

# Prognosen und Szenarien zur weltweiten Energieversorgung bis 2050 – Synopse zu den Ansätzen und Ergebnissen 2024 veröffentlichter Studien

Hans-Wilhelm Schiffer

## 1 Einleitung

Die Entwicklung der weltweiten Energieversorgung in den bevorstehenden Jahrzehnten ist für die strategische Ausrichtung von Unternehmen und Regierungen sowie die Positionierung von internationalen Stakeholdern von herausragendem Interesse. Entsprechend legen eine Reihe von Institutionen regelmäßig detaillierte Analysen zu den Perspektiven des Energieverbrauchs und dessen Deckung vor. Dazu gehören von Regierungen getragene internationale Organisationen, Energiekonzerne, Beratungs-

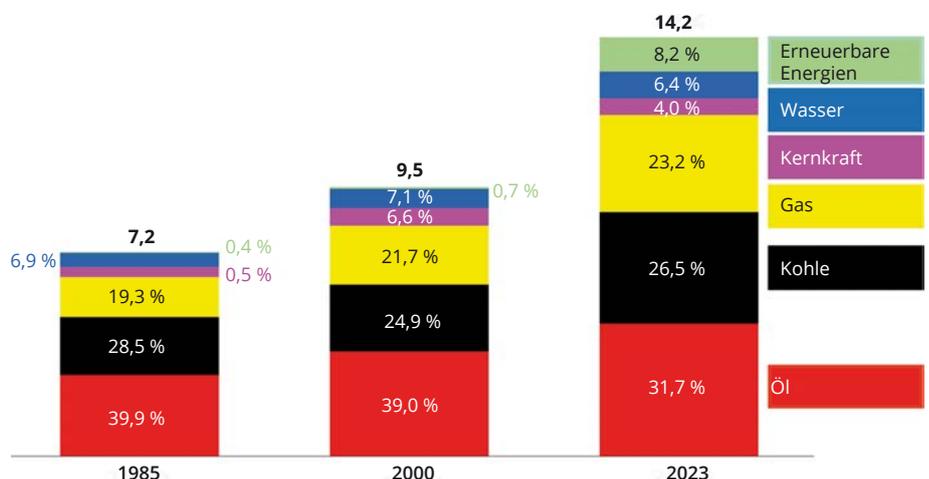
unternehmen und wissenschaftliche Institute. Die erstellten Analysen sind durch Unterschiede in den zugrunde gelegten Methoden und den getroffenen Annahmen gekennzeichnet. Grundsätzlich ist zwischen Prognosen auf der einen Seite sowie exploratorischen und normativen Szenarien auf der anderen Seite zu unterscheiden. Im Folgenden erfolgt eine Charakterisierung der Ansätze und der Ergebnisse der Studien, soweit diese im Jahr 2024 veröffentlicht wurden. Die in diesen Studien dargelegten Zukunftspfade werden den genannten Kategorien zugeordnet. Die große Spannweite in den erzielten Ergebnissen zur künftigen Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Stromerzeugung wird – differenziert nach Energieträgern – erklärt. Ferner werden gemeinsame Botschaften, die sich aus den Studien ableiten lassen, herausgearbeitet. Dies gilt insbesondere in Bezug auf die Einhaltung der von der Weltgemeinschaft beschlossenen Klimaziele. Zu den dafür er-

forderlichen zentralen Schlüsselgrößen zählen eine möglichst global harmonisierte Bepreisung von CO<sub>2</sub> sowie eine vermehrte internationale Zusammenarbeit.

## 2 Entwicklung der globalen Energieversorgung von 1985 bis 2023

Die Charakteristika der globalen Entwicklung von Energieangebot und -nachfrage im Zeitraum 1985 bis 2023 werden zunächst dargelegt, um dann anhand der analysierten Projektionen und Szenarien zu veranschaulichen, welche Perspektiven sich für die bevorstehenden Jahrzehnte im Unterschied zu den Verläufen in der Vergangenheit eröffnen. Zunächst zum Primärenergieverbrauch (Bild 1).

Von 1985 bis 2023 hat sich der weltweite Primärenergieverbrauch verdoppelt. Wichtigste Treiber dieser Entwicklung waren der



Quelle: Energy Institute, 2024 Statistical of World Energy, June 2024

Bild 1. Weltweiter Primärenergieverbrauch 1985 bis 2023 in Milliarden Tonnen Öleinheiten.

### Autor

Prof. Dr. Hans-Wilhelm Schiffer  
Faculty of Georesources und  
Materials Engineering –  
Unit of Technologies of Fuels  
RWTH Aachen  
Aachen, Germany

Anstieg der Bevölkerung um etwa zwei Drittel und die Verdreifachung der globalen Wirtschaftsleistung (inflationbereinigt). Der Energiemix hat sich innerhalb dieser 38 Jahre wie folgt verändert:

- Der Anstieg im Energieverbrauch wurde überwiegend durch fossile Energien gedeckt. Alle fossilen Energien haben mit wachsenden Beiträgen zur Deckung des gestiegenen Verbrauchs beigetragen.
- Der Anteil fossiler Energien am Primärenergieverbrauch war 2023 nur um 6,3 Prozentpunkte niedriger als im Jahr 1985. Im Jahr 2023 waren 81,4% des gesamten Energieverbrauchs auf Kohle, Erdöl und Erdgas entfallen – gegenüber 87,7% im Jahr 1985.
- Der Anteil von Kernenergie hat sich von 5,0% auf 4,0% verringert.
- Der Beitrag erneuerbarer Energien konnte von 7,3% auf 14,6% nahezu verdoppelt werden.

Die weltweite Stromerzeugung hat sich von 1985 bis 2023 verdreifacht (Bild 2). Auch hier zeigt sich bezüglich der Rolle der fossilen Energien eine vergleichbare Entwicklung:

- Der Zuwachs in der Stromerzeugung basierte überwiegend auf einem deutlich vergrößerten Einsatz von Kohle und Erdgas.
- Der Einsatz fossiler Energien an der Stromerzeugung hat sich kaum verringert – von 64,1% im Jahr 1985 auf 60,7% im Jahr 2023.
- Der relative Beitrag der Kernenergie ist von 15,1% auf 9,2% gesunken.
- Die erneuerbaren Energien konnten mit Anteilsgewinnen von 9,2 Prozentpunkten die relativen Einbußen von Kernenergie und fossilen Energien kompensieren. Wasserkraft, Wind- und Solarenergie sowie Biomasse und Geothermie waren 2023 mit 30,1% an der weltweiten Stromerzeugung beteiligt – gegenüber 20,8% im Jahr 1985.

Die Zukunft der Energieversorgung wird sich grundlegend von dieser für die vergan-

genen Jahrzehnte aufgezeigten Entwicklung unterscheiden.

### 3 Prognosen und Szenarien zur weltweiten Energieversorgung bis 2050

Im Jahr 2024 haben verschiedene Institutionen perspektivische Darstellungen zur künftigen globalen Energieversorgung bis 2050 publiziert. Dazu gehören von Regierungen getragene internationale Organisationen, Industriekonzerne, Beratungsunternehmen und wissenschaftliche Forschungseinrichtungen. Zu den Organisationen, die durch Regierungen einer Reihe von Staaten finanziert werden, zählen die International Energy Agency (IEA) [1] und die International Renewable Energy Agency (IRENA) [2]. Die U.S. Energy Information Administration (EIA), die dem U.S. Department of Energy unterstellt ist, hatte zuletzt im Oktober 2023 den International Energy Outlook vorgelegt [3]. Von den Energiekonzernen haben BP [4], die norwegische Equinor [5], ExxonMobil [6] und TotalEnergies [7] im Jahr 2024 quantifizierte Aussagen zu Perspektiven der weltweiten Energieversorgung bis 2050 publiziert. Die jüngste Szenarien-Studie von Shell war im März 2023 veröffentlicht worden. [8] Die international tätige Klassifizierungs- und Zertifizierungsgesellschaft DNV [9] mit Sitz in Norwegen hat 2024 eine Neuauflage des Energy Transition Outlook vorgestellt. Darüber hinaus sind aus dem Kreis der Beratungsunternehmen McKinsey [10], Wood Mackenzie [11] BloombergNEF [12] und Enerdata [13] als Herausgeber von 2024 neu aufgelegten Szenarien-Studien zu nennen. Der von Mitgliedsorganisationen aus rund 80 Staaten getragene World Energy Council mit Sitz in London hat zum World Energy Congress, der im April 2024 in Rotterdam stattgefunden hatte, zwei Szenarien präsentiert. [14] Mit The Institute of Energy Economics, Japan (IEEJ) [15] zählt auch ein international tätiges Forschungsinstitut zum

Kreis der Organisationen, die regelmäßig, zuletzt im November 2024, mit globalen Energieszenarien zur Diskussion beitragen.

#### 3.1 Kategorisierung von Prognosen und Szenarien

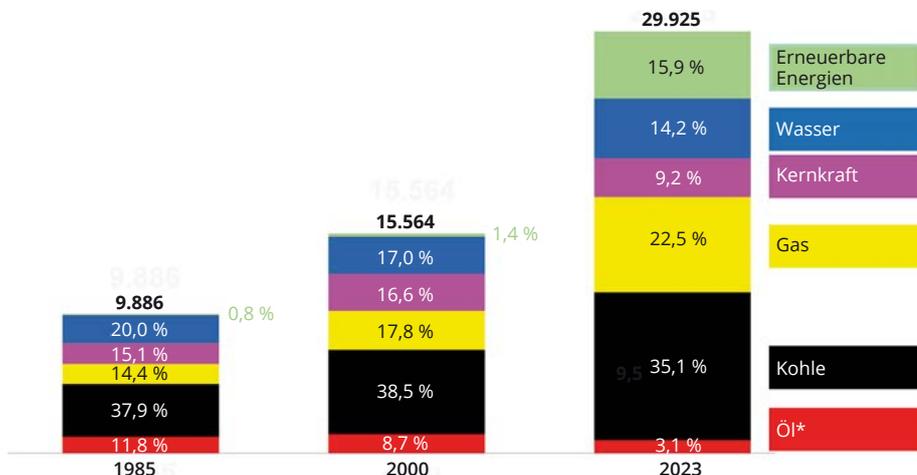
Die genannten Institutionen haben unterschiedliche Ansätze gewählt, um die Perspektiven der künftigen Energieversorgung aufzuzeigen. So handelt es sich bei den Studien von DNV und ExxonMobil um Prognosen, während die anderen Institutionen Szenarien modelliert haben. Von zehn der dreizehn Institutionen, die sich auf Szenarien gestützt haben, wurden sowohl exploratorische Szenarien als auch jeweils ein normatives Szenario gerechnet. Der World Energy Council und auch das IEEJ haben Ergebnisse für jeweils zwei exploratorische Szenarien veröffentlicht. Bei der International Renewable Energy Agency (IRENA) steht das normative 1.5 °C Szenario im Vordergrund, dem ein *Planned Energy Scenario* (PES) lediglich zu Vergleichszwecken gegenübergestellt ist. Das PES von IRENA ist als Referenzfall zu verstehen, mit dem die Perspektive für die Entwicklung der Energiesysteme auf Grundlage der gegenwärtig verfolgten Politiken der Regierungen aufgezeigt wird. Die U.S. EIA hat sich auf ein *Reference Scenario* beschränkt, das um Sensitivitätsrechnungen ergänzt ist. Zu den Gemeinsamkeiten der veröffentlichten Analysen gehört, dass die Einschätzungen zur weltweiten Entwicklung durch nach Weltregionen differenzierte Daten und Fakten unterlegt sind.

Die grundsätzlich bestehenden Unterschiede zwischen Prognosen und Szenarien können wie folgt skizziert werden:

In Prognosen wird die künftige Entwicklung auf Basis von als wahrscheinlich angenommenen Parametern, unter anderem zur Entwicklung der Demografie, zur Wirtschaftsleistung, zu technologischen Innovationen, zu den Weltmarktpreisen für Energie und zu der erwarteten politischen Rahmensezung, dargelegt. Entsprechende Annahmen gehen als Input-Parameter in die Modellierung ein und führen zu quantitativen Ergebnissen. Institutionen, die Prognosen erstellen, streben an, die aus heutiger Sicht für wahrscheinlich gehaltene Entwicklung abzubilden.

Demgegenüber handelt es sich bei Szenarien um plausible und nachvollziehbare alternative Blicke in die Zukunft, die verstehen helfen, wie verschiedene Faktoren zusammenspielen und so die Zukunft formen können. Dabei kann zwischen exploratorischen und normativen Szenarien unterschieden werden.

- In exploratorischen Szenarien wird ein Entwicklungspfad aufgezeigt, der von der Gegenwart ausgeht und – abhängig von den getroffenen Eingabeparametern – mögliche Pfade für die Zukunft charakterisiert. Bei exploratorischen Szenarien kann zusätzlich danach kategorisiert werden, ob sie eher auf eine qualitative Ausrichtung angelegt sind oder ob die Quan-



\* Einschließlich sonstige nicht erneuerbare Energien  
Quelle: Energy Institute, 2024 Statistical of World Energy, June 2024

Bild 2. Weltweite Stromerzeugung 1985 bis 2023 in TWh.

tifizierung im Vordergrund steht. Auch wenn der Fokus auf ein Narrativ gerichtet ist, kann dies modellgestützt quantitativ unterlegt sein.

- Im Unterschied zu diesem „bottom-up“-Ansatz ist in normativen Szenarien der Startpunkt ein Zielzustand in der Zukunft. Es wird – ausgehend von dem definierten Zielzustand – „top-down“ ermittelt, welcher Entwicklungspfad zum Erreichen des vorgegebenen Zielzustandes führen kann. Der in den meisten der untersuchten Szenarien gewählte Zielzustand besteht in der Einhaltung des Ziels, den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Teilweise wird aber auch ein erweitertes Zielbündel vorgegeben, zu dem beispielsweise der Zugang aller Menschen zu bezahlbarer Energie oder eine verbesserte Luftreinhaltung gehören können.

Bei beiden Szenario-Typen handelt es sich ausdrücklich nicht um Vorhersagen. Eintrittswahrscheinlichkeiten sind weder exploratorischen noch normativen Szenarien zugeordnet. Beide Szenario-Typen können dazu dienen, die Basis für eine erfolgreiche Strategie und Politik in einer von Unsicherheit geprägten Welt zu liefern. Dies gilt sowohl für unternehmerische als auch für politische Strategien.

Bei einem Vergleich von Ergebnissen verschiedener Studien zu den Perspektiven der Energieversorgung ist entsprechend von ausschlaggebender Bedeutung, welcher An-

satz gewählt und welche Eingangsparameter zugrunde gelegt wurden. Die Prognosen und Szenarien, die in jüngster Zeit von den genannten fünfzehn Institutionen vorgelegt wurden, sind den einzelnen Kategorien zugeordnet (Bild 3).

### 3.2 Prognosen zur weltweiten Energieversorgung bis 2050

Prognosen zur weltweiten Energieversorgung wurden im Jahr 2024 von ExxonMobil und von DNV vorgelegt. Dabei unterscheiden sich die ermittelten Ergebnisse deutlich. Zum Verständnis sind deshalb zunächst die jeweils getroffenen Annahmen zu erläutern.

#### 3.2.1 Charakterisierung der Prognosen von ExxonMobil und DNV

Der Einschätzung von ExxonMobil zu Nachfrage und Angebot von Energie bis 2050 liegt die Annahme einer fortschreitenden, aber gangbaren Energie-Transformation zugrunde. Nach eigener Aussage ist die Analyse Grundlage für die Geschäftsplanung des Konzerns. Sie ist wissenschaftlich fundiert und durch das tiefe Verständnis der langfristigen Marktgrundlagen gekennzeichnet, über das der Konzern verfügt. Neben der Einschätzung von Trends zur wirtschaftlichen Entwicklung, zu technologischen Fortschritten und zum Verbraucherverhalten versucht die Prognose, die potenziellen Auswirkungen von Maßnahmen der Regierungen zum Klimaschutz abzubilden. Die diesbezüglichen Unwägbarkeiten beeinflussen

die Kosten, das Tempo und die Umsetzbarkeit von Transformationspfaden. Zu den Ungewissheiten zählt der Konzern, inwieweit Unternehmen und Verbraucher bereit sind, die Kosten für eine starke Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen bei den genutzten Produkten und Dienstleistungen zu tragen und damit einen Markt zu schaffen, der Anreize für einen beschleunigten Weg zu Netto-Treibhausgas-Neutralität eröffnet.

ExxonMobil plädiert in seiner Prognose dafür, auf marktwirtschaftliche Instrumente zu setzen. Es sollte keine einseitige Bevorzugung bestimmter Technologien erfolgen. Die Politik sollte vielmehr ein einheitliches Umfeld schaffen, in dem alle Technologien miteinander konkurrieren, um eine möglichst kosteneffiziente Reduktion der Treibhausgas-Emissionen zu erreichen. Anreizmechanismen werden als Anstoß für Technologie-Entwicklungen für sinnvoll gehalten. Allerdings sollten Dauer-Subventionen vermieden werden. Der Markt sollte entscheidender Treiber für die angestrebte Dekarbonisierung sein.

DNV präsentiert ebenfalls eine einzige, als „Best Estimate“ bezeichnete, Prognose über die globale Energie-Zukunft – differenziert nach zehn Weltregionen. Die Analyse zielt darauf, gestützt auf ein unabhängiges Modell über das weltweite Energiesystem, unter anderem Fragen zur Entwicklung des globalen Energiemix, zum Peak der energiebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum Ausbau der erneuerbaren Energien, zu CCS und zu

	Prognosen	Szenarien		
		ergebnisoffen (exploratorisch)		Normative Szenarien
		mehr qualitativ ausgerichtet	stärker quantitativ orientiert	
WEC (2024) World Energy Council Scenarios		- Rivers - Rocks		
IEA (2024) World Energy Outlook 2024			- Stated Policies Scenario (STEPS) - Announced Pledges Scenario (APS)	- Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE)
EIA (2023) International Energy Outlook 2023			- Reference Scenario (incl. sensitivities)	
Shell (2023) The Energy Security Scenarios			- Archipelagos	- Sky 2050
Equinor (2024) Energy Perspectives 2024			- Walls	- Bridges
BP (2024) Energy Outlook 2024 edition			- Current Trajectory	- Net Zero
ExxonMobil (2024) Outlook for Energy	- Forecast			
TotalEnergies (2024) Energy Outlook 2024			- Current Trends - Momentum	- Rupture (1.7 bis 1.8 °C bis 2100)
Wood Mackenzie (2024) Energy Transition Outlook			- Delayed Transition - Base Case - Country Pledges	- Net Zero
DNV (2024) Energy Transition Outlook 2024	- A single forecast of the energy future			
McKinsey (2024) Global Energy Perspective 2024			- Slow Evolution (SE) - Continued Momentum (CM) - Sustainable Transformation (ST)	- 1.5 °C Pathway
IRENA (2024) World Energy Transitions Outlook 2024			- Planned Energy Scenario (PES)	- 1.5 °C Scenario (1.5-S)
Enerdata (2024) EnerFuture 2024			- EnerBase - EnerBlue	- EnerGreen
IEEJ (2024) IEEJ Outlook 2025			- Reference Sc. - Advanced Technologies Sc.	
BloombergNEF (2024) New Energy Outlook 2024			- Economic Transition Scenario	- Net Zero Scenario (1.75 °C)

Bild 3. Kategorisierung von Projektionen verschiedener Organisationen zur weltweiten Energieversorgung.

Wasserstoff im Verlauf der bevorstehenden 25 Jahre zu beantworten. Der Prognose liegende Parameter zugrunde:

- Berücksichtigung der längerfristig wirkenden Dynamiken und nicht der kurzfristig bestehenden Ungleichgewichte
- Fortgesetzte Weiterentwicklung vorhandener Technologien, ohne dass aus heutiger Sicht ungewisse Durchbrüche unterstellt werden
- Einbeziehung der wichtigsten politischen Trends, wobei nicht-belastbare Verpflichtungen (NDCs) mit Zurückhaltung Eingang finden
- Verhaltensänderungen, insbesondere mit Bezug zu verstärkten Anforderungen des Umwelt- und Klimaschutzes

Die Modell-Struktur und die Input-Daten sind in der Studie im Einzelnen ausgewiesen.

### 3.2.2 Ergebnisse der Prognosen von ExxonMobil und DNV

ExxonMobil und DNV kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen bezüglich der Perspektiven der weltweiten Energieversorgung. Dies wird anhand der prognostizierten Entwicklung des Primärenergieverbrauchs nach Energietechnologien deutlich (Bild 4).

So geht ExxonMobil davon aus, dass der weltweite Primärenergieverbrauch im Jahr 2050 angesichts der Zunahme der Bevölkerung um etwa 2 Milliarden und der im Vergleich zu heute mehr als doppelt so hohen Wirtschaftsleistung den Stand des Jahres 2023 um 13% überschreiten wird. Dabei wird sich der Energiemix stark verändern. Der Anteil von Windkraft und Solarenergie am Primärenergieverbrauch vervierfacht sich von 3% im Jahr 2023 auf 12% im Jahr 2050. Kohle wird in der Stromerzeugung zunehmend durch Energien mit niedrigerer CO<sub>2</sub>-Exposition ersetzt, und zwar nicht nur durch erneuerbare Energien, sondern auch durch Erdgas. Der weltweite Verbrauch an Erdgas erhöht sich bis 2050 um 21% im Vergleich zu 2023. Es wird erwartet, dass sich der Ölverbrauch im Individualverkehr zwar

signifikant verringert, aber ein bedeutender Faktor für industrielle Prozesse, den Schwertransport auf dem Wasser und auf der Straße sowie für den Flugverkehr bleibt.

Im Ergebnis wird unterstellt, dass der Verbrauch an Öl 2050 in etwa die gleiche Größenordnung behält wie im Jahr 2023. Öl und Gas zusammen decken laut ExxonMobil auch im Jahr 2050 noch 54% des globalen Primärenergieverbrauchs. Für Kohle werden Einbußen im Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch von 25% im Jahr 2023 auf 13% im Jahr 2050 erwartet. Der Beitrag aller fossilen Energien an der Deckung des gesamten Primärenergieverbrauchs vermindert sich von 80% im Jahr 2023 auf knapp 68% im Jahr 2050. Kernenergie kommt dann auf 6,5% (gegenüber 5% im Jahr 2023). Die erneuerbaren Energien steigern den Anteil am Primärenergieverbrauch von 15% im Jahr 2023 auf 26% im Jahr 2050.

Der weltweite Stromverbrauch steigt deutlich stärker als der Primärenergieverbrauch. So wird bis 2050 mit einer Zunahme der Nachfrage um 76% gegenüber dem Niveau des Jahres 2023 gerechnet. Der Einsatz von Erdgas zur Stromerzeugung erhöht sich laut ExxonMobil künftig noch, während der Einsatz von Kohle 2050 um 38% niedriger ausfällt als 2023. Die Kernenergie legt um etwa 50% zu. Am stärksten wächst der Beitrag von Wind und Solarenergie zur Stromerzeugung. Für Solarenergie wird bis 2050 Anstieg auf mehr als das Siebenfache und für Windkraft auf fast das Fünffache im Vergleich zum Niveau des Jahres 2023 ausgewiesen.

Die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen sinken als Ergebnis der von ExxonMobil durchgeführten Modellrechnungen bis 2050 um 25% im Vergleich zum gegenwärtigen Stand. ExxonMobil sieht es als erforderlich an, neben dem Ausbau erneuerbarer Energien vor allem die Anwendung folgender Technologien zu beschleunigen:

- Bereitstellung von Wasserstoff und dabei auch auf Erdgas unter Abscheidung und Speicherung des CO<sub>2</sub> zu setzen

- Technologie der Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> bei Industrieprozessen und in der Stromerzeugung
- Nutzung von Bio-Kraftstoffen vor allem im kommerziellen Transport

Dies wird mit dem Hinweis verknüpft, dass CO<sub>2</sub>-arme Technologien politische Unterstützung für eine beschleunigte Nutzung benötigen, aber letztlich auch hier auf die Marktkräfte gesetzt werden sollte.

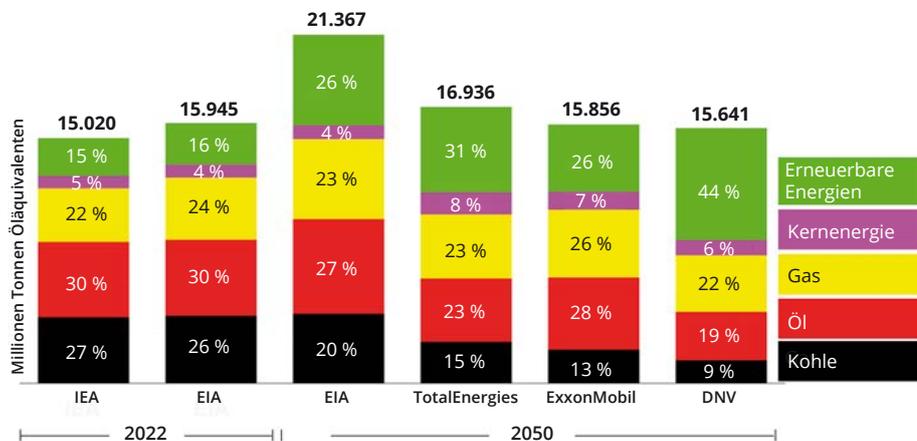
Im Unterschied zu ExxonMobil kommt DNV zu dem Ergebnis, dass der globale Primärenergieverbrauch im Jahr 2038 mit 673 Exajoule den Höchststand erreichen und damit das Niveau des Jahres 2023 um 6% überschreiten wird. In der Folge wird ein Rückgang auf 655 Exajoule oder 15.641 Mtoe im Jahr 2050 erwartet.

Nach den Analysen von DNV wird sich die Zusammensetzung des Primärenergieverbrauchs bis 2050 signifikant verändern. So verringert sich der Beitrag fossiler Energien zur Deckung des Verbrauchs von 80% im Jahr 2023 auf 50% zur Mitte des Jahrhunderts. Erneuerbare Energien verdreifachen ihren Anteil von 15% auf 44%. Auf Kernenergie entfallen 6% im Jahr 2050 gegenüber 5% im Jahr 2023.

Die Entwicklung bei den einzelnen fossilen Energien wird wie folgt eingeschätzt:

- Aufgrund struktureller Veränderungen, insbesondere eines Ersatzes von Kohle in der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien, dies vor allem auch in China, verringert sich der Verbrauch an Kohle bis 2050 um fast zwei Drittel im Vergleich zum Stand des Jahres 2023. Damit sinkt der Anteil der Kohle am weltweiten Primärenergieverbrauch von 25% im Jahr 2023 auf 9% im Jahr 2050.
- Mit *Peak Oil* wird um das Jahr 2027 gerechnet. Aufgrund des Rückgangs in den Folgejahren ergibt sich für 2050 ein Ölverbrauch, der um 36% unter dem Vergleichswert des Jahres 2023 liegt. Der Anteil von Öl am weltweiten Primärenergieverbrauch vermindert sich von 30% im Jahr 2023 auf knapp 19% im Jahr 2050.
- Für Erdgas wird ein Anstieg im Verbrauch bis 2027 erwartet – gefolgt von einer dreibis vierjährigen Plateauphase, bevor ein leichter Rückgang bis 2050 auf ein Niveau einsetzt, das 8% unter dem Stand des Jahres 2023 liegt. Der Anteil von Erdgas am Primärenergieverbrauch geht von 25% im Jahr 2023 auf 22% zur Mitte des Jahrhunderts zurück.

Die Verdreifachung der Nutzung erneuerbarer Energien bis 2050 wird insbesondere durch die Entwicklung bei Solar und Wind getrieben. Der Beitrag von Wind entspricht 2050 mehr als dem Achtfachen im Vergleich zu dem für 2023 ermittelten Niveau. Für Solarenergie wird für die gleiche Zeit ein Anstieg auf das 14-fache erwartet. Daneben wird auch ein fortgesetztes Wachstum von Bioenergie, Wasserkraft und Geothermie



Quelle: IEA, World Energy Outlook 2024; EIA, IEO 2023; TotalEnergies Energy Outlook 2024 (Trends), DNV, Energy Transition Outlook 2024; ExxonMobil, 2024 Global Outlook

Bild 4. Primärenergieverbrauch weltweit – Vergleich zwischen EIA's IEO 2023 Reference Case und TotalEnergies TEO 2024 Trends sowie den Prognosen von ExxonMobil und DNV für 2050 in Millionen Tonnen Öläquivalenten.

unterstellt. Das rasante Wachstum von Solarenergie bewirkt, dass Solar bis 2050 zur wichtigsten erneuerbaren Energiequelle bei der Deckung des Primärenergieverbrauchs aufsteigt und dann vor Bioenergie, Wind- und Wasserkraft rangiert.

Der Beitrag der Kernenergie steigt über den Prognosezeitraum um 38 % an. Dabei geht DNV aus Gründen der Energie-Versorgungssicherheit von einer zusätzlichen Flankierung des Ausbaus der Kernenergie durch die Regierungen aus. DNV unterstellt, dass die SMR-Technologie in den 2030er-Jahren kommerzialisiert wird und in den 2040er-Jahren zu Kapazitätserweiterungen beiträgt. Als Haupthindernis für einen weiter verstärkten Ausbau der Kernenergie sowohl im Großen als auch im kleinen Maßstab werden die Kosten gesehen.

Laut DNV ist die Transformation der Energieversorgung vor allem durch eine verstärkte Nutzung von Strom gekennzeichnet. Der weltweite Stromverbrauch steigt von 30 Petawattstunden (PWh) im Jahr 2023 auf 62 PWh im Jahr 2050 (Bild 5). Dies wird zum Teil auf eine wachsende und wohlhabendere Weltbevölkerung zurückgeführt. Darüber hinaus werden in den nächsten 25 Jahren bedeutende neue Nachfragekategorien entstehen, wie 1,3 Milliarden Elektrofahrzeuge für den Personenverkehr, Milliarden von Wärmepumpen für Wohn- und Industrieheizzwecke, Tausende von Elektrolyseuren zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, ein um das 2,5-fache steigender Kühlbedarf und neue Datenzentren, die eine Gesamtnachfrage entfalten, die dem Stromverbrauch von Deutschland und Frankreich zusammen gerechnet entspricht.

Das Stromversorgungssystem unterliegt einem dramatischen Wandel und verändert die Art und Weise, wie Strom erzeugt, verteilt und verbraucht wird. Erneuerbare Energien setzen ihren Aufstieg verstärkt fort. Von einem Niveau von 9,2PWh im Jahr 2023 wird die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien bis 2035 voraussichtlich um 15,2PWh ansteigen. Allerdings führt dieser Zuwachs nicht unmittelbar zu einer Reduzierung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe. Die wach-

sende weltweite Stromnachfrage, die im gleichen Zeitraum voraussichtlich um 12,1PWh steigen wird – bewirkt, dass ein Großteil dieser neuen erneuerbaren Kapazitäten durch die zusätzliche Nachfrage absorbiert wird. Erst in den späten 2030er-Jahren ist damit zu rechnen, dass mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien diese steigende Nachfrage übertroffen wird und die Voraussetzung für einen deutlicheren Rückgang der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen schaffen.

DNV geht davon aus, dass Solarenergie bis 2050 den weltweiten Strommix dominiert und dann auf einen Anteil von 44 % kommt. Der Schlüssel zum Erfolg der Solarenergie wird nicht nur in der Erzeugung tagsüber, sondern auch in der zunehmenden Verfeinerung der Speichertechnologie gesehen. Damit wird es ermöglicht, Solarenergie rund um die Uhr zu nutzen und so zu einer zuverlässigeren Energiequelle zu machen. Windkraft wird laut DNV 2050 mit 28 % zur weltweiten Stromerzeugung beitragen. Einschließlich Wasserkraft, Bioenergie und Geothermie kommen erneuerbare Energien dann auf einen Anteil von etwa 85 % an der globalen Stromerzeugung.

Auf Basis erneuerbarer Energien bzw. mit anderen kohlenstoffarmen Technologien erzeugtem Wasserstoff wird eine wichtige Rolle beigemessen, um die Treibhausgas-Emissionen in den Sektoren zu reduzieren, die sich nur schwer elektrifizieren lassen. DNV hat seine Einschätzungen im Vergleich zur vorjährigen Prognose allerdings um 20 % reduziert. Zwar wird nach jetziger Prognose der künftige Bedarf an Wasserstoff als Energieträger von dem derzeit noch vernachlässigbaren Niveau bis zum Jahr 2050 auf über 188 Millionen Tonnen ansteigen. Dieser Zuwachs ist allerdings bei weitem nicht ausreichend, um den Vorgaben gemäß dem Pariser Klimaabkommen gerecht zu werden. DNV geht davon aus, dass der überwiegende Einsatzbereich von Wasserstoff im Verarbeitenden Gewerbe (73 %) liegen wird, gefolgt vom Transport (14 %) und Gebäuden (7 %). Der verbleibende Anteil wird für die Stromerzeugung und verschiedene andere Zwecke verwendet. Mit der aktuell prognostizierten Entwicklung kommt Wasserstoff bis

2030 auf einen Anteil von 0,25 %, bis 2040 auf 1,5 % und bis 2050 auf 3,9 % des globalen Endenergieverbrauchs.

Nach den Berechnungen des Unternehmens werden im Jahr 2040 etwa 2 % der globalen Emissionen mittels CCS abgeschieden. Für 2050 wird der Anteil auf 6 % beziffert.

Auf der Grundlage der vorgelegten Analyse werden die weltweiten energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von knapp 35 Milliarden Tonnen im Jahr 2023 um rund 5 % auf 33 Milliarden Tonnen im Jahr 2030 sinken. Für das Jahr 2050 hat DNV ein Emissionsniveau von 17 Milliarden Tonnen ermittelt. Damit wird die vom IPCC bis 2030 befürwortete Halbierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwei Jahrzehnte später erreicht. Zu Netto-Null im Jahr 2050 klafft eine große Lücke. Aufgrund der bis 2050 erwarteten kumulierten Emissionen wird mit einer globalen Erwärmung um 2,2 Grad Celsius im Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Niveau gerechnet.

### 3.2.3 Fazit

Bei Vergleich der Prognose von ExxonMobil mit dem Reference Scenario der U.S. Energy Information Administration (EIA) wird deutlich, dass die Ergebnisse zur künftigen Rolle von Erdgas, Erdöl und erneuerbaren Energien ähnlich sind. Dem *Reference Scenario* der EIA liegt eine Fortsetzung der Entwicklung entlang des gegenwärtig verfolgten Pfades unter Berücksichtigung der bei Erstellung des Reports Mitte 2023 bestehenden politischen Rahmenbedingungen zugrunde. Der *International Energy Outlook* der EIA ist nach eigenem Verständnis der Organisation allerdings nicht als Prognose, sondern als politikneutrale Ausgangsbasis zu verstehen, anhand derer zukünftige politische Maßnahmen bewertet werden können. Dass die Prognose von ExxonMobil dieser Richtung folgt, könnte durch die starke Ausrichtung der Geschäftstätigkeit des Konzerns auf Erdöl und Erdgas mitbeeinflusst sein. Selbst in *Current Trends*, eines der drei von TotalEnergies erstellten Szenarien, kommen die fossilen Energien 2050 mit 61 % auf einen geringeren Beitrag zur Deckung des weltweiten Primärenergieverbrauchs als ExxonMobil mit 67 %. Im Unterschied zum Ergebnis von ExxonMobil findet gemäß der Prognose von DNV eine starke Transformation der globalen Energieversorgung statt. Die erneuerbaren Energien entwickeln sich zur stärksten Quelle bei der Deckung des Primärenergieverbrauchs. In der Stromerzeugung werden sie sogar zur dominierenden Größe. Insgesamt zeigt diese Prognose einen realistischen Weg auf, wie sich die Zukunft der Energieversorgung bis zur Mitte des Jahrhunderts gestalten könnte.

### 3.3 Szenarien zur Weltenergieversorgung bis 2050

Exploratorische und normative Szenarien zur Entwicklung der globalen Energieversorgung haben 2024 der World Energy Council (WEC), die Internationale Energie-

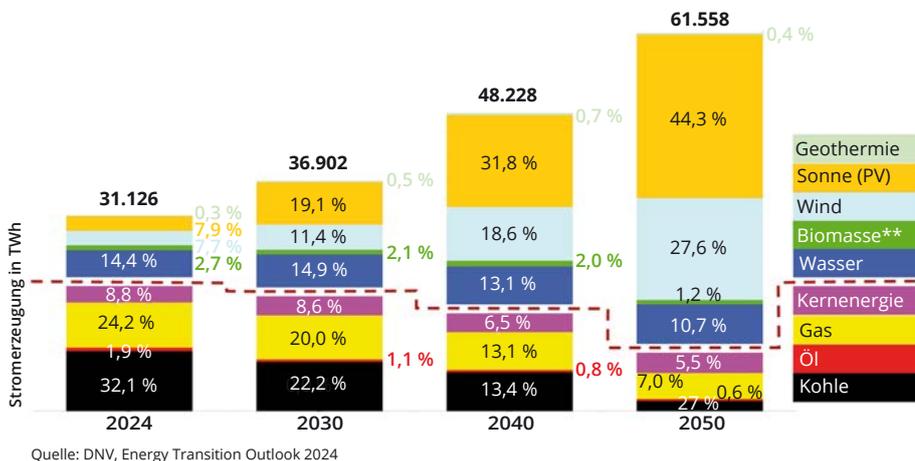


Bild 5. Prognose von DNV zur weltweiten Entwicklung der Netto-Stromerzeugung in TWh.

Agentur (IEA) und IRENA, Equinor, BP und TotalEnergies, McKinsey, Wood Mckenze, BloombergNEF und Enerdata sowie das IEEJ veröffentlicht. Ferner hatte Shell im März 2023 jeweils ein exploratorisches und ein normatives Szenario publiziert. Dabei unterscheiden sich die gewählten Ansätze deutlich. Die exploratorischen Szenarien sind geprägt durch die jeweils getroffenen Annahmen und bringen zum Ausdruck, was zu erwarten ist, wenn man von den für die Szenarien unterschiedlich definierten Vorgaben ausgeht. In den normativen Szenarien wird ausgeführt, was passieren müsste, um das jeweils vorgegebene Ziel oder Zielbündel zu erreichen.

### 3.3.1 Charakterisierung der Szenarien

Der **World Energy Council** hat zwei exploratorische Szenarien gewählt, die auf unterschiedlichen Grundannahmen basieren,

- In *Rocks* werden die globalen Hoffnungen und nationalen Versprechen, die mit dem Pariser Klimaabkommen verbunden sind, durch intensiven Druck in Bezug auf Energiesicherheit, industrielle Wettbewerbsfähigkeit und andere Aspekte des nationalen Eigeninteresses bedroht – ein „neuer Tribalismus“. In vielen Teilen der Welt wurden die Pläne für den Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe abgeschwächt oder verschoben, und die NDCs werden kaum eingehalten. Energie-subventionen werden genutzt, um den immer stärker werdenden populistischen Forderungen in einer Welt gerecht zu werden, in der die Staats- und Regierungschefs eher die nationale Stärke als internationale Vereinbarungen oder Verantwortung betonen. Die Energiewende wird dort fortgesetzt, wo sie etabliert ist und sicherheitsrelevante Ziele unterstützt, aber die Vorstellung, dass die ganze Welt die UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung erreichen kann, scheint einer längst vergangenen, einfacheren Zeit anzugehören.
- In *Rivers* verändern der digitale Fortschritt und die Marktdynamik das Energieangebot und die Nachfrage erheblich. Das Wachstum vollzieht sich in sporadischen, aber dramatischen Schüben und belohnt Unternehmen, die neue Technologien einführen und Anpassungen in den Lieferketten vorausschauend ausrichten. Verstärkte Kooperation und Öffnung der Märkte bringen Innovationen voran. Zudem entstehen – manchmal unerwartet – neue Formen der Zusammenarbeit auf vielen verschiedenen Ebenen: Nachhaltigkeitsprojekte innerhalb gemeinsamer Wertschöpfungsketten, Austausch bewährter Praktiken zwischen Bürgergruppen, neue Effizienzgewinne durch technologische Innovationen sowie Klimaklubs und andere anreizbasierte Mechanismen. Eine größere digitale Transparenz ermöglicht es den vernetzten Energieakteuren, in ihrem Bereich strategi-

sche Entscheidungen zu treffen, anstatt auf politische Vorgaben von oben zu reagieren.

Während in den früheren Szenarien des World Energy Council der Zustand der Geopolitik als zentrale Unsicherheit betrachtet worden war, wird deren Rolle jetzt als vorherbestimmter Faktor definiert. Eine kooperative globalisierte Welt wird auf absehbare Zeit ausgeschlossen. Vielmehr wird von einer fragmentierten Welt ausgegangen. Die Priorität, die dem Klimaschutz gebührt, ist in beiden Szenarien als hoch angesetzt worden. Hauptunterschiede zwischen den zwei Szenarien bestehen darin, wie stark der Fokus sich darauf richtet, welche Maßnahmen zu welchem Zeitpunkt ergriffen werden und welche Ergebnisse diese Maßnahmen haben könnten.

Die **Internationale Energie-Agentur (IEA)** hat im *World Energy Outlook 2024* drei Szenarien zur weltweiten Energieversorgung bis 2050 untersucht. Davon sind mit dem *Stated Policy Scenario* (STEPS) und dem *Announced Pledges Scenario* (APS) zwei der Gruppe der exploratorischen Szenarien zuzuordnen. Das dritte, das *Net Zero by 2050 Scenario* (NZE), ist demgegenüber als normatives Szenario zu klassifizieren. Die Schrift enthält – neben Aussagen zu den weltweiten Perspektiven – auch nach Weltregionen differenzierte Analyse-Ergebnisse.

- Das *Stated Policy Scenario* (STEPS) berücksichtigt die Maßnahmen, die bis August 2024 tatsächlich in Kraft gesetzt wurden bzw. sich zumindest in der Umsetzung befinden, um angekündigte energie- und klimapolitische Ziele zu erreichen. Es geht nicht davon aus, dass alle Ziele der Regierungen tatsächlich eingehalten werden. Dieses Szenario würde bis zum Jahr 2100 zu einem globalen Temperaturanstieg um 2,4 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Niveau führen.
- Das *Announced Pledges Scenario* (APS) nimmt alle von Regierungen weltweit eingegangenen Klimaverpflichtungen, einschließlich der *Nationally Determined Contributions* (NDCs) sowie der längerfristigen Net-Zero-Ziele, auf und unterstellt, dass diese vollständig und fristgerecht erfüllt werden. Der globale Temperaturanstieg bleibt bis 2100 im APS auf 1,7 Grad Celsius begrenzt.
- Das *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* (NZE) ist ein normatives Szenario, das einen schmalen, aber gangbaren Weg für das globale Energiesystem aufzeigt, um bis 2050 auf Netto-Null-Emissionen zu kommen, wobei fortgeschrittene Volkswirtschaften dies bereits vor anderen umsetzen. Dieses Szenario wird auch dem Anspruch weiterer energiebezogener UN-Ziele gerecht. Dazu gehören der Zugang aller Menschen zu Energie bis 2030 und die Verbesserung der Luftqualität. Das NZE ist definitionsgemäß konsistent mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 Grad Celsius.

Keines der Szenarien ist als Prognose zu verstehen. Die IEA hat allerdings mit Präsentation der Szenarien erklärt, dass sich die Welt nach Einschätzung der Organisation gegenwärtig auf einem Pfad befindet, der sich sehr stark entlang der Annahmen bewegt, die im *Stated Policy Scenario* getroffen wurden.

Im *World Energy Transitions Outlook 2024* von **IRENA** steht das normative 1,5°C Szenario im Vordergrund der Betrachtung. Darin wird aufgezeigt, was passieren müsste, damit das 1,5°C-Ziel noch erreicht wird. Dieses Szenario setzt auf verfügbare Technologien und vermittelt eine Vision für die Transformation der Energieversorgung, mit der die Weltgemeinschaft den Zielen des Pariser Klimaabkommens gerecht werden könnte. Neben diesem zentralen Szenario wird ein *Planned Energy Scenario* (PES) vorgestellt, das als Referenzfall zu verstehen ist und die Perspektive für die Entwicklung der Energiesysteme auf Grundlage der gegenwärtig verfolgten Politiken der Regierungen darlegt. Damit verknüpft die Studie die zentrale Botschaft, dass eine sofortige Kurskorrektur unverzichtbar sei, um die Welt in die nötige Spur zu bringen, damit das 1,5°C-Ziel in Sichtweite bleibt.

**Equinor** hat ein exploratorisches Szenario (*Walls*) und ein normatives Szenario (*Bridges*) präsentiert. Das Szenario *Walls* setzt auf den aktuellen Markt-, Technologie- und Politiktrends auf und geht davon aus, dass sich diese in Zukunft, allerdings nur verhalten, beschleunigen werden. Das Wirtschaftswachstum ist nach wie vor die wichtigste Triebkraft für die Entwicklung der Energienachfrage, und die nationalen Regierungen geben dem kurzfristigen Wirtschaftswachstum weiterhin Vorrang vor langfristigen Klimazielen. Bei *Bridges* besteht ein normativer Hintergrund, der sich an dem im Pariser Abkommen festgelegten Ziel von 1,5°C globaler Erwärmung orientiert. Dieses Szenario setzt die Schaffung eines günstigen geopolitischen Umfelds voraus, das Wettbewerb in Kooperation zwischen den Nationen unterstützt. Die Energiemärkte werden stärker integriert und technologische Fortschritte werden leichter geteilt. Der Klimaschutz bleibt die treibende Kraft, und in allen Regionen kommen der Ausbau der Kapazitäten für erneuerbare Energien, die Verbesserung der Energieeffizienz und drastische Verhaltensänderungen zum Tragen.

Dem globalen Energieausblick von **BP** liegen zwei Szenarien zugrunde – *Current Trajectory* und *Net Zero*, mit denen die Geschwindigkeit und Ausgestaltung der Energiewende analysiert wird. *Current Trajectory* kennzeichnet den Weg, auf dem sich das globale Energiesystem derzeit bewegt. *Net Zero* untersucht, wie sich verschiedenen Elemente des Energiesystems ändern müssten, um die zur Einhaltung der Pariser Klimaziele notwendige Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen zu erreichen. Damit werden zwei unterschiedliche Arten von Entwick-

lungsmöglichkeiten für die bevorstehenden 25 Jahre aufgezeigt.

**TotalEnergies** hat drei Szenarien entwickelt. Das sind *Current Trends*, *Momentum* und *Rupture*. *Current Trends* spiegelt den aktuellen Kurs der verschiedenen Länder bis 2030 und die Erwartungen des Konzerns an die technologischen Entwicklungen und die Politik im Einklang mit den aktuellen Trends wider. *Momentum* ist ein zukunftsorientierter Ansatz, der die bestehenden Dekarbonisierungsstrategien sowie die NDCs der Staaten zugrunde legt. Es beinhaltet eine starke Elektrifizierung des Endverbrauchs von Energie, den schrittweisen Ausstieg aus der Kohle in westlichen Ländern, einen starken Rückgang in China und nur ein geringes Wachstum dieses Energieträgers in den Ländern des Globalen Südens, die Nutzung von Erdgas als Übergangsenergie zur Stromerzeugung und für Industrieprozesse in allen Ländern und den Einsatz neuer Energien in nicht oder nur schwer elektrifizierbaren Sektoren. Dieses Szenario führt zu einem geschätzten Temperaturanstieg zwischen + 2,2° und 2,3°C bis 2100. *Rupture* ist ein normatives Szenario, das aufzeigt, was geschehen müsste, damit bis 2100 der Temperaturanstieg auf weniger als 2°C begrenzt bleibt. Es geht davon aus, dass weltweit alle Hebel zur Dekarbonisierung genutzt werden, insbesondere der Einsatz von erneuerbaren Energien und CCUS. Dieses Szenario führt zu einem geschätzten Temperaturanstieg zwischen + 1,7° und 1,8°C bis 2100.

**Shell** hat 2023 zwei Szenarien vorgelegt, die durch die veränderten Verhältnisse als Folge des Angriffskriegs Russlands in der Ukraine geprägt sind. Das dadurch verstärkte Sicherheitsdenken hat dazu geführt, dass nationalen Interessen Vorrang vor gemeinsamen Belangen der internationalen Staatengemeinschaft eingeräumt werden. Neben der Energiesicherheit werden die politischen Agenden durch die Sorge um die Energiepreise und den wachsenden Klimadruck geprägt. Aus den bestehenden Turbulenzen werden zwei Szenarien abgeleitet. *Archipelagos* skizziert einen möglichen Pfad, der von der Situation ausgeht, die 2022 herrschte, während *Sky 2050* einen normativen Ansatz verfolgt, der von einem gewünschten Ergebnis aus rückwärts betrachtet, wie dieses Ergebnis erreicht werden könnte.

– Gemäß *Archipelagos* herrscht das Streben nach Energiesicherheit vor. Der Nationalismus, der durch einen neuen Militarismus untermauert wird, nimmt zu. Dies hat zur Folge, dass globale Vereinbarungen, einschließlich der Zusagen zur Einhaltung der UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung und des Pariser Klimaabkommens, an Bedeutung verlieren. Es kommt zu einem breit gefächerten Technologie-wettlauf, der auch den verstärkten Einsatz von kohlenstoffarmen Energie-Technologien einschließt. Diese Dynamik führt – trotz der vergrößerten Ausrichtung auf den Aspekt der Versorgungssicherheit – dazu,

dass die globalen Treibhausgas-Emissionen in den 2020er-Jahren den Höhepunkt erreichen und ab Mitte der 2030er-Jahre zurückgehen. Als Konsequenz wäre ein Anstieg der globalen Temperaturen bis 2100 um 2,2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu erwarten.

– In *Sky 2050* ist der Klimaschutz der primäre Anker, an dem sich die Weltgemeinschaft orientiert. Die Bürger drängen auf Veränderungen in ihren jeweiligen Ländern. Politiken zum Klimaschutz wird Vorrang eingeräumt. Maßnahmen zur raschen Umsetzung von Klimaschutz-Technologien gewinnen an Priorität. Trotz dieser Weichenstellungen ist ein Zeitraum zu erwarten, in dem der globale durchschnittliche Temperaturanstieg 1,5°C überschreitet. Allerdings wird davon ausgegangen, dass bis 2075 die Erderwärmung auf unter 1,5°C gedrückt werden kann und zum Ende des Jahrhunderts 1,2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau erreicht. Zur Vermeidung der zeitweisen Überschreitung der 1,5°C-Marke wären Maßnahmen erforderlich, deren Umsetzung möglicherweise auch an Grenzen der technischen Machbarkeit stoßen könnte.

**Wood Mackenzie** hat vier Szenarien veröffentlicht, *Delayed transition*, *Base case*, *Country pledges* und *Net zero*. Diese Szenarien, drei exploratorische und ein normatives, sind durch unterschiedliche Annahmen gekennzeichnet. *Delayed Transition*: Eine Kaskade von geopolitischen Krisen zersplittert weiterhin den globalen Handel. Politische Entscheidungsträger ziehen Protektionismus der Zusammenarbeit vor und treiben die Kosten für alternative Energien in die Höhe. *Base case*: Stetige Weiterentwicklung aktueller und im Entstehen begriffener Technologien, wobei als hauptsächliche Treiber die Gesichtspunkte Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit gesehen werden. *Country pledges*: Koordinierte politische Antworten auf die derzeitige Energiekrise und die geopolitischen Herausforderungen für die Weltwirtschaft, die in den 2030er-Jahren an Dynamik gewinnen werden. *Net Zero 2050*: Normatives Szenario, in dem die Einhaltung des 1,5°C-Ziels vorgegeben ist. Dies setzt unmittelbaren Rückgang des Energieverbrauchs, die rasche Einführung von Technologien mit negativen Emissionen, den Ausbau der Kernenergie sowie die forcierte Implementierung von Langzeitspeicherung und Geothermie voraus. Diese vier Pfade sind verknüpft mit der Annahme einer globalen Erwärmung um 3°C (*Delayed transition*) 2,5°C (*Base case*), 2°C (*Country pledges*) bzw. 1,5°C (*Net zero*).

**McKinsey** hat ebenfalls vier Pfade modelliert.

– Das Szenario *Slow Evolution* geht von einer lokalen Entscheidungsfindung aus – fokussiert auf die Erschwinglichkeit von (heimischer) Energie und die Versorgungssicherheit. Der Nachhaltigkeit wird eine zweitrangige Priorität eingeräumt.

Diese fragmentierte Reaktion auf die Dekarbonisierung geht einher mit verhaltener Investitionstätigkeit in kohlenstoffarme Technologien und niedrigen CO<sub>2</sub>-Preisen, was wiederum erhebliche ökologische, wirtschaftliche und soziale Auswirkungen nach sich zieht. Dieses Szenario ist geprägt durch deutliche Unterschiede zwischen den Staaten in Bezug auf das Erreichen von Dekarbonisierungszielen.

– Im Szenario *Continued Momentum* wird ein Ausgleich zwischen den Aspekten der Nachhaltigkeit und anderen Faktoren, wie Wirtschaftlichkeit und Sicherheit der Energieversorgung, angenommen, wobei einige Schwellenländer der Erschwinglichkeit und der Versorgungssicherheit eher Vorrang vor der Nachhaltigkeit einräumen. Technologie- und Effizienzverbesserungen folgen weitgehend den aktuellen Trends, die durch die Wirtschaft angetrieben werden, wobei praktische Beschränkungen für die breite Einführung kohlenstoffarmer Technologien fortbestehen. Dieses Szenario spiegelt weitgehend die aktuellen Trends wider und geht davon aus, dass sie sich fortsetzen werden, was zu einer ungleichmäßigen Verbreitung kohlenstoffarmer Technologien nach Technologien und Weltregionen führt.

– Das Szenario *Sustainable Transformation* zeigt einen Weg auf, bei dem die Staaten ihr Engagement für die Nachhaltigkeit verstärken, wobei die globale Koordination zunimmt, um Engpässe zu beseitigen, Investitionszusagen für kohlenstoffarme Technologien freizusetzen und die Energieeffizienz über das historische Niveau hinaus zu verbessern. Die globale Zusammenarbeit bei der Dekarbonisierung wird durch die Schaffung einer Regionen übergreifenden Finanzierung unterstrichen, wobei die Länder kosteneffiziente Maßnahmen zur Emissionsreduzierung ergreifen. Doch trotz dieser Dynamik setzen praktische Zwänge dem Tempo der Einführung sauberer Technologien gewisse Grenzen.

– Im *1,5° pathway* ist vorausgesetzt, dass die internationale Zusammenarbeit mobilisiert wird, um Technologien zur Dekarbonisierung rasch zu verbreiten, umfangreiche Investitionen (auch in Schwellenländern) freizusetzen und Verhaltensänderungen zu bewirken. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen müssten bis 2030 um 50% gegenüber dem heutigen Stand gesenkt und bis 2050 Netto-Null-Emissionen erreicht werden. Andere Treibhausgase, insbesondere Methan und Distickstoffoxid, müssten ebenfalls stark reduziert werden. Die Einhaltung der mit diesem Szenario verknüpften Zielvorgabe erfordert eine deutliche Abkehr von den derzeitigen Trends und erhebliche Änderungen im Energiemix.

Die drei exploratorischen Szenarien gehen mit einem zu erwartenden Anstieg der globalen Temperaturen bis 2050 im Vergleich zum vorindustriellen Niveau von 2,6°C (*Slow Evolution*), 2,2°C (*Continued Momen-*

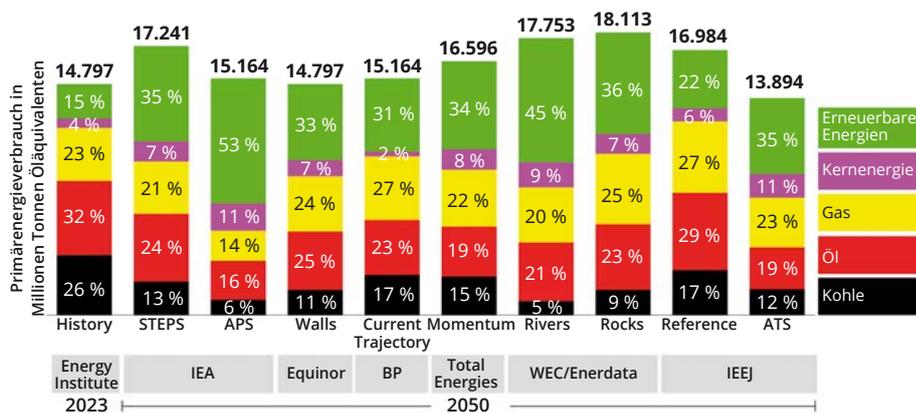
tum), und 1,8°C (*Sustainable Transformation*) aus. Im normativen Szenario 1,5° *pathway* bleibt der Temperaturanstieg definitionsgemäß auf maximal 1,5°C begrenzt.

**Enerdata** hat in *EnerFuture 2024* drei Szenarien gewählt, um die mögliche Zukunft des globalen Energiesystems abzubilden. *EnerBase*: Fortsetzung der bestehenden Politiken und Trends – verknüpft mit einem noch bis 2040/2045 fortgesetzten Anstieg der globalen Emissionen an Treibhausgasen, was einen Temperaturanstieg von etwa 3°C zur Folge hätte. *EnerBlue*: Einhaltung der aktuellen *Nationally Determined Contributions* seitens der Staaten – verbunden mit einer Halbierung der weltweiten Treibhausgas-Emissionen bis 2050 gegenüber dem heutigen Stand. Der zu erwartende Temperaturanstieg wird in diesem Szenario mit 2,5°C geschätzt. *EnerGreen*: Ambitionierte Politik zur Minderung der Treibhausgas-Emissionen, um den Anstieg der Temperaturen unter 2°C zu halten.

*EnerFuture 2024* basiert auf dem Poles-Enerdata Modell, mit dem das globale Energiesystem abgebildet wird. Es umfasst 66 Staaten bzw. Weltregionen. Als Input-Parameter gehen Daten zu Energieressourcen (fossile Energien, Uran und erneuerbare Energien), makroökonomische Annahmen (GDP, Bevölkerung etc.), Energie- und Klimapolitiken sowie Kosten und Effizienz von Technologien in die Modellierung ein. Zu den Output-Parametern zählen vor allem der Energieverbrauch, die Energieproduktion, die Endverbraucher-Preise, Investitionen und Treibhausgas-Emissionen.

**The Institute of Energy Economics (IEEJ), Japan**, quantifiziert das globale Energieversorgungssystem (Strukturen von Angebot und Nachfrage) bis 2050. Der *IEEJ Outlook 2025* umfasst zwei exploratorische Szenarien. Im *Reference Scenario* werden die vorherrschenden Veränderungen vor dem Hintergrund der derzeitigen Energie- und Umweltpolitik fortgesetzt. Das *Advanced Technology Scenario* repräsentiert einen Pfad, auf dem Energie- und Umwelttechnologien in größtmöglichem Umfang eingeführt werden, um eine stabile Energieversorgung zu gewährleisten und die Maßnahmen gegen den Klimawandel zu verstärken. Der *IEEJ Outlook 2025* basiert auf ökonomischen Modellen und anderen Instrumenten. Die Studie enthält Ergebnisse sowohl für die globale Ebene als auch für verschiedene Länder.

**BloombergNEF** hat zwei globale Energieszenarien modelliert. Das *Economic Transition Scenario* (ETS) spiegelt eine Welt wider, in der die politischen Entscheidungsträger eine Energiewende anstreben, die sich nur auf historische Effizienztrends und wirtschaftlich wettbewerbsfähige, kommerziell nutzbare saubere Energietechnologien stützt. Im ETS erfahren saubere Technologien keine weitergehende Unterstützung über die bestehenden Maßnahmen hinaus. Unter dem ETS erreicht der Anstieg der globalen



Quelle: IEA, World Energy Outlook 2024; Equinor, Energy Perspectives 2024; BP, Energy Outlook 2024; WEC Energy Scenarios 2024; IEEJ Outlook 2025; TotalEnergies, Energy Outlook 2024

Bild 6. Primärenergieverbrauch weltweit – Synopse der exploratorischen Szenarien von IEA, Equinor, BP, IEEJ, TotalEnergies und WEC/Enerdata bis 2050 in Millionen Tonnen Öläquivalenten.

Temperaturen gegenüber dem vorindustriellen Niveau bis zum Jahr 2100 2,6°C. Mit dem normativen *Net Zero Scenario* werden das Ausmaß und die Tragweite der Herausforderung veranschaulicht, die globale Erwärmung auf 1,75°C zu begrenzen und die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen.

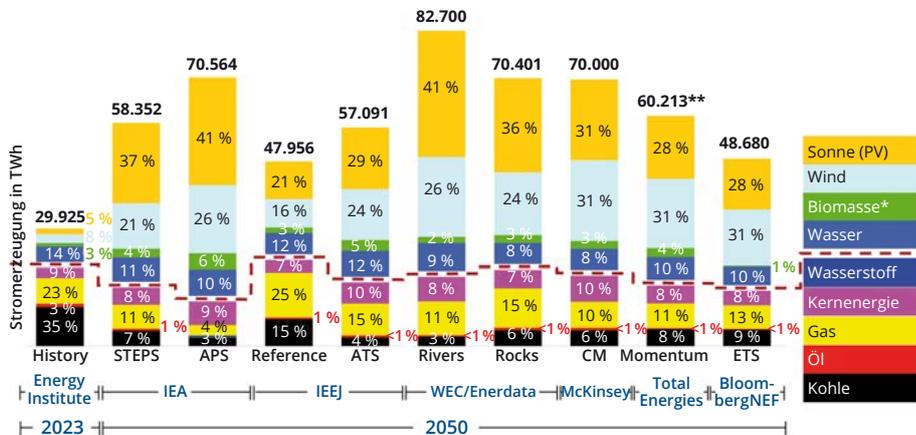
### 3.3.2 Ergebnisse von exploratorischen Szenarien im Vergleich

In den beiden Szenarien des **World Energy Council** wächst der weltweite Primärenergieverbrauch bis 2050 noch um rund ein Fünftel im Vergleich zum Stand des Jahres 2023 (Bild 6). Die Unterschiede in der Entwicklung gemäß den beiden Szenarien bestehen darin, dass bis 2030 das in *Rivers* unterstellte größere wirtschaftliche Wachstum zu einem etwas höheren Primärenergieverbrauch führt als in *Rocks*, während nach 2040 der Primärenergieverbrauch in *Rocks* wegen der niedrigeren Effizienzgewinne etwas größer ausfällt als in *Rivers*.

Auf die fossilen Energien entfallen auch 2050 noch auf Anteile von 57% (*Rocks*) beziehungsweise 46% (*Rivers*) des Primärenergieverbrauchs. Kohle muss zwar deutliche

Einbußen hinnehmen und kommt 2050 nur noch einen Beitrag von 9% in *Rocks* und 5% in *Rivers* gegenüber gegenwärtig 26%. Die Ölnachfrage verharrt bis 2050 gemäß beiden Szenarien noch weitgehend auf dem heutigen Niveau. Und für Erdgas wird zumindest in *Rocks* sogar mit einem leichten Anstieg der weltweiten Nachfrage gerechnet. Die stärksten Zuwächse verzeichnen allerdings die erneuerbaren Energien. Deren Anteil an der Deckung des globalen Primärenergieverbrauchs vergrößert sich von 14% im Jahr 2022 bis 2050 auf 36% in *Rocks* und 45% in *Rivers*. Kernenergie kann ebenfalls Zuwächse verbuchen und erreicht 2050 einen Anteil von 7% in *Rocks* und von 9% in *Rivers* am Primärenergieverbrauch – gegenüber 4% im Jahr 2023.

In beiden Szenarien wird von einer starken Elektrifizierung in der Energieversorgung ausgegangen (Bild 7). So nimmt der weltweite Stromverbrauch bis 2050 auf mehr als das Doppelte in *Rocks* und fast das Dreifache in *Rivers* im Vergleich zum Stand des Jahres 2023 zu. Dieser Zuwachs wird ausschließlich durch erneuerbare Energien gedeckt. Entscheidend ist dabei der massive Ausbau



\* einschließlich Geothermie und Wasserstoff      \*\* einschließlich Strom für die Produktion von Wasserstoff und E-Fuels

Quelle: IEA, World Energy Outlook 2024; WEC Energy Scenarios 2024; McKinsey, Global Energy Perspective 2024; IEEJ Outlook 2025; TotalEnergies, Energy Outlook 2024; BloombergNEF, New Energy Outlook 2024

Bild 7. Verschiedene exploratorische Szenarien im Vergleich Globale Stromerzeugung 2023 bis 2050 in TWh.

von Wind- und Solarenergie. Insgesamt tragen die erneuerbaren Energien 2050 zu 71 % (*Rocks*) bzw. 78 % (*Rivers*) zur weltweiten Stromerzeugung bei. Der Anteil fossiler Energien an der globalen Stromerzeugung verringert sich auf 22 % in *Rocks* und 14 % in *Rivers*. Die Stromerzeugung aus Kernenergie steigt zwar in absoluten Größen an. Da die Zuwächse aber niedriger ausfallen als die Steigerungsraten der gesamten Stromnachfrage, sinkt der Anteil der Kernenergie von heute 9 % auf 7 % (*Rocks*) bzw. 8 % (*Rivers*) im Jahr 2050.

Bei der Deckung des Endenergieverbrauchs kommt es zu einer Ablösung von Öl als wichtigster Energiequelle durch Elektrizität. Der Beitrag von Elektrizität zur Deckung des globalen Endenergieverbrauchs verdoppelt sich im Vergleich zu dem heutigen Anteil von rund 20 %. Bei Anwendungen, bei denen weiterhin molekulare Brenn- und Kraftstoffe benötigt werden, wird es zu einer zunehmenden Substitution fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe, Wasserstoffderivate und schließlich synthetische Kraftstoffe kommen. Insgesamt wird aber das Potenzial von Wasserstoff nur in begrenztem Umfang genutzt, auch wenn – zumindest im Szenario *Rivers* – dessen Nutzung bis 2050 im Vergleich zum Stand des Jahres 2023 sich vervierfacht. Der Anteil von Wasserstoff am Endenergieverbrauch erhöht sich von 1,5 % im Jahr 2023 in *Rivers* auf rund 5 % im Jahr 2050, bleibt aber in *Rocks* auch dann noch auf 2 % begrenzt.

In *Rivers* setzt eine Trendwende im Verlauf der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bereits vor 2030 ein. Demgegenüber wird für *Rocks* noch mit einer Plateau-Phase bis in die 2030er-Jahre gerechnet, bevor auch in diesem Szenario ein rückläufiger Verlauf eintritt. Im Ergebnis fallen die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2050 im Vergleich zu 2023 in *Rocks* um etwa ein Fünftel und in *Rivers* um rund zwei Fünftel geringer aus. Diese Entwicklung würde mit einem globalen Temperaturanstieg in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts von 2 Grad Celsius in *Rivers* und von 2,5 Grad Celsius in *Rocks* im Vergleich zum vorindustriellen Niveau einhergehen.

Die zwei exploratorischen Szenarien, die mit dem *World Energy Outlook 2024* von der **International Energy Agency** vorgelegt wurden, kommen aufgrund der differierenden Annahmen zu voneinander abweichenden Ergebnissen.

– Im *Stated Policy Scenario* (STEPS) steigt der weltweite Primärenergieverbrauch bis 2050 noch an, allerdings nur mit jahresdurchschnittlichen Raten von 0,4 %. Die globale Nachfrage sowohl nach Kohle als auch nach Öl und Erdgas erreicht vor 2030 den höchsten Stand. Nach dem Peak folgt ein Rückgang – besonders ausgeprägt bei Kohle. So vermindert sich der Anteil der Kohle von 26 % im Jahr 2023 auf 13 % im Jahr 2050. Alle fossilen Energien decken gemäß diesem Szenario 2050

noch 58 % des Primärenergieverbrauchs. Im Jahr 2023 waren es noch 80 %. Der Beitrag erneuerbarer Energien steigt von 15 auf 35 %. Kernenergie kommt 2050 auf 7 % gegenüber 5 % im Jahr 2023.

– Im *Announced Pledges Scenario* (APS) bleibt der weltweite Primärenergieverbrauch in den bevorstehenden Jahrzehnten trotz Zunahme der Bevölkerung und der Wirtschaftsleistung weitestgehend konstant. Der Beitrag fossiler Energien zur Deckung des Primärenergieverbrauchs fällt bis 2050 auf 36 % zurück. Erneuerbare Energien kommen dann auf 53 %, und die Kernenergie leistet einen Beitrag von 11 %.

Die weltweite Stromerzeugung erhöht sich in den zwei exploratorischen Szenarien der IEA bis 2050 um 95 % (STEPS) bzw. 136 % (APS). Die erneuerbaren Energien decken nicht nur den gesamten Zuwachs der Stromerzeugung. Sie ersetzen zunehmend auch die fossilen Energien, die 2023 mit 61 % zur gesamten Stromerzeugung beigetragen hatten. Im Jahr 2050 liegt der Anteil der fossilen Energien noch zwischen 19 % in STEPS und 8 % in APS. Der Anteil der Kernenergie wird auf 8 % (STEPS) bzw. 9 % (APS) beziffert. Die erneuerbaren Energien tragen im Jahr 2050 mit 73 % (STEPS) bzw. 83 % (APS) zur globalen Stromerzeugung bei. Der Beitrag von Wasserstoff zur weltweiten Stromerzeugung bleibt bis zur Mitte des Jahrhunderts noch auf weniger als 1 % begrenzt.

Die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen in beiden Szenarien vor 2030 den höchsten Stand. Sie sinken im STEPS von 37,7 Milliarden Tonnen im Jahr 2023 auf 28,6 Milliarden Tonnen im Jahr 2050. Im APS vollzieht sich bis 2050 ein Rückgang auf 11,7 Milliarden Tonnen.

Auch die **anderen Organisationen** weisen gemäß den 2024 vorgelegten Studien – in Abhängigkeit von den Grundannahmen, die den jeweiligen Szenarien zugrunde liegen – vergleichbare Tendenzen aus.

So haben TotalEnergies im Szenario *Momentum*, McKinsey im Szenario *Continued Momentum*, Equinor im Szenario *Walls* und IEEJ im Szenario *Advanced Technologies* für 2050 einen Anteil fossiler Energien am globalen Primärenergieverbrauch zwischen 52 und 61 % ermittelt. Dies entspricht der gleichen Größenordnung, die von der IEA in STEPS und vom WEC in *Rocks* genannt wird. Die erneuerbaren Energien kommen in diesen Fällen bis zur Mitte des Jahrhunderts auf einen Beitrag zur Deckung des Primärenergieverbrauchs von etwas mehr als einem Drittel. Auf Kernenergie entfallen in den genannten Szenarien Anteile zwischen 5 und 8 %.

Szenarien, denen die Annahme eines ambitionierteren Transformationspfades zugrunde liegt, kommen für das Jahr 2050 auf Anteile der fossilen Energien am globalen Primärenergieverbrauch zwischen 34 und 46 %. Dies gilt beispielsweise für die Szenarien *Sustainable Transition* von McKinsey

und *EnerBlue* von Enerdata. Diese Szenarien weisen mit *Rivers* von WEC und *Announced Pledges* der IEA vergleichbare Ergebnisse aus. Der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch wird in diesen Szenarien zur Mitte des Jahrhunderts mit Anteilswerten zwischen 45 und 53 % beziffert. Szenarien, die andererseits an einem nur sehr verhaltenen Transformationspfad ausgerichtet sind, weisen Beiträge fossiler Energien im Jahr 2050 von sogar noch mehr als 60 % des Primärenergieverbrauchs aus. Dies gilt beispielsweise für *EnerBase* von Enerdata, für *Slow Evolution* von McKinsey, für *Current Trends* von TotalEnergies, für *Current Trajectory* von BP oder für *Reference* von IEEJ. Diese letztgenannten Szenarien sind allerdings eher als Baseline-Pfade zu verstehen, bei denen eine Fortsetzung des status quo unterstellt ist.

Für den Stromsektor zeigen sich in Abhängigkeit der in den exploratorischen Szenarien getroffenen Grundannahmen folgende Tendenzen: Es wird von einer stark steigenden Stromnachfrage ausgegangen. Die Modellrechnungen kommen für einige der Szenarien zu einer Verdoppelung der globalen Stromnachfrage bis 2050 im Vergleich zu 2023. Strom gewinnt in den Sektoren Industrie (unter anderem auch für die Erzeugung von Wasserstoff), bei Heizung und Klimatisierung von Gebäuden, im Straßenverkehr sowie zur Deckung des stark wachsenden Bedarfs der Datenzentren erheblich an Bedeutung.

Die Zuwächse in der Stromerzeugung werden durch erneuerbare Energien gedeckt, die sich bis 2050 zur dominierenden Stromerzeugungsquelle entwickeln. So erreichen die erneuerbaren Energien in den meisten in den Vergleich einbezogenen Szenarien bis 2050 Anteile von 70 % und mehr an der globalen Stromerzeugung. Die konventionellen Energien, also fossile Brennstoffe und Kernenergie, werden auf einen Anteil von 30 % und weniger zurückgedrängt. Davon entfallen zwischen 7 und 10 Prozentpunkten auf die Kernenergie, die weltweit in absoluten Größen zwar zunimmt, anteilig aber in etwa auf dem gleichen Niveau verharrt wie im Jahr 2023. Breite Übereinstimmung besteht gemäß allen exploratorischen Szenarien, dass die größten Wachstumspotenziale für Windkraft und Solarenergie gesehen werden.

Für den weltweiten Verbrauch an Wasserstoff wird eine Spannweite ausgewiesen, die für 2050 zwischen einer Verdoppelung und einer Vervierfachung im Vergleich zum heutigen Niveau reicht. Als wichtigste Einsatzbereiche von Wasserstoff werden die nur schwer elektrifizierbaren Anwendungen in der Industrie, im Straßen-Güterverkehr sowie im Flugverkehr und in der Schifffahrt identifiziert. Ein Großteil des Wasserstoffs dürfte auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt werden. Laut McKinsey wird es sich 2050 – je nach Szenario – zwischen 50 und 70 % der Gesamtmenge um „grünen“ Wasserstoff handeln. In dessen Szenario *Conti-*

„nued Momentum“ nimmt der globale Verbrauch von „grünem“ Wasserstoff von weniger als 1 Millionen Tonnen im Jahr 2023 auf 5 Millionen Tonnen im Jahr 2030 und auf 179 Millionen Tonnen im Jahr 2050 zu.

Die in den verschiedenen Szenarien jeweils zur Höhe des künftigen Energieverbrauchs und zu dessen Zusammensetzung berechneten Ergebnisse sind entscheidend für die erwarteten globalen Temperaturveränderungen. Die Spanne, die sich für die exploratorischen Szenarien ableiten lässt, reicht – je nach in den Szenarien unterschiedlich unterstellten Klimaschutzmaßnahmen – zwischen 1,7°C und 3,0°C in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Dabei ergibt sich der höhere Wert in den Szenarien, denen die Annahme zugrunde liegt, dass die Welt dem bisherigen Pfad weiter folgt bzw. die Transformation verzögert erfolgt. Demgegenüber steht der untere Wert für eine Entwicklung, bei der unterstellt ist, dass die Regierungen zeitgerecht und in vollem Umfang die Maßnahmen ergreifen, die zur Einhaltung der übernommenen Treibhausgas-Minderungsverpflichtungen erforderlich sind.

### 3.3.3 Ergebnisse von normativen Szenarien im Vergleich

Die für die normativen Szenarien im Vergleich zu den exploratorischen Szenarien ermittelten Ergebnisse zeigen die Lücke auf, die zu schließen wäre, um das 1,5 Grad-Ziel einzuhalten. Fast alle Institutionen, die Szenarien zur künftigen Energieversorgung publiziert haben, haben neben exploratorischen Szenarien auch jeweils ein normatives Szenario modelliert. Die Ergebnisse der normativen Szenarien unterscheiden sich vor allem in sechs Punkten von den Resultaten der exploratorischen Szenarien:

- Der gesamte globale Primärenergieverbrauch sinkt in den nächsten Jahren und fällt damit 2050 niedriger aus als 2023 (Bild 8). Einem unmittelbar erreichten Peak im Verbrauch aller drei fossilen Energien folgt ein starker Rückgang, der am stärksten bei Kohle und Öl und etwas verhaltener bei Erdgas ausfällt. Der Anteil fossiler Energien sinkt bis 2050 auf weniger als ein Viertel, in einigen der normativen Szenarien sogar auf weniger als ein Fünftel des weltweiten Primärenergieverbrauchs.
- Die globale Stromerzeugung verdoppelt bis verdreifacht sich bis 2050, und der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch nimmt deutlich zu, und zwar auf eine Spanne zwischen mehr als 40 % bis zu 50 % bis 2050 – im Vergleich zu etwa 20 % heute.
- Der Anteil erneuerbarer Energien am Primärenergieverbrauch vergrößert sich massiv. So weisen die Szenarien *EnerGreen* von Enerdata, *Bridges* von Equinor, *NZE* von der IEA, *Net Zero* von BP und *1.5 °C* von IRENA für das Jahr 2050 Anteile der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch zwischen 62 und 77% aus. Und in der Stromerzeugung kommen diese Studien für das Jahr 2050 auf Bei-

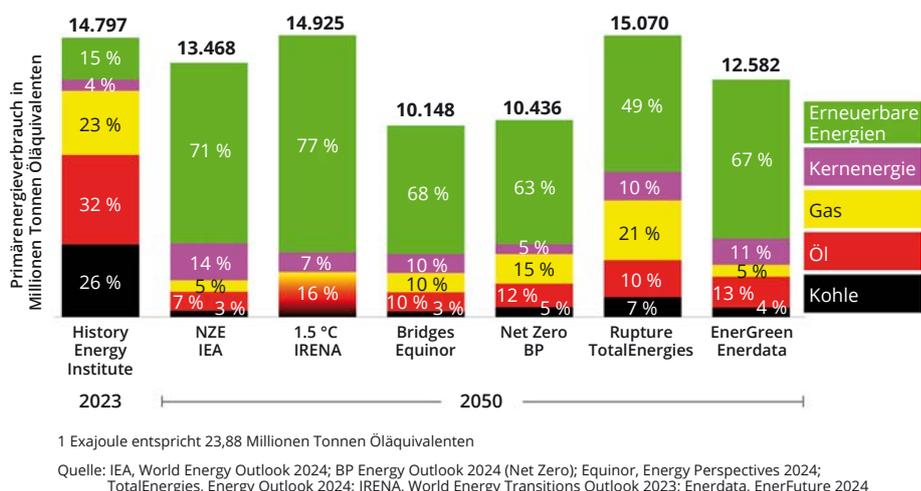


Bild 8. Primärenergieverbrauch weltweit – Synopse der Zielszenarien von IEA, IRENA, Equinor, BP; TotalEnergies und Enerdata in Millionen Tonnen Öl-Äquivalenten.

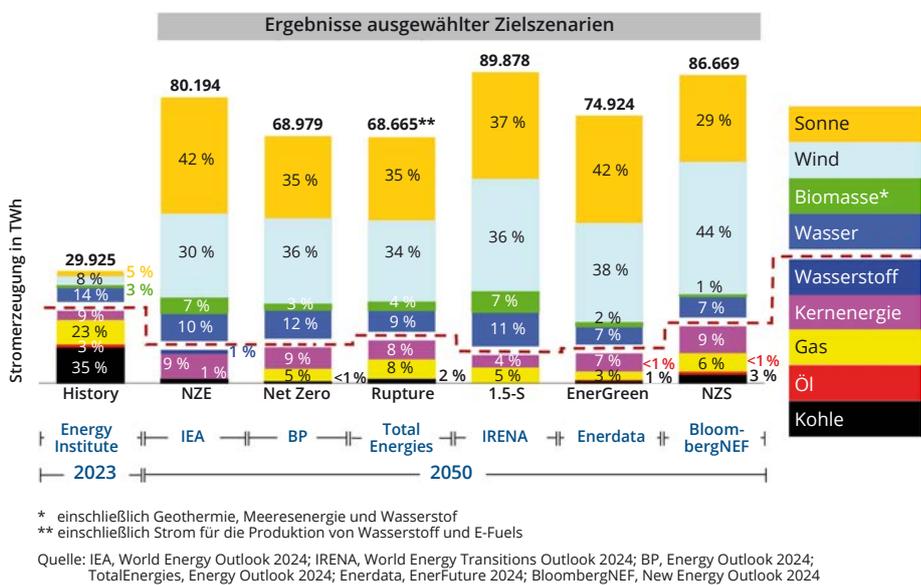


Bild 9. Globale Stromerzeugung 2023 bis 2050 in TWh.

träge der erneuerbaren Energien zwischen 80 und 90%. Bei IRENA sind es sogar 91% (Bild 9).

- Auch der Kernenergie wird, wie etwa bei der IEA, bei BloombergNEF oder Enerdata, ein größerer Beitrag zugeschrieben als in den exploratorischen Szenarien. Laut BloombergNEF müsste sich die globale Kapazität der Kernkraftwerke bis 2050 auf 1 Terawatt verdreifachen.
- Die Abscheidung und Speicherung bzw. Nutzung von CO<sub>2</sub> in der Stromerzeugung und bei Industrieprozessen wird ebenfalls ein höherer Stellenwert beigemessen als in den exploratorischen Szenarien. So beziffert etwa TotalEnergies im Szenario *Rupture* die 2050 abzuschheidende Menge an CO<sub>2</sub> auf 6,1 Milliarden Tonnen. Das ist die gleiche Größenordnung, die Equinor im Szenario *Bridges* oder BP im Szenario *Net Zero* mit 6,8 Milliarden Tonnen ausweist. BloombergNEF kommt sogar auf 8 Milliarden Tonnen. CCUS wird nicht als Alternative zum massiven Ausbau erneuerbarer Energien gesehen sondern als unverzichtbare Ergänzung.

- Die weltweite Produktion an Wasserstoff müsste sehr stark an Fahrt aufnehmen. „Sauberer“ Wasserstoff kommt vermehrt in den Bereichen zum Einsatz, die sich durch Strom nur schwer dekarbonisieren lassen. Das sind bestimmte industrielle Prozesse, der Schwerlastverkehr auf der Straße sowie die Schifffahrt und der Luftverkehr. Die weltweite Produktion von *Low-emissions hydrogen* wird beispielsweise von TotalEnergies im Szenario *Rupture* für 2050 auf 375 Millionen Tonnen beziffert, davon 71% mittels Elektrolyse hergestellt, also „grüner“ Wasserstoff und 29% „blauer“ Wasserstoff. BloombergNEF hat für das *Net Zero Scenario* 390 Millionen Tonnen „sauberen“ Wasserstoff im Jahr 2050 ermittelt, vier Mal so viel wie heute auf Basis fossiler Energien erzeugt wird.

Ein wesentlicher Faktor für diese top-down erzielten Ergebnisse ist der in den normativen Szenarien im Vergleich zu den exploratorischen Szenarien angesetzte deutlich höhere CO<sub>2</sub>-Preis. So geht etwa WoodMackenzie davon aus, dass zur Einhaltung des

1,5°C-Ziels ein globaler CO<sub>2</sub>-Preis von 157 US\$/t notwendig wäre. McKinsey nennt eine Spanne von 150 bis 225 US\$/t, und die IEA beziffert die 2050 notwendigen CO<sub>2</sub>-Preise – nach Weltregionen differenziert – zwischen 180 und 250 US\$/t (jeweils im Geldwert des Jahres 2023 gerechnet).

Die Transformation der Energieversorgung, insbesondere bei Verfolgung des 1,5°C-Pfades, führt zu einem erheblichen Anstieg der Nachfrage nach kritischen Mineralien und Materialien. Diese steigende Nachfrage ergibt sich aus dem gesamten kohlenstoffarmen Energiesystem, einschließlich des Baus von Wind- und Solaranlagen, Wasserstoff- und CO<sub>2</sub>-Pipelines, neuen Speicheranlagen, dem Ausbau des Stromnetzes und der Verteilungssysteme, die zum Anschluss erneuerbarer Anlagen und zur Lieferung von Strom an den Endverbraucher verwendet werden.

Bergbau und Verarbeitung kritischer Mineralien sind geografisch konzentriert, wobei eine ausgewählte Gruppe von Ländern eine dominierende Rolle spielt. Australien (Lithium), Chile (Kupfer und Lithium), China (Graphit, Seltene Erden), die Demokratische Republik Kongo (Kobalt), Indonesien (Nickel) und Südafrika (Platin) nehmen beim Abbau kritischer Mineralien eine führende Position ein. Der Konzentrationsgrad in der Aufbereitungsphase ist deutlich höher als im Bergbau – gekennzeichnet durch eine noch dominantere Marktposition Chinas.

Die Risiken bei der Versorgung mit fossiler Energie und bei der Versorgung mit kritischen Metallen für die Energiewende sind jedoch unterschiedlich zu bewerten. Bereits errichtete Anlagen für erneuerbare Energien könnten auch bei einer Unterbrechung der Versorgung mit kritischen Rohstoffen weiter betrieben werden. Anders als bei fossilen Brennstoffen besteht das Risiko einer Unterbrechung der Versorgung mit kritischen Mineralien also nicht in einer Störung des laufenden Betriebs der bereits errichteten Anlagen. Allerdings könnte dies zu einer Verlangsamung bei der Umsetzung der Energiewende führen.

### 3.3.4 Fazit

Die Zukunft der Energieversorgung sieht deutlich anders aus als die Vergangenheit. Dies zeigen die Prognosen und Szenarien, die in den vergangenen Monaten von internationalen Institutionen vorgelegt wurden. Es vollzieht sich ein Wandel von einem durch fossile Energien geprägten Zeitalter zu einer Welt, in der die erneuerbaren Energien dominieren. Entscheidende Schlüssel für das Erreichen der Klimaziele sind die beschleunigte Verbesserung der Energieeffizienz, der massive Ausbau erneuerbarer Energien, die breite Umsetzung der Technologie der Abscheidung und Nutzung bzw. Speicherung von CO<sub>2</sub> sowie das Setzen auf Wasserstoff, und zwar in denjenigen Sektoren, die für eine Elektrifizierung nur schwer zu erschließen sind. In einer Reihe von Staaten

wird darüber hinaus der Kernenergie eine wichtige Rolle bei der Transformation der Energieversorgung beigemessen. Wie schnell und wie stark sich dieser Wandel vollzieht, hängt von Faktoren ab, wie die energie- und klimapolitische Ausrichtung der Regierungen, die technologische Entwicklung und das Verbraucherverhalten.

## 4 Schlussfolgerungen

Entscheidender Ausgangspunkt für die Bemühungen der Staatengemeinschaft zum Schutz des Klimas war die im Jahr 1992 bei der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro beschlossene Klimarahmenkonvention (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Seit der ersten Vertragsstaatenkonferenz (Conference of Parties – COP) zur Klimarahmenkonvention im Jahr 1995 in Berlin (COP 1) finden in der Regel jährlich Folgetreffen der Weltgemeinschaft statt, zuletzt die COP 29 in Baku (Aserbaidschan). Zu den wichtigsten bisherigen Meilensteinen in diesem Prozess gehört die Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 (COP 21). Im Rahmen des dort erzielten Übereinkommens, das im November 2016 in Kraft getreten war, verpflichteten sich die beigetretenen Staaten, die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst jedoch auf 1,5°C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Um diesem Ziel gerecht zu werden, sind Nationally Determined Contributions (NDCs) von den Vertragsstaaten zur Registrierung beim UNFCCC-Sekretariat abzugeben, die alle fünf Jahre nachzuschärfen sind. Zu den zentralen Beschlüssen der letzten beiden Konferenzen gehören die Verdreifachung der Erneuerbare-Energien-Kapazitäten zur Stromerzeugung und die Verdoppelung der Energieeffizienz bis 2030 sowie die Abkehr von fossilen Energien (COP 28 in Dubai) und die Verdreifachung der öffentlichen Finanzierung von Klimaschutz-Maßnahmen zugunsten der Entwicklungsländer von zuvor vereinbarten 100 Milliarden US-Dollar pro Jahr auf 300 Milliarden US\$/Jahr bis 2035 (COP 29 in Baku). Neben diesem New Collective Quantified Goal on Climate Finance (NCQG) wurde eine Vereinbarung zur Schaffung von Kohlenstoffmärkten erzielt. Dieses Instrument soll dabei helfen, die globalen Treibhausgas-Emissionen innerhalb dieser Dekade zu halbieren. In künftigen Konferenzen – die COP 30 findet vom 10. bis 21. November 2025 in Belém (Brasilien) statt – sollten sich die internationalen Klima-Verhandlungen unter Verstärkung der internationalen Zusammenarbeit anders als bisher auf eine weltweit möglichst weitgehend harmonisierte Bepreisung von CO<sub>2</sub> fokussieren, statt um Formulierungen zur Begrenzung des Verbrauchs an fossilen Energien zu ringen. Dies gehört zu den entscheidenden Schlüsseln für die angestrebte Senkung der Treibhausgas-Emissionen.

## Referenzen

- [1] International Energy Agency (2024). World Energy Outlook 2024 (WEO 2024). Paris, Oktober 2024.
- [2] International Renewable Energy Agency (2024). World Energy Transitions Outlook 2024. Abu Dhabi, November 2024.
- [3] U.S. Energy Information Administration (2023). International Energy Outlook 2023 (IEO 2023). Washington DC, Oktober 2023.
- [4] BP (2024). Energy Outlook: 2024 edition. London, Juli 2024.
- [5] Equinor (2024). Energy Perspectives 2024. Oslo, Juni 2024.
- [6] ExxonMobil (2024). ExxonMobil Global Outlook: Our View to 2050. Irving (Texas), August 2024.
- [7] TotalEnergies (2024). Energy Outlook 2024. Paris, November 2024.
- [8] Shell (2023). The Energy Security Scenarios. London, März 2023.
- [9] DNV (2024). Energy Transition Outlook 2024 (ETO 2024). Oslo, Oktober 2024.
- [10] McKinsey & Company (2024). Global Energy Perspective 2024. New York, September 2024.
- [11] Wood Mackenzie (2024). Energy Transition Outlook 2024-25 Update. London, November 2024.
- [12] BloombergNEF (2024). New Energy Outlook 2024. New York, Mai 2024.
- [13] Enerdata (2024). Global Energy Scenarios through 2050. Grenoble, Juni 2024.
- [14] World Energy Council (2024). World Energy Scenario Foundations 2024. London, April 2024 sowie Schiffer, Hans-Wilhelm und Ulreich, Stefan (2024). 26. World Energy Congress – Schlüsselbotschaften und Ergebnisse neuer globaler Energieszenarien. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen (2024). Heft 5-6, Juni 2024.
- [15] The Institute of Energy Economics, Japan (2024). IEEJ Outlook 2025, Tokyo, November 2024.
- [16] UNFCCC (2024). COP29 UN Climate Conference Agrees to Triple Finance to Developing Countries, Protecting Lives and Livelihoods. Baku, 24. November 2024.

## Abstract

Forecasts and scenarios for global energy supply until 2050 – synopsis of the approaches and results of studies published in 2024

*Various institutions regularly publish studies on the prospects for global energy supply. These include government-backed international organizations, energy companies, consulting firms and scientific institutes. When it comes to the future paths presented, a distinction must be made between forecasts and scenarios. The different methodological approaches used are outlined and the used approaches are categorized. Against the background of developments over the past decades, the quantitative results achieved in the studies on the development of primary energy consumption and electricity generation up to 2050 – differentiated according to energy sources – are presented. This is done by explaining existing similarities and differences. In a conclusion, messages are drawn that can be derived from the analyzes – especially with a view to compliance with the climate goals.*

# vgbe Congress 2025

24 and 25 September 2025,  
Vienna, Austria

The transformation of the energy sector is an ambitious undertaking, and the challenges are enormous. Not only is there a single goal to pursue and achieve – climate neutrality of energy supply – but security of supply, affordability and financial viability, as well as grid stability, must also be reconciled, and sectors must act holistically across the board. In addition, current developments are raising new issues that also aim at a resilient energy system. The vgbe Congress 2025 will focus on the technical, structural and geopolitical solutions and aspects that can be used by the energy industry, politics, business and science to jointly implement the transformation.

The programme for the two days of the «vgbe Congress 2025» in Vienna with the plenary session and technical sessions will focus on the following topics:

- Security of supply: options for flexibility and dispatchable generation
- Current projects: hydrogen, ammonia and CCUS
- Projects and operational experience: renewables, dispatchable generation and energy storage
- Existing plants: optimisation, hybridisation and repurposing
- Innovations: future technologies for the energy sector

Present your innovative approaches, solutions and practises at the «vgbe Congress 2025», the platform for exchange of experiences for the technical aspects of the energy system of the future.

Please submit your **presentation proposals** with an abstract online by **28 February 2025** at:

[https://www.vgbe.energy/en/mform/?form\\_id=993066](https://www.vgbe.energy/en/mform/?form_id=993066)

The conference languages are German and English. Simultaneous translation will be provided. Selected papers will also be published in the **vgbe energy journal**, thus reaching an even wider audience.

In the accompanying **foyer exhibition**, operators, manufacturers and service providers will have the opportunity to maintain and further develop their industry network. Please contact us! The submission of a presentation is independent of participation in the exhibition.



SCAN ME ▶ vgbe Congress 2025



vgbe YouTube Channel ◀ SCAN ME



## CALL FOR PAPERS

### CONTACTS

#### Conference

Ms Angela Langen

t +49 201 8128-310

Ms Ines Moors

t +49 201 8128-222

e [vgbe-congress@vgbe.energy](mailto:vgbe-congress@vgbe.energy)

#### Foyer exhibition

Ms Angela Langen

t +49 201 8128-310

e [angela.langen@vgbe.energy](mailto:angela.langen@vgbe.energy)



vgbe energy e.V.  
Deilbachtal 173  
45257 Essen | Germany

vgbe energy service GmbH  
Deilbachtal 173  
45257 Essen | Germany

be informed [www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy)

# vgbe Congress 2025

24. und 25. September 2025,  
Wien, Österreich

Die Transformation des Energiesektors ist ein ambitioniertes Vorhaben mit enormen Herausforderungen. Es gilt nicht nur ein einziges Ziel zu verfolgen und zu erreichen, die Klimaneutralität der Energieversorgung, sondern auch Versorgungssicherheit, Finanzer- und Bezahlbarkeit sowie Netzstabilität in diesem Prozess in Einklang zu bringen sowie Sektoren übergreifend ganzheitlich zu agieren. Zudem werfen aktuelle Entwicklungen neue Fragen auf, die auf ein auch resilientes Energiesystem zielen.

Beim „vgbe Congress 2025“ stehen dafür technische, strukturelle und geopolitische Lösungen und Aspekte im Mittelpunkt, mit denen die Energiebranche, Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gemeinsam die Transformation umsetzen können.

Folgende Themen stehen im Fokus von Plenarveranstaltung und Fachsektionen des zweitägigen »vgbe Congress 2025« in Wien:

- ▼ Versorgungssicherheit: Optionen für Flexibilität und Gesicherte Leistung
- ▼ Aktuelle Projekte: Wasserstoff, Ammoniak und CCUS
- ▼ Projekte und Betriebserfahrungen: Erneuerbare Energien, Disponible Erzeugung und Energiespeicher
- ▼ Bestandsanlagen: Optimierung, Hybridisierung und Nachnutzung
- ▼ Innovationen: Zukunftstechnologien für den Energiesektor

Präsentieren Sie mit Ihrem Beitrag innovative Ansätze, Lösungen und Erkenntnisse auf dem »vgbe Congress 2025«, der Plattform zum Erfahrungsaustausch für die technischen Aspekte des Energiesystems der Zukunft.

➔ Bitte reichen Sie Ihre **Vortragsvorschläge** mit einem Abstract online bis zum **28. Februar 2025** ein:

[https://www.vgbe.energy/mform/?form\\_id=993066](https://www.vgbe.energy/mform/?form_id=993066)

Die Konferenzsprachen sind Deutsch und Englisch. Eine Simultanübersetzung ist vorgesehen. Ausgewählte Vorträge werden zudem in der Fachzeitschrift **vgbe energy journal** veröffentlicht, womit Sie ein noch breiteres Publikum erreichen.

 In der begleitenden **Foyerausstellung** können Betreiber, Hersteller und Dienstleister ihr Branchennetzwerk pflegen und weiterentwickeln. Sprechen Sie uns dazu an. Die Einreichung eines Vortrages ist unabhängig von einer Teilnahme an der Ausstellung.



## CALL FOR PAPERS

### KONTAKTE

#### Tagung

Angela Langen  
t +49 201 8128-310  
Ines Moors  
t +49 201 8128-222  
e [vgbe-congress@vgbe.energy](mailto:vgbe-congress@vgbe.energy)

#### Foyerausstellung

Angela Langen  
t +49 201 8128-310  
e [angela.langen@vgbe.energy](mailto:angela.langen@vgbe.energy)



vgbe energy e. V.  
Deilbachtal 173  
45257 Essen | Deutschland

vgbe energy service GmbH  
Deilbachtal 173  
45257 Essen | Deutschland

be informed [www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy)



SCAN ME ▶ [vgbe Congress 2025](https://www.vgbe.energy)



vgbe YouTube Channel ◀ SCAN ME

## vgbe Events 2024 | Please visit our website for updates!

### Congress/Kongress

vgbe | Congress 2024  
vgbe | Kongress 2024



#### Call for Papers!



11 & 12 September 2024  
Potsdam, Germany

#### Contact

Ines Moors  
t +49 201 8128-222  
Angela Langen  
t +49 201 8128-310  
e vgbe-congress@vgbe.energy

vgbe/VEÖ Expert Event  
River Management and Ecology



21 and 22 May 2024  
Salzburg, Austria

#### Contact

Eva Silberer  
t +49 201 8128-202  
e eva.silberer@vgbe.energy

### Konferenzen | Fachtagungen

DIHKW 2024  
Energieversorgung Deutschlands –  
Chancen und Risiken



Fachtagung mit Fachausstellung  
16. und 17. April 2024  
Garmisch-Partenkirchen, Deutschland

#### Contact

Jennifer Kulinna  
t +49 201 8128-206  
e vgbe-dihkw@vgbe.energy

vgbe KELI 2024  
Elektro-, Leit- und Informations-  
technik in der Energieversorgung



mit Fachausstellung

14 to 16 May 2024  
Bonn, Germany

#### Contact

Ulrike Troglio  
t +49 201 8128-282  
e vgbe-keli@vgbe.energy

vgbe Dampfturbinen  
und Dampfturbinenbetrieb 2024  
vgbe Steam Turbines and  
Operation of Steam Turbines 2024



mit Fachausstellung/  
with Technical Exhibition

28 and 29 May 2024  
Würzburg, Germany

#### Contact

Diana Ringhoff  
t +49 201 8128-232  
e vgbe-dampfturb@vgbe.energy

vgbe Chemiekonferenz 2024  
vgbe Conference Chemistry 2024



mit Fachausstellung/  
with Technical Exhibition

22 to 24 October 2024  
Potsdam, Germany

#### Contact

Ines Moors  
t +49 201 8128-222  
e vgbe-chemie@vgbe.energy

### Seminare | Workshops

Basics Wasserchemie  
im Kraftwerk



vgbe | Online-Seminar  
21. und 22. Februar 2024

#### Contact

Eugenia Hartmann  
t +49 201 8128-266  
e vgbe-wasserdampf@vgbe.energy

Wasseraufbereitung  
vgbe | Seminar



20. und 21. März 2024  
Velbert, Deutschland

#### Contact

Eugenia Hartmann  
t +49 201 8128-266  
e vgbe-wasseraufb@vgbe.energy

Flue Gas Cleaning 2024



Workshop

22 and 23 May 2024  
Frankfurt a.M., Germany

#### Contact

Ines Moors  
t +49 201 8128-222  
e vgbe-flue-gas@vgbe.energy

Chemie im  
Wasser-Dampf-Kreislauf



vgbe | Seminar  
13. und 14. November 2024

#### Contact

Eugenia Hartmann  
t +49 201 8128-266  
e vgbe-wasserdampf@vgbe.energy

Offshore Windenergieanlagen –  
Arbeitsmedizin 2024



Fortbildungsveranstaltung  
6. und 7. September 2024  
Emden, Deutschland

#### Contact

Dr. Gregor Lipinski  
t: +49 201 8128 272  
t +49 201 8128-272  
e gregor.lipinski@vgbe.energy

Immissionsschutz- und  
Störfallbeauftragte 2024



Fortbildungsveranstaltung  
26. bis 28. November 2024  
Höhr-Grenzhausen, Deutschland

#### Contact

Stephanie Wilmsen  
t +49 201 8128-244  
e vgbe-immission@vgbe.energy

Information on all  
events with exhibition  
Auskunft zu allen  
Veranstaltungen  
mit Fachausstellung

t +49 201 8128-310/-299  
e events@vgbe.energy

Updates [www.vgbe.energy](http://www.vgbe.energy)

## Exhibitions and Conferences

### E-world energy & water

20. bis 24. Februar 2024  
Essen, Deutschland

[www.e-world-essen.com](http://www.e-world-essen.com)

### Enlit Europe 2024

22 to 24 October 2024  
Milan, Italy

[www.enlit-europe.com/](http://www.enlit-europe.com/)

### 56. Kraftwerkstechnisches Kolloquium

8. und 9. Oktober 2024  
Dresden, Deutschland

<https://t1p.de/tud-kwt> (Kurzlink)