

# Die Rolle der Turbomaschinen in der Energiewende

## Ein Positionspapier der AG Turbo

### Autoren

**Dr. Dirk Hilberg**

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG  
Eschenweg 11  
15827 Blankenfelde-Mahlow

**Heinz Knittel**

MTU Aero Engines AG  
Dachauer Straße 665  
80995 München

**Dr. Thomas Polklas**

MAN Energy Solutions SE  
Steinbrinkstraße 1  
46145 Oberhausen

**Dr. Alexander Wiedermann**

MAN Energy Solutions SE  
Steinbrinkstraße 1  
46145 Oberhausen

**Dr. Benjamin Witzel**

Siemens Energy  
Mellinghofer Straße 55  
45473 Mülheim an der Ruhr

**Prof. Dr. Francesca di Mare**

Chair of Thermal Turbomachines and Aeroengines  
Managing Director, Institute of Energy Technology  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstraße 150  
D-44801 Bochum

**Prof. Dr. Volker Gümmer**

Lehrstuhl für Turbomaschinen und Flugantriebe  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15  
85748 Garching

**Prof. Dr. Reinhard Mönig & Dr. Bertram Janus**

Institut für Antriebstechnik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Linder Höhe  
51147 Köln

**Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt**

Institut für Thermische Strömungsmaschinen und  
Maschinenlaboratorium  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 6  
70569 Stuttgart

## Inhalt

Vorwort	3
1 Klimaschutzpolitische Entwicklung	4
2 Die Rolle der Turbomaschinen für die erfolgreiche Umsetzung der Leitlinien	9
2.1 Elektrifizierung aller Sektoren: Erhöhter Bedarf an Elektrizität	9
2.2 Grüne Energieträger	10
2.3 Rückverstromung: Von Erdgas zum Grünen Wasserstoff	11
2.4 Turbomaschinen für Speicheranwendungen und innovative Zyklen	14
2.5 Synergien mit Flugantrieben	17
3 Unterstützende Technologien	19
4 Zusammenfassung und Fazit	21
5 Referenzen	22

## Vorwort

Die Strukturen der Energieversorgung unterliegen weltweit großen Veränderungen, welche notwendig sind, um die Energiewende und die internationalen Klimaschutzziele zu realisieren. Einen essenziellen Baustein der heutigen Energieversorgung bilden Turbomaschinen. So werden mehr als zwei Drittel des weltweiten Stroms durch Dampfturbinen, in der Regel in Kohle-, Kernkraft- oder GuD-Kraftwerken, sowie mit zunehmendem Anteil mittels Gasturbinen erzeugt. Neben der Stromerzeugung sind Turbomaschinen zentrale Bausteine in verschiedenen Industrie-Prozessen und auch der moderne, effiziente Flugverkehr wäre ohne Turbomaschinen nicht möglich.

Während die Einführung der ersten Turbomaschinen schon weit über 100 Jahre zurück liegt, hat sich die entsprechende Technologie über die Jahrzehnte kontinuierlich weiterentwickelt. Turbomaschinenbau bildet heutzutage einen Hochtechnologiesektor. Modernste Turbomaschinen benötigen Hochleistungswerkstoffe auf Grund der extremen thermomechanischen Belastungen sowie äußerst präzise Fertigungsmethoden für die Herstellung. Die komplexe Planung und Auslegung erfordert modernste Computertechnologien. Ein großer Treiber für die Weiterentwicklungen in den letzten Jahren waren neben kontinuierlichen Effizienzsteigerungen vor allem neue Anforderungen hinsichtlich der Betriebsflexibilität, die sich durch die zunehmende Integration der fluktuierenden, erneuerbaren Energiequellen in den Energiemarkt ergeben.

Um die Klimaziele zu erreichen, muss der Ausbau erneuerbarer Energiequellen weiter fortgeführt werden. Zusätzlich wird der Strombedarf durch die Dekarbonisierung weiterer Sektoren wie Verkehr (Elektromobilität), Wohnen (Wärmepumpen) und Industrie weiter steigen. Um dabei eine zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung dauerhaft sicherzustellen, müssen die fluktuierenden erneuerbaren Energien durch flexible Speichertechnologien und entsprechende Infrastruktur ergänzt werden, welche sowohl kurzfristige wie auch saisonale Schwankungen in der Stromproduktion durch Wasser, Wind oder Sonne ausgleichen können. Bei vielen dieser Speichertechnologien aber auch bei der Infrastruktur, z.B. um Wasserstoff oder andere grüne Energieträger an entsprechende Abnehmer zu verteilen, werden neuartige und für diese Einsatzzwecke optimierte Turbomaschinen benötigt werden.

Im Rahmen der AG Turbo werden seit über 35 Jahren zahlreiche Forschungsvorhaben zur Weiterentwicklung der Turbomaschinen-Technologie durchgeführt. Dabei konnten Forschungsergebnisse aus unterschiedlichen Bereichen wie z. B. der Gasturbinen- oder Verdichter-Entwicklung auch in die Entwicklung modernster Dampfturbinen integriert werden. Diese synergetische Nutzung von öffentlichen Fördergeldern war und ist nur möglich, weil die AG Turbo einen einzigartigen Verbund bietet, der es Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen ermöglicht, gemeinsam und eng abgestimmt an vorwettbewerblichen Themen zusammenarbeiten. Die AG Turbo möchte dieses Netzwerk auch zukünftig nutzen, um die neuen Herausforderungen zu meistern und somit eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland zu unterstützen. Turbomaschinen-Technologie ist für eine stabile Stromversorgung und damit den Erhalt und den Ausbau unseres Wohlstandes unverzichtbar.

# 1 Klimaschutzpolitische Entwicklung

**Menschlich getriebener Klimawandel.** Es besteht heute kein Zweifel mehr daran, welche immensen Auswirkungen das menschliche Wirtschaften auf unsere Umwelt und das globale Klima haben. Der Begriff der Anthropozene wurde als Benennung einer neuen geochronologischen Epoche geschaffen, nämlich des Zeitalters, in dem der Mensch zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde geworden ist. Crutzen und Stoermer [1] schafften ihn 2000, um eine Epoche zu beschreiben, welche von der Beeinflussung der natürlichen Welt und des Systems Erde durch menschliche Aktivität überwiegend geprägt wird. Beispielsweise wurde durch die industrielle Anwendung des Haber-Bosch-Verfahrens zur Herstellung synthetischen Düngers aus atmosphärischem Stickstoff der globale  $N_2$ -Kreislauf seit den letzten relevanten geologischen Ereignissen vor 2,5 Milliarden Jahren nachweislich erheblich verändert.

In seinem sechsten Assessment Report [2] bestätigte das im Jahre 1988 gegründete Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) die beobachtete anthropogene Steigerung der globalen Temperatur, wobei der Mittelwert über die Jahre 2010-2019 um  $1,09^\circ\text{C}$  höher war als der Referenzmittelwert der Jahre 1850-1900. Ein Vergleich mit dem bis 2022 gemessenen Mittelwert zeigt, dass dieser um weitere  $0,16^\circ\text{C}$  gestiegen ist und folglich die Gesamtsteigerung  $1,25^\circ\text{C}$  erreicht hat. Gleichzeitig konnte während der letzten sechs Jahrzehnte eine konstante Steigerung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf den heutigen Wert in Höhe von 415 ppm beobachtet werden [3], siehe Abbildung 1-1. Die Ursache dafür sind bekanntlich industrielle Prozesse, auf denen das menschliche Wirtschaften aktuell fußt. Die Verbrennung von Kohle zum Zweck der Energie- und Wärmegewinnung bildet dabei einen Haupteinflussfaktor.

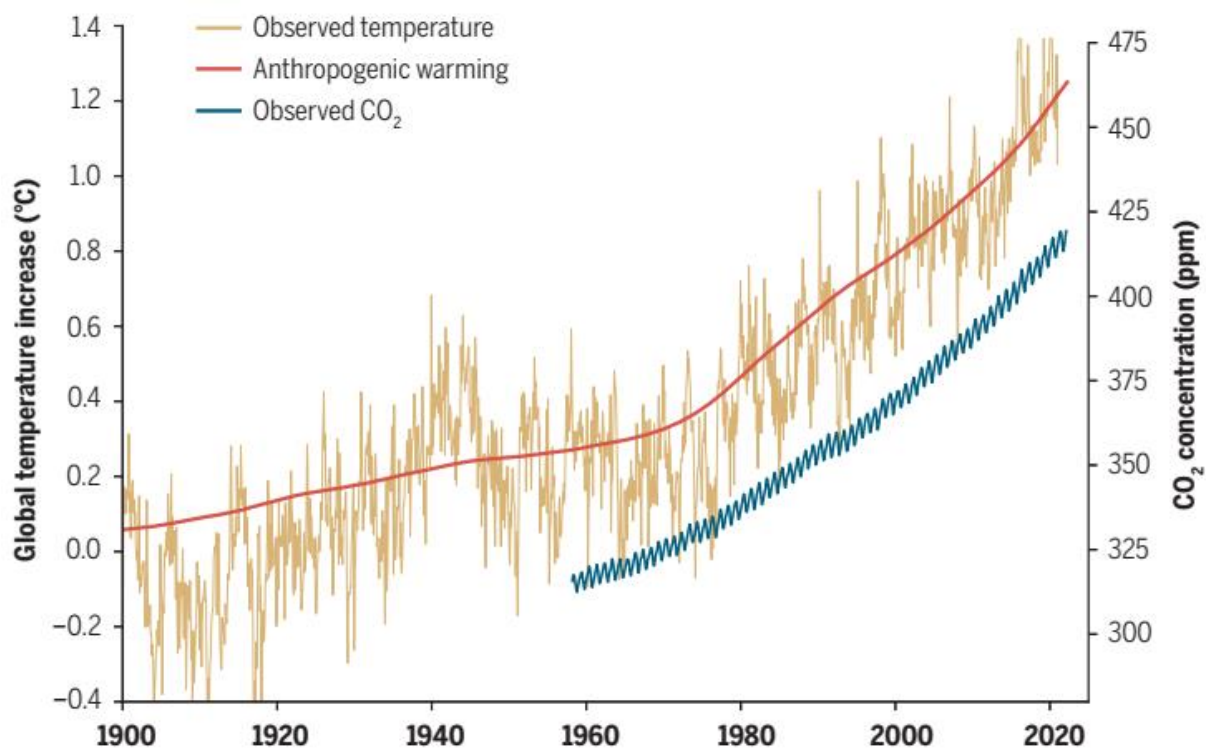


Abbildung 1-1: Korrelation zwischen beobachteter Erhöhung der globalen Temperatur und der Steigerung der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration [3]

**Ursachen und Folgen der CO<sub>2</sub>-Emission.** Insgesamt wurden seit 1750 etwa 555.000 Megatonnen Kohle durch menschliche Aktivität gewonnen und verbrannt, die zu den weit höchsten atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der letzten 800.000 Jahre geführt haben [4]. Bereits zu Beginn der 90er Jahre wurde die dringende Notwendigkeit globaler korrekiver Maßnahmen deutlich, mit denen die katastrophalen Konsequenzen der anthropogenen klimatischen Veränderungen abzuwenden ist. Mit dieser Motivation formten die Vereinten Nationen einen Rahmen für die erforderlichen politischen sowie gesetzlichen Handlungen. Dies geschah durch die Erarbeitung eines globalen Abkommens zum Schutz des Klimas, das zur Ratifizierung der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) 1992 und zur Etablierung der COP (Conference of the Parties of the United Nations Framework Convention on Climate Change) führte.

**Europa-politische Direktive.** Auf der COP 21 in Paris wurde im Dezember 2015 das sogenannte „Paris-Abkommen“ verabschiedet, welches im November 2016 in Kraft trat. Es legte die künftige Verpflichtung der europäischen Partnerstaaten fest, die globale Temperaturerhöhung auf deutlich unter 2,0°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, dies mit klarer Bestrebung einer Beschränkung auf 1,5°C [5].

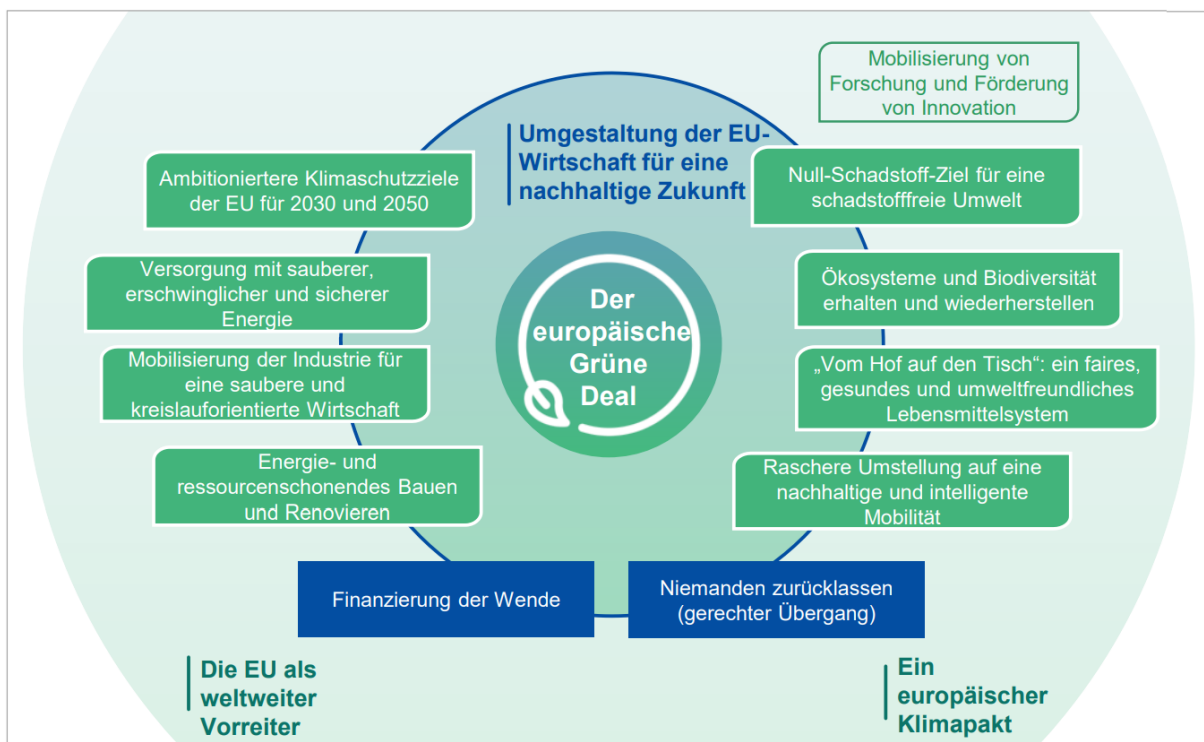


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung der Prinzipien des Europäischen Green Deal [6]

Die Europäische Union verfolgt in diesem Kontext das ambitionierte Ziel, Europa bis 2050 unter Erhaltung des wirtschaftlichen Wohlstands, des weltweit technologischen Vorsprungs und des fortgesetzten Einsatzes für eine gerechte und aufgeschlossene Gesellschaft zum ersten klimaneutralen Kontinent werden zu lassen. An diesen Prinzipien, siehe Abbildung 1-2, orientiert sich der sogenannte „European Green Deal“ [6], der im Dezember 2019 verabschiedet wurde und erstmalig die unverbindlichen Vereinbarungen des Pariser Abkommens in rechtskräftige Vorgaben umsetzte und sich dadurch als globale Richtlinie für den Klimaschutz positionierte.

Die Maßnahmen des European Green Deal lassen sich in acht Hauptpunkten zusammenfassen:

1. Die bereits durch die Initiative „A Clean Planet for All“ [7] festgelegten Klimaziele für 2030 sollen verschärft werden, sodass die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um mindestens 50% und idealerweise um 55% reduziert werden.
2. Die Verfügbarkeit sauberer, bezahlbarer und zuverlässiger Energie soll für alle gesichert werden.
3. Die Nachhaltigkeit industrieller Prozesse soll durch die massive Einführung und Förderung einer Kreislaufwirtschaft sowie neuer Technologien, wie beispielsweise künstlicher Intelligenz, gesteigert werden.
4. Die Effizienz der Energie-Nutzung von Gebäuden (welche allein für 40% des Energieverbrauch verantwortlich sind), soll durch Sanierungsprogramme gesteigert werden.
5. Transport- und verkehrsgebundene Emissionen sollen bis 2050 um 90% reduziert werden.
6. Die Lebensmittelversorgungskette soll nach den Prinzipien der Nachhaltigkeit und des Klimaschutzes umgestaltet werden (Farm-to-Fork-Policy).
7. Biodiversität und Ökosysteme, insbesondere Wälder und Meere, sollen geschützt werden.
8. Die Kontamination der Umgebung, der Lebensmittel und des Trinkwassers bzw. Grundwassers mit schädlichen Substanzen soll ab 2021 ganzheitlich durch eine „zero pollution policy“ unterbunden werden.

Zusätzlich zu den oben genannten Punkten, greift das Green Deal Programm zu begleitenden Maßnahmen, die auch die Kapitalmärkte sowie die Forschung zu einer Erneuerung und letzten Endes zur Nachhaltigkeit steuern sollen. Hierzu wurden zielgerichtet Budgets erhöht und Investitionen in Höhe von etwa 30% des EU Invest Fonds vorgesehen, aber auch erhöhte Flexibilität in der Verwendung der Mehrwertsteuereinnahmen durch die Mitgliederstaaten zum Zweck der Implementierung der acht Hauptrichtlinien geschaffen. Die acht Hauptrichtlinien des European-Green-Deal-Programms folgen der übergeordneten Vision künftiger Unversehrtheit der Umwelt (*do no harm policy*), der gemäß aller Maßnahmen zum strukturellen Wandel für die Realisierung einer nachhaltigen und gerechteren, dennoch wohlhabenden und technologisch fortgeschrittenen Gesellschaft beitragen sollen.

Das European-Green-Deal-Programm wurden sukzessive bereits in den Jahren 2020, 2021 und neuerlich in 2022 angepasst, um insbesondere den durch die COVID-19-Pandemie hervorgerufenen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen globalen Krisen entgegenzusteuern [8], [9] und [10]. Im Rahmen des zugehörigen Fitfor55-Programms [8] wurden weitere übergreifende Maßnahmen zur Konsolidierung und Verstärkung des European-Green-Deal-Programmes verabschiedet, welche vor allem eine faire und bezahlbare energetische Transition gewährleisten und insbesondere die mit der Energietransition gebundene Armut der sozial schwächeren Schichten der Gesellschaft bekämpfen sollen (z.B.: Social Climate Fund, Modernisation and Innovation Fund), siehe Abbildung 1-3. Die Maßnahmen der „Alternative Fuels Infrastructure Regulation“ zielen auf die Förderung von klimaneutralen Verkehrsmitteln durch die Erweiterung und den Ausbau der Kraftstoff- und Energieversorgungsinfrastruktur für den Straßen- und Luftverkehr hin (Elektromobilität, Sustainable Aviation Fuel (SAF), grüner Wasserstoff). Das FitFor55-Paket setzt nunmehr eine 40%ige Einbindung von Energien aus erneuerbaren Quellen in den Europäischen Energiemix als neues Ziel für unsere künftige Energieversorgung (weitere 8% über dem bisherigen Ziel von 32%).

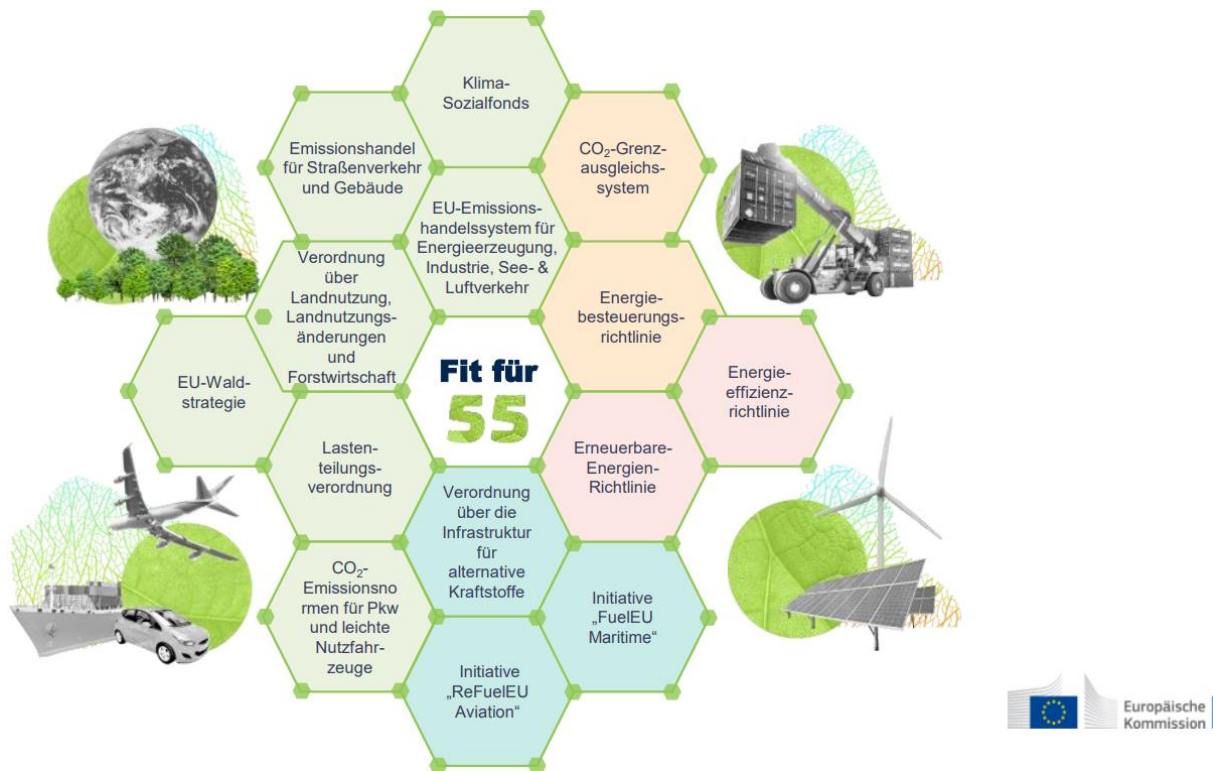


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der FitFor55 Maßnahmen [8]

**Deutsche Forschungszielsetzung.** Als Vorreiter der Energietransition und im Einklang mit den internationalen und europäischen energiepolitischen Programmen, hat Deutschland bereits mit der Verabschiedung des 7. Energieforschungsprogramms [11] im September 2018 den Rahmen für eine grundsätzliche Transformation der Energiewirtschaft gesetzt, wobei die fundamentalen Prinzipien der Versorgungssicherheit, der verlässlichen Bezahlbarkeit und der Klimaverträglichkeit das sogenannte energiepolitische Zieldreieck des Programms bilden.

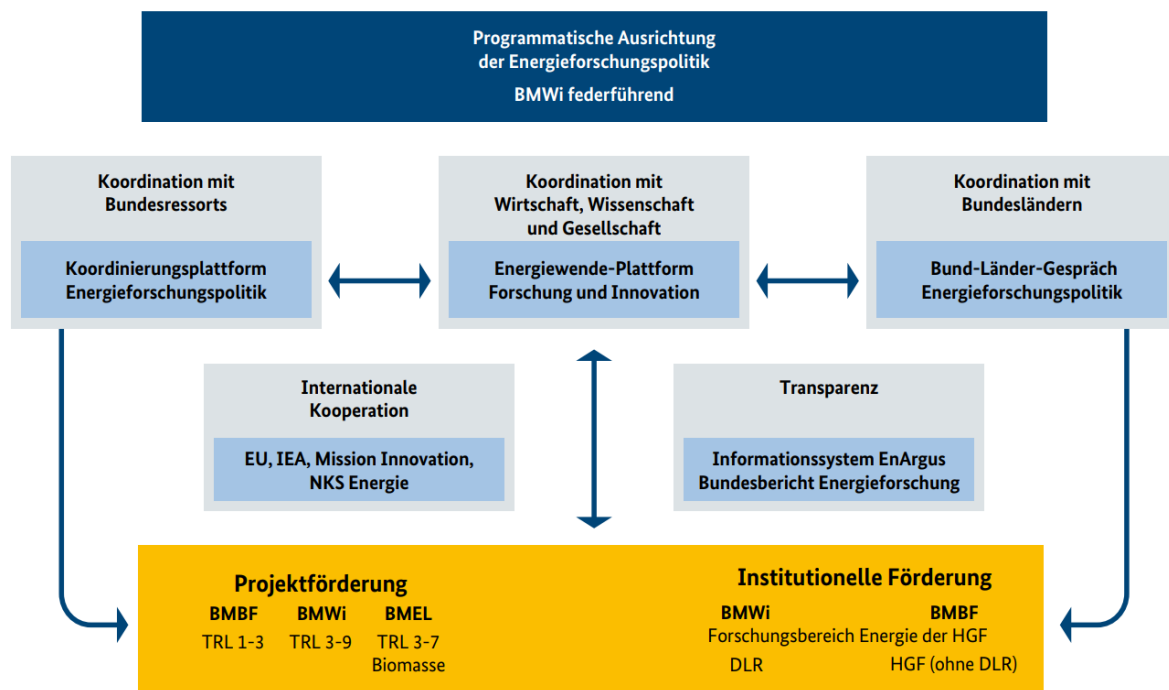


Abbildung 1-4: Strukturen der Energieforschung im 7. Energieforschungsprogramm [11]

Durch die Kombination institutioneller und projektbezogener Förderung, die von den drei Bundesministerien BMWi/K, BMBF und BMEL ressortübergreifend getragen wird, berücksichtigt das Förderprogramm das volle Spektrum der Technologiereifegrade (TRL) und die technologische Vielfalt, welche für das Gelingen der Energiewende notwendig ist (siehe Abbildung 1-4).

Die förderpolitischen Ziele des 7. Energieforschungsprogramms drücken sich in sechs wesentlichen Punkten aus:

1. Beschleunigung des marktorientierten Ausbaus erneuerbarer Energien, vor allem durch integrierte Betrachtung aller Sektoren und deren intelligenter Vernetzung.
2. Anhebung der Energieeffizienz auf allen Systemebenen, wobei der Primärenergieverbrauch bis zum Jahr 2050 gegenüber 2008 halbiert werden soll.
3. Intelligente Nutzung der Energieinfrastruktur durch innovative Vernetzung der existierenden Infrastruktur mit den für die neuen Technologien zu errichtenden Anlagen.
4. Gewährleistung der Sicherheit der Energieversorgung durch Ausbau der Speichertechnologien sowie Steigerung der technischen Robustheit und Resilienz des Versorgungssystems.
5. Stärkung des Umwelt- und Klimaschutzes durch Berücksichtigung des mit innovativen Energietechnologien verbundenen Material- und Ressourcenverbrauchs.
6. Berücksichtigung gesellschaftlicher Auswirkungen durch gezielte, regionale wirtschaftliche und politische Unterstützung des Strukturwandels, siehe Strukturstärkungsgesetz [12]

Die im 7. Energieforschungsprogramm vorgesehenen Schwerpunkte der Forschungs- und Entwicklung richten sich auf jene zentralen technologischen und wissenschaftlichen Herausforderungen, denen sich die Gesellschaft stellen muss, um eine sichere, zuverlässige, bezahlbare und nachhaltige Energieversorgung des Industriestandort Deutschlands zu gewährleisten.

Mit dem hier vorliegenden Positionspapier möchte sich die AG Turbo auch in die derzeit anstehende Gestaltung des neuen, in der Planung befindlichen 8. Energieforschungsprogramm einbringen.



## 2 Die Rolle der Turbomaschinen für die erfolgreiche Umsetzung der Leitlinien

### 2.1 Elektrifizierung aller Sektoren: Erhöhter Bedarf an Elektrizität

Die Zielsetzung der zunehmenden Elektrifizierung der Sektoren unserer Volkswirtschaft und der Lösungsansatz der Kopplung unserer Energiesektoren sind eng miteinander verknüpft. Die Sektorenkopplung löst die traditionell weitgehend voneinander unabhängig beschaffenen Strukturen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung ab. Dieser Prozess wird von der dringend notwendigen Dekarbonisierung getrieben, die durch eine möglichst vollständige Umstellung der Energieversorgung auf Strom, in Deutschland insbesondere aus erneuerbaren Energien, erreicht werden soll.

Der Weg zur „all electric society“ lässt sich nur durch einen umfassenden Transitionsprozess erreichen, der schließlich eine gänzlich CO<sub>2</sub>-neutrale Elektrizitätserzeugung ermöglicht. Zunächst erfordert dies die Entwicklung erneuerbarer Energiequellen wie Photovoltaik und Windenergie, deren verlässliche Nutzbarmachung aber aufgrund ihrer starken Volatilität operationell erst durch zusätzliche Energiespeicherinfrastrukturen möglich ist. Das wesentliche Problem der Sektorenkopplung ist es, die bislang erreichten Beitragserfolge der erneuerbaren Energien zur Dekarbonisierung auf die energie- und emissionsintensiven Sektoren des Verkehrs, der Wärmeversorgung, der Landwirtschaft und der Schwerindustrie auszudehnen, mit dem Ziel, einen Netto-Null-CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Deutschland in naher Zukunft erreichbar zu machen und auf diese Weise Öl, Kohle und Gas vollständig abzulösen.

Aus der Verfolgung der Klimaneutralität durch Umsetzung der Sektorenkopplung ergibt sich ein erheblicher Mehrbedarf an Elektrizität. Einerseits wird in zunehmend vielen Wirtschaftssektoren Strom zum Energieträger und andererseits ist elektrische Energie zur Erzeugung CO<sub>2</sub>-neutraler Kraftstoffe für solche Systeme aufzuwenden, die nicht stromnetzgebunden versorgt werden können. Dies betrifft den Mobilitätsbereich, insbesondere den Flug- und Schiffsverkehr, aber auch industrielle Prozesse. Im Bereich der elektrizitätsgestützten Industrieprozesse schreitet die Versorgung mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen erfolgreich voran, während in den Sektoren Verkehr und Wärmeerzeugung weiterhin ein hoher Anteil an Erdöl und Erdgas zum Einsatz kommen. Im Jahr 2012 wurde der bundesdeutsche Stromverbrauch zu 23% und im Jahr 2020 bereits zu 43% aus erneuerbaren Energien gedeckt. Power-to-X-Technologien zur CO<sub>2</sub>-neutralen Erzeugung von Wasserstoff oder Wärme befinden sich entweder noch im Versuchsstadium oder sind noch nicht im großen Maßstab einsetzbar.

Strom hat gegenüber flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen den Nachteil, dass er elektrochemisch in Batterien oder in umgewandelter Form, beispielsweise als Wasserstoffgas bei Power-to-X-Prozessen, in Pumpspeichern oder in Drehmomentspeichern gespeichert werden muss. Die damit verknüpften Umwandlungsschritte gehen stets mit unvermeidlichen Energieverlusten einher. Im Besonderen sind Batterien kostenaufwendig und ökologisch im Hinblick auf Bau und Rohstoffversorgung umstritten. Power-to-X-Lösungen sind am Markt einer Konkurrenz mit den günstig zur Verfügung stehenden fossilen Energieträgern ausgesetzt. Flexible Stromspeicherlösungen sind Voraussetzung und gleichzeitig Ergebnis der Sektorenkopplung und Elektrifizierung.

Die Elektrifizierung kann auf Basis existierender Technologien auf neue Sektoren erweitert werden. Die Polymerproduktion in der Kunststoff- und Chemikalienindustrie kann z.B. durch fossilfreien Wasserstoff (aus Strom und Wasser) und Kohlendioxid vorgenommen werden und

auf diese Weise während des Prozesses mehr CO<sub>2</sub> binden als freigesetzt wird. Im Agrarsektor eröffnet die Elektrifizierung der Kunstdüngerproduktion nennenswertes Potenzial.

Studien zeigen ([16] und [17]), dass bei einer zunehmenden Elektrifizierung der Wärme- und Mobilitätssektoren, der Stromverbrauch um bis zu 400-800 TWh bis 2050 steigen könnte. Diese Prognose beruht auf sogenannten Szenarien, beispielsweise Szenario „C“ in [18], die konsistent auf eine erhebliche Lücke zwischen prognostizierter installierter Leistung und Bedarf bzw. Verbrauch verweisen. Die zuverlässige Abdeckung der Stromversorgung für eine „tiefe Dekarbonisierung“ [19] erfordert einerseits adäquate Speicherkapazität, andererseits eine Flexibilisierung der elektrischen Last bei direkter sowie indirekter Elektrifizierung. Hierzu können vor allem Wärmespeicher eingesetzt werden, bei denen flexible Turbomaschinen eine zentrale Rolle spielen (siehe Kapitel 2.4 sowie Abbildung 2-6).

## 2.2 Grüne Energieträger

Chemische Energieträger ermöglichen die Speicherung und den Transport von Energie bis in den großtechnischen Maßstab und erlauben die zeitliche und räumliche Entkoppelung des Energieangebots vom aktuellen Energiebedarf zu Zeiten, in denen der durch erneuerbare Energiequellen erzeugte Strom nicht direkt genutzt werden kann. 2010 wurde dafür der Begriff „Power-to-X“ eingeführt [19], welcher die entsprechende Umwandlung von Überschuss-Strom in CO<sub>2</sub>-neutrale Ausgangsstoffe wie z.B. Wasserstoff aus Elektrolyse und die eventuelle anschließende Weiterverarbeitung zu synthetischen Energieträgern wie zum Beispiel Ammoniak, Methanol oder Sustainable Aviation Fuels (SAF) zusammen zu fassen. Wasserstoff ist dementsprechend als vielfältig einsetzbarer Energieträger ein zentrales Element zur erfolgreichen Dekarbonisierung der zukünftigen Gesellschaft. Daher wurde im Jahr 2020 in Deutschland die Nationale Wasserstoffstrategie [20] vorgestellt. Diese bildet den Startpunkt und skizziert den Weg des Übergangs einer auf fossilen Energieträgern basierten Energieumwandlung und Mobilität und der damit verbundenen Infrastruktur in eine CO<sub>2</sub>-neutrale Energienutzung auf Grundlage einer Wasserstoffwirtschaft in fast allen Sektoren.

Grundlage ist die CO<sub>2</sub>-freie Produktion von Wasserstoff. Ohne Einschränkungen trifft dies nur für sog. Grünen Wasserstoff zu, der aus CO<sub>2</sub>-freier Stromerzeugung – insbesondere aus Photovoltaik-, Wind- und Wasserkraftanlagen – durch Elektrolyse von Wasser hergestellt wird. Dieser Wasserstoff kann entweder direkt genutzt werden oder bildet die Basis für weitere synthetische Energieträger (Power-to-X) und ist auch schon heute Grundstoff für viele nachfolgende Prozesse in der chemischen Industrie wie z.B. für Ammoniak.

Abbildung 2-1 gibt einen Überblick über die Über- und Unterproduktion von Strom in Deutschland innerhalb eines gesamten Jahres und setzt dies ins Verhältnis zu verschiedenen Energiespeichermöglichkeiten. So wird gezeigt, dass, wenn in Deutschland etwa 44 Millionen Elektroautos mit einer Kapazität von 20 kWh mit dem Netz verbunden wären, nur 0,44 TWh Speicherkapazität abgedeckt werden könnten und bei einer Last von 60 GW das Netz nur für wenigen Stunden stabilisieren könnte. Im Gegensatz dazu könnten chemische Speicher wie beispielsweise Gasreserven mit vergleichbarer Entladungskapazität diesen Bedarf für circa 3 Monate abdecken. Grüner Wasserstoff und seine Power-to-X Folgeprodukte sind somit als Energieträger und -speicher das Bindeglied zwischen der volatilen Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen wie Photovoltaik und Windkraft und den Verbrauchern in allen Sektoren, wie z.B. für die Strom- und Wärmeerzeugung oder die Mobilität. Sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Nutzung von Power-to-X Energieträgern werden Turbomaschinen, z.B. zu Verdichtung, Transport oder Expansion, eingesetzt werden und sind somit unabdingbar für ein dekarbonisiertes Energiesystem der Zukunft.

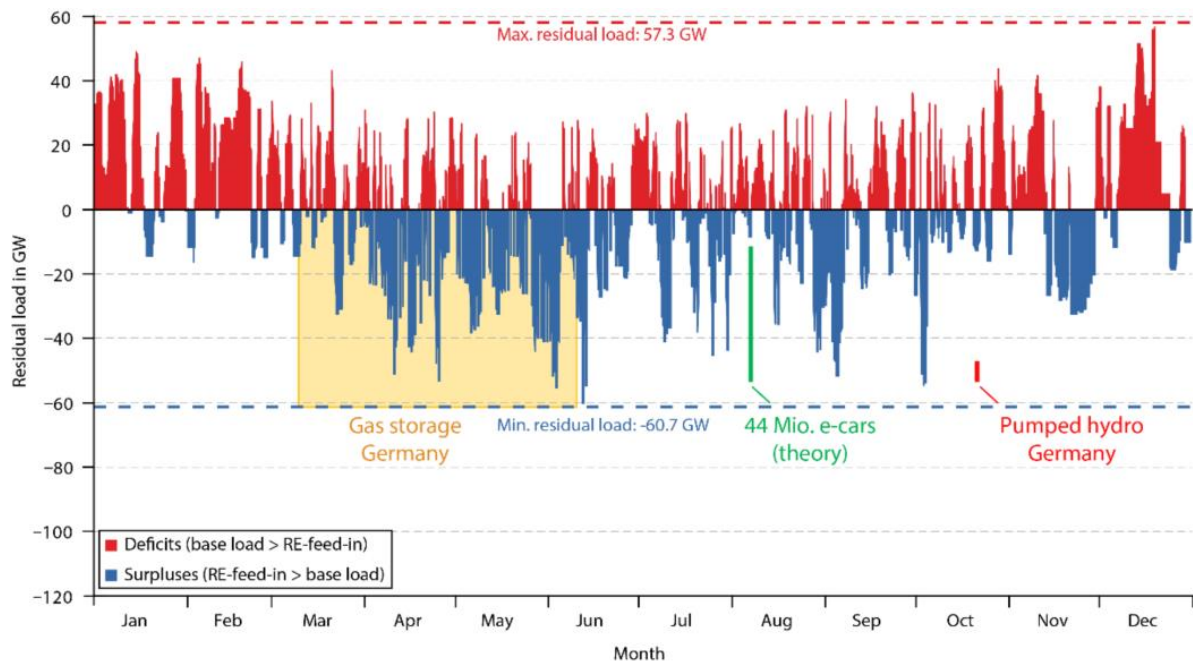


Abbildung 2-1: Defizite und Überschüsse bei einer 100% klimaneutralen Stromerzeugung in Deutschland (aus [19] und dort zitierten Quellen).

### 2.3 Rückverstromung: Von Erdgas zum Grünen Wasserstoff

Grüner Wasserstoff wird eine zentrale Rolle bei Power-to-X-Anwendungen zur Speicherung von Energie spielen. Ein erster Schritt ist die Verdrängung von Erdgas durch nachhaltigen Wasserstoff, um einen klimaneutralen Kraftwerksbetrieb zu ermöglichen, da bei der Wasserstoffverbrennung kein CO<sub>2</sub> entsteht. Die Gasturbine bietet aufgrund der hohen Brennstoffflexibilität ideale Voraussetzungen, die zudem in einem breiten Leistungsbereich von weniger als einem bis zu mehreren hundert Megawatt zum Tragen kommt. Mit wachsender Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff können Erdgas-Kraftwerke für den Betrieb mit steigendem Wasserstoffanteil oder sogar reinem Wasserstoff umgerüstet werden. Wie in Abbildung 2-2 dargestellt ist die Beziehung zwischen CO<sub>2</sub>-Reduktion und Wasserstoffvolumengehalt dabei jedoch nichtlinear. Bei 50 Volumenprozent Wasserstoff in Erdgas beträgt die CO<sub>2</sub>-Reduktion lediglich ca. 23%. Für 50% CO<sub>2</sub>-Reduktion müssen bereits ca. 80 Volumenprozent Wasserstoff beigemischt werden. Dementsprechend sind sehr hohe Wasserstoffgehalte für eine nachhaltige CO<sub>2</sub>-Reduktion erforderlich.

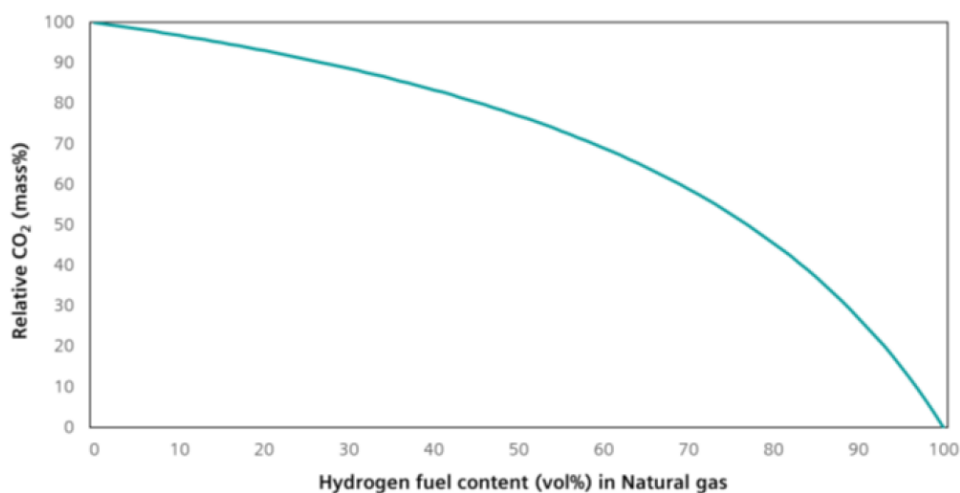


Abbildung 2-2: Relative CO<sub>2</sub>-Reduktion bei steigendem H<sub>2</sub>-Gehalt in Erdgas [21]

Die sichere Beherrschung der Verbrennung von Wasserstoff unterliegt allerdings mehreren Herausforderungen. Da sich dieser Brennstoff durch seine hohe Reaktivität und eine größere Flammengeschwindigkeit erheblich von dem bisher verwendeten Erdgas unterscheidet, kann es zu problematischen Phänomenen wie Flammenrückschlag, thermo-akustischen Verbrennungsinstabilitäten und erhöhten Stickoxidemissionen kommen. Wasserstoff hat Verbrennungseigenschaften, die zusätzliche Herausforderungen für Gasturbinen-Verbrennungssysteme darstellen, die bis dato hauptsächlich für Erdgas ausgelegt sind. Die Flammentemperaturen für Wasserstoff unter adiabatischen und stöchiometrischen Bedingungen sind fast 300°C höher als für Methan. Die laminare Flammengeschwindigkeit von Wasserstoff ist mehr als dreimal so hoch wie die von Methan und die Selbstentzündungsverzugszeit von Wasserstoff ist mehr als dreimal niedriger als die von Methan, wie in Abbildung 2-3 für Flammentemperaturen von 1600°C und Gasturbinenbedingungen gezeigt. Mit diesen Eigenschaften ist Wasserstoff ein hochreaktiver Brennstoff und die Kontrolle der Verbrennung, um die Integrität des Verbrennungssystems zu erhalten und das gewünschte Emissionsniveau zu erreichen, ist eine gewaltige Herausforderung. Hier bietet die AG Turbo aufgrund der engen Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und Industrie herausragende Rahmenbedingungen, die notwendigen Methoden und Technologien zur sicheren und emissionsarmen Wasserstoffverbrennung effizient und zielgerichtet zu entwickeln.

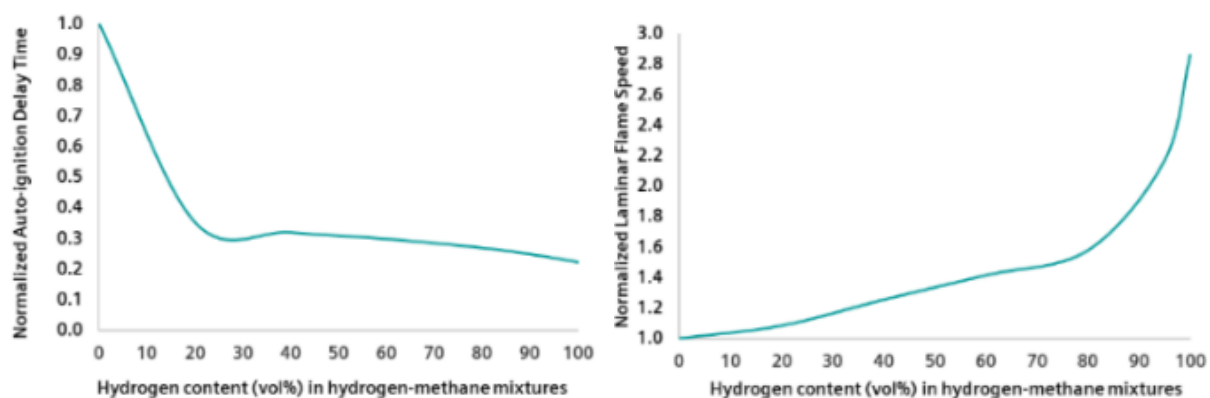


Abbildung 2-3: Einfluss des Wasserstoffgehalts auf die Zündverzugszeit und laminare Flammengeschwindigkeiten für Methan/Wasserstoff-Gemische [21]

Speziell für den Stromsektor hat der Einsatz von Wasserstoff in Gasturbinen weitere Vorteile. Für die Betreiber reduziert der Einsatz von Wasserstoffkraftstoffen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bestehender Erzeugungsanlagen. Es ermöglicht diesen Einrichtungen, an kohlenstoffarmen Energiemärkten teilzunehmen und vermeidet verlorene Vermögenswerte aufgrund von Vorschriften zur Emissionsreduktion. Für das Stromnetz sind Gasturbinen, die mit Wasserstoffbrennstoff oder Wasserstoffbrennstoffgemischen betrieben werden, disponierbar und stellen flexible Erzeugungskapazitäten zur Verfügung. Gegenüber elektrochemischen Rückverstromungsprozessen (z.B. Brennstoffzellen) leisten Sie durch ihre rotierende Masse zudem einen elementaren Beitrag zur Frequenzstabilität. Die Umrüstung und weitere Nutzung der installierten Gasturbinenflotte vermeiden größere Kapitalkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit dem Bau neuer Anlagen zur Unterstützung des intermittierenden Marktes für erneuerbare Energien verbunden sind. Gasturbinen in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen in verschiedenen Anwendungen können Dampf und Wärme bereitstellen, die sonst durch elektrische Heizungen oder Biomasseanlagen ersetzt werden müssten.

Auf dem Weltmarkt für große und hoch-effiziente Gasturbinen der H-Klasse gibt es derzeit vier etablierte Anbieter: GE Energy (USA), Siemens Energy (Deutschland / USA), Mitsubishi Power (Japan) und Ansaldo Energia (Italien / Schweiz). Mittelfristig könnten noch Doosan Heavy Industries (Südkorea) sowie Shanghai Electric (China) dazu stoßen. Daneben gibt es ein breites Portfolio an Heavy Duty Gasturbinen über 100 MW (E- und F- Klasse) sowie eine Vielzahl von weiteren Anbietern kleinerer Gasturbinen unterhalb von 100 MW. Dazu zählen neben Solar Turbines (USA) auch MAN Energy Solutions (Deutschland). Als Primärenergieträger kommen hauptsächlich Erdgas, aber auch unterschiedliche Synthesegase mit – in der Regel – niedrigeren Heizwerten zum Einsatz. Öl spielt, vor allem als Zweitbrennstoff, eine eher untergeordnete Rolle. Die eingesetzten Verbrennungssysteme basieren bei Gasverbrennung nahezu ausschließlich auf trockener Vormischverbrennung, die – auch bei sehr hohen Turbineneintrittstemperaturen (bis ca. 1600°C) – sehr niedrige Stickoxidemissionen ermöglicht.

Wie in Abbildung 2-4 gezeigt, sind heutige Verbrennungssysteme moderner Gasturbinen für Wasserstoff-Volumenanteile zwischen 30 und 50% von den Herstellern freigegeben. Allerdings arbeiten alle führenden Gasturbinenhersteller intensiv daran, in den nächsten Jahren Verbrennungssysteme zu entwickeln, die einen Betrieb bis zu 100% Wasserstoff im Vormischbetrieb ermöglichen. Besonders aussichtsreich erscheinen dabei die Flamesheet-Technologie mit Trapped-Vortex Flammstabilisierung (PSM/Ansaldo), die Micromixer-Technologie (GE und Kawasaki) sowie die Multi-Cluster-Technologie (MHPS).

Heutige drallstabilisierte Verbrennungssysteme mit magerer Vormischverbrennung sind – je nach Ausführung - nur bis zu etwa 30 bis maximal 75% H<sub>2</sub>-Zumischung geeignet. Für höhere Wasserstoff-Volumenanteile und 100% Wasserstoffverbrennung sind neuartige Brennersysteme für einen sicheren Betrieb bei niedrigen Stickoxidemissionen (NO<sub>x</sub>) notwendig, die noch einen erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufweisen.

	<b>Type</b>	<b>Notes</b>	<b>TIT °C [°F] or Class</b>	<b>Max H<sub>2</sub>% (Vol)</b>
<b>MHPS</b>	Diffusion	N <sub>2</sub> Dilution, Water/Steam Injection	1200~1400 [2192~2552]	100
	Pre-Mix (DLN)	Dry	1600 [2912]	30
	Multi-Cluster	Dry/Underdevelopment - Target 2024	1650 [3002]	100
<b>GE</b>	SN	Single Nozzle (Standard)	B,E Class	90-100
	MNQC	Multi-Nozzle Quiet Combustor w/ N <sub>2</sub> or Steam	E,F Class	90-100
	DLN 1	Dry	B,E Class	33
	DLN 2.6+	Dry	F,HA Class	15
	DLN 2.6e	Micromixer	HA Class	50
<b>Siemens</b>	DLE	Dry	E Class	30
	DLE	Dry	F Class	30
	DLE	Dry	H Class	30
	DLE	Dry	HL Class	30
<b>Ansaldo</b>	Sequential	GT26	F Class	30
	Sequential	GT36	H Class	50
	ULE	Current Flamesheet™	F, G Class	40
	New ULE	Flamesheet™ -- Target 2023	Various	100

Abbildung 2-4: Zulässige Wasserstoffanteile verschiedener Brennerkonzepte [22]

Hinsichtlich der Vergleichbarkeit von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) für Brennstoffe mit unterschiedlichem Wasserstoff-Gehalt ist zu berücksichtigen, dass die üblicherweise verwendete Umrechnung auf trockenes Abgas mit einem Restsauerstoffgehalt von 15% zulasten von Brennstoffen mit höherem Wasserstoffanteil geht und gleichzeitiger Abnahme bzw. Wegfall von Kohlendioxid im Abgas das relative Verhältnis von NO<sub>x</sub> signifikant verschiebt. Exemplarisch ist dieser Einfluss anhand einer kinetischen Rechnung in Abbildung 2-5 für typische Randbedingungen in stationären Gasturbinen gezeigt [23].

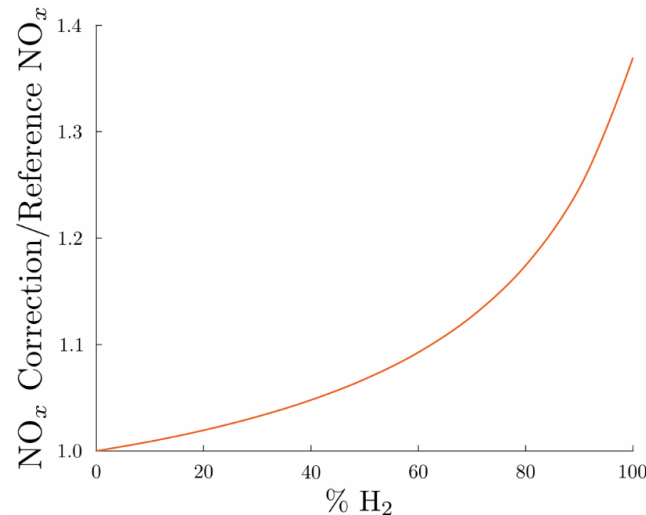


Abbildung 2-5: Berechnete (trockene) NO<sub>x</sub>-Emissionen bei konstanter Temperatur für verschiedene H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> Verhältnisse bezogen auf reines Methan [23].

Neben dem Einfluss auf das Verbrennungsverhalten generieren die speziellen Stoffeigenschaften von Wasserstoff potenzielle Herausforderungen im Zusammenhang mit Speicher- und Hilffsystemen für Gasturbinen. Als kleinstes Molekül diffundiert Wasserstoff deutlich leichter durch die Wände von Rohrleitungen und Speicherbehältern. Sofern keine langen unkontrollierten Standzeiten entstehen, ist dieser Effekt jedoch bei den üblicherweise metallisch ausgeführten Systemen vernachlässigbar. Bei bestimmten metallischen Werkstoffen kann es jedoch zu beschleunigter Materialversprödung kommen. Dieser Aspekt ist vor allem dort relevant, wenn Speicher- und Leitungssysteme ursprünglich für die Nutzung mit Methan oder vergleichbaren Kraftstoffen entwickelt wurden. Hier kann es bei Nichtberücksichtigung zu erheblichen Beeinträchtigungen der Materialintegrität kommen und unerkannte Leckagen entstehen. Diese resultieren in Verbindung mit den höchst sensiblen Zündeigenschaften in großen Sicherheitsrisiken.

Alle oben genannten Herausforderungen erfordern umfangreiche Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten, um Gasturbinen auf ein technisch ausgereiftes und zuverlässiges Niveau vergleichbar zu heutigen mit Erdgas befeuerten Anlagen zu bringen. Dies beinhaltet auch die Unterstützung durch gezielt entwickelte Messtechniken und Simulationsverfahren.

## 2.4 Turbomaschinen für Speichieranwendungen und innovative Zyklen

Die Ermittlung des Speicherbedarfs in Deutschland und weltweit zeigt, dass trotz der exzellenten Fortschritte der Forschung und Entwicklung der letzten Jahrzehnte ein ausreichendes Verhältnis von Speicherdauer und -kapazität (Monate/TWh) nur durch thermomechanische oder chemische Speichermethoden zu erreichen ist, wie die Ansätze CAES, LAES und Power-to-X ausdrücken ([13] und [14]).

Energie lässt sich elektrisch, elektrochemisch, mechanisch, thermisch oder chemisch speichern. Dabei unterscheiden sich die Energiespeicherarten nicht nur hinsichtlich ihrer Kapazität, sondern auch in der möglichen Aufbewahrungszeit der zu speichernden Energie. Für die Speicherung von sehr großen Energiemengen über lange Zeiträume kommen nur chemische Energiespeicher in Betracht. Gerade diese Speichertechnologien für den Langzeitbereich und große Speichermengen erfordern den Einsatz von Verdichtern und Turbinen. Zahlreiche innovative Energiespeichersysteme basieren dabei auf Turbomaschinen. Abbildung 2-6 zeigt eine Übersicht verschiedener Energiespeicher-Technologien.

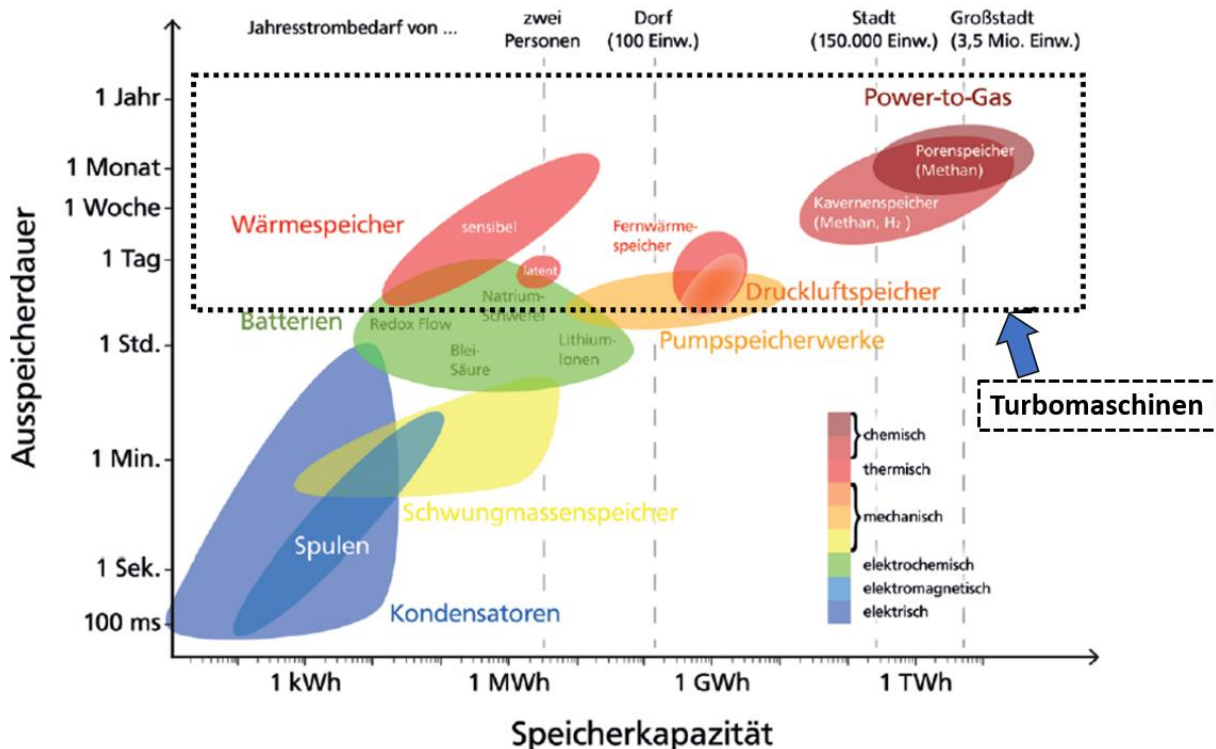


Abbildung 2-6: Speicherkapazität und Ausspeicherdauer verschiedener Speichertechnologien nach [13]

Im Bereich der thermischen Energiespeicher kommen Verdichter, eingesetzt als Wärmepumpen zum Einsatz. Die Anforderungsprofile an diese Wärmepumpen-Verdichter unterscheiden sich von denen für Verdichter, die bislang im Kraftwerksbereich, der Chemie- und Prozess-Industrie, sowie im Flugverkehr eingesetzt werden. Somit entstehen Forschungsaufgaben, um z. B. die Wärmepumpen-Verdichter für hohe Austrittstemperaturen zu ertüchtigen oder für innovative Wärmeträgerfluide anzupassen. In zukünftigen Energiespeichern werden auch andere Kreislauf-Fluide Verwendung finden als die bisher meist üblichen wie Wasser und Luft. Dies können z. B. Ammoniak, CO<sub>2</sub> (trans- oder superkritisch) oder ORC-Fluide (Organic-Rankine-Cycle) sein. Für den Speicher-Entladebetrieb wiederum sind Turbinen erforderlich die auf Dampfturbinen- und/oder Gasturbinen-Technologie basieren. Auch hier sind technologische Adaptionen notwendig, welche teilweise durch grundlegende Forschung unterstützt werden müssen.

Im Vergleich zum klassischen Einsatzprofil der Turbomaschinen für die Energieversorgung (thermische Kraftwerke), erfordert die hohe Volatilität der erneuerbaren Energieträger (Wind und Sonne) einen überwiegend transienten Betrieb künftiger Turbomaschinen, dessen Umsetzung von technologischem Wissen der Luftfahrtforschung synergetisch profitieren kann. Darüber hinaus aber bedeutet die Verwendung derzeit eher unüblicher Arbeitsmedien, die in neuen Kreisprozessen gegenwärtig sind, aufgrund deren thermodynamischer und chemischer

Eigenschaften das Betreten von Neuland, wie beispielsweise in superkritischen CO<sub>2</sub> Prozessen für Speichertechnologien und in der Verteilung und Rückverstromung von Wasserstoff. Konsolidierte Auslegungsmethodiken verlieren aufgrund veränderter Ähnlichkeiten und Kennzahlen ihre Gültigkeit [27]. Es ergibt sich eine Vielzahl neuer Fragestellungen, die beispielsweise die aerodynamische Analyse und Optimierung von Verdichtern und Expandern für dünne oder extrem dichte Gase bei sehr hohen Massenströmen oder die Wirkung von korrosiven Fluiden auf die Maschinenoberflächen betreffen können. Dadurch entsteht in der Turbomaschinenforschung ein starker Wandlungsprozess, der aufgrund der Schlüsselhaftigkeit der Turbomaschine für den Erfolg der Energiewende von zentraler Bedeutung ist.

Die Netzstabilität im aktuellen Stromnetz wird maßgeblich von den großen Dampf-Turbosätzen mit ihren enormen Schwungmassen sichergestellt. Zudem sind die turbomaschinenbasierte Wärme-Kraftwerke in der Regel schwarzstartfähig, sodass sie bei Stromnetz-Ausfällen eigenständig den Stromproduktionsbetrieb wieder aufnehmen und die Stromversorgung wieder herstellen können. Zukünftig werden keine fossilen Kraftwerke mehr zur Verfügung stehen, um diese Aufgaben zu erfüllen. Energiespeicher-Systeme, welche die Energiebereitstellung mittels Turbomaschinen realisieren bieten die Möglichkeit die genannten Funktionen **Netzstabilität** und **Schwarzstartfähigkeit** bereitzustellen.

Die größten zukünftigen neuen Energiespeicher werden im Bereich der Wasserstoff- und synthetisch hergestelltem Methan-Speicherung entstehen. Dabei werden die Betriebsweisen dieser Speicher voraussichtlich deutlich anders aussehen als der heute bekannte Betrieb von konventionellen Erdgas-Speichern. Im Bereich der Wasserstoff-Verdichtung gibt es schon einen großen Erfahrungsschatz in der Chemie-Industrie. Dieser kann genutzt werden, um die vorhandenen Technologien an die zukünftigen Aufgaben anpassen zu können. Ein Aspekt dabei ist z. B. die Skalierung hin zu deutlich größeren Anlagen, da zukünftig erheblich größere Mengen an Wasserstoff zu transportieren sind. Damit ergeben sich teilweise auch Technologiewechsel, wie z.B. die Nutzung von wartungsarmen hochverfügbaren Turboverdichtern statt Kolbenverdichtern.

Bei der Energiebereitstellung durch erneuerbare Energiequellen wie Solarthermie und Geothermie erfolgt die Umwandlung der gespeicherten Wärmeenergie in elektrischen Strom ebenfalls über Turbomaschinen, in diesem Fall in der Regel Dampfturbinen. In Kombination mit großen thermischen Speichern bietet die Solarthermie, im Gegensatz zu Photovoltaik und Windenergie, die Möglichkeiten einer kontinuierlichen Energieversorgung – Strom und Wärme –, wie dies bei der Geothermie der Fall ist. Derartige Turbinen sind volatile Betriebszustände, innovative Wärmeträgerfluide und hohe Prozessparameter (z. B. Temperatur und Druck) so anzupassen, dass höchste Zuverlässigkeit bei wirtschaftlich günstiger Effizienz realisierbar wird. Künftige Turbomaschinenlösungen, wie hier skizziert, sind im Rahmen einer hoch interdisziplinären Forschungsumgebung, unterstützt durch enge Zusammenarbeit der Forschungseinrichtungen und Industriepartner, zu fördern und weiterzuentwickeln.



## 2.5 Synergien mit Flugantrieben

Dampf- und Gasturbinen zur Strom- und Wärmeerzeugung haben technologisch viele Gemeinsamkeiten mit Fluggasturbinen zum Antrieb von Luftfahrzeugen. Die hochbelastete Aerodynamik in Verdichter und Turbine sorgt in beiden Anwendungen für hohe Drücke und hohe Leistungsdichten bei Komponentenwirkungsgraden von über 90%. In der Gasturbine werden für beide Anwendungen vergleichbare maximale Temperaturen von über 1.800 K erreicht. Das führt zwangsläufig zu sehr ähnlichen bis identischen Problemstellungen bei der Auslegung dieser Maschinen, da auch die technische Komplexität der Komponenten bei stationären und fliegenden Anwendungen vergleichbar ist (siehe Abbildung 2-7). Ebenfalls sind die Anforderungen an einen sicheren und zuverlässigen Betrieb in beiden Fällen sehr hoch und verlangen bei der Auslegung entsprechend fundierte technologische Grundlagen. Moderne Auslegungswerkzeuge für Turbomaschinen können deshalb in der Regel zum Design von Komponenten sowohl für stationäre Anlagen als auch von Flugtriebwerken eingesetzt werden.

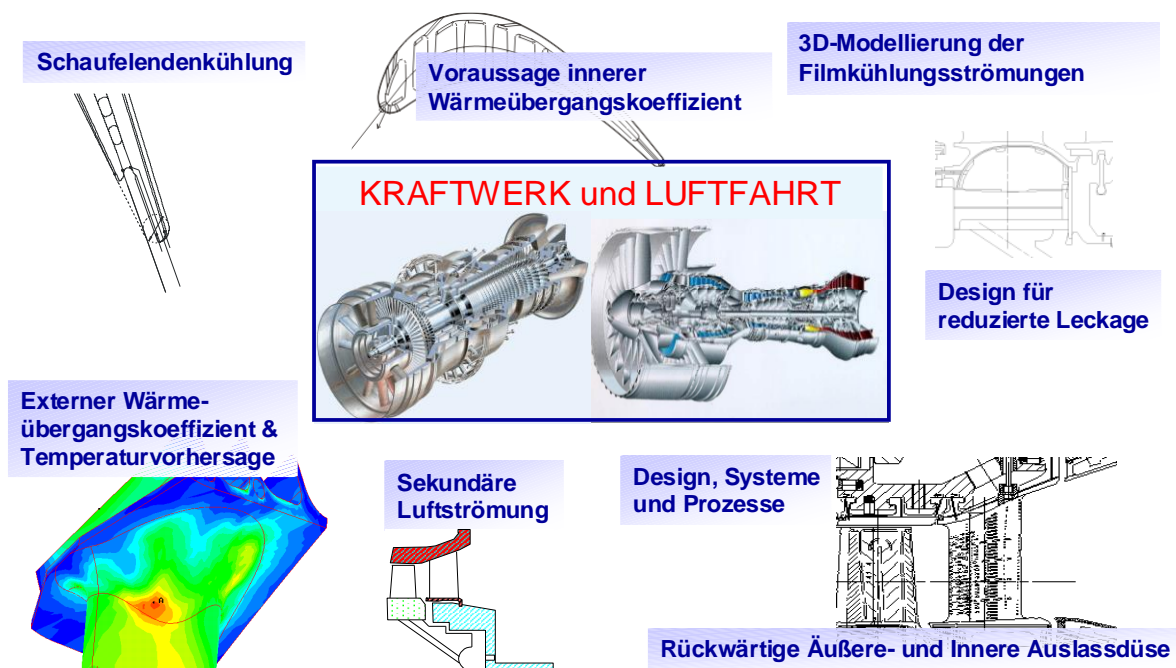


Abbildung 2-7: Beispiele für vergleichbare technologische Fragestellungen bei stationären und fliegenden Gasturbinen

In der Luftfahrt ist das Gewicht des Flugzeuges eine entscheidende Größe, die zu minimieren ist. Daher ist bei diesen Anwendungen nicht nur das Leistungsgewicht der Gasturbine von großer Bedeutung, sondern auch die hohe Effizienz der Energieumwandlung ist ein wichtiges Ziel. Ein geringerer Brennstoffverbrauch erlaubt höhere Reichweiten und/oder mehr Passagiere bzw. Fracht. Technische Innovationen der Gasturbine, die diese Ziele unterstützen, werden deshalb häufig zuerst in Flugantrieben realisiert. Damit ist die Luftfahrt in vielen Fällen auch ein wichtiger Motor für die zukünftige Technologieentwicklung der Gasturbine und ihrer Komponenten

Bei der zukünftigen Dekarbonisierung des weltweiten Luftverkehrs wird Wasserstoff voraussichtlich eine wichtige Rolle spielen. Derzeit werden u.a. von Airbus Konzepte für Flugzeuge [24] entwickelt, welche Wasserstoff anstelle von Kerosin bzw. Sustainable Aviation Fuel (SAF) für den Antrieb nutzen werden. Diese sollen ab 2035 mit Einsatz bis zu Mittelstrecken Anwendungen – vergleichbar A320 oder Boeing 737 – CO<sub>2</sub>-freies Fliegen ermöglichen. Aus dem Einsatz von Wasserstoff als Energieträger ergeben damit sich weitere

Synergien der Technologieentwicklung der Gasturbine für stationäre und fliegende Anwendungen.

Die Planung und gemeinsame Durchführung von vorwettbewerblichen Forschungsprojekten im Rahmen der AG Turbo bündelt die Fachkompetenz aus Wissenschaft und Industrie in Deutschland auf dem Gebiet der Turbomaschinenforschung. Damit wird Doppelarbeit vermieden und die Nutzung vorhandener Forschungsmittel und Ressourcen optimiert. Die langfristige Koordinierung der gemeinsamen Forschungsaktivitäten erlaubt z.B. den nachhaltigen Aufbau von komplexen Prüfständen an Forschungsinstitutionen, die über mehrere Forschungsvorhaben hinweg von verschiedenen Partnern genutzt werden können. Die unter nennenswerter finanzieller Beteiligung der deutschen Triebwerksindustrie erarbeiteten Ergebnisse kommen so in vollem Umfang der Verbesserung der Turbomaschinen in modernen Kraftwerken zugute.

### 3 Unterstützende Technologien

Neben den klassischen Komponententechnologien haben insbesondere auch die neueren Entwicklungen der Digitalisierung (Industrie 4.0, Digitaler Zwilling) und der modernen Fertigungsverfahren wie z.B. additive Fertigung und Lasersintern hohes Synergiepotenzial.

**Industrie 4.0 und Digitalisierung.** Als Industrie 4.0 wird die Digitalisierung der Produktion mit einer durchgängigen Vernetzung der Systeme und selbststeuernden Elementen in den Produktionsanlagen bezeichnet. Produktionsprozesse sollen dabei flexibler, robuster und effizienter werden. Im Kontext von Industrie 4.0 hat auch der digitale Zwilling für die Industrie eine besondere Bedeutung. In der Industrie gibt es digitale Zwillinge beispielsweise für Produkte, Produktionsanlagen, Prozesse und Dienstleistungen. Produktmodelle des Digitalen Zwillings (Soll-Zwilling) können auch schon vor dem realen Produkt (Ist-Zwilling) existieren, zum Beispiel als Designmodelle künftiger Produkte. Die unterschiedlichen Datenmodelle können dazu dienen, Daten aus dem Einsatz der realen Zwillinge zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten. Durch entsprechende Modellierungsansätze eröffnen sich Möglichkeiten, das Verhalten, Funktionalität und Qualität des realen Zwillings unter jedem relevanten Aspekt zu simulieren und damit das Verhalten der Turbomaschinen vorherzusagen. Dies ermöglicht ein verbessertes Turbomaschinendesign und bessere Produkteigenschaften wie auch das Einsparen physikalischer Prototypen.

Besondere technologische Herausforderungen stellen dabei dar:

- Durchgängige Datenstrukturen zur geometrischen Abbildung und Verknüpfung mit Eigenschaftsmerkmalen über den gesamten Lebenszyklus eines Turbomaschinen-Bauteils – von der Produkterstellung, der Herstellung und im Betrieb,
- Datenaufbereitung und –bereitstellung entsprechend spezifischer Anforderungen im Prozess,
- effiziente Datenverwaltung und Methoden zur Datenreduktion, insb. im Fertigungsumfeld und im Betrieb der Turbomaschine,
- realitätsnahe Simulation des Bauteilverhaltens, sowohl einzeldisziplinär mit hoher Detailauflösung als auch multi- bzw. interdisziplinär zur Prognose wechselseitiger Einflüsse im Betrieb sowie
- Datenverknüpfung zwischen Soll- und Ist-Zwilling (individuelle Bauteile) und Rückführung in den Auslegungsprozess der Turbomaschinen.

Mit zunehmend verfügbaren Rechnerleistungen, sowie weitgehend durchgängig digitalisierten Informationen und Daten, gewinnt die Künstliche Intelligenz (KI) in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen an Bedeutung. Schwerpunkte sind insb. die Automatisierung intelligenten Verhaltens und das maschinelle Lernen, um damit beispielsweise bestimmte Entscheidungsstrukturen des Menschen nachzubilden.

Aktuelle Schwerpunkte im Bereich der Technik und Produktgestaltung sind:

- Wissensbasierte Systeme, welche eine Form rationaler Intelligenz für sogenannte Expertensysteme modellieren. Auf Grundlage formalisierten Fachwissens und logischer Verknüpfungen lassen sich anwenderspezifische Fragestellungen beantworten, wie z.B. bei kraftoptimierten Bauteilstrukturen oder Abweichungen in technischen Systemen.
- Musteranalyse und Mustererkennung ermöglicht Bilder beziehungsweise Formen zu erkennen und zu analysieren und hieraus Strukturen abzuleiten bzw. zu transferieren. Anwendungen liegen z.B. im Bereich der Auswertung von Messdaten und

Simulationsergebnissen oder bei der industriellen Qualitätskontrolle und Fertigungsautomation (letzteres in Kombination mit Erkenntnissen der Robotik).

- Mustervorhersage als Erweiterung der Mustererkennung in Kombination mit Simulationstools und weiterer Prognosealgorithmen ermöglichen dann z.B. nicht nur ein bestimmtes Objekt in einem einzelnen Bild zu erkennen (Mustererkennung), sondern auch anhand einer Bildserie wahrscheinlichsbasierte Vorhersagen über ein Objekt treffen zu können.

**Digitale Fertigung & additive Fertigungsverfahren.** Durchgängige CAX-Prozessketten ermöglichen den effektiven Einsatz von CNC (Computerized Numerical Control) Werkzeugmaschinen für die Bauteilerstellung. Hierdurch können die Bauteile mit hoher Präzision und Reproduktionsrate hergestellt, Messschritte in den Herstellprozess integriert und zur Qualitätssicherung und Dokumentation umfangreiche Daten erfasst werden.

Weitergehende Potentiale zur Bauteilgestaltung und -erstellung eröffnen sich bei additiven Verfahren wie dem Pulverbettbasierte Laserstrahlschmelzen (engl. Laser Powder Bed Fusion, LPBF). Beim LPBF-Verfahren werden die Bauteile durch selektives Laserstrahlschmelzen hergestellt, in einem schichtweisen Aufbau. Die extrem dünne Schichtstärke (10-200  $\mu\text{m}$ ) ermöglichen eine hohe Detailsauflösung der Bauteile. Damit trägt das LPBF-Verfahren zu einer Erweiterung des möglichen Bauteilportfolios über die Grenzen der konventionellen Fertigung hinaus bei und erweitert die Möglichkeiten der realisierbaren Bauteilgeometrie.

Herausforderungen hierbei sind u.a.:

- Dimensionierung und Gestaltung kraftflussoptimierter Strukturen zur Reduzierung des Bauteilgewichts bei gleichzeitiger Verbesserung von mechanischer Integrität und Lebensdauer, insbesondere bei thermisch hochbelasteten Bauteilen im Heißgaspfad und/oder mechanisch hochbelasteten, rotierenden Bauteilen,
- Simulation des Verzugsverhaltens im Aufbauprozess und Korrektur der Bauteil-Sollgeometriedaten für den Herstellprozess,
- Wechselwirkungen von Bauteildesign mit der Oberflächenorientierung zur Richtung in der die Bauteile schichtweise „gedruckt“ werden (Aufbaurichtung),
- Nachweis der Bauteilintegrität und Homogenität der Gefügestruktur durch in-situ Prozessüberwachung bei der Herstellung sicherheitskritischer Turbokomponenten.

## 4 Zusammenfassung und Fazit

Um das ambitionierte Ziel der Klima-Neutralität bis 2050 zu erreichen, muss der Ausbau erneuerbarer Energiequellen weiter fortgeführt werden. Zusätzlich wird der Strombedarf durch die Dekarbonisierung weiterer Sektoren wie Verkehr (Elektromobilität), Wohnen (Wärmepumpen) und Industrie weiter steigen. Um dabei eine zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung dauerhaft sicherzustellen, müssen die fluktuierenden erneuerbaren Energien durch hochflexible Speichertechnologien und entsprechende Infrastruktur ergänzt werden, welche sowohl kurzfristige wie auch saisonale Schwankungen in der Stromproduktion durch Wasser, Wind oder Sonne ausgleichen können. Im Mittelpunkt vielversprechender Energiespeicher- sowie Umwandlungskonzepte (Power-to-X-to-Power) stehen moderne Turbomaschinen, deren Einsatzbereiche sowie Arbeitsbedingungen sich deutlich von dem klassischen Betrieb in konventionellen thermischen Kraftwerken unterscheiden und von Instationarität und Anwendung von nicht-idealen Arbeitsmedien geprägt sind.

Unter solchen Bedingungen verlieren konsolidierte Auslegungsmethodiken sowie Wartungsstrategien an Gültigkeit und es ergeben sich neue, bislang nicht beantwortete Fragestellungen, welche die aerothermodynamische sowie mechanische und konstruktive Optimierung der Maschinen betreffen. Insbesondere wichtig für die erfolgreiche Umsetzung der Energieforschungsprogramme und Erreichung deren Ziele sind:

- Auslegung, Optimierung und prädiktiv-präskriptive Wartungsmethodiken von Expandern und Verdichtern, die in unkonventionellen Kreisprozessen eingesetzt werden sollen (z.B. ORC, superkritische Kreisprozesse, Wasserstoffverbrennung sowie Rückverstromung);
- Flexibilisierung und Skalierbarkeit der Maschinen bei einem ausgewählten Design in einem breiten Leistungsbereich ohne Minderung deren Effizienz;
- Fertigungsstrategien zur Gewährleistung der strukturellen Festigkeit bei Senkung der Produktionskosten.

Die Beantwortung solcher Fragestellungen erfordert eine enge Zusammenarbeit sowie den kontinuierlichen Austausch zwischen Technologieentwicklung und Grundlageforschung sowie eine stark interdisziplinäre Arbeitsumgebung. Hierzu ist insbesondere die Ausschöpfung der Synergien mit anderen Sektoren wie der Luftfahrt und die begleitende und gezielte Entwicklung von unterstützenden Technologien (Digitalisierung, Künstliche Intelligenz und Methoden des maschinellen Lernens, additive Fertigungsverfahren) von höchster Bedeutung.

Die AG Turbo stellt ein weltweit einzigartiges Forschungsnetzwerk zur kooperativen Energie- und Turbomaschinen-Forschung dar und bietet somit eine ideale Umgebung für universitäre und industrielle vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, um sich den neuen Anforderungen der Turbomaschinenauslegung für die Energiewende zu stellen und gemeinsam effektive und innovative Konzepte und Methoden zu entwickeln und anzuwenden.

## 5 Referenzen

- [1] P.J. Crutzen, E. F. Stoermer. "The "Anthropocene". Global Change Newsl 41: 17–18." International Geosphere–Biosphere Programme (IGBP) (2000).
- [2] <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [3] Matthews et al., Science 376, 1404–1409 (2022) 24 June 2022, DOI: 10.1126/science.abo3378
- [4] S. Lewis, M. Maslin, Defining the Anthropocene. Nature 519, 171–180 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14258>
- [5] [Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen \(UNFCCC\) | Umweltbundesamt](#), Zugang am 04.11.2022
- [6] COM (2019) 640 FINAL, EUR-Lex - 52019DC0640
- [7] COM (2018) 773 FINAL, EUR-Lex - 52018DC0773
- [8] COM (2021) 550 FINAL, EUR-Lex - 52021DC0550
- [9] COM (2020) 80 FINAL 2020/0036 (COD), EUR-Lex- 52020PC0080
- [10] COM (2022) 230 FINAL, EUR-Lex - 52022DC0230
- [11] <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.html>
- [12] Bundesgesetzblatt, Teil I, N. 37, 13.08.2020
- [13] Sterner und Stadler, Stromspeicher – Technologien, Kosten und Bedarf, in ISBN 978-3-658-37128-9 ISBN 978-3-658-37129-6 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37129-6>
- [14] Sterner und Stadler, ISBN 978-3-662-48892-8 ISBN 978-3-662-48893-5 (eBook) DOI 10.1007/978-3-662-48893-5
- [15] V. Tola, F. C. Marcello, D. Cocco, Performance Assessment of Low-Temperature A-CAES (Adiabatic Compressed Air Energy Storage) Plants, J. Therm. Sci. 31, 1279–1292 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11630-022-1632-7>
- [16] O. Ruhnau, S. Bannik, S. Otten, A. Praktijnjo, M. Robinius, Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050, Energy, Volume 166, 2019, Pages 989-999, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.114>
- [17] A. Guminski, F. Böing, A. Murmann, S. von Roon, System effects of high demand-side electrification rates: A scenario analysis for Germany in 2030. WIREs Energy Environ. 2019; 8:e327. <https://doi.org/10.1002/wene.327>
- [18] Genehmigung des Szenariorahmens 2019-2030, BNetzA, <https://www.netzentwicklungsplan.de/de/netzentwicklungsplaene/netzentwicklungsplan-2030-2019>
- [19] M. Sterner, M. Specht; Power-to-Gas and Power-to-X—The History and Results of Developing a New Storage Concept. Energies 2021, 14, 6594. <https://doi.org/10.3390/en14206594>
- [20] Nationale Wasserstoffstrategie - BMBF

- [21] Siemens Energy White Paper – Hydrogen power with Siemens gas turbines – April 2020.
- [22] B. Emerson, D. Wu, T. Lieuwen, S. Sheppard, D. Noble, L. Angello, “Assessment of Current Capabilities and Near-Term Availability of Hydrogen-Fired Gas Turbines Considering a Low-Carbon Future”, Proceedings of ASME Turbo Expo 2020, GT2020-15714, 2020.
- [23] C. Douglas, B. Emerson, T. Lieuwen, T. Martz, R. Steele, B. Noble; "NOx Emissions from Hydrogen-Methane Fuel Blends"; [eport.https://research.gatech.edu/sites/default/files/inline-files/gt\\_epri\\_nox\\_emission\\_h2\\_short\\_paper.pdf](https://research.gatech.edu/sites/default/files/inline-files/gt_epri_nox_emission_h2_short_paper.pdf)
- [24] Strategic Research and Innovation Agenda Clean Aviation Joint Undertaking (<https://www.clean-aviation.eu/>)
- [25] R. Moradi und K. M. Groth, Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis, Int. J. Hydrog. Energy, Bd. 44, Nr. 23, pp. 12254-12269, 2019. doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.041.
- [26] W. Bräunling, (2009), Flugzeugtriebwerke, Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76370-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76370-3_8)
- [27] F. Alshammari, „Off-design performance prediction of radial turbines operating with ideal and real working fluids“, Energy Convers. Manag., Bd. 171, pp. 1430-1439, 2018. doi: 10.1016/j.enconman.2018.06.093.
- [28] G. Llewellyn, Hydrogen – An energy carrier to fuel the climate-neutral aviation of tomorrow, <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission-journey/hydrogen>