



Kein Net Zero ohne Carbon Capture – Vier Studien im Vergleich

30.09.2022

Leon Berks
Christof von Branconi

Einführung

Global Energy Solutions arbeitet an Lösungen der Energie- und Klimakrise – für demnächst zehn Milliarden Menschen, die in Freiheit und Wohlstand leben. In diesem Rahmen haben wir Studien von renommierten Instituten, die ein klimaneutrales Energiesystem für die Mitte des Jahrhunderts entwerfen, verglichen.

Nach intensiver Recherche haben wir vier Veröffentlichungen der vergangenen zwei Jahre ausgewählt:

- IEA: net zero by 2050 - a roadmap for the global energy sector (Oct. 2021)
- IRENA: world energy transitions outlook (1,5 pathway) (2021)
- BP: Energy Outlook 2022 Edition (2022)
- Shell: the energy transformation scenarios (2021)

Wer steht hinter diesen Studien? Die International Energy Agency (IEA) wurde aus der Erfahrung der Ölkrise 1974 gegründet, hat 31 Mitgliedsländer (u.a. Deutschland, USA, Frankreich, Japan), weitere 11 Länder sind assoziiert (u.a. China und Brasilien), davon drei Beitrittskandidaten (u.a. Israel). Weder Russland noch Länder des Nahen Ostens noch Mitglieder der OPEC gehören dazu. IRENA (International Renewable Energy Agency) ist eine in Abu Dhabi beheimatete Organisation, deren Ziel die Förderung erneuerbarer Energien ist. Derzeit führt sie 168 Länder als Mitglieder und hat weitere 16 Länder als Beitrittskandidaten. Sie repräsentiert also das breite Meinungsspektrum sehr vieler Länder in Bezug auf den Ausbau erneuerbarer Energien. Schließlich haben wir die Studien der beiden großen börsennotierten Ölkonzerne BP und Shell ausgewählt, bei denen jeweils BlackRock ein großer Einzelaktionär ist. Die darin enthaltenen Angaben wurden, wo immer sinnvoll möglich, auf die Energieeinheit Terrawattstunde umgerechnet und werden in diesem Text der besseren Übersichtlichkeit halber in Petawattstunden (PWh, eine Petawattstunde (10 hoch 15) entspricht 1000 Terrawattstunden, TWh) kommentiert.

Der erste wesentliche Unterschied zwischen den Studien besteht darin, dass drei Studien bemüht sind, einen Weg zur Klimaneutralität bis 2050 aufzuzeigen, der von Shell beschriebene Weg erreicht dieses Ziel dagegen erst 2058.

	Total primary energy supply / PWh (2019)	Total final energy consumption / PWh (2019)	Total primary energy supply 2050 / PWh (reference)	Delta to 2019 / %	Total primary energy supply 2050 / PWh (net zero)	Delta to 2019 / %	Total final energy consumption 2050 / PWh (reference)	Delta to 2019 / %	Total final energy consumption 2050 / PWh (net zero)	Delta to 2019 / %	CO2 emissions 2050 / Gt (reference)	CO2 emissions 2050 / Gt (net zero)
IEA	170,0	120,8	212,0	+24,6	150,8	-11,2	163,1	+34,9	95,6	-20,9	36	0
IRENA	166,7	105,0	206,1	+23,6	166,7	+/- 0	N.N.	/	96,7	-8	36,5	0
BP	174,2	132,5	210,0	+20,5	181,4	+4	150,5	+13,6	97,5	-26,4	31,1	2,4
Shell	168,6	115,8	/	/	230,0	+36,4	/	/	152,5	+31,6	/	14,2

Abb. 1: Wesentliche Daten im Überblick. Grafik: GES

Ausgangspunkt ist der globale Primärenergieeinsatz 2019, der in einer Spannweite von 167 bis 174 PWh angegeben wird, mit Endenergieverbräuchen zwischen 105 (IRENA) und 133 PWh (BP) im selben Jahr.

Unter reiner Fortschreibung der derzeit weltweit von den Regierungen veröffentlichten Maßnahmenprogrammen rechnen drei Studien mit einer Steigerung des Primärenergiebedarfs um gut 20 % bis 2050 (auf dann 206 - 212 PWh), während Shell für einen Fall ohne zusätzliche Maßnahmen keine Angaben macht. In diesem Basisfall würden auch 2050 noch CO₂-Emissionen von ca. 31- 37 Giga-t pro Jahr emittiert. Die Steigerung des Primärenergieverbrauchs ist verbunden mit einer Erhöhung der wirtschaftlichen Leistung in Form des Bruttoinlandprodukts ungefähr um den Faktor 2,2 gegenüber 2019. Das würde grob eine Verdoppelung des weltweiten Wohlstandsniveaus bis 2050 bedeuten.

Ein weiterer signifikanter Unterschied zeigt sich im Endenergieverbrauch nach zusätzlichen, in den jeweiligen Studien angenommenen Maßnahmenprogrammen zur Erreichung von Net Zero: Während IEA, IRENA und BP einen Rückgang des Endenergiebedarfs überraschend übereinstimmend auf ca. 97 PWh prognostizieren, geht Shell bis 2050 von einer deutlichen Erhöhung auf 153 PWh aus, also von einer Steigerung um gut 30 %, auch nach 2050 rechnet die Shell-Studie mit einer weiteren Erhöhung des Endenergiebedarfs.

Die Studie von Shell sieht als gravierenden Unterschied zu den anderen Studien einen deutlich langsameren Rückgang der Rolle der fossilen Energieträger. In 2050 beträgt er laut Shell rund 45 % der Primärenergie, während die weiteren Studien nur von ca. 17 - 23 % ausgehen (aktuell über 80 %). Entsprechend erwartet Shell auch 2050 noch einen deutlich höheren Anteil fossiler Energieträger an der Stromerzeugung: rund ein Fünftel. Auch danach geht die Nutzung fossiler Energien nur langsam weiter zurück.

Die Wirkhebel

Bei den möglichen Wirkhebeln der zur Erreichung von Net Zero zusätzlich erforderlichen Maßnahmenprogrammen sind die Studien recht einheitlich. Sie kommen aber zu einer teilweise sehr unterschiedlichen Wirkung der aufgeführten Programme und unterscheiden sich daher in einigen Ergebnissen deutlich.

Sieben Wirkhebel werden in unterschiedlichen Detaillierungsgraden beschrieben und in ihren Möglichkeiten beurteilt. Sie alle spielen beim Erreichen von Net Zero in allen Studien eine wichtige Rolle:

1. Effizienzgewinne in der Nutzung der eingesetzten Energie:
Hiermit sind z.B. die Reduzierung von vermeidbaren Energieverlusten bspw. bei Gebäuden oder der Einsatz von Energierückgewinnungstechniken gemeint.
2. Verhaltensänderungen:
Hierbei geht es unmittelbar um Einsparungen, die aus dem Verhalten der Bevölkerung folgen, z.B. durch Reduzierung der Raumtemperatur im Winter, Car-Sharing oder auch verstärktes Recycling. Der Beitrag der ersten beiden Wirkhebel wird in den Studien nicht separat quantifiziert, er ist jedoch von wesentlicher Größe.
3. Erhöhte Elektrifizierung:

Electrification in net zero 2050	Global electricity demand 2019 / PWh	Share of total final energy consumption 2019 / %	Global electricity demand 2050 / PWh (net zero)	Share of total final energy consumption 2050 / % (net zero)
IEA	22,8	ca. 20	46,9	49
IRENA			50,0	51
BP			49,6	51
Shell			65,6	43

Abb. 2: Prognostizierter Anteil der Elektrifizierung am Endenergieverbrauch. Grafik: GES

Während 2019 noch rund 20 % des Endenergiebedarfs in Form von Strom verbraucht wurde, erwarten die Studien eine Erhöhung auf ca. 50 %, zumindest aber ca. 43 % (Shell). Auch die erwartete Größenordnung des strombasierten Endenergieverbrauchs ist bei IEA, IRENA und BP mit 47 - 50 PWh sehr ähnlich, Shell liegt aufgrund des insgesamt erwarteten höheren Energieverbrauchs mit rund 66 PWh in der verbrauchten Strommenge sogar noch darüber.

4. Erneuerbare Energien:

Renewable Energy Forecast 2050		Solar / PWh	Wind / PWh	Hydro / PWh	Bioenergy / PWh	Other / PWh	Total share of energy supply / %	Total share of electricity generation / %
IEA	Energy supply	30,3	24,8	8,5	28,3	8,8	68	
	Electricity generation	24,9	24,8	8,5	3,3	0,9		88
IRENA	Energy supply	N.N.					74	
	Electricity generation	51,0		21,9				90
BP	Energy supply	116,1		17,9	inkludiert in 116,1	/	74	
	Electricity generation	43,3	„low carbon“ (incl. nuclear): 16					
Shell	Energy supply	35,3	24,4	5,3	30,3	8,1	44	
	Electricity generation	20,6	22,8	4,7	22,2			60

Abb. 3: Die prognostizierte Bedeutung der Erneuerbaren Energien im Vergleich. Grafik: GES

Ein deutlich steigender Anteil der erneuerbaren Energiegewinnung an der Primärenergieerzeugung wird in allen Studien erwartet, bei BP und IRENA auf 74 %, auch bei IEA auf immerhin 68 %. Als Folge wird in diesen Studien auch erwartet, dass die Stromerzeugung zu 88 bis 94 % auf Basis erneuerbarer Energieträger erfolgen wird. Shell sieht ebenfalls ein deutliches Wachstum der erneuerbaren Energieerzeugung, erwartet allerdings nur einen Anteil von 44 % an der Primärenergieerzeugung und auch bei der Stromerzeugung ist der Beitrag der Erneuerbaren nur mit ca. 60 % angegeben.

Die Prognosen von IEA, IRENA und Shell zeigen bezüglich des Ausbaus von Solar- und Windkraftnutzung mit 51- 59 PWh einen ähnlichen Korridor. Der bei BP deutlich größer angegebene Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung enthält zudem die Nutzung von Geothermie und Formen der Bioenergie wie Biomethan und Bio-Fuels aber auch Kernenergie. Differenzierende Angaben hierzu werden leider nicht gemacht.

5. Wasserstoff und Derivate:

Role of Hydrogen	Global hydrogen demand 2019 / Mt	Global hydrogen demand 2050 / Mt	Energy / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %
IEA	91	530	20,9	21
IRENA		613	24,2	12
BP		446	17,6	15
Shell		138	5,6	3

Abb. 4: Der prognostizierte Ausbau der Wasserstofferzeugung. Grafik: GES

Von einem Niveau von rund 90 Mio. t Wasserstoff 2019 ausgehend, erwarten IEA, IRENA und BP eine Steigerung etwa um den Faktor 5 - 7 auf einen Anteil von 12 bis 21 % des Endenergieverbrauchs, während auch hier Shell die Entwicklung mit einer Zunahme um lediglich 50 % auf nur 3 % des Endenergieverbrauchs deutlich zurückhaltender prognostiziert. Bei dieser Betrachtungsweise spielt der von Shell vorhergesagte deutlich langsamere Rückgang der Nutzung fossiler Energieträger eine wichtige Rolle.

6. Bioenergie:

Hydrogen & Biofuels	Global hydrogen demand 2019 / Mt	Global Hydrogen demand 2050 / Mt	Energy / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %	Biofuels / PWh	Share of final energy consumption 2050 / %
IEA	91	530	20,9	21	13,3	14
Shell		138	5,6	3	17,8	11

Abb. 5: Prognosen für Wasserstoff und Biofuels im Vergleich. Grafik: GES

Hinsichtlich der Bedeutung der Bioenergie treten unterschiedliche Bewertungen zu Tage. Während die IEA Wasserstoff und seine Derivate bedeutsamer sieht als die Bioenergie, ist dies bei Shell umgekehrt, hier wird die Rolle der Bioenergie in ihrem Beitrag 2050 dreimal so bedeutsam gesehen wie diejenige von Wasserstoff – der höchste Wert aller Studien. IRENA und BP machen im Hinblick auf die erwartete Bedeutung der Bio-Fuels keine expliziten Angaben. Die Studien sind sich also insgesamt in der Beurteilung des zu erwartenden Beitrags der Bio-Fuels uneinig.

7. Carbon Capture:

Role of Carbon Capture	CO2 captured per year / Mt (2019)	CO2 captured per year / Mt (2050)	CO2 captured from fossil fuels and processes / Mt (2050)	CO2 captured from bioenergy (BECCS) / Mt (2050)	Direct air capture / Mt (2050)
IEA	40	7.602	5.245	1.380	985
IRENA		8.100	3.400	4.700	N.N.
BP		6.000	4.700	1.300	N.N.
Shell		5.200	5.200	N.N.	N.N.

Abb. 6 Erwartete Entwicklung der Nutzung von Carbon Capture. Grafik: GES

In allen Studien wird zur Erreichung der Klimaneutralität Carbon Capture von erheblicher Bedeutung sein. Gegenüber dem Basisjahr 2019 wird sich weltweit die Menge des abgefangenen Kohlendioxids mehr als ver Hundertfachen (!). Mit 5 - 8 Gigatonnen abgefangenem CO₂ pro Jahr ist die von den vier Studien erwartete Größenordnung durchaus ähnlich, bzgl. des Potenzials von Direct Air Capture (DAC) gibt es aber nur bei der IEA eine Angabe, demnach käme DAC auf einen Anteil von 13 % am angefangenen CO₂.

Fossile Energieträger und Kernenergie 2050

Role of fossil fuels and nuclear 2050		Oil / PWh	Natural Gas / PWh	Coal / PWh	Nuclear / PWh	Share of total energy supply / %	Share of electricity generation / %
IEA	Energy supply	11,7	16,7	4,8	16,9	34	
	Electricity generation	0,006	0,7	0,7	5,5		10
IRENA	Energy supply	N.N.				26 (excl. nuclear)	
	Electricity generation	0	4,9	0	3,2		10
BP	Energy supply	12,2	16,9	4,7	13,6	24	
	Electricity generation	0	2,2	0,5	16		29
Shell	Energy supply	44,4	31,9	27,8	22,2	54	
	Electricity generation	0,6	16,1	7,5	21,9		39

Abb. 7: verbleibende Rolle der fossilen Energieträger und Bedeutung der Kernenergie. Grafik: GES

Der Anteil verbleibender Nutzung fossiler Energieträger geht gegenüber dem Ausgangspunkt 2019 von über 80 % in allen Studien signifikant zurück. BP erwartet noch die Nutzung von ca. 34 PWh, anteilig 17 %, und liegt damit deutlich unter IRENA, die 26 % an der Primärenergieerzeugung angeben, ohne eine weitere Differenzierung der einzelnen Energieträger. Shell publiziert den größten verbleibenden Anteil: noch 45 % der Primärenergie wird auf fossiler Basis versorgt, dabei spielt Öl (19 %) unverändert die größte Rolle, gefolgt von Erdgas (14 %) und Kohle (12 %). Ebenso ist bei Shell der absolute Rückgang gegenüber 2019 am geringsten: bei Öl um 5 PWh (-10 %), Erdgas um 9 PWh (-22 %) und Kohle um 16 PWh (-39 %).

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Plausibilisierung des Einsatzes fossiler Brennstoffe im Hinblick auf die prognostizierte verstärkte Anwendung von Carbon Capture. Bei IEA und BP wird grob so viel CO₂ über Carbon Capture abgefangen wie durch den Rest an fossilen Energieträgern in das Klimasystem eingetragen wird. Bei Shell ist die Summe aus verbleibenden CO₂-Emissionen und durch Carbon Capture abgefangenem CO₂ deutlich kleiner als die Summe des durch die große Menge fossiler Energieträger eingetragenen Kohlendioxids. Hier wird offensichtlich mit einer großen Kompensationswirkung von Nature-based Solutions geplant, deutlich größer jedenfalls als bei den anderen Studien. Auch bleibt in allen Fällen die Frage, wie erhebliche verbleibende CO₂-Emissionen aus solchen Sektoren wie der Zementindustrie kompensiert werden, bei denen wesentliche CO₂-Mengen nicht durch den Energieeinsatz sondern durch den zu Grunde liegenden chemischen Prozeß verursacht werden.

Ohne als Wirkhebel zur Erreichung der Klimaneutralität explizit argumentiert zu werden, spielt die Kernenergie bei den Vorhersagen 2050 eine gewichtige Rolle. Gegenüber 2019 (2,7 PWh) erwarten alle Studien eine Zunahme der kernenergiebasierten Stromerzeugung, IEA und BP um ein Vielfaches, Shell sogar um den Faktor 8 auf 22 PWh, wohl auch um dem insgesamt signifikant steigenden Energiebedarf gerecht zu werden.

Unsicherheiten

Die Studien selber sehen die größten Schwierigkeiten ihrer Prognosen bei den Verhaltensänderungen. Ob der Langstreckenflugverkehr bei steigender Weltbevölkerung und wachsendem Wohlstandsbedarf zurückgeht wird ebenso als Unsicherheit kommentiert wie die Konsequenz in der Einführung von verhaltensbeeinflussenden Regulierungen, bspw. einer möglichst global wirksamen CO₂-Bepreisung. Bei der Bioenergie wird explizit auf den Konflikt zur Nahrungsmittelproduktion bei der Landnutzung hingewiesen. Auch wird in der bedeutsamen Anwendung von Carbon Capture eine große Ungewissheit

gesehen: aufgrund der damit verbundenen Kosten, möglichen technischen Herausforderungen und des ungewissen Verhaltens der Politik in Bezug auf die Akzeptanz und Durchsetzung dieser Maßnahmen. Letztlich liegt in dem erzielbaren technischen Fortschritt ein deutlicher Unsicherheitsfaktor. Werden sich batteriebetriebene Lastwagen durchsetzen, wird sich wasserstoffbasierte Stahlerzeugung weltweit etablieren oder wird CO₂-Abfangen in großem Maßstab eine Selbstverständlichkeit?

Was fehlt?

Themen der internationalen Zusammenarbeit wie Kooperationserfordernis für die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen oder die Erfordernis von Technologietransfers werden in den Kommentaren nicht adressiert. Auch wenn es die Studien nicht zum unmittelbaren Inhalt haben, Empfehlungen zur wirtschaftlichen Entwicklung der Schwellen- und Entwicklungsländer zu geben, so erscheint es jedenfalls notwendig, die Empfehlungen bei der Entwicklung entsprechender Policies zu berücksichtigen. Nicht zuletzt deshalb, da ein erheblicher Teil der zukünftigen Entwicklung und damit ein erheblicher Teil der zusätzlich zu erwartenden bzw. zu vermeidenden Emissionen in diesen Ländern stattfinden werden.

Leider ermöglichen die veröffentlichten Daten kein profundes Verständnis der angewandten Methodik oder der durchgeführten Simulationen. Kosteneffizienz des Wandels ist in Ansätzen adressiert, die Verfügbarkeit der für den Aufbau alternativer Erzeugung erforderlichen Rohstoffe nicht.

Somit sind viele Fragezeichen bzgl. der Belastbarkeit der umfangreichen Arbeiten erlaubt – letztlich gibt aber die hier erfolgte Gegenüberstellung wichtige Hinweise auf die Ähnlichkeit der Überlegungen und wesentliche zu lösende Fragestellungen.

Fazit

Da ist zunächst die Frage nach der weiteren Nutzung von fossilen Energieträgern. Erdöl-, Erdgas- und Kohlevorkommen sind im Wesentlichen auf 25 Länder konzentriert, die über mehr als 80 % der bekannten Reserven verfügen. Wie wird die Nutzung regenerativer Energieträger dort gefördert? Welche alternativen Geschäftsmodelle sichern möglicherweise Staatshaushalt und wirtschaftliche Entwicklung? Die von allen Studien dargestellte Nutzung von Carbon Capture ist als unmittelbare Kompensationsmöglichkeit für die zukünftigen fossilen CO₂-Emissionen ein strategisch bedeutsames Lösungselement der Net Zero-Herausforderung und damit von größter Relevanz.

Die umfangreiche Nutzung regenerativer Energieträger wird neben den Fragen der Verfügbarkeit von Rohstoffen und Bezahlbarkeit auch wesentlich von einer kosteneffizienten Beherrschbarkeit der Volatilitätsfragen bei der Erzeugung von Strom beeinflusst. Ein hoher Anteil von Solar- und Windenergie erscheint überall dort möglich, wo im großen Umfang kostengünstige Strategien gegen Dunkelflauten genutzt werden können, z.B. über fossil betriebene Kraftwerke mit Carbon Capture oder kostengünstige Speicherstrategien.

Offensichtlich spielt auch der Ausbau wasserstoffbasierter Energieträger eine bedeutsame Rolle. Vorausgesetzt die zahlreichen Skalierungshemmnisse für den umfassenden Aufbau entsprechender Kapazitäten können zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zeitnah überwunden werden.¹

Effizienzgewinne und Verhaltensänderungen werden perspektivisch ebenfalls bedeutend beitragen können, sind allerdings in ihrer Planbarkeit mit großen Unsicherheiten verbunden. Der technische Fortschritt ist ebenfalls ein bedeutsamer Hoffnungsträger. Auf der einen Seite sind alle wesentlichen denkbaren Lösungen (Kernfusion, Gezeitenkraftwerke, etc.) bekannt, andererseits meist noch zu ungewiss in ihrer praktischen Anwendung, um konkret in einen Ausblick eingepreist werden zu können.

¹ Siehe hierzu auch die GES-Veröffentlichung Elektrolyse: Status Quo: Technik, Kosten und Herausforderungen