

OCCASIONAL PAPER No. 6
SEPTEMBER 2024

Technologische Aspekte der Energiewende

**Synthesepapier zu einer
Veranstaltungsreihe der OeNB**

Andreas Breitenfellner

The *Occasional Paper* series of the Oesterreichische Nationalbank is designed to disseminate and to provide a platform for discussion of either work of the staff of the OeNB economists or outside contributors on topics which are of special interest to the OeNB. The opinions are strictly those of the authors and do in no way commit the OeNB.

The Occasional Papers are also available on our website (<http://www.oenb.at>).

Publisher and editor

Oesterreichische Nationalbank
Otto-Wagner-Platz 3, 1090 Vienna, Austria
PO Box 61, 1011 Vienna, Austria
www.oenb.at
oenb.info@oenb.at
Phone (+43-1) 40420-6666

© Oesterreichische Nationalbank, 2024. All rights reserved.

May be reproduced for noncommercial, educational and scientific purposes with appropriate credit.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 2 |
| 2 | Chronologisch geordnete Zusammenfassungen der Veranstaltungen | 4 |
| 1.1 | <i>Technologische und ökonomische Herausforderungen der Energiewende</i> | 4 |
| 1.2 | <i>Internationale Dimension der Energiewende</i> | 7 |
| 1.3 | <i>„Raus aus Gas“ – klimafreundlich, kosteneffizient, realistisch?</i> | 10 |
| 1.4 | <i>Die Finanzierung der grünen Transformation: Zusammenarbeit zwischen China und Europa</i> ... | 13 |
| 1.5 | <i>Chancen und Grenzen von E-Fuels</i> | 15 |
| 1.6 | <i>Funktionieren „Verbrennerverbote“? Folgen für Wettbewerbsfähigkeit und Weltklima</i> | 19 |
| 1.7 | <i>Energiewende: Neue Ansätze in der Kernkraft-Technologie (Thorium etc.)</i> | 25 |
| 1.8 | <i>Energiewende: Kernfusion – Hoffnung für die Energiewende?</i> | 29 |
| 1.9 | <i>Potenzial und Grenzen von Wasserstoff – Strategien in Japan, Europa und Österreich</i> | 34 |
| 3 | Diskussion aufgeworfener Grundsatzfragen | 38 |
| 4 | Tentative Schlussfolgerungen | 45 |
| 5 | Literaturverzeichnis | 47 |

Technologische Aspekte der Energiewende

Synthesepapier zu einer Veranstaltungsreihe der OeNB

Andreas Breitenfellner¹

Über die Auswirkungen und Ursachen des Klimawandels besteht in der naturwissenschaftlichen Community grundsätzlich Einigkeit. Generell setzen alle Strategien zur Eindämmung des Klimawandels bei der Defossilisierung der Wirtschaft und einer umfassenden Energiewende an. Jedoch bröckelt der Konsens bei konkreten technologischen Ansätzen: konventionelle erneuerbare Energieträger versus bahnbrechende Innovationen; Energieautarkie versus internationale Arbeitsteilung; Erdgas als Brückentechnologie versus umfassende Elektrifizierung; ehrgeizige europäische Klimaziele versus internationales Carbon Leakage; „Verbrennerverbote“ versus E-Fuels und Wasserstoff; Atomausstieg versus neue Kernenergieverfahren. Diese und ähnlichen Fragen wurden in einer Veranstaltungsreihe der OeNB erörtert, um das interdisziplinäre Verständnis zu vertiefen. Die Diskussionen verdeutlichten, dass ein Konsens über machbare und wünschenswerte Technologiepfade zur Emissionsreduktion zwar anspruchsvoll, aber möglich ist. Dies setzt einen ganzheitlichen Ansatz voraus, der unterschiedliche Perspektiven unvoreingenommen integriert und auf solider wissenschaftlicher Evidenz basiert. Erforderlich ist eine gemeinsame Terminologie, kontinuierlich kritische Reflexion, Akzeptanz von Unsicherheiten und flexible Reaktion auf Veränderungen. Die Wahl der Instrumente sollte sich an Kosteneffizienz, Vorsorgeprinzip, Technologieoffenheit und langfristiger Nachhaltigkeit orientieren, wobei Zielkonflikte pragmatisch zu lösen sind. International koordinierte CO₂-Bepreisung, kombiniert mit Subvention grüner Innovationen erfüllt die genannten Kriterien in besonderem Maße und sollte deshalb eine zentrale Rolle in der Energiewende spielen. Konsensbildung ist essenziell für eine glaubwürdige und wirtschaftsverträgliche Klimapolitik. In diesem Sinne plant die OeNB die Diskussionsreihe mit dem Schwerpunkt Kosten- und Nutzenabschätzung fortzusetzen. Für die OeNB steht bei der Klimapolitik ihr gesetzliches Kernmandat, die Preis- und Finanzmarktstabilität zu wahren, im Vordergrund.

I Einleitung

Der Klimawandel ist eine **unbestreitbare** Tatsache. Seine krisenhaften Auswirkungen sind bereits heute spürbar, werden aber vermutlich für zukünftige Generationen, insbesondere im globalen Süden, dramatische Ausmaße annehmen. Seine anthropogenen Ursachen sind eng mit den modernen, auf fossilen Energieträgern basierenden Produktions- und Konsumweisen verbunden. Strategien zur Eindämmung des Klimawandels setzen daher typischerweise bei der Defossilisierung der Wirtschaft an. Im Mittelpunkt steht dabei eine umfassende **Energiewende**, die sich auf die Quellen, die Umwandlung, die Speicherung und die Nutzung von Energie bezieht. Über all dies gibt es einen allgemeinen **wissenschaftlichen Konsens**, der jedoch aufgeweicht wird, wenn es um konkrete **technologische Ansätze** geht: Reicht es aus, auf bekannte erneuerbare Energieträger umzusteigen, oder sollen wir auf bahnbrechende Innovationen setzen? Kann die benötigte saubere Energie eher autark erzeugt werden, oder brauchen wir mehr internationale Arbeitsteilung? Soll Erdgas als Brückentechnologie in der Energiewende eine Rolle spielen oder ist die Elektrifizierung aller Wirtschaftsbereiche der einfachere Weg?

¹ Oesterreichische Nationalbank, Referat International Economics, andreas.breitenfellner@oenb.at. Die vom Autor zum Ausdruck gebrachte Meinung gibt nicht notwendigerweise die Meinung der OeNB oder des Eurosystems wieder. Der Autor dankt Gouverneur Robert Holzmann (dem Initiator und Schirmherrn der Veranstaltungsreihe) sowie Eleonora Endlich, Werner Kaller und Thomas Reiningger (alle OeNB) für wertvolle Anregungen.

Kann verhindert werden, dass sinkende Treibhausgasemissionen in Europa durch steigende Emissionen auf anderen Kontinenten konterkariert werden? Funktionieren Verbote etwa des Verbrennungsmotors oder sollten wir nicht stärker auf E-Fuels und Wasserstoff setzen?

Sind in den nächsten Jahrzehnten noch entscheidende Fortschritte in der Nukleartechnologie – sowohl Kernspaltung als auch Kernfusion – zu erwarten?

Für die **Wirtschaftspolitik** ist der technologische Dissens problematisch. Je unbestimmter die Technologiepfade zur Emissionsminderung sind, desto weniger **glaubwürdig** sind sie für die Wirtschaftsakteure, also Haushalte und Unternehmen. Dies wiederum beeinträchtigt ihr unmittelbares Konsumverhalten und die **Planungssicherheit** für langfristige Investitionsentscheidungen. Der Übergang zu einer Wirtschaft, die nicht mehr auf fossilem Kohlenstoff basiert, droht dadurch teuer und holprig zu werden.² Letztlich erschwert dies auch das **Kernmandat einer Zentralbank**, nämlich die Inflation niedrig und die Finanzmärkte stabil zu halten. Andererseits können der Klimaschutz und insbesondere Investitionen in erneuerbare Energien im globalen Süden zu Produktivitätssteigerungen beitragen, die wiederum den geldpolitischen Handlungsspielraum der Zentralbanken erweitern (Holzmann et al., 2024). Daraus ergibt sich das Interesse der OeNB, die **interdisziplinäre Verständigung** zu fördern und somit optimalerweise auch zur Konsensbildung beizutragen.

Mit diesem Ziel organisierte die OeNB eine Reihe von insgesamt **neun Veranstaltungen** im Zeitraum von Jänner 2023 bis April 2024, die sich diesen und ähnlichen offenen technologischen Fragen widmeten. Grundidee war, die naturwissenschaftlichen Diskussionen für Ökonom:innen und ein breites Publikum verständlich zu machen.

1. **Technologische Voraussetzungen**, mit Georg Brasseur (Akademie der Wissenschaften [ÖAW]) und Stefan Schleicher (Universität Graz) – 17.1.23
2. **Internationale Dimension**, mit Timur Gül (International Energy Agency), Thomas Kienberger (Montanuniversität Leoben) und Stéphane Hallegatte (Weltbank) – 25.5.23
3. **Rolle von Gas**, mit Hans Joachim Schellnhuber (International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg [IIASA]) und Georg Brasseur (ÖAW) – 22.9.23
4. **Grüne Transition in China**, mit Niko Korpar (Wiener Institut für internationale Wirtschaftsvergleiche [wiiw]), Jun Ma (China Society for Finance and Banking) und Xiaodong Wang (Weltbank) – 6.11.23³
5. **E-Fuels**, mit Jürgen Roth (eFuel Alliance Österreich), Sigrid Stagl (Wirtschaftsuniversität Wien) und Falko Ueckerdt (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) – 20.11.23
6. **Funktionieren Verbrennerverbote?** mit Hans-Werner Sinn (ifo Institut) und Angela Köppl (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung [WIFO]) – 14.12.23

² Sogenannte Transitionsrisiken entstehen durch regulatorische, technologische und marktbezogene Veränderungen im Übergang zu einer klimafreundlicheren bzw. nachhaltigeren Wirtschaft. Sie können durch eine kohärente, vorhersehbare und international koordinierte Politik zwar verringert, aber aufgrund der Komplexität und Dynamik des Übergangsprozesses nicht vollständig vermieden werden. Umgekehrt verschärft eine inkonsistente, sprunghafte und intransparente Klimapolitik diese Risiken, indem sie u. a. Unsicherheit für Investoren schafft.

³ Teil der Conference on European Economic Integration 2023.

7. **Neue Kernkraft-Technologie** mit Mario Müller (Emerald Horizon), Eileen Langegger (TU Wien) und Wolfgang Liebert (Universität für Bodenkultur [BOKU]) – 17.1.24
8. **Kernfusion**, mit Friedrich Aumayr (TU Wien) und Reinhard Grünwald (Technikfolgen-Abschätzung, Bundestag) – 20.3.24
9. **Wasserstoff**, mit Martin Schulz (Fujitsu) und Wolfgang Anzengruber (Hydrogen Partnership Austria) – 26.4.24

Der bisherige Verlauf der Veranstaltungsreihe hat gezeigt, dass trotz aller unterschiedlichen Sichtweisen ein **Konsens** über machbare und wünschenswerte Technologiepfade zur Emissionsminderung erreichbar ist. Dazu bedarf es jedoch eines zielorientierten, aber im Hinblick auf das „Wie“ ergebnisoffenen, interdisziplinären **Dialogs**. Der Teufel steckt oft im **Detail**. Daher ist es notwendig, sich in mühsamer Kleinarbeit auf gemeinsame Definitionen, Abgrenzungen, Datenquellen, empirische Untersuchungsergebnisse etc. zu verständigen. Unsere Veranstaltungen konnten in diesem Zusammenhang einen kleinen Beitrag zum Faktencheck leisten.

Wie Stechemesser et al. (2024) zeigen, sind große, kurzfristige Emissionsreduktionen auf nationaler Ebene oft mit großen Regierungsinitiativen verbunden, die mehrere politische Maßnahmen in einem gut durchdachten **Policy-Mix**, meist einschließlich **CO2-Bepreisung**, kombinieren. **Zweifel** an der Wirksamkeit einzelner Klimaschutzmaßnahmen wird es immer geben, sie dürfen aber nicht mit der **Leugnung** wissenschaftlicher Erkenntnisse verwechselt werden. Zweifel ist ein wichtiges **Forschungsmotiv**, das die Wissenschaft vorantreibt. Es geht darum, Zweifel produktiv zu nutzen, Maßnahmen zu evaluieren und anzupassen. Weitere Erkenntnisse erwarten wir von einer Fortsetzung der Reihe mit dem Schwerpunkt **Kosten- und Nutzenabschätzung**.

Der Rest des Berichts ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 1 fasst die einzelnen Diskussionsrunden zusammen. Abschnitt 2 erörtert eine Auswahl jener wesentlichen Fragen, die einen Bogen über alle Veranstaltungen spannen. Abschnitt 3 zieht tentative Schlussfolgerungen.

2 Chronologisch geordnete Zusammenfassungen der Veranstaltungen

In diesem Abschnitt werden die **Diskussionsergebnisse** der neun Einzelveranstaltungen präsentiert. Alle Veranstaltungen wurden von Robert Holzmann, Gouverneur der Oesterreichischen Nationalbank, eingeleitet, der insbesondere die geldpolitische Bedeutung der Klima- und Energiewende für die Zentralbanken aufgrund ihrer Einflüsse auf die Preis- und Finanzmarktstabilität hervorhob.

1.1 Technologische und ökonomische Herausforderungen der Energiewende

Am [17.1.2023](#) diskutierten Georg **Brasseur**, Professor Emeritus der ÖAW, und Stefan **Schleicher**, Professor an der Universität Graz.

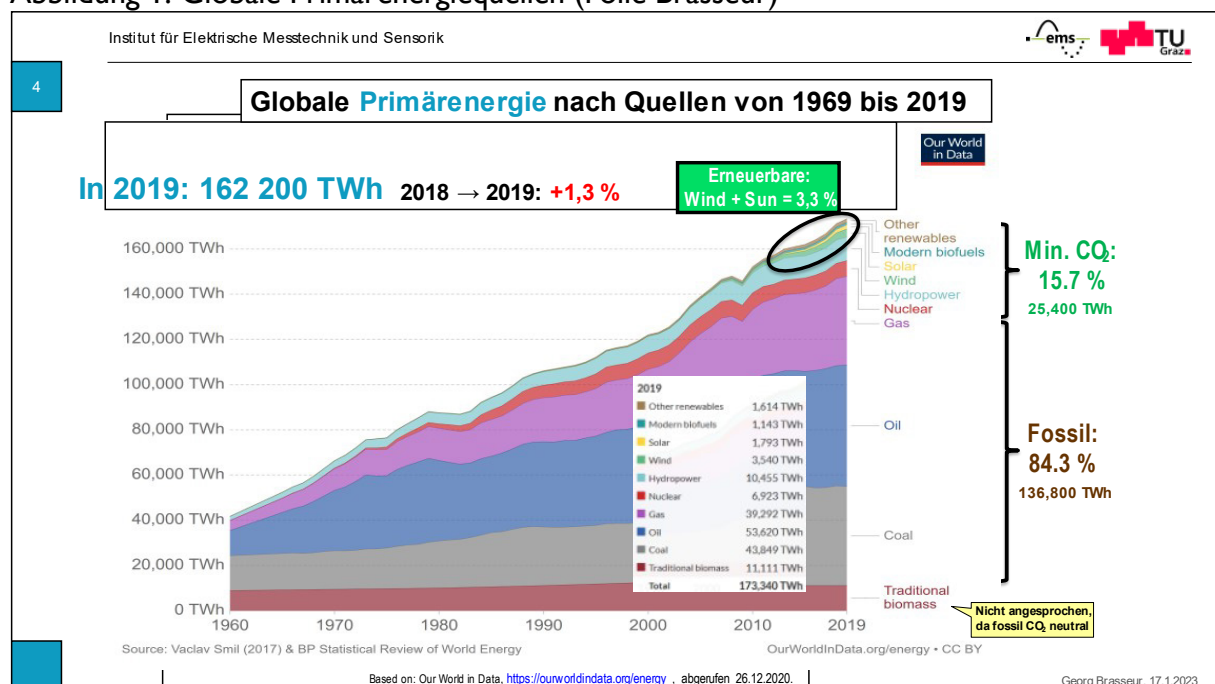
Brasseur betonte, dass die Reduzierung der Treibhausgase ein **globales** und kein lokales Thema sei. Die reichen und technologisch führenden Industrienationen und die armen Schwellenländer bestimmen gemeinsam die Erreichung der Pariser Ziele (Netto-Null bis 2050). **Energiesparen** möglichst ohne Einbußen an Lebensqualität bedeute, mit weniger Primärenergie auszukommen.

Kostbare, emissionsarme elektrische Energie solle nur dort eingesetzt werden, wo sie wirklich gebraucht wird.

Grüner Wasserstoff aus europäischen Elektrolyseuren, die mit in Europa generiertem Strom betrieben werden, solle vor allem für die Defossilisierung der Industrie eingesetzt werden. Dieser Ökostrom werde auch für Wärmepumpen benötigt, da sie das Effizienzkriterium erfüllen.⁴

Die Personenmobilität hingegen solle in optimierten **Hybridfahrzeugen mit grünen Wasserstoffderivaten** als Kraftstoff statt mit Batterien betrieben werden. Im Fahrzeug wird der Kraftstoff in Strom für den Elektroantrieb umgewandelt. Solar- und Windenergie solle vor allem dort erzeugt werden, wo sie in großen Mengen zur Verfügung steht, z. B. im **globalen Süden**. Grünes Methan und synthetische Flüssigkraftstoffe sollten an ertragreichen Standorten produziert werden, nicht zuletzt für den **Import nach Europa**. Brasseur empfiehlt die Zusammenarbeit mit lokalen Entscheidungsträgern, um einen neuen Kolonialismus zu vermeiden. Der Umstieg auf grüne Energie werde sehr teuer. Die Politik müsse für **Kostenwahrheit** sorgen. Politische Rahmenbedingungen mit Laufzeiten von gut 50 Jahren schüfen Planungs- und Rechtssicherheit für Investitionen. Die Energiewende erfordere internationale Investitionen in Milliardenhöhe, u. a. in Ländern mit günstigen Standortbedingungen für grüne Kraftwerke, die vor allem durch **Risikokapital** aufgebracht werden müssen. Die **Politik** müsse **technologieoffen** agieren. Das heißt, sie lässt Wissenschaft, Wirtschaft und Verbraucher funktionierende Lösungen erarbeiten, ohne sich in die Auswahl der Energiewende-Technologien einzumischen.

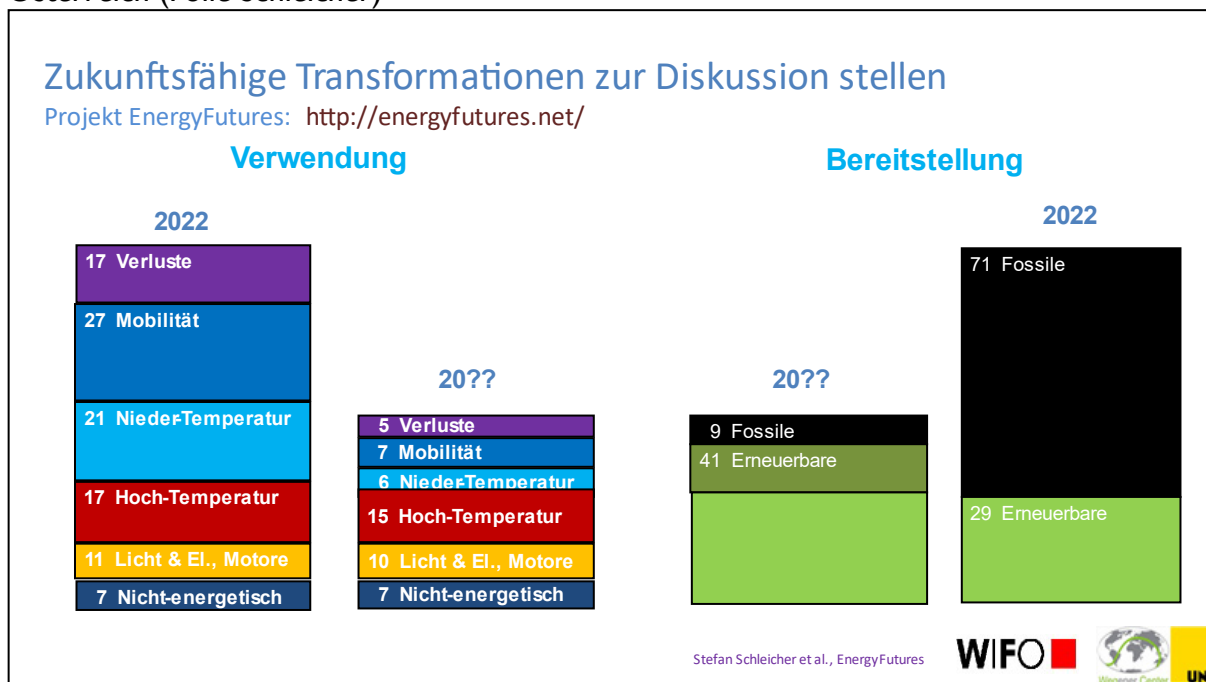
Abbildung 1: Globale Primärenergiequellen (Folie Brasseur)



⁴ Maßnahmen zur Treibhausgasverringerng erzeugen in der Regel zusätzlich neue Treibhausgase (beispielsweise durch den Bau und den Betrieb von Anlagen). Das Verhältnis von Verringerung der Emissionen (im Betrieb) und deren Erhöhung (durch Installation) ergibt die Effizienz.

Schleicher plädierte für ein radikal **neues Design** unseres Energiesystems, um energie- und klimarelevante Entscheidungen zielgerichtet zu gestalten. Am Beispiel einer Entwicklungsregion in der Schweiz zeigte er das Potenzial innovativer und **hochintegrierter CO2-freier Energiesysteme** auf: Lokale Geothermie über tief gebohrte Erdwärmesonden, Wärme und Wasserkraft aus nahegelegenen Flüssen, **Anergie-Netz** (Niedertemperaturnetz zur Wärmerückgewinnung) vernetzt mit Wärmepumpen, Wärmetauschern und Erdspeichern für Wärme im Winter und Kühlung im Sommer. Ein österreichisches Projekt schafft eine **zirkuläre Kohlenstoff-Wertschöpfungskette**: CO₂-Abscheidung bei der Zementproduktion wird für die Herstellung von erneuerbarem Polypropylen verwendet; Umgekehrt werden Kunststoffabfälle für die Zementproduktion verwertet. Weitere Beispiele sind die **thermische Bauteilaktivierung**, bei der die Gebäudemasse zur Temperierung genutzt wird, sowie leichte Deckenelemente zur Steigerung der Baustoffproduktivität. Entsprechende Entscheidungen, die vom persönlichen Lebensstil über wirtschaftliche Aktivitäten bis hin zur Politik reichen, bedürfen einer fundierten Folgenabschätzung. Als Entscheidungshilfe schlägt Schleicher ein „3i-Mindset“ vor: (i) **Innovation** entlang der Energiewertschöpfungskette stimulieren; (ii) **Integration**, um Synergien zu realisieren; und (iii) **Inversion**, die fragt, wofür wie viel Energie in welcher exergetischen Qualität benötigt wird. Der intensive Bezug erneuerbarer Energien aus dem Ausland führe zu **Umwandlungsverlusten**, da Wasserstoff nur aufbereitet als synthetisches Methan, Methanol, Ammoniak transportfähig sei. Mobilität, so Schleicher, erfordere dank der Informationstechnologien immer **weniger Transportleistungen**. Bei konsequenter Umsetzung all dieser Strategien könne der **Primärenergiebedarf** sogar deutlich **reduziert** werden, ohne dass der Endenergiebedarf in gleichem Maße sinken müsste (siehe Abb. 2). Abschließend kritisiert er die mangelnde Beschäftigung der Wirtschaftswissenschaften mit Innovationen.

Abbildung 2: Gegenwart und Zukunft der Verwendung und Bereitstellung von Energie in Österreich (Folie Schleicher)



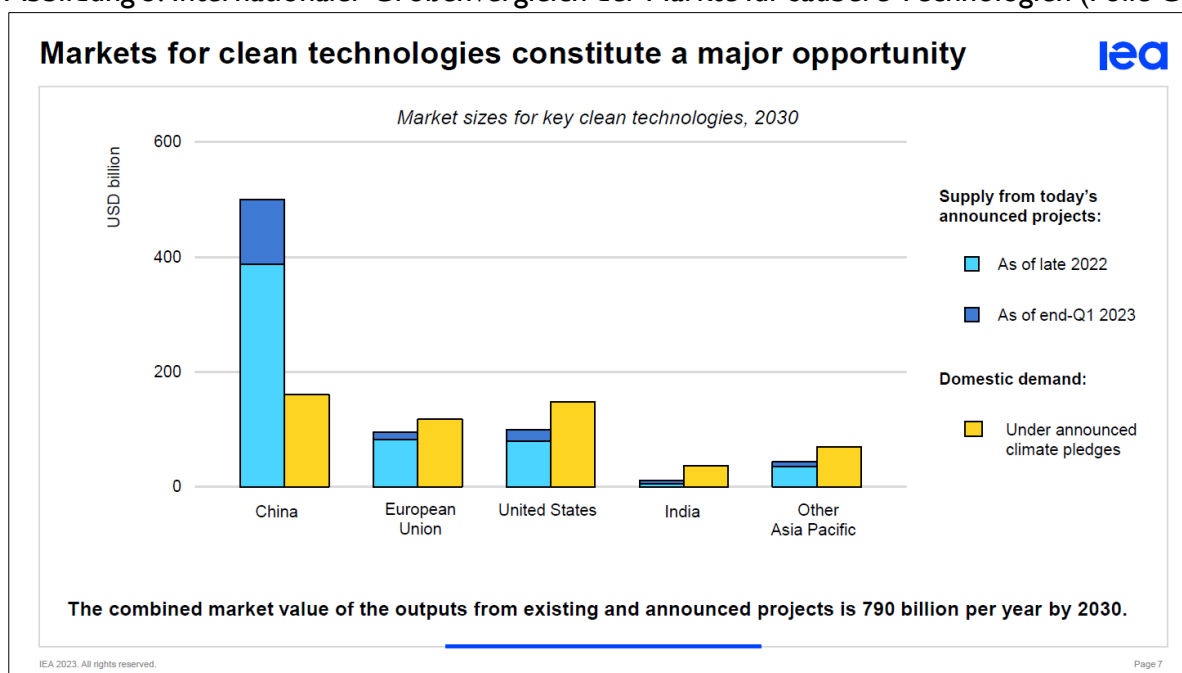
I.2 Internationale Dimension der Energiewende

Am [25.5.2023](#) diskutierten **Timur Gül**, Head of the Energy Technology Policy Division, International Energy Agency (online), **Stéphane Hallegatte**, Senior Climate Change Adviser, Weltbank (online) und **Thomas Kienberger**, Head of Chair of Energy Network Technology, Montanuniversität Leoben.

Einleitend unterstrich Gouverneur **Holzmann** die offene Fragestellung nach einer **optimalen internationalen Arbeitsteilung**: Wieviel der in Europa zukünftig gebrauchten „sauberen“ Energie sollte aus dem Ausland importiert werden? Und was wären die jeweiligen Effekte – energiepolitisch und ökonomisch – auf den globalen Süden?

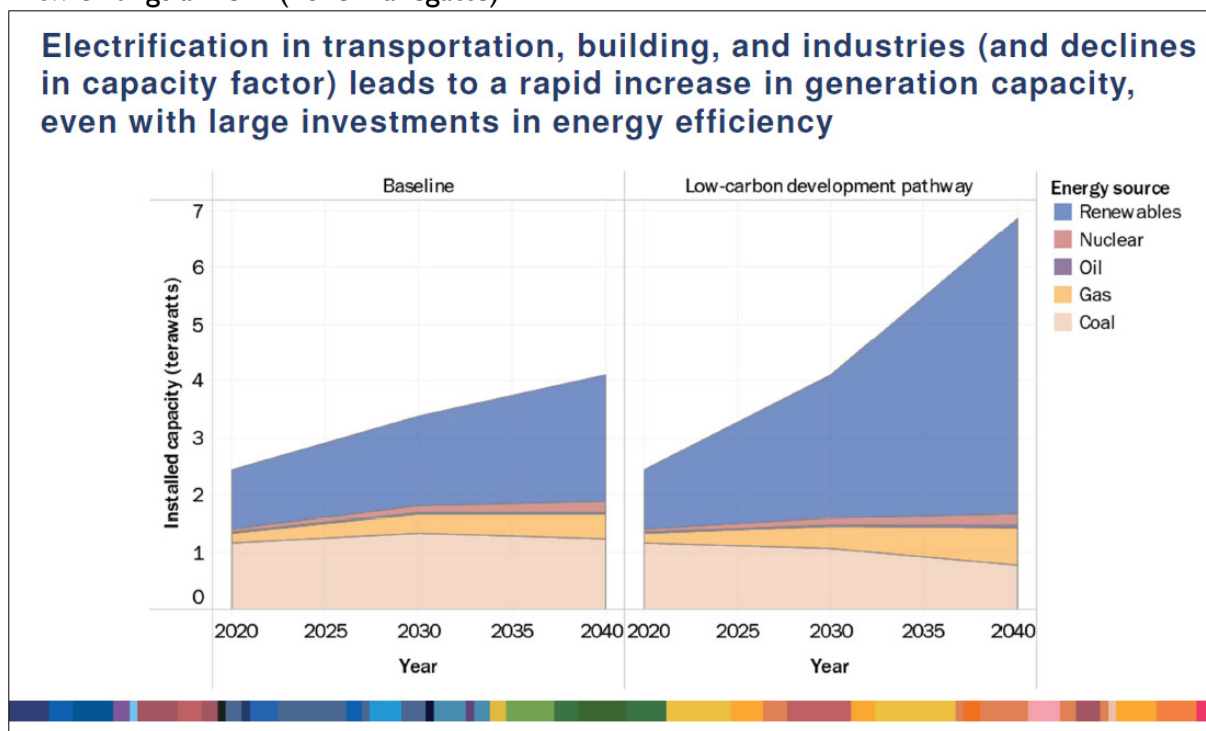
Gül stellte die verschiedenen **Szenarien der IEA** vor: explorative versus normative. Dank angekündigter Politiken und technologischer Trends sei der Ausblick für die globale Erwärmung bis zur Mitte des Jahrhunderts um etwa ein Grad reduziert worden. Ein weiteres Grad Celsius könne durch die Umsetzung von Zusagen erreicht werden, auch wenn das Netto-Null-Ziel bis 2050 immer noch verfehlt würde. Aus den Projektionen gehe jedenfalls hervor, dass die Nutzung **fossiler Energieträger** noch vor **2030 ihren Höhepunkt** erreichen wird. Schon heute würden für jeden Dollar, der in fossile Energien investiert wird, 1,8 Dollar in saubere Energien investiert. Die Summe der aktuellen Pläne der Industrie sehe bis 2030 eine Vervielfachung der Kapazitäten für die **Wasserstoff-Elektrolyse** und die **Batterieproduktion** vor. Die Lieferketten für „grüne“ Technologien seien jedoch stark konzentriert. Ein Großteil der Verarbeitung kritischer Mineralien, der Materialproduktion und sogar der Technologieindustrie werde jeweils von nur drei Ländern bereitgestellt, wobei China stets an erster Stelle steht und insbesondere bei der Technologieproduktion erhebliche Expansionspläne hat. Auch in kritischen Bereichen wie Wasserstoff oder Stahl sei **China sehr wettbewerbsfähig** (gefolgt von Indien, den USA, der EU und Japan). Jedoch liege **Europa** mit China bei den Marktanteilen in den „Umwandlungsindustrien“ (Wärmepumpen, Elektrolyse etc.) etwa gleichauf.

Abbildung 3: Internationaler Größenvergleich der Märkte für saubere Technologien (Folie Gül)



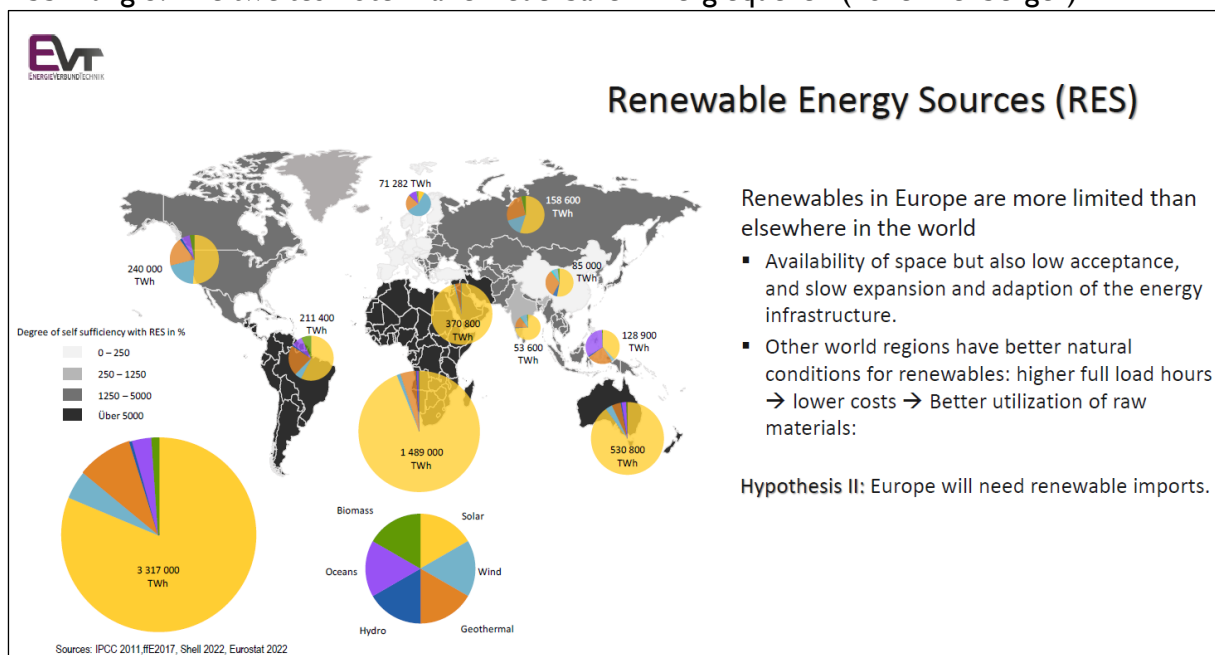
Hallegatte verwies auf die Country Climate and Development **Reports** (CCDRs) der **Weltbank**, die einen integrierten Blick auf die Entwicklungs- und Klimapolitik der Mitgliedsländer werfen. Während Upper **Middle Income Countries** (UMICs, China, Indien, Türkei etc.) tendenziell Netto-Null-Ziele für 2050, **2060** oder 2070 anstreben, haben diesen Reports zufolge Lower Middle Income Countries (LMICs) oft gar keine Netto-Null-Ziele. Für diese Länder untersuchten die CCDRs Szenarien, in denen die aggregierten Treibhausgasemissionen um 70 % reduziert werden. Vier Schlüsselbereiche zur Erreichung der Klimaziele wurden untersucht: **Dekarbonisierung** der Stromerzeugung, **Elektrifizierung** von Konsum und Produktion, **Effizienzsteigerung** und Verstärkung natürlicher CO₂-**Senken**. Erneuerbare Energien seien bereits heute an den meisten Orten billiger als fossile Energieträger, ihre Nutzung werde jedoch aus institutionellen und politökonomischen Gründen behindert. Technologische Unsicherheit stellten kurzfristig kein Hindernis dar. Der **Export von Wasserstoff** (und seinen Derivaten) mache in allen Szenarien nur einen **geringen Anteil** aus. In vielen LMICs seien die Produktion und der Export erneuerbarer Energien aufgrund fehlender Investitionen, Skills, Landverfügbarkeit und Netze begrenzt. Die Diversifizierung der Lieferketten sei wichtig. Das Computable General Equilibrium (CGE)-Modell der Weltbank ließe in Szenarien mit reduzierten Treibhausgasemissionen insgesamt sogar ein **beschleunigtes Wachstum** (bis zu 3,3 Prozentpunkte des BIP) erwarten. Die dafür notwendigen jährlichen **Investitionen** lägen in den UMIC bei 1 % bis 2 % des BIP, in den LMIC aber eher bei 8 % bis 10 %. Vieles könne aus privaten Quellen finanziert werden, aber auch Zuschüsse aus reichen Ländern müssten eine Rolle spielen.

Abbildung 4: Entwicklung der Stromgewinnungskapazität in Schwellen- und Entwicklungsländern (Folie Hallegatte)



Kienberger konzentrierte sich auf **Europa**, das seiner Meinung nach hinter seinen eigenen Absichtserklärungen zurückbleibt. Dabei könnten die Klimaziele mit einer entsprechenden Forschungs-, Technologie- und Innovationspolitik (RTI) den Technologieexport vorantreiben. Das **Potenzial für erneuerbare Energien** sei in Europa (im Gegensatz vor allem zu Afrika, Australien und Lateinamerika) mangels Flächen, Akzeptanz und Infrastruktur **begrenzt**. Wind spiele dabei eine größere Rolle als Solarenergie (im Gegensatz zum globalen Süden). Theoretisch könne die Produktion auf 50.000 TWh pro Jahr gesteigert werden. Das EU-Szenario 2050 rechne jedoch nur mit einem Ausbau auf 6.400 TWh, auch weil die entsprechenden **Netze fehlten**. **Wasserstoff** und seine Derivate würden voraussichtlich um **2040** die **Gewinnschwelle** gegenüber Erdgas erreichen (u. a. dank des EU-Emissionshandelssystems), aber **Strom** werde immer **effizienter und billiger** bleiben. Entgegen der landläufigen Meinung glichen sich **Sonne und Wind in Europa saisonal** recht gut aus, allerdings seien dichtere Stromnetze notwendig, um kurzfristige Schwankungen (z. B. Dunkelflauten) zwischen den Regionen auszugleichen und den Bedarf an Langzeit-Energiespeichern (Wasserstoff) zu reduzieren. Auf jeden Fall werde Europa aufgrund der zuvor erwähnten eingeschränkten Potenziale an erneuerbarer Energie nicht ganz ohne **Wasserstoffimporte** auskommen. Zudem könnten aus thermodynamischen und prozesstechnischen Gründen und aus Gründen der Technologieverfügbarkeit, auch wenn Strom billiger werde, **nicht alle Energieträgerbedarfe elektrifiziert** werden. Insbesondere Bedarfe der Industrie sowie gewisse Bereiche der Mobilität (Landstreckenflüge, Schiffverkehr) werden auch zukünftig gasförmige und flüssige Energieträger benötigen. Diversifizierung sei notwendig. Für die österreichische und europäische Industrie ergäben sich Chancen (z. B. bei Wärmepumpen, bei klimaneutraler Industrietechnologie). Wichtig sei, von Ankündigungen zu Umsetzungen zu kommen, um entsprechende Technologien global anbieten zu können.

Abbildung 5: Weltweites Potenzial erneuerbarer Energiequellen (Folie Kienberger)



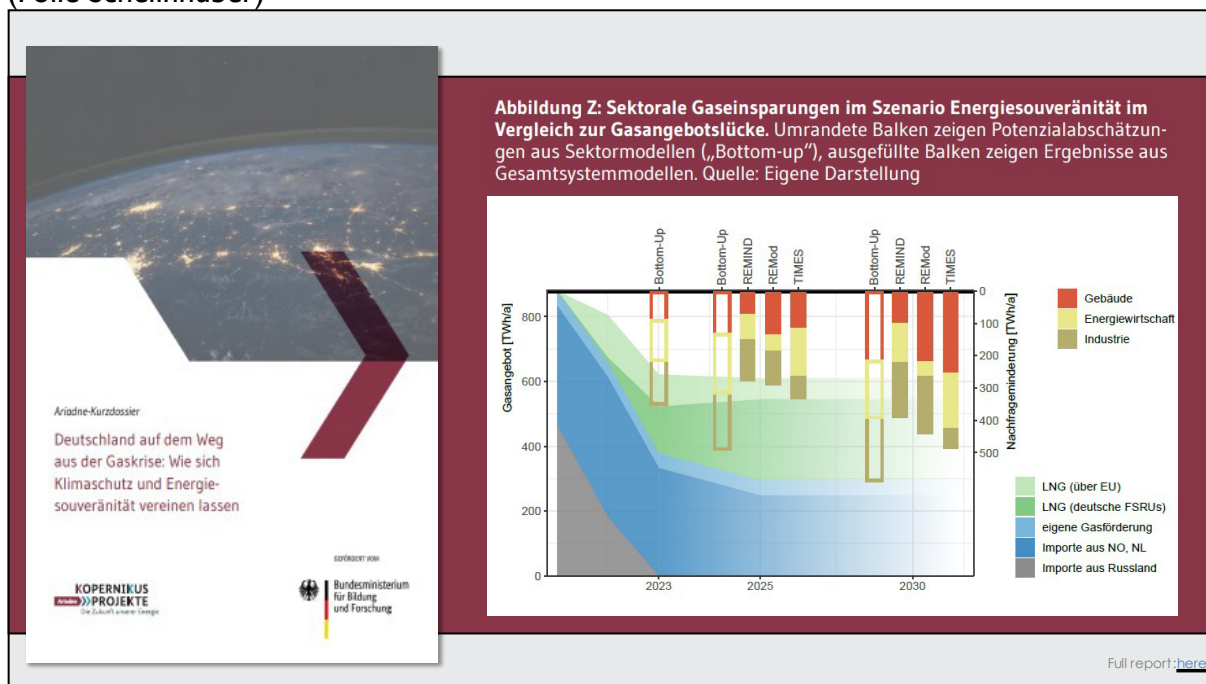
In der **Diskussion** wurden Fragen zu **Afrika** aufgeworfen. Beispielsweise müsse Namibia (in einem Projekt mit Deutschland) das Vierfache seines eigenen Energiebedarfs (in Form von Wasserstoff oder Ammoniak) exportieren. Ohne faire Risikoteilung und Regierungsfähigkeit werde dies zu einem Rückschlag führen. 800 Millionen Menschen (vor allem in Afrika) hätten noch keinen **Zugang zu Elektrizität**. Hier seien Mini-Grids eine Übergangslösung, die später in nationale Netze integriert werden können. Der Export von Energie ist u. a. aufgrund von **Umwandlungs- und Transportverlusten** kompliziert. Für die betroffenen Länder sei es sinnvoller, **(Vor-)Produkte** mit hohem Energiegehalt wie Erzpellets oder Stahl herzustellen und zu exportieren. In Südasien hingegen fehle es aufgrund der Bevölkerungsdichte an Flächen für erneuerbare Energien. Hier könnten kombinierte Photovoltaik-Anlagen (PV) und Landwirtschaft einen Game Changer darstellen. Eine weitere Frage betraf die Migration, die helfen könne, Know-how zu exportieren. **Atomenergie** wurde am Rande als eher **teuer und unflexibel** erwähnt. Abschließend wurde die CGE-Makro-Modellierung der Weltbank näher erläutert. Dabei wird versucht, anstelle von vereinfachenden Makroannahmen realistische sektorale Erfahrungen mit den typischen Imperfektionen der „Middle Income Countries“ einzubeziehen.

1.3 „Raus aus Gas“ – klimafreundlich, kosteneffizient, realistisch?

Am [22.9.2023](#) diskutierte Hans Joachim **Schellhuber** (IIASA) mit Georg **Brasseur** (ÖAW). Gouverneur **Holzmann** stellte die Frage nach der optimalen Reihenfolge der notwendigen Maßnahmen zur Energiewende am Beispiel des **Ausstiegs** aus dem **Erdgas**. Einerseits galt Erdgas zumindest bis vor Kurzem noch als relativ CO₂-arme **Brückentechnologie** zu biogenen Gasen. Andererseits beschleunige die kriegsbedingte **Energiekrise** das Streben nach Gasunabhängigkeit. **Schellhuber** interpretierte die weltweiten Extremwetterkatastrophen als erste Anzeichen dafür, dass die Menschheit das Holozän, also das **lebensverträgliche Klimafenster**, verlasse. **Klimakipppunkte** bzgl. Gletschern, Biosphäre und Zirkulationsmustern unterstrichen die Notwendigkeit des 1,5°C-Ziels. Angesichts der zunehmenden Wetteranomalie müsse die **Dekarbonisierung und Demineralisierung** der Wirtschaft beschleunigt werden. Als Beispiel nannte Schellhuber den **Bausektor**, der 40 % der weltweiten Treibhausgasemissionen verursache. Durch **Holzbauweise**, integriert mit nachhaltiger Landnutzung und entsprechendem Siedlungswesen, könnten urbane Gebäude jedoch zur globalen **Kohlenstoffsenke** beitragen. Mit dieser „Wald-Bau-Pumpe“ könne das Klima nach dem Temperatur-Höhepunkt durch die Entnahme von CO₂ wiederhergestellt werden, indem etwa 500 Milliarden Bäume gepflanzt und 2 Milliarden Wohneinheiten aus Biomasse gebaut würden. Er verwies auf die jüngsten Fortschritte beim Ausbau **erneuerbarer Stromquellen**, wozu unter anderem die stark gestiegenen Preise für fossile Energieträger beigetragen hätten. Auch weltweit wachse der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung rasch und werde 2022 bereits 14 % betragen, während der Anteil von Erdgas mit 23 % weiterhin noch nahe am Zehnjahresdurchschnitt liege. **Wärmepumpen** seien auch bei kaltem Wetter doppelt so effizient wie Gasheizungen. **E-Fuels** seien dagegen sehr ineffizient, nur begrenzt produzierbar und in Bereichen vorzuziehen, in denen derzeit keine Alternativen zur Verfügung stehen, wie z. B. bei Langstreckenflügen. Der **Ausstieg** aus der Nutzung von **Erdgas** solle nach den gängigen Szenarien noch **vor 2050** erfolgen, wenn auch erst nach Kohle und Öl.

Eine zirkuläre Bioökonomie, in der sich „No-Tech“ und „Hi-Tech“ ergänzen, würde dazu beitragen. Als Energiequellen stünden Sonnenenergie und Erdwärme zur Verfügung, die im Grunde nichts anderes sind als die natürliche Kernfusion und Kernspaltung.⁵

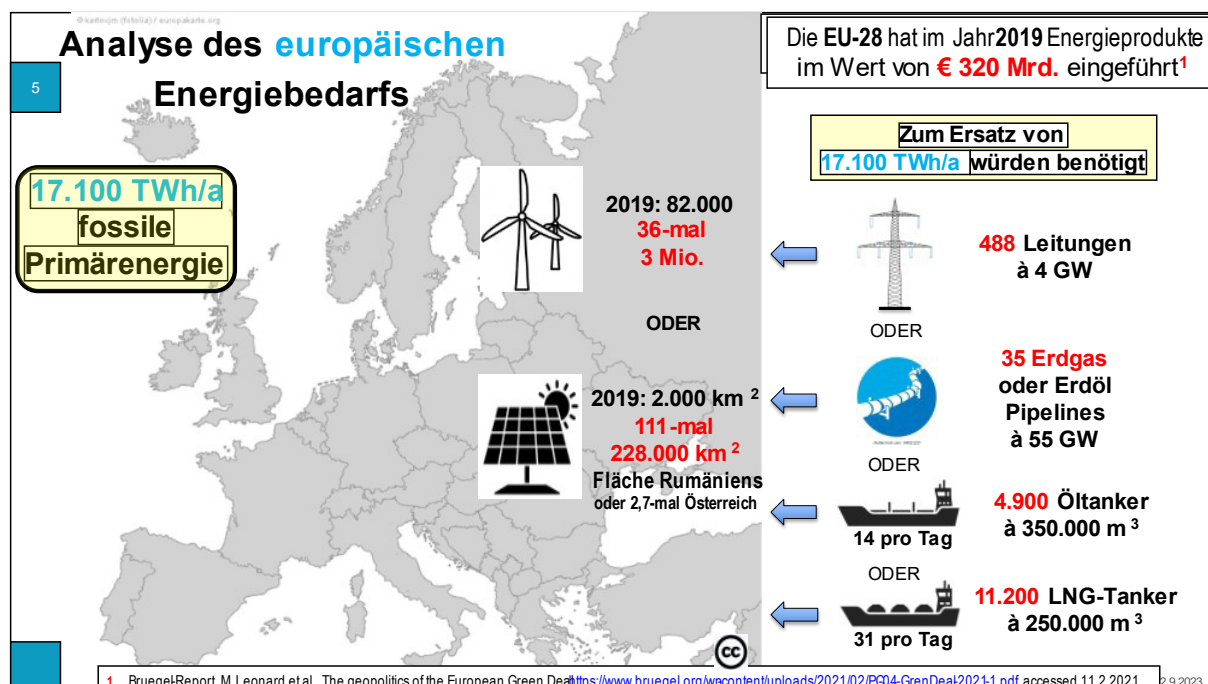
Abbildung 6: Mittelfristiges Potenzial zur Nachfrageminderung von Erdgas in Deutschland (Folie Schellhuber)



Brasseur bezeichnete die vorherrschende Ausrichtung der **EU-Klimapolitik** als **ideologisch** fehlgeleitet, da sie die Industrie überfordere und einen **illusorisch** hohen Ausbau der erneuerbaren Energien in der EU anstrebe. Sein **Lösungsvorschlag** für die europäische Energiewende basiert (1) auf **Energieeinsparung**, (2) dem Ausstieg aus der **Kohle**, (3) der Reduzierung des Einsatzes von **Erdöl und Erdgas** in der Industrie, ohne die **Wettbewerbsfähigkeit** zu gefährden, (4) der Erzeugung von **erneuerbarer Energie** (Wind, Sonne) vor allem an optimalen und „friedenssichernden“ Standorten außerhalb Europas und dem **Import** vor allem in Form von „grünen“ synthetischen Kohlenwasserstoffverbindungen (**E-Fuels**), die aus „grünem“ Wasserstoff und aus der Luft abgeschiedenem CO₂ gewonnen werden. (5) Der in Europa **erzeugte Ökostrom** solle nur Verbraucher:innen versorgen, die keine andere Wahl haben, sowie Elektrolyseure, die grünen Wasserstoff für die **Industrie** erzeugen. (6) Erdgasheizungen in **Haushalten** sollten durch eine Kombination von **Erdgas-Brennstoffzellen** (und später synthetischen Methan-Brennstoffzellen) mit Wärmepumpen ersetzt werden.

⁵ Neben dem natürlichen Kernzerfall gibt es noch zwei andere Ursachen der Erdwärme: Rest-Wärme aus der Entstehungszeit der Erde und Reibungswärme durch Materialbewegung.

Abbildung 7: Bereitstellung des europäischen Energiebedarfs durch unterschiedliche Energieträger (Folie Brasseur)



In der Diskussion wurde kritisiert, dass Schellnhuber wenig auf das konkrete **Thema Gas fokussiert** habe, welches aber aus dessen Sicht mehr taktische als strategische Bedeutung habe. Brasseur hingegen wurde vorgeworfen, **die EU-Politik zu überzeichnen**, welche vielmehr auch auf Energieeinsparung und Kohleausstieg abziele und sehr wohl die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie und mögliche Verlagerungseffekte berücksichtige (z. B. durch Gratiszuteilung von Emissionsrechten bzw. CO₂-Grenzausgleich). Zudem sei einerseits Energieautarkie kein Ziel der EU-Politik, andererseits seien die Bedingungen für mehr **ausländischen Ökostrom** (Weltfrieden, Klimaklub, Nord-Süd-Finanzströme) kaum realistischer als jene für mehr Eigenproduktion. Die errechnete Größenordnung der für die EU bis 2050 benötigten erneuerbaren Energie sei weit übertrieben. So sei der **Primärenergiebedarf** nicht die relevante Vergleichsgröße, da Strom aus erneuerbaren Quellen wesentlich effizienter ist. D. h. die Differenz zwischen Primär- und Endenergiebedarf ist aufgrund **geringerer Umwandlungs- und Transportverluste** wesentlich geringer als bei fossilen Energieträgern. Deshalb sei nur ein Bruchteil des von Brasseur angegebenen Ausbaubedarfs von drei Millionen Windrädern oder einer Fläche von ganz Rumänien entsprechenden Solaranlagen tatsächlich notwendig. Entsprechend niedriger sei folglich auch der Rohstoffbedarf. Jedoch ist fraglich, ob diese Sichtweise den Einbruch der europäischen Grünstromproduktion durch Dunkelflauten im 24-Stunden-Zyklus oder über Wochen ausreichend berücksichtigt. Bei der Nutzung grüner speicherbarer Energieträger zur Deckung der Stromlücken sei eine zweifache Umformung erforderlich: Zunächst wird europäischer Ökostrom in synthetische Kraftstoffe umgewandelt; anschließend erfolgt die Rückverstromung in Backup-Kraftwerken.⁶ Im Vergleich zum Import synthetischer Kraftstoffe aus Regionen mit mindestens doppelten Energieerträgen aus Sonne und Wind führe dies zu einem signifikant höheren Primärenergiebedarf.

⁶ Aufgrund der geringen Jahresbetriebsstunden müssten Backup-Kraftwerke dauerhaft subventioniert werden.

Andererseits gäbe es ein großes Entwicklungspotenzial an Energiespeichersystemen für heimischen Überschussstrom. Zudem müsse die stetig wachsende Energieausbeute durch **technischen Fortschritt** bei Wind & PV sowie effizientere Nutzung der Endenergie (Energieeinsparung) berücksichtigt werden. Die **Energieeffizienz** batteriebetriebener Elektrofahrzeuge sei wesentlich höher gegenüber Fahrzeugen, die mit grünen E-Fuels, einschließlich Brennstoffzellen, betrieben werden. Die **Verluste** durch mehrfache Umwandlung und Transport würden selbst die höheren Stromernten außerhalb Europas überkompensieren. Auch die Wärmeversorgung der Haushalte sei mit ökostrombetriebenen **Wärmepumpen** effizienter. Deshalb habe die Industrie wohl auch die Produktionsversuche mit Erdgas- und Methan-**Brennstoffzellen** weitgehend eingestellt.

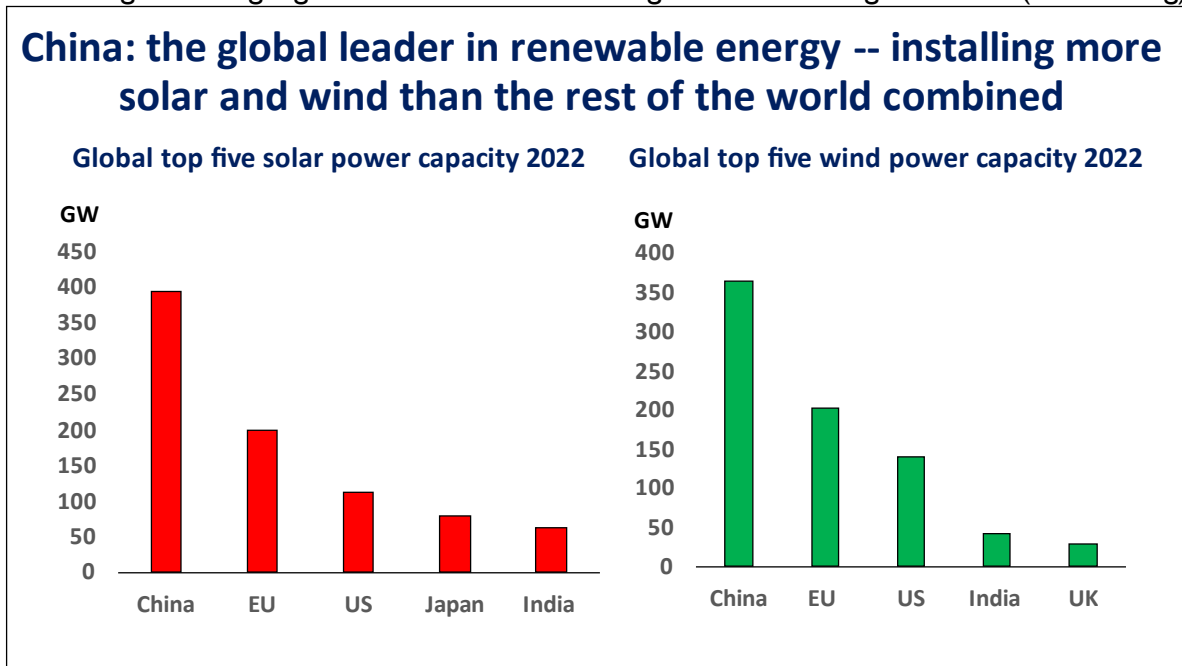
I.4 Die Finanzierung der grünen Transformation: Zusammenarbeit zwischen China und Europa

Am [6.11.2023](#) diskutierten Niko **Korpar**, wissenschaftlicher Mitarbeiter am wiiw, Jun **Ma**, Vorsitzender des Green Finance Committee der China Society for Finance and Banking (per Videoaufnahme), und Xiaodong **Wang**, leitende Energiespezialistin der Weltbankgruppe im Rahmen der von der OeNB organisierten Conference of European Economic Integration 2023 in Wien (CEEI).

Ma wies auf die wichtige Rolle **Chinas** als weltweit **größter Produzent** von erneuerbaren Energien, Elektrofahrzeugen, Batterien sowie Solar- und Windkraftanlagen hin. Chinesische Unternehmen profitierten aufgrund des großen Inlandsmarkts von **Skaleneffekten**, was zu niedrigeren Stückkosten führe. Niedrigere Produktionskosten würden zu einem höheren Wohlstand der Verbraucher:innen in den Ländern, die aus China importieren, führen. Seiner Ansicht nach sei das **geopolitische Risiko**, das mit der Abhängigkeit von chinesischen Importen verbunden ist, übertrieben. Zwischen China und Europa bestehe ein Potenzial für die **Zusammenarbeit** bei der Entwicklung von Klimatechnologien, insbesondere für Industrie und Landwirtschaft. Dies könne zu **billigeren grünen Technologien** führen, die auch exportiert werden könnten, wodurch der globale Prozess der Dekarbonisierung beschleunigt würde.

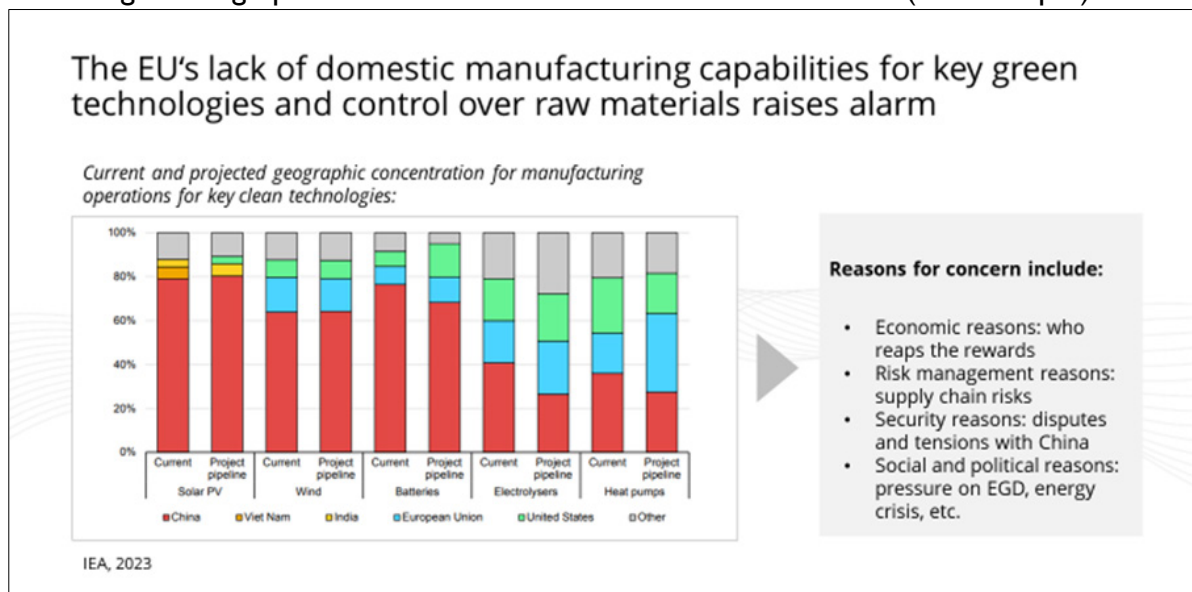
Wang betonte, dass China gleichzeitig der **größte Kohleverbraucher** und der größte Produzent **erneuerbarer Energien** weltweit sei. China stehe vor der Herausforderung, die Dekarbonisierung auf einem niedrigeren Einkommensniveau und schneller als die EU oder die USA durchzuführen. Um sein politisches Ziel zu erreichen, die Emissionen bis 2030 auf ein Minimum zu reduzieren und bis **2060 eine Netto-Null-Emission** zu erreichen, müsse China die Energieeffizienz verbessern, den Strommix durch die Abschaffung der Kohlequote umweltfreundlicher gestalten, den Industrie- und Verkehrssektor dekarbonisieren und einen gerechten Übergang für 6 Millionen Beschäftigte in der Kohleindustrie gewährleisten, indem es diesen gering qualifizierten Menschen im Landesinneren Umschulungsmaßnahmen anbietet. Die **Weltbank** unterstütze China seit den 1990er-Jahren bei der Energiewende, vor allem bei der Entwicklung und Umsetzung **marktbasierter Reformen** als Ergänzung zu Chinas eher dirigistischen Politikansätzen.

Abbildung 8: Erzeugung von Solar- und Windenergie im Ländervergleich 2022 (Folie Wang)



Korpar stellte fest, dass die globale Klimapolitik in der Vergangenheit stärker auf die geografische Verteilung der Emissionen ausgerichtet gewesen sei. In dieser Hinsicht mache China immer noch den größten Anteil der **importierten Emissionen** der EU aus. Die EU sei bestrebt, ihre nationale Klimaagenda umzusetzen und gleichzeitig ihre energieintensiven Industrien zu schützen, aber sie sei bei der Entwicklung neuer grüner Technologien hinter China zurückgefallen. Die USA seien durch den **Inflation Reduction Act** ein kritischer Faktor in den Klimabeziehungen zwischen der EU und China geworden. Die Reduzierung der Emissionen solle das Hauptziel gemeinsamer politischer Bemühungen sein, was den Import billiger grüner Technologien aus China oder anderen Ländern bedeuten könnte. Auf seine empirische Arbeit beziehend, kam Korpar zum Schluss, dass der europäische **CO2-Grenzausgleichsmechanismus** (CBAM) keine signifikanten makroökonomischen Auswirkungen haben werde.

Abbildung 9: Geographische Konzentration in Clean-Tech-Industrien (Folie Korpar)



In der anschließenden Diskussion wurde übereinstimmend festgestellt, dass **CBAM** wahrscheinlich beträchtliche **indirekte und dynamische Auswirkungen** habe, indem es CO₂-Minderungsmaßnahmen in Drittländern wie China fördere, während rein statische Analysen die Auswirkungen eher unterschätzten. Es wurde die Frage aufgeworfen, inwieweit Importe aus China nach vollständiger Internalisierung der externen Transportkosten teurer sein würden. Es herrschte Einigkeit darüber, dass die erheblichen Treibhausgasemissionen des **Agrarsektors** auch in China und Indien eine Herausforderung für die Dekarbonisierung darstellten. Darüber hinaus wurden Stadtplanung und **Raumordnungsgesetze** als Politikbereiche mit potenziell großem Einfluss auf die Emissionsreduzierung in China und anderswo genannt. Schließlich könne ein pragmatischer Ansatz für die **EU-Automobilindustrie** das „verhängnisvolle Dreieck“ vermeiden, in dem nur zwei der drei folgenden Optionen verwirklichtbar seien: ein Handelskrieg, eine Verwässerung der Klimapolitik oder eine erhebliche Schrumpfung der EU-Autoindustrie.

I.5 Chancen und Grenzen von E-Fuels

Am [20.11.2023](#) diskutierten Jürgen **Roth** Vorstandsvorsitzender der eFuel Alliance Österreich, Sigrid **Stagl**, Professorin für Umweltökonomie und -politik an der Wirtschaftsuniversität Wien und Falko **Ueckerdt**, leitender Wissenschaftler am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (per Videoaufnahme).

Ueckerdt betonte, dass E-Fuels zwar **Chancen** böten, da sie fossilen Energieträgern ähnelten und somit die **bestehende Technologie** und Infrastruktur weiter genutzt werden könne. Das nähere die Vision, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weiter mit E-Fuels betrieben werden könnten, die aus Ländern mit reichlich erneuerbarer Energie importiert werden. Dies würde die Transformationslast auf die Angebotsseite, ins Ausland und in die Zukunft verschieben. E-Fuels würden jedoch an drei **harte Grenzen** stoßen: Erstens seien E-Fuels derzeit praktisch nicht verfügbar und würden perspektivisch **knapp** bleiben.

Zweitens würden E-Fuels immer **teurer** als fossile Energieträger und klimafreundlichere Optionen bleiben, auch wenn die Kosten sinken würden. Drittens sei die **Effizienz** von E-Fuels sehr gering, was die Kosten erhöhe und die Investitionsunsicherheit verstärke, wodurch der Hochlauf erschwert würde. Daten der Internationalen Energieagentur würden zeigen, dass sämtliche **global angekündigten Projekte** für E-Fuels nur etwa **10 % des deutschen Bedarfs** decken könnten, und auch das nur in Sektoren wie **Flugverkehr, Schifffahrt und Chemie**, die langfristig nicht auf Kohlenwasserstoffe verzichten können. Der **Straßenverkehr** werde voraussichtlich nicht genügend E-Fuels haben, zumal alternative Technologien wie Elektromobilität und Wasserstoff-Lkws bereits verfügbar seien und zunehmend kostengünstiger würden. Die Herstellung von E-Fuels sei aufwendig, da hierbei die Logik der Physik umgekehrt werde: Man nutzt **wertvollen Strom**, um Kohlenwasserstoffe herzustellen, die dann wieder verbrannt werden. Ökonomisch sinnvoll sei dies nur in unverzichtbaren Bereichen mit hoher **Zahlungsbereitschaft**, wie im Flugverkehr, wo es bereits Quoten für die Nutzung von E-Fuels gäbe. Sollten E-Fuels im Straßenverkehr subventioniert werden, würde dies den **Klimaschutz ausbremsen**, da es die Entwicklung hin zu batterieelektrischen Fahrzeugen verlangsamen und die E-Fuels für den Flugverkehr verknappten würde. Der **heutige Pkw-Bestand** sei jedoch an fossile Brennstoffe „verloren“. Die Herausforderung bestehe nun darin, den zukünftigen Bestand an Verbrennern zu minimieren, indem wir E-Autos fördern.

Laut **Roth** sei E-Fuels ein Sammelbegriff für unterschiedliche **synthetische Energieträger**, in denen Sonnen- oder Windenergie gespeichert ist. Dazu gehören u. a.: grünes Methan, E-Methanol, E-Ammoniak, E-Benzin, E-Diesel oder E-Kerosine. Erst wird Wasserstoff aus Wasser durch Elektrolyse mithilfe von Ökostrom gewonnen. Dann wird CO₂ (oder Stickstoff) aus Industrieabluft oder der Atmosphäre mit Wasserstoff in einen flüssigen Energieträger umgewandelt. Die Prozesse seien aus seiner Sicht **klimaneutral**, wenn bei der Nutzung nur so viele Treibhausgase entstehen, wie bereits aus der Luft entnommen wurden. Zu den **Vorteilen** von E-Fuels zähle deren Energiedichte, Lagerfähigkeit, Transportfähigkeit und die Verwendbarkeit bestehender Systeme zur Verteilung und Anwendung. E-Fuels seien beliebig **ausbaubar**, da die Nachfrage das Angebot schaffe. Gemeldete Projekte seien kein Indikator für Potenziale. Die auf der Erde zur Verfügung stehenden **Potenziale** an erneuerbarer Energie seien mehr als ausreichend für die Versorgung der Menschheit. Laut Fraunhofer Institut läge das langfristig umsetzbare Power-to-Liquid-Potenzial (PtL) bei jährlich 57.000 Terawattstunden, mehr Energie als die globale Erdölförderung im Jahr 2019. Außerhalb Europas seien 38 **Länder** mit relevanten Potenzialen von mindestens 100 TWh pro Jahr identifiziert worden. Megaprojekte gäbe es auf allen **Kontinenten**. Die **EU importiere** zwei Drittel der gebrauchten (fossilen) Energie. Europa könne die benötigte **Energie** nicht in Form von Strom oder Wasserstoff einführen, da es keine interkontinentalen Hochspannungsleitungen, Wasserstoff-Pipelines oder Tanker gäbe. Es müsse daher einen wesentlichen Teil in Form von flüssigen E-Fuels einführen. Das **Stromsystem** stoße deutlich schneller an Grenzen als der Ausbau von E-Fuels. **Strom sei knapp**. Auch Österreich sei **Nettoimporteur** und die Schere zwischen Produktion und Verbrauch gehe aufgrund fluktuierender erneuerbarer Energieerzeugung auseinander. Importe und Exporte könnten wegen zeitlicher und geografischer Divergenz nicht saldiert werden. **Energiewende** bedeute noch viel mehr Stromverbrauch in der Industrie, Wärmepumpen, E-Mobilität, etc. Immer mehr Länder bräuchten Stromimporte. Ein ganzheitlicher Ansatz müsse auch die Rohstoffknappheit und die **geopolitischen** Interessen der EU berücksichtigen. Durch batteriebetriebene E-Mobilität würde zudem eine neue Abhängigkeit von **China** geschaffen. Kolportierte **Preisangaben** seien veraltet, denn die Gestehungskosten sanken durch Skaleneffekte der Massenproduktion signifikant. Ökostromkosten sanken an guten Standorten (insbesondere im globalen Süden) auf einen Bruchteil, da etwa dreifache Betriebsstunden von Solaranlagen für die Elektrolyse ein Drittel der Kosten pro Einheit bedeute. Sie würden sich auch physikalisch je nach Wirkungsgrad unterscheiden. Der behauptete **Effizienzvorteil** von E-Autos gegenüber E-Fuels sei nicht nachvollziehbar. Es gäbe auch bei Strom Leitungsverluste, Umwandlungsverluste (v. a. bei kalorisch erzeugtem Strom) und Speicherverluste; die Reichweiten seien oft niedriger als angegeben und E-Autos signifikant schwerer, was den Verbrauch pro Kilometer erhöhe. Wenn E-Fuels an günstigen Standorten produziert werden (z. B. Windparks mit über 6.000 Stunden Einsatz im Jahr) gliche dies den thermischen Verlust im Verbrennungsmotor aus. Der heutige **Pkw-Bestand** mit Verbrennungsmotoren sei klimapolitisch nicht verloren, da neben den verschiedenen E-Fuels auch andere klimaneutrale Kraftstoffe zur Verfügung stünden, nämlich Biokraftstoffe und HVO (Hydriertes Pflanzenöl). E-Mobilität und E-Fuels würden einander ergänzen und zusammen die größte und schnellste CO₂-Reduktion herausholen. Die Verfügbarkeit steche dabei oftmals die Effizienz. Luftfahrt und Schifffahrt seien als E-Fuels-Pioniere denkbar ungeeignet, da sie einem starken Preiswettbewerb ausgesetzt seien. Durch die Einbeziehung des Straßenverkehrs könne die Nachfrage steigen und die Kosten sinken. **Österreich** könne seine **Klimaziele** 2030 und 2040 ohne E-Fuels nicht erreichen, so Roth.

Im Verkehrsbereich sein eine Lücke von 4,4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten zu schließen. Mit einem **Technologiemix** inklusive verschiedenen E-Fuels würden wir die **Klimaziele** sozial- und standortverträglich, billig und vor allem rascher erreichen. Eine **politische Entscheidung** für oder gegen Technologien sei nicht sinnvoll, da viel Innovationspotenzial noch nicht ausgeschöpft sei. Fehle die **Akzeptanz**, etwa weil die sozialen Folgen nicht mitbedacht werden, könne die Energiewende scheitern.

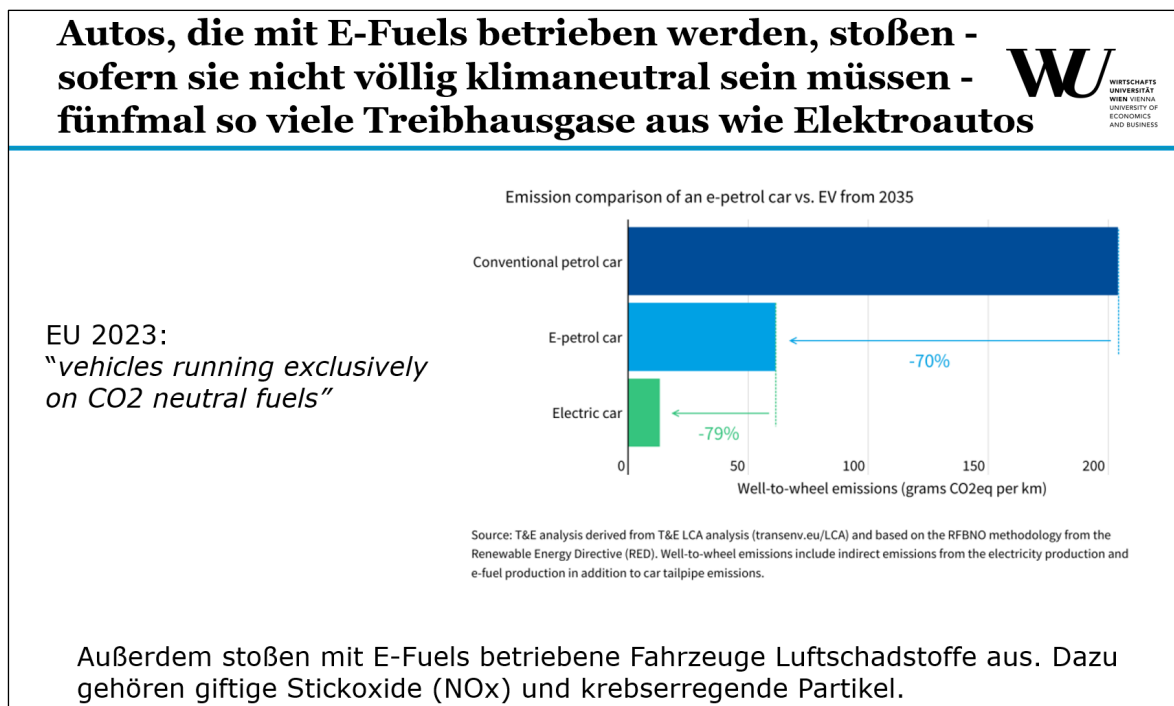
Abbildung 10: Wie E-Fuels produziert werden (Folie Roth)



Stagl hob zunächst die **Chancen** von E-Fuels hervor: (1) geringere Kohlenstoffemissionen, (2) Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur, (3) Energiespeicherung von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen und (4) geringere Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Die **Grenzen** von E-Fuels seien: (1) geringere Energieeffizienz in der gesamten Energieumwandlungskette, (2) Kosten, die jedoch mit technologischem Fortschritt und Massenproduktion sinken könnten, (3) Ressourcenverbrauch (Wasser und erneuerbarer Strom), (4) Umweltauswirkungen je nach Produktionsprozess (z. B. NO_x-Emissionen). Obwohl **Elektrofahrzeuge** in der Regel **effizienter** seien, böten **E-Fuels Potenzial** für die Nutzung bestehender Infrastruktur größere Reichweiten und spezielle Umweltziele. Laut dem **Net-Zero-Szenario** der IEA spielten bis 2030 Elektrifizierung und Biokraftstoffe eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung des Straßenverkehrs. Danach werde **Elektrifizierung** dominieren, wobei Strom bis 2050 drei Viertel des Energieverbrauchs im Straßenverkehr ausmachen werde. Emissionsarmer Wasserstoff werde aus Regionen mit guten erneuerbaren Energiressourcen in synthetische Kraftstoffe umgewandelt, wobei die notwendige CO₂-Abtrennung durch den Mangel an Speicherstätten erschwert werde. Mit **E-Fuels** betriebene Autos stießen fünfmal mehr Treibhausgase aus als Elektroautos. **Biokraftstoffe** böten derzeit die größten potenziellen Vorteile je nach Strommix.

Die CO₂-Abscheidung und H₂-Produktion für E-Fuels würde viel Strom erfordern, dessen Emissionsminderungspotenzial von klimapolitischen Maßnahmen in der EU abhängt, meinte Stagl. E-Fuels aus fossilem CO₂ (meist Erdgas) hätten die schlechteste Klimabilanz. Die **Luftfahrt**, die **Schifffahrt** und Teile der **Industrie** sollten vorrangig mit E-Fuels versorgt werden, sodass bis 2050 kaum E-Fuels für den Straßenverkehr zur Verfügung stehen würden. Die Kraftstoffindustrie versuche jedoch, die Luftfahrt und die Schifffahrt davon zu überzeugen, dass auch der Straßenverkehr E-Fuels nutzen sollte, um die Produktion und Verfügbarkeit zu erhöhen und die Kosten zu senken. Eine US-Studie widerspräche dem und zeige, dass Windenergie gegenüber Ethanol enorme Kosten-, Emissions- und Flächenvorteile hat. Stagl bekennt sich zur Technologieoffenheit, die jedoch dynamisch und mit Blick auf Pfadabhängigkeiten betrachtet werden müsste. **Technologieoffenheit** bedeute, politische Maßnahmen neutral gegenüber verschiedenen Technologien zu gestalten, um Innovation und Wettbewerb zu fördern. Gleichbehandlung könne jedoch die Einführung von Elektrofahrzeugen verlangsamen, da Investitionen und Ressourcen auf mehrere Technologien verteilt würden, irreführende Marktsignale gesendet würden und die Infrastrukturentwicklung fragmentiert werde. Bei verzögerter Einführung von Elektrofahrzeugen bestehe die Gefahr eines technologischen Lock-ins zugunsten von Verbrennungsmotoren. Die Politik solle daher marktorientierte Innovationen fördern, ohne Prioritäten und Ressourcen zu zersplittern. **Strukturkonservative Visionen** seien nicht realisierbar. Wie bei jedem Strukturwandel sei es eine politische Entscheidung, die **Verlierer** des Wandels zu kompensieren. Niedrige Stromkosten, hohe Effizienz von Elektroautos sowie die Priorisierung von E-Fuels für die Industrie trügen zur **Wettbewerbsfähigkeit** Europas bei. Die sozial-ökologische **Transformation des Verkehrs** umfasse neben der Elektrifizierung und alternativen Kraftstoffe auch den Ausbau des öffentlichen Verkehrs, eine aktive Mobilität (Radfahren), die Verlagerung des Güterverkehrs, verkehrsreduzierende Raumplanung, Forschung und Innovation sowie eine CO₂-Bepreisung und Emissionsstandards.

Abbildung 11: Emissionsvergleich verschiedener Antriebsarten für Pkws (Folie Stagl)



In einer Replik bezweifelt **Roth** die Plausibilität der genannten **Szenarien**, zumal der Netzausbau für eine vollständige Elektrifizierung bis 2030 nicht ausreiche. Zudem würden Elektroautos über den gesamten **Lebenszyklus** betrachtet mehr CO₂-Ressourcen binden. Er vermutet auch, dass **fossile Kraftstoffe** mangels Nachfrage eher billiger als teurer würden, während in einigen Teilen der Welt die Nachfrage steigen werde. Dass umgekehrt die **Stromkosten** sinken würden, widerspräche der Wahrnehmung, dass sie tatsächlich steigen, vor allem wegen der Netzkosten. Die **Technologieneutralität** sei de facto noch nicht angekommen, da seit zehn Jahren „electric only“ gelte.

I.6 Funktionieren „Verbrennerverbote“? Folgen für Wettbewerbsfähigkeit und Weltklima

Am [14.12.2023](#) diskutierte Hans-Werner **Sinn**, emeritierter Präsident des ifo Instituts, mit Angela **Köppl**, Senior Economist am WIFO.

Sinn meinte, die Politik setze **utopische Klimaziele**. Die CO₂-Emissionen der EU seien von 1990 bis 2020 um 31 % gesunken, deutlich stärker als es das Kyoto-Ziel von 20 % vorsah. Auch das ambitioniertere deutsche Vergleichsziel von 40 % sei 2020 und 2021 gerade erfüllt worden. Allerdings läge dies daran, dass niedrig hängende Früchte zuerst gepflückt worden seien, die Wirtschaft in der Corona-Krise erstarrt gewesen und vor allem die „schmutzige“ DDR-Industrie untergegangen wäre. Die restlichen 60% des Rückgangs in nur gut 20 Jahren, nämlich bis 2045 zu erreichen, sei unmöglich und gefährliche Träumerei. Österreich habe sein wesentlich bescheideneres Ziel für 2020 mit 6,5 % gerade erreicht, strebe aber nun einen viel steileren Pfad an. Das Land wolle das **Netto-Null-Ziel** sogar 2040 erreichen, fünf Jahre vor Deutschland bzw. zehn Jahre vor der EU. Die deutsche und europäische Politik setze dabei immer wieder auf **Verbote**: Ölheizungsverbot ab 2024 (unter strengen Bedingungen), „Verbrenner“-Aus bis 2035, Kohleausstieg 2030 bis 2038, Erdgasausstieg bis 2045. Dieser Neo-Dirigismus erinnere ihn an Zentralverwaltungswirtschaften.

Im Jahr 2020 betrage der Anteil der erneuerbare Energieträger am deutschen Energieverbrauch nur 16,5 %.⁷ Nicht einmal die Hälfte davon sei Wind- und Sonnenstrom, aber nur dieser Strom könne hochskaliert werden. Es sei jedoch undenkbar, diesen Anteil in nur zwanzig Jahren von 8 % auf 83,5 % zu erhöhen, wie dies Regierungsbeschlüsse implizieren würden. Sinn kritisierte auch den deutschen Ausstieg aus der **Kernenergie**. Weltweit seien 434 Kernkraftwerke in Betrieb, die meisten gebe es in den USA, Frankreich und China; 62 würden neu gebaut, weitere 111 seien in Planung und 326 in Vorplanung.

Das „**Verbrenner-Verbot**“ der EU sei laut Sinn der Höhepunkt einer immer strenger gewordenen EU-Verordnung für den durchschnittlichen Flottenverbrauch. 2015 hätten die erlaubte CO₂-Emission eines Verbrennungsmotors einem Dieseläquivalent von 5 Litern je 100 km entsprochen; 2021 wären nur mehr 3,5 Liter erlaubt gewesen; Der Grenzwert für 2030 sei 2018 erst auf 2,2 Liter und mit dem Green Deal auf nur mehr 1,8 Liter Dieseläquivalent festgelegt worden. Ungeachtet technischer Sicherheitsbedenken würden sich die Vorgaben nur mit hinreichend vielen Elektroautos in der Flotte erfüllen lassen.

⁷ Anmerkung Autor: Strom macht nur etwa ein Fünftel des deutschen Energieverbrauchs aus, im restlichen Energieverbrauch spielen Erneuerbare eine untergeordnete Rolle (<https://energiestatistik.enerdata.net/strom/anteil-elektrizitaet-endverbrauch.html>).

Laut EU-Formel würden diese nämlich als Null-Emissionsfahrzeuge gelten, trotz der vielen europäischen Kohlekraftwerke. Im Jahr 2023 habe die EU gar ein „Totalverbot der Verbrenner“ ab 2035 beschlossen, worauf bereits die CO₂-Verordnungen hinausliefen. Wie absurd das sei, zeige eine Studie von Joanneum Research im Auftrag von ADAC und ÖAMTC aus dem Jahr 2019, die den CO₂-Ausstoß eines Pkw der Golf-Klasse alternativ mit Elektro- oder Verbrennungsmotor verglichen hat. Demnach könne das reine Elektro-Auto seinen leichten Klimavorteil erst spät ausspielen: nach 127.500 km im Vergleich zum Benziner und erst nach 219.000 km im Vergleich zum Diesel, also nach der durchschnittlichen Lebensdauer eines Pkws von 180.000 km. Ein Grund für das schlechte Abschneiden der Elektro-Fahrzeuge sei der hohe Kohleanteil im deutschen **Strommix** sowie die treibhausgas-intensive **Batterieproduktion**, die sich als „Klima-Rucksack“ in der Bilanz niederschlägt. Eine neuer ADAC-Studie 2022 mit optimistischeren Annahmen über grüne Energie und Umstellung fossiler Stromproduktion auf Gas ließe frühere Vorteile von Elektromotoren erwarten. Doch nach Sinns Ansicht seien diese Annahmen angesichts der Reaktivierung der Kohlekraftwerke und der Abkehr von russischen Gasimporten schon wieder überholt. Für die **Autoindustrie** folge eine doppelte Dezimierung. So sei der Fahrzeugbau in Deutschland (Stand Oktober 2023) seit 2018 um 21 % gesunken, weil die wohl verbotsaffine ausländische Konkurrenz bei E-Autos besser positioniert gewesen sei. Bei den Neuzulassungen von Elektroautos in Deutschland hätten 2022 zwei Modelle von Tesla vor dem Fiat 500e geführt, erst dann gefolgt von zwei VW-Elektromodellen. Durch die Schwäche der Automobilindustrie sei die Produktion im verarbeitenden Gewerbe seit 2018 in Deutschland um 9 % gesunken (zugleich in Österreich hingegen um 7 % gestiegen). Europa wolle bei der Reduktion des Kohlendioxid-Ausstoßes **Vorreiter** sein, jedoch hätte nur eine Minderheit von 61 der 191 Unterzeichner des Pariser Abkommens, die für ein Drittel der globalen Emissionen verantwortlich sind, eine quantitative Emissionsbeschränkung akzeptiert. **China und Indien** würden derzeit hunderte Kohlekraftwerke bauen. China emittiere mehr CO₂ als alle OECD-Länder zusammen. 2020 habe es eine dem Gesamtstand Deutschlands vergleichbare Kohlekraftwerkskapazität geschaffen. Bundeskanzler Scholz habe in Dubai 2023 die Gründung eines **Klimaklubs** verkündet, der 31 % vom CO₂-Ausstoß der Welt abdecke. Der Schritt sei richtig, aber viel mehr Länder müssten folgen.

Ein **unilaterales Verbot** der Ölverbrennung führe nur zur Verlagerung der CO₂-Emissionen aus der EU. Das nicht mehr nachgefragte Öl werde nämlich zu sinkenden Preisen einfach nur in anderen Ländern der Welt verbrannt. Als Beleg führt Sinn den linearen Trend der weltweiten Ölförderung an, der sich trotz riesiger nachfragebedingter Schwankungen der Ölpreise als absolut stabil erweise (Siehe Abbildung 12). Zwar sei der Ölpreis während regionaler Rezessionen gefallen, jedoch fand der Marktausgleich nicht durch eine schrumpfende Ölförderung statt. Stattdessen würden andere Länder bei fallenden Preisen jene freigegeben Mengen aufbrauchen.

Erst die **Corona-Krise** ab 2020, als alle Länder wegen der Industrieflaute weniger Öl kauften, hätte zu einer Verringerung der Extraktion fossiler Brennstoffe geführt. Die Krise hätte als natürliches Experiment gezeigt, dass eine weltweit koordinierte Nachfrageeinschränkung die Erdölländer zwingen könne, ihre Förderung zu verringern und damit den Klimawandel zu verlangsamen. Eine solche Begrenzung könne nur durch flächendeckend globalen **Emissionshandel** bewirkt werden, ohne nennenswerte Outsider-Länder, die opportunistisch aufgrund fallender Ölpreise mehr Öl verbrauchen.

Außerdem, so Sinn, werde für die Erzeugung des zusätzlichen Stroms, den politisch forcierte Elektroautos und Wärmepumpen benötigen, perspektivisch wieder relativ mehr **Braunkohle** verbrannt.

Der dadurch entstehende Kohlenstoff gelange zusätzlich in die Luft, denn Braunkohle werde nicht international gehandelt und deshalb auch nicht anderen Ländern entzogen. Paradoxerweise erhöhe so ein Verbrenner-Verbot im Endeffekt sogar den weltweiten CO₂-Ausstoß. Daran ändere auch der europäische Emissionshandel nichts. Zwar verdränge zusätzlich verbrauchte deutsche Braunkohle anderswo in der EU Kohle. Darunter sei aber auch international gehandelte Steinkohle, die nun in anderen Weltgegenden vermehrt verbrannt werde. Per saldo steige also trotz des Emissionshandels der weltweite CO₂-Ausstoß durch mehr Elektromotoren.

Sinn wandte sich auch gegen die Aussage, dass mit Kohlestrom betriebene **Wärmepumpen** klimafreundlicher als Gasheizungen seien.⁸ Abgesehen vom obigen Braunkohle-Argument werde übersehen, dass der Energiegehalt von Gas zur Hälfte aus dem Wasserstoff kommt, der im Gas mit den Kohlenstoffatomen verbunden sei. Bei einem Wirkungsgrad der Wärmepumpe von 3 und des Kohlekraftwerks von 0,4 ergebe sich ein Gesamtwirkungsgrad von 1,2. Eine Gasheizung indes habe aufgrund des Wasserstoffanteils mit einem thermischen Wirkungsgrad von mindestens 1 (oder über 1 bei Brennwertkesseln) einen Wirkungsgrad des Kohlenstoffs von mindestens 2. So gesehen sei es wesentlich klimafreundlicher als eine mit Kohlestrom betriebene Wärmepumpe. Noch eklatanter sei der Vergleich mit einer gasbetriebenen Wärmepumpe. Bei einem thermischen Wirkungsgrad von 3 (wie bei strombetriebenen Wärmepumpen) errechnet sich ein Gesamtwirkungsgrad des Kohlenstoffs von etwa 6, unerreichbar für Wärmepumpen, die mit Kohlestrom arbeiten.

Auch sei laut Sinn die Aussage irreführend, dass **Elektromotoren** dreimal so effizient wie Verbrenner seien, weil der Strom wegen des Carnotschen Gesetzes mit einem sehr niedrigen Wirkungsgrad produziert werde. Im Fall von Kohleverstromung sei der Gesamtwirkungsgrad eines Elektromotors das Produkt der beiden Wirkungsgrade des Kohlekraftwerks (0,4) und des Elektromotors (0,8), also etwa 0,32. Ein moderner Dieselmotor schaffe einen deutlich höheren Wirkungsgrad von bis zu 0,45.

Zwar stimme es, dass **China** in einem halben Jahr mehr Solarpaneele errichte, als Deutschland insgesamt habe. Aufgrund seines enormen Energiebedarfs errichte China jedoch auch jährlich mehr Kohlekraftwerke als Deutschland habe.⁹ Solange die zusätzlichen Solarpaneele nicht fossile Brennstoffe ersetzen, gebe es auch keine CO₂-Einsparung.

Sinn versicherte kein Klimaskeptiker zu sein. Er halte den CO₂-Effekt für die größte Externalität der Menschheit. Er halte aber wenig von der Idee des Kohlenstoffbudgets, also einer fixen Gesamtmenge an Kohlenstoff, die die Atmosphäre noch verkraften könne. Ein festes Budget sei genauso willkürlich, wie das damit zusammenhängende 1,5-Ziel, das ohnehin schon überschritten sei, ohne dass die Welt verpuffe.¹⁰

⁸ Anmerkung Autor: Kohle deckte 2022 etwa ein Drittel des deutschen Strombedarfs, Erneuerbare weniger als die Hälfte (https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html). Jedoch kann der fossile Stromanteil bei jeder Grenzeinheit zusätzlich benötigtem Strom deutlich höher sein, insbesondere bei Verbrauchsspitzen oder Dunkelflauten.

⁹ Anmerkung Autor: Laut einer Studie des Centre for Research on Energy and Clean Air hat China in der ersten Jahreshälfte 2024 die Entwicklung neuer Kohlekraftwerke stark gebremst (<https://energyandcleanair.org/publication/china-puts-coal-on-back-burner-as-renewables-soar/>).

¹⁰ Anmerkung Autor: 1,5-Grad-Ziel soll den menschengemachten globalen Temperaturanstieg durch den Treibhauseffekt im 20-Jahresmittel auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen, gerechnet vom Beginn der Industrialisierung. Vorerst hat die Welt erst etwa ein Jahr lang diesen Wert überschritten. Für eine Zielüberschreitung bräuchte es also noch 19 weitere Messjahre über 1,5°C (<https://climate.copernicus.eu/copernicus-june-2024-marks-12th-month-global-temperature-reaching-15degc-above-pre-industrial>).

Es sei richtig, den Kohlenstoff langsamer zu extrahieren, nicht aber, große Teile davon für immer ungenutzt im Boden zu belassen. Jedenfalls sei der Beweis dafür, dass das sinnvoll sei, noch nicht erbracht worden.

Statt der Verbotspolitik der EU und der deutschen Bunderegierung plädierte Sinn für eine Verlangsamung der Extraktion fossiler Brennstoffe, durch eine **pretiale Lenkung**, also Preise für Kohlenstoff, die sich aufgrund eines Emissionshandels mit schrumpfenden Zertifikatmengen von alleine bilden. Die Lasten für die Wirtschaft seien bei gleicher CO₂-Reduktion sehr viel geringer, weil die Emittenten nach kostenminimierenden Tauschmöglichkeiten suchen könnten. Da seien sich alle Wirtschaftsforschenden einig.

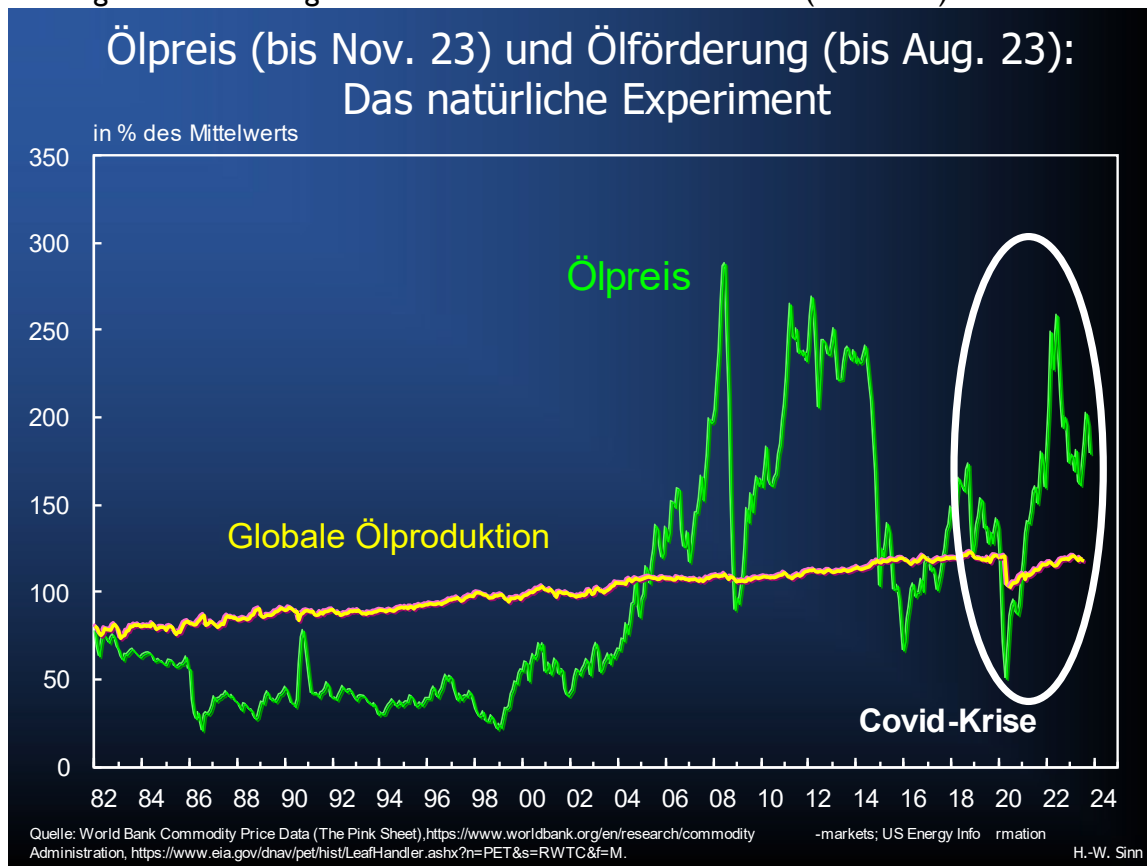
Das Hauptproblem bei der Klimapolitik bleibe für Sinn der Unilateralismus, also der Umstand, dass die meisten Emissionsländer gar nicht mitmachten. Die echte Lösung läge deshalb im „**Klimaklub**“ (Nordhaus, 2015).¹¹ Dessen Mitgliedstaaten müssten ambitionierte Klimaziele mit Hilfe eines weltweiten Emissionshandels ansteuern und dabei Nichtmitglieder durch Handelszölle diskriminieren, damit auch sie dem Klub beitreten. Statt symbolischen Ersatzhandlungen solle die EU mit den anderen Großmächten einen solchen Klimaklub gründen. Gelänge dies nicht, sei es sinnlos, die eigene Industrie zu zerstören, indem man auf handelbare Brennstoffe verzichte und sie den Mitbewerbern zukommen lasse. Einseitige Verbrauchsbeschränkungen bei handelbaren Brennstoffen erhöhten nur den Wohlfühlfaktor derer, die die Marktzusammenhänge nicht verstünden.

Wirksame **unilaterale Maßnahmen** beschränkten sich laut Sinn (1) auf den Verzicht eigene, nichtgehandelte Braunkohle abzubauen, (2) die CO₂-Sequestrierung und den Kauf und Schutz von Wäldern bzw. Aufforstung und (3) den Holzbau, der den durch Photosynthese der Atmosphäre entzogenen Kohlenstoff dauerhaft binde und in den Wäldern Platz für neue Bäume schaffe. Zur billigen Energieversorgung biete sich zudem (4) der Wiedereinstieg in die Kernenergie an. Vielversprechend seien Schmelzsatz-Reaktoren mit Thorium, das auf Uran 233 hochgebrütet wird, ebenso wie neue Ansätze der Kernfusion mit Hilfe von Lasern. Schließlich sei auch eine Wasserstoffwirtschaft mit Solarenergie aus Wüsten sinnvoll.

Fast noch wichtiger als diese technischen Möglichkeiten seien laut Sinn ökonomische **Anreizmechanismen**, um die Ressourcenländer zu veranlassen, ihre Fördermengen in die Zukunft zu verschieben. Nur diese Länder seien die Herren des Klimas, nicht die Verbraucherländer. Denn alles, was gefördert werde, gehe irgendwo in die Luft. Zu den Anreizmechanismen gehöre erstens die Umstellung der weltweiten Besteuerungsregeln vom Wohnsitzlandprinzip auf das Quellenlandprinzip, um Ressourcenbesitzer anzuspornen, ihr Vermögen auf der Erde zu investieren und ihre Ressourcen lange in der Erde zu belassen. Zweitens bräuchten Ressourcenländer sichere politische Verhältnisse, um den Anreiz zu beseitigen, fossile Energieressourcen noch schnell vor einem Regimewechsel zu verkaufen.

¹¹ 2008 nannte Sinn seinen ähnlichen Vorschlag „Super-Kioto“.

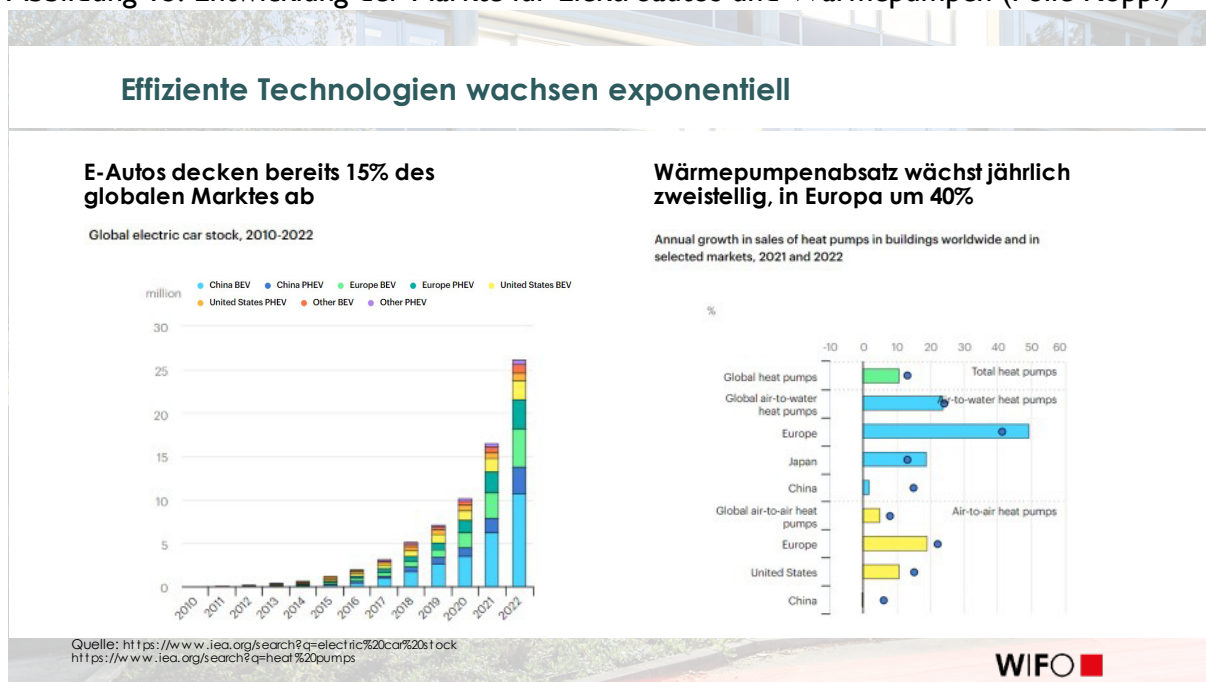
Abbildung 12: Entwicklung des Rohölmarkts von 1982 bis 2023 (Folie Sinn)



Köppl verweist in ihren Ausführungen darauf, dass das zeitliche Auseinanderklaffen von regulatorischen Maßnahmen und Klimaeffekten eine Herausforderung für die Politik darstelle. Diskussionen zu Maßnahmen und Instrumenten zur Erreichung der Klimaziele seien daher wichtig, insbesondere wie die Reduktion des CO₂-Ausstoßes im Mobilitätsbereich gelingen kann. Angesichts der spürbaren Klimawandelfolgen und der damit verbundenen ökonomischen Risiken und Kosten, sowie der geopolitischen Risiken fossiler Brennstoffe wachse der Druck, Alternativen zu einer fossil betriebenen Mobilität zu suchen. Der motorisierte **Individualverkehr** verursache zudem neben Treibhausgasen auch Lärm, Feinstaub und Staus. Die EU-Regulierung sehe vor, dass Neuzulassungen von Pkws ab 2035 emissionsfrei sein müssten, wobei **E-Fuels** erlaubt seien. E-Fuels seien verführerisch, aber ihre energieintensive Herstellung und die Verfügbarkeit von grünem Strom problematisch. **Elektrofahrzeuge** würden laut Bloomberg als kosteneffizienteste Alternative mit wachsendem Marktanteil gelten, doch Herausforderungen wie die Verfügbarkeit kritischer Materialien und Ladeinfrastruktur blieben bestehen. Aber Diskussionen über einzelne Technologien und Regularien griffen zu kurz. Ein grundsätzlicher Perspektivenwechsel im Mobilitätssystem sei erforderlich, um den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Strategien würden das **Vermeiden** unnötiger Mobilität, das **Verlagern** auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel und das **Verbessern** der Effizienz und Elektrifizierung umfassen. Die Auswahl bestmöglicher klimapolitischer Instrumente bliebe umstritten. Ein breiter Konsens unter KlimaökonomInnen bestehe jedoch darin, dass **Carbon Pricing** ein effizientes und effektives Mittel sei, um externe Kosten der Umweltverschmutzung zu internalisieren. Weltweit gebe es laut Weltbank bereits 73 implementierte CO₂-Bepreisungssysteme, die etwa ein Viertel der globalen CO₂-Emissionen abdeckten.

Carbon Pricing allein reiche laut Köppl nicht aus. **Politökonomisch** sei der optimale Preis oft nicht mehrheitsfähig und habe Verteilungseffekte, was ein durchdachtes Design erfordere. **Ökonomisch** stelle sich die Frage nach dem richtigen CO₂-Preis angesichts der hohen Komplexität des Klimasystems, der Unsicherheiten und Risiken bezüglich der Schadenskurven sowie des zeitlichen Abstands zwischen Vermeidungskosten und Klimafolgen. Zudem könnten CO₂-Preise Forschung und **Innovation** nicht ausreichend fördern, was zu Carbon-Lock-in-Effekten durch heutige Investitionen in langlebige Infrastruktur führe. Marktbarrieren wie das Eigentümer-Mieter-Dilemma seien weitere Herausforderungen. Angesichts der Dringlichkeit der Herausforderung wachse das Verständnis, dass ein **Instrumentenmix** notwendig sei, um die Ziele zu erreichen. Dabei werde Carbon Pricing in einen umfassenden Policy-Mix eingebettet, wie im „Fit for 55“-Paket der EU, das die Bepreisung von Treibhausgasen, die Förderung der Transformation (Innovation Fund), die Festsetzung von Zielvorgaben sowie Standards und unterstützende Maßnahmen umfasst. Rezente Forschung (Emil Dimanchev, Christopher R. Knittel; Energy Economics, 2023) zeige, dass ein Policy-Mix aus Carbon Pricing und anderen Regulativen nahezu **kostenoptimal** sein kann, da er es politischen Entscheidungsträgern ermögliche, die unterschiedlichen Vorteile der einzelnen Maßnahmen zu nutzen. Die länderspezifischen Zugänge bei klimapolitischen Maßnahmen seien unterschiedlich: In den USA fördere der Inflation Reduction Fund die Transformation, während sich in China und der EU27 der Energiemix der Elektrizitätserzeugung verändere. Weltweit überträfen **Investitionen** in grüne Energie (1,8 Billionen USD) jene in braune Energie (1,1 Billionen USD). Die erneuerbaren Energien würden aufgrund der Energiekrise und der Klimapolitik boomen, effiziente Technologien exponentiell wachsen. Elektroautos würden bereits 15 % des globalen Marktes abdecken, und der Absatz von Wärmepumpen wachse jährlich zweistellig, in Europa sogar um 40 %. Zusammenfassend sei der Klimawandel ein **globales** Problem und nicht lokal lösbar. Das **Pariser Abkommen** stelle einen Rahmen dar, in dem jeder Staat nationale Beiträge (NDCs) bekanntgeben müsse: Regelmäßige Bestandsaufnahmen würden für Transparenz sorgen und Peer Pressure sollte zu immer ambitionierteren NDCs führen. Die aktuellen Pläne seien jedoch unzureichend, um Klimarisiken zu begrenzen. Es bedürfe der Nutzung verschiedener Instrumente und eines **Perspektivenwechsels** in der Mobilität.

Abbildung 13: Entwicklung der Märkte für Elektroautos und Wärmepumpen (Folie Köppl)



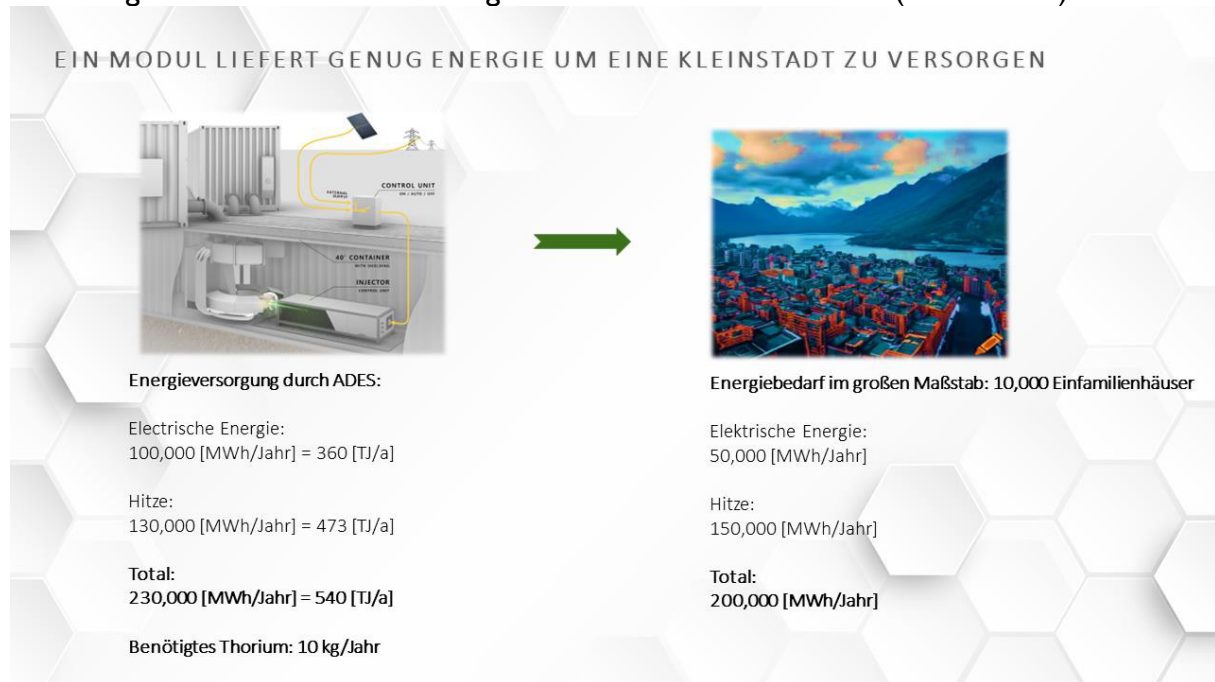
I.7 Energiewende: Neue Ansätze in der Kernkraft-Technologie (Thorium etc.)

Am [17.1.2024](#) diskutierten Mario J. **Müller**, wissenschaftlicher Leiter der Emerald Horizon AG, Eileen **Langegger**, Lehrbeauftragte der TU Wien und Graz im Bereich Kernenergie und Wolfgang **Liebert**, Leiter des Instituts für Sicherheits- und Risikowissenschaften an der BOKU. Das Unternehmen Emerald Horizon, ein 2019 gegründetes kleines Startup aus Graz, entwickelt technische Lösungen für eine möglichst CO₂-freie Energieversorgung. **Müller** betont die Bedeutung von **Partnerschaften** mit wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Partnern sowie Förderstellen, da das Thema Energieversorgung zu komplex sei, um es allein anzugehen. Emerald Horizon wachse kontinuierlich und sei bestrebt, innovative Lösungen gegen den Klimawandel, insbesondere im Bereich der Kernenergie, zu entwickeln. Die **Kernenergie** biete eine hohe Energiedichte. Dabei sollten neue Technologien verwendet werden, die über die klassischen Konzepte der Atomkraft hinausgehen. Das Unternehmen verfolge mit der Idee eines beschleunigergetriebenen Energiesystems (ADES Accelerator Driven Energy Source), eine Technologie, die vom Nobelpreisträger und ehemaligen CERN-Direktor Carlo Rubbia inspiriert worden sei. Die Technologie nutze einen **Teilchenbeschleuniger**, um Kernenergie aus **Thorium** freizusetzen, anstatt sich auf eine Kettenreaktion zu verlassen.

Moderne Entwicklungen hätten die Größe und Effizienz von Teilchenbeschleunigern erheblich verbessert, was diese Technologie erst ermöglichen würde. Ziel sei es, ein kompaktes Energiesystem zu entwickeln, das in einem 40-Fuß-Container seriell/industriell produziert und unterirdisch installiert werden könne. Die Kernenergie werde aus dem Thorium in einem flüssigen **Salzmedium** freigesetzt, das Temperaturen von 700 bis 900 Grad Celsius erreiche. Diese Wärme wird dann klassisch in Strom, Wasserstoff oder andere Energieformen umgewandelt.

Thorium sei ein Material mit hoher **Energiedichte**, das weltweit in großen Mengen vorkommt, auch in Österreich. Ein 40-Fuß-Container mit 400 kg Thorium könnte für 20 Jahre Energie liefern. Nach dieser Zeit wären die **Spaltprodukte** minimal und könnten durch den Beschleuniger weiterbearbeitet werden, um ihre Halbwertszeit zu reduzieren, was die Entsorgung vereinfachen würde. Diese Technologie biete vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, von der Versorgung von Krankenhäusern bis hin zur Energieversorgung von Schiffen. Ein Beispiel veranschauliche die Energieeffizienz: Ein Supertanker mit 2,8 Millionen Barrel Öl habe das gleiche Energieäquivalent wie 440 kg Thorium. Müller appellierte dafür, innovative Energielösungen zu entwickeln, um eine lebenswerte Zukunft für kommende Generationen zu sichern.

Abbildung 14: Potenzielle Anwendung von Thorium-Kleinreaktoren (Folie Müller)

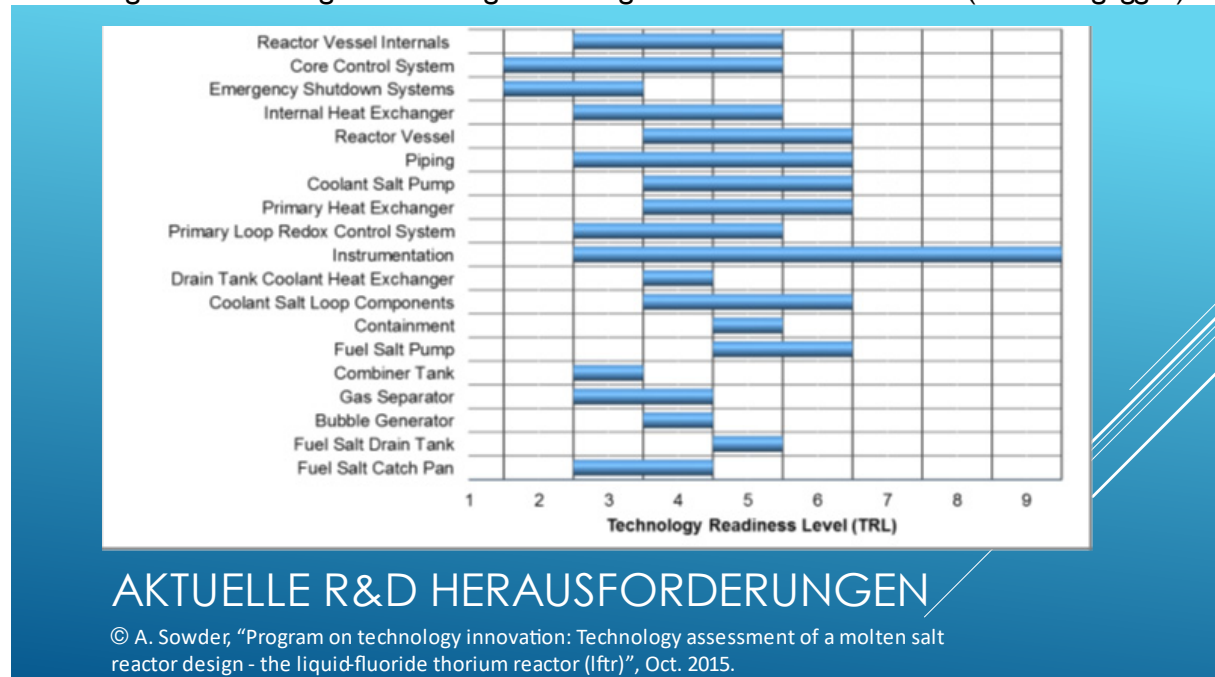


Langegger betonte, dass sie sich als grundsätzliche Befürworterin der Kernenergie in der schwierigen Lage befinde, sich zum vorgestellten Projekt **kritisch** äußern zu müssen. Man unterscheide verschiedene Arten von **Flüssigsalzreaktoren**, darunter „Single Fluid“, „Dual Fluid“, „Two-Fluid-Systeme“ und 2 Molten-SaltfastReaktor“. Diese verschiedenen Designs hätten jeweils ihre eigenen **Vor- und Nachteile**, die bei der Entwicklung und Implementierung berücksichtigt werden müssten. Es gebe subkritische und kritische Systeme. Mindestens zwanzig Unternehmen würden an Thorium-Technologien arbeiten. Ein wichtiger Aspekt sei die Frage der **Proliferation** (Weitergabe von Massenvernichtungswaffen), bzw. wie sichergestellt werden könne, dass Materialien nicht für missbräuchliche Zwecke verwendet werden.

Die Zugabe von Uran-238 zur Reaktormischung, um die Nutzung von Uran-233 für Waffen zu verhindern, sei ein Schritt in diese Richtung. Jedoch muss darauf geachtet werden, wie diese Materialien behandelt und entsorgt werden. In Bezug auf Materialfragen seien Themen wie **Korrosionsbeständigkeit und Strahlungsresistenz** relevant, insbesondere im Hinblick auf die Materialien, die in direktem Kontakt mit der Salzschnmelze stünden, wobei Nickel eine wichtige Rolle spiele. **Radioaktiver Abfall** sei ein weiteres Thema, wobei die Verwendung von Thorium die Entstehung von Plutonium und langfristigem Abfall reduzieren könne.

Das Management des radioaktiven Abfalls müsse trotzdem integriert werden. In Bezug auf die **Wirtschaftlichkeit** führe der Einsatz von flüssigem Brennstoff zu einer effizienteren Ressourcennutzung, wobei Materialforschung und Brennstoffentwicklung die Hauptkostenpunkte darstellten. Besondere Aufmerksamkeit erfordere die Anreicherung geplanter Salzschnmelzen, um reines Lithium-7 zu erhalten und gefährliche Bildung angereicherter **Tritiums** im Reaktor zu vermeiden. Aufgrund der Komplexität der Sicherheitsanalysen für Flüssigsalzreaktoren mangle es noch an Richtlinien und Validierungscodes für diese Technologien. Dies unterstreiche die Notwendigkeit weiterer **Forschung und Investitionen**, um Fortschritte in diesem Bereich zu erzielen.

Abbildung 15: Technologischer Reifegrad Flüssigfluorid-Thorium-Reaktor (Folie Langegger)



Liebert zählt sechs Ambivalenzen der Kernenergie auf. (1) Die **Sicherheits-Nutzen-Ambivalenz**: Kernenergie biete eine hohe Leistungsdichte und benötige im Vergleich zu fossilen Brennstoffen nur geringe Mengen. Allerdings berge sie ein bisher unbekanntes Katastrophenpotenzial. Die nukleare Kettenreaktion müsse stets kontrolliert werden, und es gebe radioaktiven Zerfall in Spaltprodukte. Unfälle wie in Fukushima würden die Risiken verdeutlichen, selbst wenn ein Reaktor abgeschaltet sei. Radioaktive Stoffe könnten freigesetzt und je nach Wetterlage verbreitet werden. (2) Die **zivil-militärische Ambivalenz**: Die Kerntechnologie habe ihre Wurzeln im militärischen Atomwaffenprogramm der 1940er-Jahre.

Materialien wie hochangereichertes Uran und Plutonium hätten sowohl zivile als auch militärische Anwendungen. Die Proliferationsresistenz in der heutigen Kernenergie existiere nicht, was die Weiterverbreitung von Kernwaffen begünstigen könnte. (3) Die Ambivalenz **Kurzfristgewinn versus Langzeitfolgen**: Die begrenzte Reichweite der Brennstoffe führe zu Überlegungen, alternative Energiequellen zu nutzen. Die langfristige Problematik betreffe die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle über Jahrhunderttausende hinweg. (4) Die **sozioökonomische Ambivalenz**: Relative geringen Betriebskosten stünden extrem hohe, und in Europa explodierende, Errichtungskosten gegenüber.

Hinzu kämen Folgekosten der Brennstoffgenerierung. In der in DDR-Zeiten ausgebeuteten Uranlagerstätte Wismut würden sie sich auf über 6 Milliarden EUR belaufen. Auch die Folgekosten von schweren Reaktorunfällen seien nicht ausreichend eingepreist. Das französische Institut für Strahlenschutz rechne – je nach Radioaktivitätsfreisetzung – zwischen 120 und 450 Milliarden EUR aus. Zudem würde Kernenergie bisher nur durch massive staatliche Subventionen ermöglicht. In Westdeutschland seien laut dem Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung e. V. (DIW) bisher geschätzte 54 Milliarden EUR öffentlicher Mittel aufgewendet worden (ungefähr 2.000 EUR pro installiertem Kilowatt). (5) Die **sozialökologische Ambivalenz**: Die Treibhausgasemissionen bei der Anlageerrichtung seien erheblich, wie auch im Bergbau für Uran, obwohl diese heute noch geringer sei als bei der Photovoltaik. (6) Die **Ambivalenz der Versprechungen**: Seit über 20 Jahren werde eine nukleare Renaissance propagiert, begleitet von Versprechungen hinsichtlich Sicherheit, Proliferationsresistenz und Wettbewerbsfähigkeit. Kritische Fragen zur Sicherheit, Kosten, Proliferationsgefahr und Entsorgung seien daher unerlässlich bei Weiterentwicklungen. Transparenz und Technikfolgenabschätzung sollten frühzeitig erfolgen, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Liebert ging dann auf das **konkrete Projekt** von Emerald Horizon (ADES) ein. Fehlende wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Konzeptdesign würden auf mangelnde **Transparenz** und Nachvollziehbarkeit hindeuten. So seien die aktuellen großen Versprechungen nicht wirklich unabhängig überprüfbar. Es gäbe sehr viele offene Fragen: zum **Systemtyp** des Reaktorkonzepts (schnell oder thermisch), zur Wahl der Salzschnmelze, zur Auslegung der Kühlkreisläufe und zum Konzept der Neutronenquelle. Ohne Antworten darauf seien wissenschaftliche Diskussionen und Bewertungen kaum möglich. **Thorium** komme zwar doppelt so häufig in der Erdkruste vor als Uran, aber die reale Abbaubarkeit im Vergleich zu Uran sei entscheidend. Daher sei Thorium am Spotmarkt signifikant teurer. Die seit Jahrzehnten diskutierte Umstellung auf Thorium erfordere auch die Machbarkeit von Reaktoren mit guten Brüttraten, denn der notwendige Spaltstoff sei eigentlich Uran-233. Ein weiterer kritischer Punkt sei die Problematik der **Nachwärme**, die zur Überhitzung der Salzschnmelze führen kann, was für die verwendeten Materialien kritisch sei. Salzschnmelzreaktoren hätten spezifische **Rückkopplungseffekte** hinsichtlich der Reaktivität, welche nicht für alle Systemzustände gesichert negativ sei, was dringend erforderlich wäre. Die **Reaktorsteuerung** von Thorium-Flüssigsalzreaktoren sei deutlich erschwert, da verzögerte Neutronen weniger vorhanden seien als bei Uran-235-Reaktoren, und die **Kritikalitätsgefahr** bei den großen Mengen Uran-233 in der Schnmelze bestehe. ADES bleibe dazu ebenso Antworten schuldig, wie auf Fragen zur Rückhaltung von Radioaktivität (radioaktive Edelgase und Stoffe) in Analogie zu **Barriere-Konzepten** bei heute üblichen festen Brennstoffen. Darüber hinaus müsse geklärt sein, ob eine **Schnellabschaltung** des Beschleunigers möglich und effizient sei und externer Ereignisse bewältigbar seien, um die Sicherheit und Machbarkeit des Konzepts bewerten zu können.

Neue Reaktortypen würden innovative **Sicherheitsmaßnahmen** erfordern. Diese seien für beschleunigergetriebene Flüssigsalzreaktoren noch nicht etabliert. Die Entwicklung solch neuartiger Reaktoren, wie vom Grazer ADES-Konzept angestrebt, würde die Einhaltung strenger **Regelwerke** und Genehmigungsprozesse erfordern. Weder gebe es heute solche spezifischen Regelwerke, noch könne der dazu erhebliche Zeitbedarf ein Realisierungsversprechen von 20 Jahren rechtfertigen. Auch sei offen, was geeignete **Strukturmaterialien** für den Einsatz in einem solchen Reaktor wären (Korrosionsprobleme, Wechselwirkung mit der Salzschnmelze etc.).

Bei der Spaltung von Uran-233 entstünden wie bei Uran-235 naturgesetzlich, also unvermeidbar, sowohl kurz- als auch langlebige **Spaltprodukte**. Denkbare Vorteile von Thorium-Reaktoren hinsichtlich der verbleibenden Mengen an langlebigen Aktiniden müssten durch präzise Simulationsberechnungen belegt werden. Auch die **Proliferationsresistenz** stehe in Frage, da im ADES-Reaktor Uran-233 entstehen würde, das für Atomwaffen geeignet sei. Die kritische Masse sei kleiner als bei Uran-235 und größer als bei Plutonium-239. Die Produktion von Tritium in der Salzschnmelze sei ebenfalls problematisch, da Tritium ein wichtiger Bestandteil von Kernwaffen sei. Die geologische **Endlagerung** langlebiger Spaltprodukte erfordere sichere und stabile Lagerstätten über hunderttausende von Jahren, wobei Radiotoxizität und Mobilität kritische Faktoren seien. Die **Entsorgung** der Salzschnmelze stelle eine ungelöste Herausforderung dar, für die bislang keine etablierten Lösungen existieren würden. Die **modulare Bauweise** klinge vielversprechend, aber solche Konzepte seien schon vor einem halben Jahrhundert propagiert, jedoch bislang nicht realisiert worden. Die Fachwelt sehe die zeitliche Realisierung von beschleunigergetriebenen Reaktoren als äußerst langwierigen Prozess. Zum Versprechen des Beitrags zur Klimaneutralität meint Liebert, dass die angekündigte Serienproduktion bis 2029 vollkommen unrealistisch sei; selbst bei der Entwicklung beteiligte internationale Experten hielten Jahrzehnte Entwicklungsarbeit für erforderlich.

Müller stimmt zu, dass grundsätzlich die Ambivalenzen der Kernenergie vielfältig sei. Was die **Transparenz** betrifft, müssten Start-ups abwägen, wie viel sie kommunizieren, um Investoren anzuziehen, ohne dabei sensible Informationen preiszugeben. Wenn es um **Materialeigenschaften** gehe, sei die Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Partnern entscheidend, um die besten Lösungen zu finden. Es laufe gerade ein Forschungsprojekt zur **Korrosion** und Temperatur in Salz mit der TU-Graz. Dort werde ein **Energiespeicher** auf Basis von heißen Flüssigsalzsysteimen mit hoher Korrosionsbeständigkeit gebaut. Dieser ermögliche die Speicherung von Hochtemperaturwärme in einem 20-Fuß-Container. Diese Technologien könnten auch für Fotovoltaik und Windenergiespeicherung genutzt werden.

I.8 Energiewende: Kernfusion – Hoffnung für die Energiewende?

Am [20.3.2024](#) diskutierten Friedrich **Aumayr**, Vorstand am Institut für Angewandte Physik der TU Wien und Reinhard **Grünwald**, Projektleiter am Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag.

Aumayr wies darauf hin, dass die **Sonne** Energie durch Kernfusion erzeuge, bei der Wasserstoff zu Helium verschmelze. Dieser Prozess setze enorme Energiemengen frei, von dem alles Leben auf der Erde profitiere.

Wenn wir Kernfusion auf der Erde beherrschen könnten, hätten wir eine annähernd unerschöpfliche Energiequelle. Die Fusion biete zahlreiche **Vorteile**: Sie verursache keine CO₂-Emissionen, da keine herkömmliche Verbrennung stattfinde.

Stattdessen fusioniere Wasserstoff zu Helium, wobei das neutrale Heliumgas als „Asche“ entstünde. Fusion sei sicher, es gebe keine Kettenreaktion, und der Reaktor komme zum Erliegen, wenn die Heizung oder der Gasfluss gestoppt würden. Fusion sei grundlastfähig, unterliege keinen Wetter- oder jahreszeitlichen Schwankungen und nutze einen reichlich vorhandenen Brennstoff.

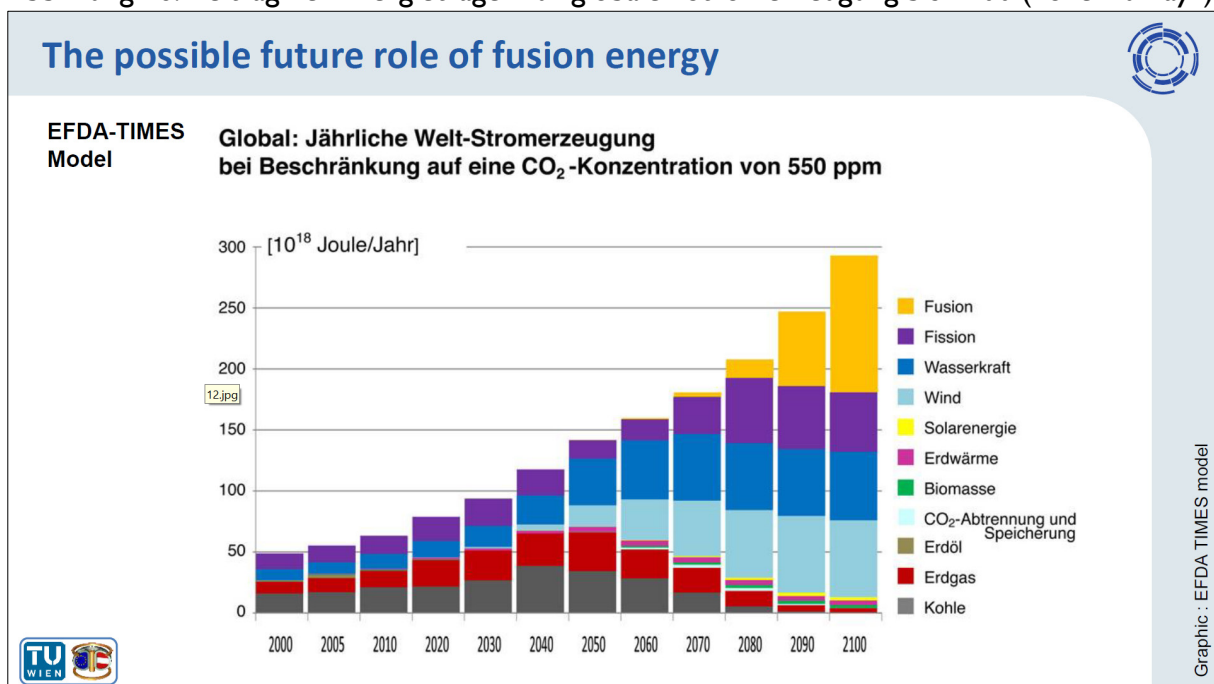
Obwohl wir Fusion noch nicht beherrschen würden, sei sie eine nachhaltige und energieeffiziente Energiequelle. Es brauche dazu Wasserstoffisotope, nämlich das schwere Deuterium, das in geringem Anteil im normalen Wasser vorkomme, und strahlendes Tritium, ein weiteres Wasserstoffisotop, welches aber vom Fusionsreaktor selbst aus Lithium erzeugt werde. Im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken benötige die Kernfusion viel **weniger Brennstoff**. Ein großes kalorisches Kraftwerk mit 3 GW thermischer Leistung müsste 2,7 Millionen Tonnen Kohle pro Jahr verbrennen; für dieselbe Energiemenge benötige die Kernspaltung 25 Tonnen Uran, die Kernfusion nur 350 Kilo Deuterium-Tritium. Leider sei die Fusion von Deuterium und Tritium auf der Erde nicht so einfach wie in der Sonne, da wir die extremen Bedingungen, wie sie im Sonneninneren herrschen, nicht exakt reproduzieren könnten. Dennoch hätten Wissenschaftler:innen einen historischen Durchbruch erzielt: In den USA sei eine Fusionsenergie von 3,15 Megajoule aus einem mit Deuterium und Tritium gefüllten Pellet freigesetzt worden. Für die Kernfusion müssten die Kerne sehr nahe zueinander gebracht werden. Auf der Erde benötige man dafür **enorme Temperaturen** in der Größenordnung von 100 Millionen Grad Celsius. Diese hohen Temperaturen seien notwendig, um die elektrische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Kernen zu überwinden und die starke Wechselwirkung zu ermöglichen. Die Sonne hingegen komme mit etwa 15 Millionen Grad Celsius aus, da sie durch ihren eigenen Druck die Fusion aufrechterhalten könne. Zusätzlich helfe der quantenmechanische Tunneleffekt. Um die Fusion zu ermöglichen, müssten die Teilchen immer wieder kollidieren, wofür ein Einschluss des **Plasmas** und hohe Temperaturen erforderlich seien. Plasma sei der vierte Aggregatzustand der Materie. Bei hohen Temperaturen würden sich die Kerne und Elektronen voneinander trennen, sodass eine Suppe geladener Teilchen entstünde – positiv und negativ geladen, aber insgesamt elektrisch neutral. Dieses Plasma sei im sichtbaren Universum weit verbreitet, nicht aber auf der Erde. Es gebe zwei Möglichkeiten, um zu verhindern, dass Plasma entweiche. Beim **Magneteinschluss** würden starke Magnetfelder verwendet, um geladene Teilchen zu fangen und zu halten. Der **Trägheitseinschluss** basiere auf der Massenträgheit. Man verwende Laser oder andere Energiequellen, um das Plasma zu erhitzen und zusammendrücken und damit für kurze Zeit zu stabilisieren. In den letzten Jahren hätte die Trägheitsfusion einen Durchbruch erreicht und die magnetische Fusion einen neuen Weltrekord verzeichnet. Trägheitsfusion nutze einen kleinen, gefrorenen Deuterium-Tritium-Kern, der von **Lasern** beschossen werde. Dies verdampfe die äußere Hülle und komprimiere das Pellet, wodurch hohe Dichte und Temperatur erreicht würden, die zur Fusion führten. Das Pellet halte nur aufgrund seiner Trägheit zusammen, wobei möglichst viel Treibstoff fusionieren würde. Ähnlich funktioniere die Wasserstoffbombe, jedoch erzeuge dort eine Kernspaltungsbombe die notwendige Hitze und Kompression. Die **Amerikaner** würden das Lawrence Livermore National Laboratory betreiben, eine der größten Anlagen zur militärischen Erforschung der Trägheitsfusion. Diese Einrichtung verfüge über 192 Laser, die auf ein winziges Ziel fokussiert würden – ein millimetergroßes Pellet in einer großen Kammer. Die Energie werde indirekt über den Hohlraum auf das Ziel übertragen. Dort sei unlängst ein Energieverstärkungsfaktor von 1,5 erreicht worden. Das bedeute, dass mit einem 2-Megajoule-UV-Laser 3 Megajoule an Fusionsenergie erzeugt worden wären. Natürlich gebe es noch Verbesserungspotenzial, insbesondere bei der Effizienz der Laser und der Energieübertragung. Vielleicht könnten Halbleiterlaser eine vielversprechende Alternative sein, um den Gesamtwirkungsgrad zu steigern. Eine Herausforderung sei die gleichmäßige Komprimierung eines Pellets, denn geringfügig unterschiedliche Intensität der Laserstrahlen würden zu Instabilitäten führen. **Europa** setze daher beim Forschungsprogramm Eurofusion auf den Magneteinschluss.

Beim Joint European Torus (**JET**) in UK handele sich um das weltweit derzeit einzige magnetische Experiment, das mit echtem Brennstoff (Deuterium-Tritium) betrieben wird. Im Dezember letzten Jahres hätte es sogar einen Rekord erzielt. Die Rekordentladung hätte eine Gesamtenergie von 9 Megajoule erzeugt, wobei der **Verstärkungsfaktor** bei 0,35 gelegen wäre. Das bedeute, dass 35 % der eingesetzten Energie in Form von Fusionsneutronen zurückgewonnen worden wären. Insgesamt seien 69 Megajoule an Fusionsenergie erzeugt worden, was deutlich mehr ist als bei vergleichbaren Experimenten mit Pellets. Während die amerikanischen Kolleg:innen nur einen solchen Schuss pro Tag machen könnten, sei man in Europa mit dem JET in der Lage, etwa 20 bis 30 Schüsse täglich durchzuführen. Die Rekordentladung hätte das Plasma 5 Sekunden lang relativ konstant halten können. Die Begrenzung läge nicht in der Plasmaphysik, sondern in den **normalleitenden Magneten**, die sich aufgrund von Überhitzung abschalten müssten. Mit superleitenden Magneten könne man das Plasma noch länger stabil brennen lassen. Der **nächste** Schritt bestehe darin, ein noch größeres Experiment zu bauen, den sogenannten **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor). Dabei solle etwa eine 10-fache Energieverstärkung erreicht werden. Die Heizleistung von ITER werde 50 Megawatt betragen, wobei Neutralteilcheninjektoren oder Mikrowellen verwendet würden. Für ein Kraftwerk sei die für ITER vorhergesagte thermische Fusionsleistung von 500 MW immer noch zu wenig. Die Parameter würden ein Plasmavolumen von 840 Kubikmetern umfassen, einen Strom von 15 Millionen Ampere und eine Plasmatemperatur von 200 Millionen Grad Celsius. ITER sei ein internationales Gemeinschaftsexperiment, an dem China, die EU, Indien, Japan, Korea, Russland und die USA beteiligt seien. Es werde derzeit im südfranzösischen Cadarache gebaut. Die Schwierigkeiten beim Bau des ITER-Projekts seien vielfältig. Etwa die Verteilung der geistigen Eigentumsrechte auf die beteiligten Länder, da alle Zugang zur gesamten Technologie erhalten möchten. Zum Beispiel müssten die Spulen aus verschiedenen Ländern perfekt zusammenpassen. Teile des Vakuumgefäßes, die nicht millimetergenau aufeinander passen, seien nicht verschweißbar. Zusätzlich würden Schwierigkeiten mit korrodierten Kühlleitungen und Genehmigungsproblemen mit der französischen Nuklearbehörde innovative Lösungen erfordern. Nach ITER, der für 2027 geplant sei, wäre der nächste Schritt **DEMO** etwa im Jahr 2050. Die Fusionsleistung dieses Demonstrationsreaktors (mit einem Leistungsfaktor von $q = 40$) soll etwa 3 Gigawatt betragen. Dieser Reaktor könnte der erste sein, der Strom ins Netz einspeist, nämlich bis zu 1 GW. Die Zeitpläne für solche Projekte würden jedoch oft von den ursprünglichen Planungen abweichen. In Österreich gebe es eine klein dimensionierte, aber sehr aktive Fusionsforschung, die von der Akademie der Wissenschaften koordiniert werde. Beteiligt seien die TU-Graz, die Research Studios Austria Forschungsgesellschaft, die TU-Wien, die Universität Innsbruck und die österreichische Industrie. Weltweit gebe es derzeit 139 Fusions-Experimente, von denen nur 77 sogenannte **Tokamak** seien – torusförmige Gebilde ähnlich dem JET. Daneben würden auch 29 private Start-ups existieren, die an kreativen Fusionsprojekten arbeiten. Ein Beispiel sei das Unternehmen Commonwealth Fusion Systems, das bereits 2,1 Milliarden USD an Risikokapital aufgebracht hat.

Insgesamt würde sich der private Fusionsmarkt auf etwa 6 Milliarden USD belaufen. Diese privaten Unternehmen könnten schneller und unbürokratischer agieren. Allerdings habe Kernfusion auch Nachteile, wie die potenzielle Gefahr durch radioaktive Freisetzung bei Unfällen. Letztendlich werde die Akzeptanz der Kernfusion von der weiteren Forschung und dem steigenden Energiebedarf abhängen. Österreich spiele eine kleine Rolle, habe aber kürzlich ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Fusionsforschung geleistet. Die Herausforderung der **Energiewende** sei enorm.

In den nächsten 30 Jahren müssten wir **täglich etwa 1 Megatonne Öl** durch alternative Energiequellen ersetzen. Das erfordere eine massive Skalierung von Windkraft, Solarenergie, Kernspaltung oder andere nachhaltige Technologien. Die Kernfusion sei eine vielversprechende Technologie, die saubere Energie liefern könnte. Allerdings gebe es noch viele **Herausforderungen**, um die Kernfusion wirtschaftlich und effizient zu nutzen. Um im Jahr 2100 ein Drittel des Stroms aus Fusion zu erzeugen, müssten wir ab 2080 **jährlich 250 Reaktoren** bauen. Die Rolle der Fusion bei der Bekämpfung des **Klimawandels** sei begrenzt, da wir bis 2050 den CO₂-Ausstoß auf Netto-Null reduzieren müssen. Dennoch sei die Kernfusion ein vielversprechender Ansatz für die **langfristige Energieversorgung**, wenn wir die technischen und wirtschaftlichen Hürden überwinden könnten. Es bliebe also in den kommenden Jahrzehnten spannend.

Abbildung 16: Beitrag der Energieträger zur globalen Stromerzeugung bis 2100 (Folie Aumayr)

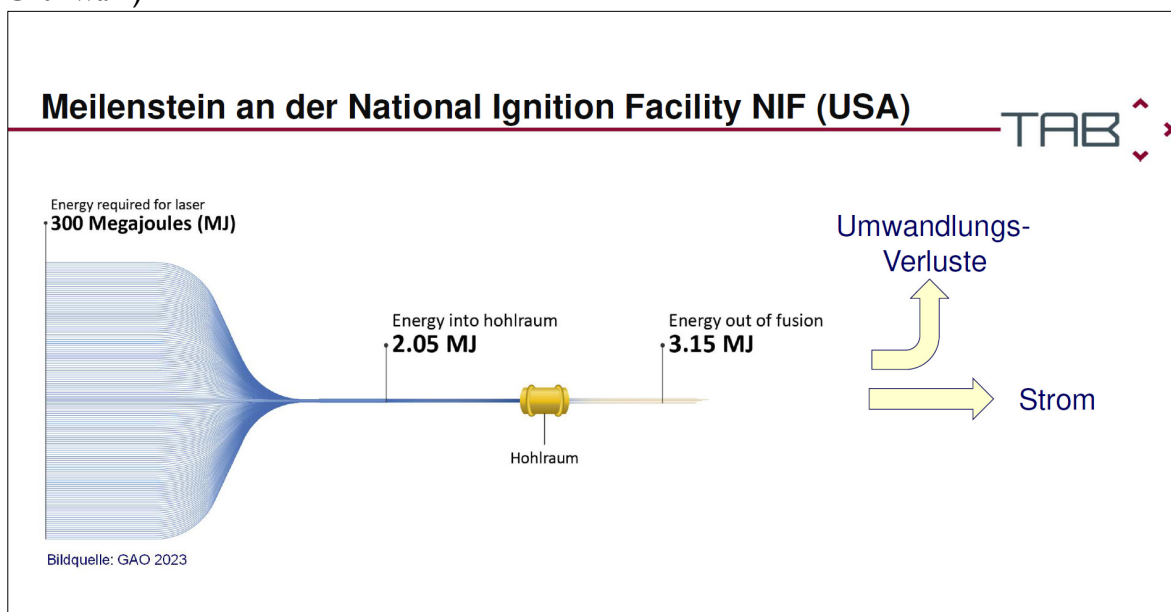


Grünwald warnt vor **übertriebenen Hoffnungen** bei der Fusion. Das Experiment an der National Ignition Facility zeige Fortschritte, aber die erzeugten 3 Megajoule **Energie würden** nicht ausreichen, um ein Kraftwerk zu betreiben, da 300 Megajoule Strom für den Laserbetrieb nötig seien. Ein Großteil der Energie gehe in Form schneller Neutronen verloren, die erst in Wärme umgewandelt werden müssten, wobei erhebliche Verluste aufträten.

Ein funktionierendes Kraftwerk bräuchte eine hundertfache Energieverstärkung und müsste im Fall, dass Pellets verwendet werden, zehn Schüsse pro Sekunde abfeuern, was hohe technische Anforderungen an Präzision und **Materialbelastbarkeit** stellen würde. Materialien in einer Laser-Fusionsanlage müssten extremen Belastungen standhalten, ähnlich denen auf der Sonnenoberfläche. Diese Bedingungen seien vergleichbar mit Hitzeschilden von Raketen, was den Bau eines Fusionskraftwerks herausfordernd mache. Zusätzlich würden hochenergetische Neutronen (14 MeV) eine weitere technische Hürde darstellen, da sie schwer abzubremsen sind und hohe Materialschäden verursachen. Materialien könnten durch Neutronenbestrahlung verspröden und müssten erst noch entsprechend entwickelt werden.

Für die Materialforschung seien Anlagen zur Erzeugung von 14 MeV Neutronen dringend nötig. **Tritium** sei ein entscheidender **Rohstoff** für Fusionsreaktoren, aber nur begrenzt verfügbar und radioaktiv, was jährlich Verluste verursache. Das ITER-Experiment benötige die Hälfte des weltweiten Vorrats, was die Tritiumversorgung für zukünftige Projekte erschwere. Alternativen zur Tritium-Erzeugung seien politisch und technisch herausfordernd. Die Erzeugung von Tritium im DEMO-Reaktor sei notwendig, aber technologisch noch nicht ausgereift. **Beryllium** werde in Fusionsreaktoren zur Neutronenvervielfachung genutzt. Ein 1-Gigawatt-Kraftwerk würde etwa ein Drittel der heutigen Jahresproduktion von Tritium erfordern. Natürliches Beryllium enthalte Spuren von Uran, das Plutonium erzeugen könnte, was Sicherheitsprobleme bezüglich Kernwaffenmaterial verursache. Auch **Lithium-6**, das nur zu 7,6 % in natürlichem Lithium vorkomme, sei notwendig, aber es gebe derzeit kein großtechnisches Verfahren zur Gewinnung. Ein früheres, umweltbelastendes Verfahren mit Quecksilber sei verboten, sodass dringend neue Methoden entwickelt werden müssten. Fusion berge auch Herausforderungen hinsichtlich der Sicherheit von Tritium, das in modernen **Kernwaffen** als Sprengkraftverstärker diene. Ein Kraftwerk benötige etwa 100 kg Tritium, und die sichere Handhabung sei problematisch, da Tritium in Materialien eindiffundieren könne und schwer nachzuerfolgen sei. Die Forschung zur Laserträgheitsfusion, wie in der National Ignition Facility, sei eng mit der Waffenforschung verbunden, da sie Bedingungen simuliert, die bei Kernwaffenexplosionen auftreten würden. Grünwald sieht sich nicht als Gegner der Kernfusion, sondern plädiert für eine offene Diskussion über deren Herausforderungen.

Abbildung 17: Energiebilanz der erfolgreichen Trägheitsfusionsanlage mit Laser (Folie Grünwald)



I.9 Potenzial und Grenzen von Wasserstoff – Strategien in Japan, Europa und Österreich

Am [26.4.2024](#) diskutierten Martin **Schulz**, Chefökonom bei Fujitsu Ltd. in Tokio und Wolfgang **Anzengruber**, Vorsitzender des nationalen Beirats der Hydrogen Partnership Austria.

Schulz betrachtet Wasserstoff als einen von mehreren Ansätzen, die zur Reduzierung von CO₂-Emissionen beitragen können. Die Politik zögere, den den **Energiepreis** deutlich zu erhöhen, weil das zu Job- und Wahlverlusten führen würde. Stattdessen fördere man erneuerbare Energien und neue Technologien und führe moderate CO₂-Preise ein. Die Frage der Entwicklung einer **Wasserstoffwirtschaft** laufe auf die Debatte hinaus, ob Strom und Batterien oder Strom und Wasserstoff geeignet seien, insbesondere für die Langzeitspeicherung und den Transport großer Energiemengen, wie bei Schiffen oder Stahlwerken. In der Diskussion liege der Fokus zunächst auf die **Effizienz**, da sich die **Kosten** mit technologischem Fortschritt ändern könnten. Bei der Bewertung von **Batterien versus Wasserstoff** sei zu beachten, dass Batterien schwer seien, während Wasserstoff leicht, aber großvolumig und schwer zu transportieren sei. In saisonalen Regionen spiele die langfristige Energiespeicherung eine besondere Rolle. Beide Technologien hätten oft länderspezifische Vor- und Nachteile. Für Energieeffizienzvergleiche im Verkehrssektor eigne sich ein **Auto** als Beispiel. Bei einem **Hybridfahrzeug** liege die Effizienz – von der Energiequelle bis zum Verbrauch – nur bei etwa 10–25 %. Die Effizienz von **Wasserstofffahrzeugen** sei nur geringfügig besser. Wenn man jedoch die gesamte Energiekette von der Erzeugung des Wasserstoffs aus Solarstrom über Transport und Speicherung bis zur Nutzung im Fahrzeug betrachte, liege die Effizienz optimistisch bei 40 % und realistisch bei 30 %. Im Gegensatz dazu hätten **batterieelektrische Fahrzeuge** die beste Effizienz. Inklusive Batterieproduktion liege die Effizienz zwischen 65 % und 80 %.

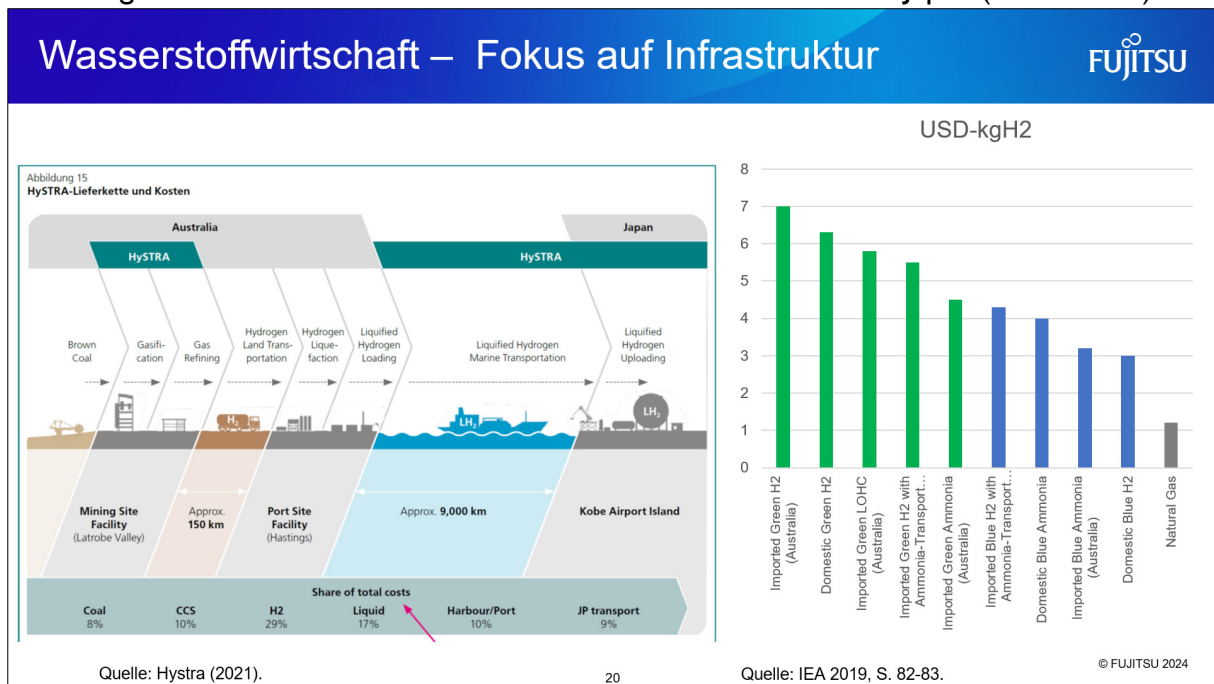
Wasserstoff ist leicht, aber die Komprimierung erfordere große Tanks, die Platz beanspruchen und das Fahrzeuggewicht erhöhen würden. Batterien seien schwerer, aber moderne Elektroautos hätten dennoch einen vergleichsweise geringen Gewichtsunterschied, weil Kund:innen oft größere, schwerere Fahrzeuge bevorzugen würden, unabhängig von der Antriebsart. Natürlich müsse man auch praktische Aspekte wie Reichweite und Ladeinfrastruktur berücksichtigen. Batterien würden immer **effizienter** werden. Derzeit könnten wir bereits etwa 700 Watt pro Liter in Batterien speichern. Bei den jüngsten Teslas sei die Energiedichte bereits auf dem Niveau von Wasserstoff. Das bedeutet, dass Batterien technologisch stark aufgeholt hätten. Im Vergleich dazu könnten Wasserstofftanks nicht weiter komprimiert werden – bei etwa 200 bis 700 bar sei Schluss. Die **Produktionseffizienz** sei ein wichtiger Faktor, und auch hier seien Batterien im Vorteil, da sie effizienter produziert werden könnten als Wasserstoff. Bei der Produktion von Batterien würden aber große Mengen an **Materialien** wie Kobalt und Nickel benötigt, die schwer zu beschaffen seien und hohe Energiekosten verursachen würden. Diese **Abhängigkeit** von bestimmten Ländern sei ein wichtiger Vorteil von Wasserstoff, aber das Hauptproblem sei die Effizienz aufgrund der vielen Umwandlungsschritte. Besser sei die CO₂-Bilanz von grünem Wasserstoff, der nachhaltige Energiequellen wie Solarenergie und Windkraft nutze. Eine vielleicht effizientere Möglichkeit um Wasserstoff ohne CO₂-Emissionen zu produzieren, sei die Verwendung von Gas mit Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS). Japan habe in den letzten 20 Jahren verschiedene Methoden zur effizienten Wasserstofftransportkette erforscht, einschließlich des Transports aus sonnenreichen Wüstengebieten wie Australien.

Für den Seetransport müsse Wasserstoff bei extrem niedrigen Temperaturen von -253°C flüssig gemacht werden. Stattdessen ließe es sich auch mit Stickstoff zu **Ammoniak** umwandeln, das leichter transportierbar sei und vielseitig eingesetzt werden könnte. Japan, Malaysia und Australien hätten umfangreiche Forschung und Experimente mit Ammoniak durchgeführt. In der Schifffahrt werde es bereits bei Produktionsanlagen in Häfen verwendet. Für Länder, die am Meer liegen und Handel mit Asien betreiben, schiene Ammoniak eine vielversprechende Lösung zu sein. Ein weiterer Nachteil der Batteriewirtschaft gegenüber der Wasserstoffwirtschaft sei das Recyclingproblem aufgrund der verwendeten Materialien wie Kobalt und Nickel. Im Gegensatz dazu werde bei der Wasserstoffwirtschaft die Entscheidung für die Recyclingfähigkeit bereits in der Designphase getroffen, während die Batteriewirtschaft mit dem Recycling von großen Lithium-Ionen-Batterien noch am Anfang stehe. Deutsche Studien würden zeigen, dass grüner Wasserstoff, insbesondere aus Solarquellen, die überlegene Option ist. **Japan** hingegen erprobe sowohl **grünen als auch blauen Wasserstoff** (aus Erdgas mit CO_2 -Abscheidung) zur CO_2 -Reduktion. In Japan liege der Fokus der Forschung stark auf der privaten **Industrie**, weniger an Universitäten. Die Regierung arbeite eng mit Unternehmen zusammen, um Innovationen voranzutreiben. Japan spiele eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von Lithium-Ionen-Batterien, die ursprünglich für den Walkman und Notebooks entworfen worden seien. Nun seien **China** und Korea im Batteriebereich stark wettbewerbsfähig. China setze voll auf Elektromobilität, während Japan zögere, mit Batterien zu konkurrieren. Europäische Bemühungen in diesem Bereich würden von Japan kritisch gesehen. Japan bevorzuge komplexe Technologien, wie **Hybride**, die schwer zu kopieren seien und gut zu ihrem Ingenieurwissen passen würden. Alte Gesellschaften würden dazu neigen, bestehende Industrien zu verbessern, anstatt komplett neue aufzubauen.

Japan nutze seine vorhandene LNG-Infrastruktur, die nach Fukushima ausgebaut worden und jetzt für Europa nützlich sei, und plane, diese Infrastruktur für Wasserstoff zu nutzen. Japan hätte verschiedene Projekte entwickelt, um eine **gemischte Strategie** zu verfolgen.

Ein Beispiel sei der Industriepark in Kyushu, wo Wasserstoff aus einem Stahlwerk genutzt werde, um Autos aufzuladen und Heizungen zu betreiben. Toyota setze auf Wasserstofftechnologie und **Brennstoffzellen**, um mit chinesischen Batteriefahrzeugen zu konkurrieren. Die Regierung unterstütze Brennstoffzellen für den Hausgebrauch, die effizient Strom und Wärme erzeugen. Trotz einer Effizienz von 87 % würden Verbraucher:innen sie jedoch kaum kaufen, da Wärmepumpen mit einer Effizienz von 400 % und der zusätzlichen Fähigkeit zu kühlen, bevorzugt würden. Japan fokussiere sich darauf, gleichzeitig die **Produktion und Nachfrage** zu steigern, um eine effiziente Wasserstoffwirtschaft zu etablieren. Anstatt sich nur auf die Entwicklung einzelner Geräte wie Wärmepumpen zu konzentrieren, investiere Japan in den Aufbau der notwendigen **Infrastruktur** für die langfristige Nutzung von Wasserstoff. Diese Strategie sei Teil von Japans „Green Growth Plan“, der auf CO_2 -Neutralität bis 2050 abziele und auf den die Wirtschaft aufbauen könne. Wasserstoff diene als langfristiger Speicher für erneuerbare Energie und verknüpfe verschiedene Sektoren wie Strom, Wärme und Verkehr. Obwohl Haushalte und Mobilität eher auf Batterien setzen würden, interessiere sich die Schwerindustrie für Wasserstoff. Investitionskosten und komplexe Infrastrukturen seien jedoch Herausforderungen, die bewältigt werden müssen.

Abbildung 18: Kosten der Wasserstofflieferkette aus Australien nach Japan (Folie Schulz)



Anzengruber betont, dass Wasserstoff kein Selbstzweck sei. Die **CO2-Konzentration** steigt, und wir hätten bereits die 1,5-Grad-Erwärmung kurzfristig überschritten. **Österreichs Energiepolitik** sei Teil eines globalen Problems. Österreich sei ein Transitland für Energie, und der Energiebedarf liege bei etwa 300 Terawattstunden. Etwa 36 % der Energie würden aus erneuerbaren Quellen wie Wasser, Wind, Sonne und Biomasse stammen. Bis 2030 strebe Österreich an, 100 % CO2-freien Strom zu erzeugen (nur 20 % des gesamten Energieverbrauchs), und bis 2040 die CO2-Neutralität zu erreichen. Die Dekarbonisierung in Österreich konzentriere sich auf drei Hauptbereiche: (1) **Elektrifizierung**, um fossile Brennstoffe durch grünen Strom zu ersetzen. (2) CO2-freie Stromerzeugung durch **erneuerbare Energien** wie Wasser, Wind und Sonne. (3) Die **Wasserstoffstrategie** ziele darauf ab, den Bedarf aus grünen Quellen zu decken und die Abhängigkeit von russischem Gas zu verringern. Bis 2030 strebe Österreich an, den Erdgasverbrauch um ein Drittel (30 Terawattstunden) zu reduzieren. Gleichzeitig möchte Österreich Erdgas geographisch diversifiziert beziehen, um singuläre Abhängigkeit künftig zu vermeiden. Vier Terawattstunden heutigen Erdgasbedarfs sollen durch grünen Wasserstoff abgedeckt werden. Es sei jedoch wichtig zu betonen, dass Wasserstoff allein nicht alle Herausforderungen der Dekarbonisierung lösen werde. Er sei quasi der **Champagner** der Energiewende. Wasserstoff sei an sich geruchs- und farblos. Zur Klassifizierung würden verschiedene Farben verwendet, um unterschiedliche Herstellungsarten und das Maß an Klimaneutralität des erzeugten Wasserstoffs zu unterscheiden. **Grauer Wasserstoff** werde hauptsächlich aus Gas und Kohle hergestellt, insbesondere durch Gasdampfpreformation. **Blauer Wasserstoff** werde genauso produziert, nur würden durch Carbon Capture die CO2-Emissionen abgeschieden und unterirdisch eingelagert, was in Österreich und Deutschland derzeit noch verboten sei.

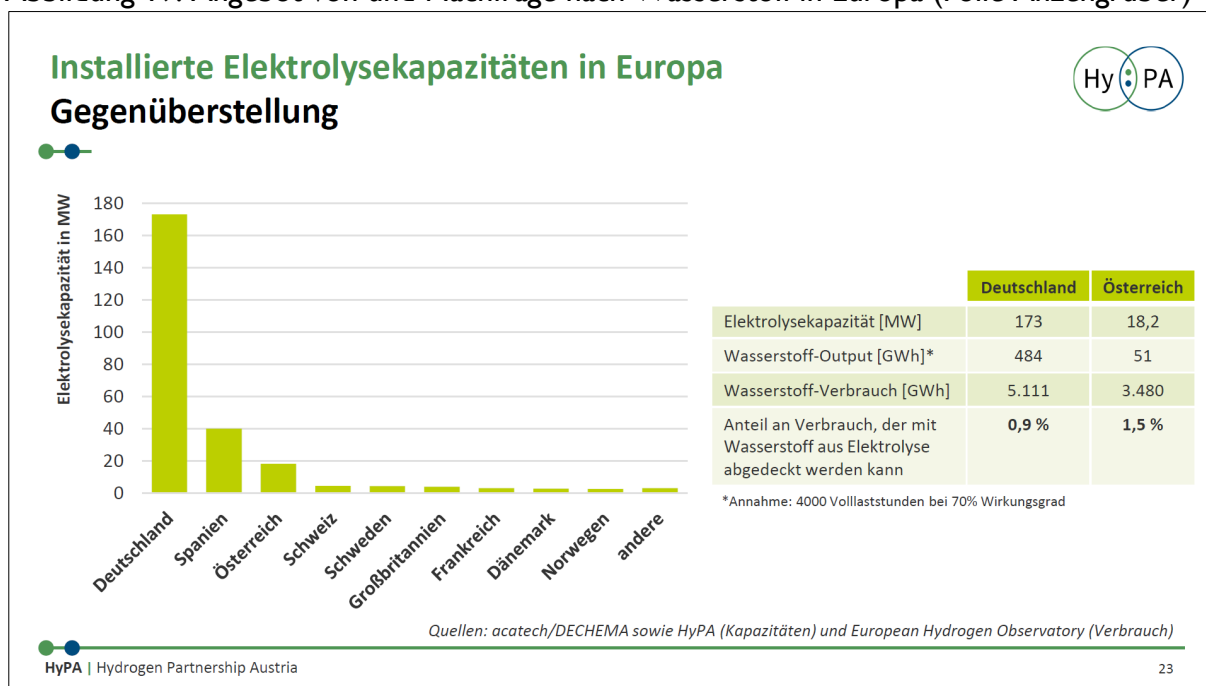
Grüner Wasserstoff werde durch Elektrolyse aus CO₂-freiem grünem Strom erzeugt und sei damit klimaneutral.¹² **Türkiser** Wasserstoff entstehe durch Pyrolyse von Erdgas; der Kohlenstoff falle als Graphit aus und werde nicht als CO₂ in die Atmosphäre emittiert. **Pinker** Wasserstoff stamme aus Atomkraftwerken und sei als Brückentechnologie umstritten. **Weißer** Wasserstoff komme teilweise in der Natur vor, aber seine tatsächliche Nutzbarkeit sei noch unklar. Die **Hydrogen Partnership Austria** (HyPA) sei eine Plattform, die 2023 von den österreichischen Ministerien für Klimaschutz und Wirtschaft ins Leben gerufen wurde. Sie solle die Umsetzung der nationalen Wasserstoffstrategie begleiten bzw. Empfehlungen an die Bundesregierung geben. Diese sollten die Rahmenbedingungen schaffen, damit Investitionen in Wasserstoff für die Wirtschaft wirtschaftlich interessant werden. In ihrem Beirat seien wichtige Akteure der Wasserstoffwirtschaft vertreten sowie Forschungseinrichtungen und Infrastrukturbetreiber. Die österreichische **Wasserstoffstrategie**, die Mitte 2021 präsentiert worden seien, solle helfen, in Österreich bis 2040 Klimaneutralität zu erreichen. Dabei liege der Fokus auf grünem Wasserstoff. Prioritäre Verbrauchssektoren würden berücksichtigt, und wirtschaftliche Lösungen angestrebt. Bis 2030 sollten etwa 90 %–95 % des heute verwendeten Wasserstoffs durch grünen Wasserstoff ersetzt werden. Dafür seien Investitionen in **Elektrolysekapazitäten** von 1000 Megawatt erforderlich, begleitet von einem unterstützenden Rahmen und Infrastrukturanpassungen. Die Energieunabhängigkeit werde jedoch nicht vollständig erreicht werden, da ein wesentlicher Teil des Wasserstoffs nach 2030 importiert werden müsse. Ziel sei auch, die heimische Wirtschaft in der Wasserstoffbranche als **Produzentin** von Anlagen und Komponenten zu etablieren. Die vielfältigen **Einsatzmöglichkeiten** von Wasserstoff würden sich hauptsächlich auf zwei Bereiche konzentrieren: einerseits die **Industrie**, insbesondere energieintensiven Industriezweigen, wie etwa bei der Ammoniakherstellung für Düngemittel oder in der Stahlindustrie. Im **Verkehrssektor** würde andererseits Wasserstoff (bzw. dessen Derivate) dort eingesetzt, wo alternative wirtschaftliche Optionen zur Dekarbonisierung fehlen würden. Konkret seien dies nachhaltige **Flugtreibstoffe** und der Schiffsverkehr.

Im Individualverkehr sei Wasserstoff aus wirtschaftlichen Gründen weniger relevant: Die Umstellung auf erneuerbare Energien führe zu CO₂-freier Stromerzeugung, aber die **Volatilität** dieser Energiequellen (Wind, Sonne, Wasser) erfordere **Speicherlösungen**. Pumpspeicherkraftwerke seien wertvoll, aber es bedürfe zusätzlicher Speicherkapazitäten, um (regionalen) Überschussstrom effizient zu nutzen. Die Wasserstofferzeugung aus Überschussstrom stelle eine interessante Option dar. Die Speicherung von Wasserstoff sei eine Herausforderung, die es noch großtechnisch zu bewältigen gelte. In Österreich betrage der jährliche **Wasserstoffbedarf** aktuell etwa 116.000 Tonnen, der fast ausschließlich aus **fossilen** Quellen stamme. Ziel sei es, diesen Bedarf durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Derzeit seien Wasserstofferzeugungsanlagen mit einer Leistung von etwa 18 Megawatt in Betrieb, aber bis 2030 sollten 1.000 Megawatt erreicht werden. Die Infrastruktur für den Wasserstofftransport werde vor allem über **Pipelines** realisiert. Von parallel-laufenden Leitungssträngen fossiler Pipelines könnten einzelne Stränge für den Transport von Wasserstoff ertüchtigt werden. Das Basisnetz umfasse die Nord-Süd-Leitung von Italien nach Baumgarten und die Ost-West-Leitung von Baumgarten nach Deutschland. Diese Leitungen seien wichtig für die Versorgung von Unternehmen wie OMV, Borealis und Voestalpine sowie für den Osten Österreichs mit großen installierten Kapazitäten an erneuerbarer Stromerzeugung (Wind).

¹² Anmerkung des Autors: Das gilt unter optimalen Bedingungen: effiziente Produktion, keine Leckagen und Ausgleich der grauen Energie in Anlagen und für Transport.

Der Transport von Wasserstoff über (idealerweise vorhandene) **Pipelines** sei entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Wasserstoffindustrie. Der Seetransport in Form von Ammoniak verdoppele die Kosten.¹³ Derzeit sei der Transport über Italien von **Nordafrika** aus favorisiert. Optionale Korridore über Spanien/Frankreich und Wasserstoffimporte aus dem skandinavischen Raum und vom Westbalkan bzw. der Ukraine seien mittelfristig interessant. Insgesamt würden viele europäische Länder am sogenannten „Hydrogen Backbone“ arbeiten.

Abbildung 19: Angebot von und Nachfrage nach Wasserstoff in Europa (Folie Anzengruber)



3 Diskussion aufgeworfener Grundsatzfragen

Außer Zweifel steht, dass die Welt den Treibhausgasausstoß bis zur Jahrhundertmitte auf **Netto-Null** reduzieren muss. Netto bedeutet hier, dass verbleibende Emissionen durch entsprechende Speicherung in zusätzliche Senken ausgeglichen werden sollen. Nur so lässt sich die globale Durchschnittstemperatur unter 1,5° Celsius über dem vorindustriellen Niveau halten. All das hatte eben erst die nunmehr 28. Klimakonferenz wieder eindringlich bestätigt. Im Hintergrund steht also **nicht, ob** wir dieses **Ziel** erreichen wollen, **sondern wie** wir es möglichst kosteneffizient erreichen können.

¹³ Anmerkung von Jürgen Roth: Ferntransporte brächten den Schiffsverkehr in Vorteil.

Dieser Abschnitt strukturiert die Diskussion zusammenfassend entlang von sechs Fragen:

1. Reicht es aus, auf bekannte erneuerbare Energieträger umzusteigen, oder sollen wir auf bahnbrechende Innovationen setzen?

Die Antwort auf diese Frage hängt vom geschätzten Energiebedarf ab. Je größer dieser ist, umso naheliegender ist es, konventionelle Strategien zu verlassen. Die **Größenordnungen** einiger Vortragender hinsichtlich des notwendigen **Ausbaus erneuerbarer Energie** in der EU widersprachen sich teilweise. Ein Hauptgrund für Missverständnisse scheint der Unterschied zwischen **Primärenergiebedarf** und **Endenergiebedarf** zu sein. Ein vielfach unterschätztes Problem ist nämlich die Energieverschwendung durch Transport- und Umwandlungsverluste bei fossilen Energieträgern. **Elektrifizierung** ist daher nicht nur der Schlüssel zur Defossilisierung, sondern birgt auch enormes Effizienzpotenzial. Mindestens ein Drittel der Primärenergie kann so eingespart werden. Der Strombedarf erhöht sich trotzdem wegen der neuen Anwendungsbereiche (Mobilität, Gebäudewärme etc.).

So erklären sich teilweise **völlig überhöhte Werte**, etwa die **3 Millionen Windkraftanlagen** als Ersatz der *fossilen* Energie im Zeitraum bis 2050 (Brasseur). Im Gegensatz dazu ergeben Berechnungen auf Basis von IEA-Daten eine **als Ersatz der fossilen und nuklearen Energie erforderliche Anzahl von nur 1,2 Millionen Windkraftanlagen**. Die erforderliche Anzahl würde noch deutlich weiter sinken, wenn die bereits üblichen höheren Leistungsstärken je Windrad sowie moderate Annahmen über Kapazitätssteigerungen durch technologischen Fortschritt in den nächsten 25 Jahren oder auch ein effizienterer Endenergieverbrauch berücksichtigt werden.

Alternativ zu den Windkraftanlagen wurde eine ebenso überhöhte Größe einer **PV-Anlagen-Fläche von 228.000 km²**, etwa gleich groß wie **die Fläche Rumäniens**, zum Ersatz der *fossilen* Energie in den Raum gestellt. OeNB-interne Berechnungen zeigen eine als Ersatz der fossilen *und nuklearen* Energie erforderliche PV-Anlagen-Fläche von **61.000 km²**, also 72,6 % der Fläche Österreichs bzw. 1,4 % der EU27-Fläche, und ebenfalls deutlich weniger, wenn bereits verfügbare leistungsstärkste PV-Modelle bzw. künftiger technologischer Fortschritt oder ein effizienterer Endenergieverbrauch berücksichtigt werden. Entsprechend ist der geschätzte **Rohstoffbedarf** für die notwendigen Windkraftanlagen zum Ersatz von fossiler Energie daher auch stark nach unten zu korrigieren. Problematisch ist auch, dass beim errechneten **Investitionsbedarf** der parallel wegfallende Bedarf für fossile Energie nicht berücksichtigt wurde.

Eine pragmatischer Lösungsansatz für die Frage wird wohl versuchen, das Potenzial der **Erneuerbaren** möglichst voll auszuschöpfen und **gleichzeitig** genügend Ressourcen in die Erforschung bahnbrechender **Innovationen** setzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Innovationen erstens unsicher sind und zweitens Zeit benötigen. Und Zeit ist in der Klimadebatte eine knappe Ressource. Es ist jedenfalls immer klug, nicht nur auf ein Pferd zu setzen. Die relevanten **Kriterien** für das Abwägen zwischen verschiedenen grünen technologischen Optionen sollten die relativen ökonomischen **Kosten**, die **Versorgungssicherheit** sowie der **Zeithorizont** angesichts der Dringlichkeit des Handelns sein. Insbesondere der Energieeffizienz wird daher eine entscheidende Rolle zukommen.

2. Soll Erdgas als Brückentechnologie in der Energiewende eine Rolle spielen oder ist die Elektrifizierung aller Wirtschaftsbereiche der einfachere Weg?

Es herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass wir eine umfassende Energiewende brauchen. Das heißt, wir müssen fossile Brennstoffe komplett ersetzen und die Energieeffizienz massiv erhöhen – und damit das Wirtschaftswachstum vom Emissionsausstoß entkoppeln. Weniger klar ist jedoch die **Reihenfolge** der erforderlichen Maßnahmen. Soll der Ausstieg aus Erdgas am Anfang oder am Ende stehen? Bis vor dem russischen Angriffskrieg auf die Ukraine galt Erdgas noch als **Brückentechnologie**. Schließlich hat Gas im Vergleich zu anderen fossilen Brennstoffen noch die geringsten **Treibhausgasemissionen**. Es ist zudem dank moderner Kraftwärmekopplungen überaus **effizient**. Und es ist **flexibel** einsetzbar – je nach Bedarf (Spitzenlast) und je nach schwankendem Angebot erneuerbarer Energie, wie Sonne und Wind (Dunkelflauten). Doch nun kann es der Politik mit dem Gasausstieg nicht schnell genug gehen.

Niemand will einen **Krieg** über die Gasrechnung finanzieren, dennoch sind auch Sorgen über unseren Industriestandort und Wohlstand berechtigt. Andererseits hat das Argument, wonach die existierende **Gas-Infrastruktur** den Weg zu synthetischem Gas erleichtert, einen Haken. Woher soll das **synthetische Gas** in Zukunft kommen? Damit verbundene hohe **Umwandlungsverluste** von sauberem Strom lassen die Frage berechtigt erscheinen, ob nicht gleich alternative Technologien wie Anergie oder Wärmepumpen entwickelt werden sollen.¹⁴ Bei der **Strom- und Wärmeversorgung** von Haushalten liegt die Energieeffizienz des **Direkteinsatzes** von erneuerbarem Strom kombiniert mit Wärmepumpen höher als die Energieeffizienz des **indirekten Einsatzes** von erneuerbarem Strom im Wege von **synthetischen Methan-Brennstoffzellen** kombiniert mit Wärmepumpen. Die Energie-Einsparung von Methan- (bzw. zuvor Erdgas-) Brennstoffzellen gegenüber der Erdgas-Therme ist hier nicht entscheidend.

3. Funktionieren Verbote etwa des Verbrennungsmotors oder sollten wir nicht stärker auf Wasserstoff und E-Fuels setzen?

Im Fokus des **Green Deals** stand unter anderem der Straßenverkehr, auf den ein Fünftel der CO₂-Emissionen in der EU entfällt. Ursprünglich war von einem „**Verkaufsverbot**“ für neue Benzin- und Dieselfahrzeuge ab 2035 die Rede. Die EU hatte sich darauf verständigt, dass auch solche neuen Pkws mit Verbrennungsmotor zugelassen werden sollen, die **beim Fahren CO₂-neutral** sind. Unabhängig vom exakten Wording: Unter gängigen Annahmen zur Verfügbarkeit von E-Fuels läuft die EU-Politik **de facto** auf ein weitgehendes **Aus** von Verbrennungsmotoren bei Neuzulassungen hinaus. Hans-Werner Sinn ist hier eher skeptisch. Als Ökonom kritisiert er **dirigistische Eingriffe** in den Markt.

Hier ließe sich auf die alte ökonomische Diskussion über Markt- und Staatsversagen anknüpfen. Einerseits befürworten Sinn und Brasseur staatliche Interventionen in Form einer (**globalen**) **CO₂-Bepreisung** und haben offensichtlich auch das **Vertrauen**, dass ein **ausreichend hoher CO₂-Preis** gesetzt wird, sodass der Markt bzw. private Akteure schnell genug entsprechende

¹⁴ Andere halten es für pragmatischer, alle Optionen parallel zu beschreiten, also etwa nicht-fossile Gase graduell beizumengen. Als Übergangslösung mag dies geeignet erscheinen, allerdings ist derzeit keine überzeugende Perspektive zu erkennen, die den massiven Einsatz von ausreichend synthetischen Gasen und E-Fuels über wenige alternativlose Nischenbereiche realistisch erscheinen lässt.

Lösungen finden. Andererseits werden **Subventionen** für energieeffizientere technologische Lösungen oder **regulatorische Eingriffe** (z. B. durch Grenzwerte) **als verzerrend abgelehnt**. Unzureichend durchdachte Regulierung ist für Investoren schwer umsetzbar und kann so die Finanzierung von klimafreundlichen Projekten behindern. Tatsächlich erlaubt die CO₂-Bepreisung mehr Technologieoffenheit als Subventionen und regulatorische Eingriffe. Angesichts der drohenden Klimakrise mag es jedoch überzeugender erscheinen, **Kosten und Nutzen möglicher Eingriffe** mit allen Stakeholdern (Energiewirtschaft, Unternehmen, Haushalte etc.) **auszuhandeln** und dann **demokratisch legitimiert** (d. h. politisch) zu entscheiden. Nicht zuletzt geht es bei der Energiewende auch um **öffentliche Infrastruktur und Netze** und die Bereitstellung **öffentlicher Güter**. Da dies auch die **öffentlichen Finanzen** betrifft, ist die Politik gefordert, mitzugestalten. Andere mögen eher auf politisch gesetzte CO₂-Preissignale und darauffolgende Marktentscheidungen vertrauen – obgleich die Politik kaum bereit scheint, ambitionierte und langfristig wirksame Preissignale inklusive Grenzabgaben zu setzen.

Wasserstoff ist das meistverbreitete chemische Element im Universum. Das leichte und **flüchtige Gas** kommt jedoch in der Natur nur gebunden vor, etwa in Wasser. Um diese Verbindungen zu zerlegen, benötigt man Energie, die bei **einer chemischen Reaktion wieder frei** wird. Das macht Wasserstoff zu einem flexiblen Energieträger – besser gesagt zu einem **Energiespeicher**, der trotz technischer Herausforderungen eine **zentrale Rolle in der Klimawende** spielen kann. Sowohl Japan als auch Europa investieren massiv in den Ausbau der **Wasserstoffinfrastruktur** für **vielfältige Anwendungen**, von der **Industrieproduktion**, etwa in der Stahl- und Chemiebranche, bis zum **Schwerlastverkehr**. Ob am Ende des Tages Wasserstoff – etwa in Form von E-Fuels – für den **Personenverkehr** übrig bleibt, ist jedoch ungewiss. Dies hängt wohl auch davon ab, wie stark sich die Produktionskosten senken lassen. Eine Hypothese ist, dass der Straßenverkehr einen Nachfrageschub auslöst, der die Produktion schnell hochfahren lässt. Unter Nutzung der vorhandenen Infrastruktur würde dies jene Kostensenkung induzieren, die E-Fuels wettbewerbsfähig macht. Problematisch ist allerdings, dass die großen Mengen grüner Energieimporte, die zur Kompensation der derzeit überwiegend fossilen Energieimporte notwendig sind, mit dem absehbar gigantischen Bedarf an erneuerbarer Energie in den Exportländern, vor allem im globalen Süden, konkurrieren. Theoretisch sind zwar genügend Potenziale an erneuerbarer Energie vorhanden, aber je ineffizienter diese in Antriebsenergie umgewandelt wird, desto mehr muss davon erschlossen werden – zu höheren Kosten oder mit höherem Zeitaufwand. Zeit, die wir vielleicht nicht mehr haben. Die Diskussion über **synthetisch hergestellte Kraftstoffe** hat in den letzten Jahren an Fahrt aufgenommen. Wie können **E-Fuels** in die Verkehrswende integriert werden? Darüber wird in Österreich und anderen europäischen Ländern mit starker Automobilindustrie und viel Straßenverkehr intensiv debattiert. **Befürworter:innen** argumentieren, dass E-Fuels eine Möglichkeit bieten, bestehende Verbrennungsmotoren zu nutzen und somit klimaneutral zu betreiben¹⁵. **Skeptiker:innen** hingegen weisen auf die hohen Produktionskosten und den Energieaufwand bei der Herstellung von E-Fuels hin.

¹⁵ Klimaneutral ist ein Fahrzeug, wenn die Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg ausgeglichen ist. Das kann durch den Einsatz erneuerbaren Stroms, synthetische Kraftstoffe oder CO₂-Kompensation erreicht werden. Emissionsfrei hingegen ist ein Fahrzeug, das während des Betriebs keine Treibhausgase ausstößt. Elektrofahrzeuge können also emissionsfrei, aber nicht unbedingt klimaneutral sein, wenn etwa der Betriebsstrom aus fossilen Brennstoffen stammt.

Zudem seien Nutzungsbereiche wie **Luftfahrt oder Schifffahrt** vorzuziehen, da sie weniger Alternativen hätten. Insgesamt zeigt die Debatte über E-Fuels, wie wichtig es ist, alternative Kraftstoffe als Teil einer **ganzheitlichen Strategie** zu betrachten, um den Treibhausgasausstoß zu senken.

In Bezug auf den **Pkw-Verkehr** zeigen Studien, dass die **Energieeffizienz** der **batterieelektrischen Antriebstechnologie** derzeit etwa dem Fünf- bis Sechsfachen von heimisch produziertem **grünen E-Fuels** und dem Doppelten von Wasserstoff-Brennstoffzellen entspricht (Ash et al., 2020).¹⁶ Dies impliziert, dass selbst bei der Produktion grüner E-Fuels an optimalen Standorten außerhalb Europas, wo der Ernteertrag zwei- bis dreimal so hoch wie innerhalb Europas ist, E-Autos die energieeffizientere Lösung darstellen.¹⁷ Allerdings sind weitere Fortschritte hinsichtlich Umweltverträglichkeit, Rohstoffzugang, Wiederverwertung sowie Reichweite und Betriebssicherheit bei der Batterieerzeugung neben dem Aufbau einer durchgängigen Ladeinfrastruktur erforderlich.

4. Sind in den nächsten Jahrzehnten noch entscheidende Fortschritte in der Nukleartechnologie zu erwarten?

Kernenergie ist hierzulande ein heikles Thema. Das Metall **Thorium** mit geringer und natürlicher Radioaktivität gilt für manche als ein **Hoffnungsträger** in der Energiewende. Es ist in der Erdkruste drei- bis viermal häufiger als Uran vorhanden; selbst Österreich verfügt über relevante Vorkommen. Neben **Testreaktor-Projekten** in China, Indien, den USA oder der Schweiz erarbeiten **Green-Tech-Start-ups** neue Technologien für die Nutzung von Kernenergie aus Thorium, die zeitnah einsatzbereit sein sollen.

Im Unterschied zu Uran-basierten Atomkraftwerken soll es bei dieser Beschleuniger-basierten Technologie **kein Katastrophenpotenzial** geben. Die Technologie soll dabei wesentlich **effizienter**, kompakter und damit billiger als herkömmliche Atomkraftwerke sein. Kleine Thorium-**Module** eignen sich potenziell für serienmäßige Produktion. Die Frage des **Endlagers** soll **dreifach entschärft** sein: Es fallen weniger Abfallstoffe an, diese sind schwach radioaktiv und haben eine geringere Halbwertszeit.

Kritiker:innen meinen jedoch, dass noch einige **Probleme** zu lösen seien, etwa die **Korrosion** durch Flüssigsalz. Radioaktive **Abfälle** müssten normalerweise noch immer hunderte Jahre gelagert werden. Alternativ können Methoden eingesetzt werden, die Spaltprodukte mit geringerer Halbwertszeit ergeben, aber atomwaffenfähig sind.

Die **Kernfusion** gilt als Energiequelle der Zukunft. Verschmelzen Atomkerne des Wasserstoffs zu Helium, wird immens viel Energie freigesetzt. Nach diesem Prinzip verfährt auch die **Sonne**. Fusionsenergie wird **als sauber, sicher, nachhaltig, unerschöpflich und günstig** gepriesen. Die Forschung macht Fortschritte, steht aber noch vor einigen Herausforderungen.

¹⁶ Über die gesamte Wertschöpfungskette (d. h. inkl. Batterieproduktion) betrachtet, schmilzt der CO₂-Vorteil – vor allem dann, wenn Kohlestrom eingesetzt wird. Allerdings gilt dies nur in einer statischen Betrachtung, und mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien und Recycling in Industrie und Verkehr wird die Effizienz absehbar deutlich steigen.

¹⁷ Damit könnte der Effizienzunterschied auf einen Faktor von unter 2 reduziert werden (<https://www.efuel-alliance.eu/de/efuels/globale-energiepotenziale-effizienz>). Ob die erzielbaren Effizienzgewinne durch E-Fuels oder Batterieantrieb ausreichen, um das globale Klimaziel bis zur Mitte des Jahrhunderts zu erreichen, ist angesichts eines weltweiten Pkw-Bestands von über 1,3 Milliarden Fahrzeugen im Jahr 2023 fraglich (<https://www.umweltbundesamt.de/bild/weltweiter-autobestand>). Daher setzen Klimaszenarien typischerweise auf Verkehrsvermeidung und Verkehrsverlagerung als komplementäre Strategien.

Weltweit arbeiten öffentliche und private Forschungseinrichtungen intensiv daran, die **technischen Hürden** zu überwinden. Die führenden Länder sind Europa, die USA, das Vereinigte Königreich, China und Südkorea. Ihr Verhältnis zueinander ist sowohl durch Wettbewerb als auch Zusammenarbeit geprägt. Die **technische Herausforderung** besteht darin, die Fusionsreaktion zu kontrollieren und einen dauerhaften Energieüberschuss zu optimieren. Dazu braucht es extreme Hitze in einem Magnetfeld oder extremen Druck und Laser. Kernfusion ist **nicht risikolos**, sie hinterlässt radioaktive Abfälle, jedoch sind nur wenige davon langlebig. Eine katastrophale Unfall-Gefahr besteht kaum.

Trotz wichtiger Durchbrüche braucht es bis zur kommerziellen Anwendung vermutlich noch **weitere dreißig Jahre**. Weil dieser Zeithorizont nun schon seit Jahrzehnten versprochen wird, spotten einige über eine „**Fusionskonstante**“ von 30 Jahren. Es sieht so aus, als würde von der Fusionsenergie nicht mehr **rechtzeitig** ein Beitrag zur Klimawende und zur strategischen Autonomie der EU geleistet werden können. Fusionsenergie ist eher **grundlastfähig** als flexibel einsetzbar, d. h. sie kann Strom aus erneuerbaren Quellen eher ersetzen als ergänzen. Durch die potenziell **niedrigen Grenzkosten** eignet sich die Kernfusion vermutlich dazu, den hohen Energieaufwand einer Kreislaufwirtschaft zu decken. So gesehen lassen sich die enormen **Forschungskosten** durchaus rechtfertigen. Der Titel der Veranstaltung „Kernfusion – Hoffnung für die Energiewende?“ darf nicht dahingehend missverstanden werden, dass statt aktiver Klimapolitik nur auf eine **technologische Wunderlösung** gewartet werden soll. Schon das Fragezeichen im Titel signalisiert einen nüchternen Blick auf die Möglichkeiten und Grenzen wissenschaftlichen Fortschritts. Denn es wäre unseriös, die Heilserwartung eines wundersamen Patentrezepts zu schüren, zumal aus heutiger Sicht nicht sicher vorhergesagt werden kann, wann entscheidende Durchbrüche in der Forschung und eine anschließende Skalierung der Technologien gelingen werden. Dies impliziert, dass konventionelle Lösungsansätze, die auf **bestehenden Technologien** aufbauen, weiterhin von zentraler Bedeutung sind. Angesichts des erheblichen Finanzaufwands ist es jedoch unerlässlich, alternative Optionen sorgfältig zu bewerten und zu vergleichen.

5. Kann die benötigte saubere Energie autark erzeugt werden, oder brauchen wir weiterhin eine internationale Arbeitsteilung?

Die EU peilt mit ihrem **Green Deal** das sicherlich weitreichendste Programm zum Klimaschutz an, obwohl auch die beiden größten „Klimasünder“, China und die USA, ihre Anstrengungen erhöhen. Die **EU-Klimapolitik** musste immer wieder die **Kritik** einstecken, zu ambitioniert, naiv oder gar ideologiegetrieben zu sein. Tatsächlich ist sie in vielen Bereichen wirtschaftsfreundlich, **flexibel und innovativ** ausgerichtet. **Sie hat** Energieeffizienz durch **Energiesparen** als Ziel. Sie strebt auch einen möglichst raschen **Kohleausstieg** an, was zu den tief hängenden Früchten der Klimapolitik zählt, die – obwohl dirigistisch – auch ökonomisch akzeptabel sind.

Längst ist die **Wettbewerbsfähigkeit** der Industrie berücksichtigt, wie z. B. in Form von teilweisen Gratis-Zuteilungen von Emissionsrechten im Emissionshandelssystem, der Einführung des CO₂-Grenzausgleichsmechanismus (CBAM), stufenweisen Übergangsfristen etc. Anders als von Kritiker:innen vorgeworfen ist **Energieautarkie kein erklärtes Ziel**, wenngleich dies von einzelnen NGOs und Parteien durchaus vertreten wird.

Sehr wohl aber möchte sie die **Energieversorgungssicherheit** verbessern und die große Abhängigkeit von fossilen Energie-Importen vermindern, ohne zu neue Abhängigkeiten von Rohstoff- und Inputlieferanten für Green-Tech führen. Die **europäische und österreichische Wasserstoffstrategien** setzen auf die **eigene Erzeugung von sauberem Wasserstoff**. Doch sie machen auch klar, dass wir in Österreich und auch auf europäischer Ebene einen Gutteil des benötigten Wasserstoffs bzw. dessen Derivate, wie Ammoniak oder Methan, **importieren** werden müssen – etwa aus Nordeuropa, Nordafrika oder vielleicht auch aus der Ukraine. Schließlich lässt sich die Importabhängigkeit im Energiebereich – mit ca. 63 % eine der höchsten der Welt – nicht innerhalb weniger Jahre beseitigen. Zudem hat eines der ältesten ökonomischen Konzepte, der komparative Vorteil, für die ökonomische Wohlfahrt weiterhin Gültigkeit.¹⁸

6. Kann verhindert werden, dass sinkende Treibhausgasemissionen in Europa durch steigende Emissionen auf anderen Kontinenten konterkariert werden?

Nationale **Alleingänge in der Klimapolitik** sind ineffizient, obwohl nicht ganz wirkungslos, und sie schaden der Wettbewerbsfähigkeit. Ansätze zur internationalen Koordinierung sind mit dem **Collective Action Problem** konfrontiert. Länder haben daher unbestreitbar ein Interesse, klimapolitische Trittbrettfahrer zu sein und CO₂-Emissionen zu verlagern, statt zu vermeiden (Carbon Leakage). Wenn Europas Nachfrage nach fossiler Energie sinkt, sollten **Ressourcenbesitzer** ökonomisch betrachtet die Preise sinken lassen, damit die **Ersatznachfrage** aus anderen Erdteilen den Markt räumt. Allerdings sorgen **Kartelle** wie die OPEC dafür, dass die Preise nicht immer mit der Nachfrage fallen.

Ungewollt erweisen sie dadurch dem Weltklima einen guten Dienst. Allerdings entstehen **Verlagerungseffekte** durch unilaterale Klimapolitik in einer **sehr engen „ceteris paribus“-Perspektive**, aber in der Realität sind eben nicht alle Bedingungen völlig unverändert. Entscheidend ist, ob sich die weltweite Verbrauchsmenge an fossiler Energie bzw. die dadurch generierten Emissionen ändern. Fällt die EU aus der Weltnachfrage nach fossiler Energie, verschiebt bzw. dreht sich die aggregierte **Nachfragekurve** nach links, die bei gegebener aggregierter **Angebotskurve** im Allgemeinen zu einem neuen Gleichgewicht bei niedrigerem Preis und **niedrigerer Menge** führt. Fraglich ist, wie **preiselastisch** sich die Nachfrage des Rests der Welt verhält. Dabei sind zumindest folgende Aspekte zu berücksichtigen: Erstens, die **angebotspolitischen Reaktionen**. Es geht darum, wie rasch innerhalb der EU die Kapazitäten für das **Angebot an fossiler Energie zurückgefahren** bzw. stillgelegt werden. Weiters hängt es vom Interesse der Anbieter fossiler Energie an hohen Preisen und ihrer **Marktmacht** ab (siehe OPEC+ und andere Kartelle). Zudem bremsen Energieunternehmen ihre fossilen Investitionen aus Angst vor „stranded assets“.

Außerdem ist die EU ein **gewichtiger Standardsetzer** für Technologie sowie Produktions- und Konsummuster, denen andere Länder schrittweise folgen (müssen). Hinzu kommt der Druck unterstützender politischer Maßnahmen wie eines **CO₂-Grenzausgleichs**. Nicht zuletzt ist das **Pariser Klimaabkommen** so gestaltet, dass durch den Gruppendruck de facto **global koordiniertes Handeln** stattfindet: etwa durch Verpflichtungen, die im 5-Jahreszyklus nachgebessert werden müssen.

¹⁸ Das Konzept des komparativen Vorteils von David Ricardo (1817) besagt, dass Länder sich auf die Produktion der Güter spezialisieren sollten, bei denen sie den größten relativen Vorteil haben, selbst wenn sie in der Produktion aller Güter weniger effizient sind als andere Länder.

Abschließend steigt die **Weltnachfrage** unabhängig von der EU. Auch in den letzten Jahrzehnten waren die emissions- bzw. nachfragedämpfenden Maßnahmen innerhalb der EU nicht die Hauptursache für den Nachfrageanstieg im Rest der Welt.

Als Alternative plädieren Kritiker:innen für einen internationalen Klimaklub, den bereits Nobelpreisträger Nordhaus vorschlug. Nach innen gelten im Klub für alle Länder hohe CO₂-Steuern, nach außen schützen CO₂-Zölle vor Wettbewerbsnachteilen. Die G7 hat bereits so einen Klub gegründet, der mittlerweile 36 Mitglieder und ein Sekretariat hat. Jedoch beschränkt sich dieser vorerst auf Bekenntnisse und Dialog. Anders als von Kritiker:innen in den Raum gestellt, strebt die EU eine **internationale CO₂-Bepreisung** an. So kann der Grenzausgleichsmechanismus der EU als Versuch gewertet werden, andere Wirtschaftsräume zu mehr Klimapolitik zu motivieren. Bepreisen die Handelspartner selbst ihre Emissionen in ähnlichem Ausmaß wie die EU, sind Importzölle nicht mehr notwendig.

4 Tentative Schlussfolgerungen

Auch wenn oft Welten unterschiedlicher Auffassungen aufeinander zu prallen scheinen, lassen sich manche Missverständnisse durch einen sorgfältigen **Faktencheck** ausräumen. Der Teufel steckt oft im Detail. Alle technischen Einzelheiten zu klären, würde den zur Verfügung stehenden Rahmen sprengen. Dennoch ließ die Veranstaltungsreihe das **Potenzial** für eine produktive **Konsensfindung** zumindest erahnen. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Bewältigung der durch den Klimawandel hervorgerufenen Herausforderungen erfordert die unvoreingenommene Einbeziehung unterschiedlicher Perspektiven sowie eine solide wissenschaftliche Grundlage. Die Verwendung einer gemeinsamen Terminologie ist von grundlegender Bedeutung, um Missverständnisse zu vermeiden und den interdisziplinären Dialog zu fördern.

Eine kontinuierliche kritische Reflexion sowie die Akzeptanz von Unsicherheiten erlauben eine flexible Anpassung an neue Erkenntnisse. Die Auswahl der Instrumente sollte sich an Kriterien wie Kosteneffizienz, dem Vorsorgeprinzip, Technologieoffenheit und langfristiger Nachhaltigkeit orientieren. Dabei sind Zielkonflikte zu berücksichtigen und gegebenenfalls durch eine pragmatische Herangehensweise zu lösen. Eine international koordinierte **CO₂-Bepreisung** in Kombination mit der Förderung grüner Innovationen erfüllt die genannten Kriterien besonders gut und sollte daher eine zentrale Rolle in der Energiewende einnehmen.

Zweifel an der Effektivität und Effizienz einzelner Maßnahmen wird es immer geben, sie dürfen aber nicht mit der Leugnung wissenschaftlicher Erkenntnisse verwechselt werden. Zweifel ist ein wichtiges **Forschungsmotiv**, das die Wissenschaft vorantreibt. Es gilt, Zweifel produktiv und konstruktiv zu nutzen, Maßnahmen zu evaluieren und gegebenenfalls anzupassen. Solche Anpassungen sollten jedoch möglichst graduell erfolgen, da abrupte Veränderungen im Sinne einer Stop-and-Go-Politik der **Glaubwürdigkeit** der Klimapolitik insgesamt schaden.

Dies erhöht die Gefahr einer ungeordneten bzw. **chaotischen Transformation**, die wiederum die **Planungssicherheit** der Wirtschaftsakteure und damit auch der Politik beeinträchtigt. Problematisch ist auch, dass sich Österreich ein sehr ambitioniertes Netto-Null-Ziel für 2040 gesetzt hat, es aber offensichtlich nicht einfach ist, einen Konsens über den Weg dorthin zu finden (siehe Diskussion zum Nationalen Energie- und Klimaplan).

Dies kann sich negativ auf die Erwartungen der Investoren auswirken und potenziell die Risiken für die Preis- und Finanzmarktstabilität erhöhen. Zumal letztere die Kernaufgaben einer Notenbank sind, sieht sich die OeNB in der Verantwortung, ökonomische Expertise in die Diskussion einzuholen.

Sollte es tatsächlich dazu kommen, dass Maßnahmen revidiert werden, empfiehlt es sich, gleichzeitig voll ausgleichende **Ersatzmaßnahmen** einzuführen. Berechtigte Zweifel an der Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit einzelner Klimaschutzmaßnahmen dürfen nämlich nicht darüber hinwegtäuschen, dass eigentlich ein **permanentes Upgrading** notwendig wäre, um die wissenschaftlich fundierten Klimaziele zu erreichen.¹⁹ Ökonomisch drückt sich dies in **stetig steigenden (Schatten-)Preisen** für Treibhausgase aus. Zwar bedeutet das eine erhöhte Kostenbelastung, insbesondere für die von fossilen Energieträgern abhängigen Sektoren, schafft aber auch die richtigen **Anreize** zur Defossilisierung. Gleichzeitig generiert es öffentliche Einnahmen, mit denen nachhaltige, produktive Investitionen finanziert werden können, neben Kompensationen für die Verlierer der Energiewende.

¹⁹ Zweifel an der wissenschaftlichen Fundierung der Ziele selbst sind kein Tabu, aber nicht zielführend, solange ein breiter Konsens über deren Notwendigkeit besteht. Natürlich wird es immer Minderheitsmeinungen geben, aber eine Gesamtbewertung sollte sich am Sorgfaltsprinzip orientieren, wobei mögliche Fehler erster Ordnung gegen Fehler zweiter Ordnung abzuwägen sind. Vereinfacht ausgedrückt, ist ein Kosten-Nutzen-Vergleich zwischen dem Klimawandel und einer Klimawende auf der Basis von Eintrittswahrscheinlichkeiten anzustellen.

5 Literaturverzeichnis

Ash, N., A. Davies und C. Newton. 2020. Renewable Electricity Requirements to Decarbonise Transport in Europe with Electric Vehicles, Hydrogen and Electrofuels. Ricardo Report, West Sussex.

https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2020_Report_RES_to_decarbonise_transport_in_EU.pdf

BMK. 2022. Berichte zum Projekt „Grüne Industriepolitik“.
https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/gruene-industriepolitik/ziele.html

Holzmann, R., A. Breitenfellner, W. Pointner, A. Raggl, R. Sellner, M. Silgoner, A. Stelzer und A. Stiglbauer. 2024. How could a decline in r^* be reversed? Productivity, green transition, and the retirement age. OeNB, Occasional Paper No. 7, forthcoming.

IEA. 2023. The State of Clean Technology Manufacturing. An Energy Technology Perspectives Special Briefing. <https://www.iea.org/reports/the-state-of-clean-technology-manufacturing>

OeNB. 2023f. Themenschwerpunkt Energiewende. YouTube-Kanal der OeNB. Mitschnitte von bislang neun Veranstaltungen.

<https://youtube.com/playlist?list=PLGTa3ALATffWtEexDrLlxz7uE0zlXutdG&si=tq-v1JesR25FOLKe>

OeNB. 2024. Financing the green transition: cooperation between China and Europe. Session 3 at CEEI 2023 - Day 2 - Conference on European Economic Integration. Minute 01:52:12.

<https://www.youtube.com/watch?v=OWeWzxBgr70&t=5s>

Nordhaus, W. 2015. Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy. American Economic Review 105/4: 1339–1370. DOI: 10.1257/aer.15000001.

Stechemesser A., N. Koch, E. Mark, E. Dilger, P. Klösel, L. Menicacci, D. Nachtigall, F. Pretis, N. Ritter, M. Schwarz, H. Vossen und A. Wenzel. 2024. Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. Science 385/6711: 884-892 DOI: 10.1126/science.adl6547

World Bank. 2023. Country Climate and Development Reports (CCDRs)
<https://www.worldbank.org/en/publication/country-climate-development-reports>