**Turbomaschinen sind eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende in Deutschland. Sie ermöglichen die effiziente Umwandlung, Speicherung und den Transport gasförmiger Energieträger wie Wasserstoff und Ammoniak, sind zur $CO_2$-Abscheidung und -Speicherung sowie für die Nutzung von $CO_2$ als Rohstoff für synthetische Kraftstoffe erforderlich und tragen als zentrale Komponente in Großwärmepumpen entscheidend zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung bei. In neuartigen Energiespeichern wie Carnot-Batterien sowie in der Kernfusion spielen Turbomaschinen eine wesentliche Rolle bei der Energiewandlung.**

**Zukünftige Forschung muss auf die Anpassung an neue Arbeitsfluide, den flexiblen Betrieb bei hohen Lastgradienten, die Integration in sektorübergreifende Systeme, neue Werkstoffe und additive Fertigung sowie die Nutzung von KI bei der Auslegung und im Betrieb gerichtet sein.**

## Ausgangslage

Um das im Pariser Klimaabkommen von 2015 formulierte Ziel zu erreichen, den durch den anthropogenen Klimawandel verursachten globalen Temperaturanstieg auf unter 2°C zu begrenzen, legt das Klimaschutzgesetz (KSG) fest, dass Deutschland bis 2045 Netto-Treibhausgasneutralität erreichen muss [1]. Dieses Ziel erfordert eine weitgehende Dekarbonisierung der Energieversorgung. Eine zentrale Voraussetzung hierfür ist die Elektrifizierung des Verkehrs, der Wärmeversorgung sowie weiter Teile der Industrie, soweit dies technisch und wirtschaftlich möglich ist. Damit wird der Strombedarf in den kommenden Jahrzehnten deutlich ansteigen.

Im Monitoringbericht des BMWE vom September 2025 [2] werden verschiedene Studien ausgewertet, die für das Jahr 2030 einen Stromverbrauch zwischen 580 TWh und 700 TWh prognostizieren. Für das Jahr 2045 wird auf Grundlage der betrachteten explorativen Szenarien ein Bruttostromverbrauch zwischen 660 TWh und 850 TWh erwartet.

Zur Bereitstellung dieser Energiemengen aus erneuerbaren Quellen kommen in Deutschland im Wesentlichen Windenergie und Photovoltaik infrage. Dies spiegelt sich auch in der Stromerzeugung wider: Im Jahr 2025 entfielen mehr als 93% der regenerativen Stromerzeugung auf Wind- und Solarenergie [3]. Gleichzeitig sind dies die einzigen erneuerbaren Technologien, die derzeit in nennenswertem Umfang ausgebaut werden.

Das Ausbaupotenzial der Wasserkraft ist in Deutschland dagegen weitgehend ausgeschöpft [4]. Eine deutliche Ausweitung der Stromerzeugung aus Biomasse würde erhebliche zusätzliche Flächen erfordern und stünde in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Die Nutzung der Geothermie zur Stromerzeugung ist aufgrund der in Deutschland überwiegend niedrigen Reservoirtemperaturen – meist unter 200°C – wirtschaftlich nur eingeschränkt darstellbar und geht mit vergleichsweise hohen Stromgestehungskosten einher. Entsprechend stagniert die Stromerzeugung aus Biomasse und Geothermie seit mehreren Jahren auf niedrigem Niveau [5].

Aktuelle Studien gehen davon aus, dass zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2045 installierte Leistungen von rund 300 GW Windenergie und 470 GW Photovoltaik erforderlich sind [6]. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob der hierfür notwendige Ausbau dauerhaft in der erforderlichen Geschwindigkeit realisiert werden kann und ob sich der zukünftige Strombedarf überwiegend durch eine inländische erneuerbare Stromerzeugung decken lässt. Alternativ wird

Deutschland – wie bereits heute – auch künftig in erheblichem Umfang Energie importieren müssen.

**Energietransport und Speicherung: ohne Turbomaschinen nicht denkbar**

Ein Ausgleich über das europäische Stromnetz setzt voraus, dass in den Nachbarstaaten ausreichende Erzeugungskapazitäten aus erneuerbaren Energien vorhanden sind und zugleich die Übertragungskapazitäten der europäischen sowie insbesondere der deutschen Stromnetze entsprechend ausgebaut werden. Zusätzlich muss die Fähigkeit vorhanden sein, überschüssige Energie über längere Zeit, d.h. über Wochen und Monate, zu speichern. Dies kann nur durch chemische Energieträger gewährleistet werden. Eine weitere Option besteht im Import chemischer Energieträger aus Regionen mit besonders günstigen Bedingungen für die Erzeugung erneuerbarer Energien. Hierfür kommen insbesondere Wasserstoff und Wasserstoffderivate infrage. Vor diesem Hintergrund wurde bereits 2024 eine nationale Wasserstoffimportstrategie entwickelt, mit der bis 2045 ein Importbedarf von bis zu 500 TWh Wasserstoff sowie weiteren 200 TWh Wasserstoffderivaten gedeckt werden soll [7].

Für die Erzeugung, den Transport und die Speicherung von Wasserstoff sowie von Wasserstoffderivaten sind leistungsfähige Turbomaschinen von zentraler Bedeutung. Die direkte Speicherung von Wasserstoff erfolgt in der Regel bei Drücken von mehreren hundert bar und teilweise in Kombination mit kryogenen Temperaturen. Auch die Herstellung, Verdichtung, der Transport und die Speicherung von Wasserstoffderivaten wie Methan oder Ammoniak erfordern Prozesse bei erhöhten Drücken und/oder tiefen Temperaturen. Die hierfür erforderlichen Verdichtungs- und Kälteprozesse lassen sich nur durch den Einsatz hocheffizienter Turbomaschinen wirtschaftlich realisieren.

**Turbomaschinen stellen auch in der Zukunft eine elementare Komponente der elektrischen Energieversorgung dar**

Für die Rückverstromung von Wasserstoff ist gegenwärtig insbesondere dessen Einsatz in Gasturbinen vorgesehen. Die Entwicklung von Gasturbinen, die ausschließlich mit Wasserstoff betrieben werden können, wird – auch durch die Förderung der Bundesregierung im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms – intensiv vorangetrieben. Parallel dazu werden geschlossene Kreisprozesse untersucht, in denen Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe unter Oxyfuel-Bedingungen verbrannt werden. Solche Konzepte ermöglichen eine nahezu vollständige Abscheidung des entstehenden $CO_2$ und können damit einen wichtigen Beitrag zu einer klimaneutralen Energieversorgung leisten.

Parallel zur Entwicklung der Wasserstofftechnologien wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Konzepte für mechanische und thermische Energiespeicher entwickelt. Hierzu zählen beispielsweise adiabate Druckluftspeicher (Compressed Air Energy Storage, CAES), $CO_2$-basierte Speicherprozesse sowie Carnot-Batterien. Diese Speichertechnologien dienen dazu, Schwankungen in der Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie auszugleichen und elektrische Energie über Zeiträume von Stunden bis hin zu mehreren Tagen oder Wochen verfügbar zu machen.

Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung der zukünftigen Energieversorgung wird die Fähigkeit erforderlich sein, große Energiemengen im MW- bis GW-Leistungsbereich flexibel bereitzustellen, aufzunehmen, umzuwandeln und über längere Zeiträume zu speichern. Hierzu

gehören sowohl kurzfristige Laständerungen als auch saisonale Speicheraufgaben. Für diese Anwendungen bilden Turbomaschinen eine Schlüsseltechnologie. Sie ermöglichen die effiziente Umsetzung unterschiedlichster Kreisprozesse und Speicherkonzepte und übernehmen eine zentrale Funktion bei deren Einbindung in zukünftige Energiesysteme.

**Turbomaschinen als wesentlicher Bestandteil der Wärmewende**

Auch die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung wird maßgeblich durch den Ausbau von Wärmepumpen geprägt sein. Insbesondere Fernwärmesysteme mit Großwärmepumpen im MW-Bereich bieten hohe Effizienzpotenziale. Anlagen mit Leistungen zwischen 5 MW und über 20 MW wurden bereits in Betrieb genommen [8]; Systeme mit Leistungen bis etwa 200 MW befinden sich derzeit in Planung. Großwärmepumpen werden ausschließlich mit Turboverdichtern realisiert, wobei unterschiedliche Arbeitsmedien und Prozesskonzepte zum Einsatz kommen.

**Negativemissionstechnologien und CCS**

Neben der Transformation der Stromversorgung werden auch weitere Technologien einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität leisten. Hierzu zählen insbesondere Negativemissionstechnologien, mit denen Kohlendioxid dauerhaft aus der Atmosphäre entfernt werden kann. Ein Beispiel ist die energetische Nutzung von Biomasse oder biogenen Abfällen mit anschließender $CO_2$-Abscheidung und geologischer Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS). Darüber hinaus kann CCS als Brückentechnologie dazu beitragen, die $CO_2$-Emissionen fossil befeuerter Kraftwerke während der Übergangsphase zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung deutlich zu reduzieren.

Gleichzeitig wird $CO_2$ künftig zunehmend als Rohstoff für die Herstellung synthetischer Energieträger, beispielsweise im Rahmen der Methanisierung von Wasserstoff oder der Synthese weiterer Wasserstoffderivate, an Bedeutung gewinnen. Sowohl die Abscheidung als auch die Verdichtung, der Transport und die Speicherung großer $CO_2$-Mengen erfordern leistungsfähige und hocheffiziente Turboverdichter.

**Energiebereitstellung aus Kernfusion braucht Turbomaschinen**

Langfristig könnte darüber hinaus auch die Kernfusion einen Beitrag zu einer klimaneutralen Energieversorgung leisten. Die Bundesregierung verfolgt das Ziel, Deutschland zu einem führenden Standort der Fusionsforschung zu entwickeln und hat hierfür einen entsprechenden Aktionsplan vorgelegt [9]. Unabhängig vom letztlich realisierten Reaktorkonzept wird die Umwandlung der erzeugten thermischen Energie in elektrische Energie wiederum auf turbomaschinenbasierten Kraftwerksprozessen beruhen.

**Ressourceneffiziente Produktion**

Neben der weiteren Steigerung von Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit wird zukünftig auch die Nachhaltigkeit von Anlagen und Komponenten zunehmend an Bedeutung gewinnen. Insbesondere innovative Werkstoffe, ressourceneffiziente Konstruktionsansätze sowie additive Fertigungsverfahren bieten erhebliche Potenziale für die Fertigung und Produktion von Turbomaschinen, die im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten weiter erschlossen werden müssen.

**Künstliche Intelligenz für Auslegung und Betrieb von Turbomaschinen**

Darüber hinaus führt die zunehmende Vernetzung von Turbomaschinen mit erneuerbaren Energiequellen, Speichern, Wasserstoffsystemen und Wärmenetzen zu einer erheblich steigenden Systemkomplexität. Daraus ergibt sich ein wachsender Forschungsbedarf an datengetriebenen Methoden und Verfahren der Künstlichen Intelligenz. Ziel ist nicht die Ablösung physikalischer Modelle, sondern deren Erweiterung durch hybride Ansätze, welche physikalisches Prozessverständnis mit Messdaten und Lernverfahren kombinieren. Solche Methoden eröffnen neue Möglichkeiten für die Auslegung, den flexiblen Betrieb, die Regelung, die Zustandsüberwachung sowie die vorausschauende Instandhaltung zukünftiger Turbomaschinen und tragen damit wesentlich zur sicheren und wirtschaftlichen Integration in klimaneutrale Energiesysteme bei.

**Fazit**

Unabhängig davon, wie die zukünftige Energieversorgung in Deutschland konkret ausgestaltet sein wird, bleibt der Einsatz von Turbomaschinen eine unverzichtbare Voraussetzung für nahezu alle relevanten Technologien der Energiewende. Dies betrifft den Ausbau der erneuerbaren Energien ebenso wie Wasserstofftechnologien, Energiespeicher, CCS, Großwärmepumpen und perspektivisch auch die Kernfusion. Turbomaschinen übernehmen dabei zentrale Funktionen bei der Energieumwandlung, der Verdichtung, der Speicherung sowie dem Transport gasförmiger und flüssiger Energieträger.

Vor diesem Hintergrund besteht auch künftig ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Wichtige Forschungsschwerpunkte sind insbesondere:

- die Auslegung von Turbinen und Verdichtern für unterschiedliche Arbeitsmedien und Prozesskonzepte,
- der flexible Betrieb von Turbomaschinen bei hohen Lastgradienten und in einem großen Betriebsbereich,
- die Integration von Turbomaschinen in sektorübergreifende Energiesysteme,
- die effiziente Verbrennung von Wasserstoff und Wasserstoffderivaten sowohl in Luft als auch unter Oxyfuel-Bedingungen,
- die Entwicklung neuer Werkstoffe und Fertigungsverfahren für mechanisch und thermisch hoch belastete Komponenten,
- die Nutzung datengetriebener Methoden und Verfahren der Künstlichen Intelligenz für die Auslegung und die Einbindung in zukünftige Energiesysteme.

Quellen:


[1] Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/BJNR251310019.html, zuletzt abgerufen am 13.07.2026

[2] EWI & BET (2025): Energiewende. Effizient. Machen. – Monitoringbericht zum Start der 21. Legislaturperiode, im Auftrag des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

[3] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2025): Die Energieversorgung 2025 – Jahresbericht –

[4] Wissenschaftliche Dienste des Dt. Bundestags (2022): Zu Ausbaupotentialen der Wasserkraft in Deutschland. Sachstand WD 8 - 3000 - 026/22

[5] Kaltschmitt, M., Lenz, V. (2026): Erneuerbare Energien in Deutschland 2025, Springer Vieweg, Wiesbaden.

[6] Senkpiel, C., Kost, C. (2026): Kostenoptimale Transformation des deutschen Energiesystems bis 2045, Fraunhofer ISE.

[7] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024): Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate

[8] https://grosswaermepumpen-info.de/de/projekte/, zuletzt abgerufen am 13.07.2026

[9] Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2025): Deutschland auf dem Weg zum Fusionskraftwerk – Aktionsplan der Bundesregierung


**Unterzeichnet**

Prof. Francesca di Mare, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Markus Schatz, Universität der Bundeswehr Hamburg

Prof. Bernhard Weigand, Universität Stuttgart

Prof. Sven König, Technische Hochschule Trier

Prof. Wolfgang Polifke, Technische Universität München

Dr. Benjamin Witzel, Siemens Energy

Dr. Thomas Polklas, Everllence

Prof. Dieter Brillert, Universität Duisburg-Essen

Prof. Hubert Schwarze, Technische Universität Clausthal

Prof. Andreas Dreizler, Technische Universität Darmstadt

Prof. Bernd Becker, Technische Universität Darmstadt

Prof. Christian Hasse, Technische Universität Darmstadt

Prof. Peter Jeschke, RWTH Aachen

Prof. Ronald Mailach, Technische Universität Dresden

Prof. Wolfgang Grote-Ramm, Hoschule Düsseldorf.

Prof. Florian Herbst, DLR Institut für Antriebstechnik/Ruhr-Universität Bochum