

Global Energy Solutions e.V.
For Prosperity and Climate Neutrality

Energietransport ist Grundlage für Wohlstand

Simon Göß, Tobias Orthen

30. Dezember 2022

Energie wird nicht immer dort eingesetzt, wo sie auch gewonnen werden kann. Historisch gesehen hat man große Energieverbraucher in unmittelbarer Nähe zur Energiequelle gebaut: Beispiele dafür sind Mühlen in Regionen mit Wind, Werkstätten am Rande der Flüsse, um die Wasserkraft zu nutzen, aber auch die großen Stahl- und Chemiekonzerne finden sich in der Nähe ehemaliger reichhaltiger Kohlevorkommen wie dem Ruhrgebiet. Mit der Erschließung immer größerer Energieressourcen wie der Erdöl- oder Gasfelder, einer erhöhten Effizienz bei der Energieförderung und einer globalisierten Ökonomie wird Energie in immer größeren Mengen auch über weite Distanzen transportiert. Dies ist insbesondere bei der Erschließung neuer Energiequellen wichtig, die nicht immer dort in geeignetem Umfang zu finden sind, wie es frühere Energiequellen waren. Im Ruhrgebiet gab es viel Kohle und dort waren die großen Industrien. Nach deren Erschöpfung mussten Gas und Öl importiert werden. Am Beispiel West- und Mitteleuropas aber auch Japans sieht man, wie wichtig der Energietransport ist. Beide Regionen verfügen selbst über wenige Energieressourcen, gehören aber wirtschaftlich zu den stärksten Regionen der Welt. Beim schrittweisen Umstieg unserer Energieversorgung auf erneuerbare Energien wie Sonne und Wind stehen wir nun wieder vor der Herausforderung, potentielle Energiequellen und Energieverbraucher über geeignete Transportwege zu verbinden.

Energie kann in verschiedenen Formen transportiert werden: ob über Elektronen und damit über das Stromnetz oder in Molekülform und damit in Pipelines oder in Tanks per Zug oder Schiff (Kohle, Erdgas, Öl und Wasserstoff). In jedem Fall sind Infrastrukturen notwendig, um die Energie vom Erzeugungs- zum Verbrauchsort zu bringen. Die Art der am besten geeigneten Infrastruktur hängt dabei stark von lokalen, nationalen oder regionalen Gegebenheiten ab, wie z.B. von der Art der Energieverbraucher, Distanz des Energietransports, Geographie des Transportweges, Bestand von Transportinfrastruktur oder Endverbrauchstechnologien. Infrastruktur konkurriert außerdem um Fläche, die andernfalls z. B. für neue Siedlungsgebiete genutzt werden könnte. Das ist vorrangig in Regionen hoher Bevölkerungsdichte wichtig. Da es mit verstärktem Einsatz erneuerbarer Energien zu den existierenden Infrastrukturen außerdem neuer Transportwege aber auch anderer Arten des Transports bedarf, sind Interessenskonflikte mit Parteien zu erwarten, die sich durch die neue

Infrastruktur beeinträchtigt fühlen, weil z. B. eine neue Stromtrasse oder eine Pipeline für Wasserstoff über ihr oder in unmittelbarer Nähe zu ihrem Grundstück verlaufen solle.

Die Infrastrukturentwicklung zum Transport und zur Verteilung der Energie steht dabei vor zwei Herausforderungen: Einerseits wird die Energienachfrage im Zuge wachsenden Wohlstands zunehmen. Vor allem in Ländern mit mittleren Einkommen erfordert das einen enormen Aus- und Umbau. Je geringer das Nationaleinkommen und je höher das Bevölkerungswachstum, desto höher ist der Bedarf an geeigneten Kapazitäten für die Energieerzeugung und an Infrastruktur für deren Transport. Andererseits stehen die Länder mit hohen Einkommen vor einem Umbau ihrer Infrastruktur, um vermehrt erneuerbare Energien in ihren Strommix zu integrieren und den Anforderungen an Klimaneutralität gerecht zu werden. Aufbau und Umbau sind natürlich mit Kosten verbunden, stellen aber auch organisatorische Herausforderungen dar, weil ein hohes Maß an Kooperation zwischen den Staaten erforderlich ist, um Kosteneffizienz bei gleichzeitig ausreichender Versorgung sicherzustellen. Im Rahmen der europäischen Strom- und Gasverbundnetze wird dies bereits realisiert. Allerdings ist auch ein hohes Maß an internationaler Kooperation gefordert, weil das technische und organisatorische Wissen über komplexe Infrastrukturen häufig in reicheren Staaten vorhanden ist und auch in anderen Staaten möglichst schnell zum Einsatz kommen muss, um perspektivisch Klimaneutralität bei gleichzeitig ausreichender Energieversorgung realisieren zu können.

Um das Energiesystem schrittweise klimaneutral zu stellen, wird vermehrt auch CO₂ am Ort seiner Entstehung abgefangen werden müssen (Carbon Capture). Dies z. B. an existierenden Kohle- und Gaskraftwerken, aber auch an Industrieanlagen wie bei der Zementproduktion. Dieses CO₂ muss in der Folge über Pipelines oder Tanker dorthin transportiert werden, wo es für nachgelagerte industrielle Prozesse verwendet werden kann (Carbon Capture and Usage, CCU) oder aber letztlich verpresst wird (Carbon Capture and Storage). In einem klimaneutralen Energiesystem ist die CO₂-Infrastruktur daher ein wichtiger zusätzlicher Bestandteil, der heute so noch nicht verfügbar ist.

Darüber hinaus ist die globale (Energie-) Infrastruktur, wie auch der restliche Teil der Infrastruktur, durch die physikalischen Auswirkungen des Klimawandels gefährdet. Die Internationale Energieagentur (IEA) schätzt in diesem Zusammenhang, dass ein Viertel der weltweiten Transport- und Verteilungswege für Elektrizität durch Zykone beeinträchtigt sein werden, weswegen Infrastrukturen insgesamt resilienter gebaut werden müssen, um unter verschärften Umweltbedingungen bestehen zu können.

Eigenschaften und Skalierung von Infrastrukturen zum Transport von Energie

In einem klimaneutralen Energiesystem wird ein höherer Anteil des Endenergieverbrauchs über Strom gedeckt, da die Effizienz strombasierter Verbraucher in den meisten Anwendungsfällen höher ist als die von Verbrauchern auf Basis von Verbrennungsprozessen. Der Ausbau der Stromnetzinfrastruktur ist in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern eine vorrangige Aufgabe, um Verbraucher mit dem sicheren, sauberen und vielseitig einsetzbaren Energieträger Strom zu versorgen. Jedoch werden nicht alle Verbraucher mit Strom beliefert werden können. Außerdem verliert das Argument der höheren Effizienz sein Gewicht, wenn nicht nur die einzelnen Anwender, sondern das gesamte Strom- und Energiesystem betrachtet wird, denn es braucht aufwendige Maßnahmen, um mit der Volatilität der erneuerbaren Energien umgehen zu können. Dazu zählt das Management von Über- und Unterkapazitäten, wenn zu viel bzw. zu wenig Wind- und Sonnenenergie erzeugt werden kann, als aktuell nachgefragt wird. Außerdem sind molekülbasierte Energieträger vorteilhaft für den Energietransport über lange Distanzen und deren Speicherung, vor allem über längere Zeiträume. Manche Anwendungen im Industrie- und Transportbereich lassen sich schwer elektrifizieren, z. B. die Stahlherstellung oder der Flugverkehr. Daher wird auch in einem klimaneutralen System Energie in Form von Molekülen transportiert und verbraucht werden.

Besonders relevant werden Energieträger in Form von Molekülen bei überregionalem und interkontinentalem Transport. Dieser erlaubt die Verbindung von Regionen mit kostengünstiger Erzeugung erneuerbarer

Energien mit den Regionen der Welt, in welchen große Mengen an Energie genutzt werden und / oder weniger Potential für erneuerbare Energien vorhanden ist. Beides trifft z. B. auf Europa zu. Der Erzeugung und dem Transport von Wasserstoff und seinen Derivaten wird dabei ein besonderer Stellenwert eingeräumt. Sogenannter grüner Wasserstoff wird mithilfe erneuerbarer Energie hergestellt, indem man Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt (Elektrolyse). Unter Umständen muss das Wasser vorher entsalzt, in jedem Fall jedoch gereinigt werden.

Die Transportmöglichkeiten von reinem Wasserstoff unterliegen unterschiedlichen technisch-ökonomischen Randbedingungen, insbesondere bezüglich Transportdistanz, Projektgröße/ Transportmenge, bestehender Infrastruktur und anschließender Verwendung. Bis zu einer Entfernung von etwa 4.000 km ist der gasförmige Transport über Pipelines wirtschaftlicher als über verflüssigte Wasserstoffderivate über den Seeweg. Bei Entfernungen über 4.000 km wird der Transport von Wasserstoff mithilfe von Schiffen ökonomisch sinnvoll. Allerdings nur dann, wenn man ihn vorher in komplexere Moleküle wie Ammoniak (durch Zugabe von Stickstoff) oder in Methanol (durch Zugabe von CO_2) umwandelt. Jedoch gibt es keinen klaren Favoriten für den Transport von Energie in Molekülform über weite Distanzen (vergleiche Abbildung 1). Je nach Bedingungen im Export- und Importland und Anwendungszweck des Energieträgers werden sich voraussichtlich unterschiedliche Transportmodalitäten entwickeln. Das liegt daran, dass für jeden Umwandlungsprozess zusätzliche Energie aufgebracht werden muss. Beim Ammoniak liegt der große Aufwand bei der Rückumwandlung in Wasserstoff (nach dem Transport), beim Methanol hingegen bei dessen Herstellung (vor dem Transport).

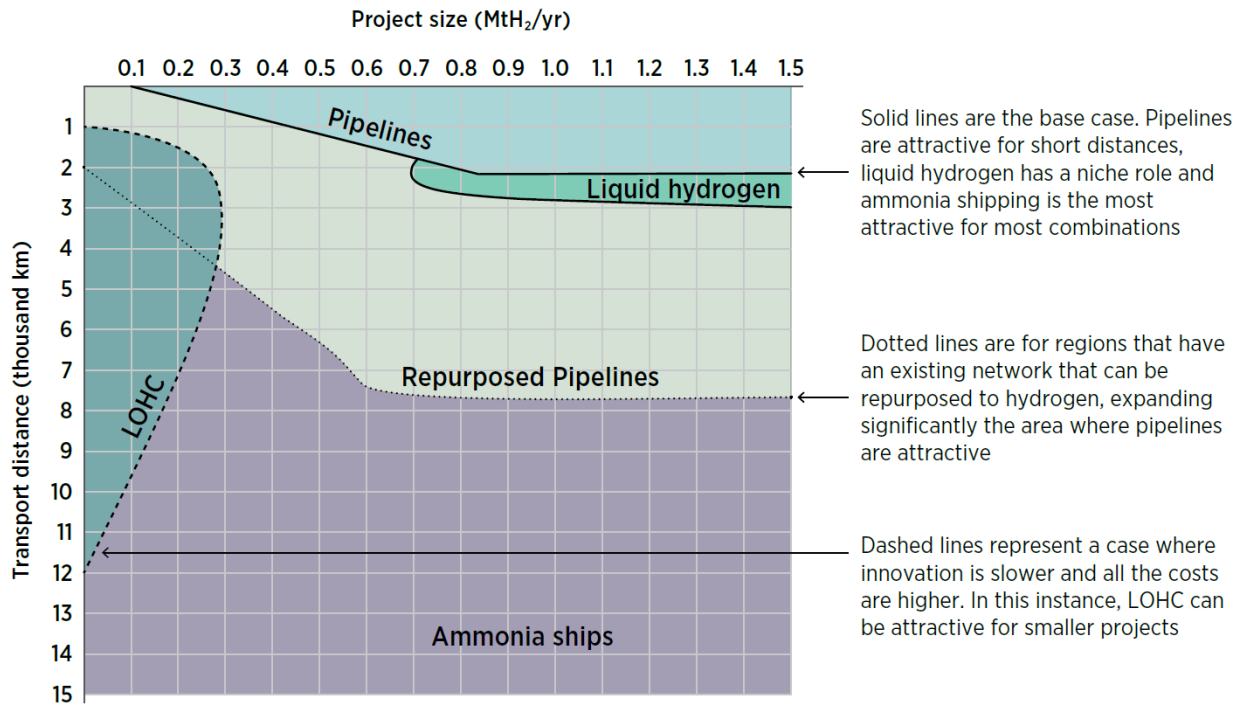


Abbildung 1: Kosteneffektive Wasserstoff-Transportwege in 2050 in Abhängigkeit von Entfernung sowie Projekt- und Transportmenge¹

Insgesamt muss Energietransportinfrastrukturen für ein klimaneutrales Energiesystem stark skaliert werden. Aufgrund der enormen Energiemengen und der großen Distanz zwischen Orten geeigneter Energieerzeugung und Energieverbrauchs, muss der internationale Transport klimaneutrale Moleküle sowie CO₂ in großem Maßstab bewegen. Daher wird insgesamt eine Skalierung der bestehenden Transportinfrastruktur um ein Vielfaches der heutigen Kapazitäten benötigt (vgl. Tabelle 1). Auch der Umbau bestehender Transport- und Speicherinfrastrukturen für Erdgas nimmt eine wichtige Rolle ein, da die Transformationskosten dadurch erheblich gesenkt werden können.

¹ Diese IRENA-Studie schließt Methanol und andere kohlenstoffhaltige Wasserstoffträger aus, da nur nachhaltig erzeugtes CO₂ (biogen oder direkt aus der Luft) als erneuerbar angesehen werden kann. Laut IRENA wiegen die Kostenvorteile für den Transport von Wasserstoff über kohlenstoffhaltige Träger diesen Nachteil nicht auf. Ist eine klimaneutrale Herstellung und Nutzung von Methanol allerdings möglich, so ist der interkontinentale Transport von Methanol über bestehende Infrastrukturen, insbesondere angelehnt an den Transport von flüssigen Chemikalien und Öl, vergleichbar attraktiv wie über Ammoniak.

Tabelle 1: Skalierung von Energieinfrastrukturen und wichtige Randbedingungen

Energietransportinfrastruktur	Nötige Skalierung	Randbedingungen
Stromnetz	Faktor 2-5	Auf- und Ausbau generell nötig in Schwellen- und Entwicklungsländern, abhängig vom Grad der Elektrifizierung und Region
Gasnetz und -speicher	Nicht eindeutig, vor allem Umrüstung bestehender Infrastruktur	Abhängig von nationalen Bedingungen und Grad der Elektrifizierung, mögliche Weiternutzung für klimaneutrale Energieträger nach Umbau
Flüssiger Wasserstoff	Vollständiger Aufbau	Stark abhängig von Anwendung und Kostenentwicklung anderer Wasserstoffderivate
LOHCs	Vollständiger Aufbau	Stark abhängig von Anwendung und Kostenentwicklung anderer Wasserstoffderivate
Ammoniak	Faktor 50	Erfahrung und Anwendungen existieren, abhängig von Kostenentwicklung anderer Wasserstoffderivate

Methanol	Faktor 50	Erfahrung und Anwendungen existieren, abhängig von Kostenentwicklung anderer Wasserstoffderivate
CO2 für CCS	Faktor 150	Regional starke Unterschiede bzgl. Aufkommen und Abscheidungspotentialen von CO2, stark abhängig von Kosten und lokaler Akzeptanz

Lokale Konditionen beeinflussen Prioritäten der Infrastrukturentwicklung

Verschiedene Länder und Regionen sind sehr unterschiedlich in Bezug auf den wirtschaftlichen Entwicklungsstand. Das betrifft politische Systeme, technologische Kapazitäten, bestehende und geplante Energieinfrastrukturen und auch fossile und erneuerbare Energiequellen. Allgemeingültige Vorschläge, welche Energieinfrastrukturen für welche Länder und Regionen den „besten“ Weg zur Klimaneutralität weisen, sind daher kaum zu geben. Detaillierte nationale oder regionale Analysen sind erforderlich. Dennoch ist es möglich, einzelne Ländern nach bestimmten Bedingungen zu klassifizieren. Dies ermöglicht eine erste Einschätzung für eine sinnvolle und realistische Entwicklung der regionalen und lokalen Energieinfrastrukturen. Dazu können Länder oder Regionen in drei charakteristische Gruppen eingeteilt werden.²

1. Hoher Grad an Industrialisierung, gut ausgebaute Energieinfrastruktur
2. Geringer Grad an Industrialisierung und wenig Energieinfrastruktur
3. Exporteure (fossiler) flüssiger und gasförmiger Energieträger

² Dies geschieht in Anlehnung an die Klassifizierung unterschiedlicher Länder bezüglich der Entwicklung ihrer Kohlewirtschaft in Jakob, M./Steckel, J.C. 2022.

Außerdem ist das erwartete Bevölkerungswachstum zu berücksichtigen, wobei häufig Staaten der Gruppe 2 ein hohes Bevölkerungswachstum haben. Diese Gruppen sind weder exklusiv noch homogen. So fallen einige Länder oder Regionen zu gewissem Grad in mehrere Kategorien. Der Ausbau von Strominfrastruktur ist in vielen Ländern auch ohne den Treiber Klimaneutralität eine Priorität. Jedoch divergieren andere Infrastrukturmaßnahmen, je nach Gruppe und Ausprägung des Potenzials für erneuerbare Energien. Die Zusammenschau in Tabelle 2 zeigt grundlegende Prioritäten bei Aufbau neuer und Umbau bestehender Infrastrukturen und kann als Anhaltspunkt für Rahmenbedingungen im Bereich der Energieinfrastrukturen dienen. Der Komplexität eines speziellen Falles, Landes oder Region kann sie nur bedingt gerecht werden.

Tabelle 2: Infrastrukturentwicklung nach Gruppe und Potenzial für erneuerbare Energien

	Hohes Potenzial für Erneuerbare	Geringes Potenzial für Erneuerbare
Gruppe 1 (Industrie- und industrielle Schwellenländer)	1. Ausbau Strominfrastruktur 2. Umstellung und Umbau bestehender Infrastruktur auf klimaneutrale Moleküle 3. Geringe Importkapazitäten nötig	1. Aufbau und Umbau bestehender Importkapazitäten 2. Ausbau Strominfrastruktur 3. Umbau und Ausbau bestehender Infrastruktur für Moleküle
Gruppe 2 (Entwicklungsland)	1. Ausbau Strominfrastruktur 2. Aufbau Exportkapazitäten für klimaneutrale Moleküle 3. nach internem Verbrauch und Speicherbedarf	1. Ausbau Strominfrastruktur 2. Aufbau Importkapazitäten für klimaneutrale Moleküle 3. nach internem Verbrauch und Speicherbedarf

Gruppe 3 (Fossile Exporteure)	1. Umbau bestehender Infrastrukturen für Export klimaneutraler Moleküle und für Verbrauch	1. Umbau bestehender Infrastrukturen für Import klimaneutraler Moleküle und Verbrauch
	2. Ausbau Strominfrastruktur	2. Ausbau Strominfrastruktur

Investitionsbedarf für ein klimaneutrales Energiesystem

Im Jahr 2019 lagen die weltweiten Investitionen in das Energiesystem bei über 1.900 Mrd. USD.³ Abbildung 2 zeigt die Aufteilung nach Sektoren. Über die Hälfte der heutigen Investitionen im Energiesektor fallen noch immer auf fossile Energieträger und -infrastrukturen.

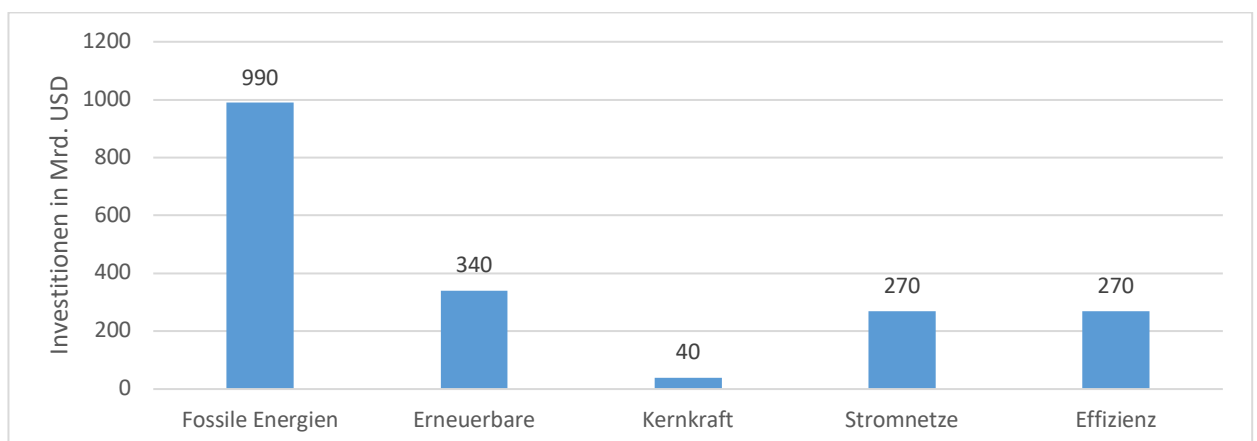


Abbildung 2: Weltweite Investitionen im Energiesektor in 2019⁴

Für den Aufbau eines klimaneutralen Energiesystems müssen die jährlichen Investitionen in den Energiesektor im Vergleich zu heute auf drei bis sechs Milliarden USD verdoppelt bis verdreifacht werden. Der Investitionsbedarf für Energietransportinfrastrukturen für ein klimaneutrales Energiesystem macht in vielen Modellen und Szenarien etwa 30 % der Gesamtinvestitionen aus. Der Abzug und die Umleitung von Kapital, welches heute in die Förderung fossiler Energieträger geht, ist dabei

³ IPCC 2022.

⁴ IPCC 2022.

essenziell und kann etwa 20 % des gesamten Finanzierungsbedarfs decken (vergleiche Abbildung 3).

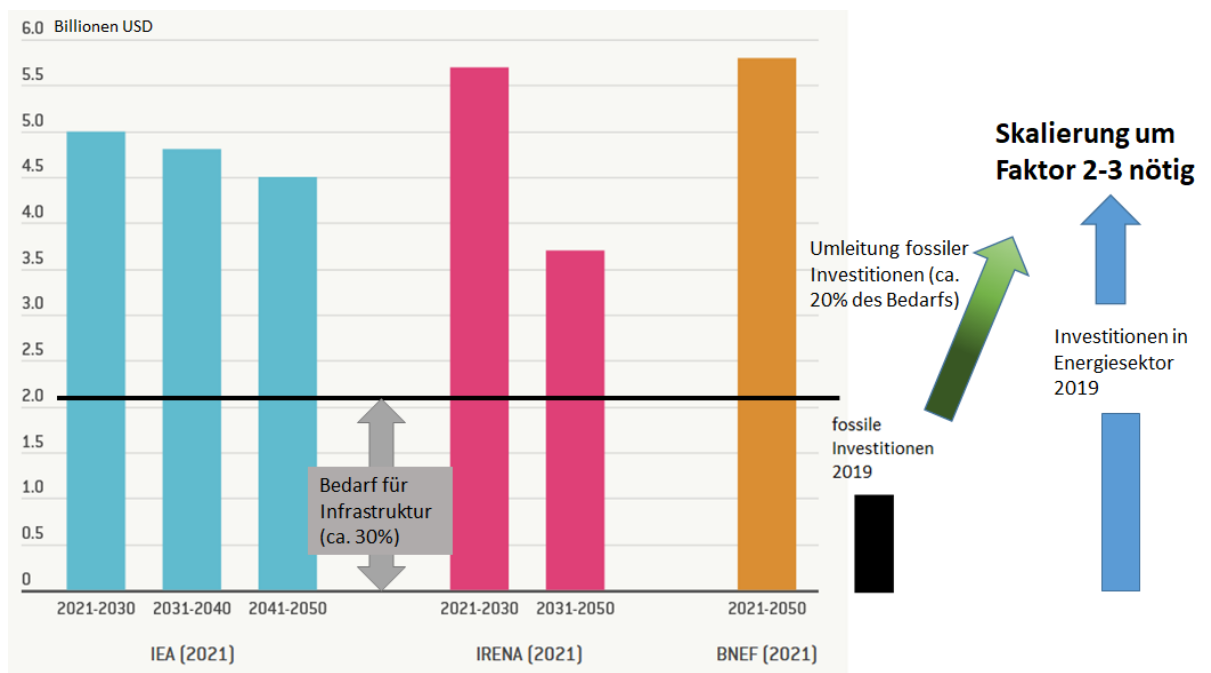


Abbildung 3: Weltweit jährlich benötigte Investitionen für ein klimaneutrales Energiesystem (angepasst durch Autor)⁵

Die erfolgreiche Umsetzung der Finanzierung bedarf der verstärkten Einbindung privaten Kapitals aus dem Bereich institutioneller Investoren als auch der Verbesserung von Finanzierungsbedingungen durch multilaterale Entwicklungsbanken und spezielle Finanzierungsfazilitäten. Wichtige Akteure bei Umsetzung von Projekten im Bereich Energietransportinfrastrukturen sind staatliche Unternehmen (state owned enterprises – SOEs) im Energiesektor. Die Aktivitäten von SOEs müssen im Zuge der Transformation des globalen Energiesystemen stärker Beachtung finden und am Ziel der Klimaneutralität ausgerichtet werden.

Relevanz für Entwicklungszusammenarbeit

Die Verfügbarkeit von Energie ist eine zentrale Voraussetzung für die Realisierung eines hohen Lebensstandards, wie er für einige Länder bereits existiert und für viele Länder in der Zukunft realisiert werden soll. Im

⁵ Bruegel 2021 (online, URL siehe Literaturverzeichnis).

Zuge der Transformation zu einem klimaneutralen Energiesystem weltweit kommt Energie(transport)infrastrukturen eine wichtige Funktion zu, vor allem deswegen, weil dieser Zeitraum für viele Staaten geringen Einkommens erst einmal den großflächigen Aufbau von Energieinfrastruktur bedeutet. Erneuerbar oder klimaneutral erzeugter Strom kann über das Stromnetz oder nach Umformung in Molekülform an lokale und regionale Verbraucher, aber auch weltweit verteilt werden. Energietransportinfrastrukturen verbinden demnach Regionen mit hohem Potenzial und damit günstiger Erzeugungsmöglichkeit für erneuerbare Energien mit Regionen hohen Verbrauchs und geringerem Erzeugungspotenzial zu höheren Kosten. Global gesehen können dabei insbesondere Schwellen- und Entwicklungsländer profitieren, die bisher nicht oder nur zu geringem Grad in die globalen und fossilen Energiewertschöpfungsketten integriert waren.

Das Potential für die Erzeugung von erneuerbaren Energien wird so zur Ressource. Große Flächen ohne große Besiedlung mit hoher Sonneneinstrahlung und / oder Windverfügbarkeit kommt in einem klimaneutralen Energiesystem die Bedeutung zu, die heute in einem fossilen Energiesystem den Öl-, Gas- und Kohlevorkommen zukommt. Staaten mit solchen Ressourcen können durch die Erschließung dieser für den Eigenverbrauch und den Export von klimaneutraler Energie wirtschaftlich relevante Sektoren entwickeln.

Allerdings ist der Aufbau von Energie(transport)infrastrukturen komplex und teuer. Daher können viele Entwicklungs- und Schwellenländer den Aufbau der Infrastruktur nur schwerlich allein stemmen. Langfristige bi- oder multilaterale Partnerschaften können hierbei eine wichtige Rolle spielen, was voraussichtlich dazu führt, dass die lokale Nutzung und der Aufbau wirtschaftlicher Kapazitäten in den Erzeugerländern zeitgleich mit dem Export erneuerbar erzeugter Energie einhergehen wird, um „Win-Win“-Situationen realisieren zu können. Dabei können Kapital und technisches Knowhow aus einem Industrieland für den Aufbau von Erzeugungs- aber auch von Transportinfrastruktur für Energie verwendet werden.

Neben der Betrachtung des technischen Potenzials für die Erzeugung klimaneutraler Energie sind Analysen des lokalen politischen,

ökonomischen sowie sozialen Kontextes notwendig, um schlussendlich zwischen der Umsetzung verschiedener Lösungen für die Ausgestaltung des jeweiligen Energiesystems, inklusive dessen Infrastruktur, abwägen zu können. Besonderes Augenmerk muss hierbei auf die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Transportmöglichkeiten von Energie über weiter Distanzen und der Integration in das bestehende Energiesystem des exportierenden Landes gelegt werden.

Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass alle beteiligten Länder profitieren und dass die relevanten Energieinfrastrukturen auch der lokalen Bevölkerung zur Verfügung stehen und nicht nur für den Export in Industrieländer aufgebaut und betrieben werden. Eine entsprechende Balance zwischen Versorgung vor Ort und Export sollte durch politische Vereinbarungen auf Staatenebene oder sogar im Rahmen überstaatlicher Institutionen wie der Europäischen Union und der Afrikanischen Union flankiert werden. Dies kann einen Einfluss auf die Aspirationen einiger Schwellen- und Entwicklungsländer haben, zukünftig aufgrund ihrer geografischen Standortbedingungen zu Wasserstoffexporteuren aufzusteigen.