale ableiten. Die Basis dieser Studie bilden 54 leitfadengestützte Experteninterviews, die durch Ergebnisse der Sekundärforschung ergänzt wurden.

Wir bedanken uns herzlich für die Teilnahme der Experten und Expertinnen und hoffen, dass unsere Arbeit bei der Leserschaft auf hohes Interesse stößt. Für einen vertiefenden Dialog stehen wir gern zur Verfügung.

Univ.-Prof. Ing. Mag. Dr. Herwig Winkler
M.Sc. Stefanie Hoffmann
B.Eng. Kevin Thomas

Lehrstuhlinhaber:



Univ.-Prof. Ing. Mag. Dr.
Herwig Winkler

✉ Winkler@b-tu.de
☎ +49 (0) 355 69 4120

Projektansprechpartner/-in:



Wissenschaftliche Mitarbeiterin
M. Sc. Stefanie Hoffmann

✉ Stefanie.Hoffmann@b-tu.de
☎ +49 (0) 355 69 4123




Wissenschaftlicher Mitarbeiter
B. Eng. Kevin Thomas


✉ Kevin.Thomas@b-tu.de
☎ +49 (0) 355 69 4081


Besucheranschrift:


📍 BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl für Produktionswirtschaft
Forschungszentrum 3H
Konrad-Wachsmann-Allee 13
03046 Cottbus


☎ +49 (0)355 69-4089
Fax +49 (0)355 69-4091
🌐 www.b-tu.de/fg-produktionswirtschaft


 Dipl. Wirtsch.-Ing Uwe Ahrens
Altech Advanced Materials AG


 Matthias Rudloff
AMBARtec AG

 Bastian Olzem
BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.

 Prof. Dr. Christian Abendroth
Prof. Dr.-Ing. Heinz Peter Berg
M. Sc. Lucien Genge
Dr. Christin Hoffmann
Prof. Dr.-Ing. Georg Möhlenkamp
Prof. Dr.-Ing. Klaus Pfeiffer
Prof. Dr. rer. nat. Mario Ragwitz
Univ.-Prof. Dr. Lars Röntzsch
Prof. Dr.-Ing. Harald Schwarz
Prof. Dr. Klaus-Peter Stahmann
Prof. Dr. rer. pol. Stefan Zundel
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg

 Wolfram Axthelm
BWE Bundesverband WindEnergie e.V.

 Dr.-Ing. Artur Napierala
CEBra Centrum für Energietechnologie
Energietechnologie Brandenburg e.V.

 Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer
Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

 DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

 DMT GmbH & Co. KG

 Michael Rusch
Jens Krause
Durch2atmen

 Dr. Thomas Roszner
Energiequelle GmbH

 Dr.-Ing. Frances Zedler
Energy Saxony e.V.

 Johannes Mundstock
Euro-K GmbH

 Horst Seide
Fachverband Biogas e.V.

 Uwe Welteke-Fabricius
Flexperten

 Dr. Ulrike Junghans
Fraunhofer CBP

 Dr.-Ing. Andreas Gericke
Fraunhofer IGP

 Dr. Klemens Ilse
Fraunhofer IMWS

 Martin Aretz
Fraunhofer IPT

	<u>Stefan Gräfe</u> Fraunhofer IPT
	<u>Björn Nienborg</u> Fraunhofer ISE
	<u>Dr. Thomas Schmaltz</u> Fraunhofer ISI
	<u>Dr. Christoph Bleicher</u> Fraunhofer LBF
	<u>Dr.-Ing. Ulrike Ehrenstein</u> Fraunhofer UMSICHT
	<u>Dr. Michael Andres</u> Fraunhofer-Zentrum Digitale Energie
	<u>Dr.-Ing. Rolf Albus</u> Gas und Wärme Institut Essen e.V.
	<u>Wolfgang Geisinger</u> Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG
	<u>René Markgraf</u> IBAR Systemtechnik GmbH
	<u>Thomas Reich</u> LEAG - Lausitz Energie Bergbau AG
	<u>Harald Altmann</u> LEAG Energy Cubes
	<u>Jimmie Langham</u> cruh21 GmbH

	<u>Dirk Hünlich</u> MITNETZ Gas
	<u>Hans Jürgen Kagerer</u> PCM Energy GmbH
	<u>Dr. Harry Lehmann</u> PtX Lab Lausitz - Cottbus
	<u>Dr. Ben Schüppel</u> Referenzkraftwerk Lausitz GmbH
	<u>Dr. rer. nat. Sebastian Bold</u> RWTH Aachen Universität PEM - HylInnoCells
	<u>Sylwia Bialek, Ph.D.</u> Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung
	<u>Lars Fallant</u> TRICERA energy GmbH
	<u>Daniel Peters</u> UKA Umweltgerechte Kraftanlagen GmbH & Co KG
	<u>Dr. Franziska Müller</u> Universität Hamburg
	<u>Matthias Zelinger</u> <u>Dr. Jutta Trube</u> VDMA e.V.
	<u>Peter Meyer</u> Zukunft Gas GmbH

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
1. Begrifflichkeiten im Zusammenhang des Studienreports	16
2. Motivation und Stand der Forschung	19
3. Ziele der Studie	20
II. Design der vorliegenden Studie	21
1. Wissenschaftliche Konzeption der Studie	22
2. Aufbau der Interviews	23
3. Durchführung der Datenerhebung	24
4. Aufbereitung und Auswertung der erhobenen Daten	25
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
1. Einladung zur Studienteilnahme und Rückläuferquoten	27
2. Tätigkeitsfelder und Fachgebiete der Studienteilnehmer	28
IV. Ergebnisse der Studie	29
1. Ebene 0 – Erneuerbare Energie	31
a) Status quo der regenerativen Energien in Deutschland	32
b) Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung	33
i. Politische Einflussfaktoren	33
ii. Ökonomische Einflussfaktoren	34
iii. Gesellschaftliche Einflussfaktoren	35
c) Zukünftige Bedarfs- und Nutzungstrends	37
d) Entwicklungspotenziale und –grenzen	39

2. Ebene 1 – Primärenergiequellen	46
a) Biomasse	47
i. Status quo der Nutzung von Biomasse	48
ii. Relevante technische Systeme zur Nutzbarmachung von Biomasse	50
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	51
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends von Biomasse	54
b) Geothermie	56
i. Status quo der Nutzung von Geothermie	57
ii. Relevante technische Systeme zur Nutzbarmachung von Erdwärme	60
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	61
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends der Geothermie	64
c) Solarenergie	65
i. Status quo der Nutzung von Solarenergie	66
ii. Relevante technische Systeme zur Nutzbarmachung von Solarenergie	68
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	69
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends im Bereich der Solarenergie	71
d) Windenergie	72
i. Status quo der Nutzung von Windenergie	73
ii. Relevante technische Systeme zur Nutzbarmachung von Windenergie	75
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	76
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends im Bereich der Windenergie	79

3. Ebene 1 – Sekundärenergiequellen	80
a) „Grüner“ Wasserstoff	81
i. Status quo der Nutzung von Wasserstoff	82
ii. Relevante technische Systeme im Kontext der Wasserstoffnutzung	84
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	85
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends im Bereich Wasserstoff	88
b) E-Fuels (Synthetische Kraftstoffe)	91
i. Status quo der Nutzung von e-Fuels	92
ii. Relevante technische Systeme im Kontext der e-Fuel Nutzung	94
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	95
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends im Bereich e-Fuels	98
c) Biofuels	99
i. Status quo der Nutzung von Biofuels	100
ii. Relevante technische Systeme im Kontext der Biofuel Nutzung	102
iii. Politische, ökonomische, ökologische und gesellschaftliche Einflussfaktoren	103
iv. Zukünftige Nutzungs- und Entwicklungstrends im Bereich Biofuels	106

4. Ebene 2 und 3 – Energiesystem- und -komponentenebene	107
a) Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien	108
i. Biogasanlagen	109
ii. Elektrolyseure	110
iii. PV-Module	115
iv. Agri-PV	117
v. Floating-PV	118
b) Energiespeicher- und Transportsysteme	119
i. Batteriespeicher	120
ii. Wasserstoffdruckspeicher	123
iii. Wasserstoffflüssigspeicher	124
iv. Metallhybridspeicher für Wasserstoff	125
v. Latent-Wärmespeicher	126
vi. Pipelines	127
c) Energiewandlungssysteme für Nutzenergie	129
i. Brennstoffzelle	130
ii. CO ₂ -Abscheider	134
iii. BHKW mit extern befeuerter Mikrogasturbine	135
iv. Gasturbine mit Wasserstoffbrennkammer	136
v. Wärmepumpen	137
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

CapEx	Capital Expenditures
BHKW	Blockheizkraftwerk
DE	Deutschland
eE	erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
GEG	Gebäudeenergiengesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquid
PtX	Power-to-X
OpEx	Operational Expenditures
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VNB	Verteilnetzbetreiber

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

- Im Zeitraum von Februar bis Mai 2023 wurde am Lehrstuhl für Produktionswirtschaft die Studie mit dem Titel „**Technologische Trends und Entwicklungen bei alternativen Energiesystemen**“ durchgeführt. Es wurden dazu **Interviews mit 54 Experten und Expertinnen** aus Forschungsinstituten, der Wirtschaft und Branchenverbänden durchgeführt und ausgewertet. Die vorliegende Studie ist explorativ, weshalb die Interviews leitfadengestützt durchgeführt wurden. Die Auswertung der Interviews folgte dem Prinzip der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse.
- Für die allgemeine Entwicklung der erneuerbaren Energien ist es notwendig, dass das **energiewirtschaftliche Zieldreieck** in Einklang gebracht wird, wobei nur Technologien, die wirtschaftlich rentabel, versorgungssicher und umweltverträglich sind, als zukunftsweisend betrachtet werden können. Die Experten und Expertinnen zeigen auf, dass die **politische Triebkraft** maßgeblich darüber entscheidet, welche Technologien in Zukunft dominieren werden. Zukünftig wird ein **komplementärer Einsatz** der einzelnen Energiequellen mit **regional diversifizierten Konzepten** stattfinden sowie die **Elektrifizierung und Kopplung von Sektoren** weiter vorangetrieben. **Speichertechnologien** werden verstärkt entwickelt und installiert werden. **Prosuming** und **Demand-Side Response** werden von den befragten Experten und Expertinnen zukünftig als bedeutend erachtet.
- In Bezug auf die einzelnen Energiequellen zeigt sich, dass **Wasserstofftechnologien** zukünftig ein erhebliches Ausbaupotenzial aufweisen, da Wasserstoff zur Dekarbonisierung vieler Sektoren beitragen und als **Speichermedium** dienen kann. Gleichzeitig wird die Entwicklung von Wind- und Solarenergie weiter vorangetrieben. Im Bereich der Photovoltaik gewinnen Technologien wie Agri- und Floating-PV an Bedeutung. Die Windkraftnutzung wird zukünftig durch den Bau höherer Türme und die Verwendung größerer Rotorblätter optimiert. Geothermie könnte in Zukunft eine bedeutende Rolle bei der Dekarbonisierung des Niedertemperatursektors spielen. Das Potenzial für den Ausbau von Biomasse ist aufgrund von Flächenkonkurrenz begrenzt, obwohl es, ähnlich wie bei Wasserstoff, verschiedene Nutzungsmöglichkeiten bietet.
- Im Bereich der Energiesysteme und -komponenten sind vielfältige Möglichkeiten zur Verbesserung sowohl in Bezug auf Materialien als auch auf Fertigungstechniken erkennbar. Einige Technologien sind bereits ausgereift und erfordern lediglich Optimierungen, beispielsweise zur Steigerung der Lebensdauer. Dies ist bei Rührern und Förderschnecken in **Biogasanlagen** sowie bei den Thermalpumpen der **Tiefengeothermie** der Fall. Andere Technologien, wie **Elektrolyseure** oder **Wärmepumpen**, müssen noch grundlegend weiterentwickelt werden, um einen effizienteren Betrieb zu ermöglichen. Im Bereich der Solarenergie liegt der Schwerpunkt auf der Weiterentwicklung von **Kombinationen von Solar- und Photovoltaikmodulen**. Des Weiteren besteht Bedarf an wirtschaftlicheren Trägerstrukturen für **Agri-PV** sowie an langlebigeren Konzepten für die Schwimmkörper bei **Floating PV-Anlagen** in Gewässern mit niedrigem pH-Wert. Schließlich zeigt sich auch im Bereich der Speichertechnologien ein erheblicher Entwicklungsbedarf, insbesondere in Bezug auf **Wasserstoffdruck- und -flüssigspeicher, Batteriespeicher** und **Latentwärmespeicher**. Diese Fortschritte werden entscheidend sein, um eine nachhaltige und effiziente Energiewirtschaft der Zukunft zu gewährleisten.

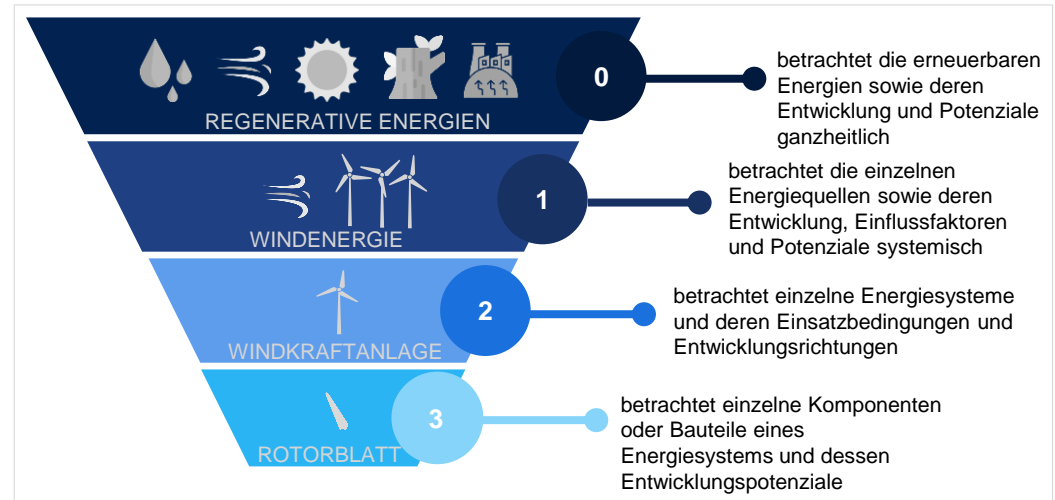
Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

Begrifflichkeiten im Zusammenhang des Studienreports (1/3)

- **Forschungsebenen in dieser Studie:** Bei der Entwicklung des Studiendesigns haben sich vier Betrachtungsebenen etabliert, auf denen sowohl der Aufbau der Expertenbefragung als auch die Auswertungsstruktur des Reports aufbauen. Die vier Ebenen umfassen:

- Ebene 0 - Ebene der erneuerbaren Energien
- Ebene 1 - Energiequellenebene
- Ebene 2 - Energiesystemebene
- Ebene 3 - Komponenten- & Bauteilebene.

In der Abbildung rechts sind die Ebenen anhand eines Beispiels verdeutlicht.



- **Erneuerbare/Regenerative Energien:** Im Rahmen dieses Berichts werden nur die Energien als erneuerbar oder „grün“ bezeichnet, die sich in einem absehbaren Zeitraum selbstständig regenerieren. Darunter fallen speziell Solarenergie, Windenergie, Biomasse, Geothermie und Wasserkraft.
- **Energiequelle:** Als Energiequelle bezeichnen die Autoren die Form in der erneuerbare Energien auftreten. Darunter fallen die oben genannten erneuerbaren Primärenergien.
- **Energiesystem:** Das Energiesystem bezeichnet eine konkrete Technologie, mit der z.B. die Primärenergie in Nutzenergie umgewandelt werden kann. Auch Speichertechnologien oder andere Technologien zur Wandlung von Energieträgern werden als Energiesystem bezeichnet.
- **Komponenten- und Bauteile:** Sind Teile oder Teilsysteme innerhalb eines zu betrachtenden Energiesystems.

Begrifflichkeiten im Zusammenhang des Studienreports (2/3)

- **Bio-Fuels** (Biokraftstoffe) sind flüssige oder gasförmige erneuerbare Energieträger, gewonnen aus pflanzlicher oder gelegentlich tierischer Biomasse. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (2014), S. 4-5)
- **Carbon Border Adjustment Mechanism** ist ein Regulierungsinstrument der EU, der im Ausland produzierte, kohlenstoffintensive Güter besteuert, um die „saubere“ Industrieproduktion in Nicht-EU Ländern zu fördern. (European Commission (2023))
- **Carbon Capture** bezeichnet den Prozess der Erfassung von Kohlenstoff, vorzugsweise in Form von CO₂ oder CO, wobei der Kohlenstoff gespeichert (Carbon Capture and Storage) und einem weiteren Nutzungszyklus zugeführt werden kann (Carbon Capture and Utilization). (Purr/Garvens (2021), S.11)
- **E-Fuels** sind strombasierte synthetische Kraftstoffe, auch bekannt als Synfuels. Sie werden unter Verwendung von Strom aus Windkraft oder Photovoltaik als Energiequelle hergestellt. (Ragwitz/Weidlich et al. (2023), S. 11)
- **Grüner Wasserstoff** wird mittels Elektrolyse aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt. In dieser Prozessvariante wird Wasser in einem Elektrolyseur in Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O) aufgespalten. **Blauer Wasserstoff** wird hingegen durch Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen. Das dabei entstehende CO₂ wird direkt in die Atmosphäre abgegeben. **Türkiser Wasserstoff** entsteht durch die Methanpyrolyse von Erdgas in einem Hochtemperaturreaktor. Im Gegensatz zur Dampfreformierung entsteht hierbei kein CO₂, sondern fester Kohlenstoff (Grafit) als Nebenprodukt. **Grauer Wasserstoff** bezeichnet zusammenfassend die Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen wie Erdgas. (Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (DIHK) (2020), S. 5-7)
- **Installierte Leistung** ist die im Maximalfall verfügbare Leistung einer Energieerzeugungsanlage. **Gesicherte Leistung** hingegen ist die zum Zeitpunkt der Jahreshöchstlast mit der geforderten Versorgungssicherheit garantierte installierte Leistung. (Jarass et al. (1980), S. 94)
- Die **Merit-Order** bezieht sich auf die „Reihenfolge der Vorteilhaftigkeit“ und wird in der Ökonomie genutzt, um den Prozess der Preisfindung und Partnerauswahl auf Strombörsen zu beschreiben. Etwa 20 % der verfügbaren Strommenge werden an der Strombörse gehandelt, um kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Die Merit-Order beeinflusst indirekt die Endverbraucherpreise. (WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft (2022), S. 4)
- **Power-to-X** bezeichnet die Umwandlung von überschüssigem Ökostrom aus Windkraftanlagen, Solarparks usw. in andere Energieträger. (Sharifi et al. (2023)) In diesem Bericht sind vor allem die drei Formen **Power-to-Gas** - also die Umwandlung von Strom in gasförmige Energieträger, **Power-to-Liquid** – die Umwandlung von Strom in flüssige Energieträger, **Power-to-Heat** – die Umwandlung von Strom in Wärme relevant.

Begrifflichkeiten im Zusammenhang des Studienreports (3/3)

- **Primär-, Sekundär- und Nutzenergie** umfasst drei Abstufungen von Energieformen, die durch Umwandlung ineinander übergehen. Bei Primärenergie handelt es sich um Energieträger in ihrer natürlich vorkommenden Form. Diese Energieträger wurden noch nicht behandelt. Dazu zählen zum Beispiel Erdgas und Braunkohle, aber auch Wind- und Wasserkraft. Die durch Umwandlungs- und Verteilungsverluste reduzierte Sekundärenergie wird durch Umwandlungsprozesse aus der Primärenergie gewonnen. Beispiele hierfür sind Elektrizität, Wärme, Kraft- und Brennstoffe. Die Nutzenergie ist die Energie, die nach weiterer Umwandlung dem Verbrauchenden zur Verfügung steht und durch Verluste beim Verbrauchenden weiter reduziert ist. Hierzu zählen Industrie, Haushalte, Verkehr und Handel. (Kaltschmitt et al. (2020), S. 5 ff.)
- **Regelenergie** agiert als kurzfristige Anpassungsmethode der Stromerzeugung oder –nachfrage, um die Nennfrequenz im Stromnetz aufrechtzuerhalten und Frequenzabweichungen zu begrenzen. Eine schnelle Aktivierung dieser Energien ist essentiell. Regelenergie ist unterteilt in die Primär-, Sekundär- und Minutenreserveleistung. (Gawlik et al. (2018), S. 507)
- **Sektorenkopplung** bezeichnet den Ersatz fossiler Energieträger durch erneuerbaren Strom oder nachhaltige Energieformen in verschiedenen Bereichen wie Wärme, Verkehr und Industrie. Dies geschieht durch direkte Stromnutzung, Power-to-X-Umwandlung und verbesserte sektorübergreifende Vernetzung. (Wietschel et al. (2018), S.13)
- **Übertragungsnetzbetreiber** stellen die zentrale Infrastruktur für den großräumigen und überregionalen Transport im Höchstspannungsbereich von elektrischer Energie bereit. Sie gewährleisten die Systembilanz und erbringen Systemdienstleistungen, wodurch sie das Rückgrat der elektrischen Energieversorgung bilden. (Schäfer (2022), S. IX-X)
- **Verteilnetzbetreiber** sind für die regionale und örtliche Verteilung elektrischer Energie an Endverbraucher verantwortlich. Sie betreiben Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze. Diese Netze sind dafür zuständig, die Energie von den höheren zu den niedrigeren Spannungsebenen zu verteilen, wobei zunehmend auch Erzeugungsanlagen in den unteren Ebenen installiert werden und Energierückflüsse auftreten. (Schäfer (2022), S. 34-35)

Stand der Forschung

Sowohl Branchenverbände als auch Forschungsinstitute haben bereits verschiedene Metatrend- und Szenariostudien bezüglich des Ausbaus und der Nutzung der erneuerbaren Energien veröffentlicht. Auch die Bundesministerien veröffentlichen regelmäßig Strategiepapiere zu Zielen und zukünftigen Maßnahmen der Energie- und Klimawirtschaft. In der folgenden Tabelle ist eine Auswahl relevanter Veröffentlichungen zu finden:

Auftraggeber/Herausgeber	Titel	Jahr
Bundesverband deutscher Industrie e.V.	Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft	2021
Bundesverband Geothermie	Klimaneutrale Wärme aus Geothermie 2030 / 2050	2021
Consentec / Fraunhofer ISI	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland	2021
Deutsche Energie-Agentur / ewi Energy Research / Scenarios gGmbH	dena-Leitstudie - Integrierte Energiewende	2018
Fraunhofer IEG	Roadmap Oberflächennahe Geothermie	2022
Fraunhofer ISE	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem - Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen	2020
Fraunhofer ISI / Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg	Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien	2022
Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina / Deutsche Akademie der Technikwissenschaften / Union der deutschen Akademien der Wissenschaften	Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland -Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement	2023
Prognos AG / Fraunhofer UMSICHT / Deutsches Biomasseforschungszentrum	Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende	2018
Wind Europe	Wind energy in Europe - 2021 Statistics and outlook for 2022-2026	2022
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	Die nationale Wasserstoffstrategie	2020
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Photovoltaik-Strategie - Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik	2023
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	Windenergie-an-Land-Strategie	2023
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg	Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg	2023

Durch die Befragung des interdisziplinären Expertenkreises konnten einige der in der Literatur bestehenden Szenarien validiert, aber auch kritisch hinterfragt sowie nicht betrachtete Potenziale identifiziert werden

Ziele der Studie

- Hauptziel der Studie ist es **zukünftige Einsatzbedingungen sowie technische und wirtschaftliche Anforderungen und Verbesserungspotenziale von Komponenten und Systemen**, die im Rahmen der Energiewende essentiell sein werden, zu identifizieren.
- Um eine systematische Vorgehensweise zur Erreichung des Studienziels zu gewährleisten werden Teilziele entwickelt. Der Aufbau der Teilziele folgt der Stoßrichtung vom Allgemeinen zum Speziellen. Zunächst wird ein holistischer Blick auf die Trends und zukünftigen Veränderungen im Bereich der erneuerbaren Energien geworfen. Zusätzlich werden Status quo, Potenziale und Einsatzbedingungen einzelner Energiequellen analysiert, wodurch sich feststellen lässt, welche Systeme und Komponenten zukünftig von besonderer Bedeutung für die Energiewende sein werden. All dies bildet die Grundlage, um letztendlich auf der Ebene von Komponenten und Bauteilen die Potenziale für zukünftige Entwicklungen zu erkennen und zu definieren.
- Im Speziellen lassen sich folgende Teilziele in den vier Betrachtungsebene identifizieren:

ZIELE		IDENTIFIKATION VON:
0	ERNEUERBARE ENERGIEN	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Entwicklungspotenzialen sowie Nutzungs- und Bedarfstrends von erneuerbaren Energien in Deutschland ❖ Ökonomischen, gesellschaftlichen und politischen Einflussfaktoren
1	ENERGIEQUELLEN-EBENE	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Aktuelle Einsatzbedingungen sowie Stärken und Schwächen ❖ Ökonomischen, gesellschaftlichen, politischen und ökologischen Einflussfaktoren ❖ Zukünftigen Einsatzbedingungen und Nutzungstrends
2	ENERGIESYSTEM EBENE	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Aktuellem Entwicklungsstand und Einsatzbedingungen ❖ Zukünftigen Nutzungsanforderungen und Einsatzbedingungen ❖ Technischen und wirtschaftlichen Verbesserungspotenzialen
3	KOMPONENTEN-/BAUTEILEBENE	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Wirtschaftlichen, materialspezifischen sowie fertigungstechnischen Entwicklungsanforderungen

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

Wissenschaftliche Konzeption der Studie

- Die Forschungsmethoden der empirischen Sozialforschung werden unterschieden in Methoden der **qualitativen Forschung**, die darauf abzielen ein tiefergehendes Verständnis des untersuchten Forschungsgebietes/-subjektes zu erlangen (*Wie*), und Methoden der quantitativen Forschung, bei denen Erhebungen auf standardisierte Weise durchgeführt werden, um diese in statistisch verarbeitbare Zahlen zu überführen (*Wieviel*). (Schirmer (2009), S. 66 ff.)
- Qualitative Forschung zeichnet sich durch eine erkundende und tiefe Betrachtungsweise in Themen aus. Sie setzt auf beobachtende und interpretative Methoden wie **Interviews**, Beobachtungen und Fokusgruppen. Sie ist besonders geeignet für Themen, bei denen ein tiefer Einblick und Verständnis für die Sichtweisen und Erfahrungen von Individuen oder Gruppen gewonnen werden soll. (Bakhtawar (2020)) Sie ist deshalb für Bearbeitung der vorliegenden Problemstellung besonders gut geeignet.
- Innerhalb der Qualitativen Forschung zeichnen sich verschiedene Studientypen ab. Deskriptive Studien dienen dabei der Feststellung von bestimmten Merkmalen oder Effekten in einer großen Grundgesamtheit. Explanative Studien hingegen finden Anwendung bei der Überprüfung aufgestellter Hypothesen und Theorien. **Explorative Studie** stellen wiederum offene Fragen, um Sachverhalte zu beleuchten und differenziert zu betrachten. (Döring (2023), S. 194) Somit eignet sich besonders die explorative Studie, um die zukünftigen Potenziale der eE und deren Systeme und Komponenten zu identifizieren und analysieren.
- Für die Datenerhebung wurde die Interviewmethode gewählt. Es gibt mehrere Ansätze zur Gestaltung von Interviews. Standardisierte Interviews sind durch eine strikte Adhärenz an den vorgegebenen Fragenkatalog charakterisiert, sowohl in Bezug auf die Frageformulierung als auch auf die Anordnung der Fragen. Im Gegensatz dazu zeichnen sich nicht standardisierte Interviews durch das Fehlen eines vordefinierten Fragebogens aus, die Gestaltung ist völlig frei. Ein weiterer Ansatz ist das **leitfadengestützte Interview**, welches eine teilstrukturierte Form aufweist. Hierbei kann die Formulierung, Reihenfolge und Quantität der Fragen zwischen den einzelnen Interviews variieren. (Stier (1999), S. 184 ff.) Letzterer bietet den optimalen Rahmen für die Experteninterviews dieser Studie.
- In dieser Studie werden **offene Fragen** verwendet, um einen tiefen und individuellen Einblick in die Sichtweisen und Erfahrungen der befragten Experten und Expertinnen zu erlangen. Der Interviewer/die Interviewerin kann auf die Antworten der Teilnehmenden situationsbedingt eingehen, was zu geringfügigen Unterschieden im Ablauf der einzelnen Interviews führt.

 **Die vorliegende Studie ist als explorative, leitfadengestützte Experteninterviews konzipiert.**

Aufbau der Interviews

- Die Umfrage beginnt mit einer Einführung, in der relevante Informationen an die befragte Person vermittelt werden. Damit soll den Teilnehmern noch vor Beginn der eigentlichen Umfrage kommuniziert werden, welches Ziel mit der Studie verfolgt wird, wer die Befragung durchführt und wie die Ergebnisse schlussendlich verwendet werden.
- Da sich die Studie hauptsächlich mit den Potenzialen der erneuerbaren Energieträger in Deutschland bzw. dem deutschsprachigen Raum (D-A-CH Region) beschäftigt, ist der Interviewleitfaden nur in **deutschsprachiger Ausführung** verfügbar.
- Die Interviews wurden so ausgearbeitet, dass sie **maximal 60 Minuten** in Anspruch nehmen. Durch die offenen Fragen wird die Länge der Interviews maßgeblich von der Länge der Antworten der Experten beeinflusst.
- Der Aufbau des Leitfadens orientiert sich an den vier Betrachtungsebenen. Je nach Antworten der Befragten konnten die Folgefragen vom Interviewer/von der Interviewerin bestimmt werden. Inhaltlich baute sich der Fragenkatalog nach folgenden Themenbereichen auf:

0 ERNEUERBARE ENERGIEN	1 ENERGIEQUELLENEBEN	2 ENERGIESYSTEMEBENE	3 KOMPONENTEN- & BAUTEILEBENE
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Zukünftige Entwicklung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarfe/Nachfrage ▪ Bereitstellung/Nutzung ❖ Trends <ul style="list-style-type: none"> ▪ Technologische Entwicklung ▪ Digitalisierung/KI ❖ Einflussfaktoren <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökonomisch ▪ Politisch ▪ Gesellschaftlich ❖ Grenzen der Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Status quo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Brancheneinsatz ▪ Technischer Ausschöpfungsgrad ▪ Vorteile ▪ Nachteile ❖ Einflussfaktoren <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ökonomisch ▪ Politisch/Rechtlich ▪ Gesellschaftlich/Sozial ▪ Ökologisch ❖ Zukünftige Einsatzbedingungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarf/Nutzung/Branche ▪ Herstellung/Gewinnung 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Status quo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Einsatzbedingungen ▪ Entwicklungsstand ▪ Nutzungsvoraussetzungen ❖ Einflussfaktoren ❖ Verbesserungspotenziale & Entwicklungsrichtungen ❖ Zukünftige Einsatzbedingungen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzungsanforderungen ▪ Brancheneinsatz ▪ Technische Spezifikationen 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Entwicklungsstand ❖ Verbesserungspotenziale <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wirtschaftlich ▪ Materialspezifisch ▪ Fertigungstechnisch ❖ Entwicklungsrichtungen

Durchführung der Datenerhebung

- Als potentielle Experten und Expertinnen wurden Forschende innerhalb der BTU sowie externer **Forschungsinstitute**, Geschäftsführende und Fachleute aus der **Wirtschaft** sowie Führungspersonen aus **Branchenverbänden** der erneuerbaren Energieträger-Branche angefragt.
- Bei der Recherche der Experten und Expertinnen wurde darauf geachtet, dass Fachleute sowohl aus den Bereichen der Ökonomie und Politikwissenschaften als auch aus den Ingenieurwissenschaften vertreten sind.
- Die Kontaktaufnahme erfolgte dabei auf 2 Wegen.
 1. Anschreiben **per E-Mail**.
 2. Kontaktaufnahme und Anschreiben über das **Business-Netzwerk XING**.
- Die Anfragen an die potentiellen Befragten wurden persönlich und zielgerichtet verschickt.
- Die Befragungen erfolgten im Zeitraum von **Februar bis Mai 2023**.
- Im Vorfeld wurde ein Pretest durchgeführt, welchem die Funktion der Prüfung auf Verständlichkeit der Fragen unterlag.
- Von den insgesamt **54 durchgeführten Interviews** wurden 49 Online über die Videokonferenzplattformen Webex oder Teams durchgeführt. Vier Interviews fanden bei einem persönlichen Treffen statt. Ein Interviewfragebogen wurde schriftlich beantwortet.
- Aufgrund des explorativen Studiendesigns wurden nur offene Fragen an die Experten und Expertinnen gestellt. Je nach Branchenwissen bzw. fachlicher Spezifikation wurden außerdem nur Fragen aus ausgewählte Betrachtungsebenen gestellt. Der Gesprächsverlauf divergiert somit teilweise stark zwischen den einzelnen Interviews.
- Alle geführten Gespräche wurden mit dem Einverständnis der Befragten aufgezeichnet, um eine vollständige Ergebnisdarstellung zu sichern.



Im Zeitraum von Februar bis Mai 2023 wurden 54 Experteninterviews mit Teilnehmenden aus Forschungsinstituten, der Wirtschaft und Branchenverbänden durchgeführt.

Aufbereitung und Auswertung der erhobenen Daten

- Zunächst wurden alle aufgezeichneten Interviews **transkribiert**, also verschriftlicht und **anonymisiert**. Vor Beginn der Transkription wurden Transkriptionsregeln festgelegt, die die Konsistenz der Transkription über die verschiedenen Interviews hinweg sicherstellt. Da der Fokus auf einer fachlichen Analyse der Aussagen liegt, ist ein einfaches Transkriptionssystem ausreichend. Es wurde wörtlich transkribiert. Nicht-verbale und emotionale Äußerungen wurden ausgeschlossen.
- Die Auswertung der Interviews erfolgte nach der **inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse** nach Udo Kuckartz, da sich das Ablaufmodell dieser Methode sehr gut auf das leitfadengestützte Interview anwenden lässt. Zuerst erfolgte dabei die Exploration der Daten sowie die deduktive Entwicklung eines Kategorien-/Codesystems anhand der gegebenen Problemstellung. Anschließend wurden relevante Passagen im Text identifiziert, paraphrasiert und den entsprechenden Codes zugeordnet. Falls Textpassagen zu keinen bestehenden Codes passten, wurden durch eine induktive Herangehensweise zusätzliche Codes erstellt. Im finalen Schritt erfolgte die Clusterung der herausgearbeiteten Inhalte und abschließend die Überführung in die Ergebnisdarstellung.
- Die Analyse der transkribierten Interviews erfolgte mit Hilfe des Programms **MAXQDA**. MAXQDA ist eine Software zur qualitativen Datenanalyse (Qualitative Data Analysis). Es handelt sich hierbei um ein Instrument, welches für die Transkription, Codierung, Kategorisierung und Analyse qualitativer Daten wie Interviews verwendet werden kann. (Rädiker/Kuckartz (2019), S. 2)
- Während der Auswertung der neuesten Interviews wurde bemerkt, dass nur noch wenige neue Aspekte zum Ausdruck gebracht wurden. Dies hat darauf hingewiesen, dass keine weiteren Gespräche mit Experten und Expertinnen notwendig sind. Es ist wichtig zu beachten, dass aufgrund der offen gestellten Fragen und der Vielfalt der Bereiche Fachleute geringfügige Abweichungen in den genannten Themenpunkten identifizierbar sind.

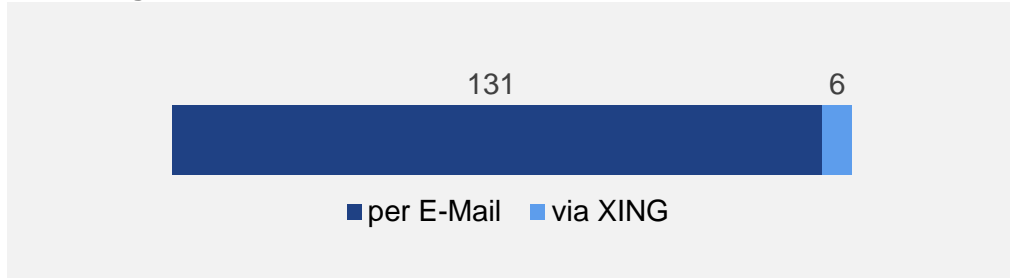


Nachdem die aufgezeichneten Interviews transkribiert worden sind, wurden sie mittels der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse mit Hilfe des Programms MAXQDA ausgewertet.

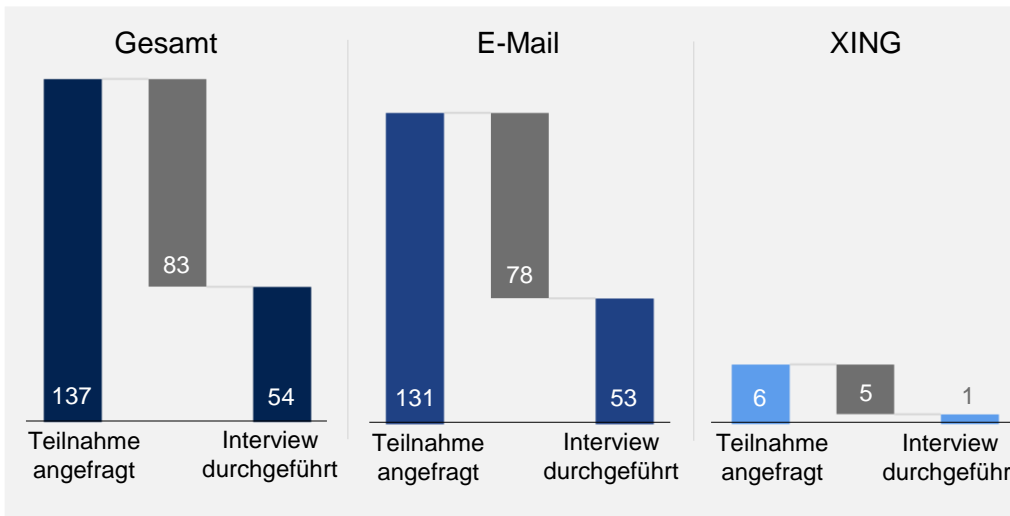
Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

ERGEBNIS

Einladungen



Rücklauf



AUSSAGEN

- 137 Personen wurden zur Studienteilnahme eingeladen, mittels
 - E-Mails (131)
 - persönlichen Nachrichten im Business-Netzwerk XING (6)
- 54 Personen haben sich für die Teilnahme an der Befragung bereit erklärt, 53 davon per Mail und 1 via XING.
- Daraus ergeben sich folgende Rücklaufquoten:
 - durchschnittlich: 39,4 %
 - per Mail angefragt: 40,5 %.
 - via XING angefragt: 16,7 %



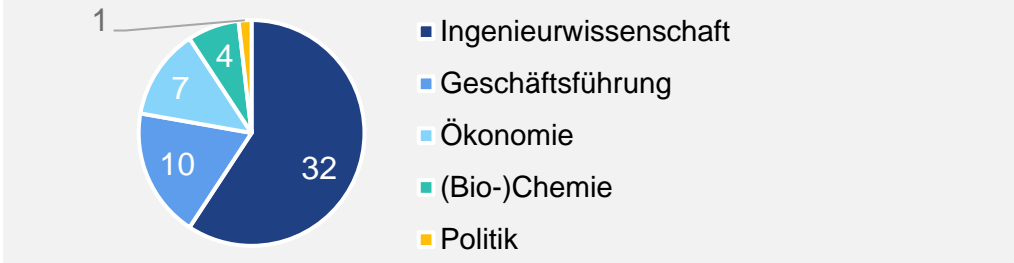
Tätigkeitsfelder und Fachgebiete der befragten Personen

ERGEBNIS

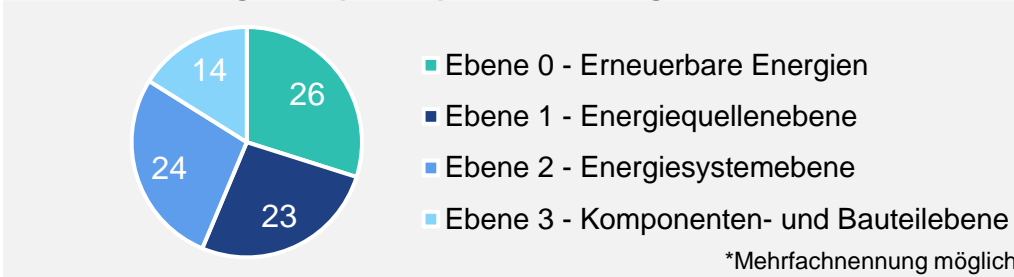
Anzahl der befragten Experten nach Tätigkeitsfeld Absolutwerte



Anzahl der befragten Experten nach Fachgebiet Absolutwerte



Anzahl der befragten Experten pro Betrachtungsebene* Absolutwerte



AUSSAGEN

- Die meisten befragten Experten und Expertinnen sind WissenschaftlerInnen, etwa 51,9%. 20,4% arbeiten in Branchenverbänden und 27,7% in Unternehmen.
- Hinsichtlich der Fachgebiete sind 59,3 % der Personen in Ingenieurwissenschaftlichen Bereichen tätig. Darunter fallen die Fachgebiete des Maschinenbaus, der Elektro- und Verfahrenstechnik sowie der Physik. Des weiteren sind 18,5 % der Experten und Expertinnen Geschäftsführende, 18,5 % Ökonomen, 13 % (Bio-)ChemikerInnen. Des weiteren wurde 1 Politikwissenschaftlerin interviewt.
- Auf Ebene 0 wurden 26 Personen befragt. Die Fragen von Ebene 1 wurden an 23 Personen gestellt. Zu Ebene 2 konnten 24 Experten Auskunft geben und zu Ebene 3 14 Experten. Einige Experten konnten zu mehreren Betrachtungsebenen befragt werden. Im Durchschnitt sind das 1,5 Ebenen pro Experte.



Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

IV. Ergebnisse der Studie	29
1. Ebene 0 – Erneuerbare Energien	31
2. Ebene 1 – Primärenergiequellen	46
a) Biomasse	47
b) Geothermie	56
c) Solarenergie	65
d) Windenergie	72
3. Ebene 1 – Sekundärenergiequellen	80
a) „Grüner“ Wasserstoff	81
b) E-Fuels	91
c) Biofuels	99
4. Ebene 2 und 3 – Energiesystem- und -komponentenebene	107
a) Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien	108
b) Energiespeicher- und Transportsysteme	119
c) Energiewandlungssysteme für Nutzenergie	129

ERNEUERBARE ENERGIEN



i

Status quo der regenerativen Energien in Deutschland

ii

Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung

iii

Zukünftige Bedarfs- und Nutzungstrends

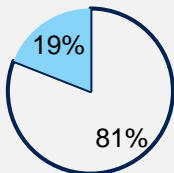
iv

Entwicklungspotenziale und -grenzen

RELEVANTE KENNZAHLEN IM KONTEXT DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

Das folgende Dashboard gibt einen ersten Überblick über den Status quo der erneuerbaren Energien in Deutschland. Es dient als Einstieg in die Thematik. Auf den nachfolgenden Folien wird auf einzelne Aspekte genauer eingegangen.

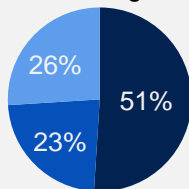
PRIMÄRENERGIEQUELLEN¹



Der Anteil der erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf lag im Jahr 2021 bei **19 %**.

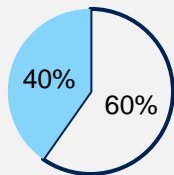
PRIMÄRENERGIEBEDARF NACH SEKTOREN IN 2021¹

Der Primärenergieverbrauch lag in Deutschland bei 3387 TWh.



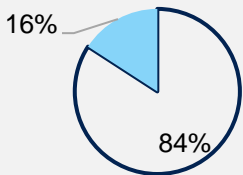
Der größte Energiebedarf besteht im Wärme- und Kältesektor mit **51 %**. Der Elektrizitätssektor macht **23 %** des gesamten Primärenergiebedarfs aus und der Verkehrssektor **26 %**.

ANTEIL DER EE AM STROMMARKT¹



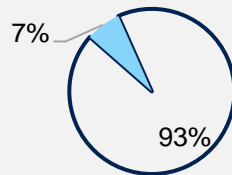
Der Anteil der erneuerbaren Energien am Strommarkt lag im Jahr 2021 bei **40 %**.

ANTEIL DER EE AM WÄRMEMARKT¹



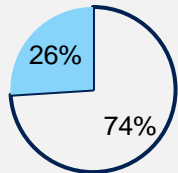
Der Anteil der erneuerbaren Energien am Wärmemarkt lag im Jahr 2021 bei **16 %**.

ANTEIL DER EE AM MOBILITÄTSSEKTOR¹



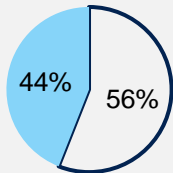
Der Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor lag im Jahr 2021 bei **7 %**.

STROMVERBRAUCH PRIVAT²



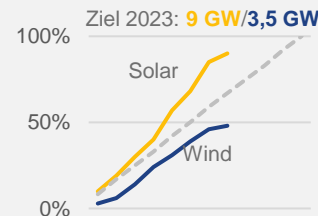
Der Stromverbrauch von Privathaushalten lag im Jahr 2021 bei **26 %**.

STROMVERBRAUCH INDUSTRIE²



Der Stromverbrauch in der Industrie lag im Jahr 2021 bei **44 %**.

AUSBAU WIND & SOLAR IN 2023³



Der Ausbau von Windkraftanlagen liegt **16 %** unter, der Ausbau von Solaranlagen **26 %** über dem Ausbauziel.

Quelle: ¹BMWK (2023), ²AGEB (2022), ³Bauer et al. (2023)

POLITISCHER EINFLUSS AUF DIE ENTWICKLUNG ERNEUERBARER ENERGIEN

Die Politik beeinflusst maßgeblich die Entwicklungsrichtung der erneuerbaren Energien durch z.B. **Förderprogramme** und **Regularien**. In einigen Fällen tritt der Staat sogar als aktiver Akteur auf dem Markt auf, wie etwa beim Kauf vom Energieunternehmen Uniper. Hierzu herrscht unter den befragten Experten und Expertinnen ein differenziertes Meinungsbild: Ein Lager argumentiert, dass zu viel staatlicher Eingriff langfristig nachteilig für Unternehmen sein kann. Eine stärkere Marktorientierung sollte gewährleistet sein, indem lediglich Instrumente wie die CO₂-Besteuerung und Auflagen zur Rücklagenbildung für Atomstrom, eingesetzt werden. Andere Experten befürworten dagegen ein verstärktes Eingreifen des Staates, etwa durch das Verbot von Verbrennungsmotoren oder Öl- und Gasheizungen, um die Energiewende schneller voranzutreiben.

Alle Experten und Expertinnen sind sich einig, dass die **Entbürokratisierung** von Genehmigungsverfahren und die **Anpassung von Gesetzen** an die aktuelle Situation **dringend erforderlich** sind. Es wird kritisiert, dass es **kein kohärentes wissenschaftliches Gesamtkonzept** der Regierung **für die zukünftige Energieversorgung** gibt. Stattdessen scheinen selektive Technologien willkürlich gefördert zu werden, während andere Bereiche wie der Stromnetzausbau seit Jahren vernachlässigt werden.

Trotzdem betonen die Experten und Expertinnen, dass der politische Wille zur Energiewende stärker denn je ist, jedoch die gesetzten Ausbauziele als „ambitioniert“ oder „hyperoptimistisch“ betrachtet werden. Einige der befragten Personen sehen das Ziel der Regierung darin, die **Komponentenherstellung für erneuerbare Energien wieder vermehrt in Deutschland** oder Europa anzusiedeln. In diesem Kontext ist der **Carbon Border Adjustment Mechanism**, der Unternehmen daran hindern soll, CO₂-Emissionen ins Ausland zu verlagern, besonders wichtig, da Deutschland sonst kein vorteilhafter Produktionsstandort ist.

Rechtlich betrachtet gibt es eine Fülle von Gesetzen, die den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien regeln. Das umfassendste auf nationaler Ebene ist **das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)**. Auch auf europäischer Ebene gibt es Regelungen für den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien. Auch das **Strommarktdesign** wird auf europäischer Ebene festgelegt.

AUSBAUZIELE DER REGIERUNG BIS 2030

PV:	215 GW
Wind Onshore:	115 GW
Wind Offshore:	30 GW

ÖKONOMISCHER EINFLUSS AUF DIE ENTWICKLUNG ERNEUERBARER ENERGIEN

Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen zur Nutzung von eE ist sowohl von den **Investitionskosten** (CapEx) als auch den **operativen Kosten** (OpEx) abhängig. Im Hinblick auf CapEx spielen **Skaleneffekte** und **zuverlässige Lieferketten** eine entscheidende Rolle, um technische Komponenten kosteneffizient zu gestalten. Generell werden im Rahmen der Nutzung von eE die Kosten von OpEx zu CapEx verschoben, also von Brennstoffkosten zu Investitionskosten, wie z.B. beim Vergleich zwischen Kohle- und Windkraftwerken. Die ökonomische Effizienz von Technologien ist essenziell, um ihre Nutzung zu gewährleisten. **Forschung und Entwicklung** sind daher wichtig, um zukünftige Technologien kosteneffizient zu gestalten. Die Wirtschaftlichkeit von Anlagen hängt auch von der **Merit-Order** im Strommarkt ab. Erneuerbare Energien (eE) können derzeit aufgrund niedriger Gestehungskosten hohe Gewinnmargen erzielen. Die **Reform des Strommarktdesigns** ist laut der befragten Experten und Expertinnen nötig und bereits in Ausarbeitung, um Speicher- und Wandlungskosten sowie Anreize für Verbrauchsanpassung im Strompreis zu berücksichtigen. Debatten wie z.B. die "Plattform klimaneutrales Stromsystem" zielen dabei auf Reformen ab, um das Strommarktdesign und die Finanzierung der eE nach 2030 zu planen.

Die Wirtschaftlichkeit der Produktion in Europa/Deutschland hängt u.a. von Rahmenbedingungen wie der sicheren **Energieversorgung**, dem **Energiepreis** und der **Investitionssicherheit** ab. Die Europäische Produktion bietet einige Vorteile, denn sie würde Abhängigkeit von anderen Ländern reduzieren, Lieferketten kürzen und arbeitsrechtliche Standards sicherstellen. An dieser Stelle muss die Politik dafür sorgen, dass Investitionssicherheit für die Unternehmen gewährleistet wird. Das Bestehen des **ETS-Systems für CO₂-Zertifikate** wird von den befragten Personen als positiv angesehen, denn die kontinuierliche Erhöhung des CO₂-Preises ist notwendig für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende. In der Kritik stehen hingegen die bestehenden **Contracts for Difference**, die für unnötig hohe Staatsausgaben sorgen. Die Experten und Expertinnen argumentieren, dass es weiterhin das Ziel sein sollte, fossile Brennstoffpreise zu erhöhen, um letztendlich die **Öl- und Gaserschließung** zu einem "**Stranded Asset**" werden zu lassen.

Die zukünftige Entwicklung des Energiepreises ist unter Experten und Expertinnen umstritten und von vielen Faktoren abhängig. Fest steht jedoch, dass die **Rohstoffpreise** aufgrund der Ressourcenknappheit, aber dem starken Ausbau der erneuerbaren Energieträger, **steigen** werden.

GESELLSCHAFTLICHER EINFLUSS AUF DIE ENTWICKLUNG ERNEUERBARER ENERGIEN

Die gesellschaftliche Akzeptanz spielt eine entscheidende Rolle beim Ausbau erneuerbarer Energien (eE), da letztendlich die **Gesellschaft die Kosten der Energiewende trägt**. Die Experten und Expertinnen betonen, dass es wichtig ist, die Gesellschaft aktiv einzubeziehen und Anreize zu schaffen, um die Akzeptanz zu steigern. Eine verbesserte **Informationsbereitstellung** und Aufklärung sind notwendig, um ein besseres Verständnis für die Dringlichkeit der Energiewende zu schaffen. Auch die Etablierung von **finanziellen Beteiligungsmöglichkeiten** für Bürgerinnen und Bürger, die in unmittelbarer Nähe von Wind- oder Photovoltaikparks leben, kann die Akzeptanz erhöhen und die Partizipation fördern. Des Weiteren sind Unterstützung und **Ansprechpartner auf kommunaler Ebene** wichtig, um Fragen und Bedenken der Bürgerinnen und Bürger zu adressieren. Zusätzlich kann durch die Schaffung von Arbeitsplätzen und die **Ausbildung von Fachkräften** im Bereich erneuerbarer Energien die Akzeptanz in der Bevölkerung gestärkt werden.

Außerdem lässt sich feststellen, dass die Akzeptanz in der Gesellschaft größer sein wird, wenn die eE eine **hohe Zuverlässigkeit** bieten. Auch muss die **Bezahlbarkeit** der eE gewährleistet sein und die Kosten sollten im Vergleich zu konventionellen Energien geringer sein. Persönliche **Einschränkungen im Lebensraum**, wie zum Beispiel die Sichtbarkeit von Windrädern, sollten hingegen vermieden werden, da diese die Akzeptanz einiger Gesellschaftsgruppen mindert.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ENTWICKLUNG DER ERNEUERBAREN ENERGIEN

Ökonomische Faktoren:

- Wirtschaftlichkeit von eE-Anlagen abhängig von CapEx und OpEx; Verschiebung der Kosten von OpEx zu CapEx
- Forschung & Entwicklung essentiell für zukünftige Wirtschaftlichkeit
- Merit-Order im Strommarkt beeinflusst Anlagen-Wirtschaftlichkeit.
- Strommarktreform nötig zur Integration der Kosten für Speicher, Wandlung und Setzung von Verbrauchsanreize
- Produktionswirtschaftlichkeit in Europa/Deutschland abhängig von Energieversorgung, Preisen, Investitionssicherheit
- ETS-System für CO₂-Zertifikate positiv, da kontinuierliche CO₂-Preiserhöhung nötig; Kritik an Contracts for Difference
- zukünftiger Energiepreis unklar, aber Rohstoffpreise steigen aufgrund von Ressourcenknappheit

Gesellschaftliche Faktoren:

- Gesellschaftliche Akzeptanz entscheidend für eE-Ausbau
- Aktive Einbeziehung und Anreize wichtig, um Akzeptanz zu steigern
- Informationsbereitstellung und Aufklärung notwendig für besseres Verständnis (am besten auf kommunaler Ebene)
- Arbeitsplatzschaffung und Fachkräfteausbildung fördern Akzeptanz
- Zuverlässigkeit der eE, Bezahlbarkeit und Vermeidung von Einschränkungen stärken Akzeptanz



Politische Faktoren:

- Politik beeinflusst erneuerbare Energien durch Förderprogramme und Regularien
- Staat agiert teilweise aktiv am Markt
- Notwendigkeit der Entbürokratisierung und Anpassung von Gesetzen
- Kritik: Fehlendes Gesamtkonzept für Energiewende, selektive Technologie-Förderung, Stromnetzausbau vernachlässigt
- Ziel: Rückverlagerung der Komponentenerstellung für eE nach Deutschland/Europa.
- Carbon Border Adjustment Mechanism wichtig, um CO₂-Verlagerung zu verhindern
- Wichtige rechtliche Grundlagen: Nationales EEG, europäisches Regelwerk für erneuerbare Energien und Strommarkt

ZUKÜNFTIGE BEDARFE

Energie:



Der **Gesamtenergiebedarf** wird voraussichtlich **leicht abnehmen**. Eine Szenario-Studie der Akademien der Wissenschaften zeigt, dass der Energiebedarf von derzeit 2.500 TWh in Zukunft **auf 1.500-2.000 TWh** zurückgehen könnte.



Der Trend der **Elektrifizierung** und **Sektorenkopplung** ist deutlich erkennbar. Trotzdem kann der gesamte Primärenergiebedarf Deutschlands nicht allein durch Elektrifizierung gedeckt werden, da Stromerzeugungskapazitäten, Netzkapazitäten und die Energiedichte des Stroms an ihre Grenzen stoßen. Bereiche wie **industrielle Hochtemperaturprozesse** (über 1.000 ° C) und **Flug- und Schifffahrt** bleiben **schwer zu elektrifizieren** und benötigen synthetische Energieträger.

Strom:



Im Bereich der Strombedarfsentwicklung sind **zwei gegenläufige Trends** erkennbar. Zum einen werden **durch** technologische Weiterentwicklungen **Effizienzsteigerungen** bei elektrischen Prozessen realisiert werden, die trotz des Rebound-Effektes, zu **Energieeinsparungen** führen werden. Zum anderen werden die **Sektorenkopplung** mit der **Elektrifizierung** sowie die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung zu einem deutlichen Anstieg des Strombedarfs führen.



Insgesamt wird der **Strombedarf steigen** vor allem in den Sektoren der Automobilität sowie industrieller und privater Wärmeerzeugung.




Wie hoch genau der Strombedarf sein wird, ist noch unklar. Verschiedene Szenarien zeichnen einen **zukünftigen Strombedarf zwischen 650 und 1.100 TWh** auf.


Wärme- und Kälte:





Für den Wärme- und Kältesektor sagen die Experten einen in etwa **gleichbleibende Entwicklung** voraus. Jedoch wird der **Stromanteil** an der Wärme- und Kälteversorgung **zunehmen**.


ZUKÜNFTIGE NUTZUNG


- 

Die zukünftige Gestaltung der Energiewirtschaft setzt die Gewährleistung der **Versorgungssicherheit** als Hauptziel voraus. Da Wind- und PV-Anlagen keine konstante Leistung liefern, waren bisher Großkraftwerke zur Frequenzregulierung notwendig. Nach aktuellem Stand der Technik, sind auch zukünftig Großkraftwerke erforderlich, um die Stabilität in urbanen Gebieten zu gewährleisten. Einige Experten gehen sogar so weit zu sagen: „Öl und Gas werde nach wie vor eine Rolle spielen müssen“.
- 

Lösungsansätze zur **Netzstabilisierung** bei hohem Anteil erneuerbarer Energien sind zum einen die stärkere **Kooperation auf europäischer Ebene**, um Stromüberschüsse und -defizite auszugleichen. Zum anderen wird die Nutzung von **Speichertechnologien** zur Überbrückung von Dunkelflauten und saisonalen Schwankungen zunehmen.
- 

Einige Experten und Expertinnen vermuten eine **Zunahme von dezentralen Systemen und Insellösungen**, dennoch bleibt die **zentrale Verwaltung durch Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber** bestehen. Obwohl Privathaushalte und Unternehmen mehr Energie selbst produzieren und verbrauchen werden (**Prosuming**), ist eine vollständige Autarkie aufgrund von Dunkelflauten und saisonalen Schwankungen nicht realistisch.
- 

Des Weiteren vermuten die Experten eine Entwicklung des Systems zu vermehrter **Demand-Side Response**. Bei dieser passen Verbraucher (Privat- und Industriekunden) die Nachfrage flexibel an die variable Strombereitstellung und somit an die Strompreise an. Dies kann zur Reduzierung des Bedarfs an Speichertechnologien führen.
- 

Die zukünftige Energiewirtschaft wird voraussichtlich auf **vielfältigen, regional differenzierten Lösungen** basieren. Es wird jedoch von allen befragten Personen empfohlen, Strom direkt als Energieträger zu verwenden, da jede zusätzliche Umwandlung Energieverluste mit sich bringt.
- 

Eine Szenario-Studie der Akademien der Wissenschaften zeigt als mögliche Realität eine zukünftige Energieerzeugung von 1.000 TWh Strom in Deutschland, 1.000 TWh Wärme aus Geothermie und Solarthermie sowie 500-600 TWh durch Import von Energieträgern und Derivaten, auf.

ENTWICKLUNGSPOTENZIALE ERNEUERBARER ENERGIEN IN DEUTSCHLAND

Allgemein:



Es besteht ein erhebliches Entwicklungspotenzial, insbesondere in der Wasserstoffnutzung sowie der Nutzung von Wind- und Solarenergie. Die oberflächennahe Geothermie bietet deutschlandweit großes Potenzial, während die Tiefengeothermie im Süden Deutschlands als sehr vielversprechend angesehen wird. Hingegen ist das Ausbaupotenzial für Biomassenutzung gering, und bei Wasserkraft liegt es nahezu bei null.

Strommarktentwicklung:



Es wird voraussichtlich auch in Deutschland ein **Markt für Blindleistung** entstehen, ähnlich dem für Wirkleistung. Ein monetärer Anreiz soll die Erzeuger dazu motivieren, auch Blindleistung zu liefern. Die Umrichter erneuerbarer Energien können für die Einspeisung von Blindleistung genutzt werden, müssen jedoch entsprechend darauf ausgelegt werden.

Technologische Entwicklung:



Interessant wird, ob die Zulassung von Technologien zur **Carbon Capture and Storage (CCS)** von der Regierung festgelegt wird. Diese Technologie bietet Potenzial, da die Synthese von CO_2 und H_2 zu CH_4 erfolgen kann. Aus dem verbrannten CH_4 kann wiederum CO_2 abgefangen werden, was einen geschlossenen Kreislauf ergibt.



Entwicklungspotenziale liegen in **Langzeitspeichern, Kraftwerken für „grüne“ Gase** und **dezentralen Wärmenutzungssystemen**. Einige dieser Systeme werden in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

METHODIK PROGNOTIZIERTER WACHSTUMSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN IN DER DACH-REGION BIS 2030

Die vorliegenden Diagramme im Bereich der Strom- und Wärmeerzeugung ermöglichen **einen Vergleich zwischen der prognostizierten Entwicklung und dem aktuellen Stand** ausgewählter erneuerbarer und fossiler Energiequellen. Als Entwicklungskriterien wurde die **Wachstumsrate** in Prozent auf den **prozentualen Bruttoanteil** der Strom-, beziehungsweise Wärmeerzeugung abgebildet. Die Datengrundlage der Abbildung des aktuellen Zustands ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Übersicht der vorliegenden Informationen für das Jahr 2021 nach Ländern

Auftraggeber/Herausgeber	Titel	Jahr
Ist-Daten für Deutschland		
Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima	Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland	2023
AG Energiebilanzen e. V., Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima	Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland	2022
Bundesnetzagentur	Kraftwerksliste Stand 2022	2023
Ist-Daten für Österreich		
Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft	E-Control - Statistikbroschüre 2022	2022
Statistische Amt der Europäischen Union	Shares 2020 - Tab.1	2022
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Innovation und Technologie Österreich	Energiebilanz Österreich 1970-2021	2022
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Innovation und Technologie Österreich	Biokraftstoffe im Verkehrssektor 2021	2022
Ist-Daten für die Schweiz		
Bundesamt für Energie BFE	Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien 2021	2022
Bundesamt für Energie BFE	Schweizerische Holzenergiestatistik 2021	2022
EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE	Geothermiestatistik Schweiz 2021	2022

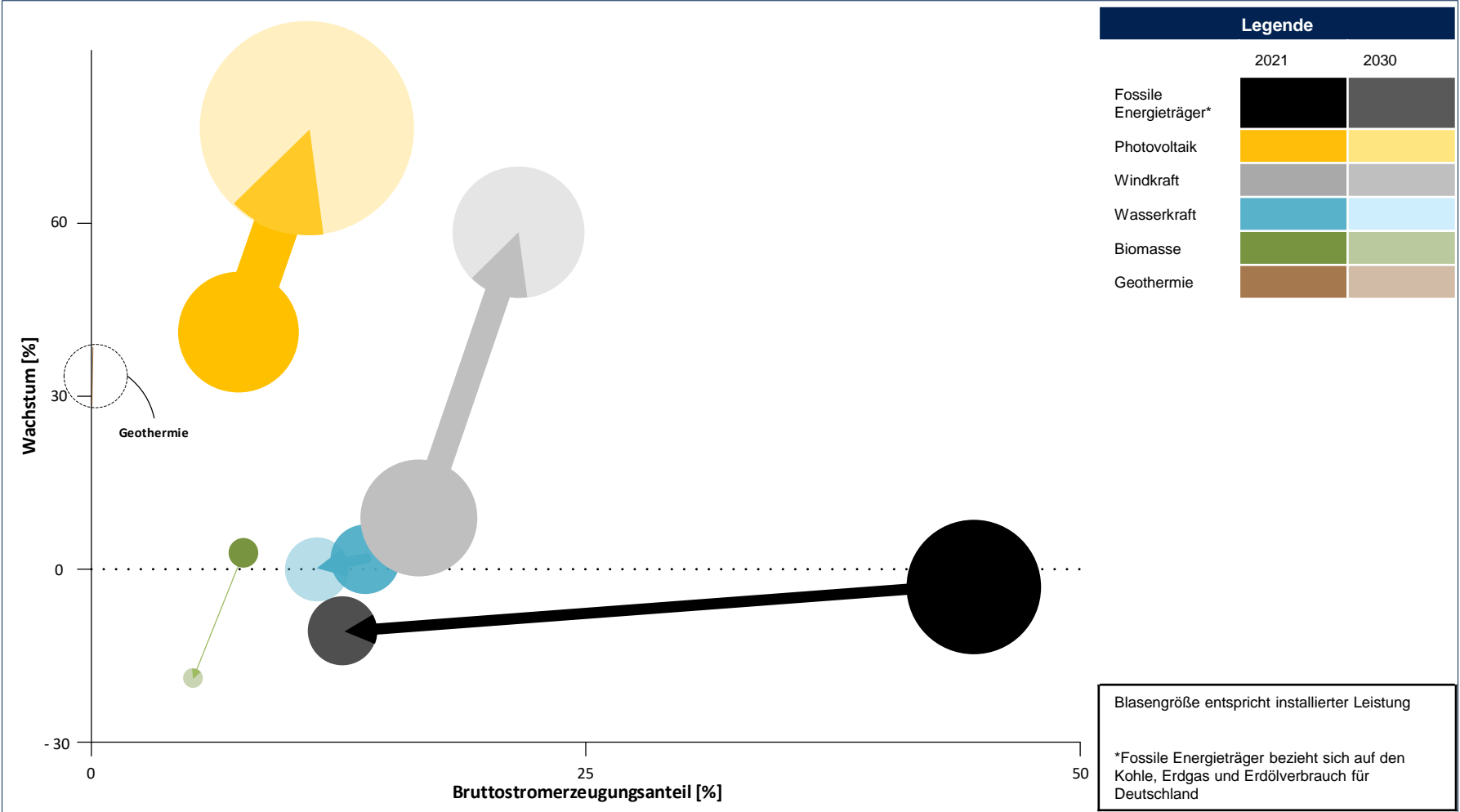
METHODIK PROGNOTIZIERTER WACHSTUMSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN IN DER DACH-REGION BIS 2030

Die **Prognosedaten** sind für das Jahr 2030 ermittelt. Sie setzen sich aus den Werten der Statistiken in der folgenden Tabelle zusammen. Fehlende Werte wurden durch eine Markov-Chain-Monte-Carlo-Simulation mit 1000 Zufallsstichproben extrapoliert.

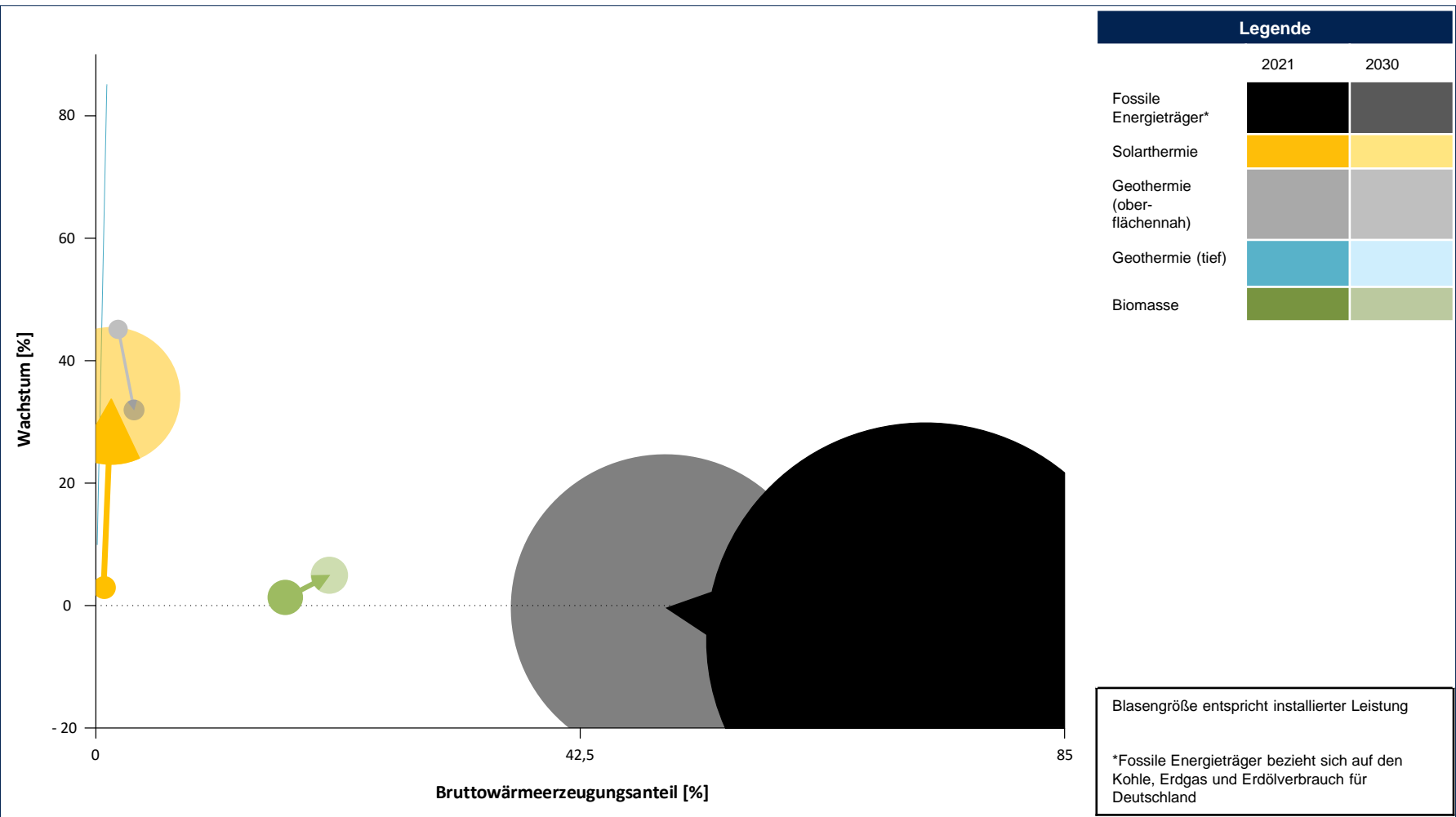
Übersicht der vorliegenden Prognoseinformationen für das Jahr 2030 nach Ländern

Auftraggeber/Herausgeber	Titel	Jahr
Prognosedaten für Deutschland		
Umweltbundesamt, Bundesstelle für Energieeffizienz	Umfassende Bewertung des Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kältenutzung für Deutschland	2021
Bundesministerium für Wirtschaft und Klima	Eckpunkte für eine Erdwärmekampagne Geothermie für die Wärmewende	2022
Bundesministerium für Wirtschaft und Klima, r2b energy consulting GmbH	Analysen zur Versorgungssicherheit am Strommarkt in Deutschland mit Kohleausstieg bis 2030	2023
Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.	Das „BEE-Szenario 2030“	2019
Prognosedaten für Österreich		
IG Windkraft, Kompost & Biogas Verband Österreich, IG-Holzskraft	Endbericht – Stromzukunft Österreich 2030	2017
Technische Universität Wien, European renewable Energies Federation, Energy Economics Group	Study on 2030 Renewable Energy and Energy Efficiency Targets in the European Union	2022
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Innovation und Technologie Österreich	FTI-Roadmap Geothermie	2022
Prognosedaten für die Schweiz		
Bundesamt für Energie BFE	Szenariorahmen 2030/2040 für die Stromnetzplanung	2022
Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie	SOLARWÄRMESEKTOR SOLL SICH BIS 2030 «MINDESTENS VERDREIFACHEN»	2022

PROGNOSTIZIERTE WACHSTUMSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN ZUR STROMERZEUGUNG IN DER DACH-REGION BIS 2030



PROGNOSTIZIERTE WACHSTUMSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN ZUR WÄRMEERZEUGUNG IN DER DACH-REGION BIS 2030



PROGNOSTIZIERTE WACHSTUMSPOTENZIALE AUSGEWÄHLTER ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN IN DER DACH-REGION BIS 2030


In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass **erneuerbare Energiequellen** bis zum Jahr 2030 eine **bedeutende Rolle** in der **Strom- und Wärmeerzeugung** der DACH-Region einnehmen werden. Der Einsatz der **fossile Energieträger** Kohle, Erdöl und Erdgas ist bis zum Jahre 2030 insgesamt **Rückläufig**.

Situation in der Stromerzeugung: **Entwicklungspotenzial** ist im Bereich der Stromversorgung für die Nutzung von **Windkraft und Photovoltaik** zu erwarten. Das prognostizierte **Wachstum** an der Bruttostromerzeugung liegt im Falle von **Photovoltaik** bei **76,51 %**, im Falle der **Windkraft** bei **58,41 %**. Mit einer prognostizierten **installierten Leistung** von **109,7 GW** für **Photovoltaikanlagen** und **67,5 GW** für **Windkraftanlagen** ist zu erwarten, dass der Bruttostromerzeugungsanteil beider Technologien bis zum Jahre 2030 zunehmen wird. **Wasserkraft** spielt als erneuerbare Energiequelle eine **untergeordnete Rolle**. Das **Wachstum** ist aufgrund geografischer Beschränkungen mit **0,03 % gleichbleibend**. Die **Installierte Leistung** wird für das Jahr 2030 auf **35,7 GW** prognostiziert. Durch eine Erhöhung des Strombedarfes nimmt der prozentuale Anteil an der Bruttostromerzeugung bei Wasserkraft ab. Die **Biomassenutzung** wird Jahr 2030 einen **Bruttostromerzeugungsrückgang von 18,87 %**, sowie eine **Reduktion der installierten Leistung von 15,2 GW auf 10,1 GW** erfahren. Dadurch wird der Biomassenutzungsanteil bei der Stromerzeugung sinken. **Fossile Energieträger** werden für die Erzeugung von Strom zukünftig **obsolet**, was einen **Rückgang von 10,68 %** am Bruttostromerzeugungsanteil bis zum Jahre 2030 zeigt. **Ihr Anteil am erzeugten Gesamtbruttostrom wird von 44,62 % auf 12,69 % sinken, die Installierte Leistung sinkt von 68,8 GW auf 35 GW.**


Situation in der Wärmeerzeugung: Für den Sektor der **Wärmeerzeugung** wird ein ähnliches Bild prognostiziert. Hier ist insbesondere für den Primärenergieträger **Sonnenenergie** ein **starkes Wachstum von 34,25 %** zu erwarten. **Solarthermieanlagen** werden, der Prognose nach mit einer Steigerung der **installierten Leistung von 18,6 GW auf 111,8 GW** stark ausgebaut. Ebenso wird ein vermehrter Einsatz von oberflächennaher und tiefer **Geothermie** angenommen, sodass sich eine **Wachstumsrate von 31,95 % für die oberflächennahe Geothermie** und **85,03 % für die tiefe Geothermie** bis zum Jahre 2030 ergibt. Die installierten Leistungen im Jahr 2030 mit **16,9 GW für die oberflächennahe** und **1,4 GW für die tiefe Geothermie** angenommen. **Biogene Brennstoffe** werden einen vermehrten Einsatz erfahren, jedoch mit **4,95 %** aufgrund des bereits erschlossenen Potenzials, ein geringeres **Wachstum**. Die **installierte Leistung** wird dennoch für das Jahr 2030 auf **30 GW** vermutet. Beim Einsatz **fossiler Brennstoffe** ist ein **Rückgang von 5,62 %** zu erwarten, jedoch werden sie im Jahr 2030 noch **49,98 % des Wärmemarktes** ausmachen. Die **installierte Leistung** bei der fossilen Wärmeerzeugung wird von **352,5 GW um 29,22 %, auf 249,5 GW** abnehmen.


GRENZEN DER ENTWICKLUNG

Produktion von Komponenten und Systemen erneuerbarer Energien:


 Die **Inlandsproduktion** stößt auf verschiedene Hindernisse wie den **Mangel an Fachkräften**, **hohe Energiepreise**, **hohe Lohnkosten** und **Engpässe in der Rohstoff- und Materialversorgung**. Infolgedessen wird es laut Experten darauf hinauslaufen, dass Deutschland Industrien anzieht oder beibehält, die wenig energie- und arbeitsintensiv sind oder schwerere Produkte herstellen, die aufgrund langer Transportwege ungeeignet sind.


Stromnetze:

 Der Netzausbau ist entscheidend für den Erfolg der Energiewende. Die Erweiterung der erneuerbaren Energien ist wenig sinnvoll, wenn die Netze nicht entsprechend ausgebaut werden, um den **Energieabtransport zu gewährleisten**. Es werden beispielsweise 5.000-6.000 km zusätzliche Höchstspannungsleitungen benötigt.


 Die **Netzspannungssicherheit** muss bei den zahlreichen dezentralen Einzellösungen berücksichtigt werden. Denn die Netzspannung muss trotz der Möglichkeit für individuelle Ein- und Ausspeisung konstant gehalten werden.

Technische Grenzen:

 **Kraftwerkseigenschaften** müssen angemessen ersetzt werden. Dies umfasst Regelbarkeit, gesicherte Leistung sowie die Bereitstellung von Systemdienstleistungen wie Wirkleistungs-Frequenzregelung und Spannungsblindleistungsregelung. Bisher erfüllen erneuerbare Energien diese Eigenschaften nur eingeschränkt.

 Studien zeigen, dass im **Winter** Zeiträume auftreten werden, in denen die **Versorgung durch erneuerbare Energien nicht ausreichen**. Die Lösungen für dieses Problem sind noch offen.

Globale Entwicklungsgrenzen:

 **Nationale Alleingänge** sind problematisch und nicht zielführend. Gemeinsame Lösungen müssen international mit relevanten Erzeugern und Verbrauchern abgestimmt und umgesetzt werden, da die Emissionen sonst lediglich in andere Länder verlagert werden. Es besteht somit eine Abhängigkeit vom Willen anderer Länder.

IV. Ergebnisse der Studie	29
1. Ebene 0 – Erneuerbare Energien	31
2. Ebene 1 – Primärenergiequellen	46
a) Biomasse	47
b) Geothermie	56
c) Solarenergie	65
d) Windenergie	72
3. Ebene 1 – Sekundärenergiequellen	80
a) „Grüner“ Wasserstoff	81
b) E-Fuels	91
c) Biofuels	99
4. Ebene 2 und 3 – Energiesystem- und -komponentenebene	107
a) Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien	108
b) Energiespeicher- und Transportsysteme	119
c) Energiewandlungssysteme für Nutzenergie	129

BIOMASSE



i

Status quo der Nutzung
von Biomasse

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Biomassennutzung

iii

Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends von Biomasse

VOR- UND NACHTEILE DER BIOMASSENUTZUNG

Biomasse...



... ist sehr gut und langfristig speicherbar und somit auch zur saisonalen Überbrückung geeignet.



... ist flexibel und grundlastfähig.



... ist eine seit vielen Jahren etablierte Technologie.



... kann als gereinigtes Biogas auch ins Erdgasnetz eingespeist werden.



... ist sektorenübergreifend einsetzbar.



 **VORTEILE**

NACHTEILE 



... hat eine geringe Energieeffizienz. Der Energieertrag ist im Verhältnis zur Anbaufläche und dem Aufwand gering. (Biomasse)



... ist aufgrund des enthaltenen Methans (Biogas) umweltgefährdend, wenn es in die Atmosphäre gelangt.



... Ist im Falle der Nutzung von Biogasanlagen betreuungs- und überwachungsaufwändig.

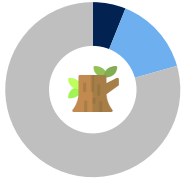


...anbau führt zu Konkurrenz in der Flächennutzung (Teller-Tank Debatte). Die Flächenpotenziale sind begrenzt.



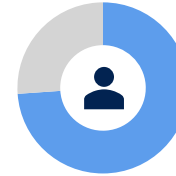
... ist (besonders in Form von Biogas) ein teurer Energieträger. Der Anbau von Substraten wie Mais und deren Düngung ist kostenintensiv. Zu den Anbaukosten addieren sich auch immer Transportkosten.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON BIOMASSE



Der Anteil von Biomasse am Bruttostromverbrauch in DE liegt im Jahr 2021 bei **7,7 %**.

Der Anteil am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte liegt im Jahr 2021 bei **18,3 %**. (AGEE-Stat/BMWK (2023))



73,9 % der knapp 9.000 Biogasanlagen in DE sind im Jahr 2019 im Besitz von Landwirten. (trend:research (2020))

Die **Nutzungsarten** von Biomasse lassen sich in Biogas und direkte Verbrennung unterteilen.

Biogas



Biogasanlagen sind **regionale, dezentrale Energieerzeugungsanlagen**.



Substrate für die Biogasproduktion sind vor allem **Rest- und Abfallstoffe** wie tierische Exkremente, organischer Müll oder industrielle Reststoffe. Des Weiteren werden vor allem **Mais**, aber auch Grassilage eingesetzt.



In gereinigter Form kann Biogas (Methan) **ins Erdgasnetz eingespeist** werden. Andernfalls kann das Biogas mittels BHKWs **in Strom umgewandelt** und ins Stromnetz, oft als Regelenergie, eingespeist werden. Gleichzeitig kann die erzeugte Wärme für **lokale Nahwärmenetze** genutzt werden.



In den letzten Jahren wurden verstärkt **BHKWs** und **Biogasspeicher** erbaut. Diese Entwicklung ermöglicht es zum einen mehr Biogas zu bevorraten und zum anderen in kürzerer Zeit mehr Biogas in Strom umzuwandeln und diesen im Falle von Dunkelflauten ins Netz einzuspeisen.

Direkte Verbrennung



Dieses Verfahren erfolgt beispielsweise in Heizwerken oder Heizkraftwerke. Der Verbrennungsprozess erzeugt **thermische Energie**, die wiederum zur **Stromerzeugung** genutzt werden kann.

BIOGAS

...ZUR HERSTELLUNG



Zur Herstellung von Biogas wird eine **Biogasanlage** benötigt. Es gibt bereits verschiedene Bauweisen. Das Herzstück einer jeden Anlage ist der Fermenter, der Gärbehälter. Das Substrat wird kontinuierlich in diesen hinein gegeben. Dort verbleibt es unter ständigem Rühren. Das entstehende Gas wird über Gasleitungen in den Speicherbehälter geleitet. Die Gärreste gelangen anschließend in den Schlammbehälter. Eine Biogasanlage enthält außerdem Steuerungs- und Sicherheitselektronik zur Überwachung der Prozesse.

...ZUR SPEICHERUNG



Da eine Biogasanlage nicht einfach für ein paar Stunden oder Tage abgeschaltet werden kann, ist ein Speicher zum Ausgleich notwendig. Derzeit gibt es verschiedene Arten von Speicher, **Niederdruck- und Hochdruckgasspeicher**. Niederdruckgasspeicher sind eine einfache und kostengünstige Art der Speicherung in der Nähe der Erzeugungsanlage. Die Druckgasbehälter speichern das Gas hingegen bei 200 bis 300 bar. Diese sind sowohl für stationäre als auch für mobile Anwendungen geeignet. Vorteil der Hochdruckspeicher ist der geringe Platzbedarf. (Hermeling et al. (2023), S. 111 ff.)

...ZUR NUTZBARMACHUNG



Zur Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz muss dieses zunächst gereinigt und somit in Biomethan umgewandelt werden. Für diesen Prozess wird eine **Biogasaufbereitungsanlage** verwendet.



Alternativ lassen sich zur Stromerzeugung aus Biogas **BHKWs** verwenden. In der Regel werden 500 kW-Anlagen genutzt. Der erzeugte Strom kann direkt ins Netz eingespeist oder selbst genutzt werden. Zusätzlich kann die Wärme ausgekoppelt und beispielweise in einem Wärmenetz nutzbar gemacht werden.

DIREKTE VERBRENNUNG

...ZUR NUTZBARMACHUNG



Je nach Biomassesubstrat und Anwendungspfad kann die direkte Verbrennung von Biomasse mittels **Mikrogastrubinen, BHKWs, Heizwerken** oder **Dampfmotoren** erfolgen.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER BIOMASSENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

Der Anbau von Substraten zur Gewinnung von Biogas hat **negative Auswirkungen auf die Biodiversität**, da er zur Entstehung von Monokulturen beiträgt. Ein positiver Aspekt der Biogasproduktion liegt jedoch darin, dass der **Restschlamm aus dem Prozess als Dünger genutzt** werden kann, was die Emissionen, die bei der Herstellung von handelsüblichem Dünger entstehen, reduzieren kann. Biogasanlagen, die mit Gülle betrieben werden, können sich leicht positiv auf die CO₂-Bilanz auswirken. Wenn Gülle nicht in einer Biogasanlage verarbeitet wird, wird sie auf Feldern als Dünger verteilt oder zwischengelagert, wodurch Methan in die Atmosphäre entweicht. Die Nutzung von Gülle in Biogasanlagen hilft, diese Methanemissionen zu verringern.

Ökonomische Faktoren:

Stromerzeugung aus Biogas ist teuer, wobei die Kosten bei ca. 0,20 € pro kWh liegen. Aktuell werden **Biogasanlagen größtenteils subventioniert**, da sie ohne diese Unterstützung in der Regel wirtschaftlich nicht rentabel sind. Ein bedeutender Kostenfaktor bei Biogasanlagen sind die **Transportkosten**. In der Regel wird für eine über 30 km lange Transportstrecke mehr Energie eingesetzt als erzeugt werden kann. Für Landwirte stellt die **hohe Investitionssumme** eine erhebliche Hürde dar, um in diese Branche einzusteigen. Die Anschaffungskosten sind beträchtlich. Zudem sind lange Lieferzeiten für Komponenten wie Trafos, Blockheizkraftwerke (BHKWs) und Baumaterialien in dieser Branche derzeit üblich, was zusätzliche Verzögerungen mit sich bringt.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER BIOMASSENUTZUNG

Gesellschaftliche Faktoren:

Das Thema Biogas steht derzeit im Zentrum gesellschaftlicher Debatten, wobei besonders die "**Tank-Teller-Debatte**" aufkommt. Hierbei dreht sich die Diskussion um die mögliche Konkurrenz zwischen Energiepflanzen und Nahrungspflanzen, wobei Experten hervorheben, dass die eigentliche Konkurrenz zwischen Energiepflanzen und Tierfutter besteht. Ein weiteres kritisches Thema, das von der Gesellschaft beleuchtet wird, sind die **Sicherheitsrisiken** im Zusammenhang mit Biogasanlagen, da Methan explosiv ist. Die potenziellen Gefahren werden kritisch hinterfragt. Zudem führt die Nähe zu Biogasanlagen für Anwohner zu **Geruchsbelästigungen**.

Politische Faktoren:

Das weitere Potenzial der Biogasindustrie steht in enger Abhängigkeit von politischen Entscheidungen. Aktuell ist der **Neubau von Anlagen gedeckelt**. Die **in Deutschland bestehende hohe Anzahl** von Anlagen, ist auf staatliche Unterstützung wie Einspeisevergütungen und Flexibilitätsprämien zurückzuführen. Für die Zukunft fehlen jedoch klare politische Pläne. Dies führt zu großer Investitionsunsicherheit führt. Diese Unsicherheit soll jedoch bald durch die Entwicklung einer **nationalen Biomasse-Strategie** beseitigt werden.

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) bildet den Rahmen für die Biomasseindustrie und regelt Aspekte wie Ausschreibungsvolumina, Maisdeckel und Flexpreis-Prämien. Das kürzlich veröffentlichte **Gebäude-Energie-Gesetz (GEG)** unterstützt Biomethan im Bereich der Gebäudeheizung. Ab 2040 müssen Gasheizungen für mindestens 60 % Biomethannutzung ausgelegt sein.

In Bezug auf die Verbrennung von Biomasse sind Gesetze zur Beschränkung von Lärm- und Abgasemissionen von Relevanz.

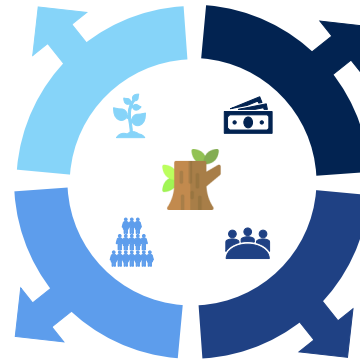
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER BIOMASSENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

- Biogas-Substratanbau beeinflusst Biodiversität negativ (Förderung von Monokulturen)
- Stoffliche Verwertung des Restschlamm als Dünger reduziert CO₂-Emissionen der herkömmlichen Düngerherstellung
- Verarbeitung von Gülle in Biogasanlagen verhindert Methanemissionen bei Feldausbringung

Gesellschaftliche Faktoren:

- "Tank-Teller-Debatte": Konkurrenz Energie- vs. Nahrungspflanzen
- Bedenken und Fragen zu potenziellen Gefahren: Methan ist explosiv
- Anwohner-Nähe zu Biogasanlagen: Geruchsbelästigung






Ökonomische Faktoren:

- Biogas-Strom teuer: 0,20 €/kWh
- Biogasanlagen oft subventioniert und ohne Subventionen meist nicht rentabel
- Transportkosten für Substrat entscheidender Kostentreiber
- Hohe Investitionen sind Einstiegshürde für Landwirte
- Lange Lieferzeiten für Trafos, BHKWs, Baumaterialien







Politische Faktoren:

- Biogas-Potenzial hängt von Politik ab: Neubau aktuell gedeckelt
- Investitionsunsicherheit aufgrund fehlender politischer Perspektive
- Nationale Biomasse-Strategie soll Unsicherheit zukünftig beseitigen
- EEG bildet Rahmen, regelt Ausschreibungen, Maisanbau, Flex-Preise
- GEG fördert Biomethan zukünftig für Heizung, Gasheizungen ab 2040 mind. 60 % Biomethan.
- Gesetze für Lärm- und Abgasemissionen bei Biomasseverbrennung relevant

HERSTELLUNG


-  Die **Flächenpotenziale** für den **Anbau** von Biomassesubstraten sind nahezu **erschöpft**.
-  Potenzial besteht noch im Bereich **Reststoffen wie Abfällen, Gülle und Klärschlamm**.
-  In Fällen, in denen eine Verwertung in Biogasanlagen nicht möglich ist, bietet sich die **thermische Verwertung** an.


NUTZUNG


-  Biomasse hat ein **hohes Nutzungspotenzial** in diversen Szenarien. Aufgrund der sehr begrenzten Verfügbarkeit muss deshalb genau abgewogen werden, in welchen Bereichen es unverzichtbar ist.
-  Eine zentrale Rolle wird Biomasse weiterhin bei der Bereitstellung von **Regelenergie** und **Grundlast** spielen. Dabei könnte die zentrale Strom- und Wärmeerzeugung mittels **Gruppen-BHKWs** und der Anbindung an ein **Wärmenetz** eine effiziente Lösung sein.
-  Ein weiteres Nutzungsszenario ist die **Biogas-Brennstoffzelle**, um Biogas in Strom umzuwandeln. Der Wirkungsgrad liegt derzeit bei 80%. Im Falle eines Stromüberschusses kann die Brennstoffzelle umgekehrt werden, um Wasserstoff zu produzieren. Dieser Wasserstoff kann wiederum in anderen Sektoren eingesetzt werden.
-  Des Weiteren eröffnet Biomasse die Möglichkeit der Erzeugung von **Hochtemperatur-Prozesswärme**.
-  Je nach politischer Entscheidung könnte Biomasse in Form von **Biofuels** auch in der Mobilität Anwendung finden.
-  Die vollständige Substitution von Erdgas durch Biomasse ist nicht möglich.


ENTWICKLUNG

 Die Politik muss mittels der **nationalen Biomassestrategie** klare Nutzungsszenarien schaffen.

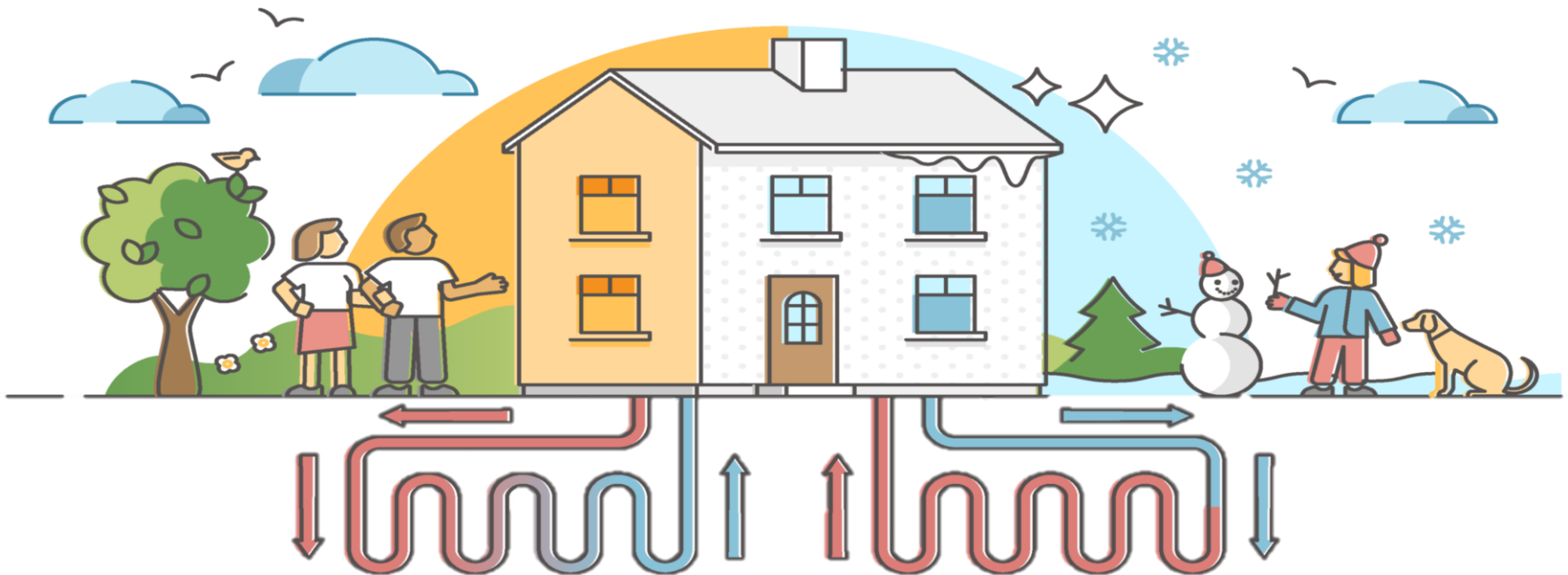
 Biogasanlagen, die bisher durch das EEG über 20 Jahre gefördert wurden, stehen vor der Herausforderung, nach Auslaufen der Förderung wirtschaftlich zu operieren.

 Die **Koexistenz von Wasserstoff und Biogas** in der zukünftigen Energieinfrastruktur erfordert eine klare Strategie, insbesondere im Hinblick auf bestehende Wasserstoffnetze, die dann nicht mehr für Methan genutzt werden können.

 Aufgrund der Herausforderungen bei der Speicherung von Wasserstoff bietet sich eine interessante Option an: Der durch Elektrolyse erzeugte **Wasserstoff** könnte **in Biogasanlagen eingespeist** werden. Dies würde den Methangehalt (CH_4) erhöhen und ermöglichen, dass die bestehenden CH_4 -Netze weiterhin genutzt werden können. Herkömmliche Biogasanlagen sind für dieses Szenario jedoch noch nicht funktionsfähig.

 **In anderen Ländern**, sowohl in Europa als auch in Entwicklungsländern, besteht noch **erhebliches Potenzial für den Ausbau von Biogasanlagen**. Deutschland, als technologischer Vorreiter, könnte seine Expertise und Technologie in diese Märkte einbringen und somit international eine Vorreiterrolle einnehmen.

GEOOTHERMIE

**i**

Status quo der Nutzung
von Geothermie

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Erdwärmennutzung

iii

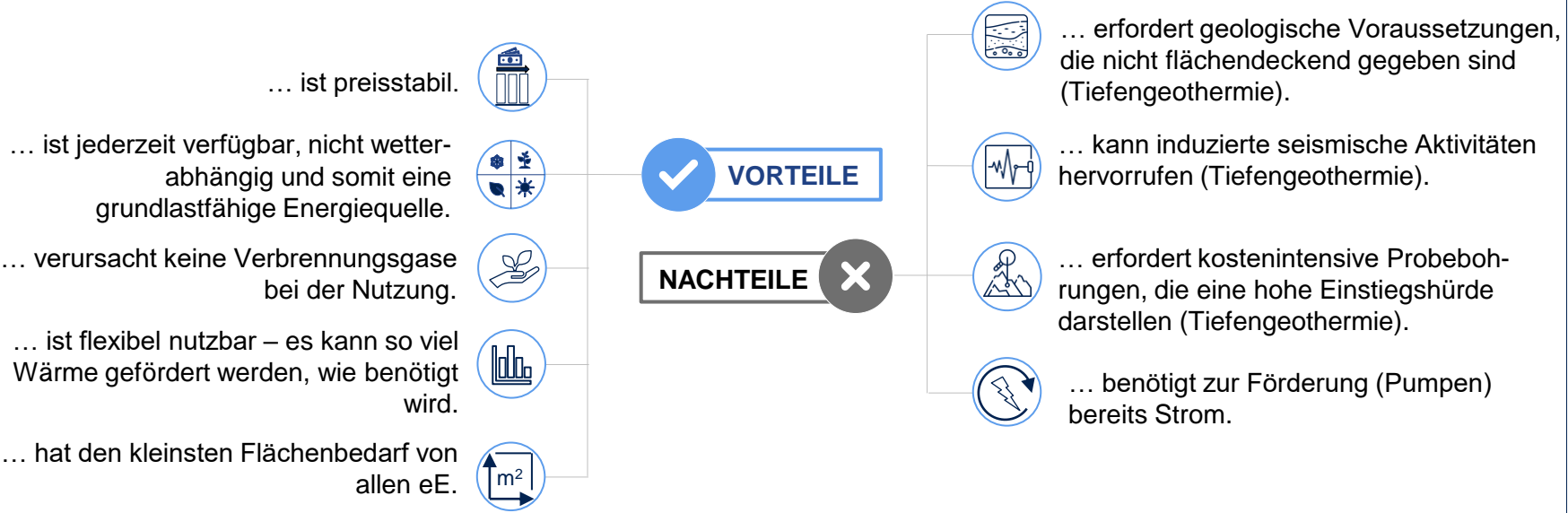
Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

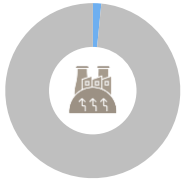
Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends von
Geothermie

VOR- UND NACHTEILE DER NUTZUNG VON GEOTHERMIE

Geothermie...

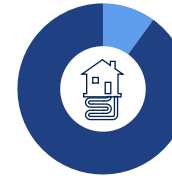


AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON GEOTHERMIE



Der Anteil von Geothermie am Bruttostromverbrauch in DE liegt im Jahr 2021 bei **0,04 %**.

Der Anteil am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte liegt im Jahr 2021 bei **1,55 %**. (AGEE-Stat/BMWK (2023))



90 % der installierten geothermischen Leistung wird im Jahr 2023 durch oberflächennahe Nutzung gewonnen. 90 % entstehen durch Tiefengeothermie. (Bundesverband Geothermie (2023))

Die **Nutzungsarten** von Geothermie lassen sich in Oberflächennahe und Tiefengeothermie unterscheiden.

Oberflächennahe Geothermie



Oberflächennahe Geothermie bezieht Energie aus den nahegelegenen Schichten der Erdoberfläche (**bis 400 m Tiefe**).



Die gewonnene Energie wird zur **Wärmeversorgung** von Gebäuden, Industrie, Gewerbe und Handel sowie zum Betrieb von **Wärmenetzen** verwendet.



Dies geschieht durch verschiedene Methoden wie **Erdwärmekollektoren**, **Erdwärmesonden**, **Grundwasserbohrungen** oder **Energiepfählen**.



Die Nutzung der Wärme erfolgt indirekt, da die gewonnene Wärme gering ist (**max. Temperatur: 15-30 ° C**) und erst durch den Einsatz von Wärmepumpen auf ein nutzbares Temperaturniveau angehoben werden muss. Die Wärmepumpen können zentral oder dezentral (gebäudebasiert) ausgelegt werden.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON GEOTHERMIE

Tiefengeothermie



Bezeichnet die Nutzung von Energie aus einer Tiefe von mehr als 400 Metern, bei einer Temperatur über 20° C. Im engeren Sinne spricht man allerdings erst **ab einer Tiefe von 1.000 Metern** und einer **Temperatur über 60° C** von Tiefengeothermie. Der Bereich zwischen 400 und 600 Metern wird als Mitteltiefe Geothermie bezeichnet.



Im Wesentlichen lassen sich **zwei Nutzungsarten** der Tiefengeothermie unterscheiden: die hydrothermale Nutzung und die petrothermale Nutzung.



Hydrothermale Systeme sind standortabhängig, da die geologische Voraussetzung von Wasser im Untergrund gegeben sein muss. Hydrothermale Systeme sind entwicklungsstechnisch bereits weit erforscht. Die Nutzung erfolgt über eine mehrere 1.000 Meter tiefen Bohrung. Über diese wird das Thermalwasser hochgepumpt und nachdem die Wärme extrahiert wurde in einigen Kilometern Entfernung wieder in die Erde geleitet.



Petrothermale Systeme hingegen sind nicht an Untergründe mit wasserführenden Schichten gebunden, denn die Wärme wird direkt aus dem Gestein gewonnen. Dazu wird kaltes Wasser mittels eines Bohrloches in die Erde gepresst. Das Gestein wirkt wie ein Wärmetauscher und erwärmt das Wasser, welches in einem weiteren Bohrloch wieder nach oben gepumpt wird. Anschließend kann die Wärme genutzt werden und der Kreislauf beginnt von neuem. In dieser Methode zur Energiegewinnung wird großes Potenzial gesehen. Sie bedarf jedoch noch weiterer Entwicklung.




Die aus Tiefengeothermie gewonnene Wärme wird direkt zur **Stromerzeugung** oder zur Speisung von **Fernwärmenetzen** eingesetzt. Die Fernwärme wird anschließend zu Industriebetrieben oder Gebäuden geleitet werden. Derzeit werden solche Fernwärmenetze bereits von Kommunen zur Beheizung von öffentlichen Gebäuden und Einrichtungen wie Schulen oder Schwimmbäder sowie Quartieren genutzt. In der Industrie werden vor allem Trocknungsprozesse im Bereich der Papier-, Baustoff-, Lebensmittelindustrie oder Gewächshäuser und Fischzuchtanlagen bedient.





Alternativ kann die gewonnene Wärme auch mit einem z.B. Hackschnitzelkraftwerk kombiniert werden, um die Temperatur weiter zu anheben.

OBERFLÄCHENNAHE GEOTHERMIE


Bei der Nutzung von Oberflächennaher Geothermie können verschiedene Systeme zum Einsatz kommen, um die Erdwärme nutzbar zu machen.


 **Erdwärmekollektoren** sind Rohrsysteme, die im Erdreich verlegt werden und die Wärme aus dem Boden aufnehmen. Sie werden oft für Heiz- und Kühlanwendungen verwendet. **Erdwärmesonden** hingegen sind vertikale Bohrungen, in denen Rohre verlegt sind, durch die ein Wärmeträgermittel zirkuliert, um die Erdwärme aufzunehmen oder abzugeben. Grundwasserbohrungen nutzen im Gegensatz dazu kein extra Wärmeträgermittel. Das Wasser wird direkt durch den Wärmetauscher geleitet, um die Wärmeenergie zu nutzen.


 Bei Oberflächennaher Geothermie sind jedoch in jedem Fall **Wärmepumpen** notwendig. Diese erhöhen die Temperatur der geothermischen Wärme, um sie für Heiz- und Kühlzwecke nutzbar zu machen.


 Über **Verteilungsnetze** wird die gewonnene Wärme oder Kälte in Gebäude oder Prozesse transportiert.


TIEFENGEOTHERMIE

 Im ersten Schritt werden Erkundungsbohrungen durchgeführt, um die Eignung des Gebiets und die geologischen Gegebenheiten festzustellen. Ist das Gebiet geeignet folgen Bohrungen mit speziellen **Bohranlagen**, um tiefe Bohrlöcher zu schaffen, die zu den geothermischen Quellen in der Tiefe führen. Produktionsbohrungen fördern das heiße Wasser oder den Dampf aus den geothermischen Reservoirs an die Oberfläche.

 Mittels **Wärmetauscher** und **Dampfwechsellanlagen** wird die Wärmeenergie aus dem geothermischen Fluid extrahiert und in nutzbare Energie umgewandelt.

 Mit einer **Dampfturbine** oder **ORC-Anlagen** kann die thermische Energie in Strom umgewandelt werden.

 Nachdem die Wärme extrahiert wurde, wird das Thermalwasser mit Hilfe von **Rückführungssystemen** zurück in das geothermische Reservoir geleitet. So kann der Kreislauf aufrecht erhalten werden.

 Der reibungslose Ablauf des gesamten Kreislaufprozesses erfordert ein leistungsfähiges **Pumpensystem**, das in der Lage ist, mit den anspruchsvollen Eigenschaften des Thermalwassers effizient umzugehen. Abhängig von der spezifischen Lokalität kann dieses Wasser hochkorrosiv sein oder sogar radioaktive Bestandteile enthalten.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER GEOTHERMIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

Die Anwendung der Tiefengeothermie kann **induzierte seismische Aktivitäten** hervorrufen, was ein wichtiges Anliegen ist. Ein weiterer Aspekt betrifft das **Thermalwasser**, das potenziell **Schadstoffe** wie Schwefelwasserstoff, Arsen oder sogar radioaktive Substanzen enthalten kann. Aufgrund des geschlossenen Kreislaufs gelangen diese Schadstoffe jedoch nicht in die Umwelt. Bei der Nutzung der tiefen Geothermie wird in der Regel nicht der schwache, kontinuierlich aus dem Erdinneren fließende terrestrische Wärmestrom genutzt. Stattdessen wird das erheblich höhere, jedoch begrenzte Potenzial der gespeicherten Erdwärme verwendet. Infolgedessen wird faktisch eine **Wärmelagerstätte erschöpft**. Die vollständige Regeneration dieses Wärmereservoirs dauert mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende. Dieser Aspekt unterstreicht die Bedeutung einer nachhaltigen und verantwortungsbewussten Nutzung der tiefen Geothermie, um die langfristige Verfügbarkeit dieser Ressource sicherzustellen.

Ökonomische Faktoren:

Tiefen-Geothermie nimmt eine herausragende Stellung im Energiemix ein, da sie nach Abwärme- und Müllverbrennungsmethoden als die **kostengünstigste Option zur Wärmeerzeugung** gilt. Die Bruttokosten für Endverbraucher liegen im Bereich von 0,08 bis 0,1 € pro Kilowattstunde, vorausgesetzt, die Energie wird über ein Fernwärmenetz genutzt.

Allerdings sind die **anfänglichen Investitionen (CapEx)** für Tiefen-Geothermieprojekte beträchtlich, was im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energiequellen eine hohe **Einstiegshürde** darstellt. Das "Eintrittsticket" für derartige Projekte liegt nicht unter 50 Millionen Euro. Bei der Kombination von Tiefen-Geothermie mit einem Fernwärmenetz steigen die Kosten sogar auf über 100 Millionen Euro an. Schon allein eine Testbohrung kann Kosten in Höhe von rund 10 Millionen Euro verursachen. Um die Entwicklung und Nutzung von Tiefen-Geothermie zu fördern, ist es erforderlich, dass die **Politik** geeignete **Rahmenbedingungen** schafft. Dies könnte beispielsweise Maßnahmen zur Risikoabsicherung für Investoren beinhalten.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER GEOTHERMIENUTZUNG

Gesellschaftliche Faktoren:

Die **gesellschaftliche Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie ist hoch**, was sich durch die bereits große Anzahl von Gebäudeheizungen zeigt, die derzeit schon geothermisch betrieben werden. Diese Akzeptanz wächst kontinuierlich, einerseits aufgrund der positiven Umweltbilanz und andererseits aufgrund der steigenden Heizkosten, insbesondere bei Gasheizungen. Jedoch besteht immer noch viel **Unkenntnis** in der Gesellschaft darüber, was Geothermie in der Energiewende leisten kann. Diese Informationslücke muss laut Expertenmeinung durch gezielte Aufklärungsmaßnahmen geschlossen werden. In den Regionen, in denen Gebäude durch induzierte Seismizität beschädigt wurden, gibt es **teilweise Proteste** gegen die Anwendung von Tiefengeothermie in der Bevölkerung. Generell sind Politik und gesellschaftliche Akzeptanz auch hier eng verknüpft. Durch gezielte Maßnahmen kann die Politik die Akzeptanz der Gesellschaft beeinflussen oder aber die Gesellschaft könnte Druck auf die Politik ausüben, um die Nutzung weiter voranzutreiben. Ein entscheidender Faktor zur Steigerung der Akzeptanz ist die Beteiligung der Bürger an Geothermieprojekten. Dafür ist die Schaffung eines geeigneten Rechtsrahmens erforderlich.

Politische Faktoren:

Die Politik zeigt bisher **Zurückhaltung in Bezug auf die Geothermie**. Um diesen Zustand zu verbessern, sind Initiativen wie "Wärmewende durch Geothermie" im Gange, die dazu dienen, PolitikerInnen besser zu informieren. Die Zukunftsaussichten der Geothermie hängen maßgeblich von politischen Entscheidungen ab. Aktuell haben die Gas- und Wasserstofflobby eine starke Präsenz. Um die Geothermie zu fördern, bedarf es eines **klaren Rechtsrahmens** für Tiefengeothermie. Dieser sollte Aspekte wie eine Versicherung gegen Fündigkeitsrisiken umfassen, da Investoren einem Totalausfallrisiko ausgesetzt sind, wenn keine Thermalwasserquelle im Untergrund gefunden wird. Auch die **Freigabe geologischer Daten** aus der Erdöl- und Erdgasindustrie würde zu einem effizienteren Ausbau der geothermischen Nutzung führen. Ein weiterer entscheidender Punkt ist die **Beschleunigung von Genehmigungsverfahren**, um die Umsetzung von Geothermieprojekten schneller voranzutreiben und Investoren mehr Planungssicherheit zu bieten. Insgesamt ist eine engagierte politische Unterstützung notwendig, um das volle Potenzial der Geothermie zu erschließen und eine nachhaltige Wärmeversorgung zu ermöglichen.

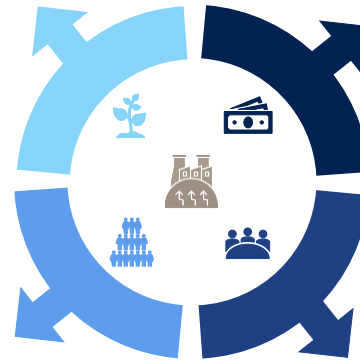
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER GEOTHERMIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

- Tiefengeothermie kann induzierte seismische Aktivitäten verursachen
- Thermalwasser kann Schadstoffe enthalten, diese gelangen jedoch aufgrund des geschlossenen Systems nicht in die Umwelt
- Gespeicherte Erdwärme wird kontinuierlich abgebaut, wobei vollständige Wiedererwärmung bis zu 1.000 Jahre dauert

Gesellschaftliche Faktoren:

- Hohe Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie aufgrund der Umweltbilanz und steigender Heizkosten
- Gesellschaft bedarf weiterer Aufklärung über die Potenziale von Geothermie
- Teilweise Proteste, in Regionen mit induzierter seismischer Aktivität
- Bürgerbeteiligung zur Akzeptanzsteigerung (Rechtsrahmen benötigt)








Ökonomische Faktoren:

- Tiefen-Geothermie ist kostengünstigste Wärmequelle nach Abwärmenutzung und thermischer Verwertung von Müll (bei Nutzung im Fernwärmenetz) (geringe OpEx)
- Hohe Einstiegshürden aufgrund hoher CapEx für Investoren
- Notwendigkeit der Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen von der Politik




Politische Faktoren:

- Politik derzeit noch sehr verhalten hinsichtlich des Ausbaus von Geothermie
- Derzeit Gas- und Wasserstofflobby stark vertreten
- Rechtsrahmens für Tiefengeothermie, der Investoren besser absichert, erforderlich
- Genehmigungsverfahren müssen beschleunigt werden
- Nutzung von geologischen Daten aus Erdöl- und Erdgasindustrie würden Ausbau effizienter voranbringen

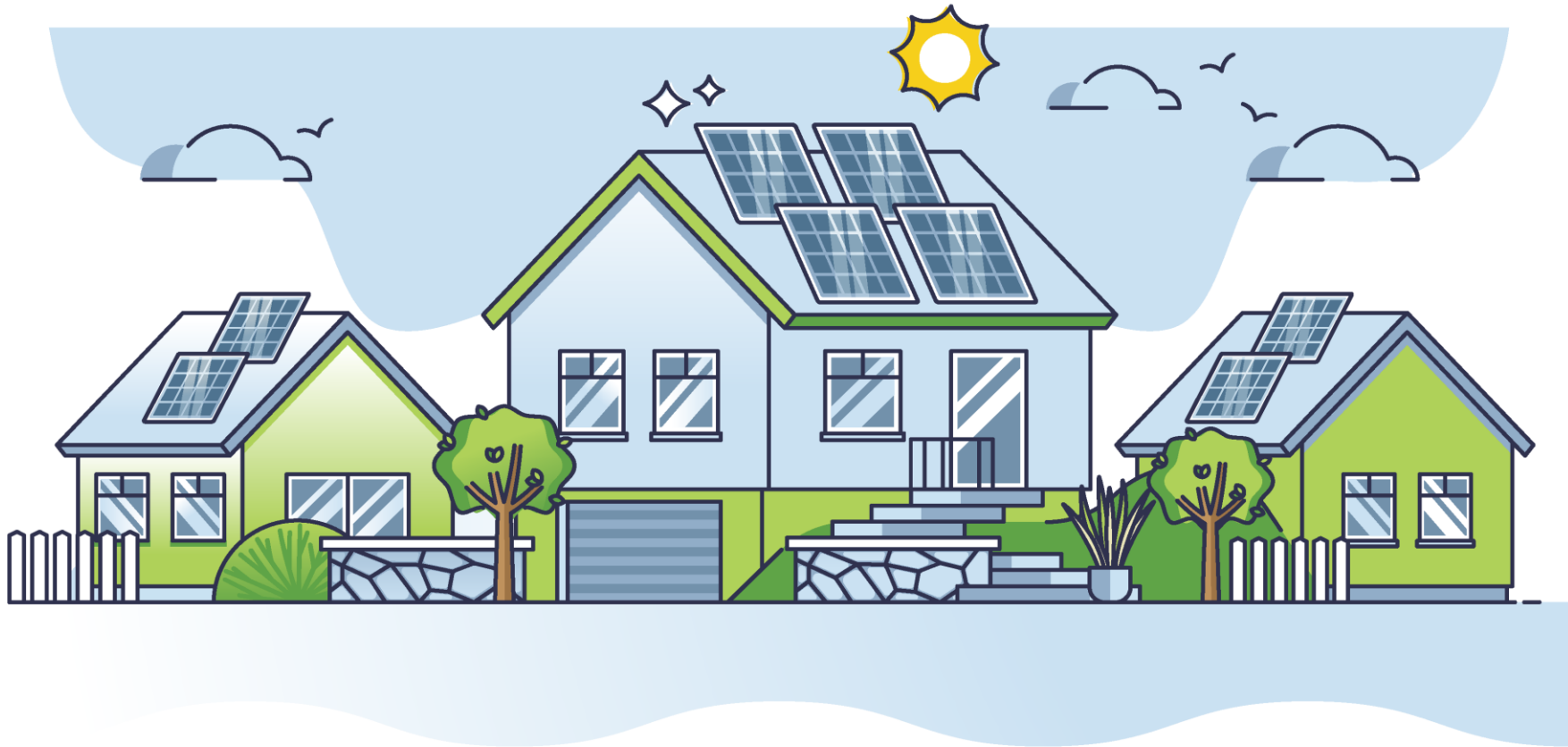
NUTZUNG

-  Etwa **50 % der Fläche Deutschlands lassen sich geothermisch nutzen**. Das genaue Ausmaß der Ressourcenvorkommen ist nicht vollständig bekannt, dafür ist ein bundesweites Explorationsprogramm erforderlich.
-  Laut einer Potenzialstudie des Fraunhofer IEG könnte etwa **75 % des Niedertemperatur-Wärmebedarfs Deutschlands** durch Geothermie gedeckt werden.
-  Die zukünftige Nutzung der **oberflächennahen Geothermie** sieht eine **dezentrale, gebäudebezogene Wärmenutzung** vor.
-  Die **Tiefengeothermie** wird voraussichtlich weiterhin für die Wärmeversorgung über **Nah- und Fernwärmenetze** sowie für Bereiche wie Gewächshäuser, Papierindustrie, Nahrungsmittelindustrie und weitere **Industriezweige** genutzt.
-  Die **Bereitstellung von Prozesswärme** für industrielle Anwendungen mit hohen Temperaturen ist voraussichtlich auch zukünftig **nicht mit Geothermie umsetzbar**.

ENTWICKLUNG

-  In der Tiefengeothermie liegen Entwicklungspotenziale in der **seismologischen Überwachung und Steuerung**, der **Bohrtechnik** für schnellere, kostengünstigere und zuverlässigere Bohrungen sowie in der Weiterentwicklung des **Wärmetransports** und der Wärmetrassen.
-  Enhanced Geothermal Systems (**Petrothermale Systeme**) bieten ebenfalls noch Entwicklungspotenzial.
-  Insbesondere in der hydrothermalen Tiefengeothermie besteht Verbesserungspotenzial bei den **Thermalwasserpumpen**. Diese müssen, aufgrund des z.B. Schwefelwasserstoffanteils, beständig gegen Korrosion und weitere Materialbeanspruchungen ausgelegt sein. Dies erfordert die Verwendung von speziellen Stählen oder Legierungen, die dieser Belastung standhalten.

SOLARENERGIE

**i**

Status quo der Nutzung
von Solarenergie

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Solarenergienutzung

iii

Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends von
Solarenergie

VOR- UND NACHTEILE DER NUTZUNG VON SOLARENERGIE

Solarenergie...



VORTEILE

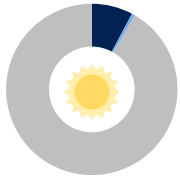
NACHTEILE

- ... kann flächendeckend genutzt werden, denn es erfordert keiner geologischen Voraussetzungen.
- ... ist eine kostenlose Energiequelle.
- ... ergänzt sich mit Windenergie sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf sehr gut.
- ... verursacht keine Emissionen bei der Stromgewinnung.
- ... bzw. deren Nutzungssysteme haben einen hohen Reifegrad und sind langlebig.



- ... ist volatil, bietet keine gesicherte Leistung und ist somit nicht grundlastfähig oder flexibel einsetzbar.
- ... benötigt im Zuge der Nutzung viel Fläche (Flächenkonkurrenz).
- ...ausbau ist derzeit abhängig von Ländern, die diese Technologien produzieren.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON SOLARENERGIE



Der Anteil von Solarenergie am Bruttostromverbrauch in DE liegt im Jahr 2021 bei **8,48 %**.

Der Anteil am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte liegt im Jahr 2021 bei **0,67 %**. (AGEE-Stat/BMWK (2023))



32,1 % der installierten PV-Anlagen befinden sich im Jahr 2019 in privatem Besitz. **24,8 %** halten Gewerbetreibende und **15,9 %** Landwirte. (trend:research (2020))



Solarenergie kann in Form von Strom (**Photovoltaik**) oder thermischer Energie (**Solarthermie**) nutzbar gemacht werden.



Die kumulierte **installierte Leistung aller PV-Anlagen** beträgt in Deutschland im Jahr 2021 knapp **60 GW**. Damit liegt Deutschland im europäischen Ländervergleich an erster Position. (Eurostat (2023)) Der **Wirkungsgrad** von handelsüblichen PV-Siliziummodulen liegt bei **10 – 20 %**. Die Verschaltung mehrerer Module zu einer Anlage führt zu Wirkungsgradverlusten. In Forschungslaboren werden bereits PV-Module mit einem Wirkungsgrad von über 40 % erzielt.



Die kumulierte **installierte Leistung aller Solarthermie-Anlagen** beträgt in Deutschland im Jahr 2021 ca. **15 GW**. Der **Wirkungsgrad** von handelsüblichen Solarthermiemodulen liegt bei **ca. 50 %**. Die Verschaltung mehrerer Module zu einer Anlage führt zu Wirkungsgradverlusten.





Photovoltaik-Anlagen kommen bereits flächendeckend zum Einsatz. Dabei sind Stand 2022 ca. **zwei Drittel Dachanlagen** und **ein Drittel Freiflächenanlagen**. Vereinzelt kommen PV-Module als Agri PV-Anlagen und Floating PV-Anlagen zum Einsatz.





Die **Herstellung** der Module hat sich vor einigen Jahren nach **China** verlagert, so dass eine große Abhängigkeit bezüglich des Imports von PV-Modulen besteht.


PHOTOVOLTAIK

 Die **Solarmodule** sind das Herzstück einer PV-Anlage. In ihnen wird die Solarenergie in Strom umgewandelt. Mehrere Module werden in Parallel- oder Reihenschaltung zusammengeschlossen.

 Mittels der **Montagesysteme** werden die Module auf dem Dach oder den Trägersystemen befestigt und ausgerichtet. Besondere Anwendungen, die sich in den letzten Jahren etabliert haben sind dabei die Nutzung von PV-Anlagen als Zäune in der Landwirtschaft oder schwimmende PV-Anlagen.


 **Wechselrichter** wandeln den erzeugten Gleichstrom aus den PV-Modulen in Wechselstrom um, damit dieser genutzt werden kann bzw. eingespeist werden kann.


 **Transformatoren** bzw. **Umspannwerke** passen anschließend die Spannung des erzeugten Stroms an die des Stromnetzes an.


 Wenn der erzeugte Strom nicht direkt in das Stromnetz eingespeist werden soll, können alternativ auch **Stromspeicher** wie z.B. Batteriespeicher eingesetzt werden.


Zum Betrieb des Systems ist außerdem noch Regelungs- und Steuerungstechnik notwendig sowie Infrastruktur zum Transport des erzeugten Stromes.


SOLARTHERMIE


 Bei Solarthermieanlagen wandeln die **Kollektoren** die Solarenergie in thermische Energie um. Es gibt verschiedene Arten von Kollektoren, darunter Flachkollektoren und Vakuumröhrenkollektoren.

 Ein **Wärmeträger** (meist eine Flüssigkeit wie Wasser oder Solarflüssigkeit) zirkuliert in den Kollektoren, um die absorbierte Wärme zu transportieren.

 Durch den Einsatz eines **Wärmetauschers** wird die Wärmeenergie vom Wärmeträgermedium auf das Warmwassersystem oder das Heizsystem.

 Ein **Wärmespeicher** (Solarwärmespeicher) speichert die erzeugte Wärme für den späteren Gebrauch, z.B. Warmwasser oder Raumheizung.

 **Pumpen** sorgen für den kontinuierlichen Fluss des Wärmeträgermediums zwischen Kollektoren, Wärmetauscher und Speicher.

 Die erzeugte Wärme kann je nach Anwendungsbedarf für die **Warmwasserbereitung** oder die **Raumheizung** verwendet werden.

Zum Betrieb des Systems ist außerdem noch Regelungs- und Steuerungstechnik notwendig sowie Rohrleitungen und Verbindungen zum Transport der erzeugten Wärme.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER SOLARENERGIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

Die **Produktion** von PV-Modulen ist zwar **energieintensiv**, aber die Module haben in der Regel eine **Lebensdauer von 25-30 Jahren**. Diese Module können **gut recycelt** werden, was ihre Umweltauswirkungen verringert. Bei der Installation von PV auf Freiflächen ist zu beachten, dass die betroffenen Flächen für den Zeitraum von 25-30 Jahren für andere Zwecke nicht nutzbar sind.

Ökonomische Faktoren:

Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) erweisen sich bereits **ohne Subventionen** als **wirtschaftlich** rentabel und amortisieren sich innerhalb einer vergleichsweise kurzen Zeitspanne. Die **Gestehungskosten** sind **niedrig**, was beispielsweise daran ersichtlich wird, dass in Saudi-Arabien bereits eine Produktion von 1 Cent/kWh erreicht wird. Im Gegensatz dazu belaufen sich die Gestehungskosten in Deutschland momentan auf 8-11 Cent/kWh. Seit einigen Jahren etablieren sich vermehrt PPA-Solarparks (**Power Purchase Agreement**), die gänzlich unabhängig von der EEG-Förderung agieren und betrieben werden. In Bezug auf die Produktion verzeichnet die PV-Fertigung eine rasch ansteigende Lernkurve, die mit stetig **sinkenden Fertigungskosten** einhergeht. Jedoch bleibt eine gewisse **Abhängigkeit von anderen Ländern** in Bezug auf die Modulproduktion bestehen. Die Entwicklungen in neuartigen Solarmodulen könnten Deutschland die Möglichkeit bieten, erneut die Führung in Technologie und Produktion zu übernehmen. Dies ergibt sich aus der Verwendung eines anderen Zelltyps, der alternative Fertigungsverfahren erfordert.

Gesellschaftliche Faktoren:

Unter den erneuerbaren Energien wird die Nutzung von Solarenergie von der Gesellschaft am meisten **akzeptiert**. Außerdem nehmen die Akzeptanzprobleme weiter ab, da die Menschen die **Vorteile im Vergleich zu den steigenden Gaspreisen** erkennen. Als sozio-ökonomischer Aspekt sind die schlechten **Arbeitsbedingungen in den Produktionsländern** zu nennen.

Politische Faktoren:

Die Regierung hat die **verpflichtende Integration von Solaranlagen**, beispielsweise auf Neubauhäusern, festgelegt und bietet hierfür **Förderinstrumente** an. Diese umfassen Maßnahmen wie Steuersenkungen beim Kauf von PV-Anlagen, Fördersatzes für Solarthermie-Heizungen oder **bürokratische Erleichterungen**. In Bezug auf die Produktion strebt die Regierung an, dass Deutschland erneut die technologische Führung im Bereich der PV übernimmt. Die EU hat den **Net-Zero Industry Act** verabschiedet, der die Vereinfachung von Antrags- und beschleunigte Genehmigungsverfahren für die Produktion von Netto-Null-Technologien vorsieht.

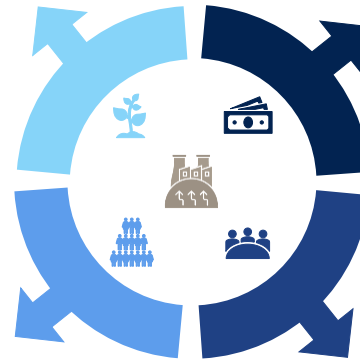
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER SOLARENERGIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

- PV-Produktion energieaufwendig, Module halten 25-30 Jahre
- PV-Module gut recycelbar
- PV auf Freiflächen: Flächen langfristig nicht anderweitig nutzbar

Gesellschaftliche Faktoren:

- Höchste Akzeptanz unter den erneuerbaren Energien
- Sinkende Akzeptanzprobleme dank erkennbarer Vorteile gegenüber steigenden Gaspreisen



Ökonomische Faktoren:

- PV-Anlagen rentabel ohne Subventionen, schnelle Amortisierung
- Niedrige Gestehungskosten: 1 Cent/kWh in Saudi-Arabien, 8-11 Cent/kWh in Deutschland
- Aufstieg von PPA-Solarparks außerhalb EEG-Förderung
- PV-Fertigung: steile Lernkurve, sinkende Kosten
- Abhängigkeit von Modulproduktion anderer Länder

Politische Faktoren:

- Regierung verpflichtet Nutzung von PV-Anlagen auf Neubauhäusern und bietet verschiedene Förderinstrumente wie Steuersenkungen und Solarthermie-Fördersätze an
- Regierung strebt technologische Führungsrolle in PV-Produktion an
- EU führt Net-Zero Industry Act ein: Einfachere Antragsstellung, schnellere Genehmigungsverfahren für Netto-Null-Technologien

HERSTELLUNG



Die Regierung strebt an, dass **Deutschland** erneut die **Technologieführerschaft** im Bereich der Photovoltaik übernimmt. Dies ist vor allem durch **hocheffiziente Technologien** (nächste Generation der PV-Module) möglich, nicht durch Billigproduktion, die weiterhin hauptsächlich in China stattfindet. Für die Ansiedlung der PV-Modulproduktion in Deutschland ist ein niedriger Industriestrompreis entscheidend, da Prozesse wie Siliziumproduktion und Wafer-Herstellung sehr stromintensiv sind. Voraussichtlich müsste die Regierung die eigene Produktion, ähnlich wie die USA mit dem Inflation Reduction Act, fördern.

NUTZUNG



Weiterer Ausbau von **Solarparks** sowie **Dachanlagen** auf privaten und Firmendächern aufgrund des gestiegenen Strompreises.



Potenzial in **Agri-PV**, da keine Flächenkonkurrenz mit Landwirtschaft besteht, sondern Synergieeffekte möglich sind.



Großes Potenzial in **Floating PV-Anlagen** (schwimmende PV-Module) auf nicht touristisch genutzten Gewässern.



Kein Potenzial für PV-Mover aufgrund hoher finanzieller Aufwände und fehlender Wirtschaftlichkeit.

ENTWICKLUNG



Technologietrend: **Kombination von Photovoltaik-Solarthermie-Modulen** für Strom- und Wärme Gewinnung. Diese sind bisher jedoch noch nicht wirtschaftlich.



Ziel der technologischen Weiterentwicklung: **Steigerung des Wirkungsgrades** und **Reduzierung seltener Metalle**.



Fokus auf **einfacher Anwendbarkeit** bei **niedrigen Kosten**, z.B. Folien für Hauswände oder Schallschutzwände.



Fortschritte in der Entwicklung von **Tandem-Solarzellen**, wie am Helmholtz-Institut mit einem Wirkungsgrad von 32,5%.

WINDENERGIE

**i**

Status quo der Nutzung
von Windenergie

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Windenergienutzung

iii

Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends von
Windenergie

VOR- UND NACHTEILE DER WINDENERGIENUTZUNG

Windenergie...



- ... erzeugt eine große Energiemenge im Verhältnis zur benötigten Fläche.
- ... kann flächendeckend genutzt werden, denn es erfordert keiner geologischen Voraussetzungen.
- ... ist eine kostenlose Energiequelle.
- ... ergänzt sich mit Solarenergie sowohl im Tages- als auch im Jahresverlauf sehr gut.
- ... verursacht keine Emissionen bei der Stromgewinnung.
- ... bzw. deren Nutzungssysteme haben einen hohen Reifegrad und sind langlebig.
- ... ist gut plan- und steuerbar einsetzbar, wenn eine Mindestwindgeschwindigkeit vorhanden ist.
- ...nutzungsstunden steigen zunehmend.



VORTEILE

NACHTEILE



...nutzung benötigt Flächen abseits von bewohntem Gebiet aufgrund der Lärm- und Schallemissionen und dem Schattenwurf.

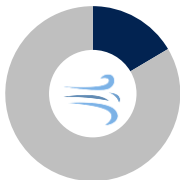


... ist volatil, bietet keine gesicherte Leistung (1-2 % über das Jahr gemittelt) und ist somit nicht grundlastfähig.



...ausbau ist derzeit abhängig von Ländern, die diese Technologien produzieren.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON WINDENERGIE



Der Anteil von Solarenergie am Bruttostromverbrauch in DE liegt im Jahr 2021 bei **19,71 %**. (AGEE-Stat/BMWK (2023))

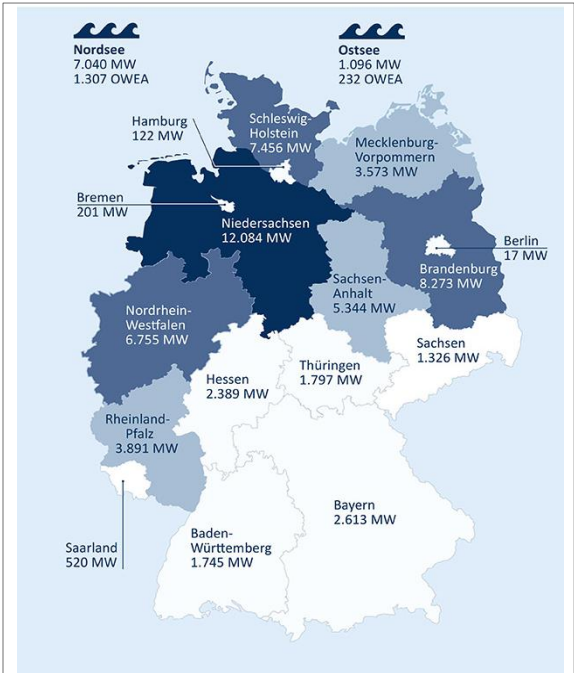


38,6 % der installierten PV-Anlagen befinden sich im Jahr 2019 in privatem Besitz. **22,8 %** halten Projektierer und **16,1 %** Fonds/Banken. (trend:research (2020))

Windenergie wird derzeit mittels **Onshore-Anlagen**, also Windkraftanlagen an Land und **Offshore-Anlagen**, Windkraftanlagen auf See, genutzt.

Windenergie leistet derzeit den größten Beitrag unter den eE zur Stromerzeugung. Im Jahr 2021 sind **8,1 GW Offshore** und **58,1 GW Onshore Anlagenleistung installiert**. (Bundesverband WindEnergie e.V (2022))

Laut Expertenberechnung könnten in Deutschland theoretisch auf dem Land und im Meer langfristig rund **285 GW Windenergieleistung** installiert werden. (Agentur für erneuerbare Energien (2023))





Verteilung der installierten Leistung von Windkraftanlagen in Deutschland im Jahr 2022¹


Quelle: ¹ Bundesverband WindEnergie e.V (2022)

...ZUR NUTZBARMACHUNG

Eine Windkraftanlage, wie sie heutzutage typischerweise verwendet wird besteht aus mehreren Komponenten.

 Das Herzstück der Windkraftanlage ist die **Windturbine**, diese umfasst die Komponenten **Rotorblätter**, **Nabe** und **Generator**. Die kinetische Energie, die in bewegten Luftmassen vorhanden ist, kann durch den aerodynamischen Auftrieb an den Rotorblättern von Windkraftanlagen in eine Kraft umgewandelt werden, die senkrecht zur Windrichtung wirkt. Diese Kraft setzt die Rotorwelle in eine mechanische Drehbewegung um. Diese Rotationsenergie wird dann durch einen Generator in elektrische Energie umgewandelt. Die Größe der Rotorblätter wirkt sich positiv auf die Energieausbeute aus. Die obere Einheit des Turms, die die Nabe und den Generator umfasst, wird oft auch als Gondel bezeichnet.

 Mittels **Transformatoren** wird die Spannung des erzeugten Stromes auf die benötigte gehoben, z.B. zur Einspeisung ins Netz zum Weitertransport über lange Strecken.

 Der **Turm** trägt die Windturbine. Je höher der Turm gebaut ist, desto besser ist die Energieausbeute, denn die Höhenwinde sind deutlich stärker als diese nahe der Erdoberfläche. Durch die zunehmend höhere Bauweise ein stabiles **Fundament**, auf dem der Turm steht, notwendig.

Wie bei allen Stromwandlungssystemen sind auch bei Windkraftanlagen noch eine Reihe an Steuerungs- und Überwachungssystemen für einen sicheren und effizienten Betrieb.

Zukünftig sollen vor allem Windkraftanlagen in Verbindung mit Speichern bzw. PtX-Anlagen, zur beispielsweise Herstellung von „grünem“ Wasserstoff, genutzt werden.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER WINDENERGIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

Ein besorgniserregender Faktor ist der **Vogel- und Insektenschlag**, der durch die Rotorblätter verursacht werden kann. Die Auswirkungen beschränken sich nicht nur auf Lebensräume in der Luft, sondern Offshore-Anlagen können auch **marine Ökosysteme negativ beeinflussen**. Ebenfalls kritisch ist die **begrenzte Recyclingfähigkeit** einiger Windkraftanlagenkomponenten. Rotorblätter werden oft thermisch verwertet, wenn sie außer Betrieb genommen werden, was wiederum zu Abgasemissionen führt.

Ökonomische Faktoren:

Windkraftanlagen erweisen sich bereits ohne staatliche Subventionen als **wirtschaftlich** attraktiv. Die **Gestehungskosten** sind **niedrig**, sie liegen in etwa bei 0,08-0,09 Cent/kWh. Allerdings führen die **Inflation** und **gestiegene Zinsen** zu einer **Verteuerung der Anlagen**. Besondere Herausforderungen ergeben sich aus **Lieferkettenproblemen**, die auch durch den Ukraine-Konflikt verursacht werden. Insbesondere Umspannwerke und Transformatoren (Komponenten mit Elektrostahl) sind betroffen. Da europäische Hersteller für die kommenden Jahre komplett ausgelastet sind, müssen auch Alternativen im Ausland, wie China, Indien und Südamerika, in Betracht gezogen werden.

Gesellschaftliche Faktoren:

Obwohl Windenergie unter den eE den größten Beitrag zur Stromerzeugung leistet, ist die **Akzeptanz von Onshore-Anlagen** in der Gesellschaft aufgrund der Lärmemissionen, des Schattenwurfes und der großen Sichtbarkeit **gering**. Allmählich nimmt diese aber zu, da die Vorteile im Vergleich zu den hohen Preisen der fossilen Energieträger erkannt werden. **Offshore-Anlagen** haben hingegen **keine Akzeptanzprobleme**, da diese außerhalb der Lebensräume der Bevölkerung installiert sind.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER WINDENERGIENUTZUNG

Politische Faktoren:

Die **Ausbaugeschwindigkeit** der Windenergie wurde in den letzten Jahren durch die Regierung mittels des Ausschreibungssystems **entschleunigt**. Die Gestaltung des zukünftigen Marktdesigns und wirtschaftlichen Rahmens ist entscheidend für die Investitionslandschaft. Für Investoren sind speziell **Anreize** erforderlich für 1. den **Zubau von Anlagen**, 2. die **Sektorenkopplung** und 3. Investitionen in **Speicher**. Das aktuelle EEG ist "speicherunfreundlich", da Windparkbetreiber monetär entschädigt werden, wenn Windräder aufgrund von Netzüberlastung abgeschaltet werden müssen. Eine **EEG-Reform** ist zwingend **notwendig** und auch **Genehmigungsverfahren müssen beschleunigt und vereinfacht werden**. Obwohl sich die Regierung wünscht, dass Unternehmen wieder **in Deutschland produzieren**, verlagern Firmen wie Vestas, Enercon und Nordex ihre Produktion derzeit vermehrt ins Ausland. Diese Entwicklung ist vor allem auf die geringeren Energie- und Lohnkosten zurückzuführen. Vor allem Offshore-Windenergie hat laut Expertenmeinung von der Politik in den letzten Jahren zu wenig Aufmerksamkeit erhalten. Diese Aussage spiegelt sich auch in den Kennzahlen der installierten Onshore- und Offshore-Leistung wider.

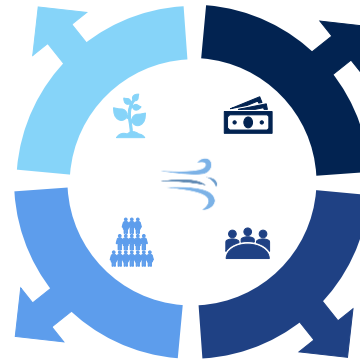
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG DER WINDENERGIENUTZUNG

Ökologische Faktoren:

- Vogel- und Insektenschlag durch Rotorblätter
- Offshore-Anlagen beeinflussen auch marine Ökosysteme negativ
- Eingeschränkte Recyclingfähigkeit einiger Komponenten, z.B. werden Rotorblätter thermisch verwertet, was Abgasemissionen verursacht

Gesellschaftliche Faktoren:

- Windenergie leistet größten Beitrag unter den erneuerbaren Energieträgern zur Stromerzeugung
- Onshore-Anlagen: geringe Akzeptanz wegen Lärmemissionen, Schattenwurf, Sichtbarkeit
- Akzeptanz steigt langsam aufgrund Vorteile gegenüber fossilen Energieträgern.
- Offshore-Anlagen: keine Akzeptanzprobleme, da außerhalb bewohnter Gebiete



Ökonomische Faktoren:

- Windkraftanlagen sind ohne Subventionen wirtschaftlich, Gestehungskosten bei 0,08-0,09 Cent/kWh
- Inflation und Zinsanstiege verteuern die Anlagen
- Lieferkettenprobleme durch Ukraine-Konflikt (besonders Umspannwerke und Transformatoren)
- Europäische Hersteller ausgelastet, Alternativen: China, Indien, Südamerika

Politische Faktoren:

- Zukünftiges Marktdesign entscheidend für Investitionslandschaft
- Notwendige Anreize für Zubau, Sektorenkopplung, Speicher
- Aktuelles EEG "speicherunfreundlich,, deshalb Reform erforderlich
- Beschleunigung von Genehmigungsverfahren notwendig
- Firmen wie Vestas, Enercon, Nordex verlagern Produktion ins Ausland
- Offshore-Windenergie von Politik vernachlässigt, niedrigere installierte Leistung

NUTZUNG



Die Windenergie sowohl Offshore als auch Onshore wird **weiterhin stark ausgebaut** und wird eine bedeutende Rolle im Kontext der **Power-to-X-Technologien** spielen, insbesondere bei der **Wasserstoffproduktion**.



Onshore-Ausbau auf stillgelegten Tagebau- und Militärfächen mit vorhandener Infrastruktur.



Kombination mit Batteriespeichersystemen werden voraussichtlich verstärkt zum Einsatz kommen.

ENTWICKLUNG



Die Wirkungsgradsteigerung von Windkraftanlagen erreicht seine Grenzen, aber Effizienzsteigerungen können durch **höhere Bauweise und Rotorblattgröße** erzielt werden.



Reduzierung der Lärmemissionen durch optimiertes Design der Rotorblätter.



Materialeinsparungen beim Anlagenbau zur Kosten- und Ressourcenschonung.



Erhöhung der Betriebsstunden durch Erweiterung der Nutzbarkeitsgrenzen: Beginn der Stromproduktion bei geringen Windstärken und vermeiden von Abschaltungen bei hohen Windstärken.



Konzeptionierung der Anlagen, so dass diese **Systemleistungen** übernehmen, die bisher von fossilen Kraftwerken bereitgestellt wurden.



Trend zur **datenbasierten Instandhaltung** für optimierte Service- und Wartungsintervalle sowie zweiteiligen Rotorblättern aufgrund logistischer Herausforderungen bei der Anlieferung dieser.



Potenzielle Forschungsrichtungen: **Kleine Windräder für den privaten Gebrauch, Kites**.

IV. Ergebnisse der Studie	29
1. Ebene 0 – Erneuerbare Energien	31
2. Ebene 1 – Primärenergiequellen	46
a) Biomasse	47
b) Geothermie	56
c) Solarenergie	65
d) Windenergie	72
3. Ebene 1 – Sekundärenergiequellen	80
a) „Grüner“ Wasserstoff	81
b) E-Fuels	91
c) Biofuels	99
4. Ebene 2 und 3 – Energiesystem- und -komponentenebene	107
a) Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien	108
b) Energiespeicher- und Transportsysteme	119
c) Energiewandlungssysteme für Nutzenergie	129

„GRÜNER“ WASSERSTOFF



i

Status quo der Nutzung
von Wasserstoff

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Wasserstoffnutzung

iii

Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends im Bereich
Wasserstoff

VOR- UND NACHTEILE FÜR DIE NUTZUNG VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF

Wasserstoff...



- ... ist langfristig speicherbar und somit auch zur saisonalen Überbrückung geeignet.
- ... ist in verschiedenen Aggregatzuständen transportierbar.
- ... ist flexibel und grundlastfähig.
- ... ist mittels Elektrolyse „grün“ herstellbar.
- ... ist nicht giftig oder umweltschädlich.
- ... ist gut in Derivate oder Strom wandelbar.
- ... ist ein seit vielen Jahren genutzter Stoff und somit bekannt und beherrschbar.
- ... ist in den aktuellen Nutzungssystemen anwendbar, wenn in diesen nur einige Komponenten angepasst werden.
- ... ist sektorenübergreifend nutzbar, vor allem in Sektoren, in denen Strom keine Alternative für die Dekarbonisierung ist.

VORTEILE

NACHTEILE

- ... ist nicht verlustfrei speicherbar. Er diffundiert durch das umgebende Material.
- ... sorgt für Materialversprödungen.
- ... hat eine geringe Speichereffizienz aufgrund der geringen Energiedichte.
- ... ist kein effizientes Medium, da mit jeder Umwandlung Wirkungsgradverluste einhergehen.
- ... verbrennung ist umwelt- und gesundheitsschädigend, da Stickoxide entstehen.
- ... ist leicht entzündlich.
- ... ist aufgrund der vielen Umwandlungsschritte sehr teuer.
- ... („grüner“) ist derzeit kaum verfügbar und benötigt einen enormen Ausbau eE.
- ... ist in flüssiger Form nur mit großem Aufwand speicher- und transportierbar.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF

Herstellung



Verschiedene Power-to-Gas-Anlagen haben die **technische Machbarkeit** der Herstellung von „grünem Wasserstoff“ bereits unter Beweis gestellt. In zahlreichen Forschungs- und Pilotanlagen wird das Strom-zu-Gas-Verfahren weiterentwickelt.



Im Jahr **2022** betrug die deutsche **installierte Produktionsleistung** für „grünen“ Wasserstoff **0,08 Gigawatt**. In absoluten Zahlen sind das 50 Power-to-Gas-Anlagen in Deutschland, die grünen Wasserstoff produzierten. (Zukunft Gas (2023))



Die meisten Anlagen sind Demonstrations- oder Forschungsanlagen. Andere sind aus Forschungsprojekten hervorgegangen. Vor allem größere Produktionsstätte sind derzeit noch in der Planung oder am Anfang der Bauphase. (Zukunft Gas (2023))



95 % des in Deutschland genutzten und produzierten Wasserstoffs ist „**grau**“, also aus fossilen Energieträgern hergestellt. (Kruse/Wedemeier (2021))

Nutzung



Aktuell kommen die 57 Terrawattstunden „grau“ produzierter Wasserstoff hauptsächlich in der **chemischen Industrie** z.B. zur Düngemittel- oder Ethylenproduktion zur Anwendung.



In geringem Umfang findet Wasserstoff bereits in der **Mobilitätsbranche** Anwendung. Derzeit existieren ca. 100 Wasserstofftankstellen in Deutschland, die Busse und PKWs mit Brennstoffzellenantrieb bzw. Verbrennungsmotor versorgen können.

...ZUR HERSTELLUNG



Elektrolyseure spalten Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff auf.

Die bekanntesten Arten von Elektrolyseuren sind:

- Alkalische Elektrolyseure (AEL)
- Proton-Exchange-Membran-Elektrolyseure (PEM)
- Hochtemperatur-Elektrolyseure (HTEL)
 - Festoxid-Elektrolyseure (SOE)
- Nickel-Eisen-Elektrolyseure
- Anionenaustauschmembran-Elektrolyseur (AEM)

...ZUR SPEICHERUNG



Mittels **Druckspeichern** lässt sich Wasserstoff in gasförmiger Form zwischen 200 bis 700 bar in komprimierter Form speichern. Durch die Kompression wird die Energiedichte des Wasserstoffs erhöht, so dass auf gleichem Volumen, mehr Energie gespeichert werden kann.



Flüssigspeicher werden genutzt, um Wasserstoff in flüssiger Form bei niedrigen Temperaturen zu speichern. Diese Speichermethode ermöglicht eine höhere Energiedichte als die Speicherung in gasförmiger Form.



Pipelines dienen dem Transport des gasförmigen Wasserstoffs. Neben der Transportfunktion dient das Pipelinennetz aber auch als Zwischenspeicher für den produzierten Wasserstoff.

...ZUR NUTZBARMACHUNG

Zur Nutzbarmachung von Wasserstoff, also zur Umwandlung von Wasserstoff in Strom oder Wärme können je nach Anwendungspfad verschiedene Systeme zur Anwendung kommen.



Brennstoffzellen wandeln gasförmigen Wasserstoff unter Zugabe von Sauerstoff in Strom und Wasser um. Ähnlich wie bei den Elektrolyseuren gibt es verschiedene Arten von Brennstoffzellen, die sich in ihrer Funktionsweise unterscheiden.



Eine weitere Möglichkeit der Nutzbarmachung von gasförmigem Wasserstoff ist die Verbrennung in **KWK-Anlagen** wie **BHKWs** oder **Gasturbinen**. Somit kann sowohl die Abwärme als auch der, durch den Generator, erzeugte Strom genutzt werden.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF

Ökologische Faktoren:

Der ökologische Einfluss der Elektrolyse ist durch mehrere Faktoren geprägt. Der **hohe Wasserbedarf** dieser Technologie steht im Kontrast zur zunehmenden Wasserknappheit auf der Erde. Zudem sind **Edelmetalle** sowohl für die Herstellung als auch die Nutzung der Systeme erforderlich. Außerdem benötigt die Produktion von Wasserstoff **viel Energie**. Ein zusätzliches Risiko, das insbesondere bei der Wasserstoffproduktion im globalen Süden auftreten kann, bezieht sich auf die **Meerwasserentsalzung**. Die Rückführung der Reststoffe ins Meer bei diesem Prozess kann die Meerestemperatur weiter erhöhen, was weitere ökologische Bedenken aufwirft.

Ökonomische Faktoren:

Bislang ist die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff aufgrund **hoher Kosten** noch nicht flächendeckend realisierbar. Diese Kosten resultieren einerseits aus den Kapitalausgaben für zusätzliche Systeme und Anlagen zur Umwandlung sowie aus den gegenwärtig noch beträchtlichen Wirkungsgradverlusten bei der Umwandlung und Speicherung. Gegenwärtig ist die **Anlagentechnik** für die Herstellung und Nutzung von „grünem“ Wasserstoff **kaum vorhanden**, was zu hohen Preisen und langen Lieferzeiten führt.

Es wird erwartet, dass sowohl der Wasserstoff selbst als auch die entsprechenden Anlagen in den kommenden Jahren dank **Skaleneffekten, technologisches Lernen** und weiterer **Forschung und Entwicklungsarbeit** kostengünstiger werden. Der zukünftige Preis für „grünen“ Wasserstoff bleibt allerdings schwer abzuschätzen. Experten gehen davon aus, dass Strom, der mithilfe von „grünem“ Wasserstoff erzeugt wird, zwischen **0,50 und 1 € pro kWh** kosten könnte.

Die Wirtschaftlichkeit von „grünem“ Wasserstoff kann auch erheblich von politischen Maßnahmen beeinflusst werden, wie beispielsweise der Besteuerung konventionellen Wasserstoffs oder der **Subventionierung** von „grünem“ Wasserstoff.

Gesellschaftliche Faktoren:

Bislang verzeichnet die Gesellschaft eine **positive Stimmung**, da das Thema „grüner Wasserstoff“ von der Politik in hohem Maße gelobt wird und bisher keine Informationen über mögliche Nachteile in die öffentliche Diskussion gelangt sind. Somit ist ein wesentlicher Faktor für die zukünftige Akzeptanz, dass es keine „Showstopper“ gibt. Die Akzeptanz wird ebenfalls stark vom **Preis und der Zuverlässigkeit** von Wasserstoff beeinflusst werden. Es stellt sich die Frage, ob dieser über oder unter den Kosten für fossile Alternativen liegen wird. Die Aus- und Weiterbildung von **Fachpersonal** für die zukünftigen Energieträger darf in diesem Kontext keinesfalls vernachlässigt werden. Es besteht auch die Gefahr sozialer Risiken im Zusammenhang mit der Wasserstoffproduktion im globalen Süden wie z.B. die Missachtung von Arbeitnehmerstandards und Landgrabbing.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF

Politische Faktoren:

Der aktuelle rechtliche Rahmen hinkt der dynamischen Realität in Punkto Wasserstoff deutlich hinterher und erfordert **dringende Anpassungen**. Die komplexen und veralteten Regelungen, Gesetzen und Verordnungen hemmen den raschen Ausbau der Wasserstoffwirtschaft. Ein Beispiel hierfür ist die Begrenzung der Beimischungsquoten im Erdgasnetz, die den Transport von 100 % Wasserstoff verhindert. Bedeutende rechtliche Rahmenwerke im Kontext der „grünen“ Wasserstoffwirtschaft sind der **Delegated Act** und die **RED II Richtlinie** auf europäischer Ebene sowie die **Nationale Wasserstoffstrategie** auf Bundesebene. Zur Erreichung der in den Strategiepapieren gesetzten Ziele, fördert der Bund verschiedenste Forschungsprojekte zum Thema Elektrolyseure sowie Wasserstoff-Infrastruktur.

Die zukünftige Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft hängt stark von politischen Entscheidungen ab. Verschiedene Gesetzesentwürfe sind in Vorbereitung, etwa für **Herkunftsnachweise** von "grün" produziertem Wasserstoff. Experten zufolge sollen künftig auch **Contracts for Difference** für Wasserstoff eingeführt werden, um Investitionsunsicherheiten zu minimieren.

Der Grad der Anwendbarkeit von „grünem“ Wasserstoff wird von der Regierung teilweise optimistischer dargestellt als er tatsächlich ist. Noch steht es zur Debatte, ob eine **staatliche Wasserstoff-Gesellschaft** gegründet werden soll, die die Infrastrukturen verwaltet. Dies führt zu **Planungsunsicherheiten** bei Investoren, was wiederum Investitionen in Infrastruktur verzögert. Diese Planungsunsicherheit betrifft nicht nur die infrastrukturellen Bereiche, sondern auch Speicher- und Elektrolysetechnologien.

Die zukünftige Gestaltung der Wasserstoffimportrouten, der **Hydrogen Supply Chain**, hängt in erster Linie von der Art und Weise ab, wie und mit welchen Ländern die Regierung die Zusammenarbeit gestalten wird.

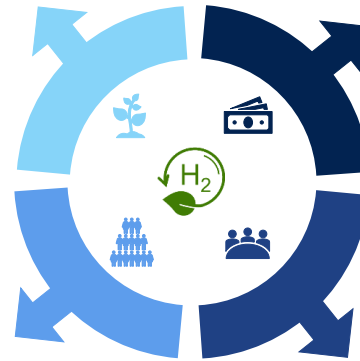
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON „GRÜNEM“ WASSERSTOFF

Ökologische Faktoren:

- Hoher Wasserbedarf bei steigender Wasserknappheit
- Edelmetalle in Herstellungs- und Nutzungssystemen benötigt
- Wasserstoffproduktion erfordert viel Energie
- Speziell bei Wasserstoffproduktion im globalen Süden: Wasserknappheit, Rückleitung der Reste der Meerwasserentsalzung erhöht Meerestemperatur

Gesellschaftliche Faktoren:

- Gesellschaft bisher positiv gestimmt, Politik betont Thema, keine Nachteile bekannt
- Akzeptanz abhängig von Wasserstoffpreis und Zuverlässigkeit
- Aus- und Weiterbildung von Fachpersonal essentiell
- Soziale Risiken bei Wasserstoffproduktion im globalen Süden: Arbeitnehmerstandards gefährdet, Landgrabbing möglich












Ökonomische Faktoren:

- Kosten von "grünem" Wasserstoff bisher zu hoch für breite Anwendung
- Hohe Kosten durch zusätzliche Systeme, Umwandlungsverluste und begrenzte Anlagentechnik
- Erwartete Kostensenkung durch Skaleneffekte, technologischen Fortschritt und F&E
- Zukünftiger Preis schwer abzuschätzen, Experten erwarten 0,50 - 1 €/kWh
- Politik kann Wirtschaftlichkeit beeinflussen: Besteuerung von konventionellem Wasserstoff, Subventionen für "grünen" Wasserstoff









Politische Faktoren:

- Komplexe, veraltete Regelungen bremsen Wasserstoffwirtschaft, dringender Anpassungsbedarf
- Bedeutende rechtliche Rahmenbedingungen: Delegated Act, RED II Richtlinie, Nationale Wasserstoffstrategie
- Wasserstoffzukunft abhängig von politischen Entscheidungen (auch Hydrogen Supply Chain)
- Contracts for Difference sollen Investitionsunsicherheiten mindern
- Debatte um Gründung staatlicher Wasserstoff-Gesellschaft, Planungsunsicherheit behindert Investitionen in Infrastruktur






HERSTELLUNG

-  Zur Prognostizierung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs existieren eine Bandbreite an Studien, die aufgrund der großen Ungewissheit in den Ergebnissen stark dissoziieren.
-  Der geschätzte zukünftige **Wasserstoffbedarf** wird **im Jahr 2050** zwischen **100-500 Terrawattstunden** liegen. Dabei soll ein Drittel des „grünen“ Wasserstoffs domestisch produziert und die restlichen zwei Drittel durch Importe gedeckt werden.
-  Die **Wasserstoffherstellung** könnte mittels **Solarenergie im globalen Süden** wie Spanien, Portugal oder der MENA-Region kostengünstig realisiert werden.
-  Auch der Einsatz von **Windkraft** in den Ländern wie Norwegen oder anderen **Küstenregionen** ist denkbar.
-  Dieser kostengünstig hergestellte „grüne“ Wasserstoff kann anschließend **mittels Pipelinesystemen** nach Deutschland importiert werden.
-  Die Frage, ob Wasserstoff in Form von Derivaten wie Ammoniak, LOHC oder Methanol oder in reiner Form importiert wird, kann noch nicht abschließend geklärt werden.
-  Die Wasserstoffproduktion **in Deutschland** mittels Elektrolyse erfordert den **weiteren Ausbau von eE**, um eine hinreichend große Menge an Wasserstoff verfügbar zu machen.
-  Als systemisch sinnvoll wird die zukünftige domestische Elektrolyse an Offshore-Windparks im Norden Deutschlands eingeschätzt.
-  Die Frage der zukünftigen **rechtlichen Zulassung** von **Pyrolyse, Dampfreformierung** und **Hochtemperaturprozessen** (wie z.B. dem Iod-Schwefel-Verfahren) zur Gewährleistung einer ausreichenden Wasserstoffproduktion bleibt bisher **ungelöst**.

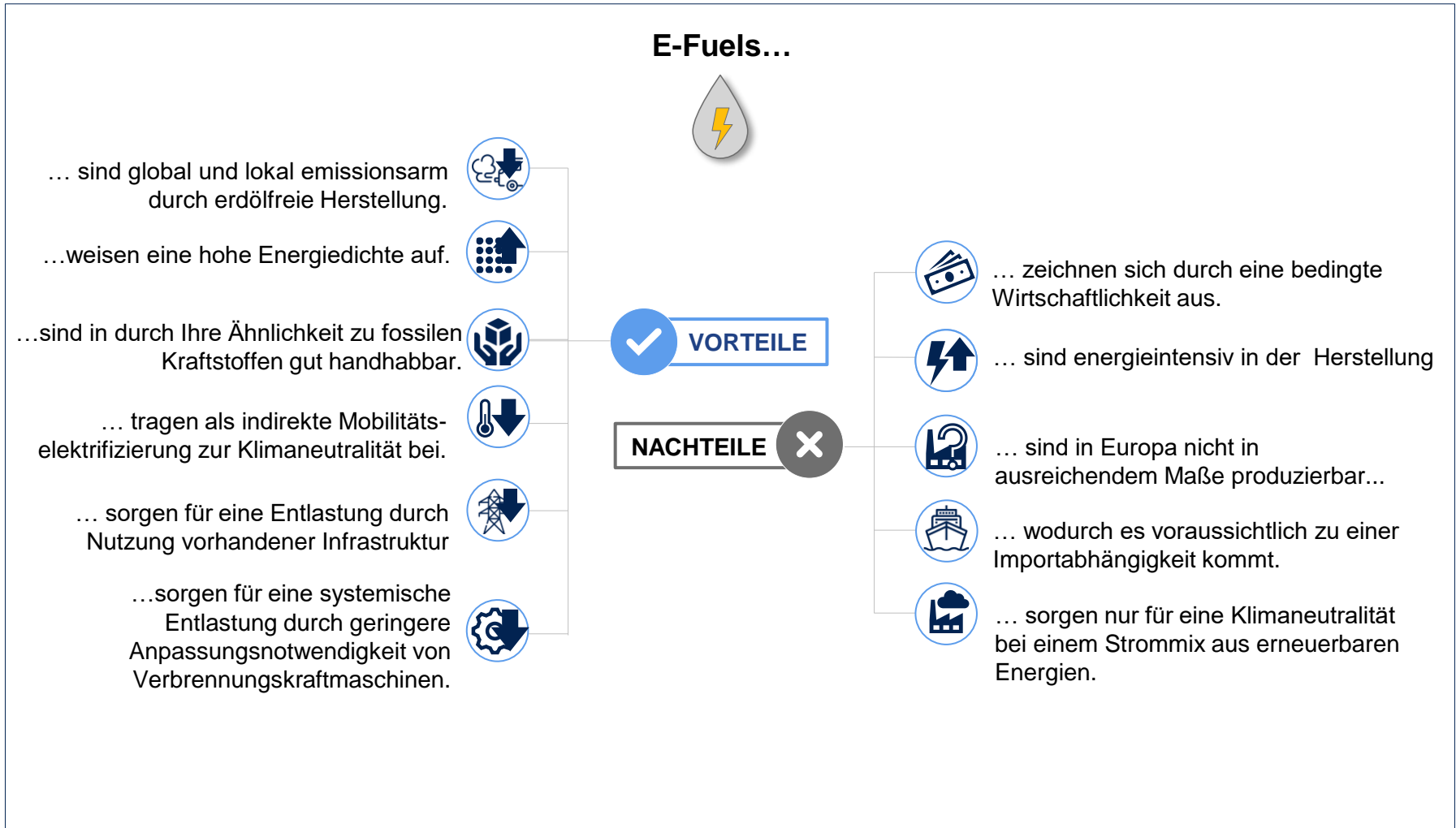
NUTZUNG

-  „Grüner“ Wasserstoff sollte aufgrund der geringen Verfügbarkeit zunächst nur in **No-Regret Szenarien** Anwendung finden. Welche Anwendungspfade das im Detail sein werden, ist bisher noch nicht bekannt.
-  Die Experten erwarten, dass Wasserstoff in erster Instanz zur **Dekarbonisierung von Hochtemperatur-Verbrennungsprozessen** der Industrie, aufgrund der Emissionsintensivität dieser, eingesetzt wird. Beispiele für diese Industriezweige sind die **Stahl- oder Zementproduktion**.
-  Des Weiteren wird „grüner“ Wasserstoff als Grundstoff in der **chemischen Industrie** benötigt wie beispielsweise der Düngemittelproduktion.
-  Je nach zukünftigem Nutzungsgrad von **synthetischen Kraftstoffen** (e-Fuels), spielt „grüner“ Wasserstoff bei der Herstellung dieser eine elementare Rolle.
-  Der Einsatz von „grünem“ Wasserstoff in der **Halbleiter- und Glasindustrie** ist derzeit ebenso in Planung.
-  Große Hoffnung bietet Wasserstoff auch als **Speichermedium** zum Ausgleich der volatilen eE. Die Speicherung ist beispielsweise in großen Mengen in **Gaskavernen** oder **Salzstollen** denkbar. Die Rückverstromung könnte zentral über Gaskraftwerke erfolgen.
-  Im **Personenverkehr** wird Wasserstoff voraussichtlich **nicht konkurrenzfähig** sein. Dies liegt zum einen daran, dass die technologische Entwicklung von batteriebetriebenen Fahrzeugen bereits sehr weit vorangeschritten ist. Zum anderen sorgen die Umwandlungsverluste bei der Herstellung dafür, dass Wasserstoff wesentlich teurer als Strom sein wird.
-  Auch die Nutzung von „grünem“ Wasserstoff zur **Beheizung privater Haushalte** wird aufgrund der geringen Kapazitäten von den Experten **ausgeschlossen**.


ENTWICKLUNG


-  International wird die Wasserstoffherstellung und -nutzung weiter voranschreiten. Die Länder werden sich in der **Hydrogen Supply Chain positionieren**. Deutschland wird dabei voraussichtlich Wasserstoffimporteureur und Technologieexporteur werden.
-  Die **Transportrouten** per Schiff und Pipeline werden ausgewählt und festgelegt werden. Die European Hydrogen Backbone wird realisiert werden.
-  Das „**Henne-Ei**“ **Problem** stellt sich dar, wenn es um den Beginn von Investitionen im Wasserstoffsektor geht: Steigen zuerst Unternehmen ein, die Wasserstoff nutzen möchten, oder Infrastrukturbetreiber sowie Betreiber von Wind- und Solarparks?
-  Vor allem für die Nutzung der Elektrolysetechnologien müssen **regionale Konzepte** entwickelt werden, die Erzeuger und Verbraucher lokal zusammen bringen, denn jeder Transportkilometer verteuert den Wasserstoff.
-  Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Weiterentwicklung von **Speichertechnologien** für sowohl gasförmigen als auch flüssigen „grünen“ Wasserstoff.

VOR- UND NACHTEILE FÜR DIE NUTZUNG VON E-FUELS




AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON E-FUELS


- 
- Erste Test und **Pilotanlagen** sind im Aufbau und Betrieb. Zu Diesen gehören auszugsweise:
- **Haru Oni**, Chile, voraussichtliches Produktionsvolumen: **130.000 Liter pro Jahr**
 - **Höchst**, Deutschland, voraussichtliches Produktionsvolumen: **2.500 Tonnen pro Jahr**



Der Einsatz von e-Fuels ist abhängig von der **Versorgung mit erneuerbaren Energien** beziehungsweise den erneuerbar produzierten Rohstoffen Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Dadurch bleibt ein **flächendeckender Einsatz unsicher** und ist momentan noch nicht erfolgt.



Die Technologie der Syntheseprozesse ist mit einem **TRL von 9** voll entwickelt, dennoch findet eine ständige Weiterentwicklung statt



Das größte **Hindernis** ist die Trennung von CO_2 zu CO für die Synthesegaserzeugung. Dies geschieht zum Teil über einen RWGS – **Reverse Wassergas Shift Reaktor** mit **TRL 6**, sowie die **CO-Elektrolyse** von H_2O und CO_2 mit **TRL 3-4**

...ZUR HERSTELLUNG

Zur Herstellung von e-Fuels sind **diverse technische Systeme** einsetzbar. Sie lassen sich unterteilen in **Elektrolyseure** zur Wasserstoffproduktion, **CO₂-Abscheider** zur Bereitstellung des Kohlenstoffmonoxids und **Syntheseanlagen** für die Weiterverarbeitung des Synthesegases.



Eingesetzte **Komponenten** in Syntheseanlagen sind:

- **Kompressoren** für die Gasdruckerzeugung
- **Wärmetauscher** zur Stabilisierung der Reaktionsbedingungen
- **Chemische Reaktoren** für den Syntheseprozess
- **Rektifikationskolonne** zur Kraftstoffaufbereitung
- Optional: **RWGS – Reverse Wassergas Shift Reaktor** zur Spaltung von CO₂ in Kohlenstoffmonoxid und Sauerstoff

...ZUR SPEICHERUNG



Die Speicherung flüssiger e-Fuels erfolgt in **konventionellen Kraftstofftanks**.



Die Speicherung von gasförmigen eFuels erfolgt in **konventionellen Flüssiggastanks**

...ZUR NUTZBARMACHUNG

Die Nutzung von e-Fuels, also die Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie in andere Energieformen ist **abhängig vom Anwendungspfad**. Zum Einsatz kommen sowohl konventionelle als auch fortschrittliche technische Systeme.



Die Nutzung mancher e-Fuels, wie beispielsweise **Methanol** und **Ammoniak** kann über **Brennstoffzellen** erfolgen.



Die Nutzung von e-Fuels ist generell in **Verbrennungskraftmaschinen** wie **Turbinen** und **Verbrennungsmotoren** möglich.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON E-FUELS

Ökologische Einflussfaktoren:

E-Fuels eröffnen die Möglichkeit der **Klimaneutralität** durch Implementierung eines **CO₂-Kreislaufs**, wenn CO₂ aus atmosphärischer Luft gewonnen wird. Sie stellen momentan zusammen Biofuels die einzige **Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Luftfahrtbranche** dar. E-Fuels sind den konventionellen Kraftstoffen in ihren Eigenschaften gleich und daher **wasser- und gesundheitsgefährdend**.

Ökonomische Einflussfaktoren:

Ökonomische Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung von e-Fuels betreffen die **Kostenentwicklung** für eine **Strombereitstellung** aus erneuerbaren Quellen, beziehungsweise die **Kostenentwicklung von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Kohlenstoffdioxid**. Zu letzteren Beiden ist explizit die **Regulatorik von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Kohlenstoffdioxid** ausschlaggebend. Ein ebenso relevanter ökonomischer Einflussfaktor ist die **technologische Weiterentwicklung** und der damit zusammenhängenden der **Kosten- und Energieeffizienz von Elektrolyseuren, DAC-Anlagen und den generellen Syntheseprozessen**.

Gesellschaftliche Einflussfaktoren:

In einem erheblichen Maße trägt die **Akzeptanz von Alternativen zu fossilen Kraftstoffen**, aber auch die **Akzeptanz von alternativen Antriebskonzepten** als solches zu den gesellschaftlichen Einflussfaktoren bei. Die **technische Weiterentwicklung einer direkten Elektrifizierung** von Flugzeugen, Schiffen, LKW und KFZ eröffnet Nutzungspfade die e-Fuels unattraktiv machen. Als weiterer gesellschaftlicher Einflussfaktor ist ebenfalls die **Kostenentwicklung des Ölpreises** im Vergleich zum e-Fuel Preis zu sehen. Die Nutzung von e-Fuels wird dabei aus gesellschaftlicher Sicht attraktiver, sobald der Ölpreis unterboten wird. Dies ist auch durch regulatorisch Maßnahmen wie eine CO₂-Steuer erreichbar. Das es bei e-Fuels voraussichtlich zu einer **Importabhängigkeit** kommen wird, sind unter bestimmten Voraussetzungen eine **heimische Kraftstoffproduktion** aus Biomasse, oder **alternative Antriebskonzepte** attraktiver.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON E-FUELS

Politische Einflussfaktoren:

Politische Einflussfaktoren, die dazu dienen eine **Investitionssicherheit** zu geben, stehen häufig im Zusammenhang mit der Entwicklung einer Regulatorik bezüglich diverser **Kraftstoffverordnungen und Beimischungsquoten**. So haben e-Fuels zuerst einen Freigabeprozess zu bestehen, um als Alternative zu konventionellen Kraftstoffen in Betracht gezogen zu werden. Dabei spielt natürlich ebenfalls die Entwicklung der zukünftigen **Regulatorik für Verbrennungskraftmaschinen** eine tragende Rolle. Gerade im **Luft- und Schifffahrtsbereich** ist die Regulatorik für diverse kurzprozessige e-Fuels, wie beispielsweise e-Methanol und e-Ammoniak, abhängig von der Geschwindigkeit der **weltweiten Transformation von erdölbasierten Kraftstoffen** zu grünen Alternativen. Eine weitere Bedeutung nimmt die Geschwindigkeit der **Kostendynamik für Erdölbasierte Produkte** ein. Es ist davon auszugehen, dass bei einem hohen Erdölpreis der Einsatz von alternativen Treibstoffen wahrscheinlicher wird. Im europäischen Kontext erlangen Rahmenbedingungen für eine **Wasserstoffnutzung, -erzeugung und -infrastruktur** ebenfalls Relevanz.

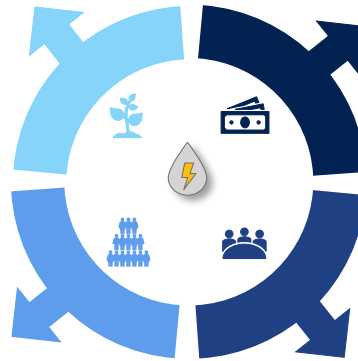
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON E-FUELS

Ökologische Faktoren:

- Klimaneutral durch Implementierung eines CO₂-Kreislaufgedankens, wenn CO₂ aus atmosphärischer Luft gewonnen wird
- Derzeit einzige Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Luftfahrtbranche
- E-Fuels sind, wie konventionelle Kraftstoffe teils wassergefährdend

Gesellschaftliche Faktoren:

- Akzeptanz von Alternativen zu fossilen Kraftstoffen, aber auch die Akzeptanz von alternativen Antriebskonzepten
- Technische Weiterentwicklung von Anwendern eröffnet Nutzungspfade die e-Fuels unattraktiv machen
- Kostenentwicklung des e-Fuelpreises im Vergleich zum Rohölpreis
- Importabhängigkeit macht eine heimische Kraftstoffproduktion aus Biomasse, oder alternative Antriebskonzepte attraktiver





Ökonomische Faktoren:

- Kostenentwicklung für Strombereitstellung
- Kostenentwicklung und Regulatorik von grünem Wasserstoff und erneuerbaren CO₂
- Technologische Weiterentwicklung und Kosteneffizienz von Rohstoffbereitstellungs- und Syntheseprozessen
- Weiterentwicklung und Kostendegression von Antriebsalternativen



Politische Faktoren:

- Regulatorik bezüglich der Kraftstoffverordnungen und Beimischungsquoten
- Ungesetzte Rahmenbedingungen für eine Wasserstoffnutzung, -erzeugung und -infrastruktur
- Entwicklung der zukünftigen Regulatorik für Verbrennungskraftmaschinen
- Regulatorik auch abhängig von der weltweiten Transformation von erdölbasierten Kraftstoffen zu grünen Alternativen sowie von der Kostendynamik für Erdölbasierte Produkte



HERSTELLUNG

- 
 Zur Herstellung von e-Fuels sind **diverse technische Systeme** einsetzbar. Sie lassen sich unterteilen in **Elektrolyseure** zur Wasserstoffproduktion, **CO₂-Abscheider** zur Bereitstellung des Kohlenstoffmonoxids und **Syntheseanlagen** für die Weiterverarbeitung des Synthesegases. Eine technische Entwicklung, die zu einer höheren Kosteneffizienz von Einzelkomponenten führt, beeinflusst die wirtschaftliche Herstellung von e-Fuels.
- 
 Für die Herstellung von e-Fuels werden große Mengen erneuerbarer Energie notwendig, weshalb eine Herstellung vorläufig auf kleinere Pilotanlagen begrenzt ist. Die Entwicklung der Stromgestehungskosten sowie der Stromverfügbarkeit beeinflusst maßgeblich eine Wirtschaftlichkeit von e-Fuels.

NUTZUNG

- 
 Notwendigkeit von e-Fuels zur **Dekarbonisierung von Luft- und Schifffahrt**
- 
 Anwendung von e-Fuels im **Schwerlastverkehr** aufgrund hoher **Energiedichte** wahrscheinlich

ENTWICKLUNG

- 
 Trend zur **Kostendegression** durch Lernkurveneffekt
- 
Blending mit konventionellen Kraftstoffen und Kombination mit Biofuels **als re-Fuel**

BIOFUELS

**i**

Status quo der Nutzung
von Biofuels

ii

Relevante technische
Systeme im Kontext der
Nutzung von Biofuels

iii

Politische, ökonomische,
ökologische und
gesellschaftliche
Einflussfaktoren

iv

Zukünftige Nutzungs-
und Entwicklungs-
trends im Bereich von
Biofuels

VOR- UND NACHTEILE FÜR DIE NUTZUNG VON BIOFUELS

Biofuels...



VORTEILE

NACHTEILE

... haben bei der Erzeugung einen geringeren Strombedarf als e-Fuels.



...bieten die Möglichkeit zur energetischen Reststoffnutzung.



...sind in durch Ihre Ähnlichkeit zu fossilen Kraftstoffen gut handhabbar.



... tragen als indirekte Mobilitäts-elektrifizierung zur Klimaneutralität bei.



... sind bereits auf dem Markt Verfügbar.



... sorgen für eine Entlastung durch Nutzung vorhandener Infrastruktur



...sorgen für eine systemische Entlastung durch geringere Anpassungsnotwendigkeit von Verbrennungskraftmaschinen.



...sind in Europa in großen Mengen herstellbar.



... erfordern eine höhere Aufbereitung des Synthesegases als bei e-Fuels





... sorgen für Flächennutzungskonflikte, da für den Rohstoffanbau ein Trade-Off zwischen Lebensmitteln und Kraftstoffen stattfindet...





... dadurch sind sie in ihrer Produktionskapazität stark begrenzt.

AKTUELLE EINSATZBEDINGUNGEN VON BIOFUELS

-  Erste Test und **Pilotanlagen** sind im Aufbau und Betrieb. Zu Diesen gehört auszugsweise:
 - **READi PtL-Pilotanlage**, Deutschland, voraussichtliches Produktionsvolumen: **100 Tonnen pro Jahr** (Sievers/Willner(2020), S. 293)

-  Biofuels werden bereits als Biodiesel, zum Beispiel durch die Firma VERBIO Vereinigte BioEnergie AG **hergestellt und vertrieben**

-  Die Technologie der Syntheseprozesse ist mit einem **TRL von 9** voll entwickelt, dennoch findet eine ständige Weiterentwicklung statt

- 
 - Das größte **Hindernis** ist die Trennung von CO₂ zu CO für die Synthesegaserzeugung. Dies geschieht zum Teil über einen RWGS – **Reverse Wassergas Shift Reaktor** mit **TRL 6**.
 - Derzeit ist der flächendeckende Einsatz von Biofuels unsicher, da **Flächennutzungskonflikte** für Anbauflächen die **Nutzungsfreigabe** weiterer biogener Reststoffe erfordern

...ZUR HERSTELLUNG

Zur Herstellung von Biofuels sind **diverse technische Systeme** einsetzbar. Sie lassen sich unterteilen in **Anlagen zur Biomasseaufbereitung** und **Syntheseanlagen** für die Weiterverarbeitung des Synthesegases. Eingesetzte **Komponenten** in **Syntheseanlagen** zur Biofuel Erzeugung sind **analog zu** denen für die Erzeugung von **e-Fuels**.



Biomasseaufbereitungsanlagen:

- **Biomassezerkleinerer**
- **Biomassetrockner**
- **Gas- und Feststoffpartikelabscheider**

...ZUR SPEICHERUNG



Die Speicherung flüssiger Biofuels erfolgt in **konventionellen Kraftstofftanks**.



Die Speicherung von gasförmigen Biofuels erfolgt in **konventionellen Flüssiggastanks**

...ZUR NUTZBARMACHUNG

Die Nutzung von Biofuels, also die Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie in andere Energieformen ist **abhängig vom Anwendungspfad**. Zum Einsatz kommen sowohl konventionelle als auch fortschrittliche technische Systeme.



Die Nutzung mancher Biofuels, wie beispielsweise **Methanol** und **Ammoniak** kann über **Brennstoffzellen** erfolgen.



Die Nutzung von Biofuels ist generell in **Verbrennungskraftmaschinen** wie **Turbinen** und **Verbrennungsmotoren** möglich.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON BIOFUELS

Ökologische Einflussfaktoren:

Biofuels eröffnen die Möglichkeit der **Klimaneutralität** durch Implementierung eines **CO₂-Kreislaufs**, DA CO₂ aus atmosphärischer Luft gewonnen und in natürlichen Prozessen gespeichert wird. Sie stellen momentan zusammen mit e-Fuels die einzige **Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Luftfahrtbranche** dar. Biofuels sind den konventionellen Kraftstoffen in ihren Eigenschaften gleich und daher **wasser- und gesundheitsgefährdend**.

Ökonomische Einflussfaktoren:

Ökonomische Einflussfaktoren für die zukünftige Entwicklung von Biofuels betreffen die **Bereitstellungskosten für grünen Wasserstoff und erneuerbares Kohlenstoffdioxid**. Dazu ist explizit die **Regulatorik von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Kohlenstoffdioxid** ausschlaggebend. Wie bei e-Fuels beeinflusst auch die **Ölpreisentwicklung** stark einen **kosteneffizienten Anlagenbetrieb**. Ein ebenso relevanter ökonomischer Einflussfaktor ist die **technologische Weiterentwicklung** und die damit zusammenhängende Steigerung einer **Kosten- und Energieeffizienz von Syntheseprozessen**.

Gesellschaftliche Einflussfaktoren:

In einem erheblichen Maße trägt die **Akzeptanz von Alternativen zu fossilen Kraftstoffen**, aber auch die **Akzeptanz von alternativen Antriebskonzepten** als solches zu den gesellschaftlichen Einflussfaktoren bei. Die **technische Weiterentwicklung einer direkten Elektrifizierung** von Flugzeugen, Schiffen, LKW und KFZ eröffnet Nutzungspfade die Biofuels unattraktiv machen. Als weiterer gesellschaftlicher Einflussfaktor ist ebenfalls die **Kostenentwicklung des Ölpreises** im Vergleich zum Biofuel-Preis zu sehen. Die Nutzung von Biofuels wird dabei aus gesellschaftlicher Sicht attraktiver, sobald der Ölpreis unterboten wird. Dies ist auch durch regulatorisch Maßnahmen wie eine CO₂-Steuer erreichbar. Zusätzlich steht eine Land- und **Flächennutzungsbestrebung für die Erzeugung der Rohstoffe von Biofuels** in zunehmender **Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung** und wird dadurch als gesellschaftlich kritisch gesehen. Da es bei e-Fuels voraussichtlich zu einer **Importabhängigkeit** kommen wird, ist unter bestimmten Voraussetzungen eine **heimische Kraftstoffproduktion** aus Biomasse dennoch attraktiver.

EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON BIOFUELS

Politische Einflussfaktoren:

Politische Einflussfaktoren, die dazu dienen eine **Investitionssicherheit** zu geben, stehen häufig im Zusammenhang mit der Entwicklung einer Regulatorik bezüglich diverser **Kraftstoffverordnungen und stärkerer Beimischungsquoten**. Dabei spielt ebenfalls die Entwicklung der zukünftigen **Regulatorik für Verbrennungskraftmaschinen** eine tragende Rolle. Gerade im **Luft- und Schifffahrtsbereich** sind Regelwerke für diverse Biofuels abhängig von der Geschwindigkeit der **weltweiten Transformation von erdölbasierten Kraftstoffen** zu grünen Alternativen (Detsios et al. (2023), S. 2). Eine weitere Bedeutung nimmt die Geschwindigkeit der **Kostendynamik für Erdölbasierte Produkte** ein. Es ist davon auszugehen, dass bei einem hohen Erdölpreis der Einsatz von alternativen Treibstoffen wahrscheinlicher wird. Im europäischen Kontext erlangt die Regulatorik für die **enzymatische Erzeugung von grünem Wasserstoff** ebenfalls Relevanz.

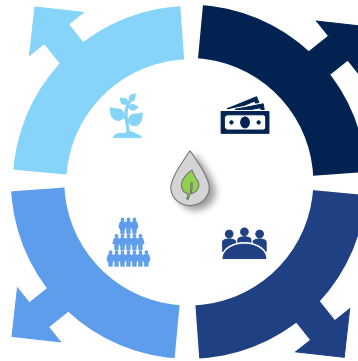
EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG VON BIOFUELS

Ökologische Faktoren:

- Klimaneutral durch Implementierung eines CO₂-Kreislauf Gedankens, wenn CO₂ aus atmosphärischer Luft gewonnen wird
- Derzeit einzige Möglichkeit zur Dekarbonisierung der Luftfahrtbranche
- Biofuels sind, wie konventionelle Kraftstoffe teils wassergefährdend

Gesellschaftliche Faktoren:

- Akzeptanz von alternativen Kraftstoffen und alternativen Antriebskonzepten
- Land- und Flächennutzungskonflikte für die Erzeugung der Rohstoffe für Biofuels
- Technische Weiterentwicklung von Anwendern eröffnet Nutzungspfade die Biofuels unattraktiv machen
- Kostenentwicklung des Biofuelpreises im Vergleich zum Ölpreis
- Die Importabhängigkeit von Alternativen macht eine heimische Kraftstoffproduktion aus Biomasse attraktiver




Ökonomische Faktoren:


- Kostenentwicklung für Strombereitstellung
- Kostenentwicklung und Regulatorik von grünem Wasserstoff und erneuerbaren CO₂
- Technologische Weiterentwicklung und Kosteneffizienz von Rohstoffbereitstellungs- und Syntheseprozessen
- Weiterentwicklung und Kostendegression von Antriebsalternativen

Politische Faktoren:


- Rahmenbedingungen für die Biomassennutzung
- Regulatorik für enzymatischen Wasserstoff
- Ungesetzte Rahmenbedingungen für die Wasserstoffnutzung, -erzeugung und -infrastruktur
- Entwicklung der zukünftigen Regulatorik für Verbrennungskraftmaschinen
- Regulatorik abhängig von der weltweiten Transformation von erdölbasierten Kraftstoffen zu grünen Alternativen sowie von der Kostendynamik für Erdölbasierte Produkte


HERSTELLUNG

 Zur Herstellung von Biofuels kommen **diverse technische Systeme** zum Einsatz. Sie lassen sich unterteilen in **Anlagen zur Biomasseaufbereitung**, **Partikelabscheider** zur Reinigung eines Synthesegases und **Syntheseanlagen** für die Weiterverarbeitung des Synthesegases.

 Durch technologische **Weiterentwicklung** von **Einzelkomponenten** und **Verfahrenswegen** wird eine Effizienzsteigerung bei der Herstellung von Biofuels vermutet. Hierbei werden durch die Verwendung neuartiger **biogener Prozesse** diverse **Reststoffe** für die **Kraftstoffsynthese** nutzbar gemacht.


NUTZUNG


 Notwendigkeit von Biofuels zur **Dekarbonisierung von Luft- und Schifffahrt**

 Anwendung von Biofuels im **Schwerlastverkehr** aufgrund hoher **Energiedichte** wahrscheinlich

ENTWICKLUNG

 Trend zur **Kostendegression** durch Lernkurveneffekt

 **Blending** mit konventionellen Kraftstoffen und Kombination mit Biofuels **als re-Fuel**

 Anerkennung weiterer biogener Rohstoffquellen sowie Stärkere Implementierung von Biofuels in den Kraftstoffverordnungen

IV. Ergebnisse der Studie	29
1. Ebene 0 – Erneuerbare Energien	31
2. Ebene 1 – Primärenergiequellen	46
a) Biomasse	47
b) Geothermie	56
c) Solarenergie	65
d) Windenergie	72
3. Ebene 1 – Sekundärenergiequellen	80
a) „Grüner“ Wasserstoff	81
b) E-Fuels	91
c) Biofuels	99
4. Ebene 2 und 3 – Energiesystem- und -komponentenebene	107
a) Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien	108
b) Energiespeicher- und Transportsysteme	119
c) Energiewandlungssysteme für Nutzenergie	129

Ausgewählte Energiewandlungssysteme für Primär- und Sekundärenergien

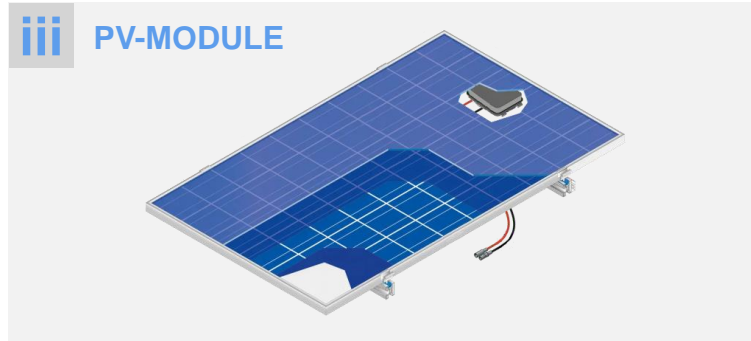
i BIOGASANLAGEN



ii ELEKTROLYSEURE



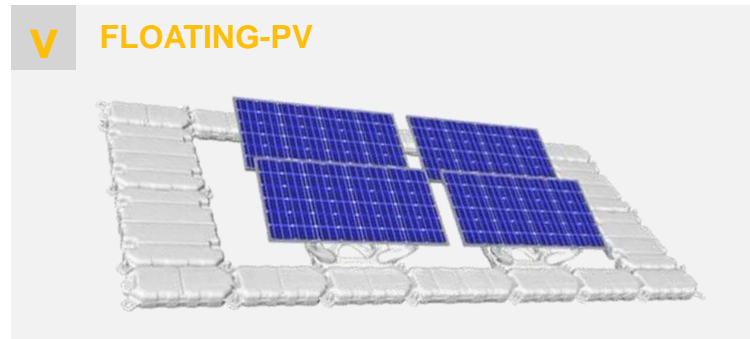
iii PV-MODULE



iv AGRI-PV



v FLOATING-PV



ÜBERBLICK BIOGASANLAGEN

Aktueller Entwicklungsstand & Einsatzbedingungen

- Biogasanlagen sind eine **etablierte Technologie**, die seit vielen Jahren eingesetzt wird.
- Das erzeugte Biogas kann zur **Stromerzeugung** (Verbrennung in BHKW) oder zur **Wärmeversorgung** (Wärmenetz, Erdgasnetz) genutzt werden.
- Derzeit werden Biogasanlagen schon flächendeckend bspw. Im Bereich der Landwirtschaft, Rest- und Abfallentsorgung oder in Klärwerken eingesetzt. Die Ausbaupotenziale sind beschränkt.



Forschungspotenzial & zukünftige Einsatzbedingungen

Verbesserungspotenzial Einzelkomponenten

- Derzeit wird verstärkt an **Enzymzugaben** gearbeitet, die das **Aufspalten** von Verbindungen im Fermenter beschleunigen.
- Das Substrat im Fermenter muss kontinuierlich umgerührt werden. Damit die Rührer keinen zusätzlichen Strom benötigen, sind **selbstumwälzende Anlagen** in Konzeption.
- Förderschnecken und Rührer weisen einen hohen Verschleiß aufgrund von Störstoffen wie Sand, auf. Für diese Komponenten werden weniger anfällige **Materialien** benötigt, die der Nutzungsumgebung standhalten.

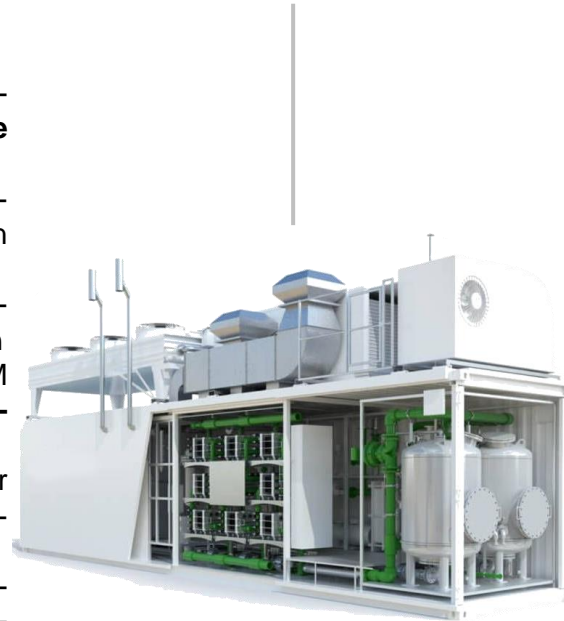
- **Biomethanisierung:** Eine Möglichkeit, den aus Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff zu nutzen, besteht darin, ihn in Biogasanlagen einzuspeisen. Das zusätzlich zum Biogas entstehende CO_2 kann durch Zugabe von H_2 zu CH_4 , also Methan synthetisiert werden, wodurch das bestehende Methangasnetz weiter genutzt werden kann. Herkömmliche Biogasanlagen sind momentan für diese Nutzung ungeeignet.
- Biogasanlagen könnten zur **Produktion von Säuren** wie Essigsäure, Propionsäure uvm. genutzt werden. Diese Säuren werden bisher aus Erdöl hergestellt. Für diesen Nutzungspfad sind noch weitere Forschung und Entwicklung notwendig.
- In der Entwicklungsphase sind auch **Prozesscontainer**, die anstelle der traditionellen stationären Betonfermenter eingesetzt werden. Diese Container bieten modulare Systeme, die sowohl in der Errichtung kosteneffizienter als auch anpassungsfähiger sind.

Bildquelle: https://cdn.daa.net/p/aufbau_biogasanlage_677b8f8870.jpg

ÜBERBLICK ELEKTROLYSEUR

Aktueller Entwicklungsstand

- **Produktionsbedingungen** von Elektrolyseuren sind **abhängig vom Use Case**
 - **Produktionskosten** sind durch Einsatz von Edelmetallen und seltenen Erden **hoch**
 - **Serienfertigung** kleiner PEM-Elektrolyseurtypen im **Automotivebereich**
 - **Handwerkliche Produktion** von PEM und SOEC Elektrolyseuren bei **großen Anlagendimensionen**
 - **Automatisierungsgrad** ist in der Fertigung durch hohe Präzisionsaufgaben **gering**
 - Die **Stackfertigung** von PEM Elektrolyseuren stellt einen **hohen Anspruch an Produktionstechnologie**
-
- Gängige **Beschichtungsverfahren** für Membranen sind:
 - Physical Vapour Deposition
 - Chemical Vapour Deposition
 - Aerosol Jet Printing



Aktuelle Einsatzbedingungen

- **Stationäre Anwendungen** bei Verfügbarkeit von günstiger erneuerbarer Energie
- Bei **volatilen Energiequellen** nur **PEM-Elektrolyseurtypen** einsetzbar
- Hohe **Anforderungen** an die **Stromversorgungsleistung** und **Wasserqualität**
- **Elektrolyseurplatzierung** nah an der **Stromquelle** um Transportverluste in Kabeln zu minimieren
- **Integrierbarkeit** in **Offshore Windparks**
- Hohe Ansprüche an **Dichtheit** der **Transportleitungen**
- **Besonders beansprucht** sind **Dichtungen und Ventile**, da diese einem Druck von bis zu **700 bar** standhalten.
- Typische **Standzeiten** der Stacks reichen von **10.000 bis 40.000 Betriebsstunden**

Bildquelle: https://www.h-tec.com/fileadmin/_processed_/4/f/csm_ME450_2023_BG_COMP_01_A3_6116e4fad3.jpg

EINZELKOMPONENTEN ELEKTROLYSEURE

Der Begriff Elektrolyseur beschreibt **diverse Systeme** zur Spaltung von gasförmigen, oder flüssigen Rohstoffen mittels elektrischer Energie in **Wasserstoff** oder Kohlenstoffmonoxid. Elektrolyseure sind dabei nach Wirkungsprinzip unterteilbar. Obwohl sich die Elektrolyseure nach Art der Energiewandlung unterscheiden, weisen sie **als Gesamtsystem die selben grundlegenden Komponenten** auf.



Umhausung der Gesamteinheit



Wasseraufbereitungseinheit



Kühlaggregate und Wärmetauscher



Kompressoren und Pumpen



Elektrolyse-Stacks

- Elektroden
- Diaphragma/Austauschmembran/Keramikelektrolyt
- Separator mit Flowfield
- Diffusionsschichten mit Stromabnehmer



Gasabscheider

UNTERTEILUNG VON ELEKTROLYSEURTECHNOLOGIEN

Wasserelektrolyseure sind in nach ihrem **Wirkungsprinzip innerhalb der Elektrolysestacks** in unterschiedliche Technologien einteilbar. Im Folgenden wird eine Übersicht der **relevantesten Elektrolysetypen** unter Berücksichtigung von Anwendungen, Betriebsparametern und technologischer Reife gegeben.

Alkalischer Elektrolysestacks (AEL)

Bestandteile:

- Nickelelektroden
- Asbest- oder polymerbasierenden Ionen-Diaphragma
- Flüssigelektrolyt aus Natron- oder Kalilauge

Betriebstemperatur:

20 °C – 200 °C

Wirkungsgrad:

59 % - 70 %

Technologischer Reifegrad:

9 – voll Ausgereift

Anwendungsfälle:

Wasserstoffproduktion in konstanten Umgebungsbedingungen ohne rasche Lastwechsel

Protonenaustauschmembran Stacks (PEM)

Bestandteile:

- Platinbeschichtete Kathode
- Iridium- oder rutheniumbeschichtete Anode
- Perfluorsulfonsäure Membran

Betriebstemperatur:

20 °C – 200 °C

Wirkungsgrad:

65 % - 82 %

Technologischer Reifegrad:

8 bis 9 – Marktqualifizierung

Anwendungsfälle:

Wasserstoffproduktion in volatilen Umgebungsbedingungen mit raschen Lastwechseln und Schwankungen

Feststoffoxid Elektrolyseur Stacks (SOEC)

Bestandteile:

- Keramische Zirkonoxidmembran
- Nickel-Yttrium-Zirkon Kathode
- Mangan- oder Eisenoxidanode

Betriebstemperatur:

500 °C – 1000 °C

Wirkungsgrad:

>90 %

Technologischer Reifegrad:








3 bis 7 – Demonstratoren in der Produktionsumgebung

Anwendungsfälle:

Wasserstoffproduktion in festen Umgebungsbedingungen ohne Lastwechsel

Quelle: Ferreira et al. (2023), S. 5; Sebbahi et al. (2022), S. 144

EINSATZ- UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE VON ELEKTROLYSEUREN

-  Im Zuge der Energiewende wird die Flexibilisierung des Stromnetzes durch hohe Wasserstofferzeugungskapazität notwendig. Als **Rahmenbedingung** für die installierte Elektrolyseurleistung bis zum **Jahre 2030 werden 10 - 30 Gigawatt** prognostiziert. Für das **Jahr 2050** reicht die Prognose bis **zu 50 Gigawatt** installierter Elektrolysekapazität.
-  Die zukünftigen **Anwendungsfälle** für Elektrolyseure reichen von der **dezentralen Eigenbedarfsdeckung** von Unternehmen, bis zur **zentralen Sektorenkopplung**.
-  Mit **einer Serienfertigung von Großanlagen** wird ab **2024/2025** gerechnet, die **Massenproduktion** wird **bis 2038** erwartet. Dabei wird angenommen, dass die Preise für PEM Elektrolyseure in Zukunft unter denen für AEL Technologien liegen werden.
-  Für die Massenfertigung von Großanlagen bedarf es eines **höheren Grades der Fertigungsautomatisierung**, durch die **Standardisierung von Elektrolyseurkomponenten** und die Bildung von komplexen **Wertschöpfungsnetzwerken**.
-  Sobald ein Massenmarkt etabliert ist, wird mit der **Steigerung von Use-Cases** sowie dem **Ausbau von Unternehmensnetzwerken** und **Supply-Chains** gerechnet, dabei begünstigen Marktvorreiter in der Branche die Erstellung solcher Netzwerke.
-  Es werden **neue Produktportfolios für metallverarbeitende Betriebe** durch die spezialisierte Fertigung von Einzelkomponenten prognostiziert. Ein besonderes Potenzial für die Massenfertigung liegt beispielsweise in der **günstigen Produktion von Streckmetallen**. Dabei wird zur Steigerung von Fertigungsgeschwindigkeit und -output bei geringeren Kapital- und Materialeinsatz die Substitution von Fräsprozessen durch Walzprägeprozesse prognostiziert.
-  Eine **Steigerung des Anlagenwirkungsgrads** wird durch die Möglichkeit der **Wasserstoffverdichtung und Elektrolyse in einem Schritt** erwartet.

EINSATZ- UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE VON ELEKTROLYSEURKOMPONENTEN



Das generelle **technologische Entwicklungspotenzial** von Elektrolyseurkomponenten besteht darin **Edelmetalle, seltene Erden und Perfluorsulfonsäuremembranen (PFAS)** durch umweltschonendere und günstigere Alternativen zu **substituieren**.



Das **Korrosionsverhalten sowie die Wasserstoffversprödungsneigung** der eingesetzten Komponenten ist durch entsprechende Materialzusammensetzungen **positiv zu beeinflussen**. Insbesondere für die Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit an Membrankontaktflächen von PEM Elektrolyseuren sind neuartige Beschichtungsverfahren zu erproben.



Für PEM Elektrolyseure führt die **Erzeugung der Strömungsstruktur (Flowfield) durch umformende Technologien**, statt trennenden Technologien zu einer Steigerung der Kosteneffizienz bei der Massenfertigung.



Für die Elektrolyseverfahren ist die Leitfähigkeit innerhalb der Stacks von zentraler Bedeutung. Dazu gilt es **ohmsche Widerstände zu senken**.



Bei einer Erhöhung des Elektrolysedrucks werden **Verbesserungen von Dichtungen und Rohrleitungen** notwendig. Ferner bestehen insbesondere für **PEM-Elektrolyseure** einer hohen Leistungsklasse **Druckdifferenzen** zwischen Anoden- und Kathodenseite der Protonenaustauschmembran von über **30 bar**. Um dem entgegenzuwirken, wird momentan die **Membrandicke** erhöht. Hieraus leitet sich ein Kostensenkungspotenzial durch den Einsatz **dünnerer Membranen** mit derselben Druckbeständigkeit, beziehungsweise effizienter Stützstrukturen ab.



Ein weiteres Herstellungspotenzial ergibt sich durch die **Reduzierung der Gasblasenbildung** bei der Elektrolyse bis hin zur Entwicklung einer gasblasenfreien Elektrolyse.

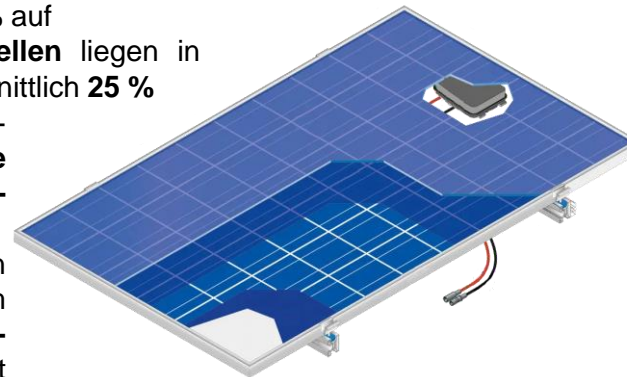


Zukünftiges **Forschungspotenzial** für alkalische Elektrolyseure besteht in der **Entwicklung von Demonstratoren** nach dem Anionenaustauschmembranprinzip (AEM).

ÜBERBLICK PV-MODULE

Aktueller Entwicklungsstand

- **Wirkungsgrade** für Photovoltaikzellen bewegen sich **von >40 %** bei III-V-Mehrfachsolarzellen **bis zu 11 %** bei organischen Solarzellen (Kaltschmitt et al. (2020), S.367)
- Handelsübliche **Mono-Silizium-Zellen** weisen einen **Wirkungsgrad von ca. 28 %** auf
- Handelsübliche **polykristalline Zellen** liegen in Ihrem **Wirkungsgrad** bei durchschnittlich **25 %**
- Im Vergleich zu Glas-Folien Modulen sind **Glas-Glas Module** preisintensiver, aber auch **langlebiger**
- Der **Markt** wird derzeit von **silizium-Wafer-Modulen** mit einem **Anteil von 95 %** sowie **Dünnschichttechnologie-Modulen** mit einem **Anteil von 5 %** dominiert.



Einzelkomponenten







- Rahmen und Halterungsaufnahmen
- Leistungselektronik und Verbindungsstecker
- Rückseitenfolie
- Einbettungsfolien
- Verschaltete PV-Zellen
- Frontglas

Forschungspotenziale




- **Forschungsschwerpunkte** liegen in einer **Wirkungsgradsteigerung** von Modulen sowie in **Material-einsparungen** und dem Einsatz von neuartigen Materialien mit höherer **Verfügbarkeit**.
- Ein Material welches zur **Substitution von Siliziumzellen** beforscht wird, ist **Perowskit**. Im Prototypenmaßstab zeichnet sich Perowskit durch einen ca. **10 % höheren Wirkungsgrad im Vergleich zu Silizium** aus. Die **Lebensdauer** von Perowskitmodulen ist noch **nicht erforscht**, die industrielle **Produktion wird in 3 bis 5 Jahren** prognostiziert.

https://www.solarfocus.com/produkte/solar/photovoltaik/image-thumb__523__product-detail-fancybox/pv-mit-nummern.webp





ZUKÜNFTIGE KOMPONENTENENTWICKLUNGEN FÜR PV-MODULE

- 
 Substitution von Wafermaterialien mit einer **verbesserten Ausnutzung des Sonnenlichtspektrums** im Vergleich zu Silizium
- 
 Kombination **mehrerer Waferschichten** in einem Modul mit Ergänzung von **Bündelungslinsen** vor dem Modul
- 
Materialeinsparung bei der Glasschichtendicke von 3,6 mm bis 1,6 mm
- 
 Materialeinsparungen die zur **Reduktion eines Modulrahmens** führen ermöglichen eine Vergrößerung der Modulfläche
- 
 Die **Reduktion der Schichtdicke von Siliziumwafern** verringern Materialkosten in der Produktion
- 
 Die **Reduktion des Silberanteils in der Lötpaste** reduziert ebenfalls die Materialkosten. Der **Verzicht auf Bleilot** eröffnet die Möglichkeit zum Einsatz alternativer Fügeverfahren wie beispielsweise **Kleben** und trägt zu einer **verbesserten Umweltverträglichkeit** bei.

NUTZUNGSANFORDERUNGEN

- 
Preisreduktion macht eine Nutzung attraktiver
- 
Langlebigkeitsanforderungen steigen von 20 bis 25 Jahre auf 30 bis 35 Jahre
- 
 Eine Erhöhung der generellen **Recyclingfähigkeit**

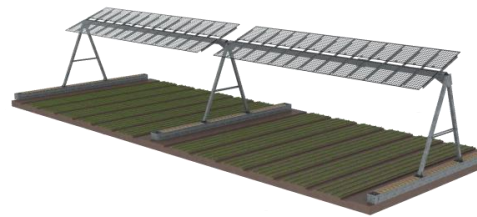
TECHNOLOGISCHE ENTWICKLUNG

- 
 Tunnel Oxide Passivated Contact Zelle (TopCON)
- 
 Semi Hetero Junction Zelle (SHJ)
- 
 Integrated Back Contact Zelle (IBC)
- 
 Tandem Solarzelle (MJC)

ÜBERBLICK AGRI-PV

Aktueller Entwicklungsstand & Einsatzbedingungen

- Agri-Photovoltaik, kurz Agri-PV, ist ein Ansatz, bei dem **landwirtschaftliche Flächen** gleichzeitig für den **Anbau** von Pflanzen (Photosynthese) und die **Erzeugung von Strom** mittels Photovoltaik (PV) genutzt werden.
- Derzeit werden vor allem **bifaziale PV-Module** als Zaunelemente im Bereich der Landwirtschaft eingesetzt.
- Horizontale PV-Module werden derzeit noch nicht flächendeckend eingesetzt, da der Einsatz bisher noch sehr teuer ist. Vor allem die Statik ist ein großer Kostentreiber.



Zukünftiger Einsatz & Forschungspotenziale

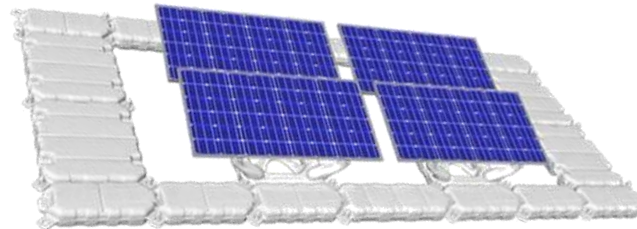
- Aufgrund der zunehmenden **Flächenkonkurrenz** zwischen der **Landwirtschaft** und der **Stromerzeugung** wird der Einsatz von Agri-PV in Zukunft voraussichtlich ansteigen.
- Anhand von Studien konnte bereits belegt werden, dass es für den Anbau der Lebensmittel sogar vorteilhaft ist, dass diese nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind.
- Entwicklungsbedarf besteht somit noch bei der **Statik** bzw. den **Trägerstrukturen**, damit diese für den Anwender kostengünstiger werden.
- Des Weiteren werden für die Agri-PV Nutzung spezielle **PV-Module** genutzt und weiterentwickelt, die **semitransparent** sind. Somit erreicht das Sonnenlicht die Nutzpflanzen teilweise trotzdem.

Bildquelle: <https://www.agrosolareurope.de/wp-content/uploads/agri-pv-top-anlage-von-agrosolar-030.jpg>

ÜBERBLICK FLOATING-PV

Aktueller Entwicklungsstand & Einsatzbedingungen

- Unter "Floating Photovoltaics" versteht man **Solkraftwerke**, deren Module auf **Schwimmkörpern** auf Wasserflächen platziert sind.
- Die Anlagen sind entweder am Grund des Gewässers, am Ufer oder an benachbarten Strukturen verankert.
- Aufgrund der mangelnden finanziellen Förderung sind derzeit **in DE lediglich 750 kW installierte Leistung** in Form von Floating-PV Anlagen vorhanden. Im asiatischen Raum und den Niederlanden ist der Einsatz schon deutlich weiter vorangeschritten. (Ilgen (2023))

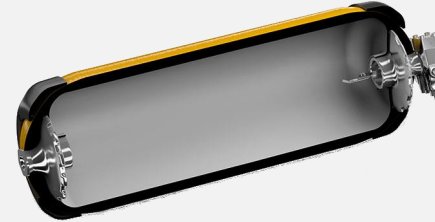
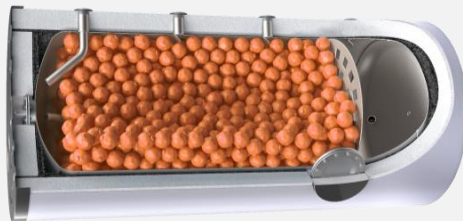


Zukünftiger Einsatz & Forschungspotenziale

- Zukünftig ist ein verstärkter Einsatz der Floating-PV Anlagen zu erwarten, da die Nutzung verschiedene Vorteile wie z.B. die **Entschärfung der Flächenkonkurrenz** oder einen **gesteigerten Energieertrag** durch die Kühlung durch das Seewasser, mit sich bringt.
- Die Nutzung ist lediglich auf **ruhigen und nicht touristisch genutzten Gewässern** sinnvoll und umsetzbar. Baggerseen sind z.B. ein idealer Nutzungsort.
- Entwicklung bedarf es noch im Bereich der **Schwimmkörper**. Diese müssen für eine Nutzung von mindestens 30 Jahre ausgelegt werden. Vor allem Seen mit niedrigem pH-Wert sind für die Materialwahl herausfordernd.

Bildquelle: <https://img.mbt-energy.com/05266f87vodcq1251519607/40abcfee3701925920644973288/f0.jpg>

Ausgewählte Energiespeicher- und Transportsysteme

i BATTERIESPEICHER**ii** WASSERSTOFF-DRUCKSPEICHER**iii** WASSERSTOFF-FLÜSSIGSPEICHER**iv** METALLHYDRIDSPEICHER**v** LATENTWÄRMESPEICHER**vi** PIPELINES

ÜBERBLICK VON BATTERIESPEICHERN

Aktueller Entwicklungsstand

- Hauptsächlich kommen **Lithium-Ionen** Batterien mit einem **Wirkungsgrad von > 90 %** zum Einsatz.
- Die **Batteriespeicherkapazität** liegt in Deutschland bei 40 GWh.
- Batterien erlauben **3.000 – 5.000 Voll-lastzyklen**.
- Die **weltweit größte** Batterie hat eine **Kapazität von 100 MWh**, die **Größte Deutschlands** hat eine Kapazität von **50 MWh**.
- Lithium-Ionen Batterien werden **in Serie produziert** und haben einen **hohen technologischen Reifegrad**.
- Durch ihre niedrige Energiedichte erfolgt eine **Anwendung großer Batteriedimensionen lediglich in Prototypen**.
- Die **Rohstoffbereitstellung** für Batterien ist **ökologisch bedenklich**.
- Batterien sind **im Brandfall schwer löschar** und neigen zu einer **Selbstentladung** nach ca. 60 Tagen.



Aktuelle Einsatzbedingungen

- **Stationäre Anwendungen:**
 - Im **Batterieverbund** aus mehreren Einheiten als Kurzzeitspeicher zum **Abfangen von Lastspitzen** in Kraftwerken.
 - Als **Stromspeicher** in Kombination mit PV-Anlagen für **Privathaushalte**.
- **Mobilitätsanwendungen:**
 - Als **Energiequelle zur Versorgung von Fahrzeugen** für den Individualverkehr.
 - **Derzeit noch nicht für Schwerlasttransporte geeignet**, da das **Eigengewicht von Batterien zu hoch** ist. Mehrere Forschungsprojekte entwickeln Lösungen für den batteriebetriebenen Schwerlasttransport.

Bildquelle: https://www.leag.de/fileadmin/_processed_/b/2/csm_100Tage_BigBattery_Montage_Batteriecontainer_6e64b44682.jpg

ZUKÜNFTIGE EINSATZBEDINGUNGEN UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE VON BATTERIEN

Zukünftige Entwicklungspotenziale

- Zukünftige Entwicklungsrichtungen für Batteriespeicher betreffen die **Verbesserung der Recyclebarkeit** von Batterien, die **Erhöhung der Energiedichte**, sowie die **Verringerung von Ladezeiten**.
- Der **Batteriemarkt für stationäre Speicherung** wird als der größere Markt prognostiziert.
- Insbesondere für den Einsatz in Mobilitätsanwendungen wird eine **Gewichtsverringerng** angestrebt.
- Bei der zukünftigen Entwicklung von Batteriespeichertechnologien werden **diverse Herausforderungen durch Zielkonflikte** bei Verbesserung von Parametern prognostiziert.
- Ein **Trade-Off zwischen** angestrebten Zielen wie **Langlebigkeit, Gewicht und Energiedichte** wird stattfinden, da beispielsweise die Langlebigkeit durch stärkeren Materialeinsatz kompensierbar ist, was im Gegenzug wiederum das Gewicht erhöht.
- Durch die konkurrierenden Ziele in der Batterieentwicklung wird es zu einer **Diversifizierung von Batterietechnologien** je nach Anforderungsprofil mit dedizierten Optimierungszielen kommen.

Zukünftige Einsatzbedingungen

- Der Trend zukünftiger Nutzungsanforderungen für Batteriespeicher tendiert zu einer **Verlängerung von Lebensdauern, einer Erhöhung der Ladezyklen, einer Kostenreduktion pro kWh Speicherleistung sowie zu einer Erhöhung der Systemsicherheit**.
- Für den elektrifizierten **Personenverkehr** haben **Lithium-Ionen Batterien** die besten Eigenschaften.
- Für den zukünftigen Einsatz stationärer Batterien ergeben sich vielfältige **Nutzungsoptionen für Energieversorger**:
 - Zum **Abfangen von Lastspitzen** (Peak Shaving)
 - Zur **Einspeisung von Regelleistung** aus volatilen Energiequellen und **Stabilisierung der Netzfrequenz**
 - Zum **Abfangen negativer Strompreise**, wenn zu viel Strom die Netze überlastet
 - Zum **Abfangen Verbraucherseitiger Lastverschiebungen**
- Sind die **Bedingungen für einen großflächigen Einsatz** geschaffen gibt es für **Windparkbetreiber** folgende **Argumente** in Batteriespeicher zu investieren:
 - **Grünes Image**
 - **Gesetzliche Verpflichtung**
 - **Wirtschaftlichkeit**

FORSCHUNGS- & ENTWICKLUNGSRICHTUNGEN VON BATTERIEN



Hauptsächlich wird eine **wirtschaftlichere Gestaltung** von Batteriespeichern beforscht. Dabei sind folgende **Entwicklungsrichtungen identifizierbar**:

- **Upscaling** von Herstellungsanlagen, um Prototypen in Serienfertigung herzustellen.
- **Reduktion** und Verkleinerung von **passiven Bauteilen**. Beispielsweise wird durch den Ersatz von Einhausungen auf Stahlbasis auf aluminiumbasierte Einhausungen eine Gewichtsreduktion angestrebt, wodurch Batteriespeicher in Mobilitätsanwendungen attraktiver werden.



Durch die **Substitution des Lithiums** mit kostengünstigen und nachhaltigen Materialien, wird eine Optimierung **der Nachhaltigkeit** sowie **Ressourcennutzung** angestrebt. Dabei sind folgende Lithiumalternativen auszumachen:

- Aluminium-Ionen-Batterien
- Magnesium-Ionen-Batterien
- Natrium-Ionen-Batterien
- Lithium-Schwefel-Batterien
- Natrium-Schwefel-Batterien
- Feststoffbatterien auf Natriumchlorid Basis
- Redox-Flow Batterien bei denen eine Energiespeicherung zu Lasten der Energiedichte länger möglich ist. Diese sind dadurch nur für stationäre Anwendungen attraktiv.

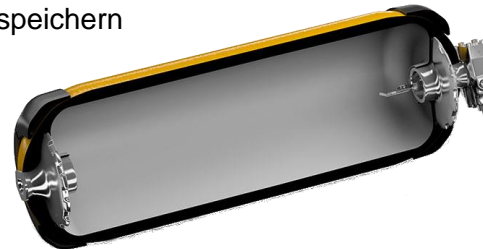


Insbesondere **Feststoffbatterien auf Natriumchlorid Basis** werden zukünftig in stationären Kraftwerksanwendungen an Interesse gewinnen. Sie zeichnen sich durch den **Verzicht auf seltene Metalle** wie Kupfer, Lithium und Kobalt aus und sind **nicht brennbar**. Ebenso benötigen sie keine dedizierte Kühlung, was Geräuschemissionen und Energieverbrauch der Balance of Plant senkt. Bei einer **Betriebstemperatur von 270 °C** setzen sie Wärme beim Laden frei und nehmen Wärme beim Entladen auf. Derzeit existieren **Anlagen mit einem Megawatt installierter Leistung**, welche aus 18 Power Stacks mit jeweils 60 kWh Speicherleistung bei 600 Volt und 100 Ampere betrieben werden. Nachteilig bei diesem Batterietyp ist die **hohe Eigenentladungsrate**.

ÜBERBLICK WASSERSTOFFDRUCKSPEICHER

Aktueller Entwicklungsstand

- Wasserstoffdruckspeicher sind ein **erprobtes Konzept**, bei dem **wenig Peripherie** notwendig ist. Jedoch verfügen Druckspeicher über eine vergleichsweise **geringe Energiedichte** und sind anfällig für **Metallversprödung**.
- Für die **Speicherung** in Drucktanks **gehen** bis zu **20 %** des Wasserstoffenergiegehalts **verloren** jedoch spielt die **Permeation** von Druckspeichern eine **untergeordnete Rolle**
- Drucktanks werden im **Mobilitätsbereich** eingesetzt und je nach Anwendung mit **350 bar**, oder **700 bar** betankt.



Forschungspotenziale

- Flexibilisierung der Tankform** anhand des Anwendungsgebiets.
- Verbesserung des **Tankrecyclings**.
- Kosten- und Gewichtsreduktion**.
- Optimierung** von zerstörungsfreien Prüfverfahren.
- Eignungsprüfung** von neuartigen **Legierungen** sowie der **additiven Fertigung** von Permeationsbarrieren.

Verbesserung von Einzelkomponenten

- Entwicklungsbedarf liegt in der **Dichtigkeitsoptimierung von Ventilen**.
- Optimierung von Schweißnähten** und den damit verbundenen Schweißverfahren für eine gesteigerte Druckbeständigkeit und Beständigkeit **gegenüber dynamischen Belastungsfällen**.

Bildquelle: <https://ecomento.de/wp-content/uploads/2018/05/Toyota-Mirai-Wasserstoff-Tank.jpg>

SYSTEMÜBERBLICK WASSERSTOFFFLÜSSIGSPEICHER

Aktueller Entwicklungsstand

- Eine **Speicherung** von flüssigem Wasserstoff erfolgt **bei -250°C** .
- Flüssiger Wasserstoff hat die **sechs- bis achtfache Speicherkapazität** von druckkomprimiertem Wasserstoff, allerdings stellt die **Verflüssigung** einen **Energieintensiven** Prozess dar.
- Bei kryogenem Wasserstoff besteht die Gefahr, dass Tanks aufgrund der **Materialversprödung** bersten.
- Flüssigtanks stellen **komplexere Systeme als Drucktanks** dar, da durch die ständige Kühlung eine zusätzliche **Peripherie** notwendig wird.
- Bei Flüssigwasserstofftanks kommt es zum Boil-Off Effekt, bei dem ca. 2 % des Tankvolumens durch den Tank diffundieren.



Forschungspotenziale

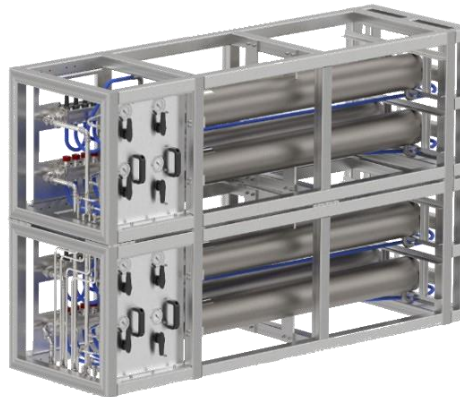
- Forschungsbedarf an **Materialien**, die **bei tiefen Temperaturen duktil** sind.
- **Optimierung von Schweißwerkstoffen und -verfahren**, welche die Tankeigenschaften durch eine geringere Wärmeeinbringung positiv beeinflussen.
- Kostenoptimierungspotenziale bestehen bei der **Substituierung von Nickelwerkstoffen**.
- Verbesserung von **dynamischen Belastungseigenschaften**.
- **Optimierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren**.
- **Eignungsprüfung von neuartigen Legierungen** sowie der **additiven Fertigung von Permeationsbarrieren**.

Bildquelle: https://www.man-es.com/images/default-source/press-releases/lh2-4-thumb.jpg?sfvrsn=20fd836c_2

ÜBERBLICK METALLHYDRIDSPEICHER

Aktueller Entwicklungsstand

- Metallhydridspeicher eignen sich für **mobile und stationäre Anwendungen** und arbeiten auf einem **Temperaturniveau von 500 °C bis 800 °C**.
- Sie kommen **ohne die Verwendung seltener Erden** aus und bieten **Kosten-, Effizienz- und Nachhaltigkeitsvorteile** gegenüber anderen Speichermöglichkeiten
- Die **Beladung** stellt einen **endothermen**, die **Entladung** einen **exothermen** Vorgang dar.
- Metallhydridspeicher sind durch ihre Eigenschaften **komplementär zur Hochtemperaturelektrolyse**
- Sie weisen einen **Wirkungsgrad** von **65 % bis 70 %** sowie einen technologischen Reifegrad von 5 bis 6 auf. Dadurch **liegen sie technologisch hinter anderen Speichermöglichkeiten zurück**.



Einsatzpotenziale

- Aufgrund ihrer Neuartigkeit ist der **Markteintritt noch nicht abschätzbar**, dennoch zeichnen sie sich durch leichte Anwendungsvoraussetzungen aus.
- Zukünftige Anwendungsfelder werden in der **stationären Energiespeicherung** für Quartierslösungen oder als Speicher für Wasserstofftankstellen bis 100 MW vermutet.
- Eine **direkte Anwendung in Fahrzeugen** ist aufgrund des aufwendigen Wärmemanagements **unwahrscheinlich**.

Bildquelle: https://www.vip-kommunikation.de/files/Pressemeldungen-2019/iGas/iGas_GKN_%20Speicher.jpg

ÜBERBLICK LATENTWÄRMESPEICHER

Aktueller Entwicklungsstand

- Latentwärmespeicher verwenden den **ökologisch unbedenklichen Stoff Natriumacetat zur Speicherung von Wärme und Kälte.**
- Sie haben eine dreimal **höhere Energiespeicherkapazität** als **Wasserstoffspeicher** bei demselben Raumvolumen.
- Sie sind durch den hohen Fertigungsaufwand **teurer in der Herstellung** als Wasserstoffdruckspeicher
- Ihre **Lebensdauer** reicht von **10.000 bis 40.000 Ladezyklen**, was im Mittel 15 bis 20 Jahren entspricht.
- Eine **Wärmebelastung** findet bei maximal **90 °C** statt, die **Entladung erfolgt bei 58 °C.**



Forschungspotenziale

- Zukünftige Entwicklungen für Latentwärmespeicher streben die **Kosten- sowie Gewichtsreduktion** an.
- Ein Kostenreduktionspotenzial liegt in der **Fertigungsautomatisierung** einzelner Komponenten.
- **Potenziale zur Gewichtsreduktion** werden für die gesamte Balance of Plant erwartet.
- Das **schnelle Be- und Entladen für mobile Anwendungsfelder** wird derzeit beforscht.

Aktuelle und zukünftige Anwendungen

- Latentwärmespeicher sind mit Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie **kombinierbar** um einer **Dunkelflaute entgegenzuwirken.**
- Durch ihre **leichte Transportierbarkeit** wird die Möglichkeit der **Entkopplung von Wärmeerzeugung und -nutzung** eröffnet.
- **Anwender** können dabei **Schwimmbäder, öffentliche Einrichtungen** und andere Wärmeabnehmer sein.

Bildquelle: <https://shwt-warmwasserspeicher.de/media/image/product/711/lg/1000-liter-pcm-pufferspeicher-latentwaermespeicher-inklusive-isolierung-3.jpg>

ÜBERBLICK WASSERSTOFFPIPELINES

Aktueller Entwicklungsstand

- Aktuell wird die **Umwidmung des Erdgasnetzes** zum Einsatz von Wasserstoff diskutiert.
- Das deutsche **Erdgasnetz umspannt 500.000 km** unterirdischer Gasleitungen und unterteilt sich in **Fernleitungs- und Verteilnetz**.
- Historisch bedingt ist das **Ostdeutsche Erdgasnetz** für einen vollständigen **Wasserstoffbetrieb ausgelegt**.
- Bei der Umwidmung des Erdgasnetzes ergeben sich spezielle **Herausforderungen für Ventile, Dichtungen, Muffen und Gasdruckregelanlagen**.
- Die Frage ob Ablagerungen in den Erdgasleitungen zur **Verunreinigung des Wasserstoffs** führen ist bisher ungeklärt.
- Für einige Anwendungen wird **hochreiner Wasserstoff** benötigt, diesbezüglich gilt es anwenderseitig **Sensoriken und Abscheidetechnologien** zur Erfüllung von Reinheitsanforderungen zu entwickeln.
- Wie mehrere Studien ergaben, ist das **Erdgasnetz zu Wasserstoffanwendungen kompatibel**.
- Bei **Transportdistanzen bis zu 2000 km** ist ein **Pipelinetransport** aus Kostengründen zu **bevorzugen**.







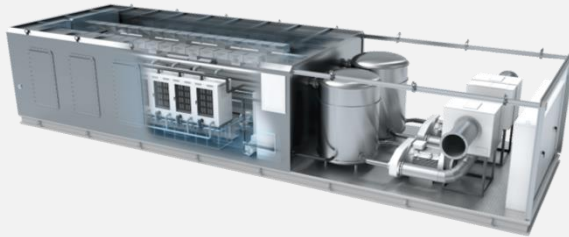
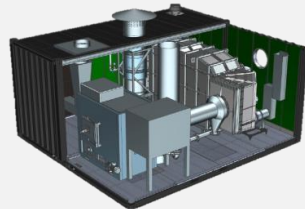
Zukünftige Entwicklungs- und Einsatzperspektiven

- Die **Umwidmung** des Erdgasnetzes wird **kritisch Betrachtet**, da die ausschließliche **thermische Verwertung** von Wasserstoff momentan aus regulatorischen Gründen **nicht in Betracht** kommt.
- Dadurch werden **Gebäude und Quartiere** nach einer Umwidmung **nicht mehr mit Erdgas versorgt**.
- Für die Nutzung von Wasserstoff in bestehenden Anwendungen wird zudem die **Anpassung von Gasthermen** notwendig.
- Generell ist davon auszugehen, dass das **Retrofitting** bei einer Umwidmung **kosteneffizienter** durchführbar ist, als der **Neubau** eines dedizierten Wasserstoffnetzes
- Zukünftig ist geplant mehrere **Industrie- und Mobilitätsstandorte** durch Ringleitungen **miteinander zu verbinden**.
- Durch den hohen Druck beim Wasserstofftransport werden zukünftig weitere **Kompressorstationen notwendig**.
- Für den Wasserstofftransport sind **Metalleitungen Kunststoffleitungen vorzuziehen**, da ausdampfende **Weichmacher** den **Wasserstoff verunreinigen**.

Bildquelle: https://cdn-dhjgi.nitrocdn.com/GhCjyEnKGsCPeRvewALnbHoxswPcxpes/assets/images/source/rev-09a269d/demaco-cryogenics.com/wp-content/uploads/2021/01/D0405072_VI-piping-optie-2_0_0_In-work-2-1024x810.png

VERBESSERUNGSPOTENZIALE FÜR EINZELKOMPONENTEN VON WASSERSTOFFPIPELINES

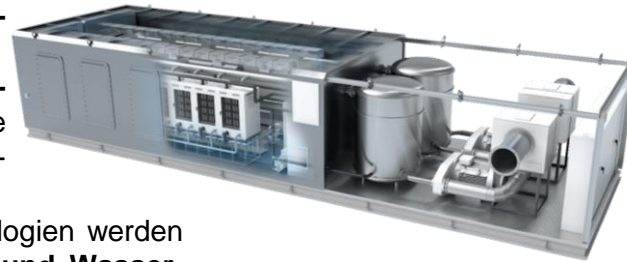
-  Potenziale für die **additive Fertigung** ergeben sich bei der **Innenbeschichtung** von Rohrleitungen mit Permeationsbarrieren.
-  Der **Austausch von Armaturen, Verdichterstationen, Gaschromatographen und Filtertechnologien** wird während einer Umwidmung notwendig.
-  Um neugebaute Rohrleitungen kosteneffizient zu gestalten, ist die **Substitution von Edelstählen** mit günstigeren Materialien bei gleichbleibenden Eigenschaften notwendig.
-  Rohrleitungssysteme sind auch im Falle einer Wasserstoffnutzung auf **Druckstöße und Pulsationen auszulegen**.

AUSGEWÄHLTE ENERGIEWANDLUNGSSYSTEME FÜR NUTZENERGIE**i BRENNSTOFFZELLE****ii CO₂-ABSCHEIDER****iii BHKW MIT EXTERN BEFEUERTER
MIKROGASTURBINE****iv GASTURBINE MIT
WASSERSTOFFBRENNKAMMER****v WÄRMEPUMPEN**

ÜBERBLICK BRENNSTOFFZELLEN

Aktueller Entwicklungsstand

- Brennstoffzellen sind in Ihren **Dimensionen** je nach Anwendungsgebiet von **Mikrobrennstoffzellen** bis hin zu **Kraftwerksanwendungen** skalierbar.
- Mit Brennstoffzellen ist die **Stromgenerierung und Rückverstromung in einem System** durchführbar
- Die Herstellung erfolgt unter Einsatz **seltener Erden und Edelmetalle**.
- Für die Herstellung der **Membranen** kommen häufig Kunststoffe auf **PFAS-Basis** (Per- und Polyflouride) zum Einsatz.
- Für diverse Brennstoffzellentechnologien werden **hohe Anforderungen an Sauer- und Wasserstoffreinheitsgrade** gestellt.
- Die **Investitionskosten** für eine Brennstoffzellenanwendung sind durchschnittlich **um das Dreifache höher**, als im Vergleich zu konventionellen Alternativen. Ebenso kommt es zu **langen Lieferzeiten** da die europäische Brennstoffzellenfertigung erst in Kleinserie stattfindet.
- Für **Großanwendungen** erfolgt die Produktion **manufakturartig** von Hand in geringer Stückzahl.



Aktuelle Einsatzbedingungen

- Brennstoffzellen kommen große **Potentiale bei der Sektorenkopplung** in stationären Anwendungen zu. Durch die Fähigkeit von Stromerzeugung und Rückgewinnung innerhalb eines Systems tragen sie zu einer **Stabilisierung des Stromnetzes** bei.
- In **mobilen Anwendungen** dienen sie der Energiebereitstellung für elektrische **Antriebe und Bordelektronik** von Fahr- und Flugzeugen.
- **Kleine Brennstoffzellen** kommen aktuell bereits **in Serienfahrzeugen**, wie beispielsweise dem Toyota Mirai zum Einsatz.
- In der Fertigung von Brennstoffzellen ist ein **geringer Automatisierungsgrad** vorherrschend.

Bildquelle: https://www.h-tec.com/fileadmin/_processed_/4/f/csm_ME450_2023_BG_COMP_01_A3_6116e4fad3.jpg

EINZELKOMPONENTEN BRENNSTOFFZELLEN

Der Begriff Brennstoffzelle beschreibt **diverse Systeme** zur Umwandlung von gasförmigen, oder flüssigen Energieträgern in elektrische Energie, sie eröffnen die Möglichkeit der klimaneutralen Verstromung diverser Brennstoffe. Brennstoffzellen sind nach Funktionsprinzip zu unterscheiden, die Mehrheit ist jedoch darauf ausgerichtet Wasserstoff als Hauptbrennstoff zu verwenden. Obwohl sich Brennstoffzellen nach Art der Energiewandlung unterscheiden, weisen sie **als Gesamtsystem die selben grundlegenden Komponenten** auf.



Umhausung der Gesamteinheit



Luftfilter, Luftverdichter und Luftbefeuchtungseinheit



Kühlaggregate und Wärmetauscher



Brennstoffzellen-Stacks

- Spannungsüberwachungs- und Stromregelsysteme
- Elektroden
- Diaphragma/Austauschmembran/Keramikelektrolyt
- Diffusionsschichten mit Stromabnehmer



Kurzzeitspeicherbatterie

UNTERTEILUNG VON BRENNSTOFFZELLEN TECHNOLOGIEN

Brennstoffzellen sind in nach ihrem **Wirkungsprinzip innerhalb der Brennstoffzellenstacks** in unterschiedliche Technologien einteilbar. Im Folgenden wird eine Übersicht der relevantesten **Brennstoffzellentypen zur Wasserstoffumwandlung** unter Berücksichtigung von Anwendungen, Betriebsparametern und technologischer Reife gegeben.

Alkalische Brennstoffzellenstacks (AFC)

Bestandteile:

- Nickel-Eisenoxidelektroden oder Perovskite
- Asbest- oder polymerbasierenden Ionen-Diaphragma
- Flüssigelektrolyt aus Natron- oder Kalilauge

Betriebstemperatur:

20 °C – 80 °C

Wirkungsgrad:

59 % - 70 %

Technologischer Reifegrad:

9 – voll Ausgereift

Anwendungsfälle:

Umgebungsbedingungen ohne rasche Lastwechsel beispielsweise als Notstromspeicher

Protonenaustauschmembran Stacks (PEM-FC)

Bestandteile:

- Platinbeschichtete Kathode
- Iridium- oder rutheniumbeschichtete Anode
- Perfluorsulfonsäure Membran

Betriebstemperatur:

20 °C – 200 °C

Wirkungsgrad:

65 % - 82 %

Technologischer Reifegrad:

9 – voll Ausgereift

Anwendungsfälle:

Einsatz in volatilen Umgebungsbedingungen mit raschen Lastwechseln und Schwankungen zum Beispiel als Stromaggregat bei der dezentralen Stromerzeugung

Feststoffoxid Brennstoffzellen Stacks (SOFC)

Bestandteile:

- Keramische Zirkonoxidmembran
- Nickel-Yttrium-Zirkon Kathode
- Mangan- oder Eisenoxidanode

Betriebstemperatur:

500 °C – 1000 °C

Wirkungsgrad:

>90 %

Technologischer Reifegrad:






6 bis 9 – Demonstratoren in der Produktionsumgebung, Reifegrad abhängig von Anwendung

Anwendungsfälle:




Stromerzeugung in festen Umgebungsbedingungen ohne Lastwechsel beispielsweise in Kraftwerken

Quelle: Singla et al. (2021), S. 15615–15617, Felseghi et al. (2019), S. 16, Bianchi/Bosio (2021), S. 15

EINSATZ- UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE VON BRENNSTOFFZELLEN

-  Es wird industriell bereits an diversen **turbogeladen Brennstoffzellentypen** geforscht, wodurch sich eine Wirkungsgradsteigerung ergibt, eine Kommerzialisierung ist ausstehend.
-  Durch die **Standardisierung von Einzelkomponenten** und Fertigungsprozessen ist mit der **Massenfertigung** von Großanlagen nach dem PEM Prinzip in den kommenden Jahren zu rechnen.
-  Der **Aufbau von Wertschöpfungsketten** mit spezialisierten Fertigungsleistungen wird erwartet, was zu Kostenreduktion und Effizienzsteigerung führt.
-  **Intelligente Produktionssysteme** sind zukünftig erforderlich, die während der Produktion die Qualität der Bauteile prüfen. Dies ist durch Inline Sensoren oder operando Messungen möglich.
-  Zukünftig ist mit einem weiteren **Ausbau von Brennstoffzellenfahrzeugen** im Mobilitätssektor insbesondere für Schwerlast- und Transportanwendungen zu rechnen.

EINSATZ- UND ENTWICKLUNGSPOTENZIALE VON BRENNSTOFFZELLENKOMPONENTEN

-  Das generelle technologische Entwicklungspotenzial von Elektrolyseurkomponenten besteht darin **Edelmetalle, seltene Erden und PFAS-Membranen** durch umweltschonendere und günstigere Alternativen zu **substituieren**.
-  Eine Verbesserungsmöglichkeit ergibt sich bei der Herstellung von Brennstoffzellen durch **effizientere Beschichtungstechnologien** von Brennstoffzellenmembranen. Dadurch wird die Korrosionsbeständigkeit der Membrankontaktpunkte unter Einsatz von Eisen- und Stahlwerkstoffen beibehalten, was zu einer Kostenreduktion durch die Substitution von Edelmetallen führt.
-  **Kostenreduktionspotenziale** ergeben sich durch die zu erwartende **Massenfertigung**. Durch verringerte Produktkosten ist dabei eine Markterschließung zu erwarten.

ÜBERBLICK CO₂-ABSCHIEDUNGSTECHNOLOGIEN

Aktueller Entwicklungsstand

- Zur **Erzeugung von e-Fuels** wird Kohlenstoffmonoxid benötigt. Die Bereitstellung geschieht durch **Einfang** und Spaltung von **Kohlenstoffdioxid**.
- Beim CO₂-Einfang bestehen zwei **grundlegende Technologien**:
 - Abscheidung des CO₂ **aus punktuellen Quellen** beispielsweise industriellen Prozessen.
 - Abscheidung von **atmosphärischem CO₂** aus dem in der Luft enthaltenen CO₂.
- Die Technologien bieten ein **unterschiedlich hohes Potenzial zur Treibhausgasreduktion**. Während bei Abscheidungen aus **Punktquellen** lediglich einzelne **CO₂-Bilanzen** von beispielsweise Zementfabriken optimierbar sind und das CO₂ bei einer Nutzung wieder in die Umwelt gelangt, eröffnen **Luftabscheidungstechnologien** die Möglichkeit zur Schaffung eines **CO₂-Kreislaufes**.



Forschungspotenziale

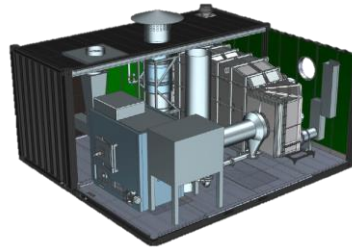
- Eine **Abscheidung aus Punktquellen** wird in der EU als nicht erneuerbar eingestuft. Die Nutzung ist **in Deutschland daher unzulässig**. Die damit verbundene Investitionssicherheit ist nicht gegeben.
- Für die Entwicklung mancher PtX-Ansätze wird nach Wegen von **erneuerbaren CO₂-Quellen geforscht**. Besonderes Augenmerk erhalten dabei aufgrund des Erneuerbarkeitsgedanken **Luftabscheidungstechnologien**.
- Die **CO₂-Abspaltung aus Punktquellen** ist eine **ausgereifte Technologie**.
- Für den **atmosphärischen CO₂-Einfang** existieren derzeit **Pilotanlagen**, wie beispielsweise im Orca-Projekt.

Bildquelle: https://www.energiegrundschau.ch/wp-content/uploads/2017/06/kopie_05_Kollektor.jpg

ÜBERBLICK BLOCKHEIZKRAFTWERK MIT EXTERN BEFEUERTER MIKROGASTURBINE

Aktueller Entwicklungsstand & Einsatzbedingungen

- Wird eingesetzt zur **Verbrennung von holzartigen Reststoffen** sowie **Schwach-, Industrie- und Pyrolysegasen**. Der Vorteil bei der externen befeuerten Mikrogasturbine liegt darin, dass die Wärmequelle für die Turbine keine Rolle spielt. Die Systemperipherie dieser Turbine ist simpler im Vergleich zu Gasmotoren und sie gewährleistet eine konstante Verbrennung, was wiederum zu einem gleichbleibenden Massenstrom an Heizgas führt.
- Branchenanwendung: Gewerbetreibende mit Reststoffen wie Möbelwerke und Kompostierungsbetriebe, metallverarbeitende Unternehmen.
- BHKWs können als **modulare Anlagen** ausgelegt werden: Je nach Leistung ist das BHKW in 20- oder 40-Fuß-Containern verbaut.
- Nicht geeignet für Bedarfe unter 10kW und Anwendungsbereiche mit geringem Platzangebot.



Zukünftiger Einsatz & Forschungspotenziale

- Der Trend tendiert zu einer **Diversifizierung der Leistungsgrößen**. Je nach Anwendungsbranche werden teilweise größere, teilweise kleinere und dezentrale BHKWs eingesetzt werden. Außerdem steigen die Anforderungen an die Systeme. Diese müssen zukünftig fernsteuer- und wartbar sowie systemvernetzbar sein. Des Weiteren erwarten anwendende Personen ein robustes, kosten-günstiges und schnell verfügbares System.
- In der Fertigung ist ein Trend hin zum **Orbitalschweißen** zu erkennen, was den Vorteil hat, dass Komponenten gut und reproduzierbar geschweißt und gleichzeitig Personalkosten gespart werden.

Verbesserungspotenzial Einzelkomponenten

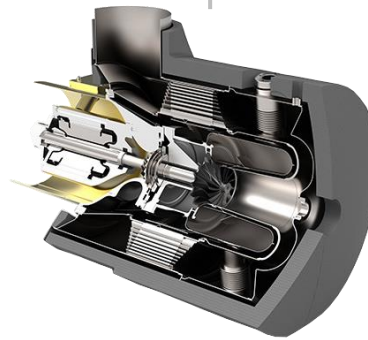
- Eine Effizienzsteigerung des Systems würde mit der **Effizienzsteigerung des Hochtemperatur-Wärmetauschers** einhergehen. Dazu müsste sowohl die **Ein-** als auch die **Austrittstemperatur angehoben** werden. Mit dieser Temperaturveränderung gehen verschiedene Entwicklungsbedarfe einher. **Materialien (Stähle)** müssen anders gewählt oder neu entwickelt (**Keramiken, graphitbasierte Werkstoffe**) werden. Verbindungen und **Schweißnähte** im System müssen fertigungstechnologisch weiterentwickelt werden und die **Aufhängungen** der einzelnen Module untereinander müssen neu konzipiert werden.

Bildquelle: https://www.shk-profi.de/imgs/3/2/1/6/0/5/_800_1205.-7acad63960d11c7b.jpg

ÜBERBLICK GASTURBINE MIT WASSERSTOFFFÄHIGER BRENNKAMMER

Aktueller Entwicklungsstand & Einsatzbedingungen

- Gasturbinen sind eine etablierte, kosteneffiziente Technologie. Gasturbinen für den Betrieb mit reinem Wasserstoff (100 %) sind hingegen derzeit **in der Entwicklung**, aber noch nicht in der Serienfertigung.
- Verbrennungskraftmaschinen weisen einen wesentlich **geringeren Wirkungsgrad** auf als die Stromerzeugung mittels Brennstoffzelle. Des Weiteren können bei hohen Temperaturen Stickoxide entstehen.
- Vorteilhaft bei der Nutzung von Gasturbinen zur Wasserstoffverstromung ist außerdem, dass die Qualitätsanforderungen im Gegensatz zu einer Brennstoffzelle geringer sind.



Verbesserungspotenzial Einzelkomponenten

Zukünftige Einsatzbedingungen & Forschungspotenziale

- Wasserstofffähige Gasturbinen können zukünftig bspw. im Bereich der **Luftfahrt** oder zur **Strom-generierung** eingesetzt werden.
- Die Fertigung der wasserstofffähigen Gasturbinen muss zukünftig vom Labormaßstab in die **Massenfertigung** überführt werden, um die Nutzung kosteneffizienter zu gestalten.
- Aufgrund der Ressourcenschonung wird außerdem eine Produktion mit **alternativen Materialien** zu teuren Edelmetallen angestrebt.
- Auch für Verfahren zur kostengünstigen **Reparatur von Brennstoffkammern** und anderen Teilen einer Turbine bedarf es weiteren Forschungsbedarf.

- Aufgrund der hohen Temperaturen bei der Wasserstoffverbrennung muss die Brennkammer der Gasturbine dementsprechend ausgelegt werden. Als Lösungsstrategie kann die **Brennkammer im Micro-Mix Design** gefertigt werden. Derzeit beträgt das TRL der Brennkammer im Micro-Mix Design 4-5.
- Bei diesem Design wird nicht nur eine „große“ Flamme in die Brennkammer eingeleitet, sondern viele kleine, die über einen Flammenring verteilt sind. Somit entstehen geringere Temperaturen und eine andere Vermischung mit der Luft und der Stickstoffausstoß wird minimiert.
- Derzeit ist die Fertigung der Brennkammer im Micro-Mix Design sehr teuer, da diese eine hohe Präzision, speziell der Flammenring mit seiner komplexen Innenstruktur, erfordert. Der Einsatz additiver Fertigung wäre hier denkbar. Fraglich ist, ob zusätzlich eine Wärmedämmschicht aufgetragen werden muss, um das Material gegen die hohen Temperaturen zu schützen.

Bildquelle: https://media.licdn.com/dms/image/C5112AQHdzZ3fuS07Kg/article-cover_image-shrink_600_2000/0/1520102256545?e=2147483647&v=beta&t=iNzdakscuBg9bxNA4fyUyNXRPbRWQIQNSvdrlevSH0

ÜBERBLICK WÄRMEPUMPEN

Aktueller Entwicklungsstand

- Wärmepumpen werden in **Niedertemperatur-** sowie **Hochtemperaturwärmepumpen** differenziert.
- Wärmepumpen **erwärmen** über einen Verdichtungsprozess **ein Medium mithilfe elektrischer Energie** und stellen diese Abwärme daraus als Nutzwärme zur Verfügung. Dabei arbeiten sie so Effizient, dass die eingesetzte **Strommenge ein viertel der der nutzbaren Wärmeenergie** beträgt.
- Für Haushalte kommen **Niedertemperaturanwendungen** im Vorlauftemperaturspektrum von **30°C bis 60°C** zum Einsatz.



Aktuelle und Zukünftige Einsatzperspektiven

- Wärmepumpen spielen eine bedeutende **Rolle im Zuge der Wärme-wende** zur Sektorenkopplung.
- Niedertemperaturwärmepumpen werden in Zukunft voraussichtlich in **Mas-senfertigung** hergestellt werden und stellen eine attraktive **Option für Neubauten** dar.
- **Hochtemperaturwärmepumpen** arbeiten im Temperaturbereich von **100°C bis 200 °C** und stellen eine Dekarbonisierungsoption für **indu-strielle Niedertemperaturanwendun-gen** dar.

Verbesserungspotenziale

- Optimierung der **Stromnutzung bei einer Dunkel-flaute**, da das Dekarbonisierungspotential **strom-mixabhängig** ist.
- Derzeit herrscht ein **Forschungsbedarf** bezüglich der **Wirkungsgradsteigerung durch material-spezifische oder fertigungstechnische Optimierung**.

Bildquelle: https://www.haustec.de/sites/default/files/styles/content_image_default_desktop_xxl/public/2023-05/lww1.jpeg.webp?itok=qxvpPRwy

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

STATUS QUO*

Zusammensetzung des Primärenergiebedarfs:
51 % Wärme- & Kälte 23 % Elektrizität 26 % Verkehr

19% eE Anteil am Primärenergiebedarf

40% eE Anteil am Strommarkt

16% eE Anteil am Wärmemarkt

7% eE Anteil am Verkehrssektor

ZIEL

Ziel ist es, die **Energiewende** mit dem übergeordneten Ziel der Klimaneutralität erfolgreich umzusetzen. Dies Umsetzung kann nur erfolgreich sein, wenn das **Energie-wirtschaftliche Zieldreieck** in Einklang gebracht wird. Die drei Ziele der Bezahlbarkeit, Versorgungssicherheit und Umweltverträglichkeit sind konkurrierend, was eine Vereinbarkeit erschwert.



EINFLUSSFAKTOREN

Die **Triebkraft der Politik** entscheide über das „Wie“ der Energiewende. Sie bestimmt Technologieoffenheit, Ziele, Förderprogramme, Gesetze und Regularien. Die festgesetzten Ausbauziele bis 2030 sind:

- 215 GW PV
- 115 GW Wind Onshore
- 30 GW Wind Offshore
- 10 GW Elektrolyse

Die **Wirtschaftlichkeit** von eE hängt u.a. ab von:

- OpEx & CapEx
- zukünftiges Strommarktdesign
- ETS-System für CO₂-Zertifikate
- Contracts for Difference
- Carbon Border Adjustment Mechanism

Die **gesellschaftliche Akzeptanz** ist u.a. abhängig von:

- Aufklärungsgrad der Gesellschaft
- Kosten der eE für die Gesellschaft
- Zuverlässigkeit der Technologien
- Potentielle Einschränkungen

➔ Politik, Wirtschaft und Gesellschaft sind eng verbunden. Die Politik wird von der Gesellschaft beeinflusst, die Meinung der Gesellschaft wiederum von politischen Debatten. Die Politik legt den Grundstein für die ökonomische Entwicklung und andererseits nimmt die Wirtschaft Einfluss auf die Politik.

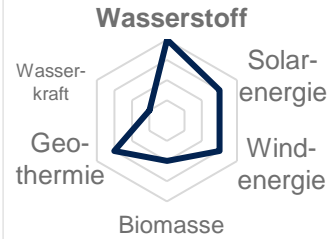
BEDARFS- & NUTZUNGSTRENDS

📊 Geschätzter **Energiebedarf in DE 2050:** 1.500 - 2.500 TWh

📊 Geschätzter **Strombedarf in DE 2050:** 650 - 1.100 TWh

- Komplementärer Einsatz** der einzelnen Energiequellen mit regional diversifizierten Konzepten
- Elektrifizierung und Sektorenkopplung**, Nutzung **synthetischer Kraftstoffe**
- Kooperation** auf europäischer Ebene sowie Ausbau und Nutzung von **Speichertechnologien**
- Dezentralisierung** der Stromherstellung und –nutzung z.B. durch Prosuming
- Zunahme von **Demand-Side Response**

AUSBAUPOTENZIALE



Bedarf besteht außerdem im Ausbau von Langzeitspeichern, Kraftwerken für „grüne“ Gase, Dekarbonisierungstechnologien des Wärmesektors sowie Carbon Capture Technologien.

* Werte beziehen sich auf Deutschland in 2021

Ebene 1 – Primär- und Sekundärenergiequellen

BIOMASSE



Biomassennutzung kann in **Direktverbrennung** und **Biogas** unterteilt werden. Aktuell verwendete Substrate: Rest- und Abfallstoffe, Mais, Silage.

- Flächenpotenziale** für Biomasseanbau **erschöpft**, Rest- und Abfallstoffe nutzbar
- Nutzungspotenzial hoch**, aber Anwendungsbereiche & Zusammenspiel mit Wasserstoff abhängig von **Biogasstrategie**
- Mögliche Anwendungsbereiche: Stromerzeugung (Regelenergie), Betrieb von Wärmenetzen, industriellen Hochtemperaturprozessen, Herstellung von Biofuels
- Ausbaupotenzial in anderen Ländern** vorhanden

SOLARENERGIE



Stand 2022 sind ca. **66 % Dachanlagen** und ca. **33 % Freiflächenanlagen**.

- auch **zukünftig starker Ausbau**, großes Potenzial für **Floating- und Agri-PV Anlagen**
- Entwicklungspotenzial: **Steigerung des Wirkungsgrades, Kostenreduktion**
- Weiteres Potenzial: **PVT-Module**
- Technologieführerschaft** der nächsten Generation von PV-Modulen soll **wieder in DE** erreicht werden

„GRÜNER“ WASSERSTOFF

95 % des derzeit genutzten Wasserstoffs sind „grau“.
0,08 GW installierte Produktionsleistung für „grünen“ Wasserstoff.
57 TWh Wasserstoff werden derzeit in der chemischen Industrie verwendet.

- Ausbauziel** Produktionskapazität 2030 in DE: **10 GW**
- Geschätzter **Wasserstoffbedarf 2050: 100-500 TWh**, Ziel: ca. **30 % in DE produzieren**
- Fraglich ob zukünftig Pyrolyse oder Dampfreforming gesetzlich zugelassen werden
- Import aus Sonnen- und Windreichen Regionen** mittels Pipeline oder Schifffahrt in Form von Derivaten denkbar
- Mögliche Anwendungsszenarien: Hochtemperaturprozesse in der Industrie, chemische Industrie, Speichermedium, Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

GEOATHERMIE



Erdwärme kann mittels **Oberflächennaher Geothermie** (z.B. Erdwärmekollektoren) in Wärme oder **Tiefengeothermie** (z.B. Hydrothermal) in Strom oder Wärme, umgewandelt werden.

- 75 % des Niedertemperaturbedarfs** von DE könnten durch Geothermie gedeckt werden
- Oberflächennahe Geothermie: dezentrale, gebäudebezogene Wärmenutzung
- Tiefengeothermie: Nah- und Fernwärmenetze für Industrie oder Gebäudebeheizung, Stromerzeugung
- Bekannte Ausbaupotenziale der Tiefengeothermie in Norddeutschland, im Rhein-graben und im Voralpenland, Oberflächennah in ganz Deutschland

WINDENERGIE



8,1 GW installierte Leistung Offshore
58,1 GW installierte Leistung Onshore

- Windkraftpotenzial** in DE (On- und Offshore): **285 GW**
- Ausbauziele** bis 2030: **115 GW Onshore, 30 GW Offshore**
- Nutzung in Kombination mit PtX-Anlagen und Batteriespeichern bei Stromüberschüssen
- Entwicklungsrichtung: Höhere Türme, größere Rotorblätter, Reduzierung von Lärmemissionen, Materialreduktion
- Entwicklung von **Windkraftanlagen für den privaten Gebrauch** und Untersuchung der Wirkleistung von **Kites**

E-FUELS

- Syntheseprozesse sind bereits in **Pilotanlagen** etabliert
- Flächendeckender Einsatz noch nicht vorhanden
- Zukünftige Nutzung** noch unsicher & abhängig von eE- & Elektrolyseausbau
- Möglich zur **Dekarbonisierung** der Luft- und Schifffahrt sowie des Schwerlastverkehrs genutzt werden
- Blending** mit konventionellen Kraftstoffe oder Biofuels denkbar

BIOFUELS

- Syntheseprozesse sind bereits in **Pilotanlagen** etabliert
- Biofuels bereits als **Biodiesel** im Verkauf
- Zukünftige Nutzung unsicher, da **Flächenpotenziale** biogener Substrate **begrenzt**
- Forschung: **Effizienzsteigerungen** bei Herstellungsprozess
- Möglich zur **Dekarbonisierung** der Luft- & Schifffahrt & des Schwerlastverkehrs
- Blending** mit konventionellen Kraftstoffe oder E-Fuels denkbar

Daten zum Strom- und Wärmemarkt beziehen sich auf Deutschland, in 2021, Quelle: BMWK (2023)

ENERGIEWANDLUNGSSYSTEME FÜR PRIMÄR- UND SEKUNDÄRENERGIEN

Biogas Anlagen 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Wärme- und Stromerzeugung
- Entwicklungspotenzial:** Biomethanisierung, Enzymaufspaltung, Robustheit und mobilen Anwendungen.

Elektrolyseure 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Erzeugung von Wasserstoff
- Entwicklungspotenzial:** PEM und SOEC Anlagen in Großanwendungen, Kostenreduktion bei Massenfertigung

PV-Module 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur erneuerbaren Stromerzeugung
- Entwicklungspotenzial:** Wirkungsgradsteigerung durch Lichtbündelung, Vergrößerung der Module und Substituierung seltener Erden

Agri-PV 

- Status Quo:** Landwirtschaftliche Flächen-nutzung durch PV-Zäune
- Entwicklungspotenzial:** Verbesserung der Trägerstruktur und Einsatz horizontaler PV-Module

Floating PV 

- Status Quo:** PV-Module auf Schwimmkörpern in ruhigen Gewässern
- Entwicklungspotenzial:** Verbesserung der chemischen und mechanischen Stabilität von Schwimmkörpern.

ENERGIESPEICHER- UND TRANSPORTSYSTEME

Batterie-speicher 


- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Stromspeicherung
- Entwicklungspotenzial:** Gewichtsreduktion, Recyclebarkeit, Substitution von Lithium

H2 Druck-speicher 

- Status Quo:** Etablierte Wasserstoffspeichertechnologie
- Entwicklungspotenzial:** Flexibilisierung von Tankformen, Gewichtsreduktion

H2 Flüssig-speicher 

- Status Quo:** Komplexe Wasserstoffspeichertechnologie
- Entwicklungspotenzial:** Schweißverfahren und -werkstoffe, Tieftemperaturduktilität

Metallhydrid-speicher 

- Status Quo:** Neuartige Wasserstoffspeichertechnologie
- Entwicklungspotenzial:** Forschungsbedarf für mobile Anwendungen, Abwärmesteuerung


Latentwär-meispeicher 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Wärmespeicherung
- Entwicklungspotenzial:** Gewichtsreduktion, schnelle Be- und Entladung

H2 Pipe-lines 

- Status Quo:** Etablierte Wasserstofftransporttechnologie
- Entwicklungspotenzial:** Retrofitting von Erdgasleitungen durch neue Innenbeschichtungen

ENERGIEWANDLUNGSSYSTEME FÜR NUTZENERGIE

Brennstoff-zellen 

- Status Quo:** Wärme- und Stromerzeugungstechnologie mittels Wasserstoff
- Entwicklungspotenzial:** Standardisierung von Einzelkomponenten, Substituierung kritischer Rohstoffe

CO2-Abscheider 

- Status Quo:** Technologie zur CO2-Bereitstellung aus Luft oder Abgasen
- Entwicklungspotenzial:** Effizienzsteigerung von atmosphärischem CO2-Einfang

BHKW mit Mikro-gasturbine 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Wärme- und Stromerzeugung
- Entwicklungspotenzial:** Effizienzsteigerung von Wärmetauschern, Fertigung mittels Orbitalschweißen

H2 Gas-turbine 

- Status Quo:** Neuartige Technologie zur Wärme- und Stromerzeugung
- Entwicklungspotenzial:** Fertigung der Brennkammer im Micro-Mix Design, Substitution von Edelmetallen

Wärme-pumpen 

- Status Quo:** Etablierte Technologie zur Wärmerzeugung
- Entwicklungspotenzial:** Forschungsbedarf von Material- und Fertigungstechnischen Optimierungspotentialen

Ausblick für das Projekt SpreeTec neXt

Die Studie "**Technologische Trends und Entwicklungen bei alternativen Energiesystemen**" hat wesentliche Erkenntnisse geliefert, indem sie die Entwicklungsrichtungen verschiedener erneuerbarer Energien aufgezeigt und Klarheit über die zukünftigen Bedürfnisse der Energiewirtschaft geschaffen hat. Diese Studie kann nicht nur als Leitfaden für die weitere Forschungsarbeit innerhalb des Projektes SpreeTec neXt dienen, sondern auch darüber hinaus wertvolle Orientierung bieten.

Ein besonders wichtiger Aspekt, der in der Studie hervorgehoben wurde, ist die Tatsache, dass die weitere technologische Entwicklung nicht nur von Forschungs- und Entwicklungsarbeit angetrieben wird, sondern maßgeblich von den politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen abhängt. Darüber hinaus hat die Studie deutlich gemacht, dass die Energiewende nur durch ein koordiniertes **Zusammenspiel der Energiequellen mit regionalen Konzepten** erfolgreich umsetzbar ist.

Auf der Ebene der Technologieentwicklung wurde ebenfalls deutlich, dass es zukünftig eine **Diversifizierung je nach Anwendungsbedarf** geben wird. Die verschiedenen Technologien ergänzen sich dabei mit ihren jeweiligen Leistungsspektren. Experten sind sich einig, dass jede dieser Technologien in ihrem spezifischen Bereich eine wichtige Rolle für die Energiewende spielt und somit unverzichtbar ist.

Für das Forschungscluster SpreeTec neXt können, in Einklang mit den Kompetenzen der Projektpartner, folgende Bedarfe und somit mögliche Forschungspotenziale identifiziert werden:

<p>BIOGASANLAGEN</p> <p>Robustere Gestaltung von Förderschnecken und Rührern gegen Störstoffe wie Sand und Kies.</p>	<p>GEOTHERMIE</p> <p>Langlebigere Auslegung der Thermalwasserpumpen gegen korrosives Thermalwasser</p>	<p>PVT-MODULE</p> <p>Kombination von Solarthermie und Photovoltaik aufgrund der steigenden Flächenkonkurrenz</p>	<p>AGRI-PV</p> <p>Kostendegression der Trägerstrukturen von Agri-PV Anlagen</p>	<p>FLOATING-PV</p> <p>Langlebigere und kostengünstigere Gestaltung der Schwimmkörper bei Gewässern mit niedrigem pH-Wert</p>	<p>GASTURBINE</p> <p>Brennkammer für 100%-Wasserstoffnutzung auslegen</p>	<p>BRENNSTOFFZELLE/ ELEKTROLYSEURE</p> <p>Ökologisch bedenkliche Materialien ersetzen, Membran dünner gestalten, System für höhere Drücke auslegen</p>
<p>PIPELINES</p> <p>Entwicklung von Innenbeschichtungen mit Permeationsbarrieren, um Dichtigkeit zu erhöhen</p>	<p>H₂-DRUCKSPEICHER</p> <p>Flexibilisierung der Tankform, Kosten- und Gewichtsreduktion, Erhöhung der Dichtigkeit von Ventilen, Auslegung von Schweißnähten für höhere Drücke und dynamische Belastung</p>	<p>H₂-FLÜSSIGSPEICHER</p> <p>Duktilität der Materialien, Substituierung von Nickel, Auslegung für dynamische Belastungseigenschaften</p>	<p>BATTERIESPEICHER</p> <p>Reduzierung des Gewichts von Einhausungen und Verbesserung des Wärmemanagements</p>	<p>LATENTWÄRMESPEICHER</p> <p>Gewichtsreduktion durch Optimierung der Balance of Plant</p>	<p>HOCHTEMPERATURWÄRMETAUSCHER</p> <p>Materialien und Materialverbindungen (Schweißnähte) für höhere Temperaturen auslegen</p>	<p>WÄRMEPUMPE</p> <p>Wirkungsgradsteigerung</p>

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

AGEE-Stat/BMWK (2023): Zeitreihen Erneuerbare Energien.

Agentur für erneuerbare Energien (2023): Potenziale der Windenergie, URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energie/wind/onshore/potenziale-der-windenergie> (zugegriffen: 28.08.2023).

Bakhtawar, B. (2020): An Introduction to Qualitative Research (Flick, U. (2014). An introduction to qualitative research. Sage.) Book Review for Academic Consultation, URL: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.11809.22887> (zugegriffen: 10.08.2023).

Bauer, J./Blickle, P./Ehmann, A./Endt, C./Erdmann, E./Grefe-Huge, C./Peter, V./Stahnke, J./Tröger, J./Wahls, R./et al. (2023): Energiemonitor: Die wichtigsten Daten zur Energieversorgung – täglich aktualisiert, in: Die Zeit, Hamburg, 26. August 2023. URL: <https://www.zeit.de/wirtschaft/energiemonitor-deutschland-gaspreis-spritpreis-energieversorgung> (zugegriffen: 26.08.2023).

Bianchi, F. R./Bosio, B. (2021): Operating Principles, Performance and Technology Readiness Level of Reversible Solid Oxide Cells, in: Sustainability, 13 (9), S. 4777.

Bundesverband WindEnergie e.V (2022): Zahlen und Fakten, Bundesverband WindEnergie, URL: <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/> (zugegriffen: 28.08.2023).

Detsios, N./Theodoraki, S./Maragoudaki, L./Atsonios, K./Grammelis, P./Orfanoudakis, N. G. (2023): Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review, ENERGIES, ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND: MDPI.

Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (DIHK) (Hrsg.) (2020): Wasserstoff: DIHK-Faktenpapier.

Döring, N. (2023): Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer.

European Commission (2023): Carbon Border Adjustment Mechanism, URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (zugegriffen: 30.08.2023).

Eurostat (2023): Installierte Photovoltaikleistung in der EU - Statistisches Bundesamt, Photovoltaik: Deutschland größter Erzeuger in der EU, URL: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/Photovoltaik.html> (zugegriffen: 27.08.2023).

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hrsg.) (2014): Biokraftstoffe, 4. Auflage, Gülzow-Prüzen.

- Felseghi, R.-A./Carcadea, E./Raboaca, M. S./Trufin, C. N./Filote, C. (2019): Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications, in: *Energies*, 12 (23), S. 4593.
- Ferreira, A. P. R. A./Oliveira, R. C. P./Mateus, M. M./Santos, D. M. F. (2023): A Review of the Use of Electrolytic Cells for Energy and Environmental Applications, in: *Energies*, 16 (4), S. 1593.
- Gawlik, W./Kerdegarbakhsh, A./Pešek, M./Alács, C. (2018): Entwicklung des Bedarfs an schneller Regelleistung im europäischen Verbundsystem, in: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 135 (8), S. 507–513.
- Hermeling, W./Nachtmann, K./Scholwin, F. (2023): *Biogas – ein Taschenbuch für die Erzeugerpraxis: Erzeugerwissen, Aufbereitung und Vermarktung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Ilgen, K. (2023): Schwimmende Photovoltaik - Fraunhofer ISE, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/schwimmende-photovoltaik-fpv.html> (zugegriffen: 31.08.2023).
- Jänisch, T./Neuling, U./Carels, F./Aigner, M./Kaltschmitt, M./Gaudig, U. (o. J.): *Outline of a 10,000 t/a PtL Plant: Technological Assessment and Upscale-Study*.
- Jarass, L./Hoffmann, A./Jarass, A./Obermair, G. (1980): *Windenergie - Eine systemanalytische Bewertung des technischen und wirtschaftlichen Potentials für die Stromerzeugung der Bundesrepublik Deutschland*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Jung, F. (2021): Power from Patagonia, in: *ATZ worldwide*, 123 (7–8), S. 3–3.
- Kaltschmitt, Martin/Streicher, Wolfgang/Wiese, Andreas (Hrsg.) (2020): *Erneuerbare Energien: Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte*, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kruse, M./Wedemeier, J. (2021): Potenzial grüner Wasserstoff: langer Weg der Entwicklung, kurze Zeit bis zur Umsetzung, in: *Wirtschaftsdienst*, 2021 (1), S. 26–32.
- Purr, K./Garvens, H.-J. (2021): *Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization*, Umweltbundesamt.
- Rädiker, S./Kuckartz, U. (2019): *Analyse qualitativer Daten mit MAXQDA: Text, Audio und Video*, 1. Auflage, Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- Ragwitz, M./Weidlich, A./Biermann, D./Brandes, J./Brown, T./Burghardt, C./Dütschke, E./Erlach, B./Fischedick, M./Fuss, S./et al. (2023): Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement, München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.
- Schäfer, K. F. (2022): Systemführung: Betrieb elektrischer Energieübertragungsnetze, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schirmer, D. (2020): 2. Methodologien Grundlagentheorien, in: Empirische Methoden der Sozialforschung, 1. Auflage, Brill | Fink, S. 33-82.
- Sebbahi, S./Nabil, N./Alaoui-Belghiti, A./Laasri, S./Rachidi, S./Hajjaji, A. (2022): Assessment of the Three Most Developed Water Electrolysis Technologies: Alkaline Water Electrolysis, Proton Exchange Membrane and Solid-Oxide Electrolysis, in: Materials Today: Proceedings, 66 , S. 140–145.
- Sharifi, S./Razmi, A. R./Nabat, M. H./Liu, J. J./Arabkoohsar, A./Shahbakhti, M. (2023): Power-to-X, in: Arabkoohsar, A. (Hrsg.): Future Grid-Scale Energy Storage Solutions, Academic Press, S. 621–646.
- Sievers, A./Willner, T. (2020): Fuels from Waste and Hydrogen : The HAW Hamburg Approach, in: Werner, J./Biethahn, N./Kolke, R./Sucky, E./Honekamp, W. (Hrsg.): Logistik Und Supply Chain Management, University of Bamberg Press, S. 291–304.
- Singla, M. K./Nijhawan, P./Oberoi, A. S. (2021): Hydrogen Fuel and Fuel Cell Technology for Cleaner Future: A Review, in: Environmental Science and Pollution Research, 28 (13), S. 15607–15626.
- Stier, W. (1999): Empirische Forschungsmethoden, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer.
- trend:research (2020): Eigentümerstruktur Photovoltaikanlagen, Eigentümerstruktur der Erneuerbaren Energien, URL: <https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/eigentuemstruktur-erneuerbare-energien> (zugegriffen: 25.08.2023).
- WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft (2022): Merit-Order-Modell am Strommarkt - Regulatorische Eingriffsmöglichkeiten, WD 5 - 3000 - 121/22.
- Wietschel, M./Plötz, P./Pfluger, B./Klobasa, M./Eßer, A./Haendel, M./Müller-Kirchenbauer, J./Kochems, J./Hermann, L./Grosse, B./et al. (2018): Sektorkopplung – Definition, Chancen und Herausforderungen.
- Zukunft Gas (2023): Power-to-Gas: Aus grünem Strom wird grüner Wasserstoff, Grüner Wasserstoff, URL: <https://gas.info/neue-gase/wasserstoff/herstellung-wasserstoff/gruener-wasserstoff> (zugegriffen: 22.08.2023).

Executive Summary	13
I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie	15
II. Design der vorliegenden Studie	21
III. Strukturelle Daten der Untersuchungseinheiten	26
IV. Ergebnisse der Studie	29
V. Fazit aus den Studienergebnissen	138
Literaturverzeichnis	143
Weitere Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft	147

Link zum Downloadbereich des Lehrstuhls: <https://www.b-tu.de/fg-produktionswirtschaft/downloads>

Lugert, A./Winkler, H.: **Die Wertstrommethode im Zeitalter von Industrie 4.0**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 1, Cottbus 2017.

Kaucher, Ch./Kunath, M./Winkler, H.: **Zukunft elektrochemischer Speicher für Hybridantriebe - Studienreport am Beispiel von Hybridrangierlokomotiven**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 2, Cottbus 2018.

Kunath, M./Winkler, H.: **Untersuchung des Status quo betrieblicher Entscheidungsunterstützungssysteme im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 3, Cottbus 2019.

Jeglinsky, V./Winkler, H.: **Untersuchung von Hindernissen zur Digitalisierung in der industriellen Produktion**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 4, Cottbus 2020.

Stockmann, C./Winkler, H.: **Robustheit in Produktionssystemen aus Sicht der industriellen Praxis**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 5, Cottbus 2020.

König, M./Winkler, H.: **Digitalisierung in der Montage mit dem Schwerpunkt des Einsatzes von Assistenzsystemen**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 6, Cottbus 2023.

Berneis, M./Winkler, H.: **Untersuchung von aktuellen Trends und Herausforderungen im Supply Chain Management in Deutschland**, Studienreport des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 7, Cottbus 2023.