

*Umwelt- und Klimaschutz
leicht gemacht!*



Nächster Vortrag:
**Der Energiewende fehlt es an effizienten Energiespeichern!
Welche Perspektiven werden verfolgt?**

12.12.2022, 20:00 Uhr

Referent: Prof. Dr. Jörg Sundermeyer (Philipps-Universität)



Video: <https://youtu.be/WywpdYyhAkU>

<https://www.uklg.de/>



Chemistry Department
Prof. Dr. Jörg Sundermeyer

Philipps



Universität
Marburg

**Green Chemistry and its Opportunities to
Contribute to a more Sustainable World**



Akademisches Wirken 1996-2022

ca. 90 Diplom/Masterand*Innen
ca. 70 Doktorand*Innen
ca. 240 Publikationen (Peer-Review)
ca. 55 Patent-Familien (Peer-Review)
.....Vorlesungen und Prüfungen

GREEN CHEMISTRY GROUP

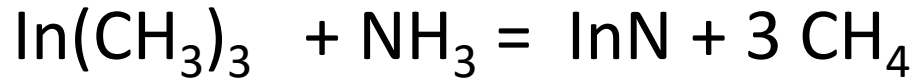
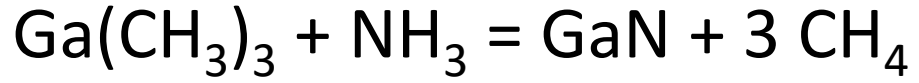
Forschungsgebiete

Metallorganische Chemie und Katalyse
Energie-Konversionsmaterialien:
Power-to-Light (OLED), Light-to-Power (PV)
Batterie-Elektrolyte und Redoxmediatoren
Bioraffination nachwachsender Rohstoffe

Die Chemie hinter der Evolution

LED

III-V-Halbleiter



OLED Emitter Materialien



[Cu(PPh₃)tpym]BF₄

[Cu(AsPh₃)tpypo]PF₆

[Cu(μ-I)(Me₂HpzPPh₃)₂

[Cu(μ-I)(Me₃pzPPh₃)₂

[Cu(μ-I)(tpya)]₂

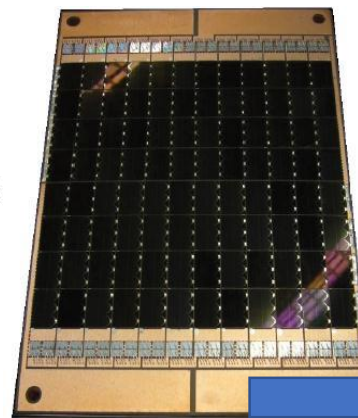
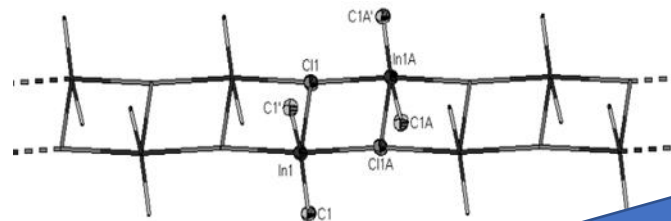
[CuI(tpym)]

[CuI(tpypo)]


[CuCl(tpypo)]



Source: Uni Marburg







**Ackerflächen-PV: ein Gewinn für alle?
Investoren und Anwohner?
Naturgänger, Jogger, Hundehalter?
Bienen-, Natur- und Artenschutz?**



Gliederung des 3-Stunden Seminars:

„Persönliche Energiewende“: Was lernen wir über die Verflechtung von Energie-Erzeugung, -Speicherung, -Autarkie und -Kosten?

Wo stehen wir nach 30 Jahren Energiepolitik seit Einführung des EEG?

Wo müssen wir hin, wenn Deutschland 2045 decarbonisiert sein soll?

Wie sieht ein nachhaltiges Gesamtsystem im Sektorenverbund aus?

Ausgewählte Speichertypen:

- Elektrochemische Speicher (Batterien)
- Chemische Speicher (Power-to-X)
- Physikalische Speicher (Wärme- & Pumpspeicher für Wasser & Gase)

Zusammenfassung und Glaubensfragen zum Nachdenken





Ein persönlicher Beitrag zur Energiewende:

Knapp 130 qm PV, 25 kWp auf 4 Dächern (42.000 Euro)

PV-Anlage würde sich nach 4,6 Jahren (bei 40 ct/kWh) amortisiert haben, falls Einspeisung durch Eigenverbrauch Null wäre

13 kWh LFP-Batteriespeicher (12.000 Euro)

mit 6,5 kW Lade/Entladeleistung

Batterie-Speichernutzung kostet bei 10 Jahre Nutzungszeit

0,25 Euro pro kWh – bei einer 24-Stunden-Speicherperiode

3,50 Euro pro 13 kWh, die in 24 h ein/ausgeladen werden

7 Euro pro 13 kWh, die in 48 h ein/ausgeladen werden

35 Euro pro 13 kWh, die 10 Tage „aufgehoben“ werden!

7 kW LW-Wärmepumpe mit Wärmespeicher (30-35.000 Euro)

Intelligente Wallbox für reines PV-Zielladen **(2.000 Euro)**

Umstieg vom geleasteten Hybrid- auf reines **Elektroauto**

91.000 Euro ohne E-Auto ...ein Hobby für Wohlhabende?

Ein Anspruch! ohne damit Energie-Autarkie erreicht zu haben

Das Dilemma der deutschen Energiewende:

.... anders als Eigenheimbesitzer:

Profit-orientierte Ökoenergie-Investoren investieren selten in den Verbund aller Komponenten, vielmehr picken sie sich die **subventionierten Rosinen**, investieren nur in das **lukrative Erzeugungsgeschäft** und nicht parallel in die zwingende **Speicherung** von Ökoenergie, weil die ein schlechteres Geschäft ist, **bezahlt durch Vergesellschaftung**.

Wenn 1,0 kWh Strom in dem teuren, durch eine Sparkasse oder Investor vorfinanzierten Speicher landen und nur 0,5 bis 0,9 kWh Strom kommen bei Bedarf zum Verkauf wieder heraus, ist dies **kein attraktives Geschäftsmodell**.

Investorensicht: Systemkosten sollen wie in den letzten 30 Jahren auf die Systemnutzer umgelegt werden - **hohe Stromendpreise sind das Ergebnis!**

Vorrausschauende nachhaltige Klimapolitik

- würde von jedem geförderten Ökostrom-Erzeuger verlangen, mindestens 20% seiner Investitionssumme in die Stromspeicherung nachweislich anzulegen.
- würde jeden einkassierten Euro CO₂-Preis bei den Fossilen zweckmäßig für die **gezielte Förderung der Speichertechnologien** für die Ökoenergie einsetzen.

Chancen der deutschen Energiewende:

Frau Prof. Martina Klärle, Geo-Informatikerin an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg: Wir haben 100 qm Dachfläche pro Person in Deutschland. **10 qm Dach-PV** decken rechnerisch den **Energiebedarf einer Person**, 40-50 qm pro Person (50% der Dachflächen) versorgen sämtliche Sektoren inklusive Industrie mit Energie.

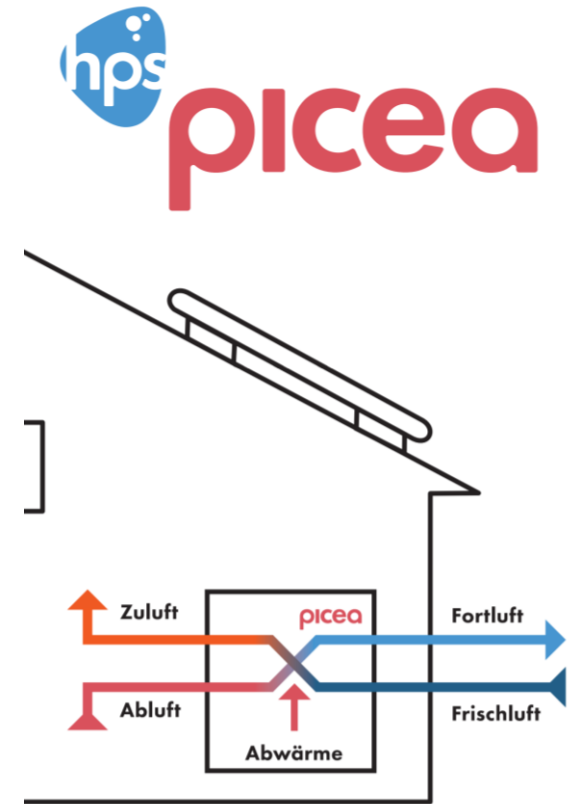
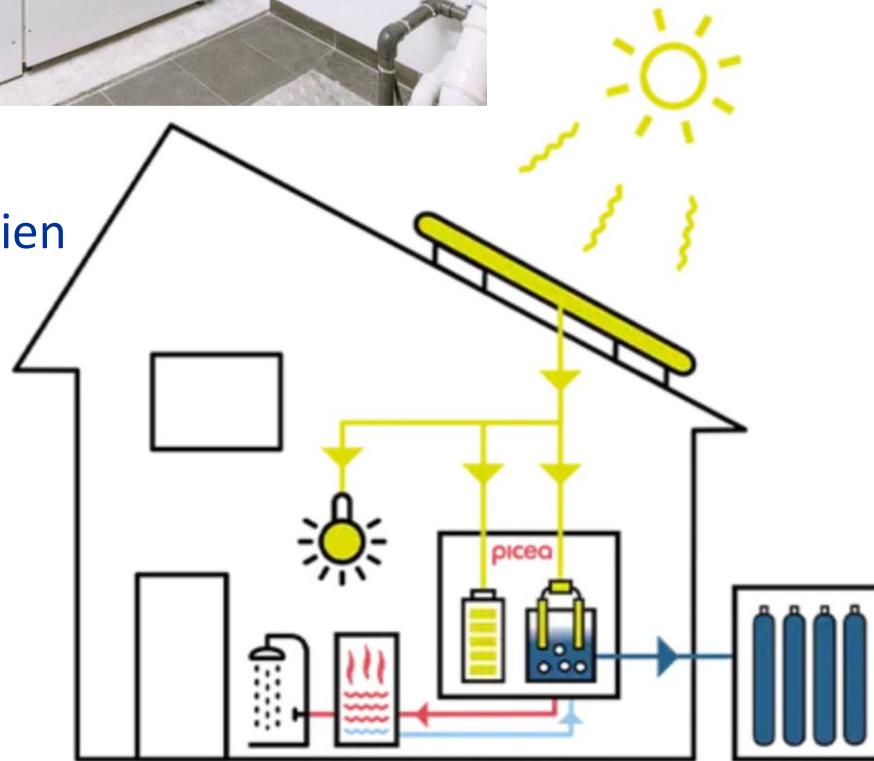
Wie könnte der **Beitrag der Stadtbürger und Mieter** für die Energiewende aussehen? Soziale Partizipation an Fördermaßnahmen? Beteiligung an Bürger-Energieparks und kommunalen Speicherprojekten?

Autarkie? Nie ohne Speicher!aber der beste Batteriespeicher ist und bleibt ein Tagesspeicher – er rettet den PV-Strom aus dem Sommer nicht in den Winter! In den 4 Monaten November bis Februar produziert die PV-Anlage nur 13 % ihres Jahresertrags, aber gerade in diesen 4 Monaten werden 80% der Strommenge von der Wärmepumpe angefordert! → **kommunale Wasserstoffspeicher**



365 Tage Energie-Autarkie durch
Elektrolyse – Verdichter –
300 bar Wasserstoffspeicher –
Brennstoffzelle – 20 kWh Batterie
– Wärmerückgewinnung durch
Lüftung und Warmwasserspeicher

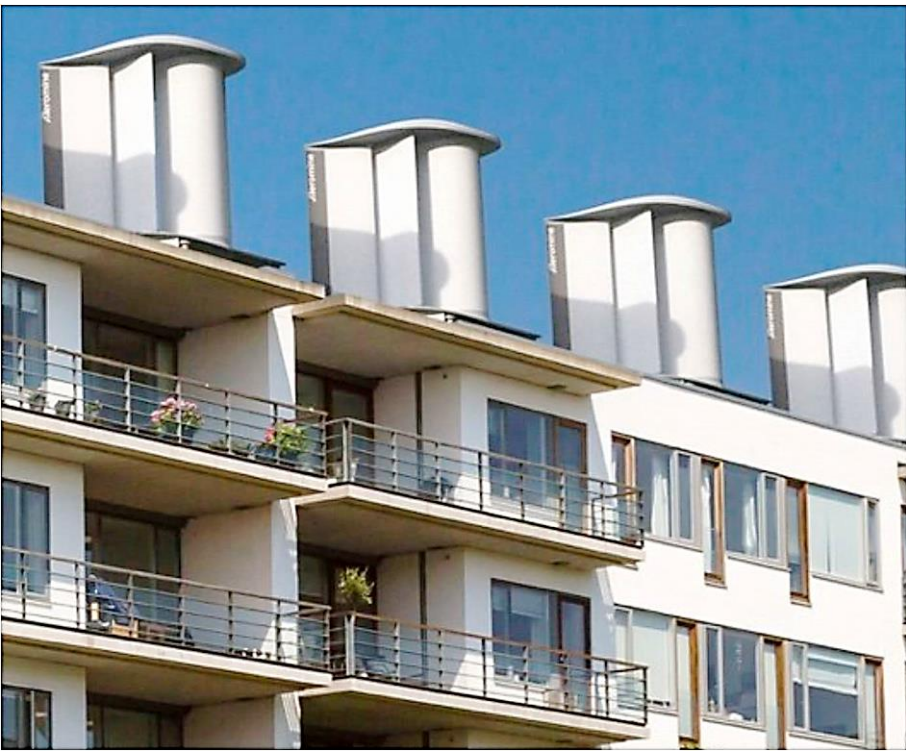
900 kWh Saisonspeicher auf 3x2x1 m
ersetzt 2 Schiffscontainer voll mit Li-Batterien
Keine Selbstentladung wie bei Batterie
Elektrolyseleistung 2,3 kW Wasserstoff
Brennstoffzellenleistung 1,5 kW Strom
verfügbare Abwärme 3 kW für Heizung
Wärmerückgewinnung bis 87%
105.000 – 145.000 € brutto (-15.000 KfW)
10 Jahre Garantie bei Abschluss eines
Servicevertrags 499,80 € brutto/Jahr



Die Windturbine für den Gebrauch in Stadt- und Gewerbegebieten

(www.aerominetechologies.com)

- leise, keine sichtbaren bewegten Teile, kein Stobo-Effekt, dafür Venturi-Effekt genutzt
- Windenergie auf hohen Flachdächern rund um die Uhr auch in den 4 dunklen Wintermonaten
- bis 50% mehr Energie pro Fläche als PV: 5.000 W pro Box ersetzen 12 PV Paneele à 400 Watt
- Parallele Ernte von Wind- und Sonnenenergie spart 75% des urbanen Speicherbedarfs!



25 Boxen mit 125 kWp Nennleistung ...dahinter
300 aufgeständerte PV-Paneele mit 125 kWp Nennleistung

Aeromine, ein Spinoff-Unternehmen der
University of Houston macht es uns vor

Harvesting the Power of Wind for
the Global Distributed
Generation Market



Empfehlungen für die Stadt Marburg, ihre Universität und Industrie:

Urbane Wind- und PV-Anlagen erstmal auf das eigene Dach ...und nicht anderen vor die Nase!

Prof. Martina Klärle, Geo-Informatikerin & Präsidentin der Dualen Hochschule Baden-Württemberg:

- **Belegung von 50% aller urbanen Dachflächen** und weiterer bereits versiegelter Flächen in Marburg-Stadt liefert genug Energie für den von jedem Bewohner Marburgs anteilig aufzubringenden Anteil einer **Vollversorgung ALLER SEKTOREN mit Solarstrom!**
- **Voraussetzung: Ökostrom-Speicherkapazitäten werden parallel aufgebaut!**

Quellen: 1) www.enercity.de/magazin/unsere-welt/studie-weltweites-pv-potenzial.

2) www.kontextwochenzeitung.de/gesellschaft/585/wir-schaffen-die-energiewende-8250.html (Interview-Podcast).

Prof. Ulrich Platt, Institut für Umweltphysik der Uni Heidelberg:

- **Sommer-Winter- / Tag-Nacht-Ausgleich** durch Kombination von PV und Windenergie
- Erforderliche Speicherkapazität sinkt um den Faktor 4 auf ein Minimum bei
30 : 70 (Wind : PV) Anteilen bezogen auf die **installierte Nennleistung**
55 : 45 (Wind : PV) Anteilen bezogen auf die **erwartbare Stromerzeugung** wegen
25 : 10 (Wind : PV) Anteilen der **erwartbaren Volllaststunden im Jahr**

Quelle Heidelberger Academy for Future: www.hadw-bw.de/news/events/potential-der-erneuerbaren-energie-europa-was-ist-moeglich

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2020: 11.895 PJ (1.000 PJ = 0,278 PWh)

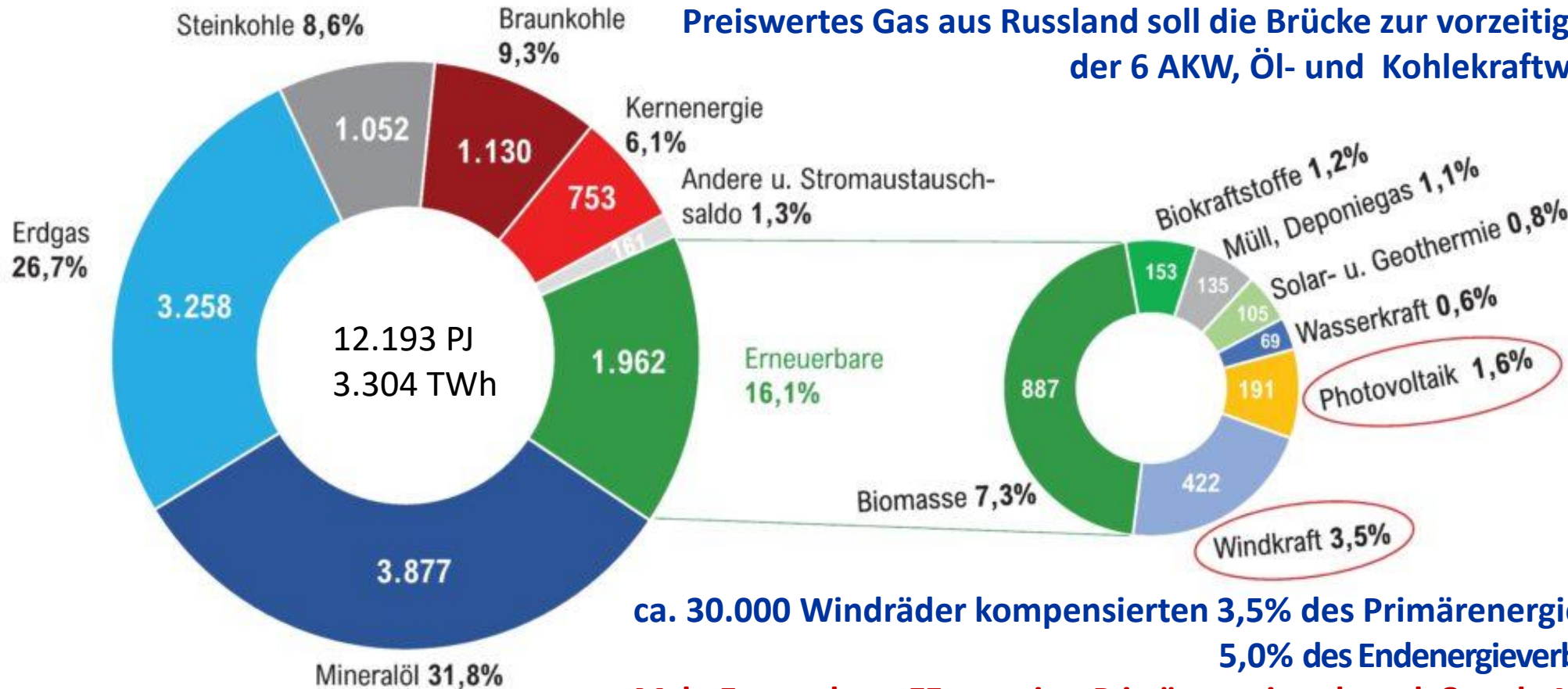
Energieinhalt chemischer Energieträger (fossil, bio) und physikalischer (nuklear, hydro) **vor Wandlung** in Strom & Wärme

Endenergieverbrauch Deutschland 2020: 8.400 PJ (70%: 30% Verlust durch Wandlung & Transport)

Den Haushalten, Gewerbe, Verkehr und Industrie zur Verfügung gestellte Strom- und Wärmeenergie **nach Wandlung**

Primärenergieverbrauch in Deutschland 2021 (12.193 PJ*)

**Energiesituation im Dezember 2021 vor Ausbruch des Ukraine-Krieges:
Preiswertes Gas aus Russland soll die Brücke zur vorzeitigen Abschaltung
der 6 AKW, Öl- und Kohlekraftwerke garantieren**



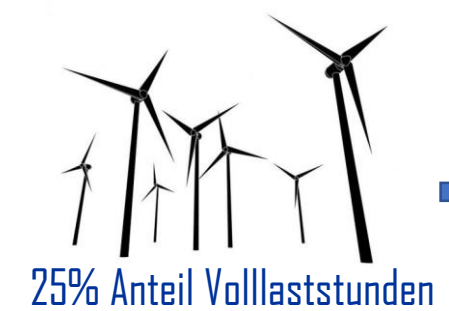
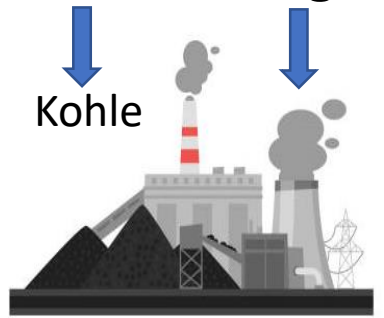
ca. 30.000 Windräder kompensierten 3,5% des Primärenergieverbrauches, aber 5,0% des Endenergieverbrauches

Mehr Erneuerbare, EE = weniger Primärenergieverbrauch & mehr Nutzenergieverluste durch zwingend notwendige EE-Speicherung!

*vorläufige Zahlen, Stand 12/2021

Quelle: Energiedaten des BMWK, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, eigene Darstellung

Aus 100 MWh Primärenergie



Endenergie

Wirkungsgrad
x 0,40



x 0,60



x 0,45

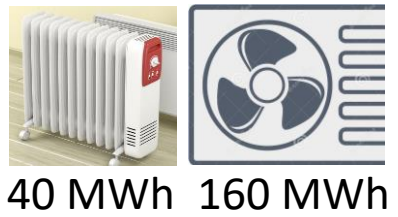


x 0,20

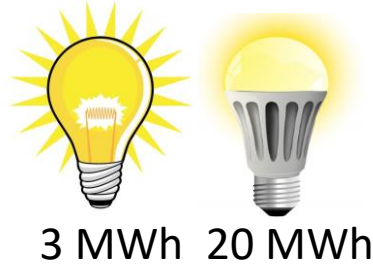


Nutzenergie

x 1,00
x 4,00



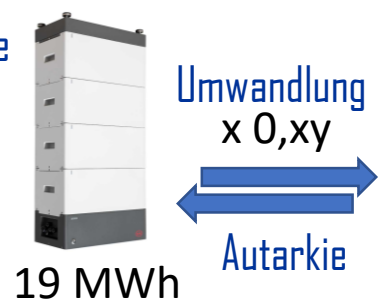
x 0,05
x 0,33



x 0,85



x 0,94



Wärmeenergie

Lichtenergie

Kinetische Energie

Elektrische Energie

Umwandlung
x 0,xy

Autarkie

Systemkosten (Vollkosten)

- ☹️ - Klimawandel-Folgen
- ☹️ - Klimawandel-Anpassung
- ☹️ - Feinstaubbelastung, Emissionen
- ☹️ - Reservekraftwerke teuer & ineffizient
- ☹️ **Verluste an Nutzenergie durch:**
- Elektrochemische Speicherung:**
- 😊 - Batterien (0,75...0,90 Wirkungsgrad)
- ☹️ - Batterie-Kosten, nur **Tagesspeicher**
- Chemische Speicherung Power-to-X:**
- ☹️ - Wasserstoff (0,65 – 0,75 PEM-Elektrolyse)
- ☹️ - Methanol (0,52), Methan SNG (0,52)
- ☹️ - Ammoniak (0,74), E-Fuel Kerosin (0,35)
- 😊 - Alle **Stoffe X** als **Saisonspeicher** geeignet
- ☹️ - Strom-Wasserstoff-Brennstoffzelle-Strom (0,40)
- Physikalische Speicherung:**
- 😊 - Pumpspeicher: Hydro (0,80), Druckluft (0,55)
- ☹️ - Mangelnde geologische Voraussetzungen
- ☹️ - (Latent)Wärmespeicher (0,70) Isolierung!

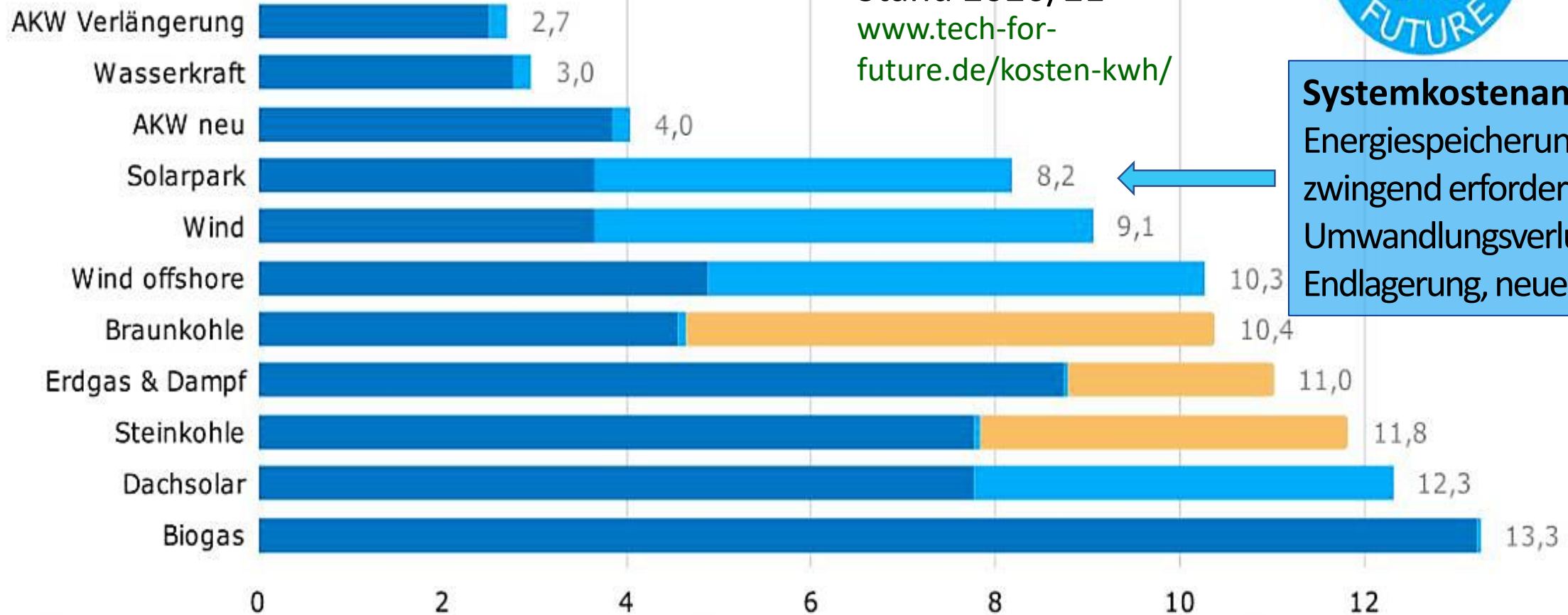
Vollkosten pro kWh: Welches ist die preisgünstigste unter den klimaneutralen Energiequellen?

Bei fossilen und nuklearen Kraftwerken erfolgt die kostengünstige Energiespeicherung **vor Umwandlung der Brennstoffe in Strom und nicht teuer danach!** → **Vollkosten** in €Cent pro kWh_{el} für ausschließlich deutsche/mittleuropäische Erzeuger



Stand 2020/21

www.tech-for-future.de/kosten-kwh/



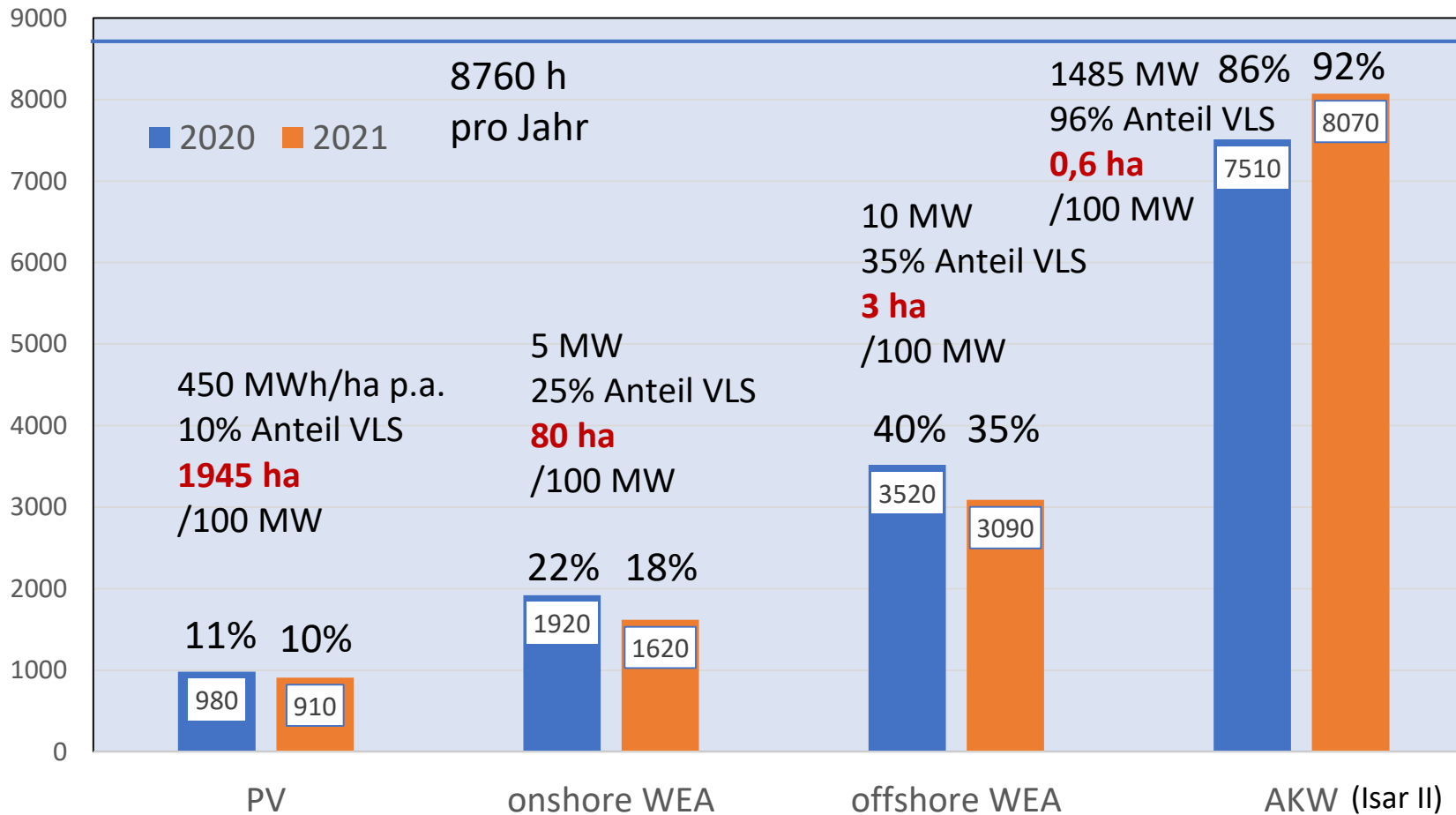
Systemkostenanteil:
Energiespeicherung, sofern zwingend erforderlich (PV, Wind), Umwandlungsverluste, Recycling, Endlagerung, neue Stromtrassen

■ Gestehungskosten - Kohle-/Gaspreis 2. HJ 2021 ■ Systemkosten - dt. Systemanteil (2020) ■ CO2-Preis 50€/t

Quelle: Internationale Energie Agentur IEA <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>

Auslastung, Konstanz und Flächenbedarf klimaneutraler Energieerzeugung

Volllaststunden-Äquivalente pro Jahr bei installierter Nennleistung



Beachte: Schwache PV- und Wind-Leistung 2021 wurde durch starke AKW-Leistung **klimaneutral** ausgeglichen

Beachte: Die 6 bis Ende 2021 laufenden deutschen AKW waren besser gewartet als die Hälfte der **56 AKW in Frankreich**, die 2021/22 nur auf eine Volllaststunden-(VLS)-Anteil von 30-45% kamen!

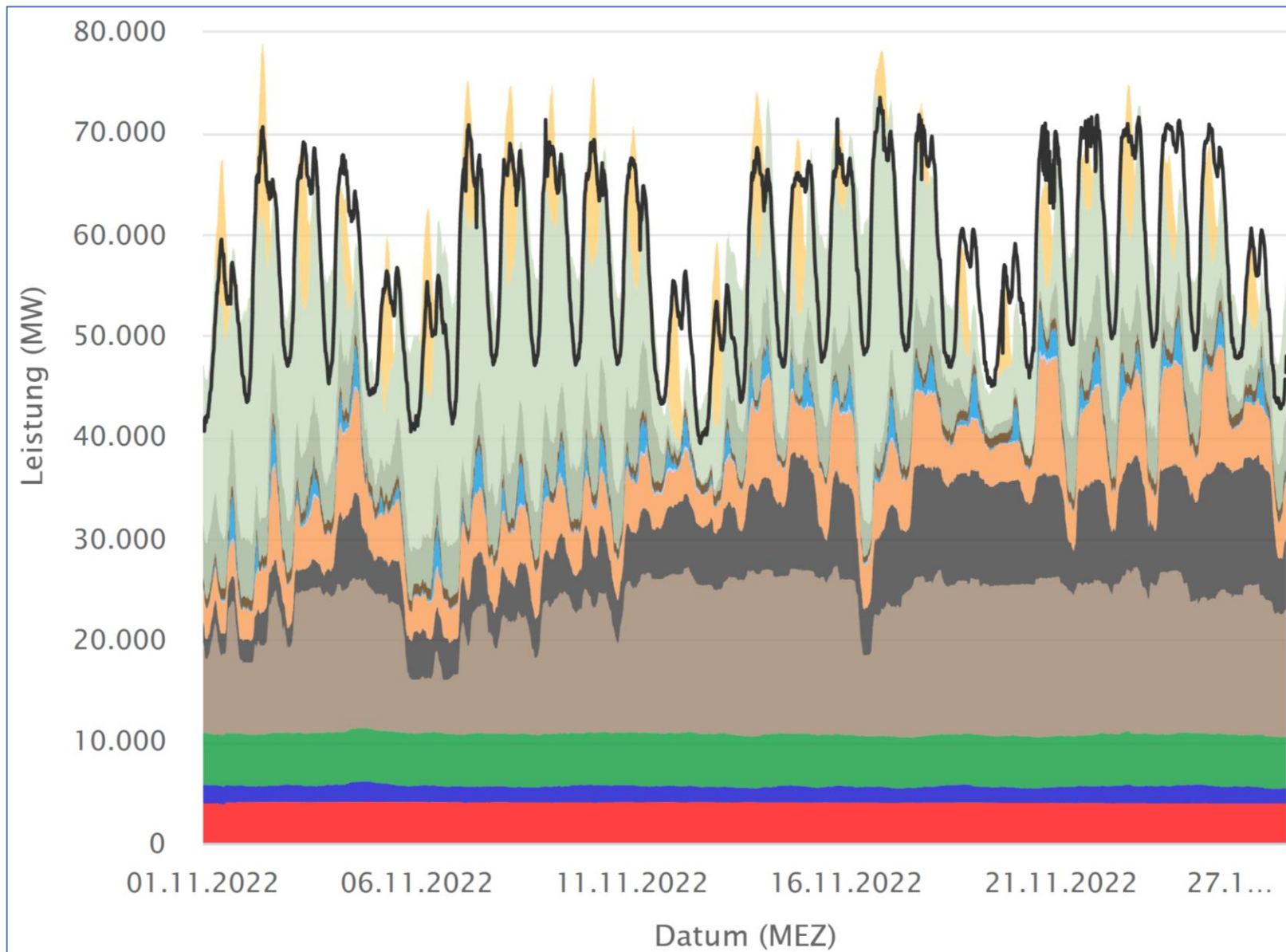
Beachte: Die **Laufzeitverlängerung** der 6 deutschen AKW würde bei sofortiger Abschaltung von Kohlekraftwerken gleicher Leistung **ca. 1 Milliarde Tonnen CO₂** bis 2038 einsparen!

Quelle: www.onebilliontons.org

Beachte: **Flächenverbrauch (ha) pro 100 MW Dauerdurchschnittsleistung & Strom-Endkosten** für Industrie- & Privatkunden in F, US
Quelle zu den Zahlen: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW (www.bdew.de abgerufen 9.6.22)

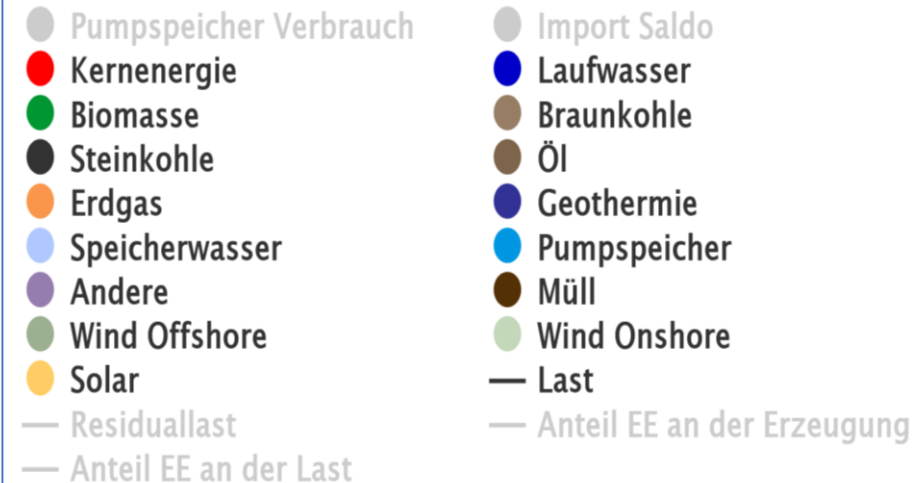
Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im November 2022

Quelle: <https://energy-charts.info> (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme)



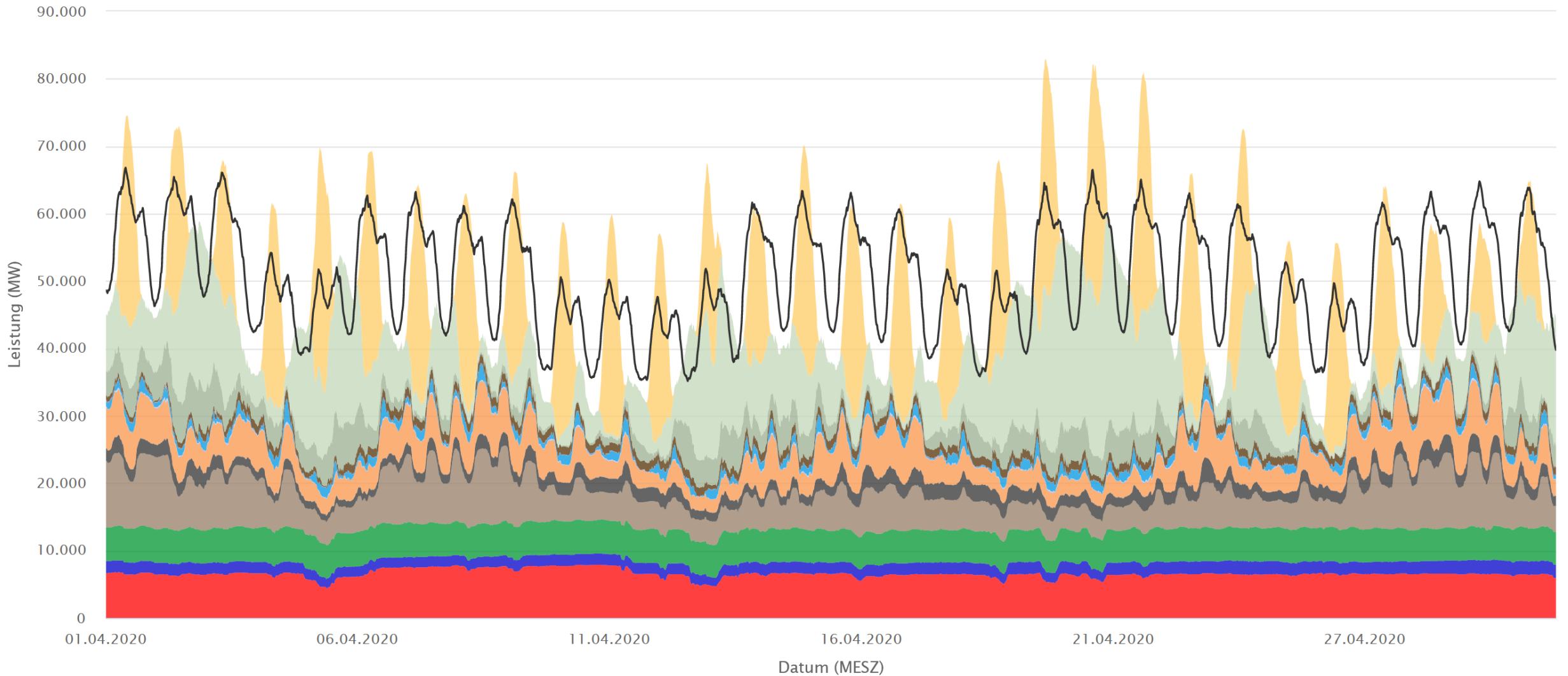
Beachte: Wochenrhythmus mit Senken der schwarzen Lastkurve am Sa + So

Beachte: Glück gehabt, dass die Unterversorgung am Sa 12.11.22 sowie Sa 19.11. + So 20.11. durch Mangel an Wind- und PV-Strom nicht auf einen Wochentag fielen, somit durch Import aus Frankreich sowie Hochfahren der fossilen Residuallast-Kraftwerke mit >70% Stromanteil ausgeglichen wurde.



Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im April 2020

Energetisch korrigierte Werte

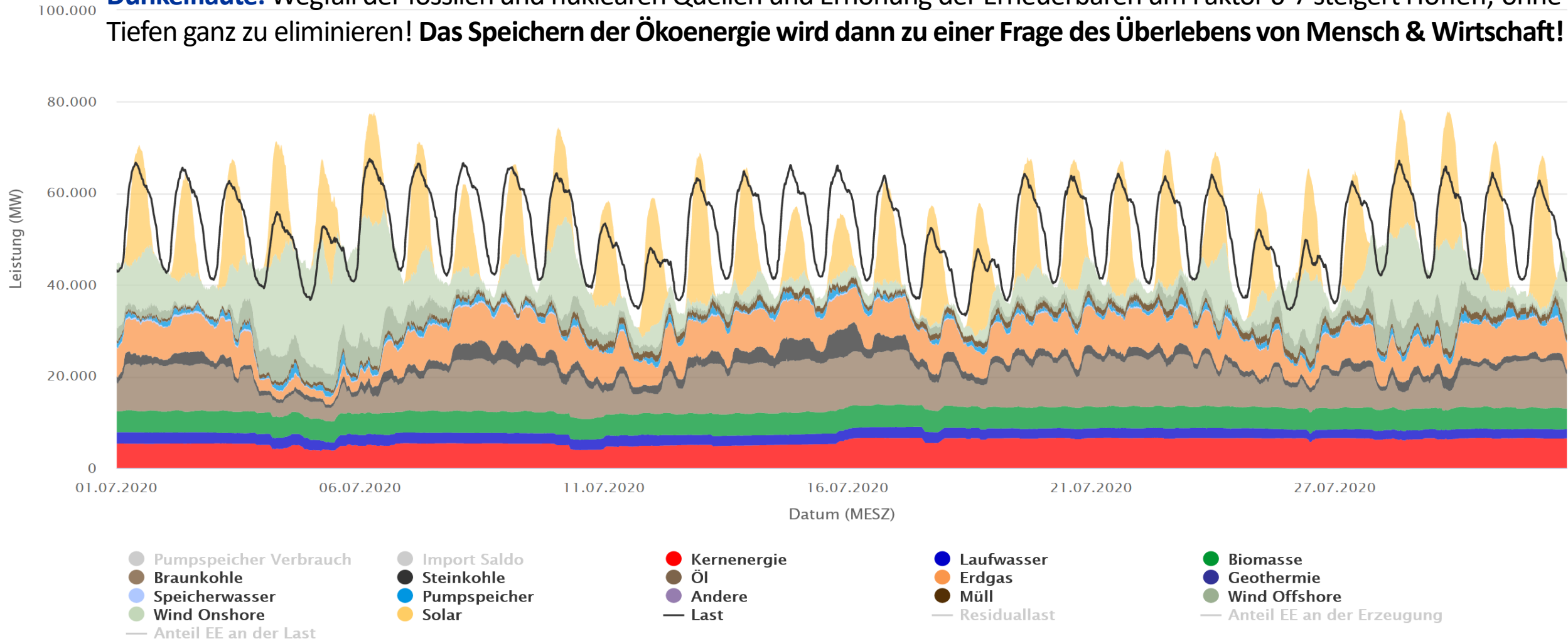


Weißer Flächen unter der **schwarzen Lastkurve** bedeuten „Stromimport zwingend“, überschießende Flächen bedeuten „Stromexport oder Energiewandlungsbedarf“, **beides bedeutet „Speicherbedarf“**.

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Juli 2020

Energetisch korrigierte Werte

Dunkelflaute: Wegfall der fossilen und nuklearen Quellen und Erhöhung der Erneuerbaren um Faktor 6-7 steigert Höhen, ohne Tiefen ganz zu eliminieren! **Das Speichern der Ökoenergie wird dann zu einer Frage des Überlebens von Mensch & Wirtschaft!**



Speicherbedarf kann uns mitten im Hochsommer treffen, sei es bei Unterlast mitten im Juli oder bei Überlast in stürmischer und sonniger Übergangsjahreszeit

Stromerzeugungsbedarf auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045/2050

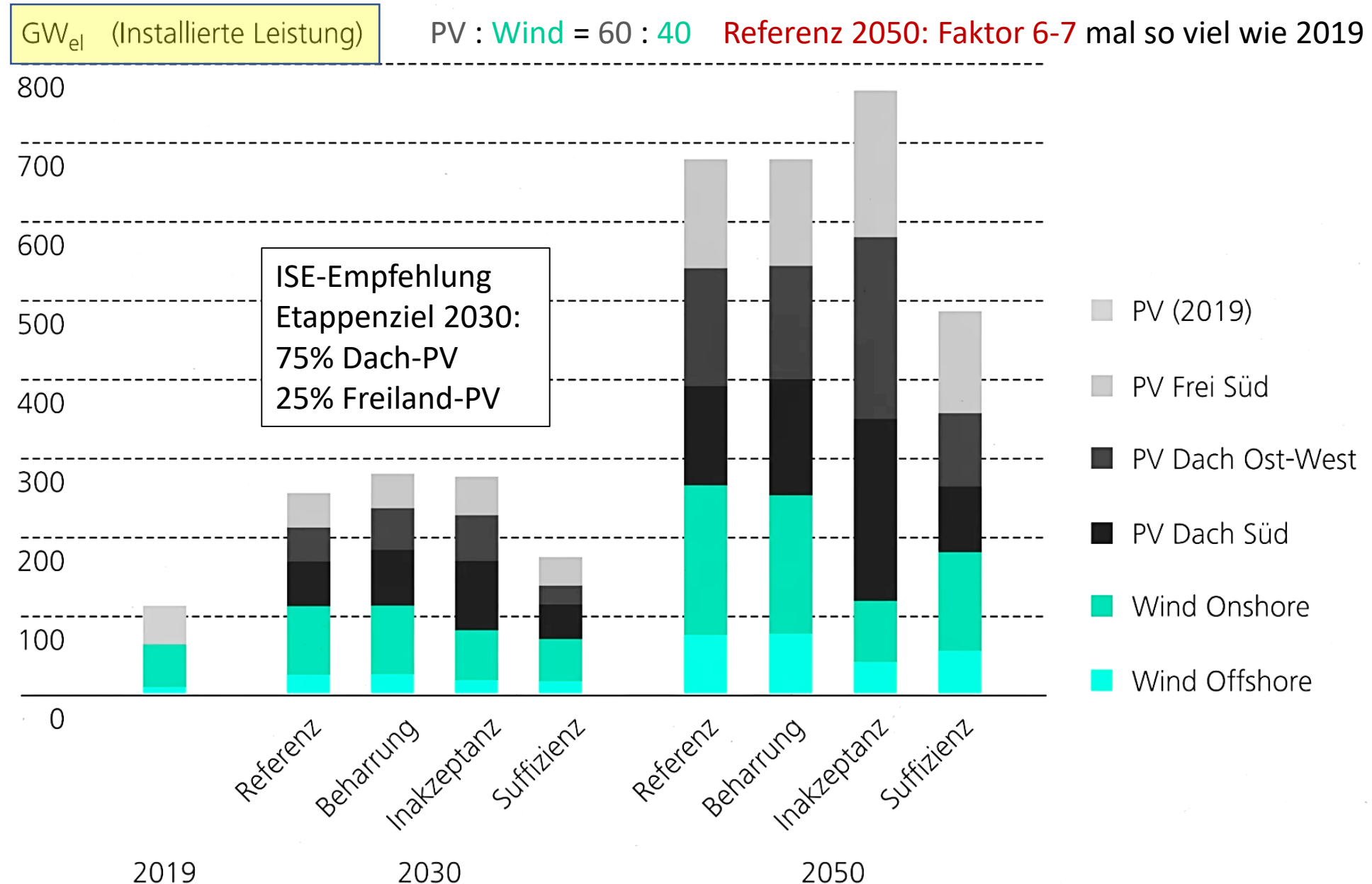
Zielempfehlung der Wissenschaft,
relative Anteile 2045:

PV Freiland Süd 30%
PV Dach O+W 40%
PV Dach Süd 30%

Wind Onshore 66%
Wind Offshore 33%

unabhängig von diversen
gesellschaftlichen Szenarien
bei AKW-Stopp in D

Quelle 2021:
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>



Stromspeicherbedarf im Jahresschnitt 2041-2045 & Strom-Flexibilitätsbedarf

Strommenge in TWh pro Jahr

Stromspeicherbedarf: 11 TWh

Stromspeicherangebot (2020):

0,04 TWh alle Pumpspeicher

0,000116 TWh alle Batteriespeicher

Speicherbedarf: 104 GW (2030)

in Leistung 180 GW (2045)

Speicherangebot: 15 GW (2020)

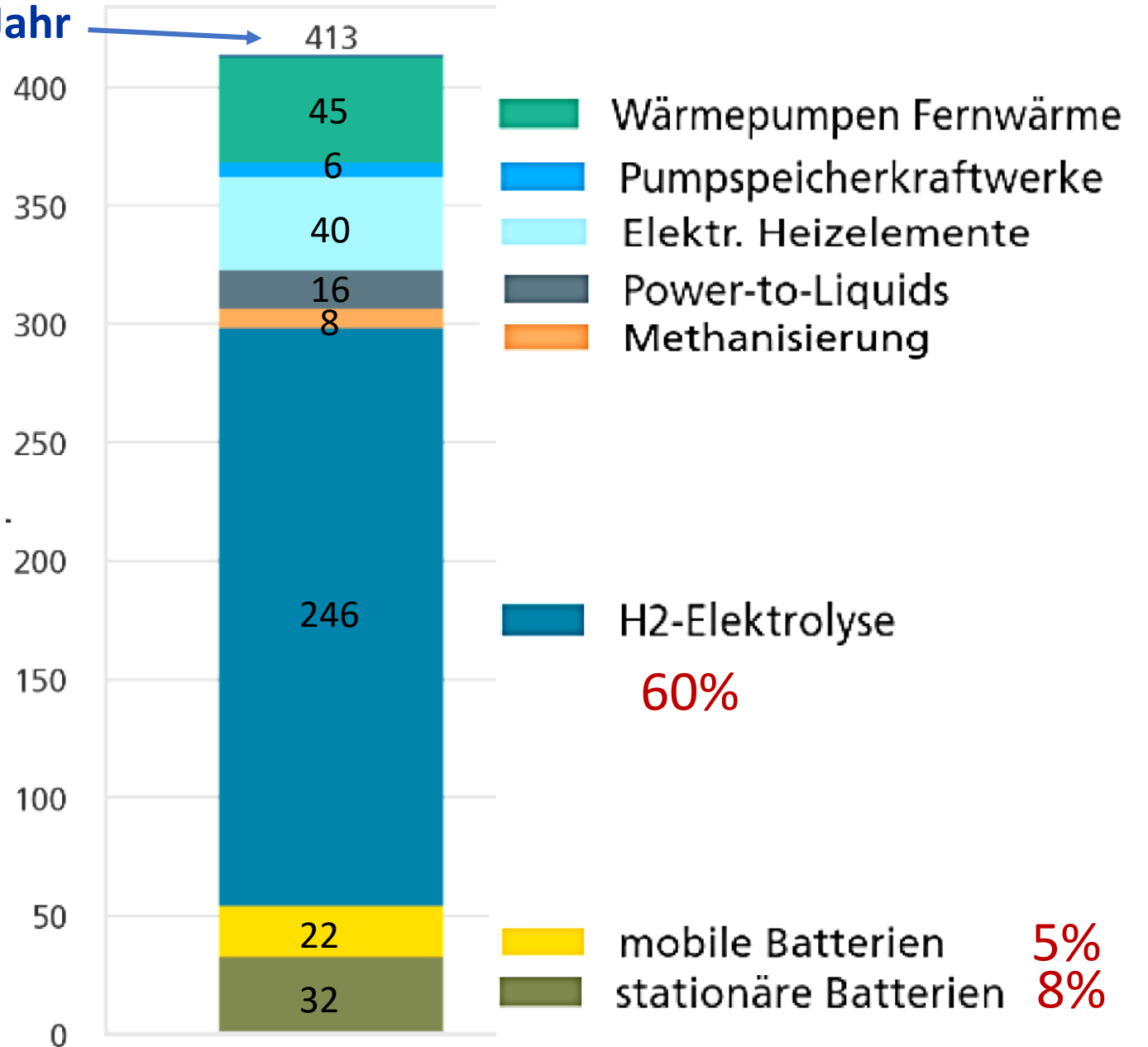
**Krasser Speicher-Mangel im
Energiewende-Musterland!**



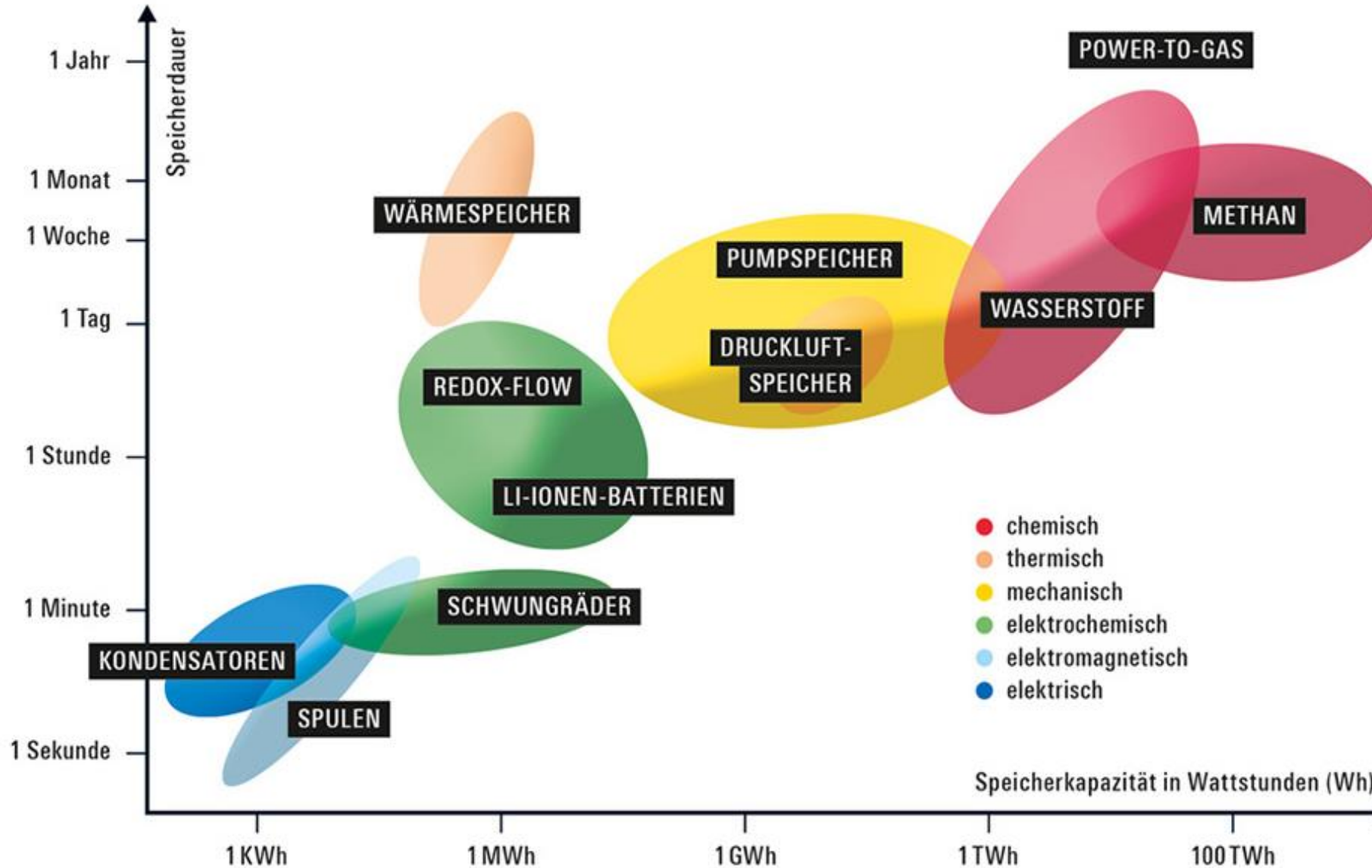
Quellen: [www.spektrum.de/
video/die-wahrheit-ueber-
erneuerbare-energien/2074593](http://www.spektrum.de/video/die-wahrheit-ueber-erneuerbare-energien/2074593)

ISE 2021: „Wege zu einem klimaneutralen
Energiesystem“

ISE 2022: „Batteriespeicher an ehemaligen
Kraftwerkstandorten“



Typen: Energiespeicher in Abhängigkeit von Speicherdauer und Speicherkapazität



Strommenge

10 MWh = 1 Windrad von
1 MW Durchschnittsleistung x 10 h bzw.
5 Windräder à 2 MW x 1 h

Strombedarf von Marburg inklusive Gewerbe 2018:

386 GWh pro Jahr
ca. 1 GWh pro 24 h

1 Windrad von 5 MW Nennleistung
= 1,25 MW erzeugte Durchschnittsleistung
x 24 h = 30 MWh pro Tag & Nacht

Wie viele 5 MW-Windräder (WEA) decken den Tagesverbrauch Marburgs?
1.000 MWh / 30 MWh = 33,3 WEA

Wieviel Tagesspeicher-Kapazität benötigt Marburg dafür?

1 LIB oder 1 Redox-Flow-Tagesspeicher von 1 MWh Kapazität speichert 1/30 des Tagesverbrauchs von Marburg 2018 !

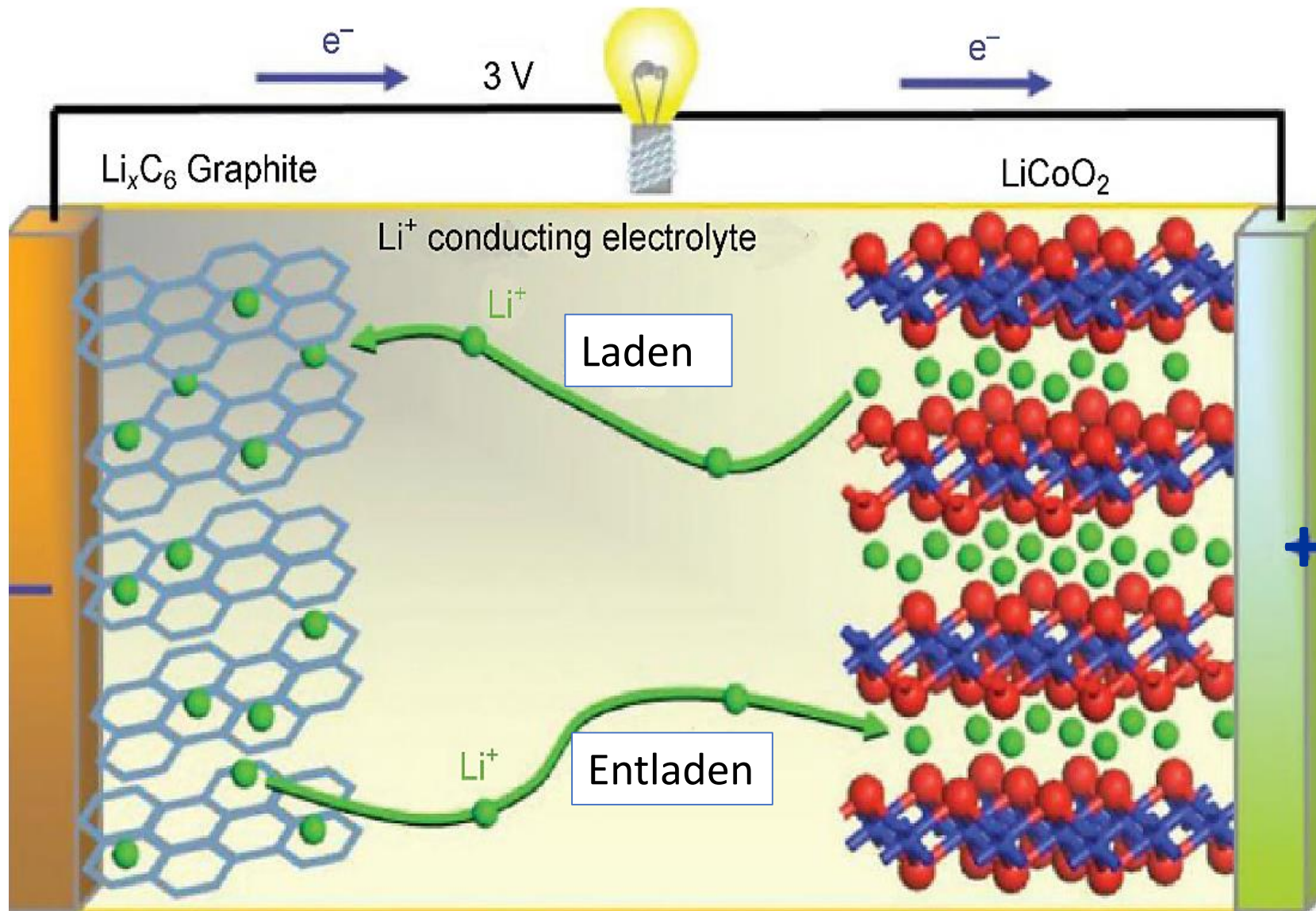
Decarbonisiertes Marburg 2030: x Faktor 10 !

Leider versiegende öffentlich einsehbare Zahlen bei Quelle: <https://www.energieportal-mittelhessen.de>

Grafik: Bild der Wissenschaft, Themenheft 2016: „Die Challenge / Stromspeicher: Der Schlüssel zur Energiewende“

Energie-Speicherung in Lithiumionen Batterien LIB

Tagesspeicher, teuer, aber sehr hoher Wirkungsgrad 95%



Forschungsthemen der Nachhaltigen Chemie:

Weniger Selbstentladung, Zyklen- / Temperaturfestigkeit, Wirkungsgrad? Recycling? Nachwachsende Rohstoffe?

Ersetze Cobalt durch Nickel und nicht-toxisches Mangan sowie Eisen: z.B. LFP $\text{Li Fe}(\text{PO}_4)$!

Ersetze weniger nachhaltiges Lithium durch Natrium!

Ersetze brennbares Elektrolyt-Lösungsmittel durch anorganischen Festelektrolyten

Benban Solar-Park Ägypten (2019)

Größtes Solarfeld Afrikas, eines der größten weltweit: 37 km² (6,0 x 6,2 km, 6 Millionen PV Paneele)
Von deutschen Ingenieuren gebaut, 2,3 Milliarden Dollar, finanziert durch EU und Green Climate Fund
1,65 GWp Gleichstrom DC x 0,85 Wechselrichter-Wirkungsgrad = 1,40 GW Wechselstrom AC
Leistungsäquivalent von 90% des Aswan High Dam oder 100% eines AKW.

Satellitenbild



Größte Lithiumionen-Batterie (LIB) weltweit: **350 MW / 1.400 MWh**

Crimson Energy Storage Project, Riverside California **on-grid 11'22**

Thermisch isolierte LIB-Container auf 8,1 km² inkl. Wechselrichter & Umspannstation

Flächenverbrauch in der Wüste preiswert: Reine Investitionskosten 550.000.000 USD

Mindestspeicherpreis (ohne Gewinn): **400.000 USD/MWh** bzw. **400 USD/kWh (Rekord) !**



Im Aufbau

Annahme: Verkaufspreis für Speichernutzung sei 600 USD/kWh (Bau, Wartung, Verschleiß, Gewinn)

Frage: Wie viel würde es kosten, die Leistung des Benban Solarparks / Ägypten (**1,65 GW DC**) für **6 Stunden in 4,7 LIB á 350 MW** zu speichern, um diese nach Sonnenuntergang Kairo zu liefern?

Antwort: 1,65 GW x 6 h = 9,9 GWh DC
10 GWh partielle Tagesenergiespeicherung
kosten 10.000 MWh x 400.000 USD/MWh =

4 Milliarden USD allein für LIB-Speichernutzung zuzüglich Energiepreis!



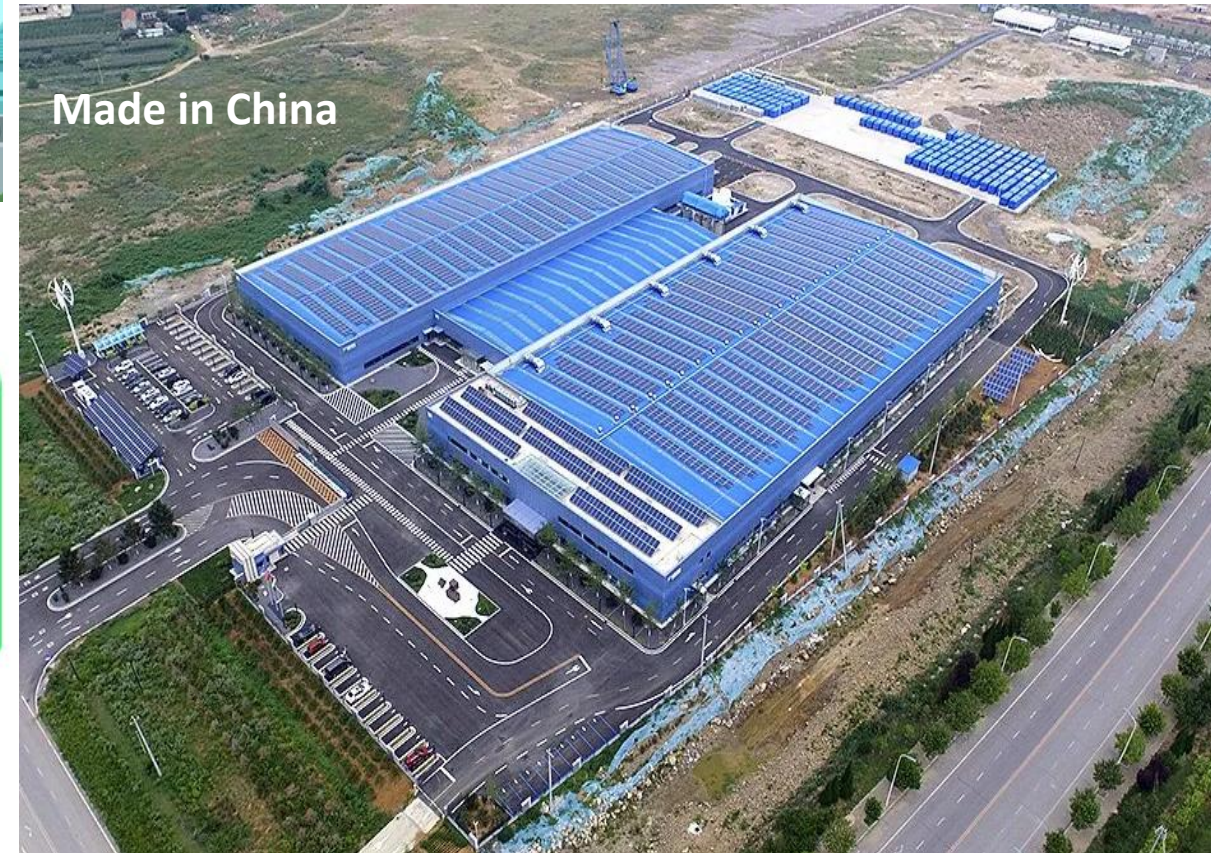
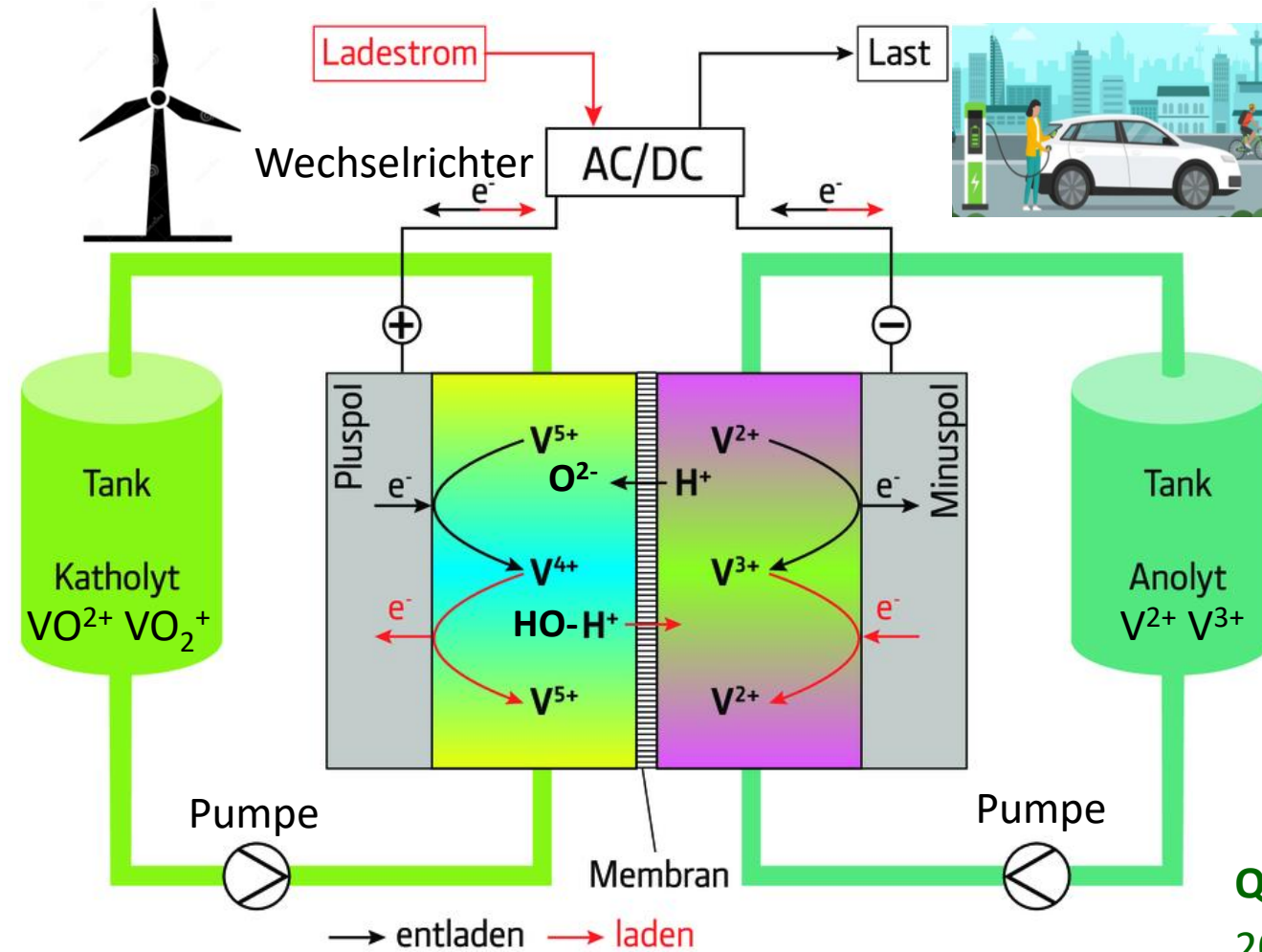
Weltgrößte Vanadium Redox-Flow (Fluss-) Batterie (RFB: 200 MW, 800 MWh)

Vorteil: 2020 preisgünstiger als Lithiumionen-Batterie, 700 \$/kWh, skalierbar, Kapazität unabhängig von Zellgröße

Nachteil: Energiedichte geringer, nicht nachhaltig verfügbarer, giftiger Elektrolyt, 75-85% Effizienz statt LIB 95%

Stromverbrauch Marburg inkl. Gewerbe 2018: 386 GWh pro Jahr (<https://www.energieportal-mittelhessen.de>)

800 MWh Kapazität entspricht 75% des Tagesverbrauchs 1,06 GWh von Marburg



Quelle: <https://electrek.co/2017/12/21/worlds-largest-battery-200mw-800mwh-vanadium-flow-battery-rongke-power/>

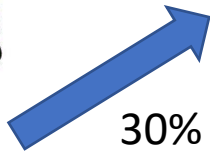
Über Lignin-Bioraffination zur „Holzbatterie“ aus nachwachsenden Rohstoffen

Natürliches Verbundmaterial Holz (Lignocellulose)

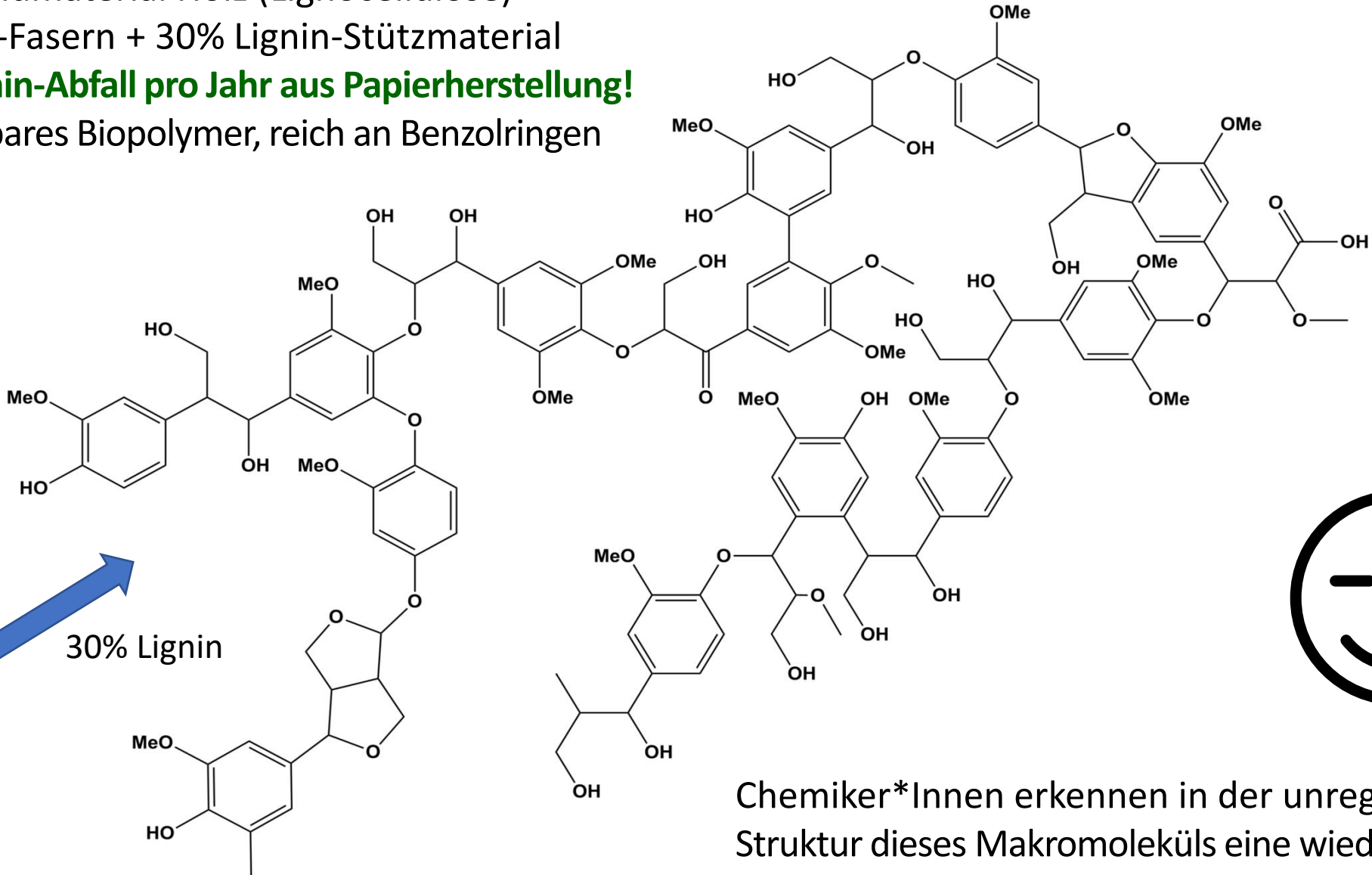
= 70% Cellulose-Fasern + 30% Lignin-Stützmaterial

50 Mio Tonnen Lignin-Abfall pro Jahr aus Papierherstellung!

Unbegrenzt verfügbares Biopolymer, reich an Benzolringen



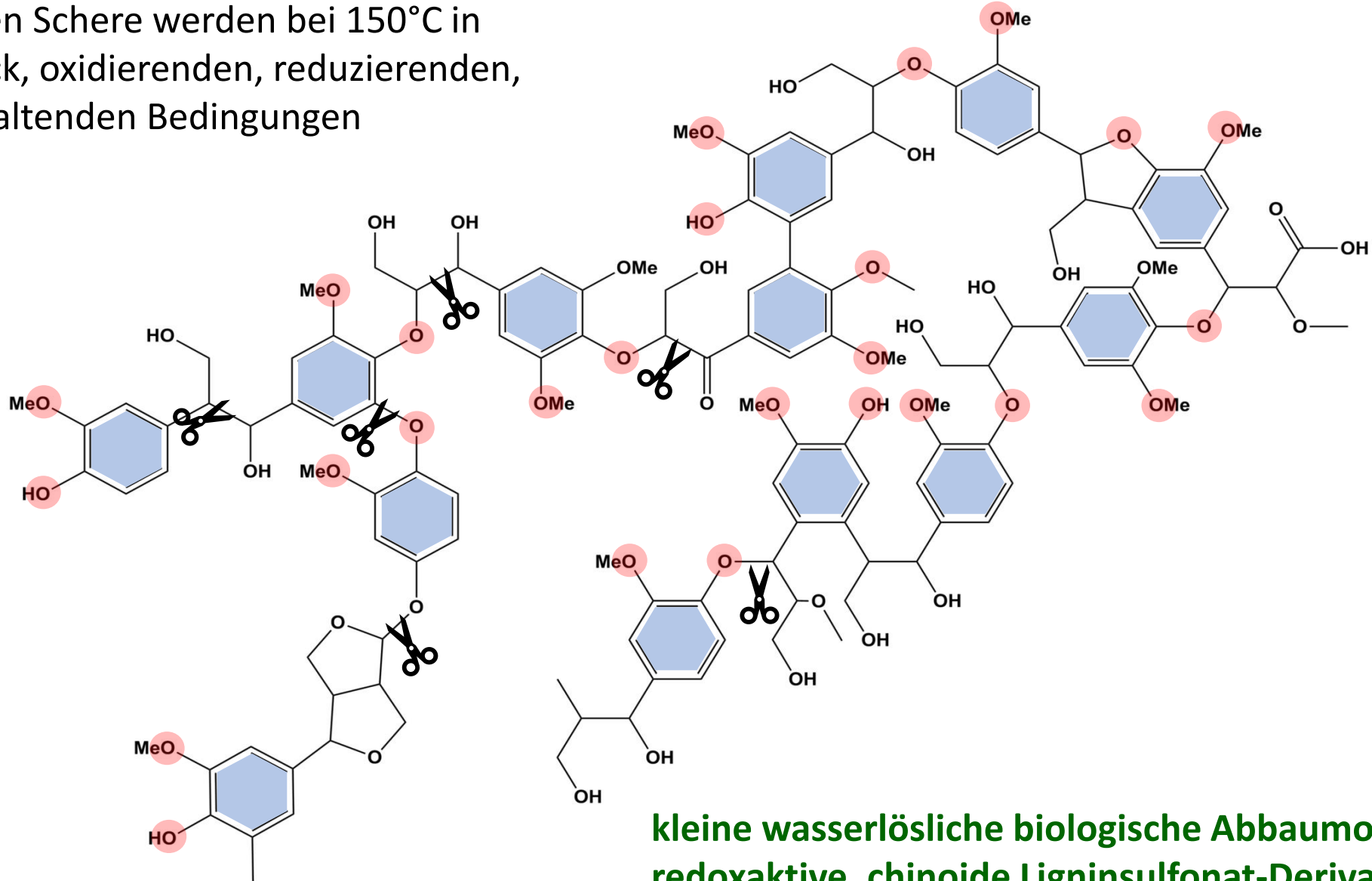
30% Lignin



Chemiker*Innen erkennen in der unregelmäßigen Struktur dieses Makromoleküls eine wiederkehrende Baustein-Sequenz aus C6-Ringen mit 2 O-Atomen.

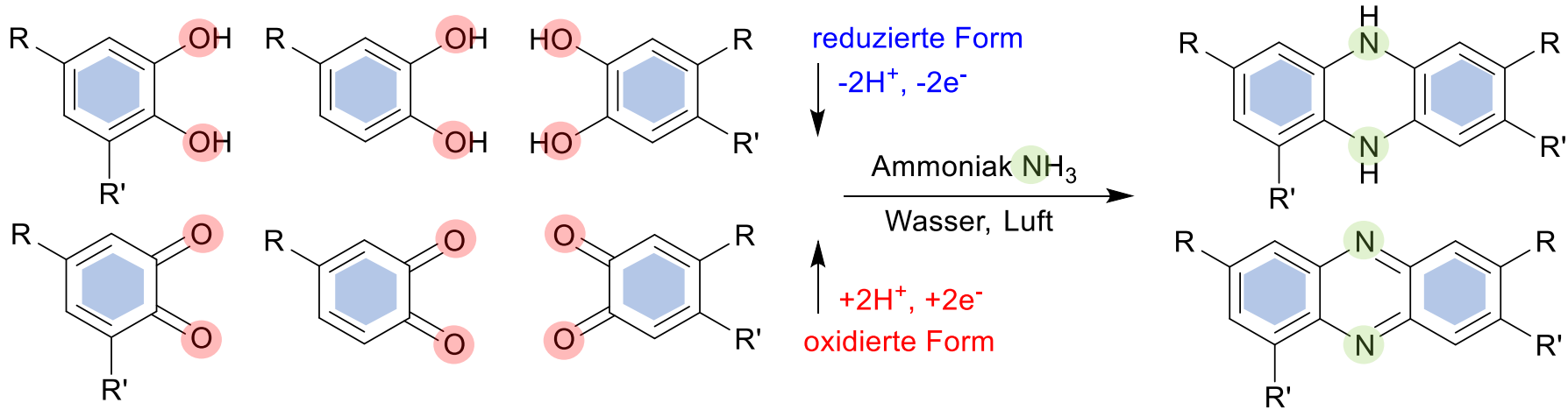
Über Lignin-Bioraffination zur „Holzbatterie“ aus nachwachsenden Rohstoffen

Mit der chemischen Schere werden bei 150°C in Wasser unter Druck, oxidierenden, reduzierenden, C-O-Bindungen spaltenden Bedingungen



kleine wasserlösliche biologische Abbaumoleküle = redoxaktive, chinoide Ligninsulfonat-Derivate erhalten

Über Lignin-Bioraffination zur „Holzbatterie“ aus nachwachsenden Rohstoffen



Phenazin-Derivate
als Elektronen &
Protonen Reservoir

<https://www.cmblu.com>

Kombination chinoider organischer Lignin-sulfonat-Bausteine mit Ammoniak zu robusten und redoxaktiven Stickstoff-Heterocyclen (Phenazinen) liefert die Elektrolyt-Bausteine dieser „**raffinierten Holzbatterie**“.

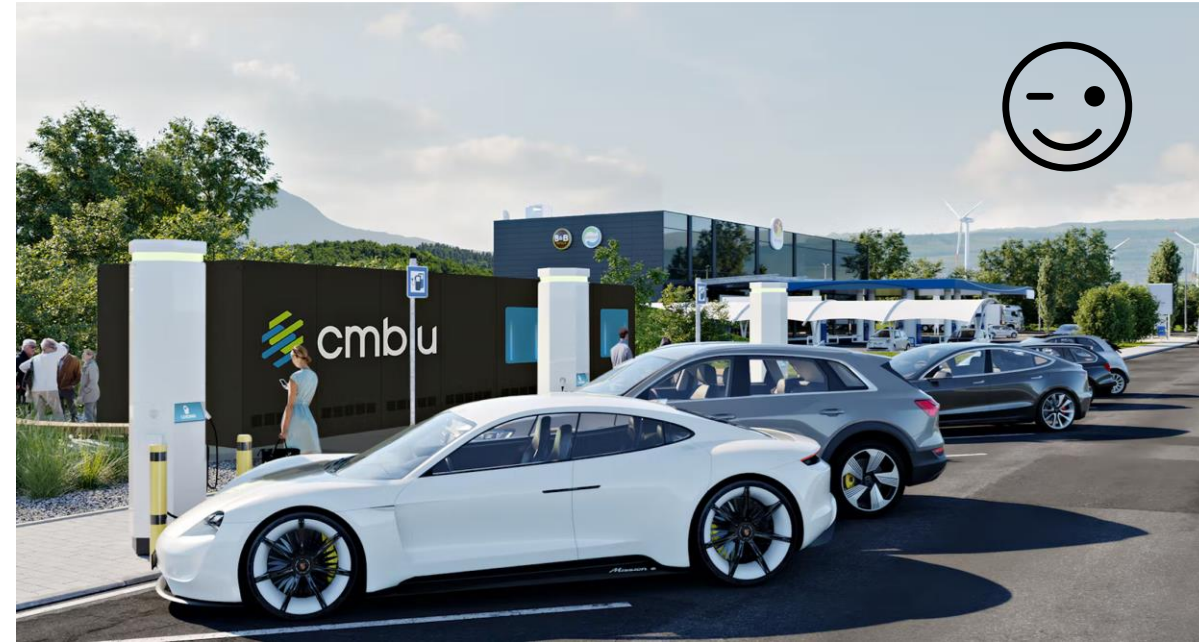


Die Ökobatterie:

- kostengünstig
- skalierbar
- ungiftig
- nicht brennbar
- zyklenstabil

©CMBLU Energy AG
Alzenau

Organic Solid-Flow
Technology



Wasserstoff: „Champagner der Energiewende“. Zentraler Knotenpunkt der **Kopplung der Sektoren** Verkehr-Gewerbe-Industrie-Dienstleistungen-Haushalte **über EIN Energiemolekül**

Hohe gravimetrische Energiedichte: 1 kg H₂ ≈ 33 kWh vgl. 1 L Diesel / Benzin ≈ 10 kWh

Niedrige volumetrische Energiedichte: 12.000 L H₂ (1 bar, 20°C) ≈ 1 L Diesel / Benzin ≈ 10 kWh

Komprimierung auf 80 bar: 7 kg/m³, 200-300 m³ Tanks, Verlust durch Volumenarbeit (x 0,95), Stahlcontainer preiswert

Komprimierung auf 300 bar: 20 kg/m³, 300-800 L Tanks, Verlust durch Volumenarbeit (x 0,90), Stahlzylinder

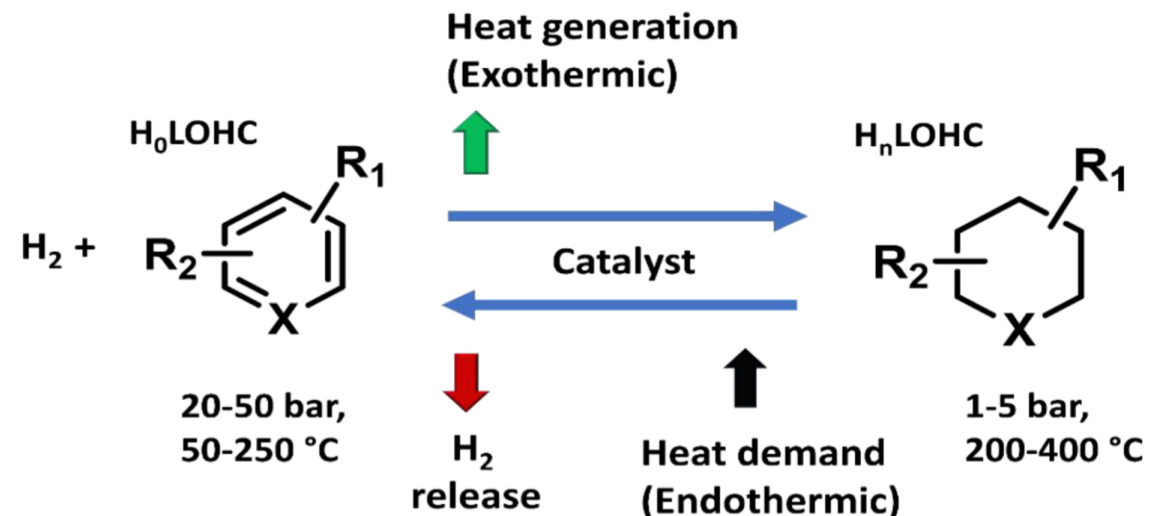
Komprimierung auf 700 bar: 40 kg/m³, 3-8 L Tanks, Verlust durch Volumenarbeit (x 0,85), Kohlefaserkugelbehälter teuer

Verflüssigung zu Kryowasserstoff (-253°C, 1 bar): 71 kg/m³ (< 0,80), 1 L Kryo-H₂ ≈ 0,27 L Benzin, Isolierung, Abdampfverluste

Speicherung von Wasserstoff



Liquid Organic Hydrogen Carriers LOHC



H₂-to-X Konversion zwecks Speicherung in besser transportierbaren **Gasen** Methan (SNG, -162°C, 1 bar), Ammoniak (30°C, 12 bar) & **Flüssigkeiten** Methanol, LOHC, E-Fuels. **LOHC: ≈ 2 kWh/l; 5-7% (der Masse = H₂)**

Power-to-Gas über Wasser-Elektrolyse

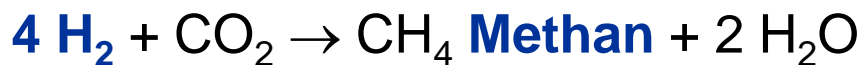
Problem: Süßwasser, kein Salzwasser!
 Meerwasserentsalzung mit Ökostrom

Energetische Verwertung von Sauerstoff ?
 Energetische Speicherung von Wasserstoff in **Speichermolekülen:**



Power-to-H₂
1,0 MW Leistung

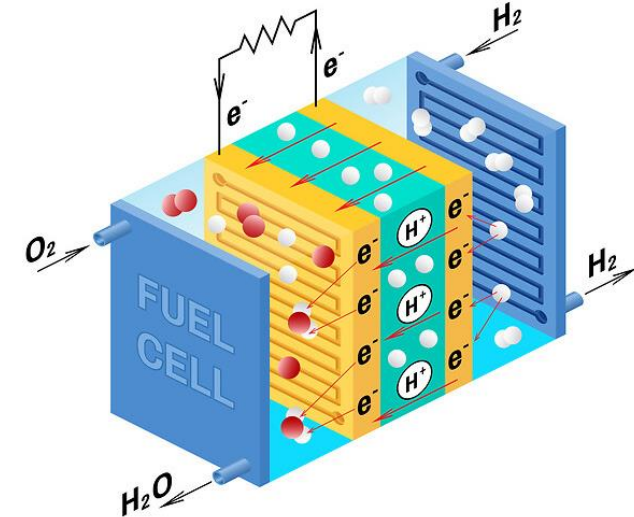
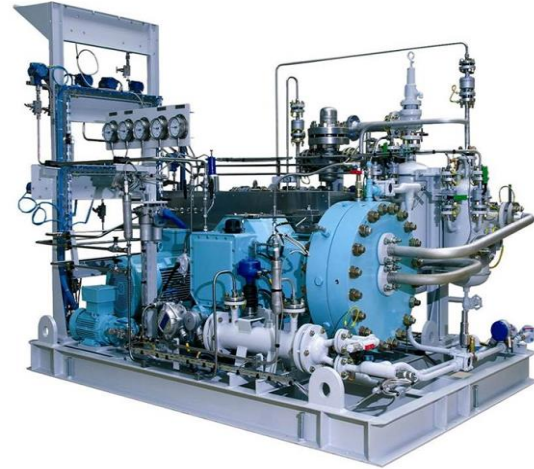
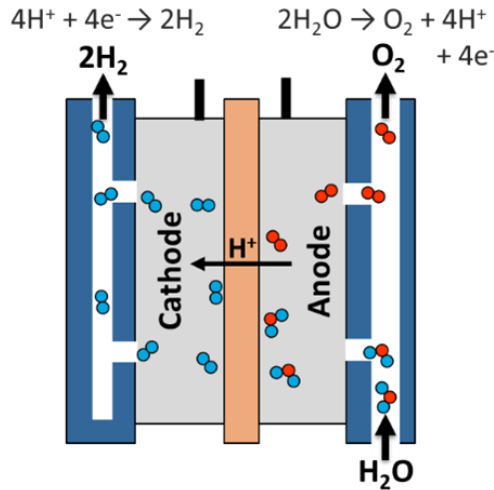
alkalische Elektrolyse von Wasser in Wyhlen



Wirkungsgrad nach Verwendung des Stroms (Wikipedia)

Weg	Wirkungsgrad	Anmerkung
Strom → Gas		
Wasserstoff	54–72 %	mit 200 bar komprimiert
Methan (SNG)	49–64 %	
Wasserstoff	57–73 %	mit 80 bar komprimiert (Erdgasleitung)
Methan (SNG)	50–64 %	
Wasserstoff	64–77 %	ohne Kompression
Methan (SNG)	51–65 %	
Strom → Gas → Strom		
Wasserstoff	34–44 %	mit 80 bar komprimiert und zu 60 % verstromt
Methan (SNG)	30–38 %	
Strom → Gas → Strom & Wärme Kraft-Wärme-Kopplung KWK		
Wasserstoff	48–62 %	mit 80 bar komprimiert und Strom/Wärme anteilig 40/45 %
Methan (SNG)	43–54 %	

Effizienz Grüner Ökoenergie – Wasserstoff-Konversion und Nutzenergie



1 MWh Ökoenergie
Produktion

x 0.7

nach Elektrolyse
0,7 MWh sind übrig

x 0.85

nach Kompression auf
700 bar 0,6 MWh übrig

x 0.6

nach Brennstoffzelle:
0,36 MWh Strom übrig

↓ direkter Verbrauch
x 4

4 MWh Wärmepumpe

↓ x 0,85

0.85 MWh in E-Auto

↓ H₂

Chemische
Industrie



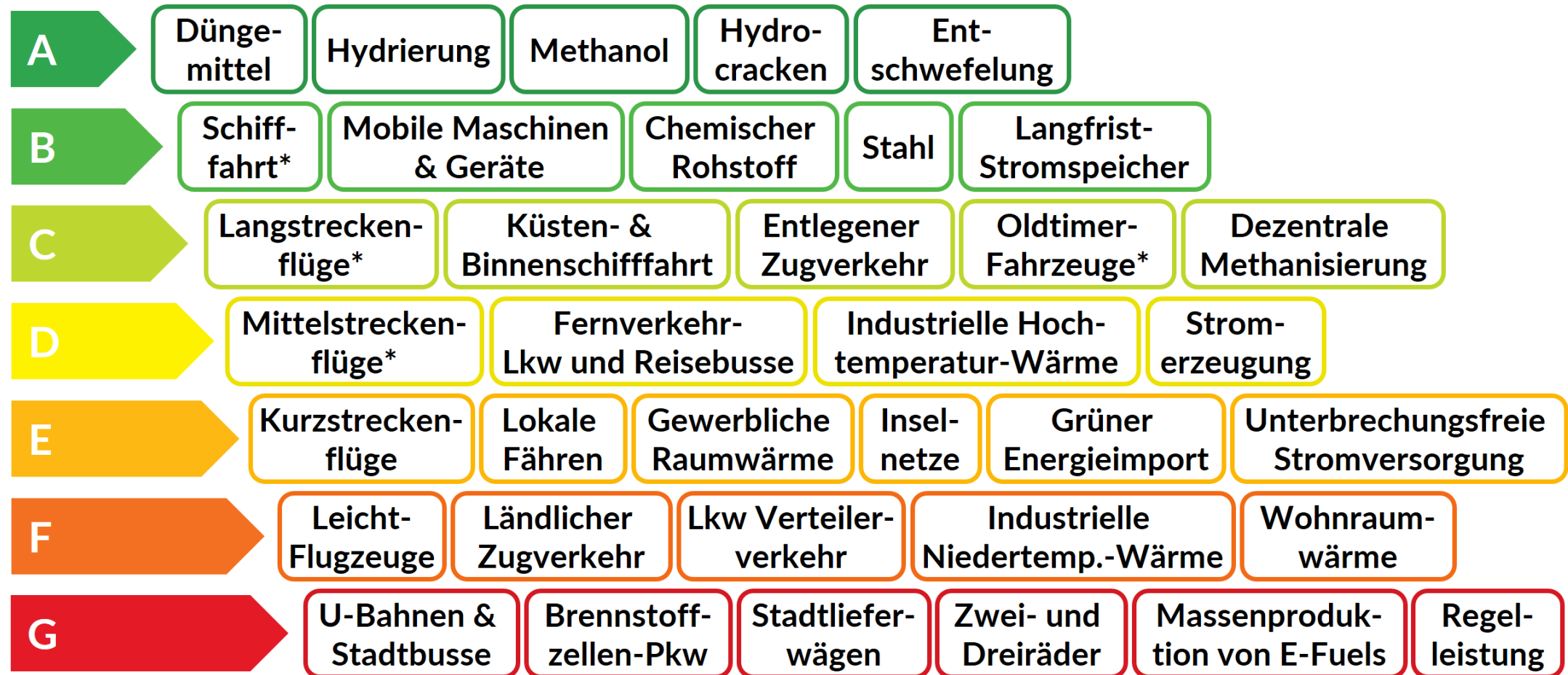
↓ Schwerlast H₂-elektrisch



Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Nach M. Liebreich, 2021)

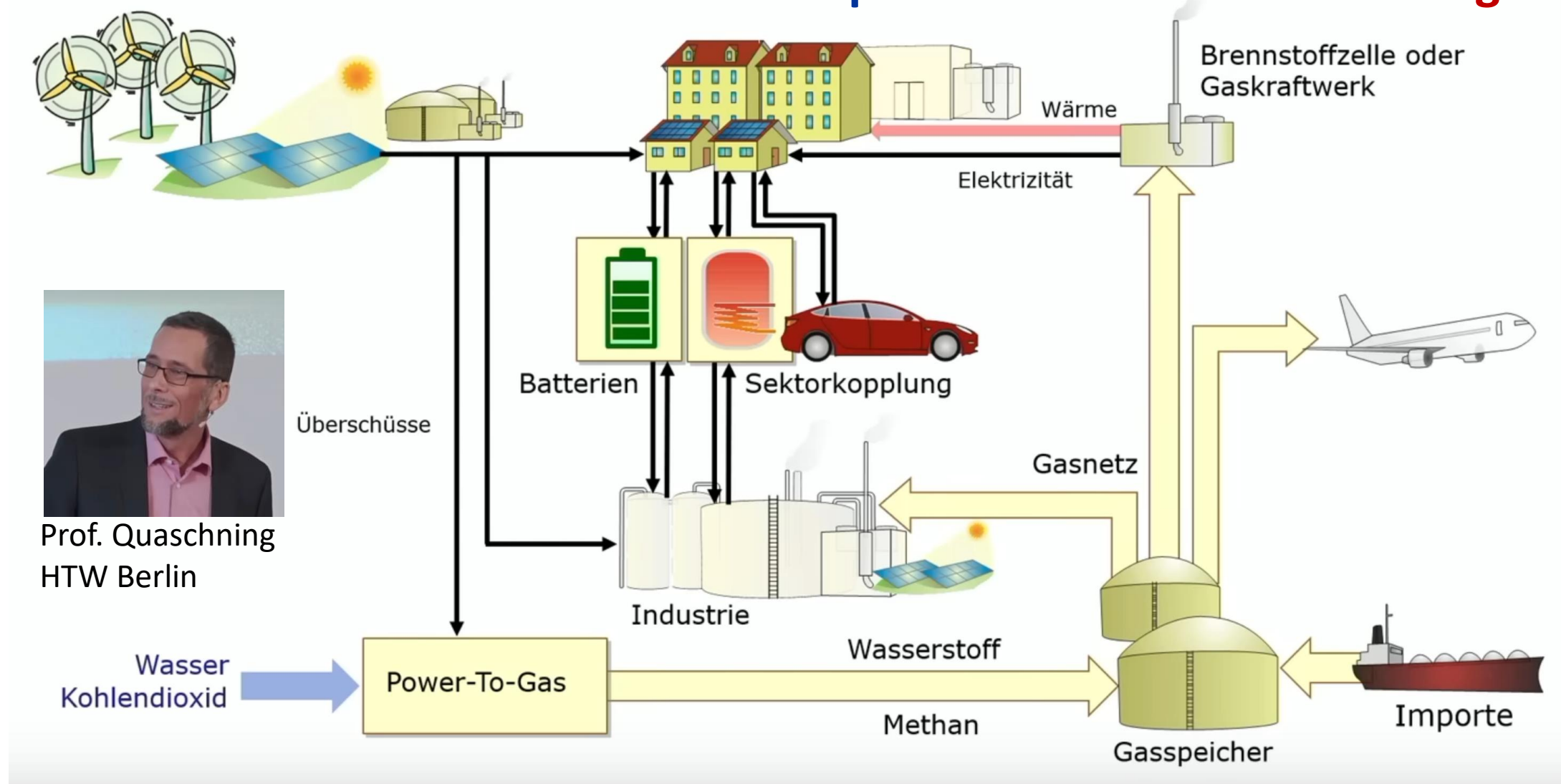
Alternativlos



Unwirtschaftlich

* Sehr wahrscheinlich in Form von mittels Wasserstoff erzeugten E-Fuels oder Ammoniak.

Sektorenverbund mit allen relevanten Komponenten - ohne Verlust-Energiebilanz



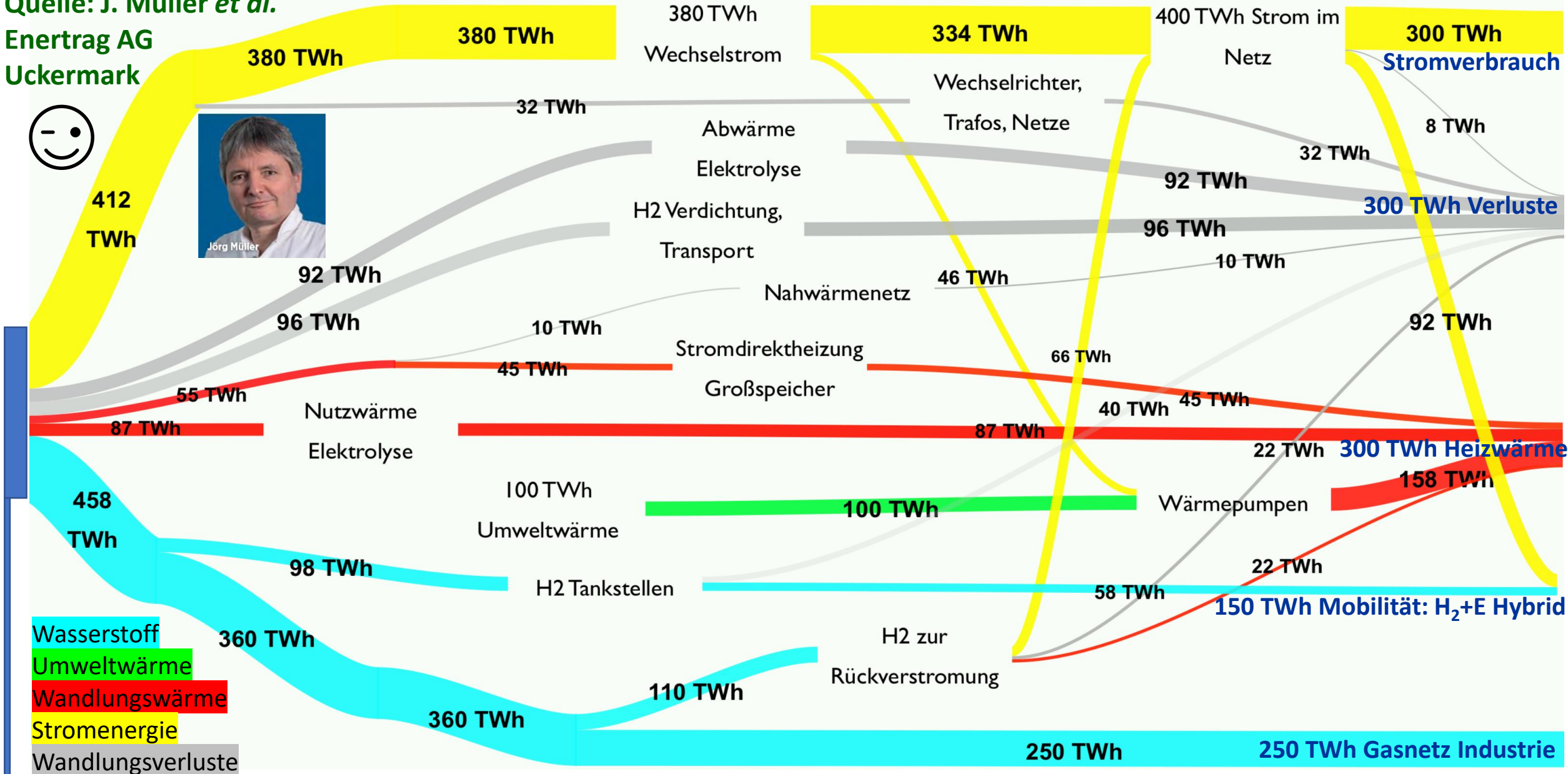
Prof. Quaschnig
HTW Berlin

Quelle: Prof. Quaschnig HTW Berlin 4.11.22 „Zeitenwende & Klimakrise – Warum wir JETZT eine Energierevolution brauchen“ <https://youtu.be/rYoFYAXovLI?t=3819>

Wasserstoff-Verbund: Klimaneutrales Deutschland 2045 – versorgungssicher & 80% Speicher-Systemwirkungsgrad

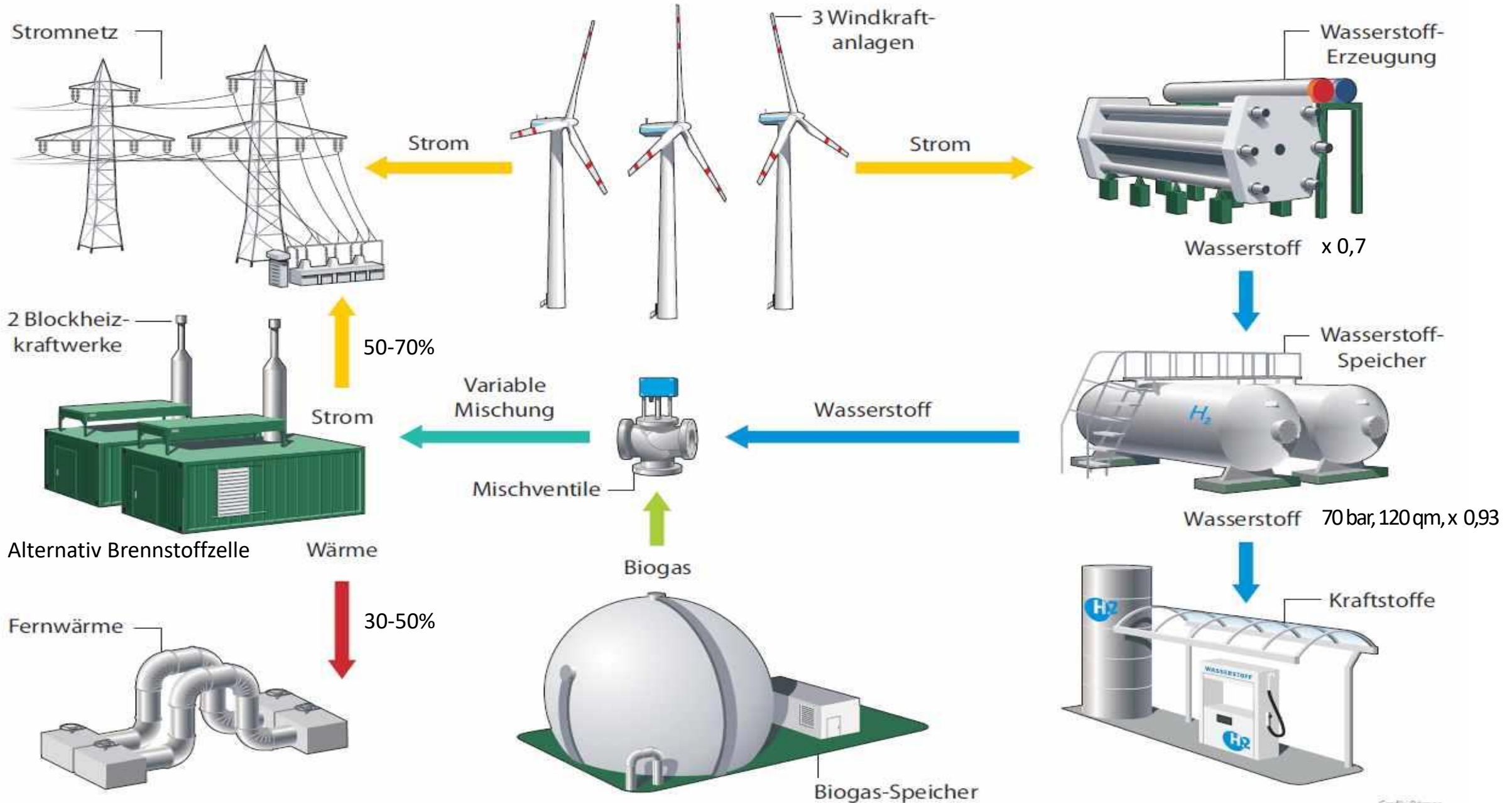
Quelle: J. Müller et al.

Enertrag AG
Uckermark

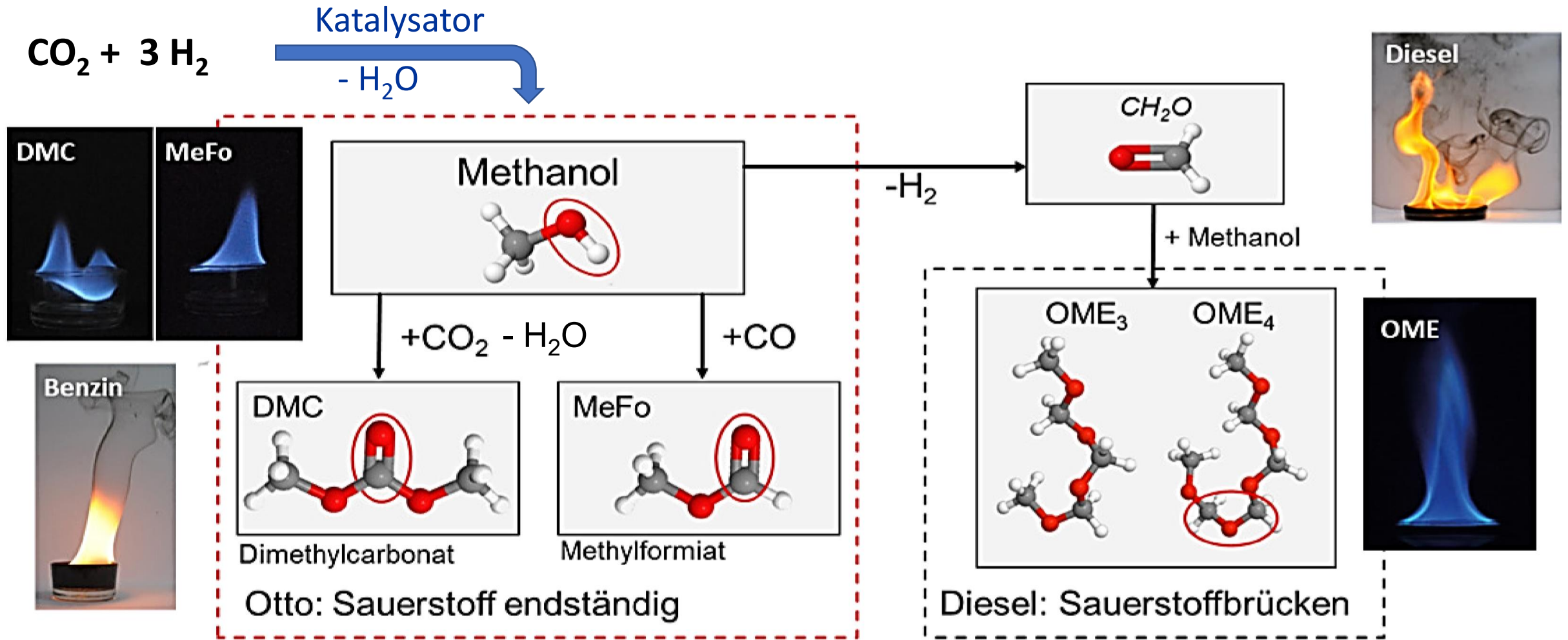


Bedarf 2045: 1.200 TWh Gleichstrom aus PV, Wind (und AKW?) – Stand 2020: 2.333 TWh Endenergie, davon 544 TWh ~Strom

ENERTRAG Hybridkraftwerk



Power-to-Liquid E-Fuels für Otto- und Dieselmotoren aus Wasserstoff und CO₂

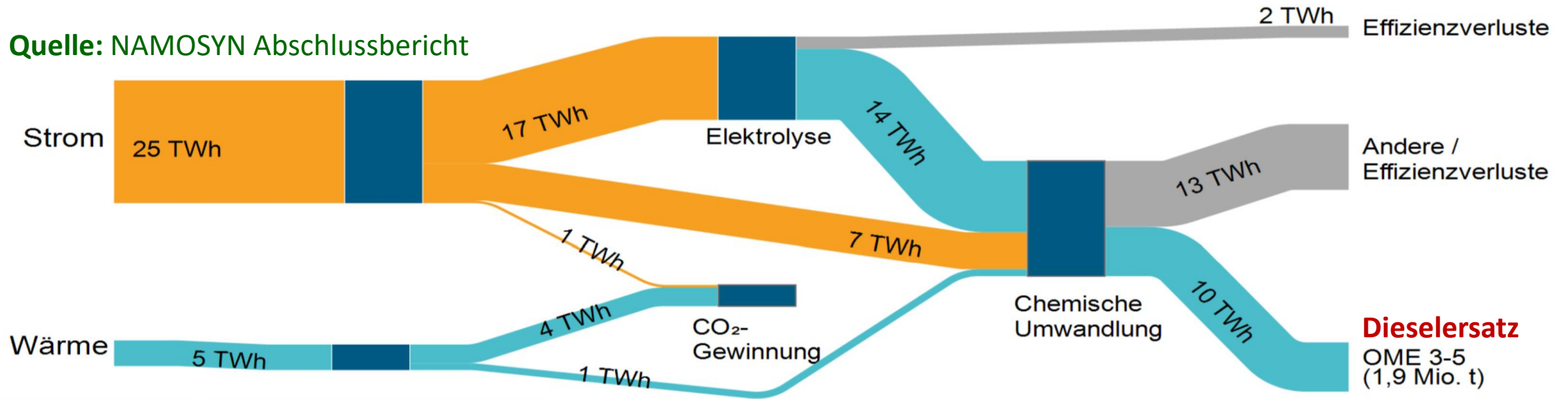


Vorteile: nahezu kein CO₂ Footprint, kein Ruß/Feinstaub
Nachteile: geringer Wirkungsgrad & Brennwert (partiell oxidiert)

Quellen: Lehrstuhl für Nachhaltige Mobile Antriebssysteme TU München & Inst. für Verbrennungskraftmaschinen TU Darmstadt

E-Fuels für klimaneutrale PKW? Völlig chancenlos gegen E-Mobilität (80-85% Eff.)!

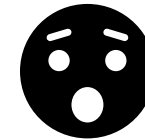
Quelle: NAMOSYN Abschlussbericht



Energiebilanz: 30% Effizienz bis zum E-Fuel, 9% inkl. Verbrennermotor:

Aus 25 TWh Strom + 5 TWh HT-Nutzwärme, d.h. aus Σ 30 TWh werden 10 TWh Dieselersatz OME und 15 TWh NT-Abfallwärme (30% Effizienz).

Der Dieselmotor selbst bringt es auf 30% Effizienz, somit bringt man nur $0,3 \times 0,3 \times 100\% = 9\%$ der eingesetzten Energie mit E-Fuels auf die Straße!



- Elektrische Energie
- Thermische Energie
- Andere/Verluste

Ausnahmen: Nischenanwendungen (Expeditions- und Militärfahrzeuge) und Fehlen von Alternativen:

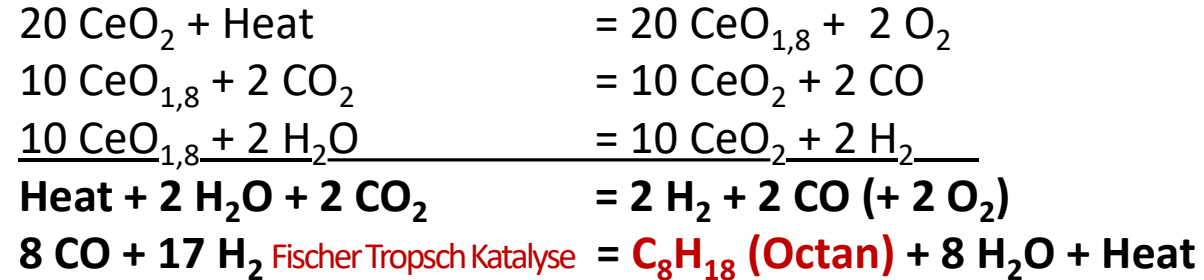
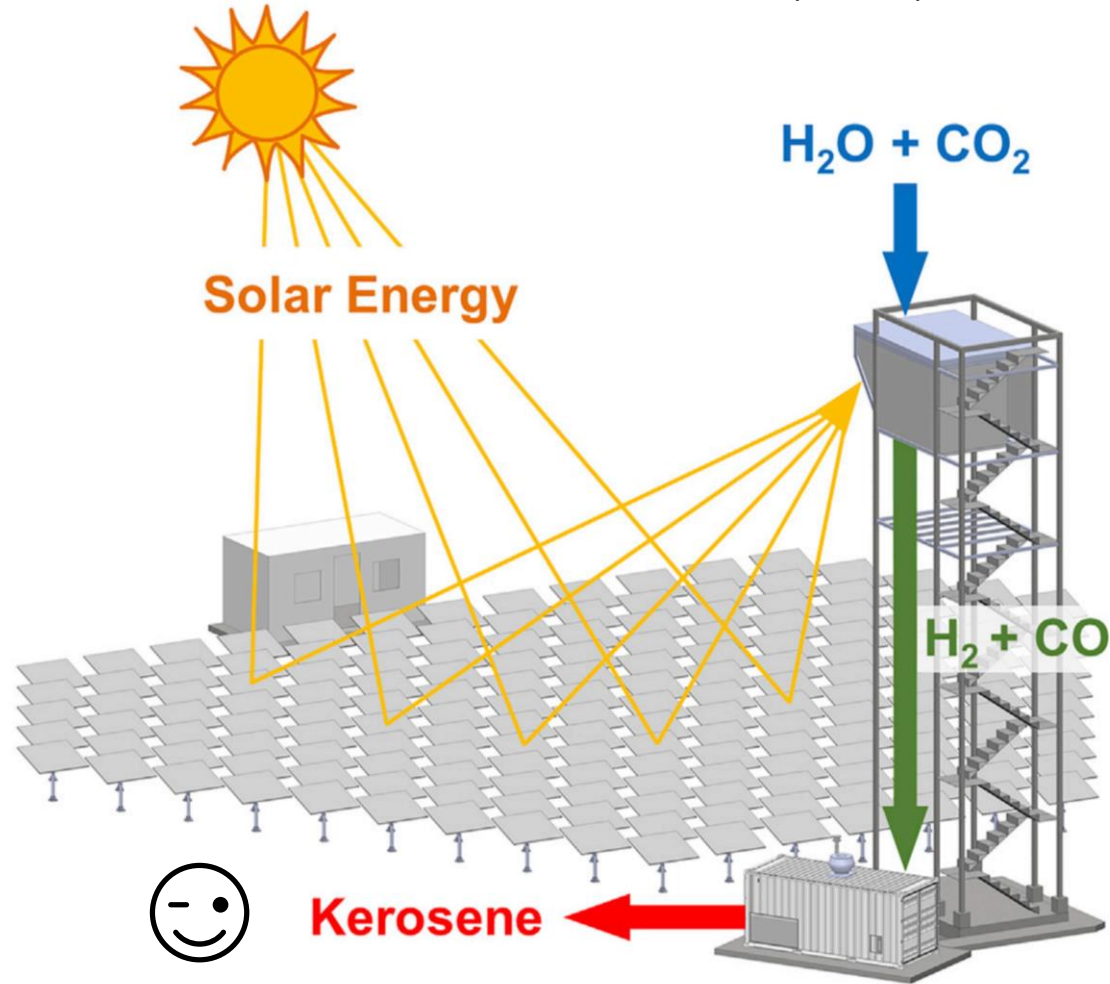
Schiffsverkehr mit E-Flüssigammoniak (NH_3 8,6 bar, 20°C, als E-Fuel für NH_3/H_2 -HT-Brennstoffzellen, E-Motoren).

Interkontinentalflüge mit E-Kerosin (kaum eine andere Substanz hat diese Energiedichte und Lagerfähigkeit).

Klimagerechtigkeit: Export von Power-to-X-Produkten aus dem Maghreb, Namibia, den Anden, Wüsten & Steppen fördert den globalen Ausgleich der wirtschaftlichen Entwicklungschancen aller Menschen und Regionen der Erde!

Speicherung thermischer und elektrischer Energie in E-Fuels (reserviert für Interkontinentalflüge!!)

Zoller et al. *Joule* 6, 2022, 1606–1616

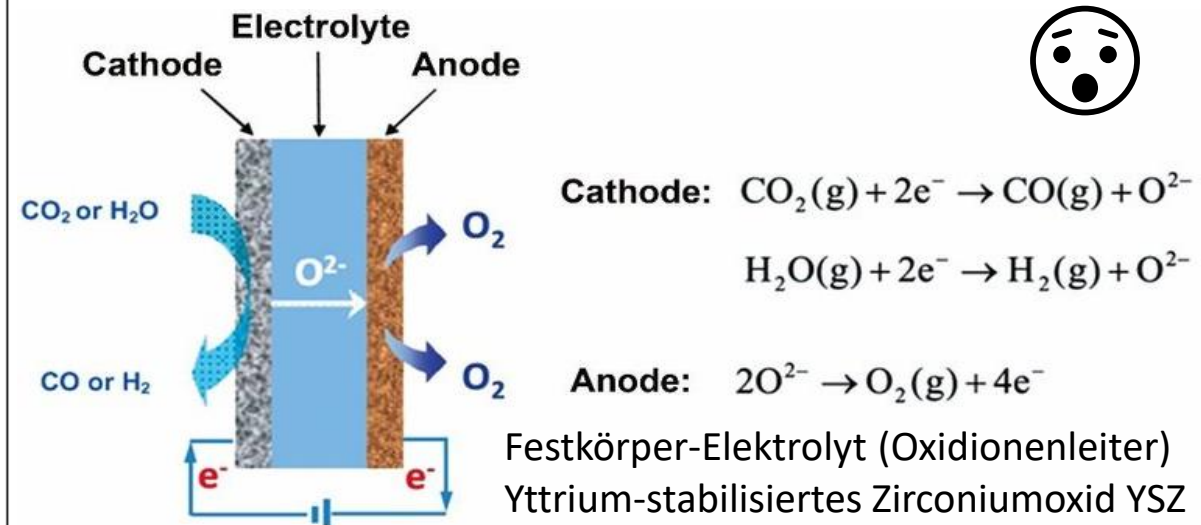


Noch effizienter ist die **Kombination von 850°C & PV-Strom (Sunfire GmbH Dresden)**:

Umkehrung der Hochtemperatur-Brennstoffzelle SOFC zu **Solid Oxide Electrolysis Cells (SOEC)** **GENIAL:** 😊
bis 90% Wirkungsgrad – auch bei H₂O-Dampf-Elektrolyse!



Wo gibt's klimaneutral 850°C Heat in Deutschland: **AKW?!?** 😱



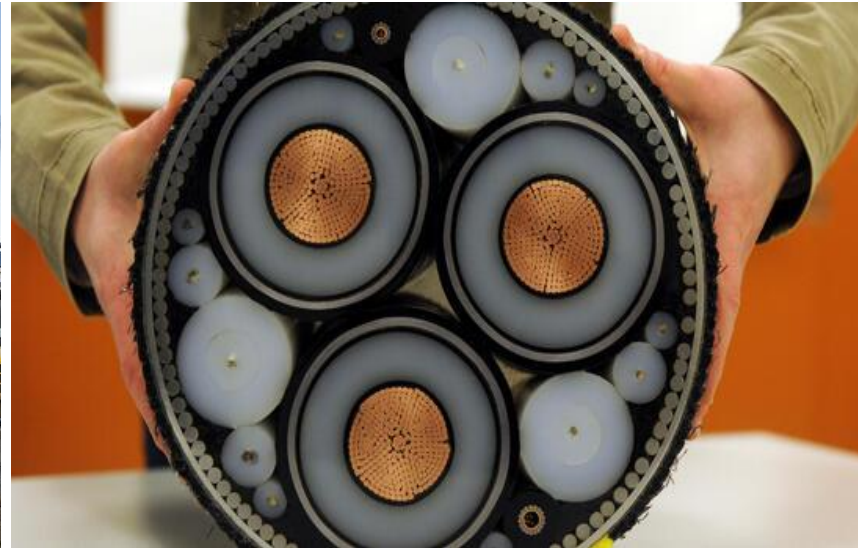
Pumpspeicherkraftwerke PSW in Deutschland und Norwegen

Hydro-PSW – Gesamtleistung und Kapazität Deutschlands: **ca. 15 GW / 40 GWh**

Hocheffizient: 75-85% Wirkungsgrad ohne Strom-Transport, aber Talsperren geographisch ausgeschöpft

AU + CH brauchen PSW für eigenes Geschäft mit D, aber **Norwegen hat Potential von 82.000 GWh!**

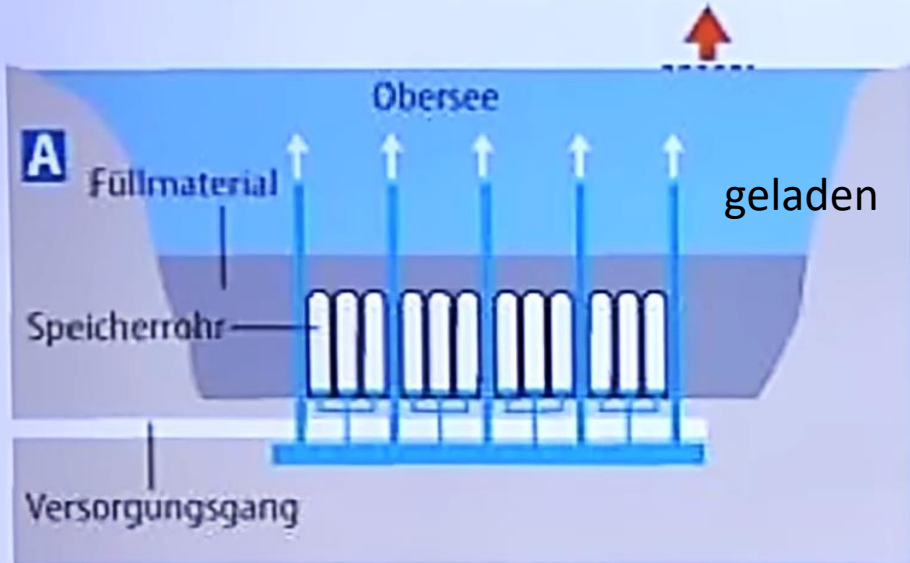
Es gibt bereits zwei Unterseekabel aus Norddeutschland und von offshore-Windparks nach Norwegen mit einer Leistungsaufnahme von 1,4 GW (**NordLink** seit 05/2021) und 0,7 GW (**NorNed** seit 2008).



Problem: Bis zu **50% Gesamtverluste** durch das Produkt der Wirkungsgrade von Pumpen, Generatoren (0,8) x Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Mittelspannungsleitungen (0,9): **0,71 Hin- x 0,71 Rückweg von N = 0,5 Wirkungsgrad, Rest Wärme.**

Quelle: <https://www.management-circle.de/blog/norwegen-energiespeicher-europa/>

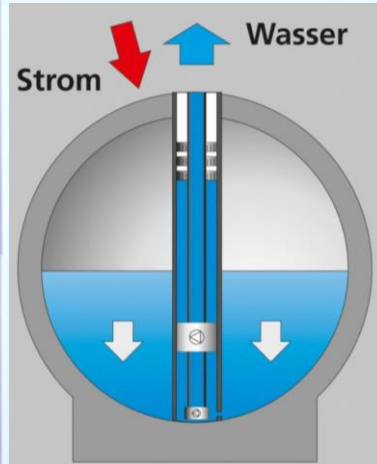
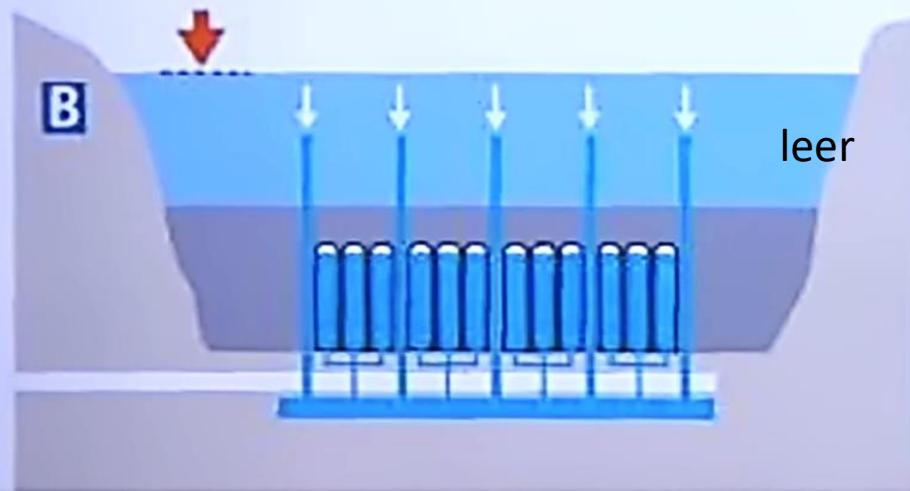
Vom Hambacher Loch zum größten Pumpspeicher Deutschlands



Auch 30-Meter-Betonkugeln am Meeresboden >500 m (50 bar):

Auspumpen zur Energiespeicherung,

Wasser-Einlass und Auslass über Turbine



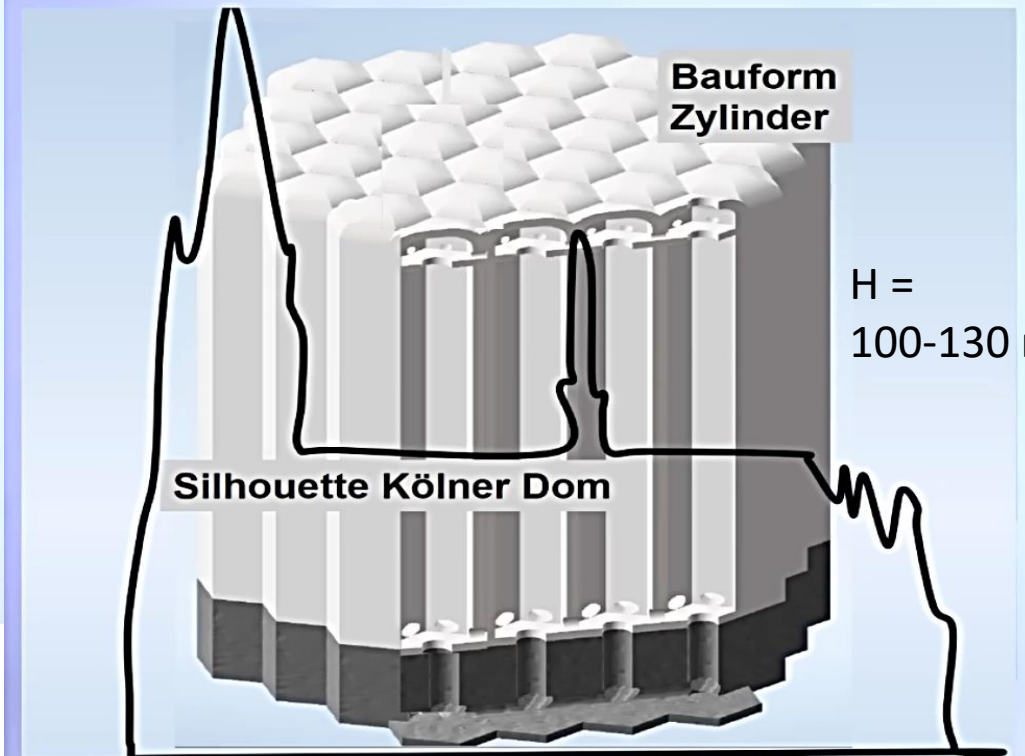
Speicherkapazität 300 GWh (7,5-fach 40 GWh)

Speicherkosten 4-20 Cent/kWh

Klassisches PSW 3-5 Cent/kWh

Baukosten? Baugenehmigung?

Nordsee: 100 Meter in Küstennähe		
Bodensee: mittlere Tiefe 95m,	max.	254 m
Hambacher Tagebau:	max.	411 m



Quellen: Projektskizze SPEICHERSTADT KERPEN vom 20.3.2020
 Zukunftsagentur Rheinisches Revier Prof. Schmidt-Böcking & Luther
 Universität Frankfurt, Institut für Kernphysik, Hochtief AG

Cryogenic Energy Storage (CES) – die „Flüssigluft-Batterie“ (60-70% Eff.)

Luftverflüssiger

- Komprimierung
- Wärmeabfuhr
- Expansion
- Abkühlung der Luft
- Kaskade

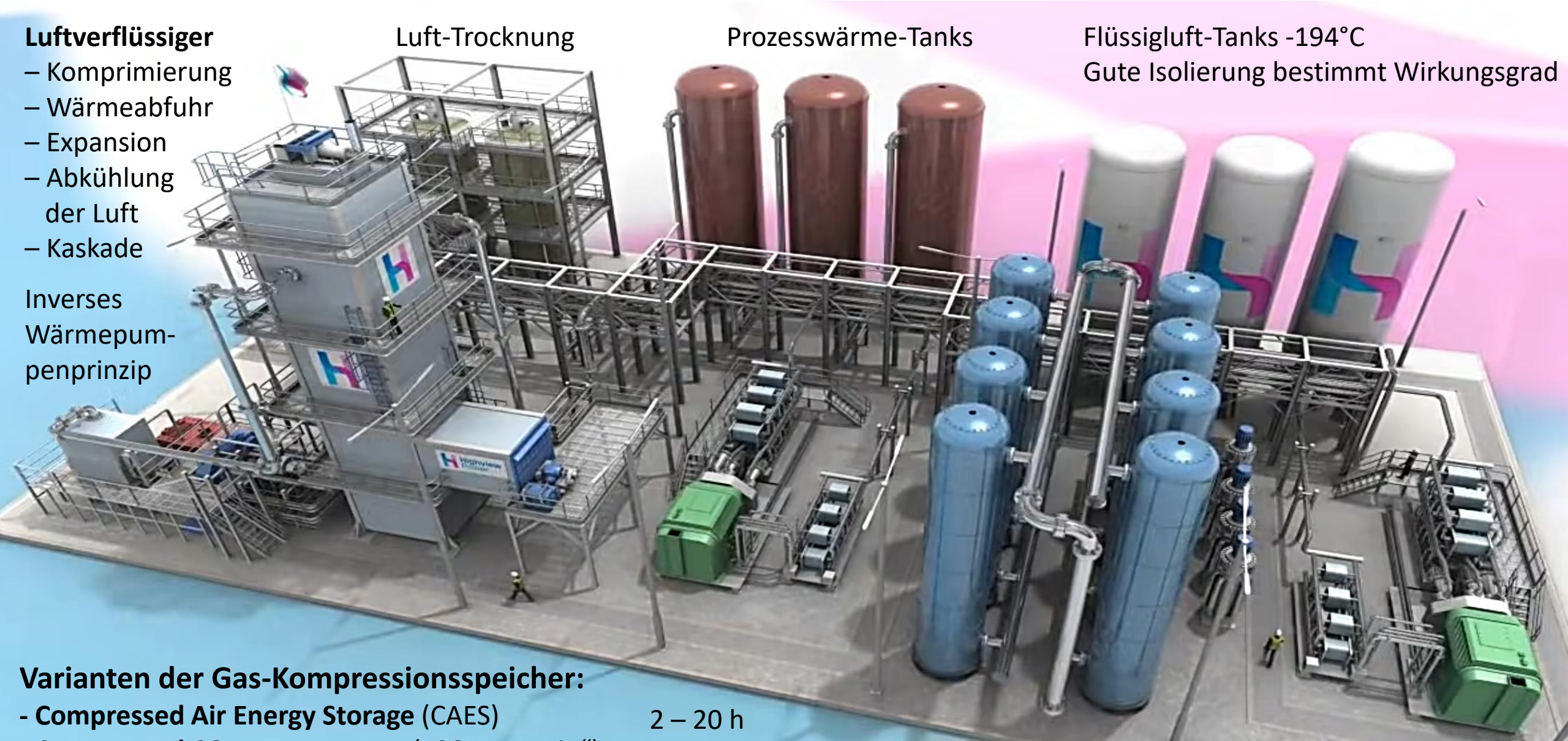
Inverses Wärmepumpenprinzip

Luft-Trocknung

Prozesswärme-Tanks

Flüssigluft-Tanks -194°C

Gute Isolierung bestimmt Wirkungsgrad



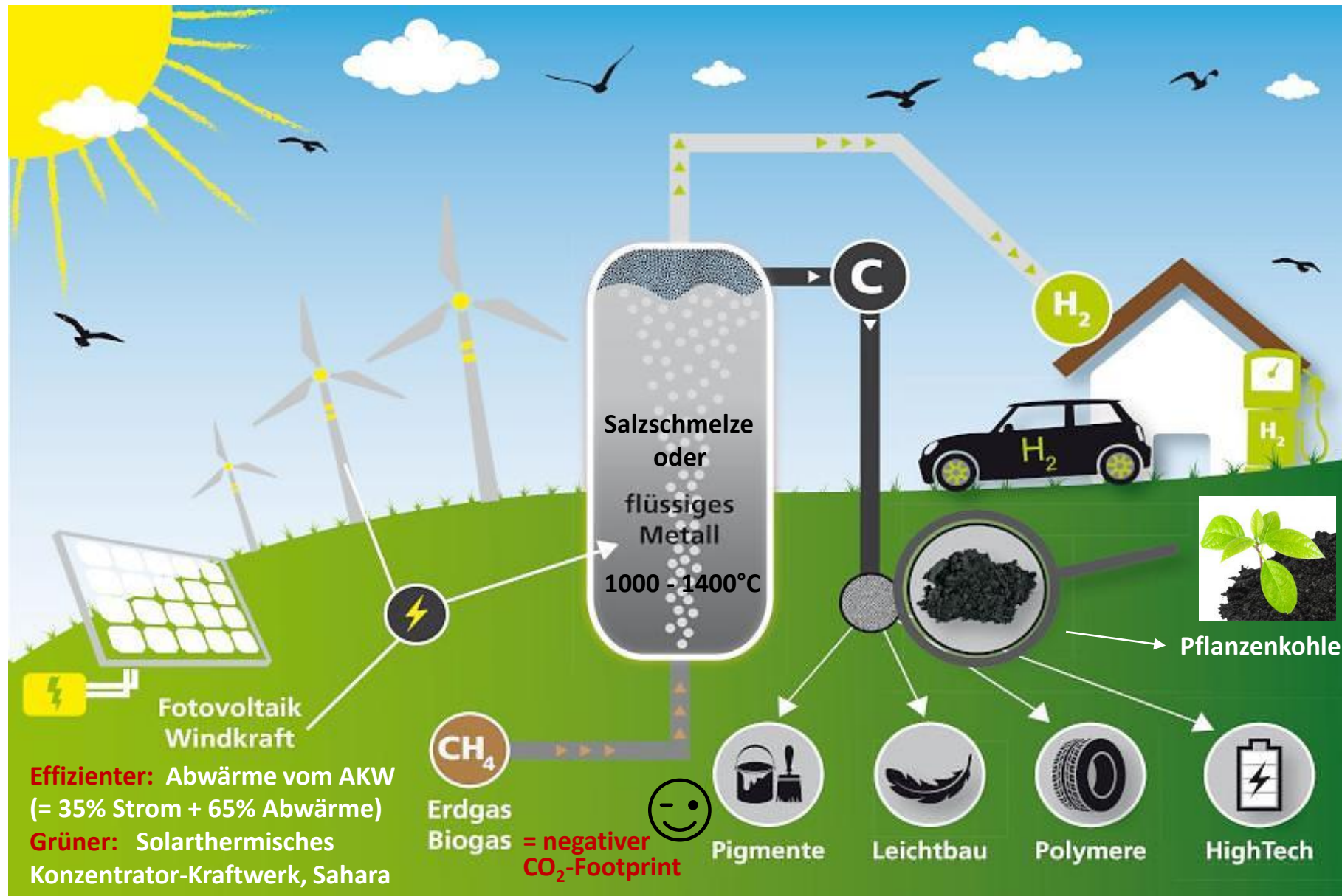
Varianten der Gas-Kompressionspeicher:

- Compressed Air Energy Storage (CAES) 2 – 20 h
- Compressed CO₂ Energy Dome („CO₂ Batterie“) 50-300 MWh

Prozesskälte-Tanks

Verdampferluft-Generator

Speicherung thermischer und elektrischer Energie: Methan-Spaltung CH_4 zu $2 \text{H}_2 + \text{C}$



Methan-Pyrolyse mittels Blasensäulenreaktor zu „türkischem Wasserstoff“

Skizze in Anlehnung an ©Kühner, KIT

Die thermische Spaltung von Methan (Erdgas) $\text{CH}_4 = 2 \text{H}_2 + \text{C}$ bedarf **nur 13% der Energie** wie die elektrolytische Spaltung von Wasser $2 \text{H}_2\text{O} = 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Wirkungsgrad 65%:

Brennwert von CH_4 (100%)
 $= 2 \text{H}_2$ (65%) + C (35%)

Wertschöpfung der Kohlenstoff-Produkte bestimmt

Wirtschaftlichkeit: ab 3 €/kg C

Aus 16 kg CH_4 entstehen 12 kg C

Quelle: *Energies* 2021, 14, 3107.

<https://doi.org/10.3390/en14113107>

Perspektive: Hochtemperatur-Wärmepumpen & Latentwärme-Salzspeicher

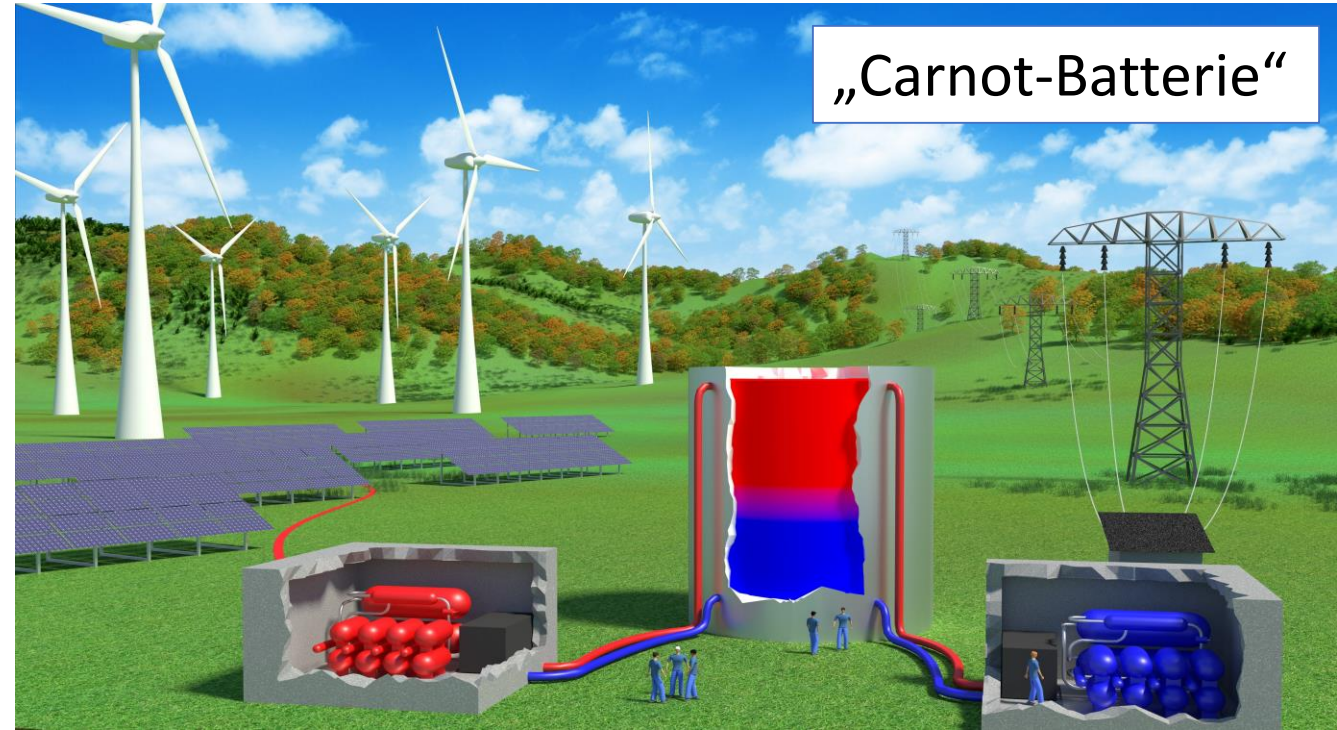


Quelle DLR Stuttgart: Weltrekord $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 300^{\circ}\text{C}$ bei 200 kW Wärmeleistung.

Mit Argon als Arbeitsmedium lassen sich in einer aufwändigen Kaskade auch 400°C erreichen.

Arbeitszahl bislang leider unveröffentlicht.

Relevant für Hochtemperatur-Industrieprozesse.



Latentwärmespeicher nutzen die latente Schmelzwärme beim Phasenübergang fest-flüssig als zusätzliches Wärmereservoir. Beispiel zuhause: **Eisspeicher** mit Smp. 0°C . Beispiel hier:

Flüssigsalzspeicher mit Natriumnitrat Smp. 308°C . Dampf-Restwärme aus Dampfturbine rechts wird in Wärmepumpe links genutzt.

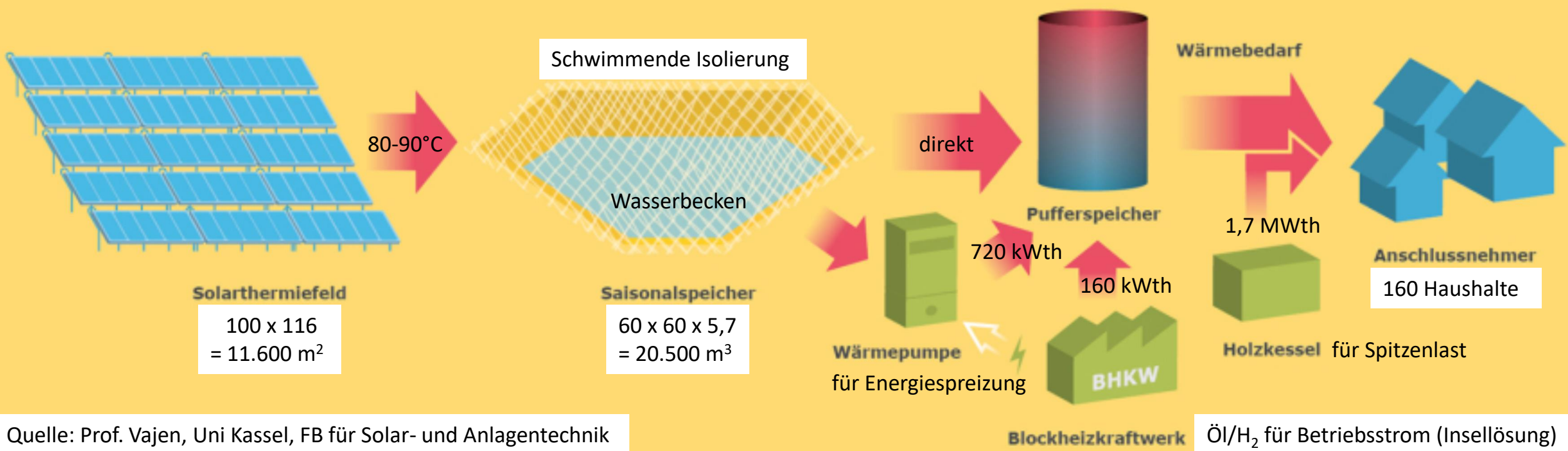
Quelle: Prof. A. Thess, DLR Institut für Technische Thermodynamik.

Niedertemperatur-Saisonspeicher für solarthermische Aufheizung im Sommer: Nahwärmenetz sichert Heizung im Winter mit 80% Solarenergie

Ländliche Energiegenossenschaft Bracht bei Marburg:
<https://www.solarwaerme-bracht.de/>



**Super Sache für Landbewohner:
160 Dorf-Haushalte versorgt!**
....aber wie sieht es mit Wärme- & Stromproduktion in Ballungsräumen für Gewerbe, Industrie und Verkehr **im Winter** aus?



Quelle: Prof. Vajen, Uni Kassel, FB für Solar- und Anlagentechnik

Kann der ehemalige Exportweltmeister in postfossiler Zukunft ohne klimaneutrale AKW international wettbewerbsfähig bleiben?

NEIN sagen die meisten Ökonomen und viele Sozialpolitiker

Nein, weil das IPCC und das EU-Parlament die Renaissance der Kernenergie als nachhaltig einstufen und Deutschlands Sonderweg angesichts steigender CO₂- und Gaspreise sowie höchster Betriebskosten für 150 GW noch zu bauender H₂-ready Gas-Reservekraftwerke sich erst noch als weise erweisen muss.

Nein, weil Diversität klimaneutraler Energiegewinnung wirtschaftlich stärker ist als Konzentration auf nur zwei ausbaufähige, sich ergänzende „Geschlechter“, PV und Wind.

Nein, weil unsere wirtschaftlichen Mitbewerber Frankreich, Großbritannien, Schweden, Finnland, USA, Indien, Südkorea, Japan und China zu viel geringeren Systemkosten klimaneutralen (Atom-)Strom für die Produktion international wettbewerbsfähiger Wirtschaftsgüter verwenden als wir (IEA-Studie).

Nein, weil deutsche Unternehmen bei aller Verantwortung für den Erhalt ihrer Arbeitsplätze und Tarifverpflichtungen sich dort ansiedeln werden, wo wenigstens Strom und Wärmeenergie für eine klimaneutrale Produktion am günstigsten und nicht am teuersten ist, z.B. in Frankreich und USA.

Nein, weil wir die weltweit höchsten Strompreise haben und diese sozialpolitischen Sprengstoff bergen – eine Gefahr für unsere Demokratie und Wirtschaft.

Kann der ehemalige Exportweltmeister in postfossiler Zukunft ohne klimaneutrale AKW international wettbewerbsfähig bleiben?

NEIN sagen die meisten Ökonomen und viele Sozialpolitiker

Nein, weil bei weniger Nachfrage nach fossilen Energieträgern deren Preis sinkt, dadurch deren Verbrauch weltweit nicht fallen, sondern eher steigen wird – das Pariser Abkommen ist leider nicht bindend für alle Menschen.

Nein, weil AKW anders als Erneuerbare neben 35% Strom parallel konkurrenzlos günstig 65% konzentrierte thermische Energie liefern können, die für die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse (SOEC bei 850°C) mit sagenhaften 90% Wirkungsgrad verwendet werden kann. Ohne klimaneutrale Abwärme aus AKW sinkt der Wirkungsgrad in der Flüssigwasser-Elektrolyse auf 70% (PEM bei 50°C).

Nein, weil auch die klimaneutrale Synthese von Energieträgern Ammoniak, Methan, Methanol und Kerosin sowie von Stickstoffdünger und der meisten anderen Chemieprodukte durch abfallreduzierende AKW der 3. und 4. Generation 20% billiger sein wird als mit Erneuerbaren.

Nein, weil Deutschland in einer postfossilen Welt ohne Kernkraftwerke sicher nicht untergeht, wohl aber der Status als viertstärkste Industrie- und Exportnation der Welt, somit unser Sozialstaat derzeitiger Güte.

Kann der ehemalige Exportweltmeister in postfossiler Zukunft ohne klimaneutrale AKW international wettbewerbsfähig bleiben?

JA: Wissenschaftler & Ingenieure bei Einhaltung der **Rahmenbedingungen als Conditio sine qua non!**

Ja, wenn die Erzeugung von Ökostrom um den Faktor 7 in Bezug auf 2022 gesteigert worden ist.

Ja, wenn wir eine verlässliche Überkapazität Ökostrom erzeugen und unsere Tages- und Saison-Speicherkapazität von derzeit 0,04 auf 11 TWh ausgebaut haben (Fraunhofer ISE & Enertrag AG).

Ja, wenn wir der Forderung vom Fraunhofer ISE nachgekommen sind und 100-150 GW Leistungsreserve aus H₂-ready Gaskraftwerken (GuD) garantieren - zur Deckung der Residuallast in 2045: Etwa so viel verlässliche Leistung, wie dann alle onshore Windkraftwerke liefern (zwei Drittel der Windenergie in 2045). Must Do: Deutschlands natürliche Gasspeicher mit Wasserstoff & synthetischem Methan SNG füllen!

Ja, wenn wir bis zu einer Milliarde Euro pro Jahr nachhaltig in Elektrolyseure anlegen würden, statt diese für Phantomstrom aus geförderten, aber zwangsabgeschalteten Wind- und PV-Anlagen sowie für Negativ-Strompreise an der Börse sinnlos zu verschleudern - eindeutig ein SPEICHERPROBLEM!

Kann der ehemalige Exportweltmeister in postfossiler Zukunft ohne klimaneutrale AKW international wettbewerbsfähig bleiben?

JA: Wissenschaftler & Ingenieure bei Einhaltung der **Rahmenbedingungen als Conditio sine qua non!**

Ja, wenn wir >2.000 Milliarden Euro erfolgreich investiert haben in neue Ökostromnetze und Ladestationen, in Ökostrom-Wasserstoff-Energie-Cluster und in neue Nah- und Fernwärmenetze für die häusliche Verwertung der gesammelten „Restwärme“ aller Energieumwandlungsschritte.

Ja, wenn unser intrinsischer Mangel an Autarkie durch Import von 30-40% Grüner Energie (Power-to-X Produkte) aus diversen Drittstaaten abgesichert ist - derzeit sind es unter 0,5 %.

Ja, wenn wir unseren Gasspeicher in Rheden mit SNG statt LNG füllen können: Synthetischem Methan, statt mit klimaschädlich verflüssigtem und bei -162°C verschifften Fracking-Erdgas aus Nordamerika.

Ja, wenn wir 100.000 Studierende der anstrengenden MINT-Fächer mehr hätten als heute, die unsere fundamentalen Probleme der klimafreundlichen Gewinnung und Speicherung grüner Energie und digitaler Daten in Zukunft lösen könnten.

Appell an unsere Politiker – egal welcher demokratischen Partei

Es gab viele **klimafreundliche Technologie-Innovationen basierend auf deutschen Erfindungen:**

- bei Photovoltaik, Wind- und Kernenergie
- bei Transrapid, Carbon-Capture-Sequestrierung (CCS) und genialen Pumpspeichern.

In allen Bereichen wurde **politisch bedingt** unser **Wissensvorsprung nicht in wirtschaftliche Stärke umgesetzt**. Patente wurden ins Ausland verscherbelt, Produktion wurde stillgelegt und wanderte in andere Länder ab – wir sind **erfinderisch, aber nicht clever** wie andere:
Deutschlands **Steuersubventionen fördern überwiegend außereuropäische Unternehmen!**

Nun gilt es, mit einem „Dreifach-Wumms“ richtig darauf zu reagieren und den Kurs zu korrigieren:

Bringen Sie mit den kostengünstigsten und zugleich klimaneutralen Gewinnungsmethoden unseren Strompreis auf ein international kompetitives Maß runter, um unseren Wohlstand und wirtschaftliche Stärke, somit unseren geschätzten Sozialstaat zu bewahren!

Appell an unsere Politiker – egal welcher demokratischen Partei

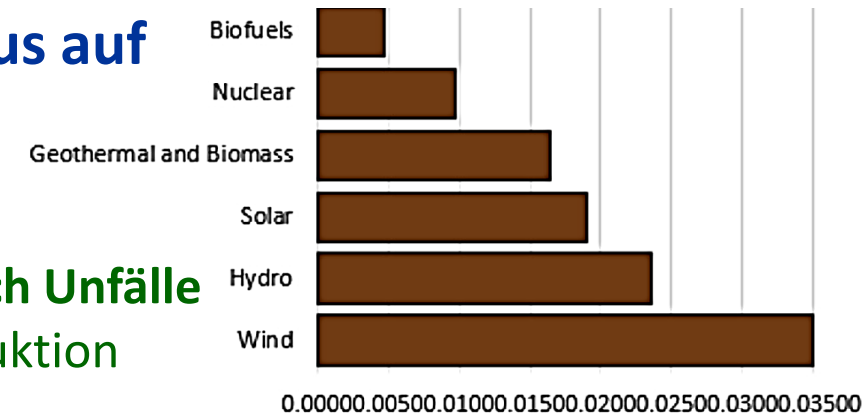
Wenn Erdgas als ursprünglich geplante Brückentechnologie langfristig allein schon aus ökonomischen Gründen ausfällt, so **lasst doch bitte die Kohle in der Erde!**

Setzt wie auch in anderen gesellschaftlich wichtigen Bereichen, so auch bei der Energieversorgung auf **Diversität ...der Technologien mit Fokus auf**

- Klimaneutralität
- Bezahlbarkeit / Wettbewerbsfähigkeit
- Sicherheit #



Todesfälle durch Unfälle
pro TWh Produktion



also auf PV-, Wind- und Kernenergie# letztere als grundlastfähige Übergangstechnologie, bis der bislang **vernachlässigte Speicherausbau** den endgültigen **AKW-Ausstieg möglich** macht!

#**Quelle (open access):** Sovacool *et al.*, Balancing safety with sustainability: assessing the risk of accidents for modern low-carbon energy systems, *Journal of Cleaner Production* 112 (2016) 3952-3965.

Scharfe Analysen von **Ulrike Herrmann**,

- führende Wirtschaftsjournalistin der TAZ
- derzeit ruht ihre Parteimitgliedschaft bei den GRÜNEN



Vor dem Hintergrund unserer brummenden deutschen Wirtschaftsleistung:
„Eine Stunde Blackout kostet Deutschland eine Milliarde Euro“

Vor dem Hintergrund der Zukunft unserer Wirtschaft:
„Es gibt kein Grünes Wirtschaftswachstum!“

Vor dem Hintergrund der Klimagerechtigkeit:
Wohlstand muss zukünftig anders definiert werden!
Unser materieller Wohlstand muss schrumpfen, damit der anderer wachsen kann.

Gretchenfrage: Wie hast du's mit der AKW-Laufzeitverlängerung?

„Nun sag, wie hast du's mit der Religion?“

Goethe: Gretchen an Faust

„Wer in Glaubenssachen den Verstand befragt, kriegt unchristliche Antworten!“

Wilhelm Busch

Bevor wir uns eine Meinung bilden, sollten wir rechnerisch belegbare Fakten ergebnisoffen analysieren und in einen konstruktiven Dialog mit Andersdenkenden eintreten – schon die Weisen unter den Römern bestanden darauf:

„Audiatur et altera pars“ (Lasst uns auch die andere Seite hören).

Seneca