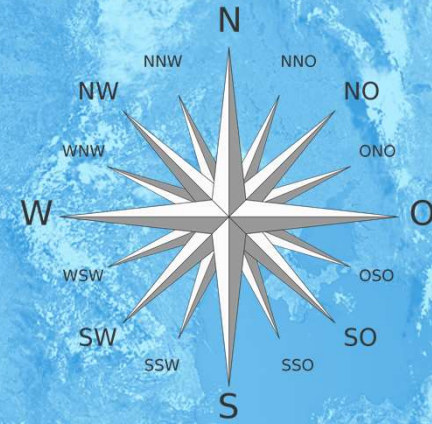


DIE ENERGIESYSTEMANALYSE ALS KOMPASS IN DER ENERGIEWENDE

Vortrag bei der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, AKE, Bad Honnef

Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023



Agenda

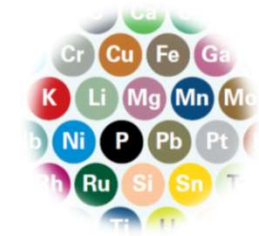


- Einblicke in unsere Forschung:

1. Szenarien zum klimaneutralen & sektorengesetzten Energiesystem 2045: Verkehrswende



2. Benötigte Ressourcen der Energiewende



3. Energiemarktdesign

- Zusammenfassung und Fazit



Motivation



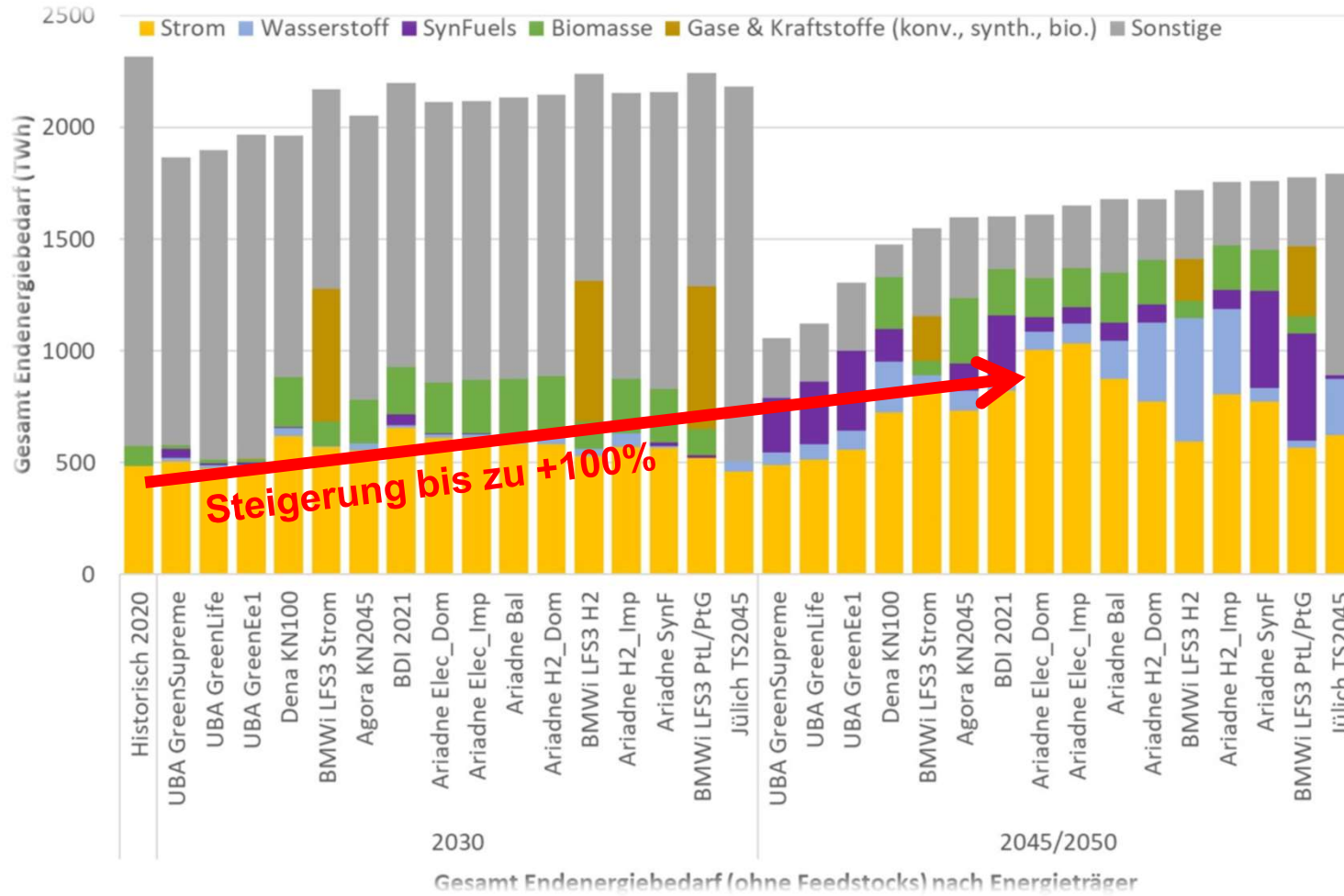
- Die Energiesystemanalyse gibt Antworten zu (Beispiele):
 - Wie könnte ein klimaneutrales Energiesystem in 2045 aussehen? (Szenarien)
 - Haben wir hierfür genügend Ressourcen und wie abhängig sind wir hier von (unsicheren) Drittländern? (Assessment)
 - Welches Energiemarktdesign bietet effektive Anreize, um „optimale“ Ausbaupfade von Erneuerbaren Energiequellen anzureizen? (Energieökonomik)

DIE VERKEHRSWENDE

Themenfeld 1



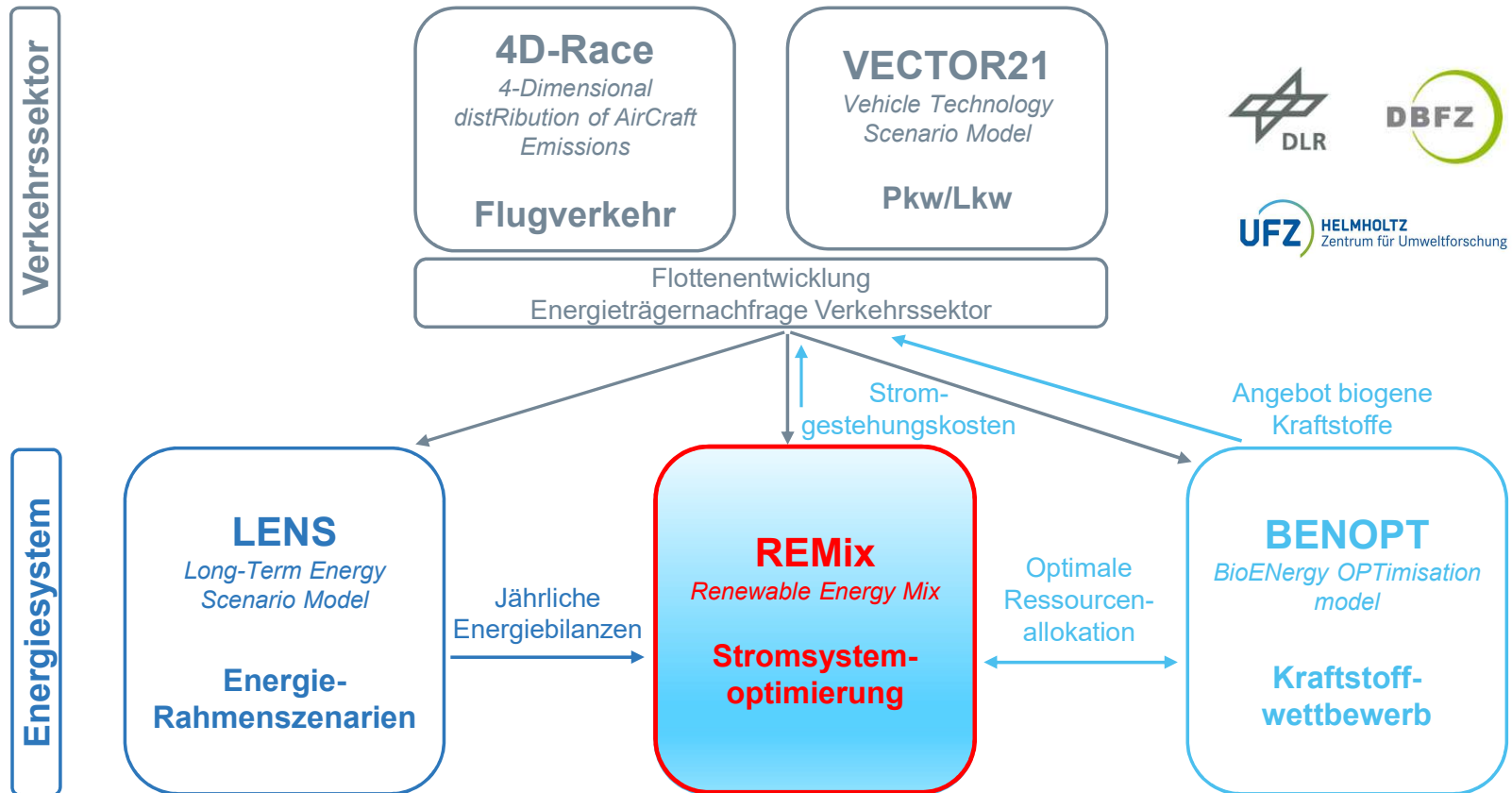
Stromnachfrage 2050



Übersicht der Modelle zur Szenarien-Modellierung



- Gekoppeltes Modellsystem
 - Luftverkehr (4D-RACE)
 - Straßenverkehr (Vektor21)
 - Stromsystem (REMix)
 - Mengengerüste (LENS)
 - Kraftstoffwettbewerb (BENOPT)

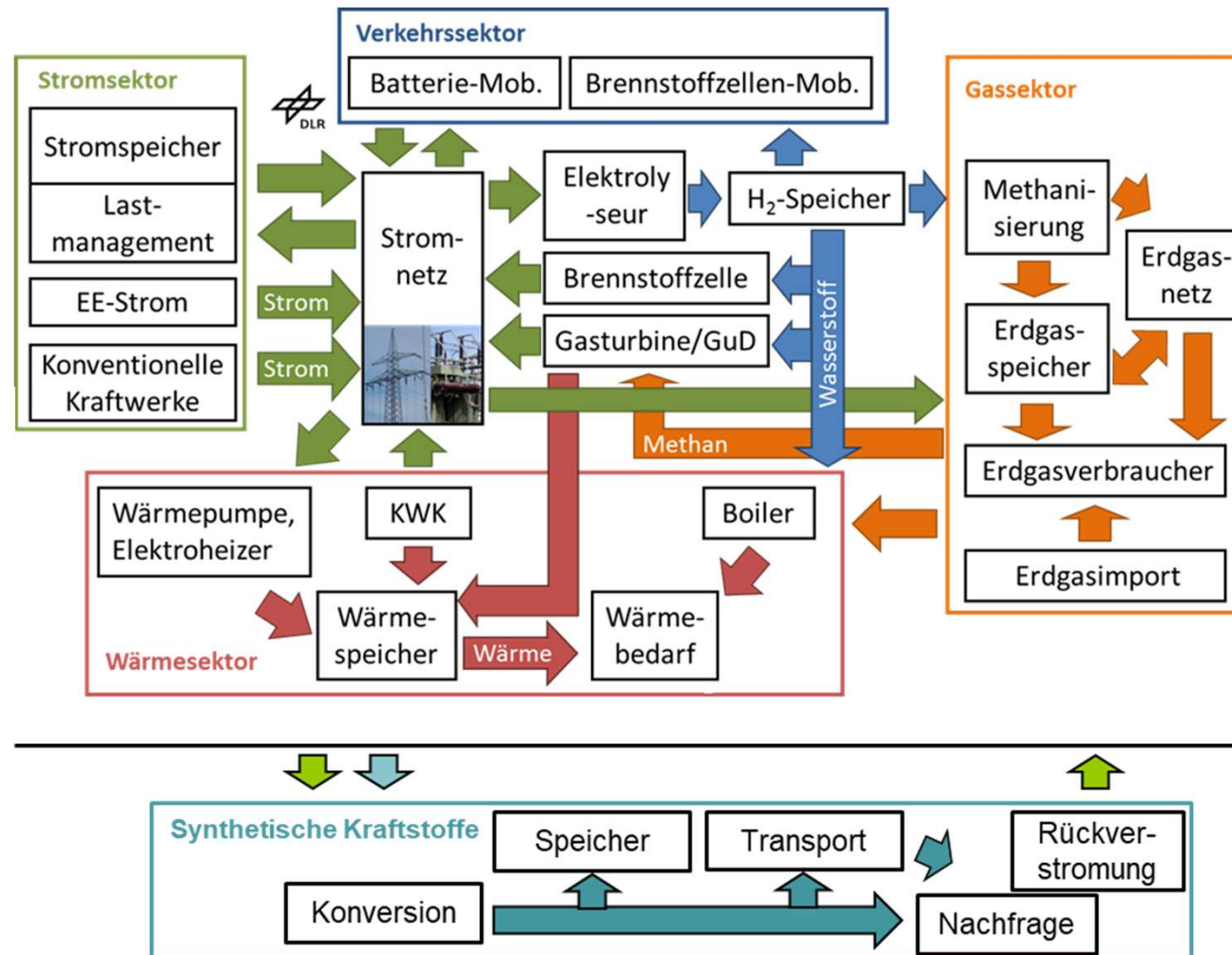


BEniVer

Begleitforschung Energiewende im Verkehr



Betrachtete Flüsse in REMix



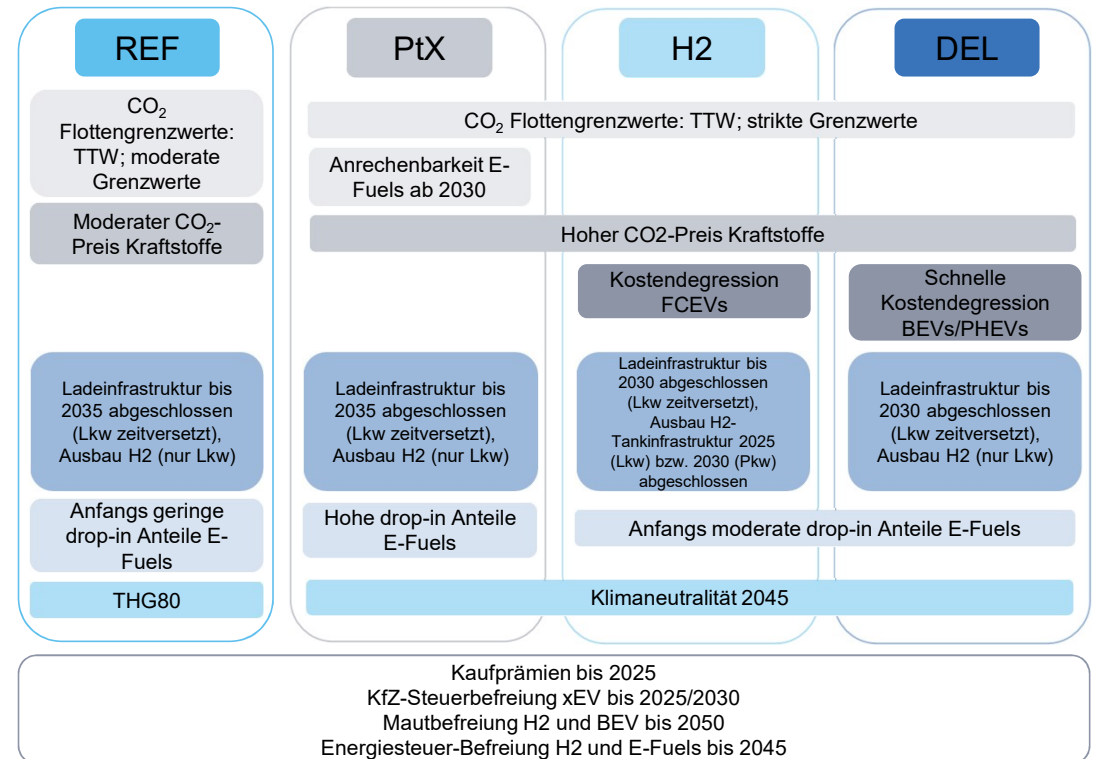
REMIX
Renewable Energy Mix



Betrachtete Szenarien



- ✓ Klimaneutralität im Verkehrssystem bis 2045
- ✓ Bestehende politische Rahmenbedingungen
- ✓ Moderate Zunahme der Verkehrsnachfrage
- ✓ Effizienzverbesserung der Technologien
- ✓ Ab 2035 nur noch emissionsfreie neue Pkw und leichte Nfz im DEL und H2
 - ✓ Im PtX-Szenario bis zu 10% nachweislich mit E-Fuels betriebene Pkw möglich
- ✓ Ab 2040 nur noch emissionsfreie neue schwere Nfz



Die Szenarien-Analysen stellen keine Prognosen oder Empfehlungen dar. Sie beschreiben mögliche Wege (Transformationspfade) im Kontext der zugrundeliegenden Annahmen. Seit dem Projektbeginn im Jahr 2018 haben sich die (welt-)politischen Rahmenbedingungen in vielfacher Hinsicht sehr dynamisch verändert. Insbesondere die Umwelt-politischen Änderungen sind sehr zu begrüßen. Jedoch konnten nicht alle Gesetzesänderungen (insbesondere die Sektorziele 2030) vollständig in der Modellierung berücksichtigt werden.



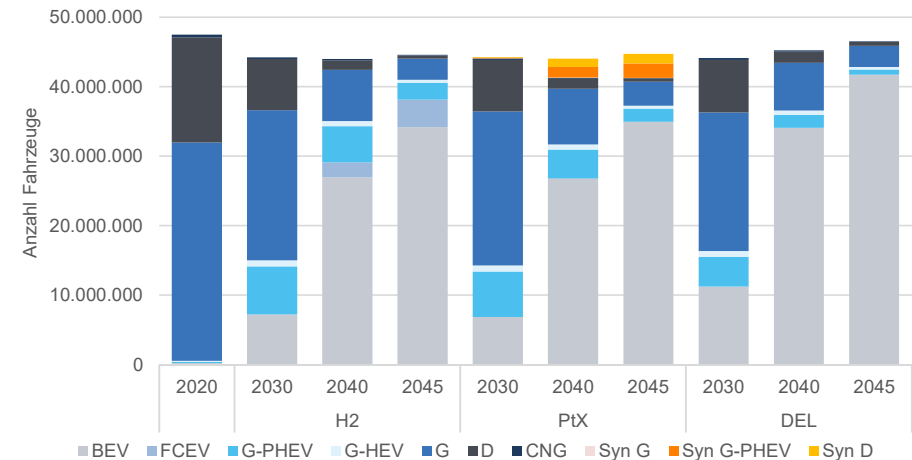
Modellierte Bestandsentwicklung (Pkw/Lkw)



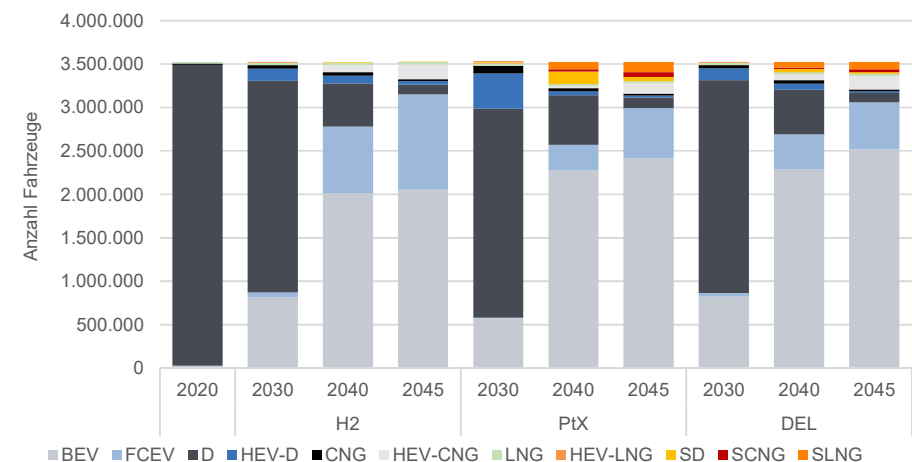
- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) in Pkw-, wie in Lkw-Flotte zukünftig dominant
 - *Das Zwischenziel von 15 Mio. BEVs in 2030 ist nur mit ambitionierteren Maßnahmen zu erreichen*
- Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) vor allem mit Potential für Lkw
- Trotz steigenden Neuzulassungszahlen erfolgt die Erneuerung der bestehenden Flotte mit zeitlicher Verzögerung

→ Erreichen der **Klimaziele** im Verkehrssektor bis 2045 bei bestehenden politischen und wirtschaftlichen Bedingungen **äußerst herausfordernd**

Pkw Fahrzeugbestand DE nach BEniVer Szenarien



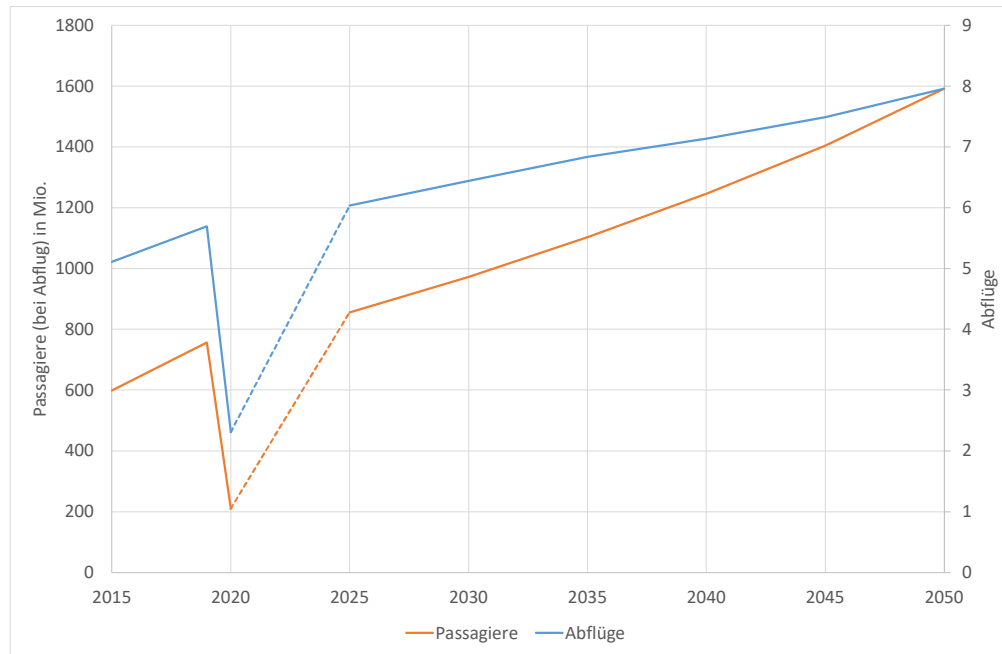
Lkw Fahrzeugbestand DE nach BEniVer Szenarien



Luftfahrt

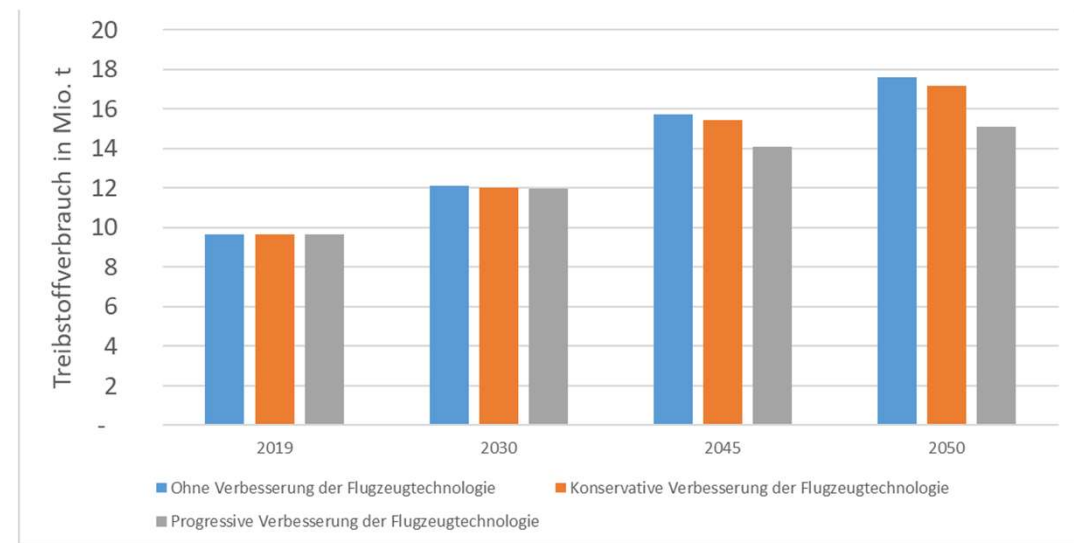


Verkehrsprognose EU27 (Abflüge und Passagiere)



Die Pandemie hat nur zur einer kurzen Delle im Wachstum des Luftverkehrs geführt.

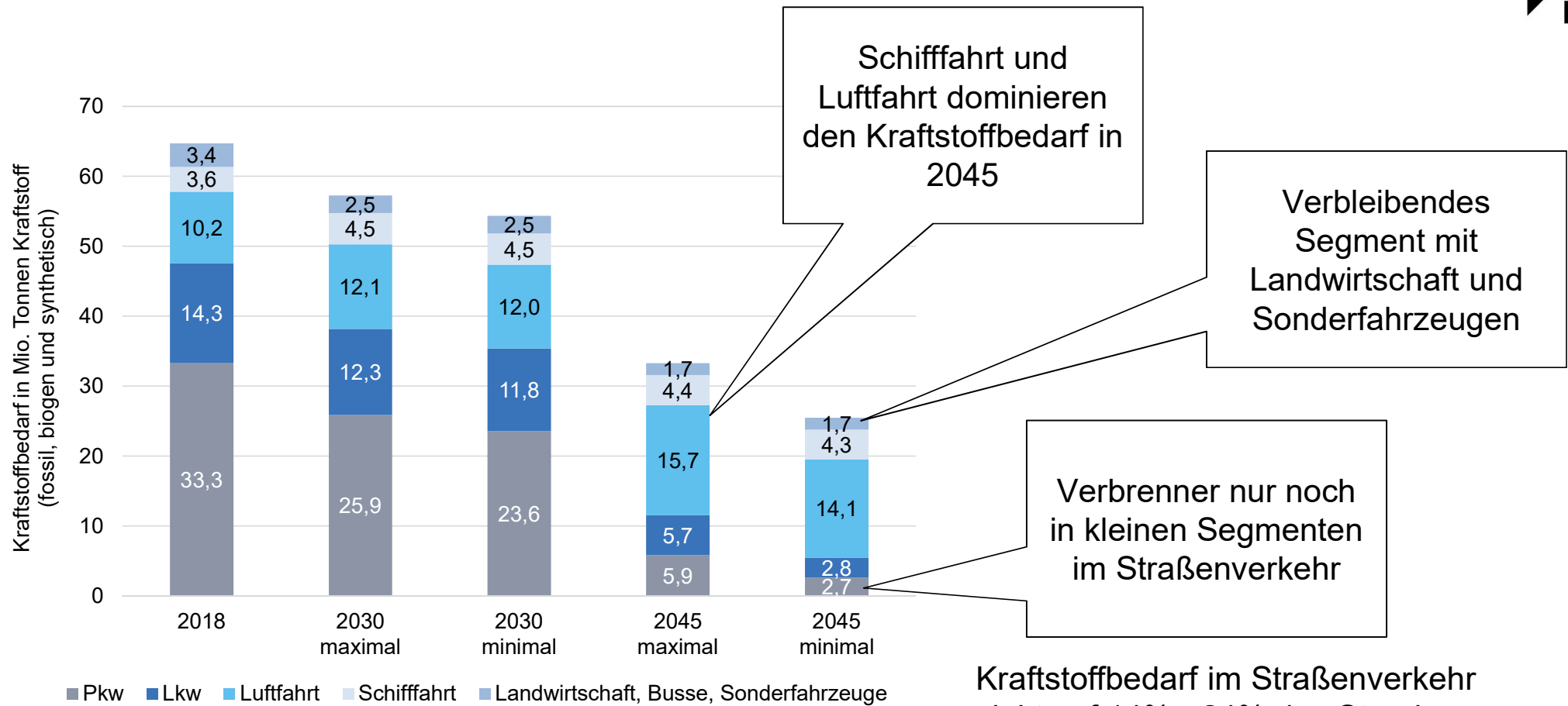
Prognose des Treibstoffbedarfs in Deutschland



Wachstum des Bedarfs des Kraftstoffbedarfs je nach Technologieentwicklung auf 15,1 bis 17,6 Mio Tonnen. Wasserstoff kann nur ein kleines Segment ab 2040 bis 2500 km abdecken.



Kraftstoffbedarf Verkehr & Landwirtschaft



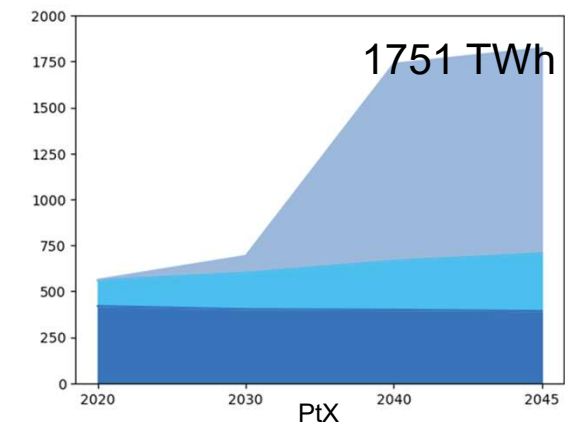
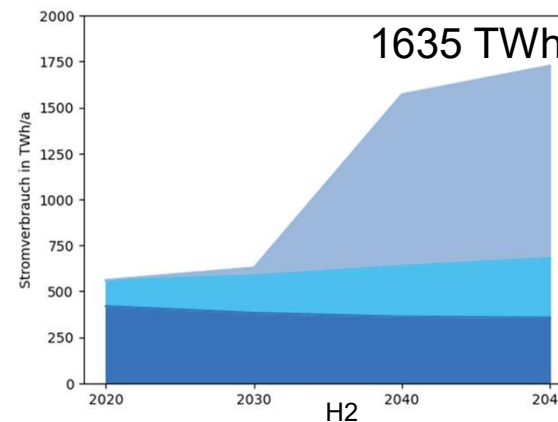
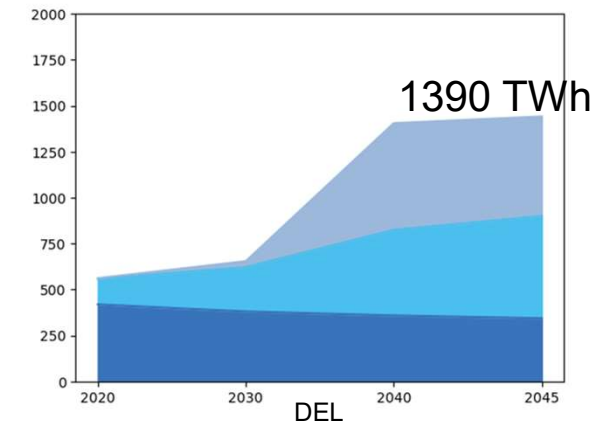
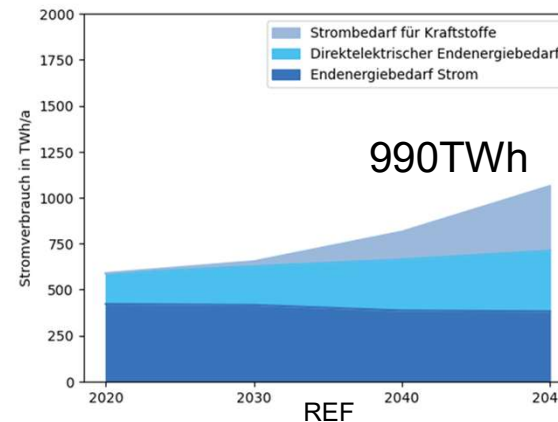
Kraftstoffbedarf im Straßenverkehr sinkt auf 14% - 24% des Standes von 2020



Resultierende Nachfrage im Energiesystem



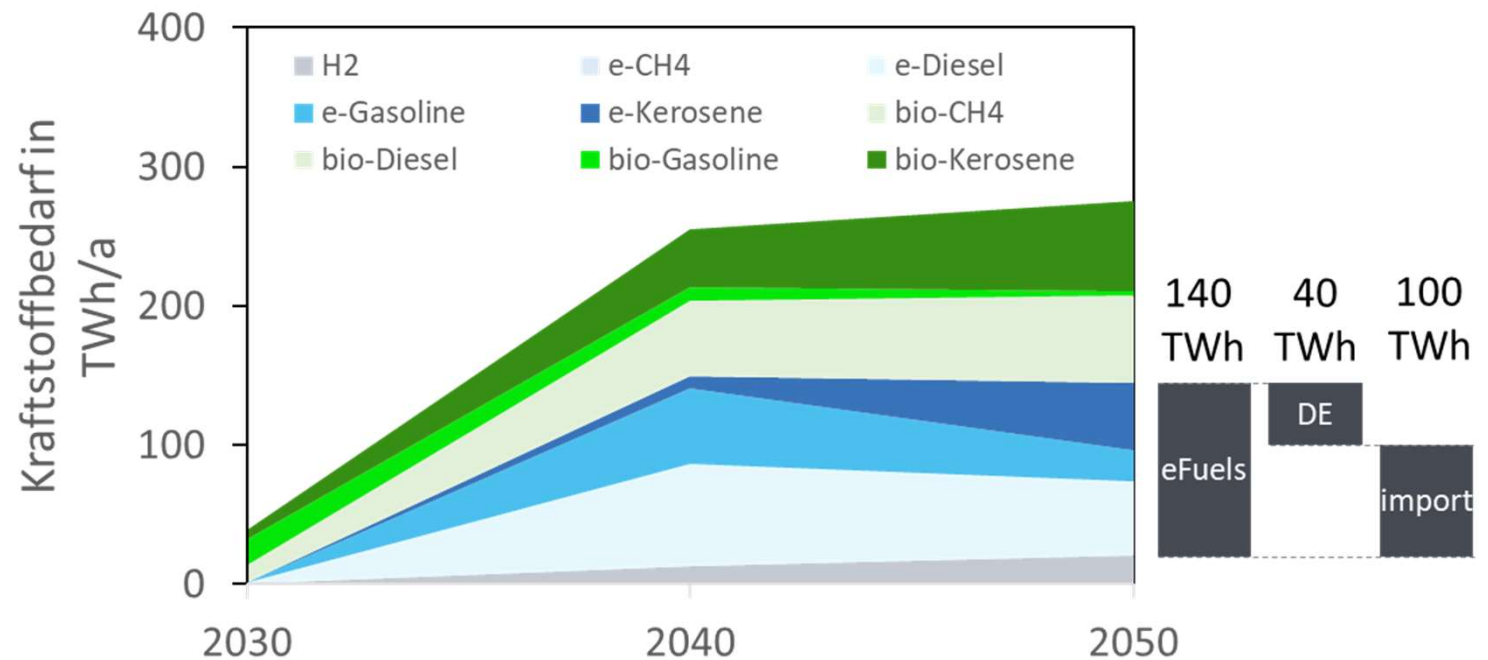
- Energiebedarf für bestehende Stromanwendungen sinkt in allen Szenarien.
- Steigende Nachfrage für direktelektrische Bedarfe (e-Mobilität und Wärmepumpen), insb. im DEL Szenario.
- Stark steigende Nachfrage für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe ab 2030 (hier Herstellung in D angenommen).
- Geringster Gesamtenergiebedarf im DEL Szenario bei 1390 TWh, höchster Bedarf bei 1751 TWh im PtX Szenario.



Biokraftstoffe und Import



Treibstoffbedarf in TWh/a im PtX Szenario



- Etwa 50% des Bedarfs wird aus Biokraftstoffen gedeckt.
- 71% des Bedarfs an strombasierten Kraftstoffen wird importiert.



Fazit (Verkehrswende)



- Wesentlicher Treiber für den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen sind **Schiff- & Luftfahrt**, da es hier kaum Alternativen für die Defossilisierung gibt.
- Nachfrage im **Straßenverkehr** hängt im Wesentlichen an der Flottenentwicklung, wie viele Verbrenner bis 2030 und 2045 noch im Bestand sind. Zur Erreichung der Klimaneutralität müssten diese 2045 entweder mit synthetischen Kraftstoffen betrieben oder nicht mehr genutzt werden.
- Es bleibt ein Segment für Landwirtschaft und Sonderfahrzeuge, für das synthetische Kraftstoffe möglicherweise die günstigste Defossilisierungsoption sind.
- Die Nachfrage der Zukunft wird von Kerosin und Schifffahrtkraftstoffen dominiert, verbleibende Straßensegmente fallen als Nebenprodukte ab. Beimischungsquoten sollten ggf. dahin optimiert werden, dass vor allem in langfristige Nachfrage investiert werden kann.

BEniVer

Begleitforschung Energiewende im Verkehr

Mehr Informationen: Carsten Hoyer-Klick oder Projekthomepage

www.energiesystem-forschung.de/beniver

Bericht (2023):

www.energiesystem-forschung.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/4898/live/lw_datei/beniver-roadmap_kurzbericht_final.pdf



BENÖTIGTE RESSOURCEN DER ENERGIEWENDE

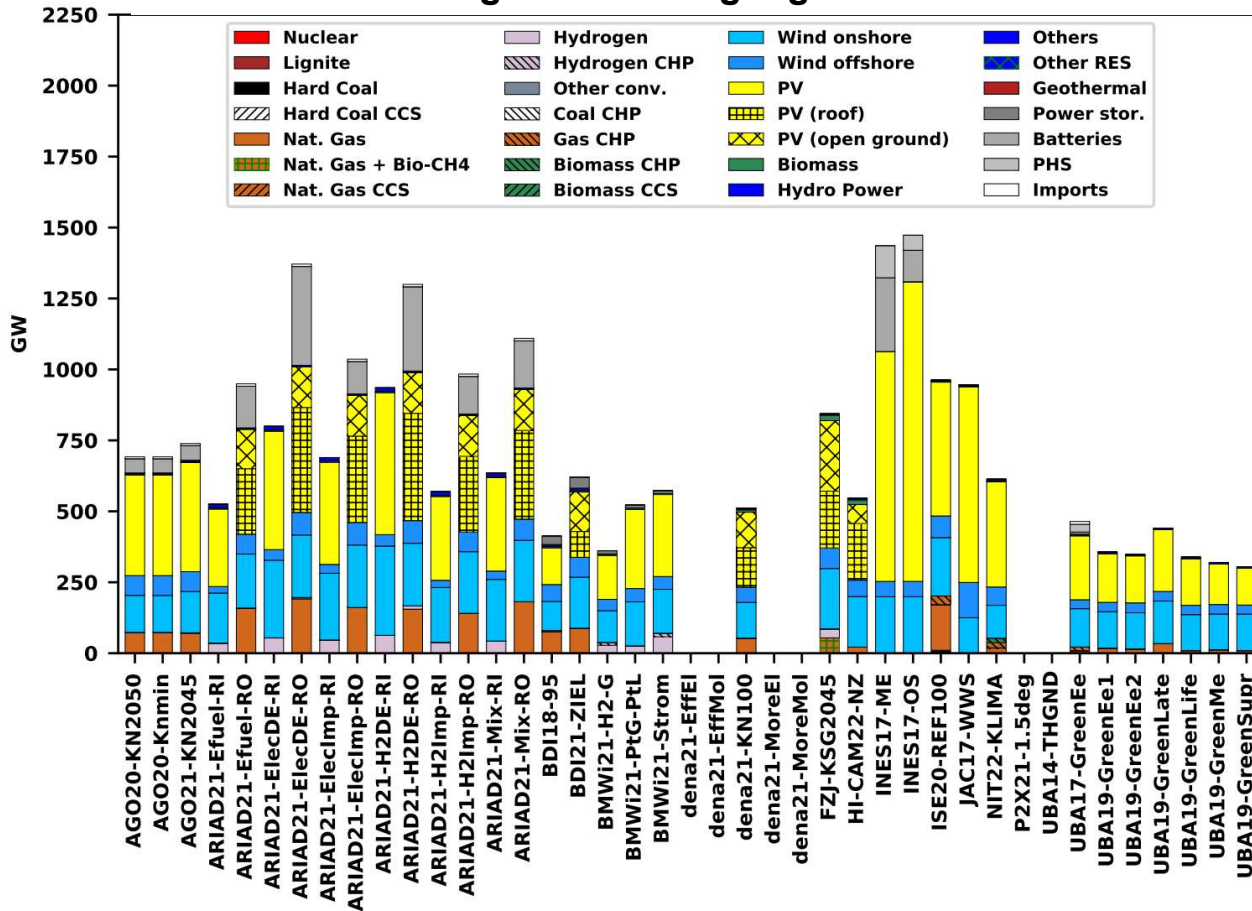
Themenfeld 2



Motivation



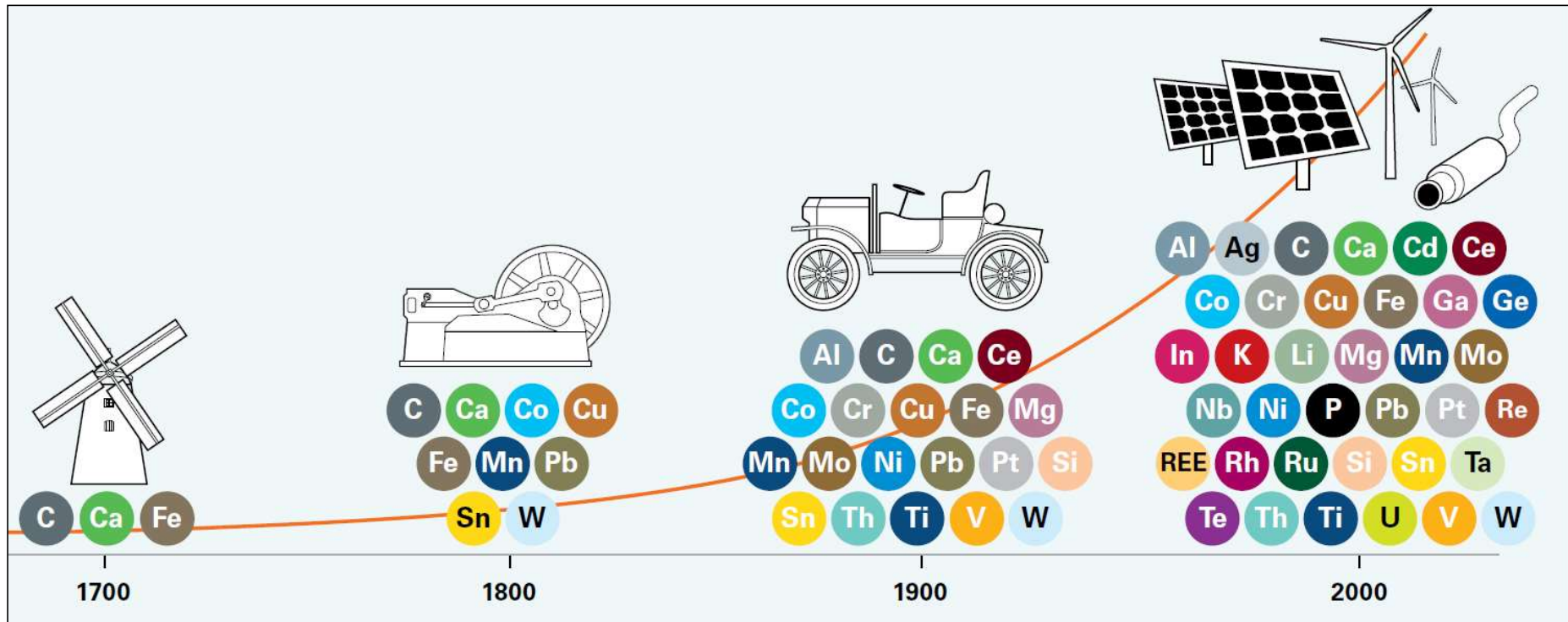
Installierte Leistung Stromerzeugung Deutschland 2045/2050



- Kein einheitliches Bild eines klimaneutralen Energiesystems
- Meist Szenarien-Entwicklung auf Basis kostenminimierender Ansätze
- Oft Solar & Wind als Konstanz
- Unberücksichtigt bleiben:
 - Umweltauswirkungen jenseits CO₂
 - Makro-ökonomische Auswirkungen
 - Soziale Auswirkungen
 - Rohstoffbedarf
 - ...

selected scenarios with 100% CO₂ emissions reduction 2050 - %16 complete year and year between 2035 and 2050

Motivation



Zepf, Reller, Rennie, Ashfield, Simoons: Materials critical to the energy industry – an introduction. 2nd edition. BP 2014

Grundlegende Forschungsziele



- Abschätzung der Rohstoffbedarfs in Szenarien für die Energie- und Verkehrswende mit besonderem Fokus auf „kritische“ Rohstoffe
- Identifikation (a) Risiko für kurz- bis mittelfristige Versorgungsengpässe aufgrund des schnell steigenden (globalen) Bedarfs, (b) geopolitischen Risikos
- Identifikation von Risiko-Hotspots auf Technologie- und Szenarien-Ebene
- Vergleich des Risikos von Rohstoff-Engpässen für verschiedene Transformations-Szenarien

Langfristiges Ziel:

- Entwicklung von Szenarien für die Energie- und Verkehrswende, die das Risiko von Engpässen bei der Versorgung mit kritischen Rohstoffen minimieren

Kritische Materialien



USGS
science for a changing world

Draft Critical Mineral List—Summary of Background Information—U.S. Geological Survey Input Document in Response to Secretary

European Commission

Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020)

DERA
Bundesanstalt für Rohstoffe

DERA Deutsche Rohstoffagentur
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

49 DERA Rohstoffinformationen

50 DERA Rohstoffinformationen

Kritische Materialien:

- Hohe Wirtschaftliche Bedeutung
- Risiko von Lieferengpässen

Open-File Report 2018–1021

U.S. Department of the Interior
U.S. Geological Survey

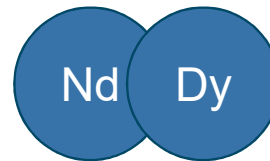
Rhodium 80%
Ruthenium 93%

Raw Materials

Angebotskonzentration bei mineralischen und Zwischenprodukten – potenzielle Preisentwicklung

Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021
»Auftragsstudie«

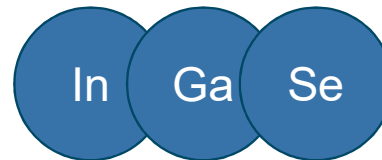
Beispiele: Kritische Materialien in Energie- und Transport-Technologien – Beispiele I



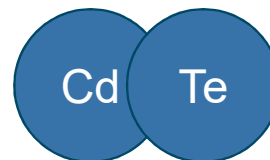
Permanentmagnete in getriebelosen Windkraftanlagen



Viele Silizium-basierte PV-Module

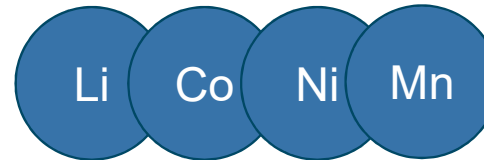


CIGS-Dünnschicht-Module



CdTe-Dünnschicht-Module

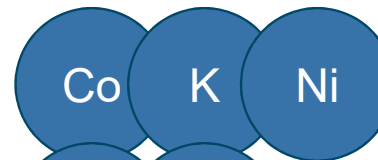
Beispiele: Kritische Materialien in Energie- und Transport-Technologien – Beispiele II



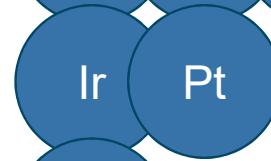
Lithium-Ionen-Batterien



Vanadium-Redox-Flow-Batterien



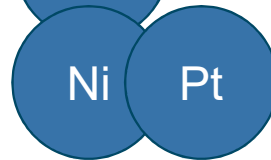
Alkalische Elektrolyseure



PEM-Elektrolyseure

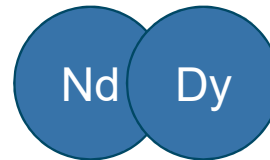


PEM-Brennstoffzellen

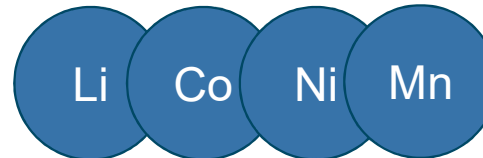


PAFC-Brennstoffzellen

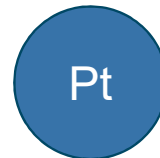
Beispiele: Kritische Materialien in Energie- und Transport-Technologien – Beispiele III



Permanentmagnete in Elektromotoren



Lithium-Ionen-Batterien



PEM-Brennstoffzellen

- Große Vielfalt an kritischen Materialien in zentralen Technologien für die Energie- und Verkehrswende
- Materialbedarf hängt stark von der konkreten Technologie innerhalb einer Technologiekategorie ab
- Datenverfügbarkeit kritisch für Analyse Rohstoffbedarf Energiewende

Analyse des Risikos kurz- bis mittelfristiger Engpässe bei der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen



Potentielle kurz- bis mittelfristige Engpässe bei der Rohstoffversorgung

Aufgrund des schnell steigenden globalen Bedarfs

Sehr schnelle Ausweitung der Produktion nötig?

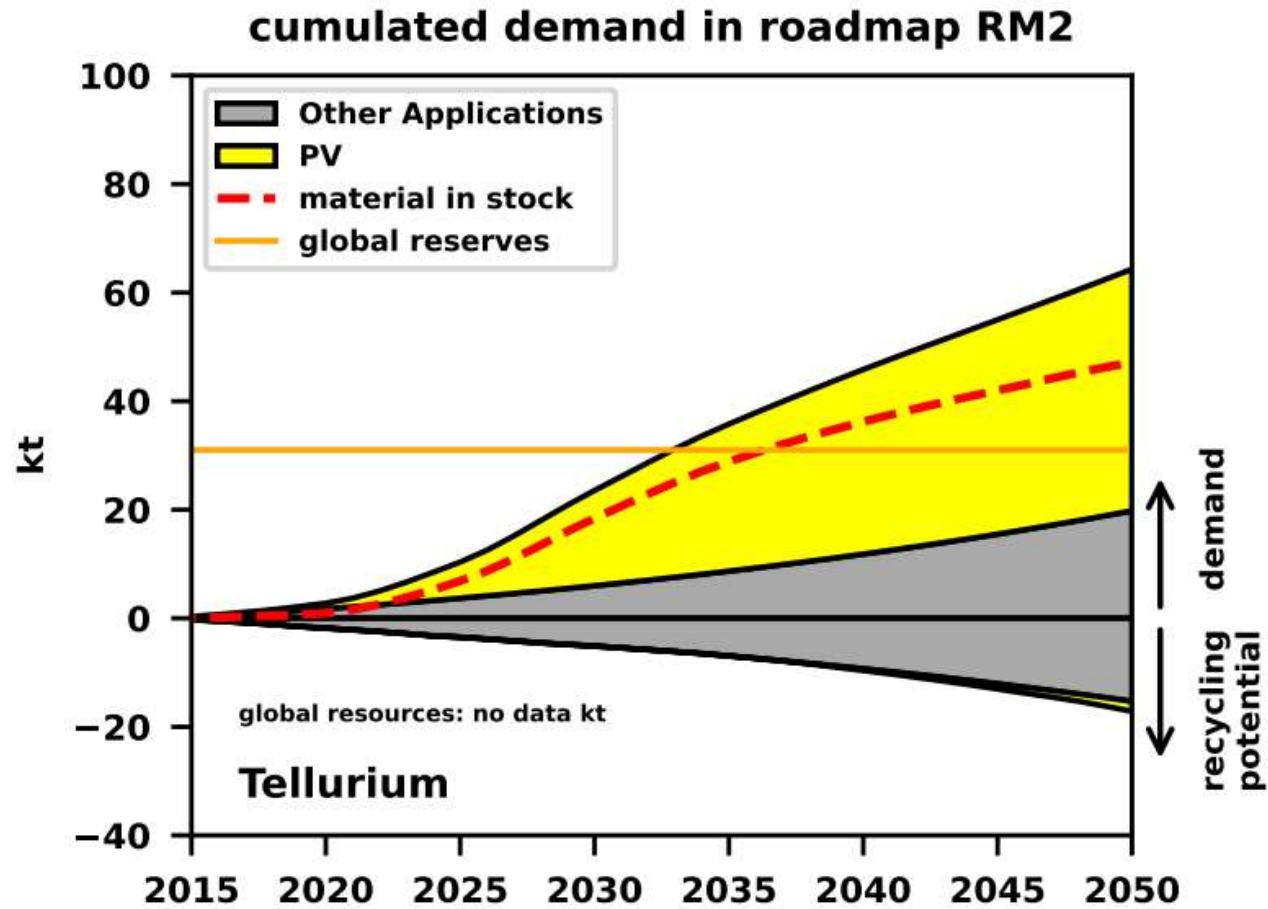
Abbau von heute noch nicht wirtschaftlich nutzbaren Lagerstätten nötig?

Aufgrund geopolitischer Faktoren

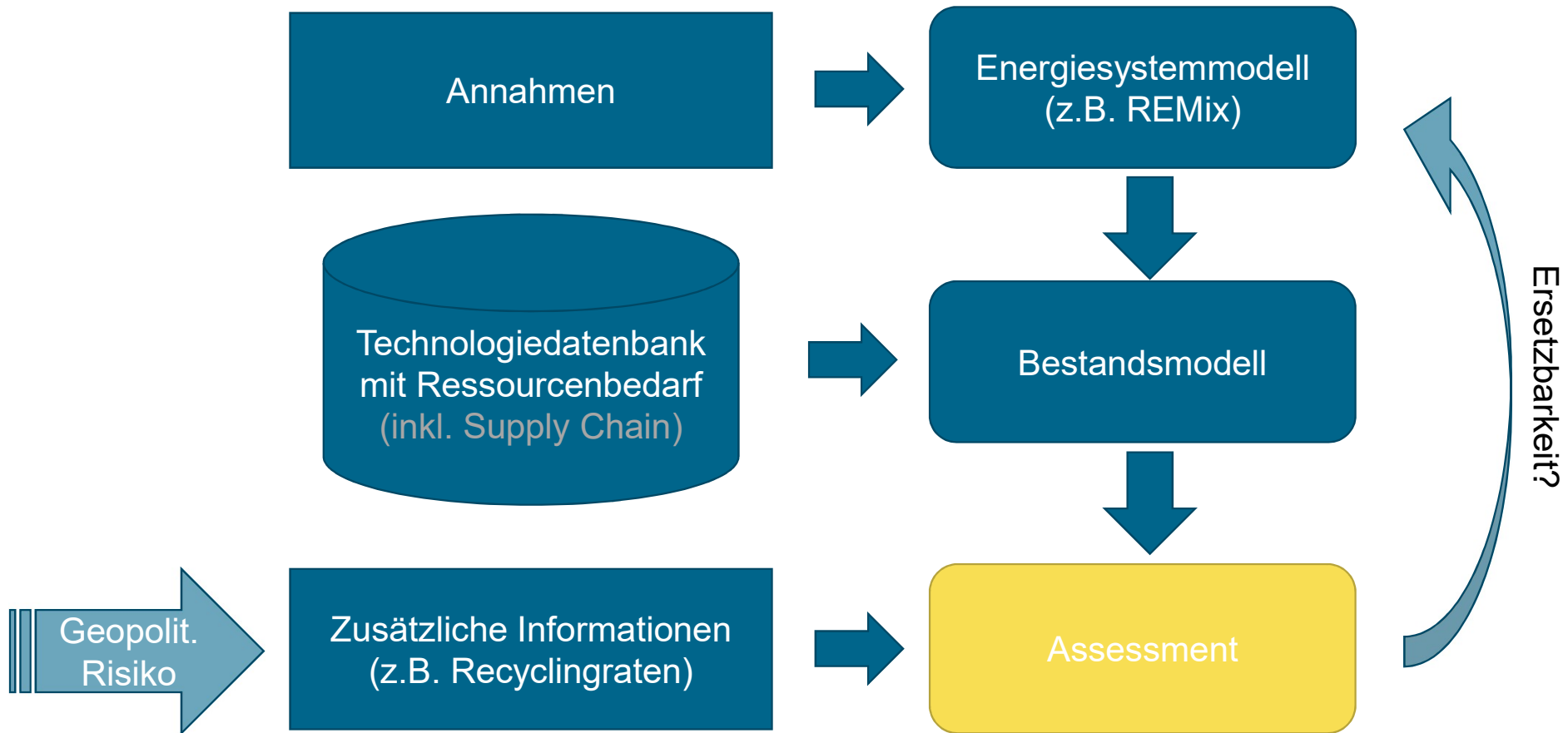
Konzentration der Lieferländer

Gewichtetes Länder-Risiko der Rohstoffe

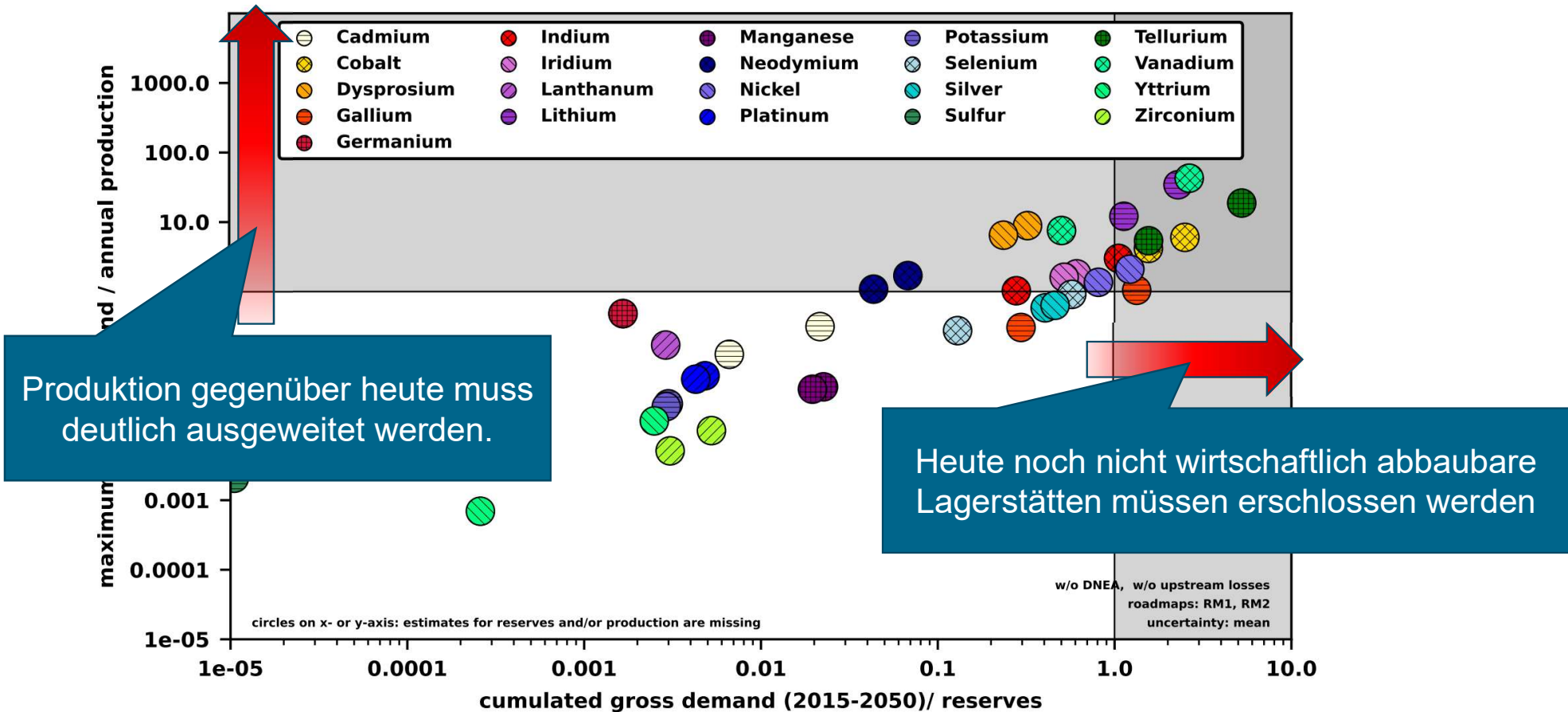
Beispiel-Ergebnis: Entwicklung des Tellur-Bedarfs



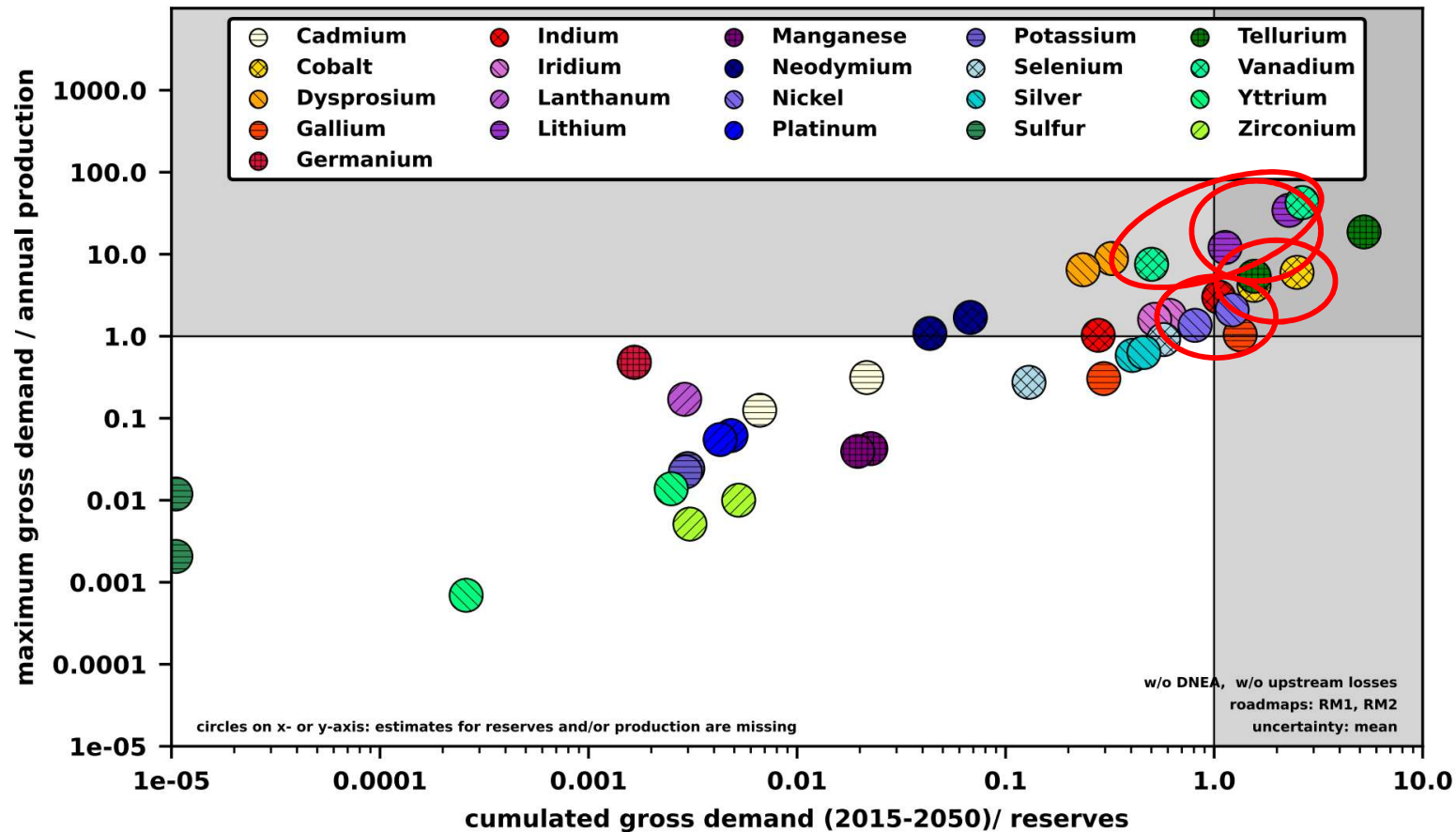
Verwendete „Methode“



Risiken für kurz- bis mittelfristige Versorgungsengpässe aufgrund des stark steigenden Bedarfs



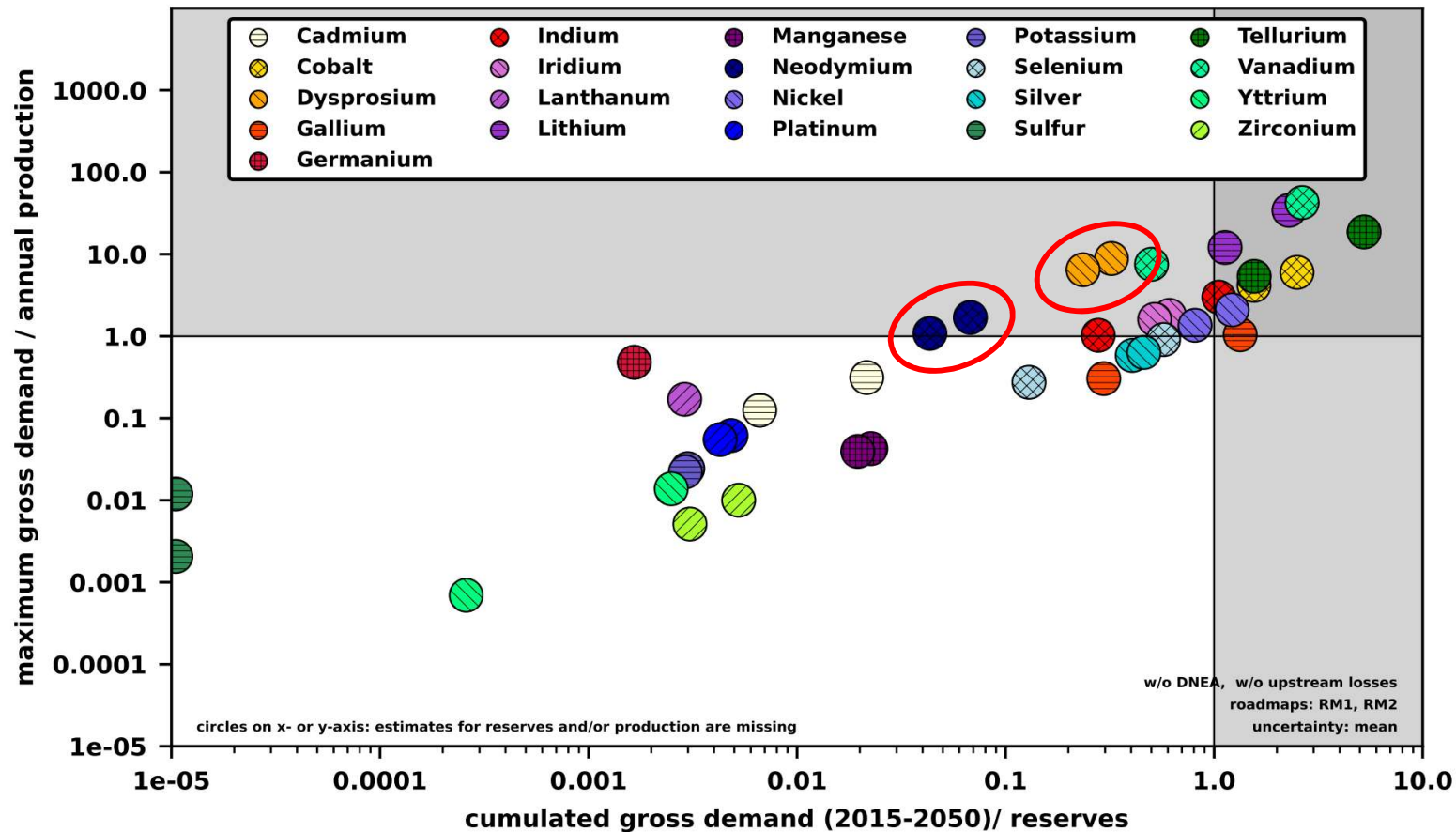
Risiken für kurz- bis mittelfristige Versorgungsengpässe aufgrund des stark steigenden Bedarfs



Batterien:

- Lithium
- Cobalt
- Nickel
- Vanadium

Risiken für kurz- bis mittelfristige Versorgungsengpässe aufgrund des stark steigenden Bedarfs



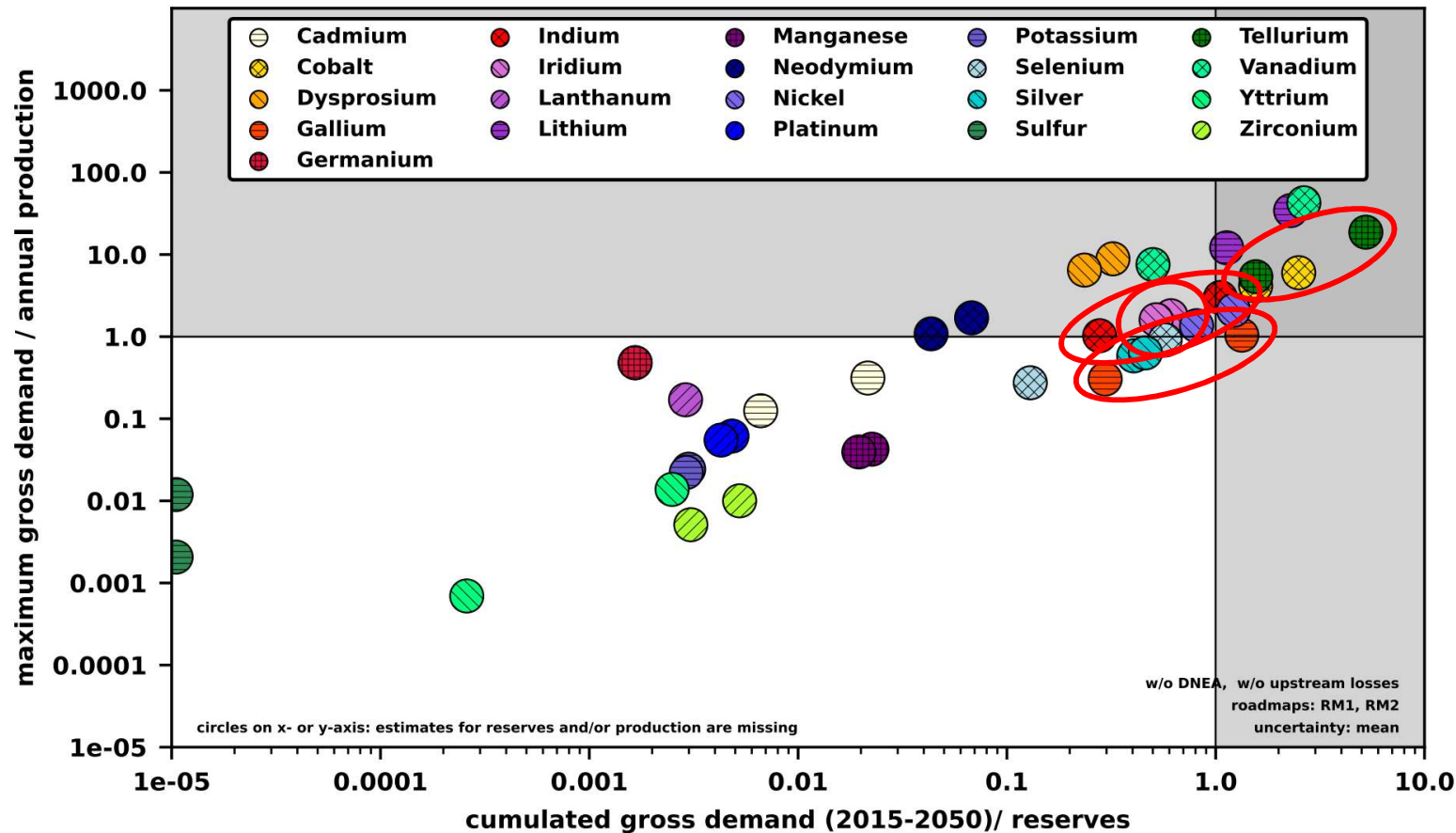
Batterien:

- Lithium
- Cobalt
- Nickel
- Vanadium

Permanent-Magneten (WKA, Elektromotoren):

- Neodym
- Dysprosium

Risiken für kurz- bis mittelfristige Versorgungsengpässe aufgrund des stark steigenden Bedarfs



Batterien:

- Lithium
- Cobalt
- Nickel
- Vanadium

Permanent-Magneten (WKA, Elektromotoren):

- Neodym
- Dysprosium

Elektrolyseure:

- Iridium

(PV-Module):

- Tellur
- Gallium
- Indium

Maßnahmen zur Abmilderung potentieller Versorgungsengpässe aufgrund schnell steigenden Rohstoff-Bedarfs



- **Materialeffizienz:** Entwicklung von Technologien mit reduziertem Bedarf an kritischen Materialien
- **Substitution:**
 - Ersatz von knappen Materialien durch weniger knappe Materialien innerhalb Technologie
 - Entwicklung von neuen Technologien innerhalb Technologieklasse, die weniger/andere Materialien benötigen
- Längere **Lebensdauer:** verringert den jährlich nötigen Ersatz an Anlagen und den damit verbundenen Materialbedarf
- **Recycling:** Entwicklung von Recycling-fähigen Technologien und Recycling-Anlagen

Primärmaterialbedarf kann dadurch zwar reduziert werden, aber zunächst dennoch deutliche Bedarfssteigerung durch Aufbau der neuen Energieinfrastruktur und Fahrzeugflotte!

Analyse des Risikos kurz- bis mittelfristiger Engpässe bei der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen



Potentielle kurz- bis mittelfristige Engpässe bei der Rohstoffversorgung

Aufgrund des schnell steigenden globalen Bedarfs

Sehr schnelle Ausweitung der Produktion nötig?

Abbau von heute noch nicht wirtschaftlich nutzbaren Lagerstätten nötig?

Aufgrund geopolitischer Faktoren

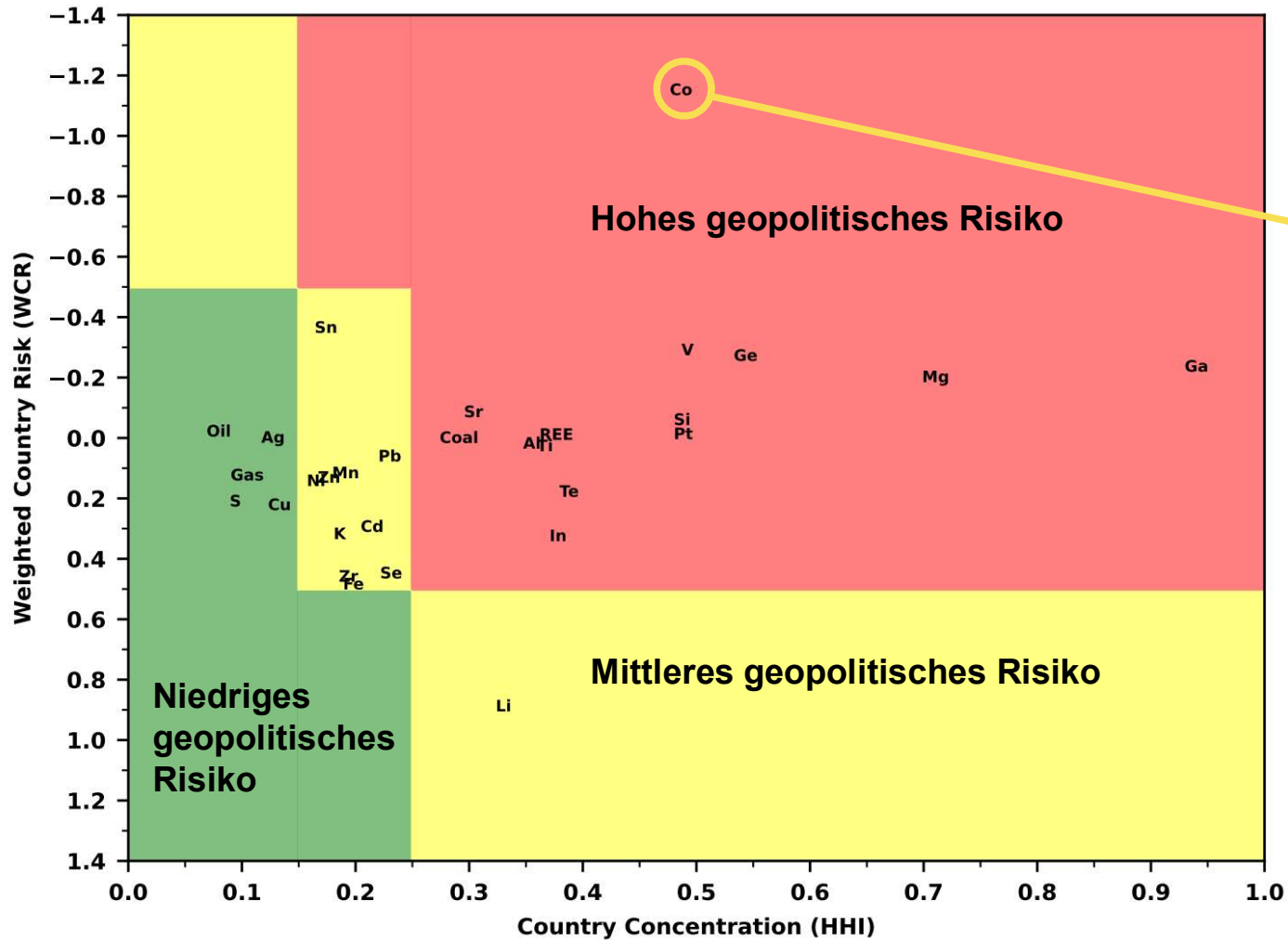
Konzentration der Lieferländer (HHI)

Gewichtetes Länder-Risiko der Rohstoffe (WCR)

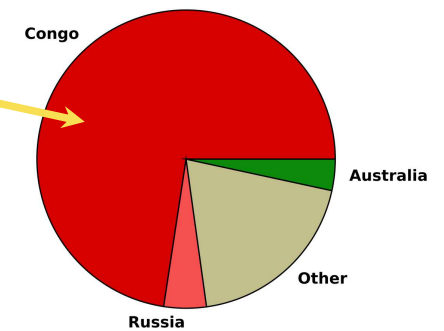
Herfindahl-Hirschman-Index

Auf Basis der Einschätzung der Weltbank bzgl. der politischen Stabilität und Governance-Qualität der Lieferländer („Worldwide Governance Indicators“, WGI)

Geopolitisches Risiko



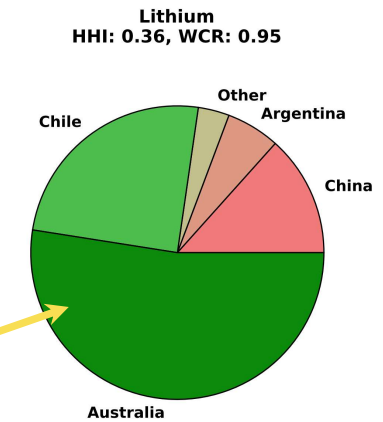
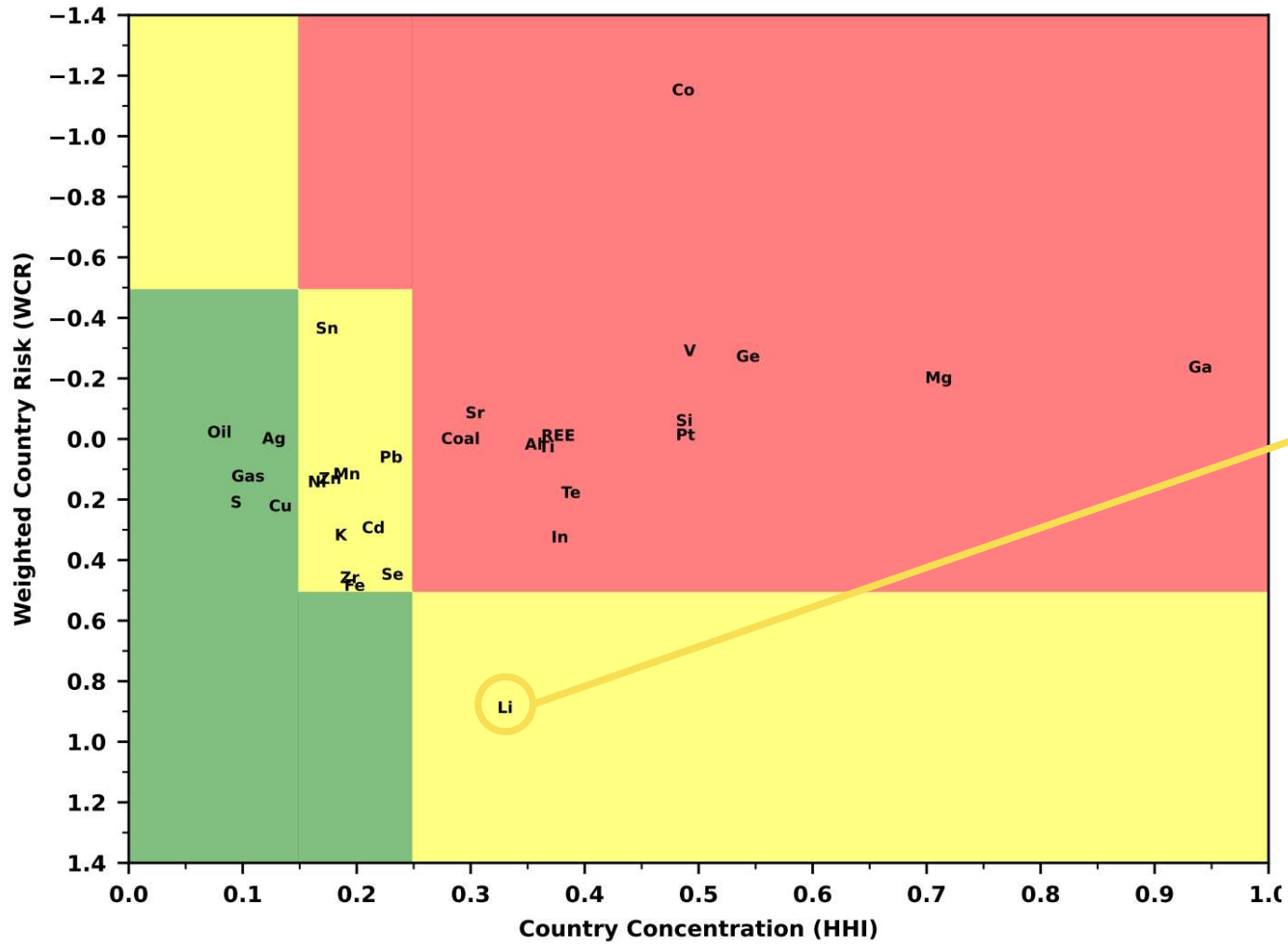
Cobalt
HHI: 0.53, WCR: -1.19



benötigt für:

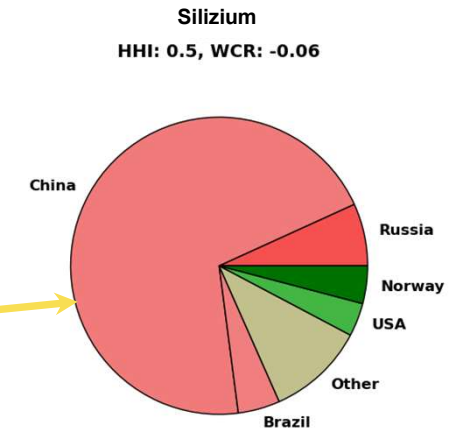
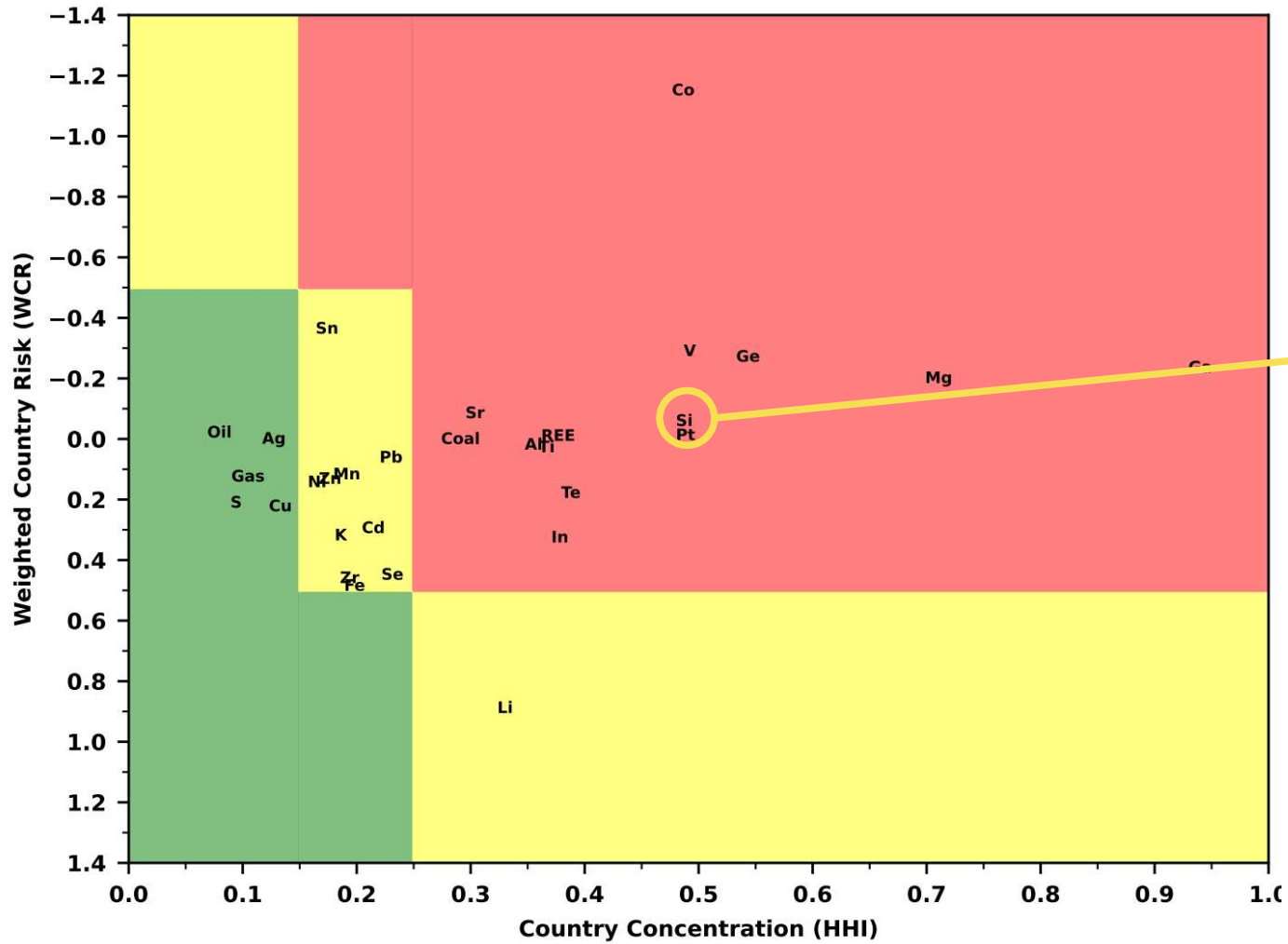
- Bestimmte Batterietypen (mobil & stationär)

Geopolitisches Risiko



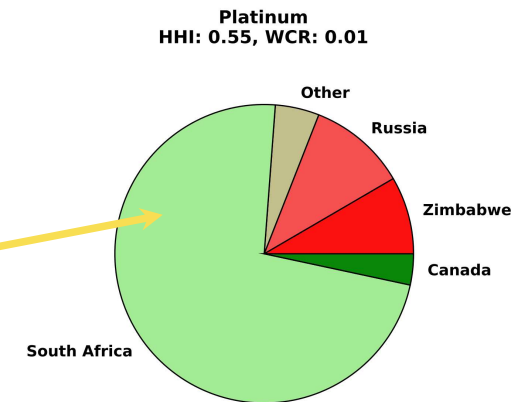
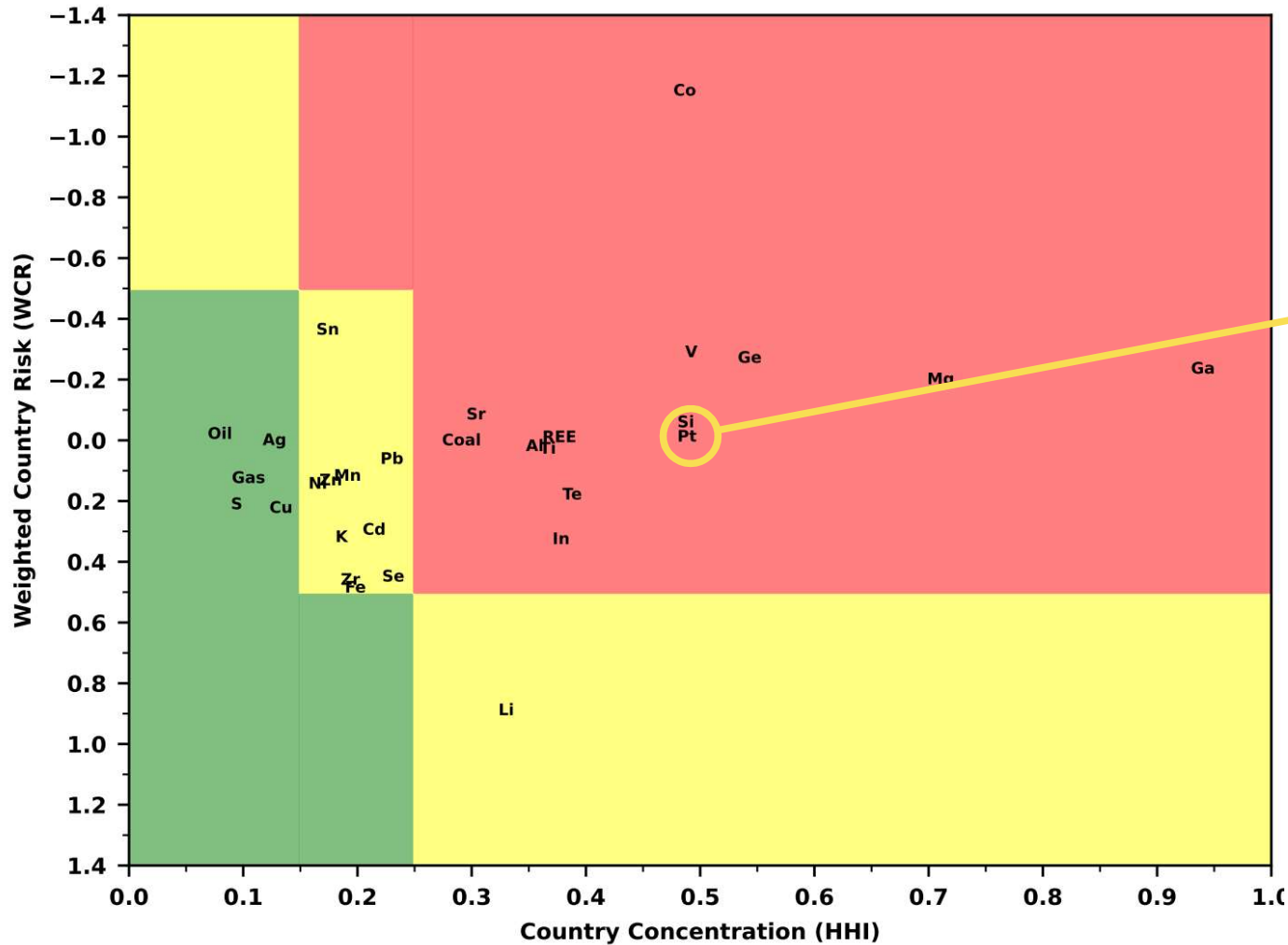
benötigt für:
- Bestimmte Batterietypen (mobil & stationär)

Geopolitisches Risiko



benötigt für:
- Silizium-basierte PV-Module

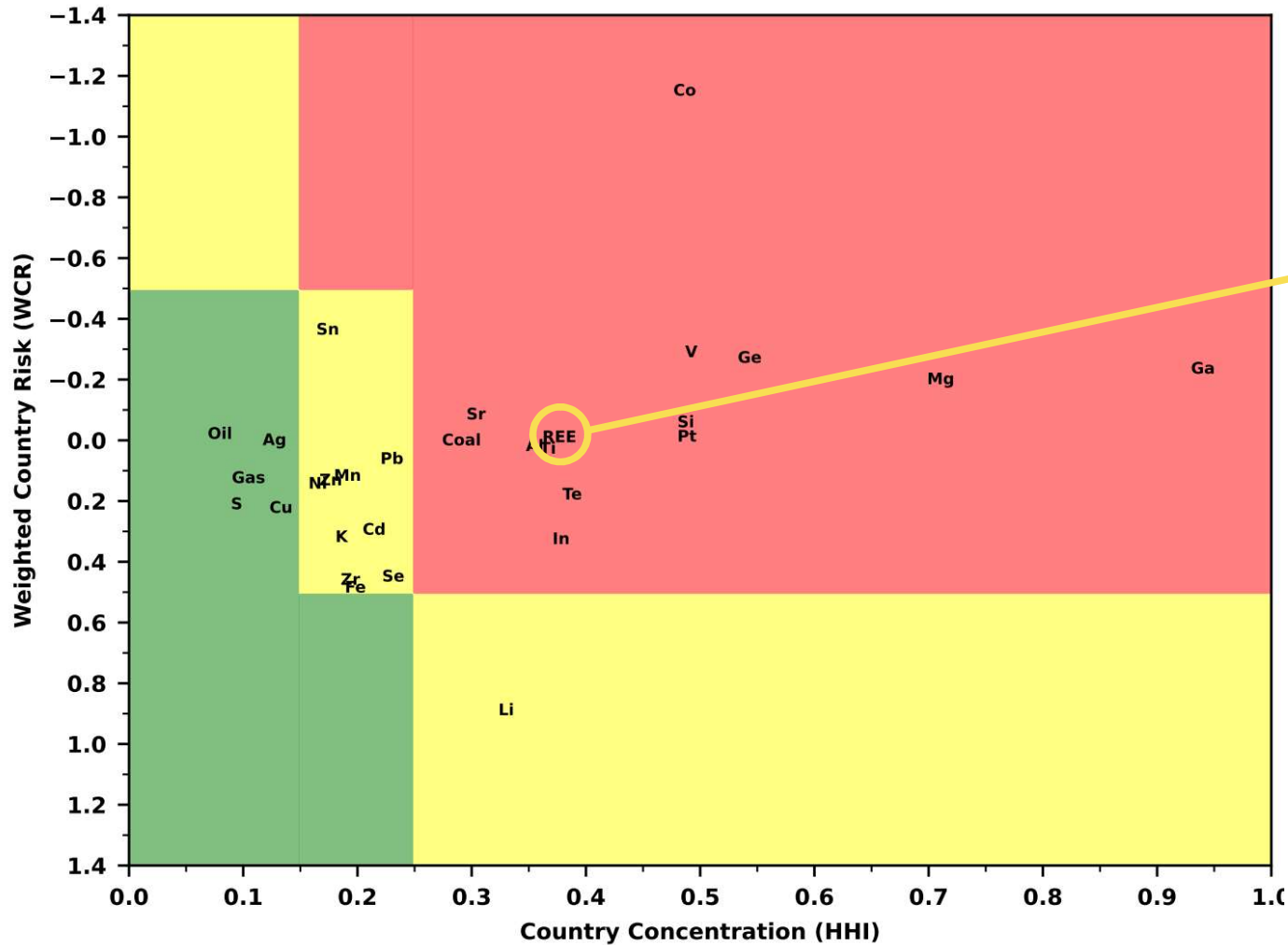
Geopolitisches Risiko



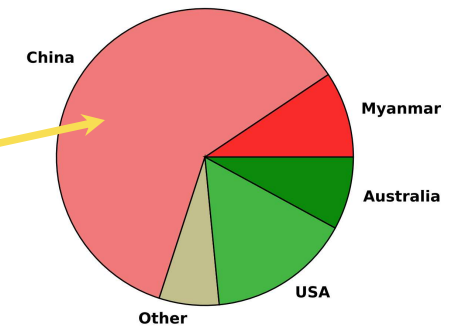
benötigt für:

- PEM- und PAFC-Brennstoffzellen
- PEM-Elektrolyseure
- Katalysatoren in KFZ mit Verbrennungsmotor

Geopolitisches Risiko



Seltene Erden
HHI: 0.41, WCR: 0.0



Neodym & Dysprosium:

- Permanent-Magnete in
 - Manchen Typen von Windkraftanlagen
 - Elektromotoren

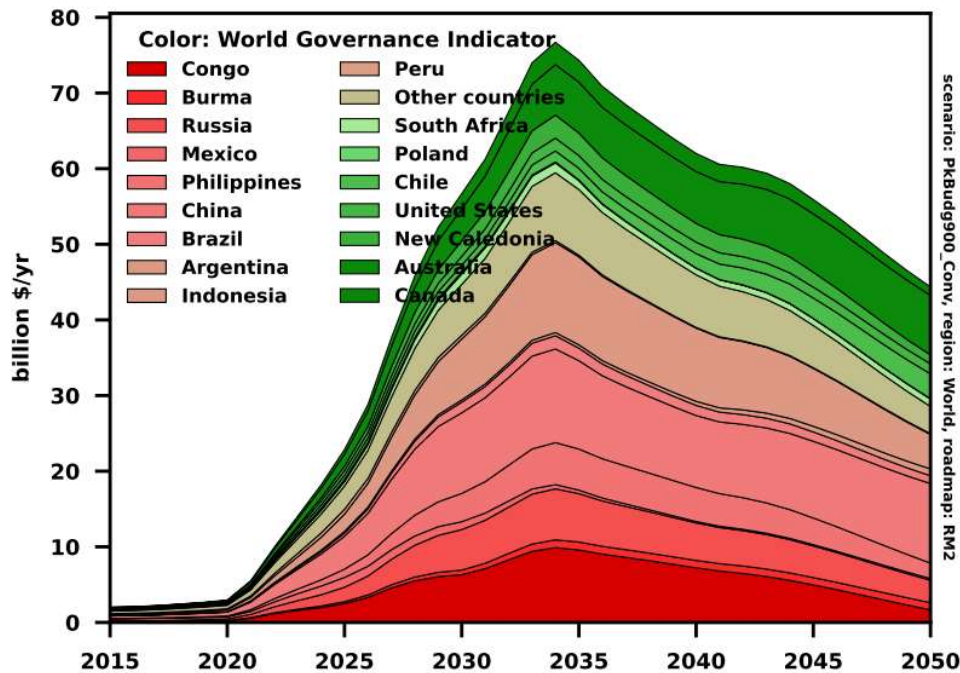
Yttrium & Scandium:

- Bestimmte Brennstoffzellen- und Elektrolyseurs-Typen

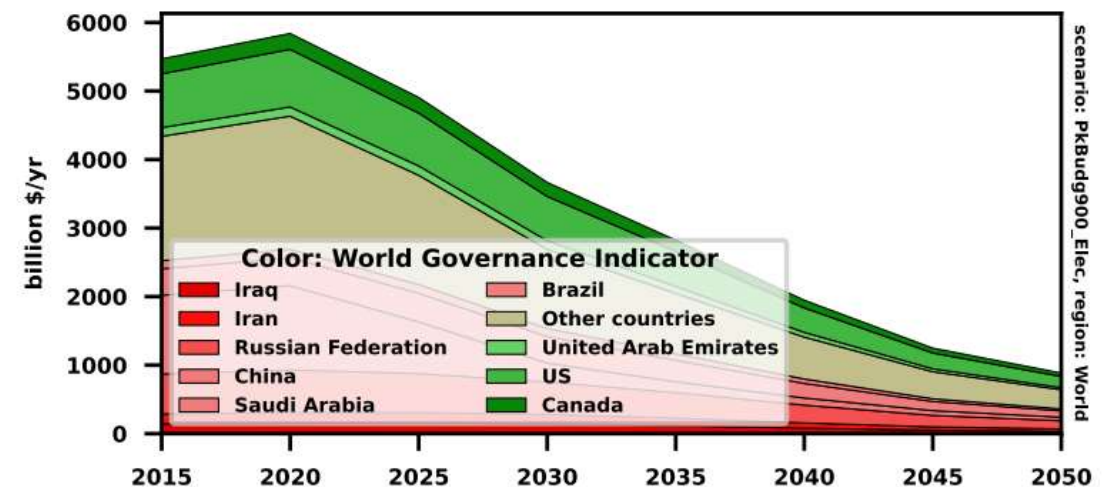
Ist die Energiewende in Bezug auf die Rohstoff-Versorgung ein geopolitisches Hochrisiko-Unterfangen?

Vergleich der monetarisierten Werte fossiler Energieträger und kritischer Rohstoffe

Mineralische Rohstoffe



Fossile Energieträger



Eine ambitionierte Transformation des globalen Energiesystems führt zu einem deutlichen Rückgang der globalen Geldflüsse für fossile Energieträger und kritische Rohstoffe (in Summe) → in diesem Sinne sinkt (ab 2035) die Abhängigkeit von politisch instabilen Förderländern!

Zusammenfassung geopolitisches Risiko



- Wichtige Rohstoffe für die Energiewende sind mit geopolitischen Risiken behaftet (Li, Co, Pt, Si, Seltene Erden (Nd, Dy, ...)); Ursachen sind eine hohe Konzentration und/oder politische Instabilität/Unzuverlässigkeit (niedriger WGI) der Förderländer.
- Geopolitischen Risiken betreffen Rohstoffe in vielen wichtigen Energie- und Verkehrs-Technologien (Batterien, Windkraftanlagen, Brennstoffzellen, Elektrolyseure, Elektromotoren, ...).
- Der Bedarf an mineralischen Rohstoffen, die ein hohes geopolitisches Risiko aufweisen, steigt vermutlich deutlich in den nächsten Jahrzehnten.
- Gleichzeitig sinkt der Bedarf an fossilen Energieträgern und die damit verbundenen geopolitischen Risiken signifikant.
- Das steigende Risiko aufgrund des Bedarfs mineralischer Rohstoffe wird durch das sinkende Risiko durch den Bezug fossiler Energieträger deutlich überkompensiert!

STROMMARKTDESIGN

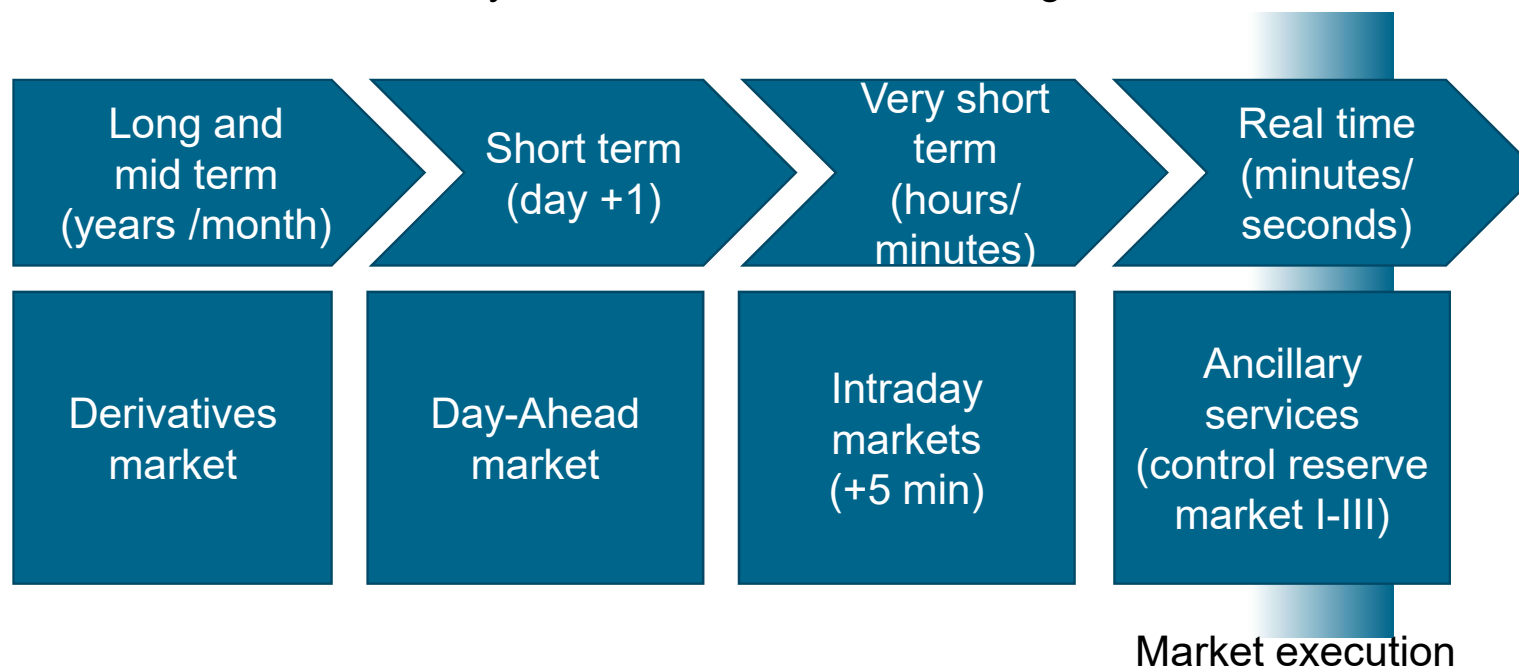
Themenfeld 3



The German Electricity Market



- Electricity trading is specific, because during the (continuous) market execution phase, demand must always equal supply!
- In a nutshell the German electricity market contains the following sub markets:

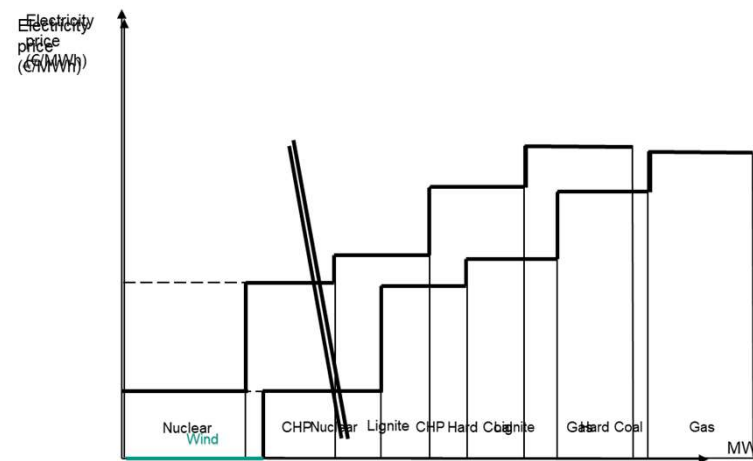
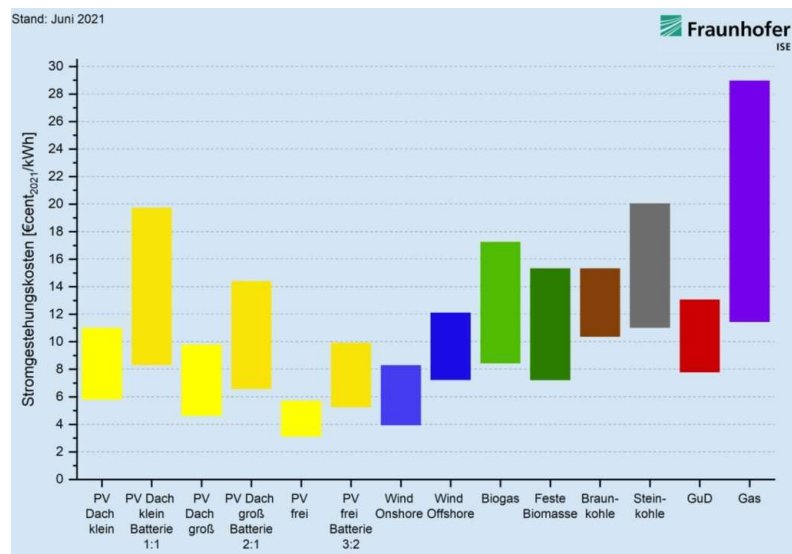


Der Merit-Order-Effekt der Erneuerbaren



Kostenseitig können Erneuerbare Energiequellen bei der Stromerzeugung bereits mithalten, jedoch weisen sie höhere CAPEX und geringere OPEX (nahe null) auf.

Dies führt zum bekannten Merit-Order-Effekt der Erneuerbaren ... der Strom auf der Börse wird günstiger.



<https://www.pv-magazine.de/2021/06/22/fraunhofer-ise-stromgestehungskosten-fuer-grosse-photovoltaik-anlagen-auf-bis-zu-312-cent-pro-kilowattstunde-gesunken/>

Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023

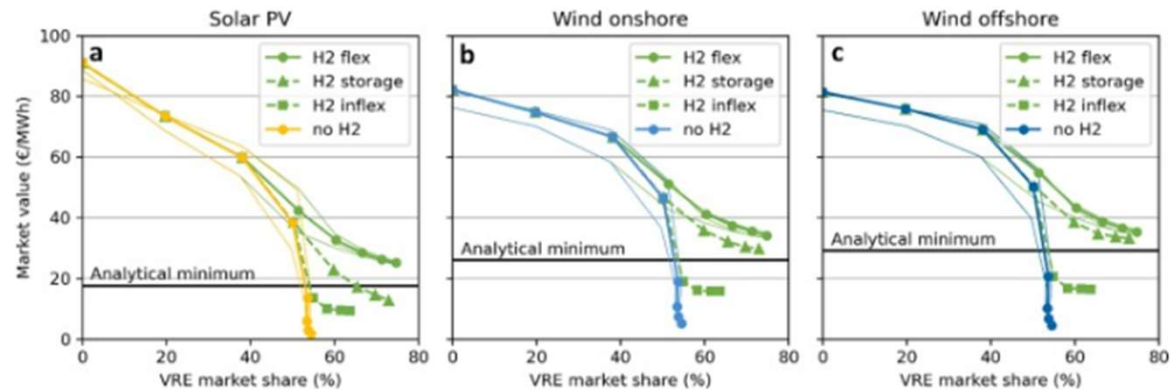
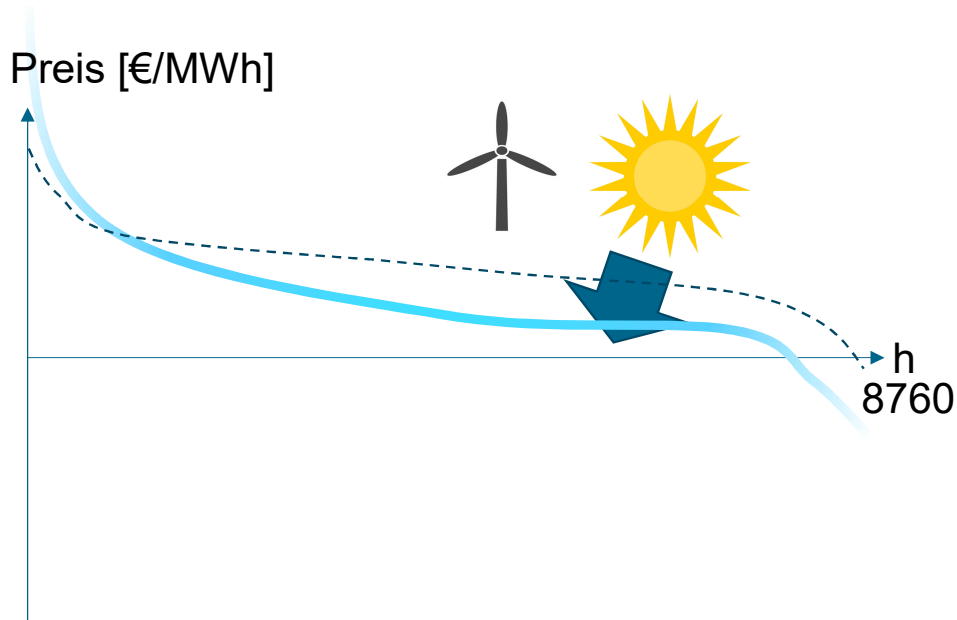
Marktwerte für Erneuerbare – insbesondere Wind und PV – sinken rasant



Durch den Merit-Order Effekt ändert sich auch die Preisdauerlinie.

... und damit auch die Marktwerte der Erneuerbaren

→ der Anreiz für Zubau verlangsamt sich!



Marktwerte für Wind und Solar

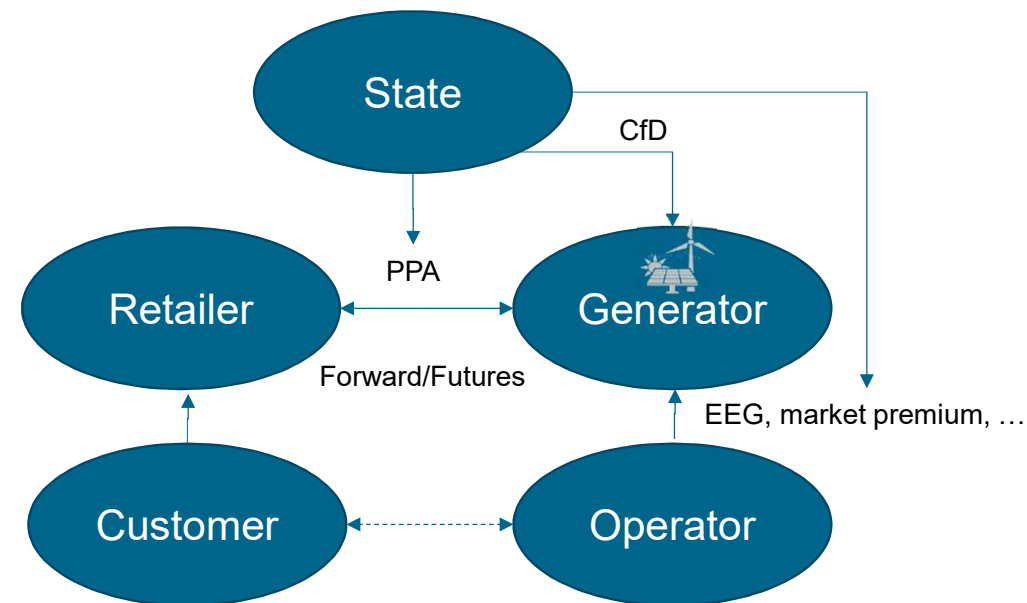
https://www.energiecluster.de/service/olec_infomaterial/weitere_infos_studien/BMWi/strommarkt-in-deutschland.pdf

Ruhnau 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261921014641>

Aktuelle Diskussion um Politikmaßnahmen zur Sicherstellung der Refinanzierung von Wind- und PV-Anlagen

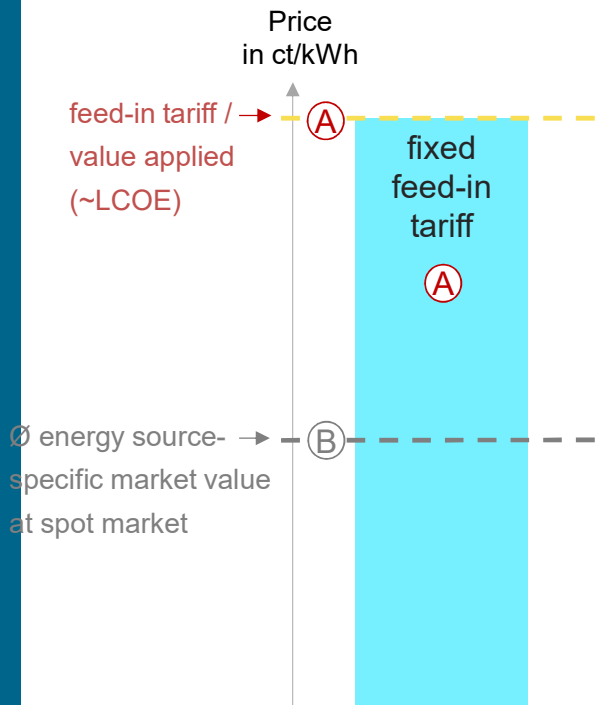


- Mögliche Maßnahmen:
 - Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energiegesetz (EEG)
 - langfristiger Handel
 - Futures
 - Forwards
 - Power Purchase Agreements (PPA)
 - Marktprämien
 - variable & fixe Marktprämien
 - verschiedene Formen von zweiseitigen Differenzkontrakten (Contracts for Difference – CfD)



Überblick über (einige) Fördermaßnahmen

Feed-in tariff – a fixed single payment per kWh



Feed-in tariff

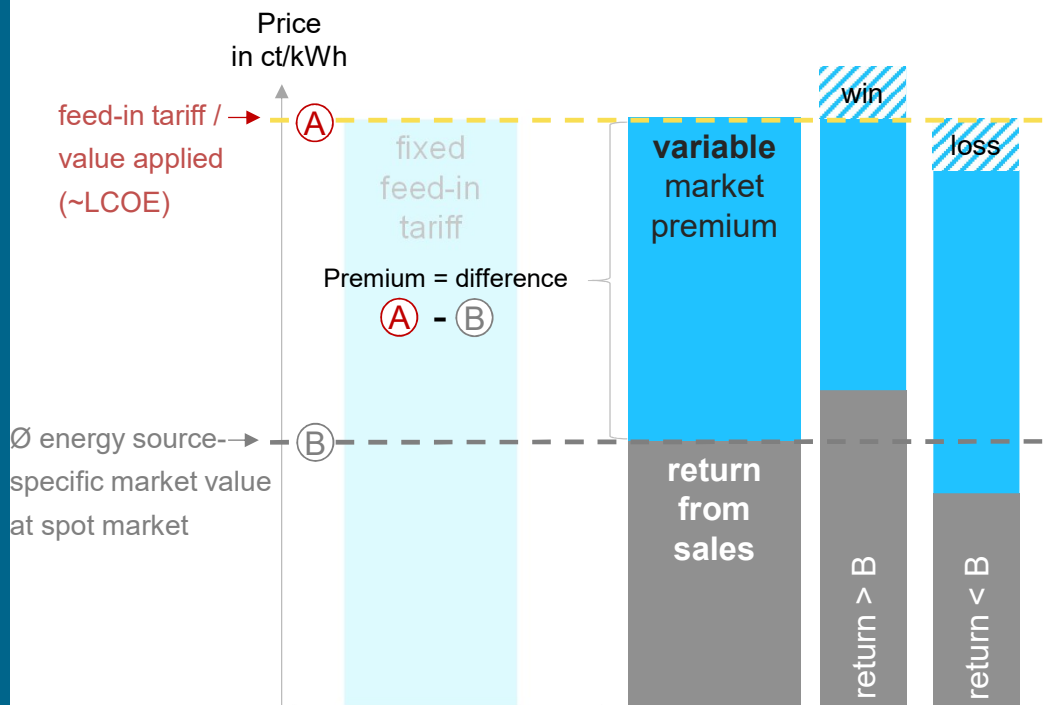
- One fixed payment
- No market revenues



Source: own depiction; CfD based on May et al. (2018), p. 629;
Visualization based on Nienhaus and Nitsch (2020)
Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023

Überblick über (einige) Fördermaßnahmen

Variable market premium – the difference between LCOE and average market revenues



Feed-in tariff

- One fixed payment
- No market revenues

Variable market premium

- **Difference** between LCOE and market revenues
- Adjustment to market prices
- Varying; determined ex-post

Source: own depiction; CfD based on May et al. (2018), p. 629;

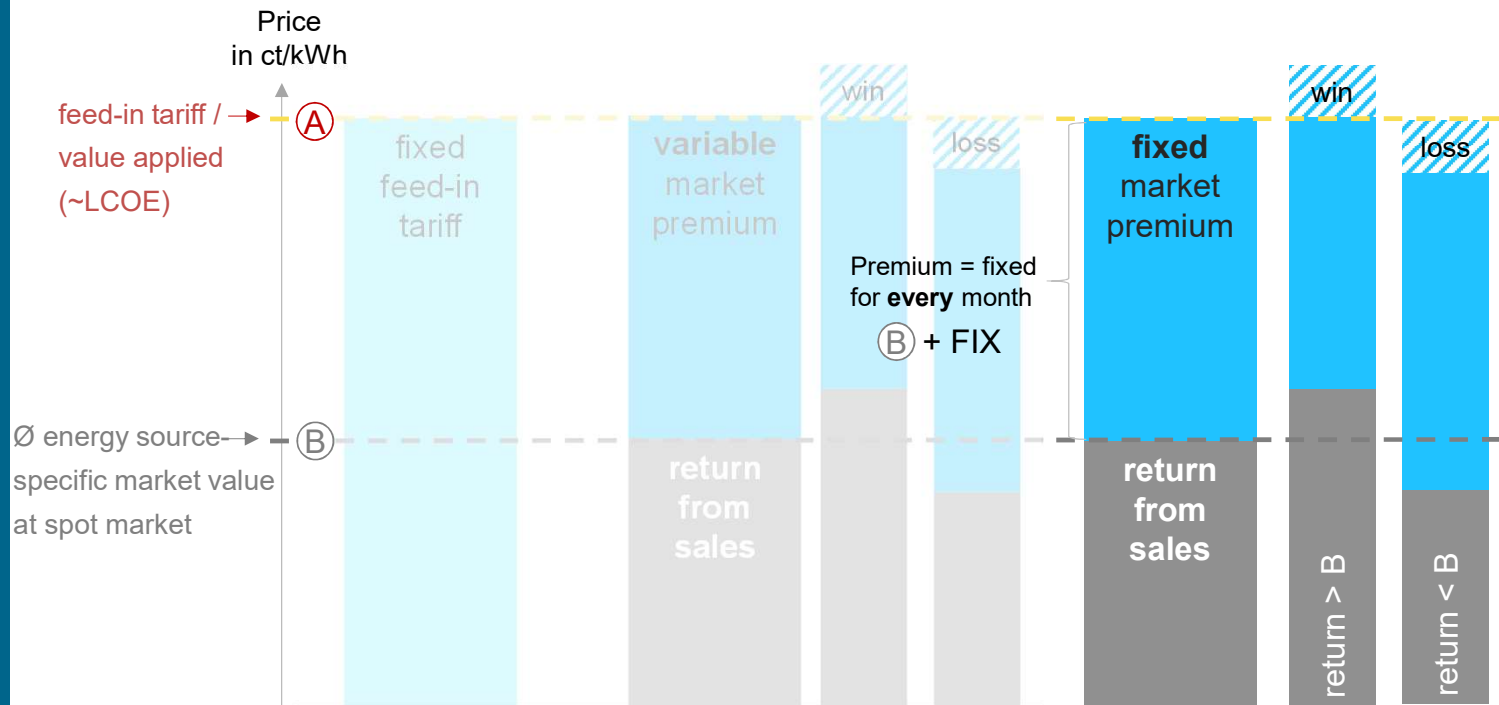
Visualization based on Nienhaus and Nitsch (2020)

Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023



Überblick über (einige) Fördermaßnahmen

Fixed market premium – a fixed add-on on market revenues



Feed-in tariff

- One fixed payment
- No market revenues

Variable market premium

- Difference between LCOE and market revenues
- adjustment to market prices
- Varying; determined ex-post

Fixed market premium

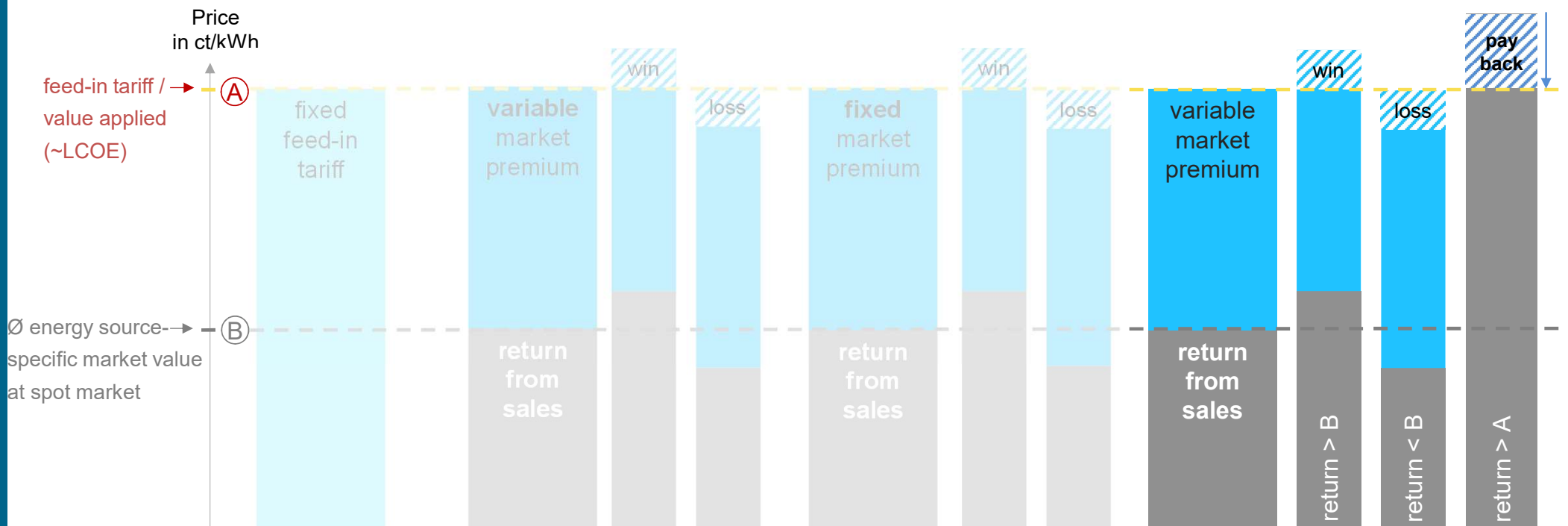
- **Fixed add-on** on market revenues
- No adjustment to market prices
- determined ex-ante

Source: own depiction; CfD based on May et al. (2018), p. 629;
 Visualization based on Nienhaus and Nitsch (2020)
 Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023



Überblick über (einige) Fördermaßnahmen

Contracts for differences – a two-sided market premium



Feed-in tariff

- One fixed payment
- No market revenues

Variable market premium

- Difference between LCOE and market revenues
- adjustment to market prices
- Varying; determined ex-post

Fixed market premium

- Fixed add-on on market revenues
- no adjustment to market prices
- determined ex-ante

Contracts for differences

- Extension of variable market premium
- **Obligation to pay back**, when market revenues are high

Source: own depiction; CfD based on May et al. (2018), p. 629;
 Visualization based on Nienhaus and Nitsch (2020)

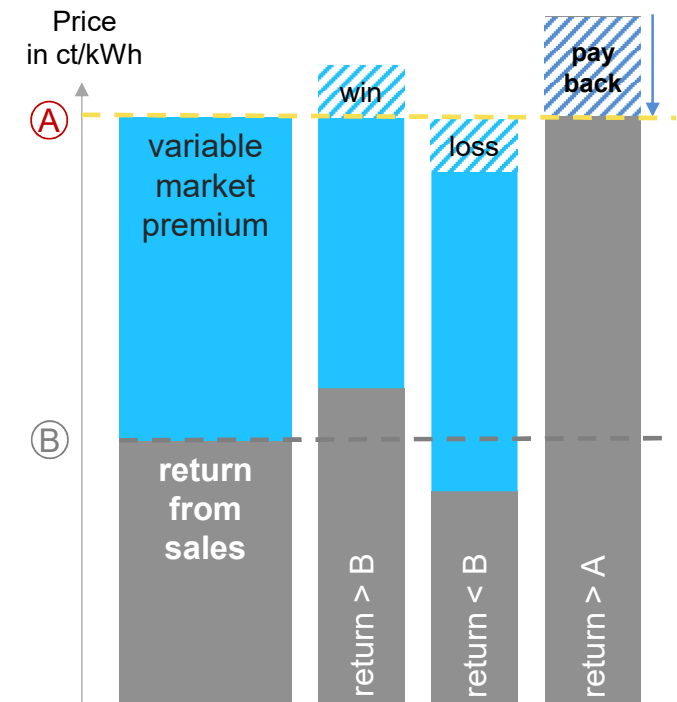
Patrick Jochem, DLR-VE, 20.10.2023



Contract for Differences (CfD)



- „simple“ CfD have the following disadvantages:
 - Volume risks are still with the operator
 - No incentive to behave “market-conform” (day-ahead distortion as a result)
 - No incentive for repowering



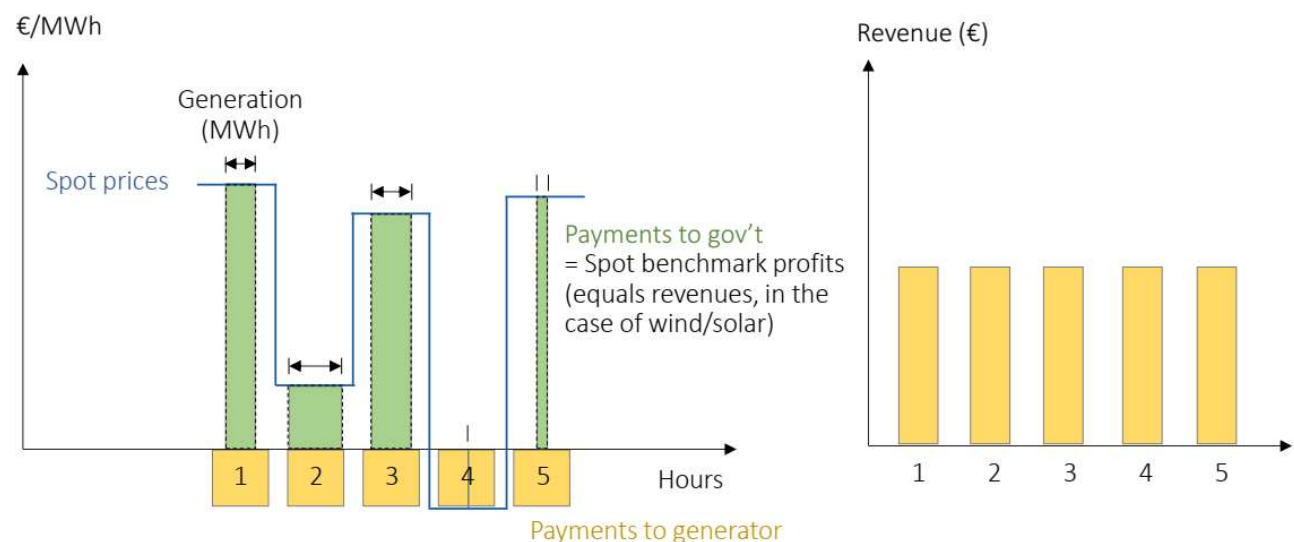
Contracts for differences

- Extension of variable market premium
- **Obligation to pay back**, when market revenues are high

Aktuelle Diskussion: Neben PPAs erscheinen insbesondere CfDs geeignet

- Jedoch haben einfache CfDs drei Nachteile:
 - sie sind weiterhin Fördermechanismen (Koalitionsvertrag!)
 - sie verzerren Marktpreise (Bieterverhalten!) und
 - sie setzen keine perfekten Anreize!
- Financial CfDs verwenden eine Benchmark-Anlage, dies führt zu folgenden Vorteilen:
 - Effizient (Rückzahlungen)
 - Preissignale des Marktes wirken unverzerrt.
 - Repowering & „nicht-optimale“ Anlagen werden incentiviert.
 - Lokale Nachteile können berücksichtigt werden.
 - fester „Stundenlohn“ (Planungssicherheit!)

→ Definition der Referenzanlage?

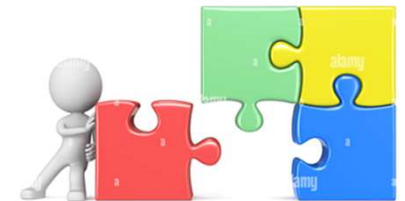


Schlecht, Ingmar; Maurer, Christoph; Hirth, Lion (2023) : Financial Contracts for Differences, ZBW.

Die Challenge!



- Marktdesignfragen sind schwer quantitativ zu analysieren (kontrafaktische Frage in einem sehr dynamischen und heterogenen Umfeld)
- Analysen mit dem open-source publizierten, agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS
 - Simulation von Handelsentscheidungen von Erzeugern, Flexibilitäten, Nachfragern
 - Berücksichtigung der betriebswirtschaftlichen Perspektive (z. B. Opportunitätskosten bei Förderinstrumenten) sowie von Unsicherheiten
 - Untersuchung der Anreizwirkung für systemfreundliche Betriebs- und Investitionsentscheidungen
 - Abbildung komplexer Zusammenhänge
- Wertvolle Beiträge auch im Zusammenspiel mit Energiesystemmodellen mit dem Ziel der Ermittlung realisierbarer Optima („efficiency gap“)¹



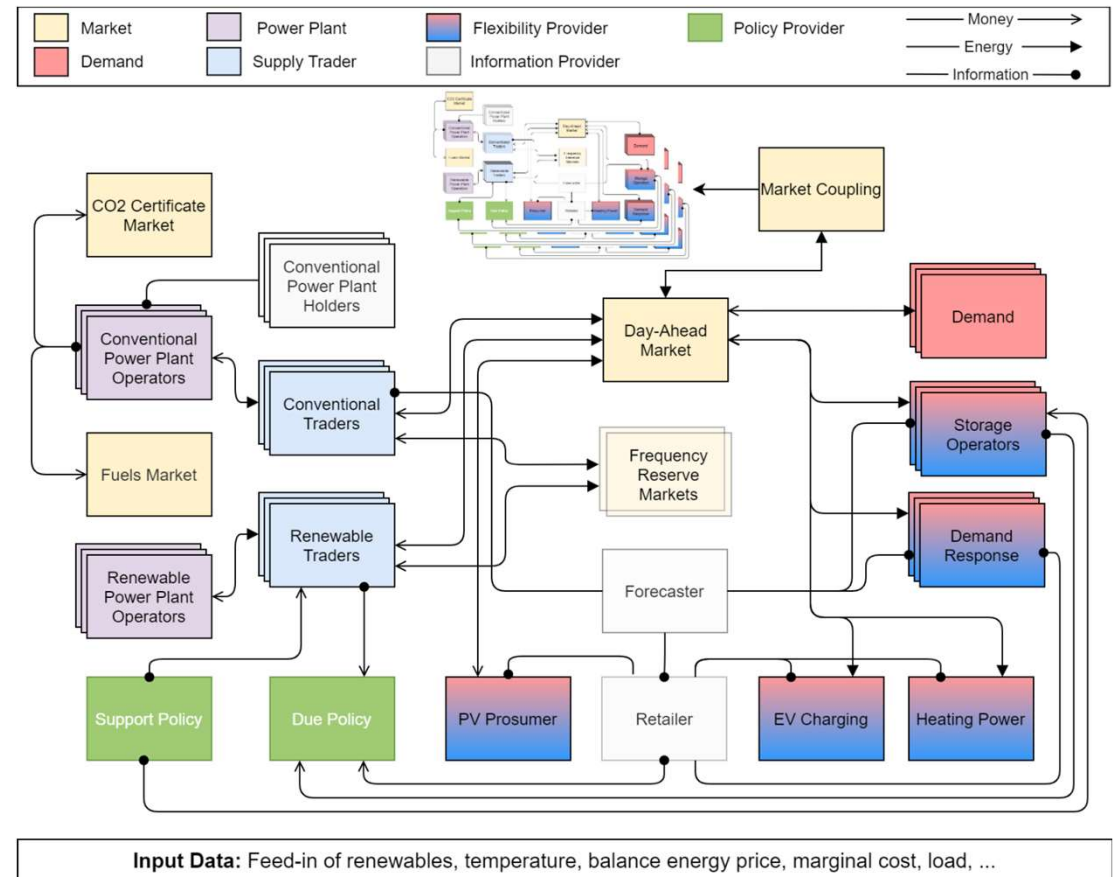
AMIRIS  **FAME**
Open Framework for Distributed
Agent-Based Models of Energy Systems
Agent-Based Market Model for the Investigation
of Renewable and Integrated Energy Systems

¹ z.B. INTEEVER und ERAFlex

Das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS



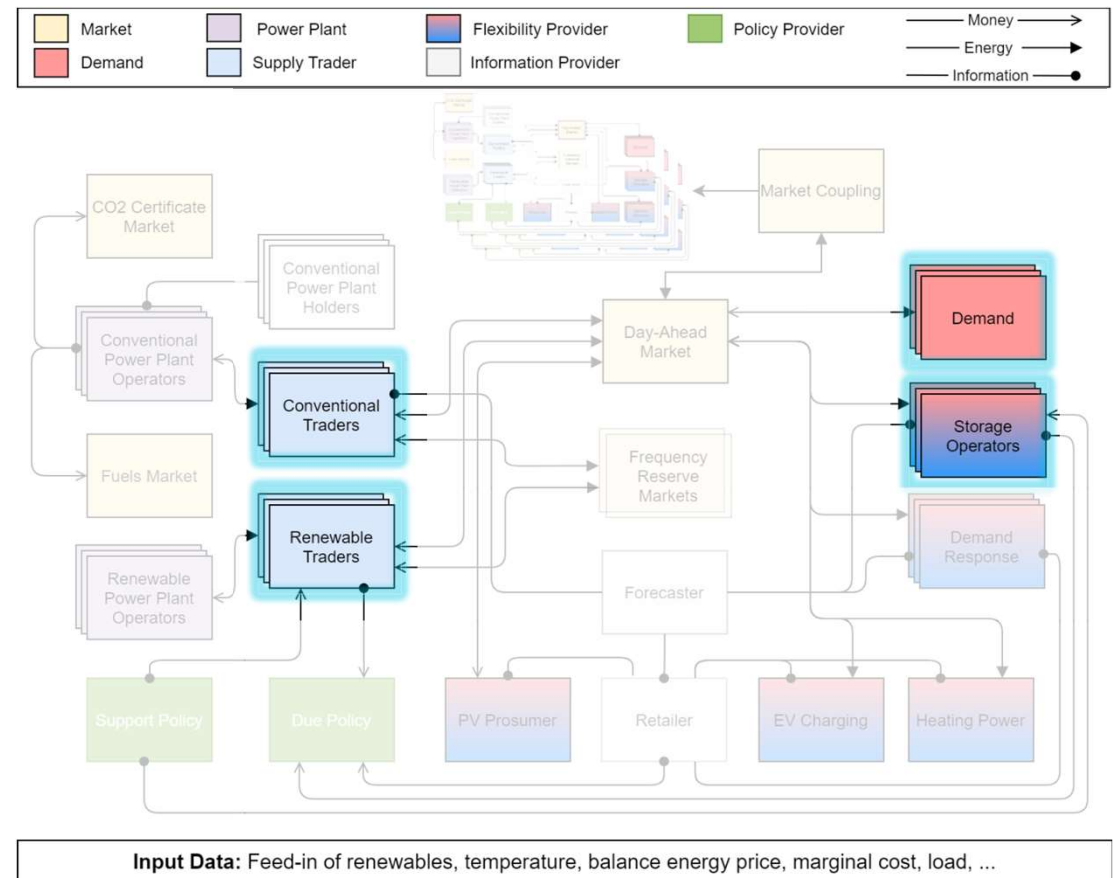
- **agent-based simulation** of power markets (focusing on the Day-ahead market)



Das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS



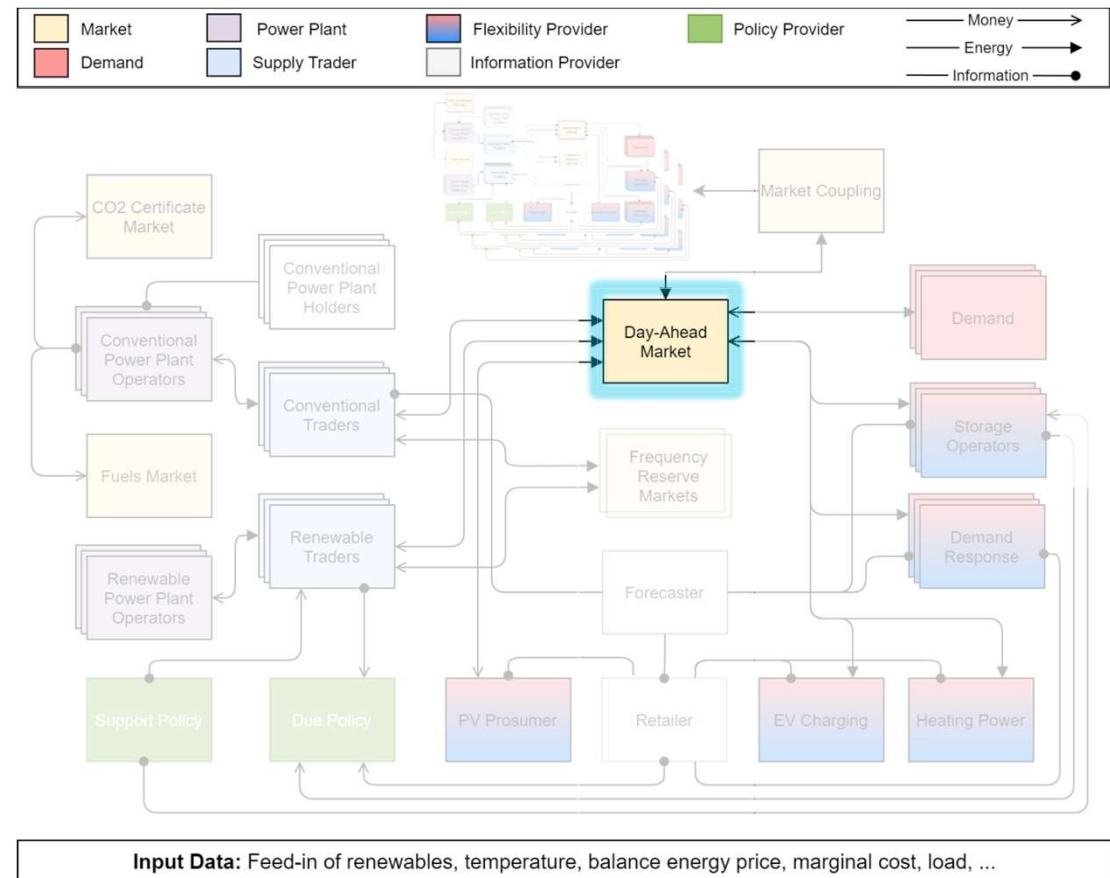
- **agent-based simulation** of power markets (focusing on the Day-ahead market)
- Each trading agent has a **bidding strategy** for offering supply and/or demand bids to the EnergyExchange.



Das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS



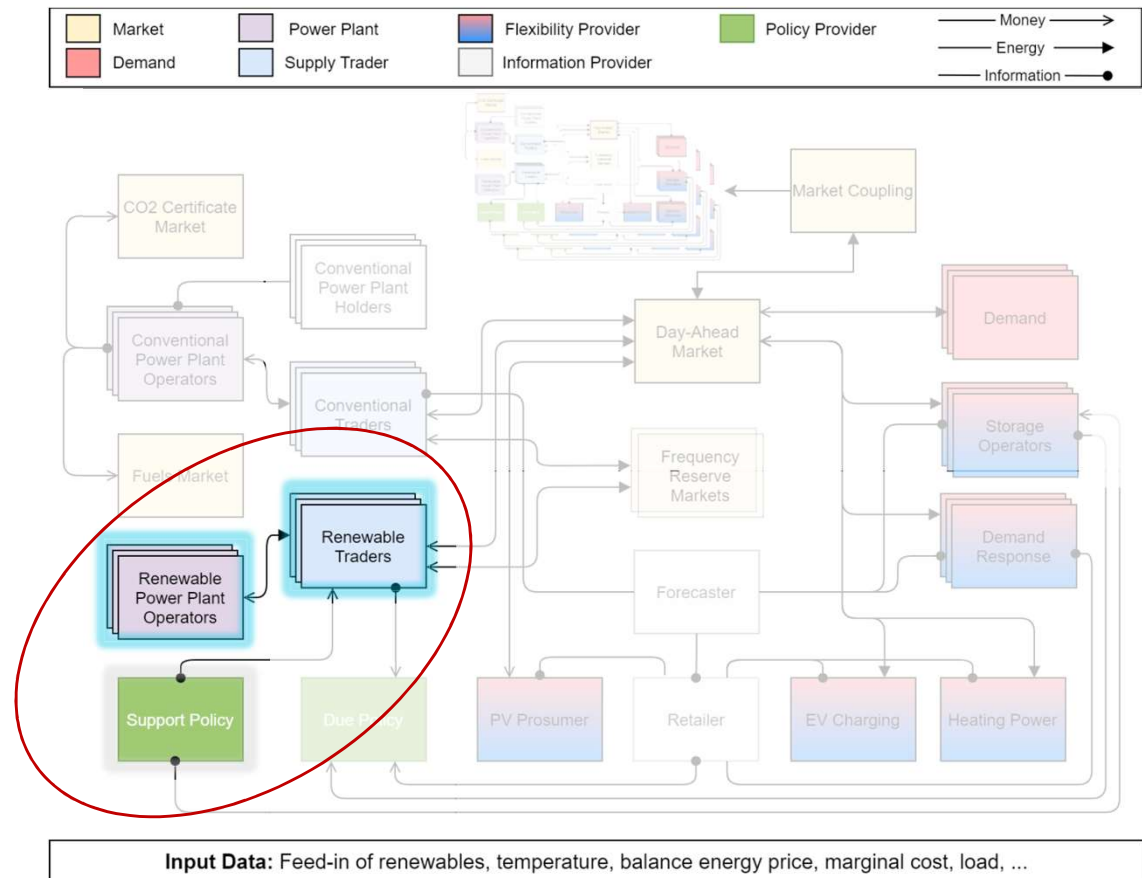
- **agent-based simulation** of power markets (focusing on the Day-ahead market)
- Each trading agent has a **bidding strategy** for offering supply and/or demand bids to the EnergyExchange.
- EnergyExchange clears the market by **intersecting aggregated demand and supply curves**.



Das agentenbasierte Strommarktmodell AMIRIS



- **agent-based simulation** of power markets (focusing on the Day-ahead market)
- Each trading agent has a **bidding strategy** for offering supply and/or demand bids to the EnergyExchange.
- EnergyExchange clears the market by **intersecting aggregated demand and supply curves**.
- We may include **policy measures** and can easily vary strategies.



TradeRES: Forschungsfrage & Analysedesign



TradeRES
New Markets Design & Models for
100% Renewable Power Systems



*Werden Fördermechanismen für erneuerbare Energien benötigt
und falls ja, wie sollte man diese ausgestalten?*



Vorgehen



Grundvorgehen

- Agentenbasierte Dispatch-Simulation mit AMIRIS
- Einführung verschiedener Fördermechanismen
- Auswertung von Market Performance Indicators (MPIs)

Prämienfestlegung

Iterativ angepasst, so dass jede Technologie ihre Kosten innerhalb einer 0.1%-igen Toleranz refinanziert

Parametrierung & EE-Anteile

Szenario von Projektpartnern; EE-Anteile: ~85% bis ~100%

Analysierte Fördermechanismen



- **“None”**: keine Förderzahlung
- **“MPfix”**: fixe Marktprämie (ex ante)
- **“MPvar”**: variable Marktprämie (ex post) mit monatlicher Referenzperiode
- **“CfD”**: zweiseitige Contracts for Differences als Erweiterung der Marktprämie (ex post) mit monatlicher Referenzperiode
- **“CP”**: Kapazitätsprämien
- **“Financial CfD”**: Financial CfD, wie von Schlecht et al. (2023) vorgeschlagen mit Bundesdurchschnitt als Referenzanlage

Zusammenfassung und Fazit

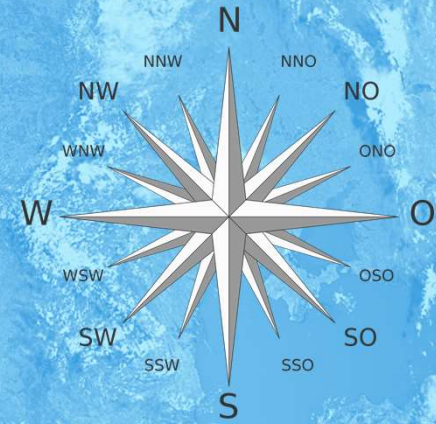


- Die Energiesystemanalyse ist ein Kompass in der Energiewende und gibt Antworten auf zahlreiche Fragen wie wir eine effiziente Energiewende bis 2045 bewerkstelligen können.
- Sie stellt insbesondere Entscheidungswissen bereit, welches insbesondere Entscheidungsträger – aber auch andere Personen – nutzen.
- Wir haben heute drei Beispiele näher kennengelernt:
 - Kraftstoffentwicklung der Verkehrswende
 - Ressourcenbedarf der Energiewende
 - Künftiges Strommarktdesign



[Aktuelle Veröffentlichungen](#)

DIE ENERGIESYSTEMANALYSE ALS KOMPASS IN DER ENERGIEWENDE



Vortrag bei der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, AKE, Bad Honnef

Vielen Dank für Ihr Interesse, ich freue mich nun auf Fragen!
patrick.jochem@dlr.de

