Energieeffizienz-Forum Heuchelheim (HENEF)

Willkommen zum Präsenz- und Online-Vortrag:

Mi 22.03.2023, 19:00 h, Mehrweckgebäude der Gemeinde Heuchelheim

» Neue Speicher für die Energie-Wende «

- Ökostrom heute:
  Günstige und nachhaltige Produktion, aber teure Speicherung
- Gesamtüberblick über die derzeitige Energielandschaft
- Der Weg zur Klimaneutralität –
  mit Speichern auf privater und kommunaler Ebene
- Welche Perspektiven haben wir, die Systemkosten (Vollkosten) der Energiewende Deutschlands durch Anwendung von Chemie zu senken?

Referent: Professor Dr. **Jörg Sundermeyer**

Philipps-Universität Marburg - Fachbereich Chemie

INTRO

Philipps Universität Marburg

Chemistry Department
Prof. Dr. Jörg Sundermeyer

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**

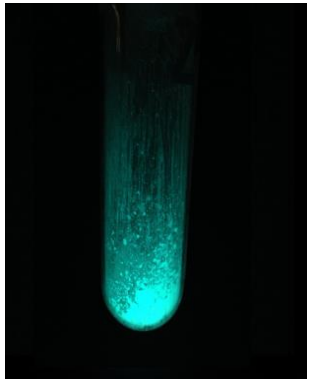
$Ga(CH_3)_3 + NH_3 = GaN + 3\ CH_4$

$In(CH_3)_3 + NH_3 = InN + 3\ CH_4$

OLED Emitter Materialien

$[Cu(PPh_3)tpym]BF_4$

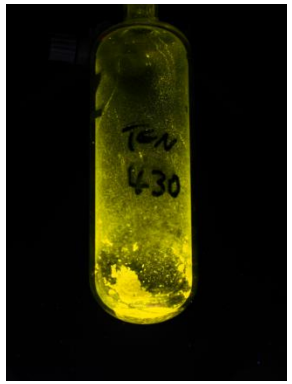
$[Cu(AsPh_3)tpypo]PF_6$



$[Cu(\mu\text{-}I)(Me_2HpzPPh_3)]_2$

$[Cu(\mu\text{-}I)(Me_3pzPPh_3)]_2$

$[Cu(\mu\text{-}I)(tpya)]_2$



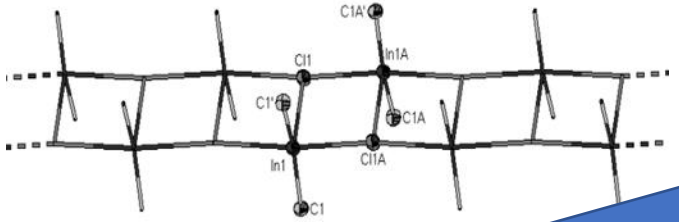
[CuI(tpym)]

[CuI(tpypo)]

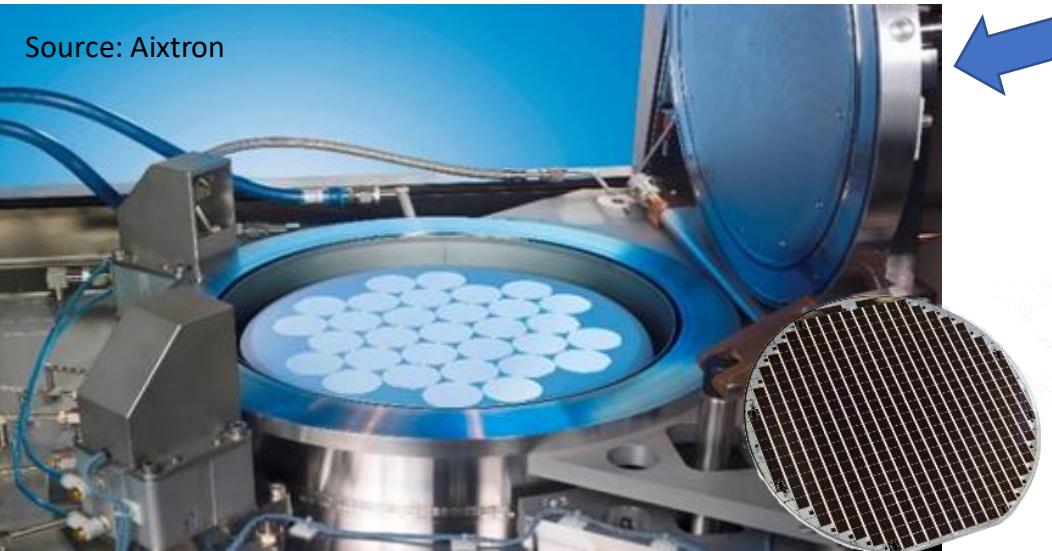
[CuCl(tpypo)]

III-V-Halbleiter Wafer Herstellung für PV

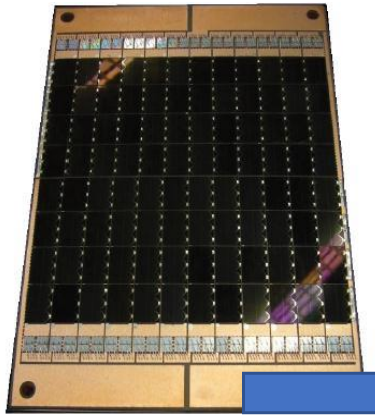
Source: Uni Marburg

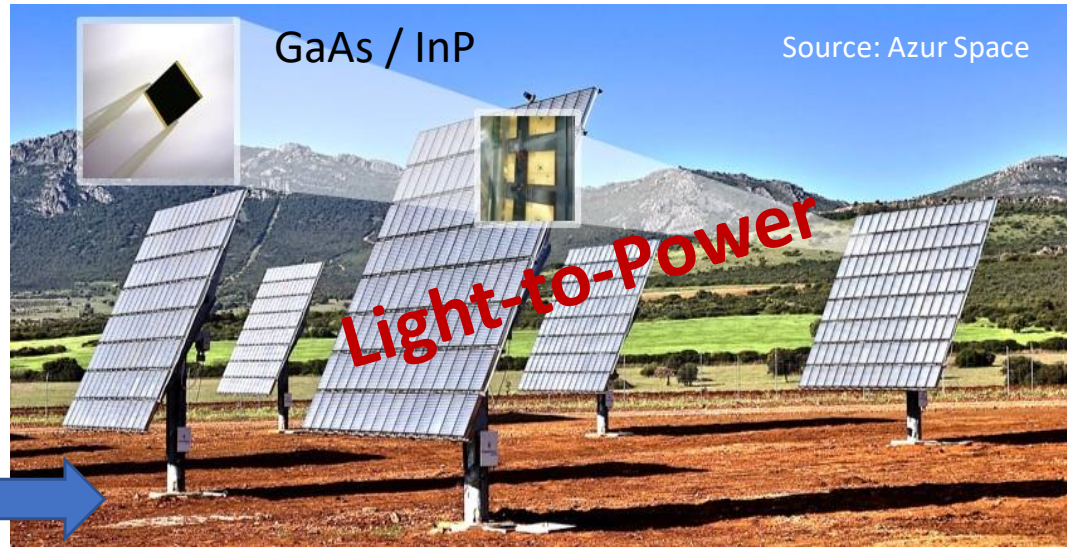


Source: UMICORE Hanau



Source: Aixtron





Source: Azur Space

Genussvolles Wohnen im Holzhaus, im nachhaltigsten aller CO_2-Speicher mit einer Top-Wärmedämmung

34 Module TrinaSolar
Vertex S Black Glas-Folie
monokristallin 400 ± 5 W
45° SSO, 13,6 kWp,
20,8% conv. efficiency
12,8 kWh BYD LFP Akku
10 kW Kostal Plenticore plus 10

Netzdienlicher Beitrag zur Energiewende:

65 m² / 13,6 kWp PV, max.10 kWp Wechelrichter (19.000 €)

13 kWh LFP-Batteriespeicher (7.690 €) nach Förderung
mit 6,5 kW Lade/Entladeleistung (Preisniveau 2023).

Strom aus dem Akku ist so teuer wie Strom aus dem Netz:
Batterie-Speichernutzung kostet bei 15 Jahren Nutzungszeit
Ideal: 0,19 €/kWh bei ∅ ± **12 kWh/24h-**Speicherperiode
Real: 0,37 €/kWh bei ∅ ± **6 kWh/24h-**Speicherperiode p.a.
→ 2,20 Euro pro 6 kWh, die in **24 h** ein/ausgeladen werden
→ 4,40 Euro pro 6 kWh, die in **48 h** ein/ausgeladen werden
→ 22,0 Euro pro 6 kWh, die 10 Tage „aufgehoben“ werden!

8 kW LW-Wärmepumpe mit Wärmespeicher **(20.215 € nach Förd.)**

Intelligente Wallbox für dynamisches PV-Laden **(2.570 €)**

Umstieg vom geleasten Hybrid- auf reines **Elektroauto (BEV)**

51.901 € nach Förderung ohne BEV ...ein Hobby für Wohlhabende?
Ein Anpruch! ...ohne damit je Energie-Autarkie zu erreichen!

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 CO_2-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 – falls wir endlich in **Erneuerbare Energie-Speicherung investieren!**

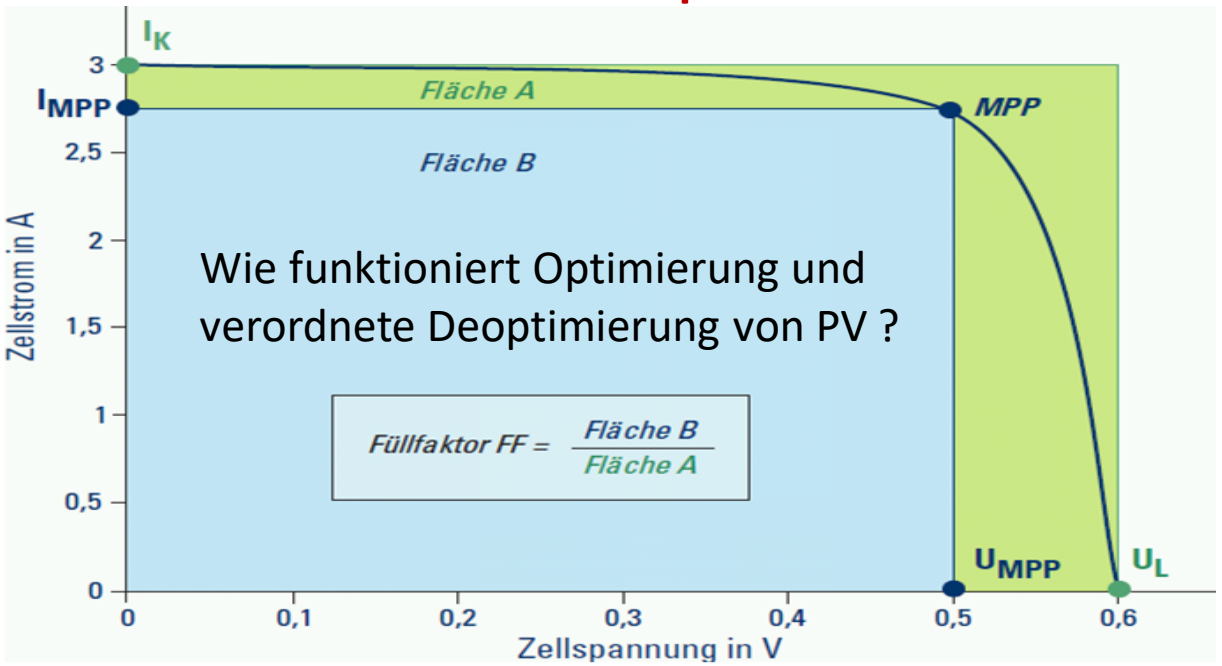
Wie könnte der **Beitrag der Stadtbürger und Mieter** für die Energiewende aussehen? Soziale Partizipation an Fördermaßnahmen? Beteiligung an Bürger-Energieparks und kommunalen Speicherprojekten?

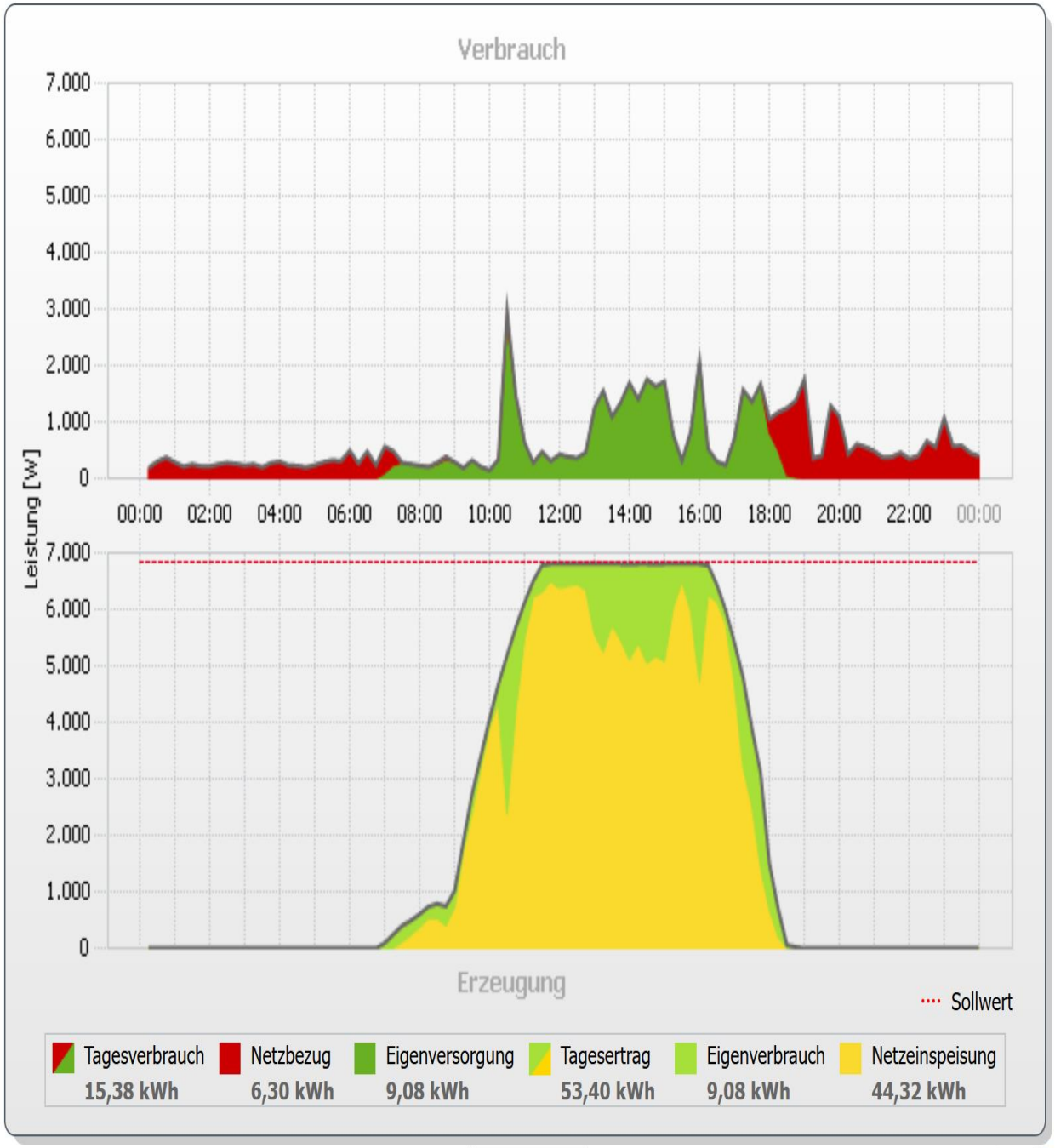
Autarkie? Nie ohne Reserve und Speicher! ….aber der beste **Batteriespeicher ist und bleibt ein Tagesspeicher** – er rettet den PV-Strom aus dem Sommer nicht in den Winter! In den 4 Monaten November bis Februar produziert die PV-Anlage nur 10 % ihres Jahresertrags, aber gerade in diesen 4 Monaten werden 90% der Strommenge von der Wärmepumpe angefordert! → **kommunale Wasserstoffspeicher**

Typisches PV-Tagesprofil in Marburg von März bis Oktober

9,8 kWp PV-Anlage Ausrichtung Südwest 45° mit nahezu täglicher **Abregelung(!) bei 70 % Leistungs-spitze** – falls nicht gerade ein E-Auto mittags zuhause läd.

5-10 % der potentiell produzierbaren Strommenge [kWh] (= Fläche **Phantomstrom-Kappe** = Leistung x Zeit) gehen verloren, **weil die Wasserstoff-Modellkommune Marburg NICHT in Wasserstoff-Saisonspeicher investiert** hat!

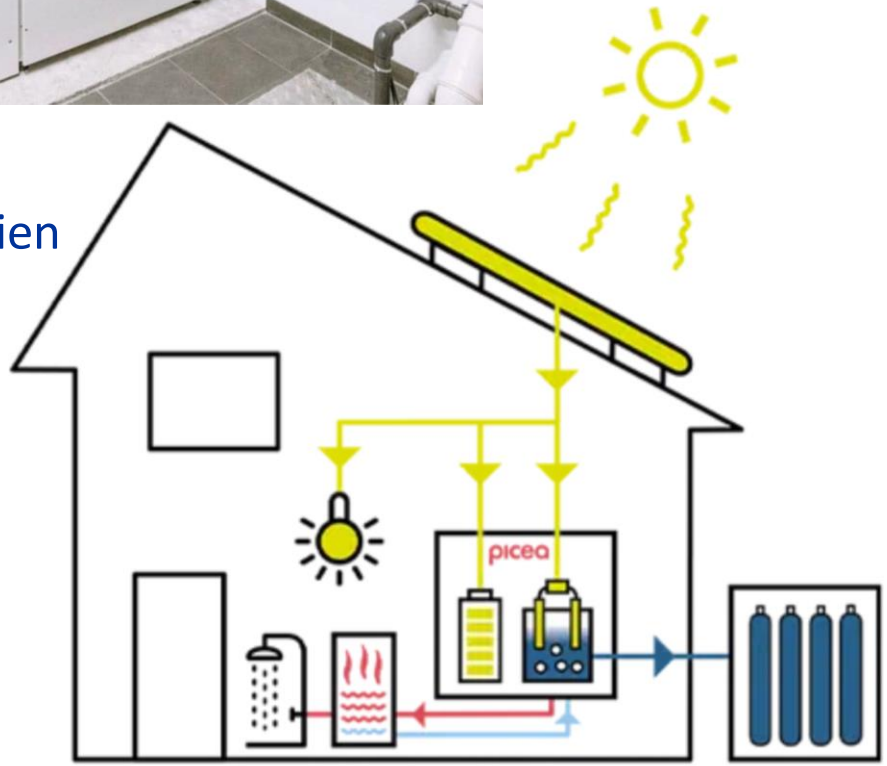


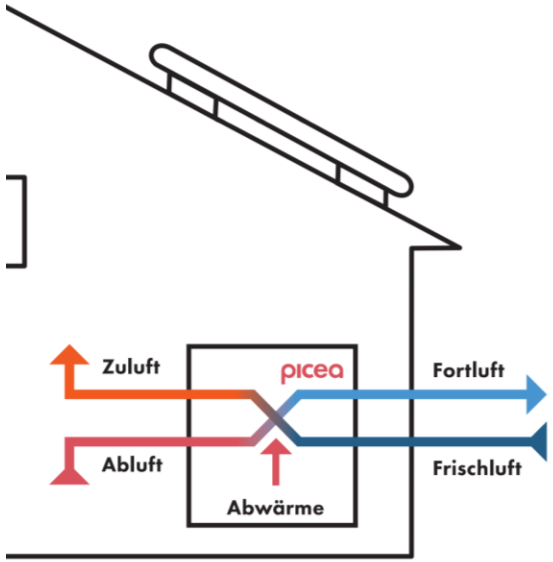


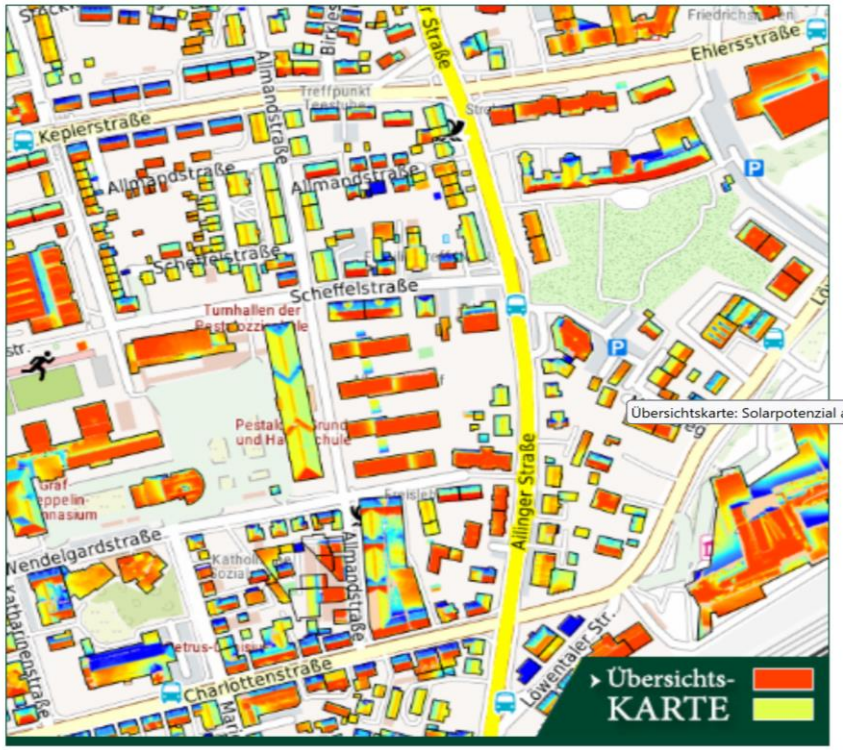
Bereits im März: 18.03.2022

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







Prof. Martina Klärle, Umwelt-Geoinformatikerin & Präsidentin der Dualen Hochschule Baden-Württemberg, Schöpferin des Marburger Solarkatasters und ehemalige Geschäftsführerin der Hessischen Landgesellschaft HLG, Konzeptentwicklerin für Plus-Energie-Siedlungen, könnte mit Satelliten- und KI-gestützter geodätischer Software den **Masterplan Energie für Marburg** erstellen, sie legt dar:

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 inklusive Industrie und Gewerbe mit Solarstrom!**

Voraussetzung: Ökostrom-Speicherkapazitäten werden parallel aufgebaut!

Quellen: 1) Erneuerbare Energien Atlas der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflaechen/pv-potenziale-auf-gebietsebene
2) www.kontextwochenzeitung.de/gesellschaft/585/wir-schaffen-die-energiewende-8250.html (Interview-Podcast).

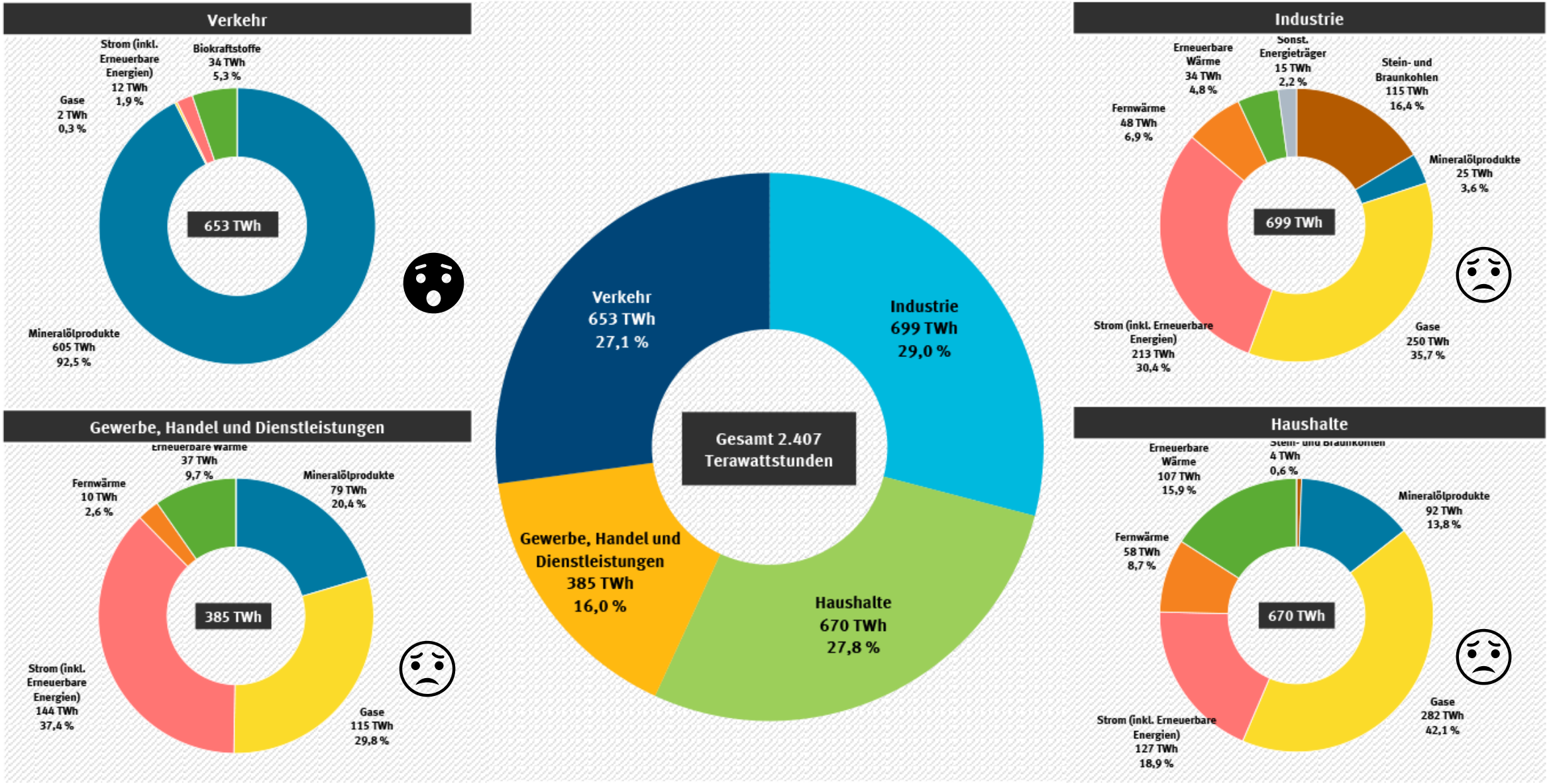
Unabhängige Studien - gleiches Ergebnis:

Perfekt zur Vermeidung von Naturflächenfraß

Eggers et al. PV-Ausbauerfordernisse versus Gebäudepotenzial:
Ergebnis einer **gebäudescharfen Analyse für ganz Deutschland**, 35. PV-Symposium, ISBN 978-3-948176-09-9, September 2020.
In Deutschland stehen ca. 40 Millionen Gebäude, deren Gebäudehüllen und Dächer ein **technisches PV-Potenzial** in der Größenordnung von **1.000 GWp** bieten. Diese Analyse berücksichtigt als PV-geeignet nur größere, keine kleinteiligen Flächen, die einer durchschnittlichen **solaren Strahlungsdichte von >500 kWh/m² (maximal 1.000 in D) im Jahr** ausgesetzt sind, folglich einen Jahresertrag >100 kWh/m² (maximal 200) erwarten lassen.

www.enercity.de/magazin/unsere-welt/studie-weltweites-pv-potenzial
Erste Berechnung zum **weltweiten Dach-PV-Potenzial**: 130 Millionen Quadratmeter der globalen Landoberfläche wurden mittels KI für die Studie kartiert und 200.000 Quadratkilometer Dachflächen dabei als für Solaranlagen-geeignet identifiziert.
Ergebnis: Nicht nur **Deutschland mit 2.344 Quadratkilometer PV-geeigneter Dachfläche**, sondern die ganze Welt lässt sich mit Solarstrom vom Dach versorgen, falls die **Strom-Überproduktion im Sommer in Wasserstoff-Speichern für den Winter gespeichert** wird.

Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren und Energieträgern



Quelle: Umweltbundesamt UBA

Reduzierung des Endenergieverbrauches um 21% seit 1990

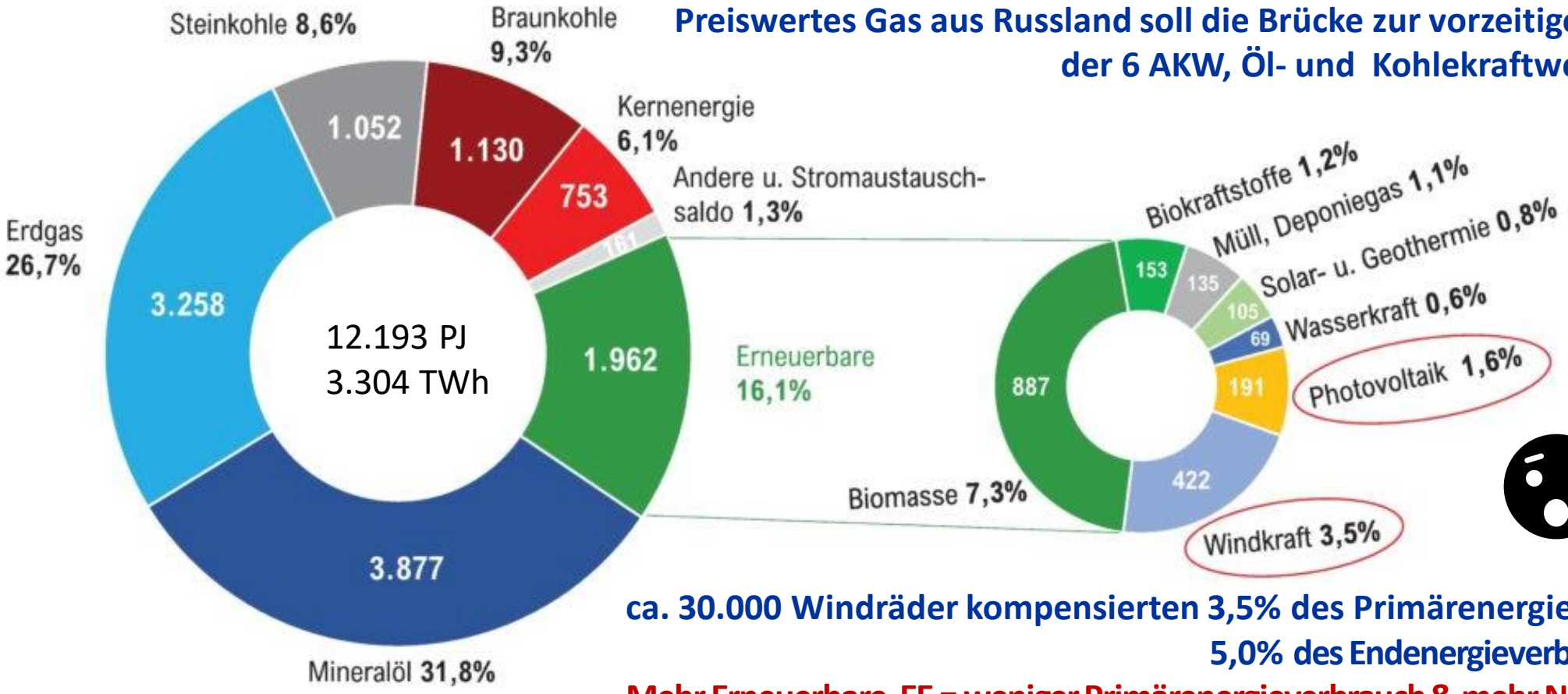
Primärenergieverbrauch in Deutschland 2021: 12.193 PJ (1.000 PJ = 0,278 PWh)

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

Endenergieverbrauch Deutschland 2021: 8.665 PJ (70%) 30% Verlust durch Wandlung & Transport

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

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

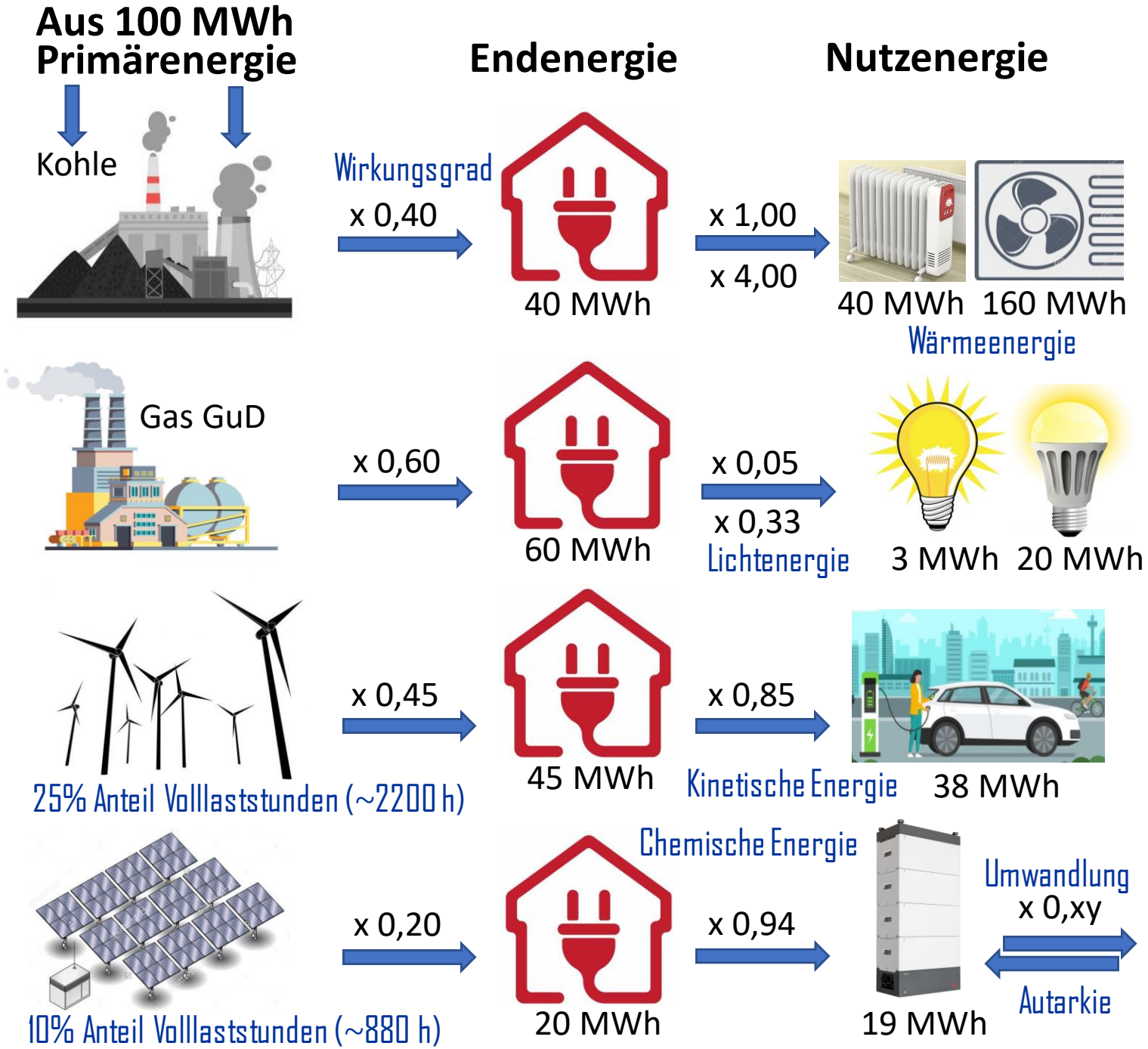


ca. 30.000 Windräder kompensierten 3,5% des Primärenergieverbrauches, aber 5,0% des Endenergieverbrauches

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



Systemkosten (Vollkosten)

- Klimawandel-Folgen
- Klimawandel-Anpassung
- Feinstaubbelastung, Emissionen
- Reservekraftwerke teuer & ineffizient

Verluste an Nutzenergie durch:

Elektrochemische Speicherung:

- Batterien (0,75…0,95 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 (0,64), E-Fuel Kerosin (0,35)
- Lagerbare **Energiestoffe X** als **Saisonspeicher**
- Strom-Wasserstoff-Brennstoffzelle-Strom (0,30)

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?

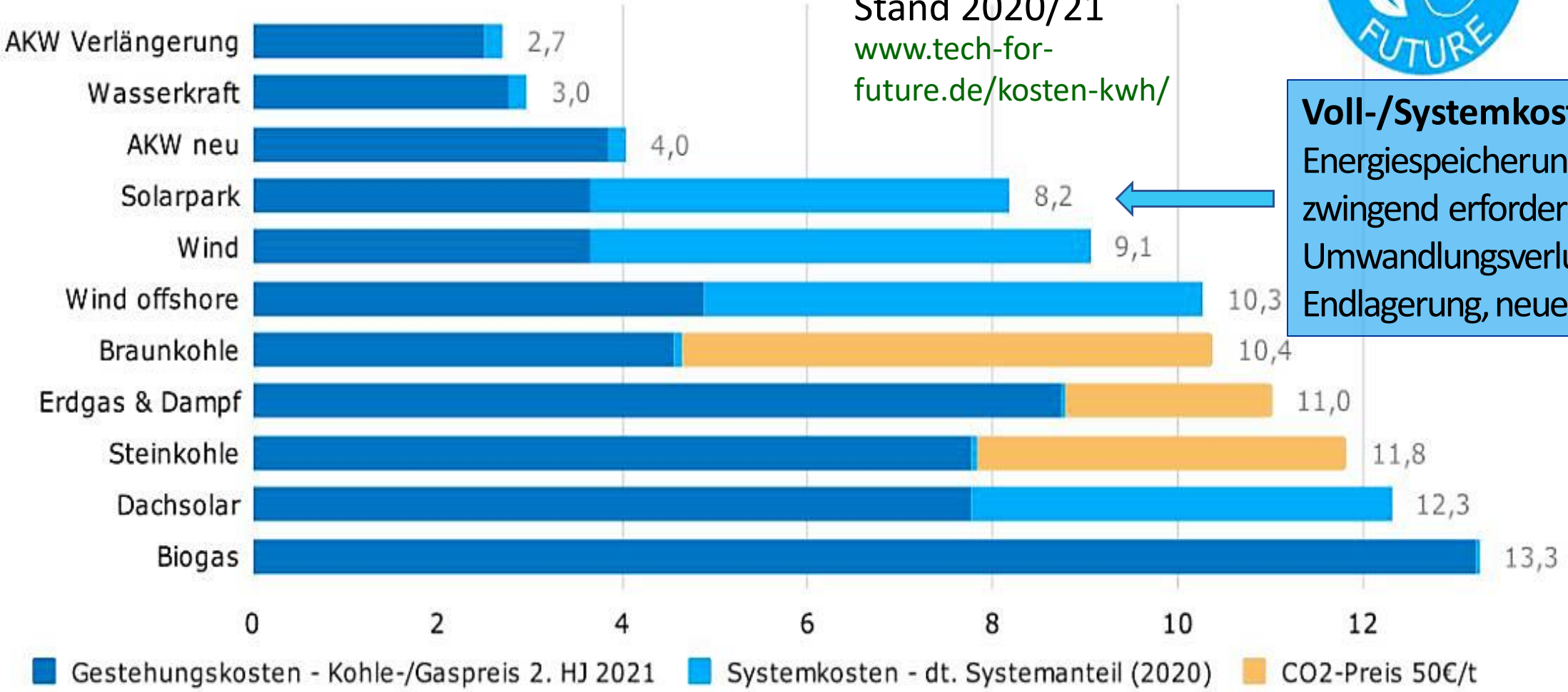
Bei fossilen und nuklearen Kraftwerken erfolgt die kostengünstige Energiespeicherung **vor Umwandlung der Brennstoffe in Strom und nicht teuer danach! → Vollkosten**

in €Cent pro kWh_{el} für ausschließlich deutsche/mitteleuropäische Erzeuger

sub-ventions-bereinigt

Stand 2020/21

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



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

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

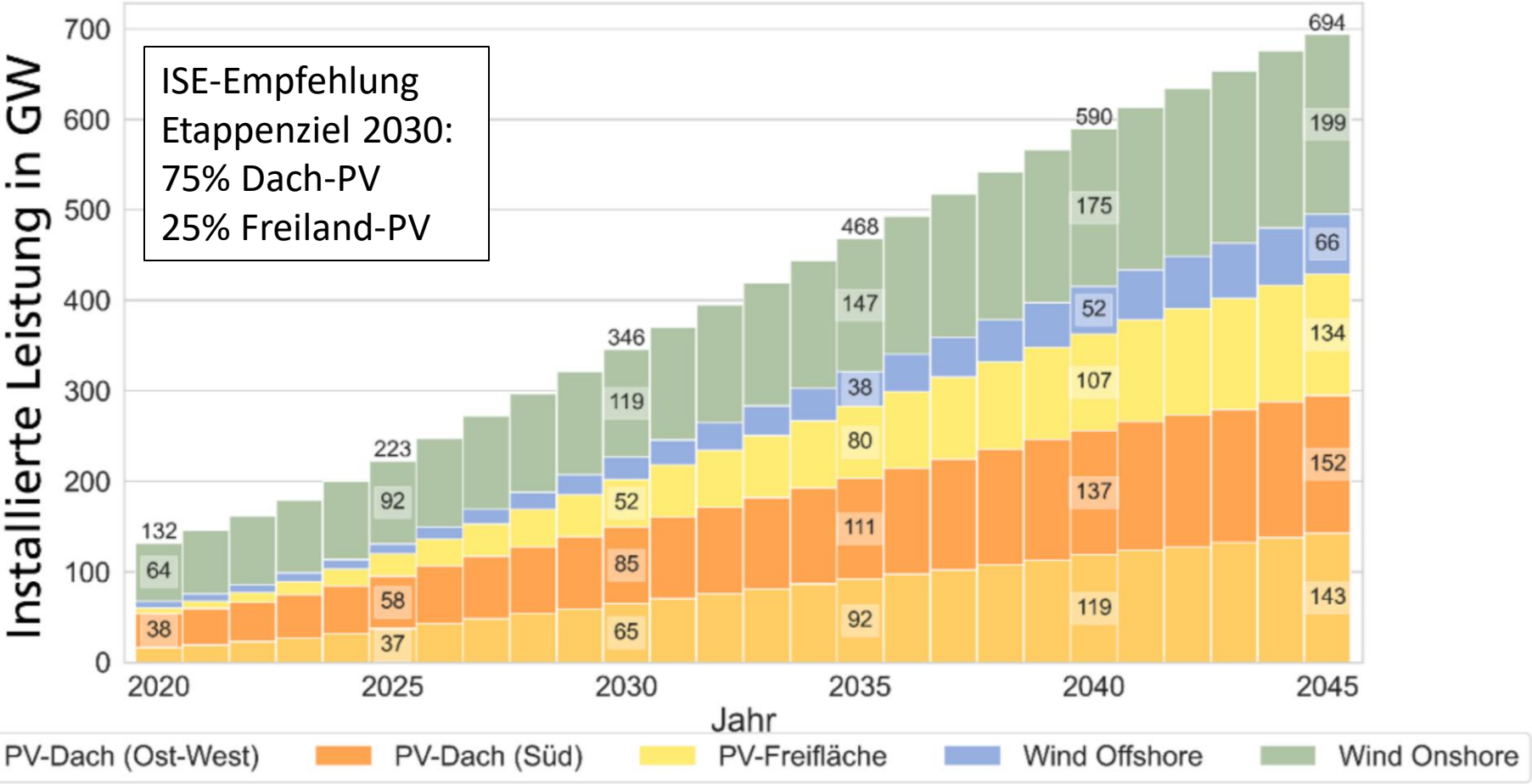
Stromerzeugungsbedarf auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045

Zielempfehlung der Wissenschaft

Ausbaubedarf 2045 bei einem AKW-Stopp in Deutschland:
Steigerung der Erneuerbaren um **Faktor 5-6** im Vergleich zu 2020
Absolute Anteile 2045: PV : Wind = 60 : 40 der installierten Nennleistung

Relative Anteile 2045:

Wind Onshore	75%
Wind Offshore	25%
PV-Freifläche	30%
PV-Dach Süd	30%
PV-Dach OstWest	40%



Quelle 1: Fraunhofer ISE 2021
https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html

Quelle 2: Fraunhofer ISE 2022 „Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerkstandorten“

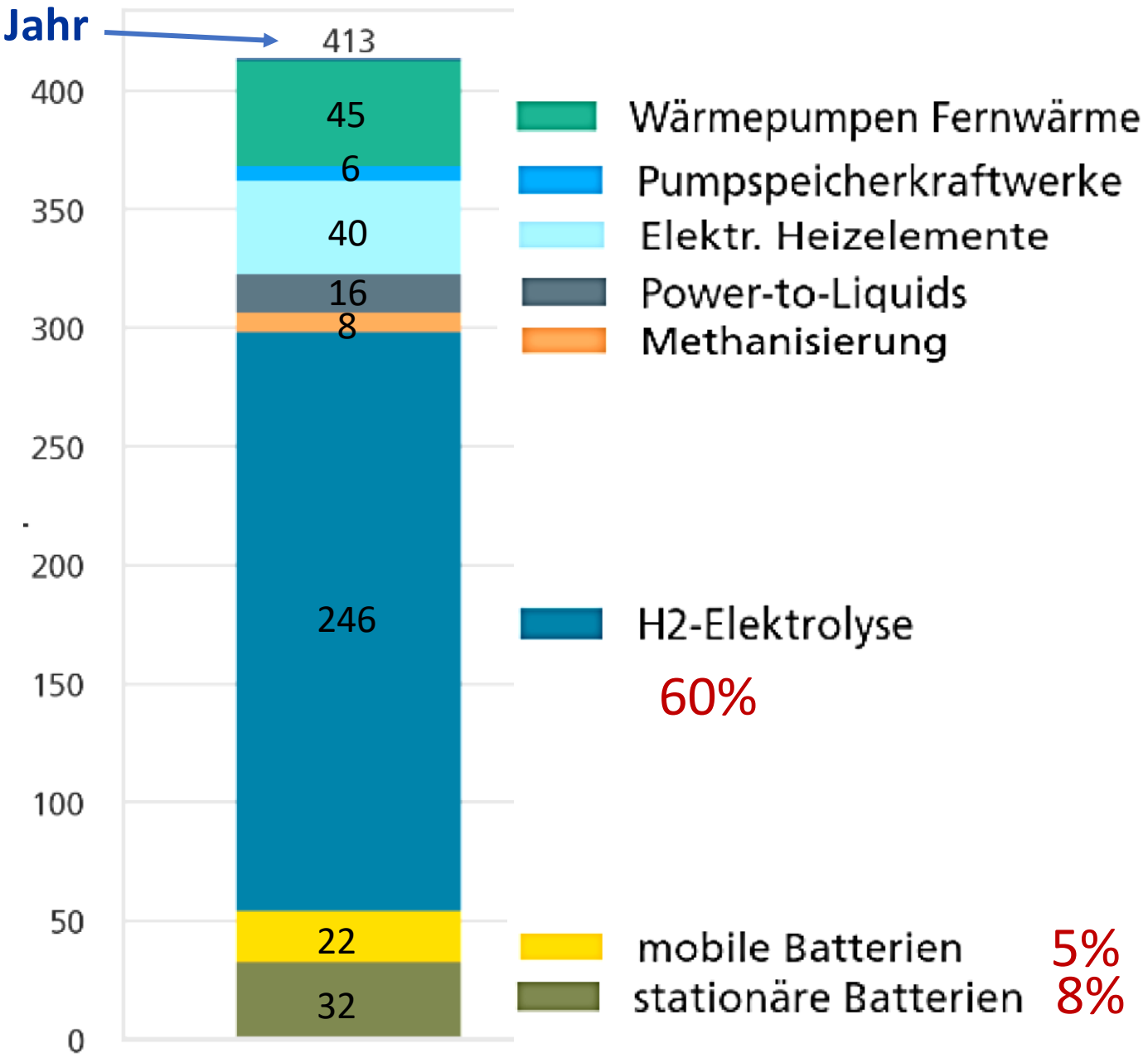
Stromspeicherbedarf im Jahresschnitt 2041-2045 & Strom-Flexibilitätsbedarf

Stromspeicherbedarf: 11 TWh
Stromspeicherangebot (2020):
0,04 TWh alle Pumpspeicher
0,000116 TWh alle Batteriespeicher

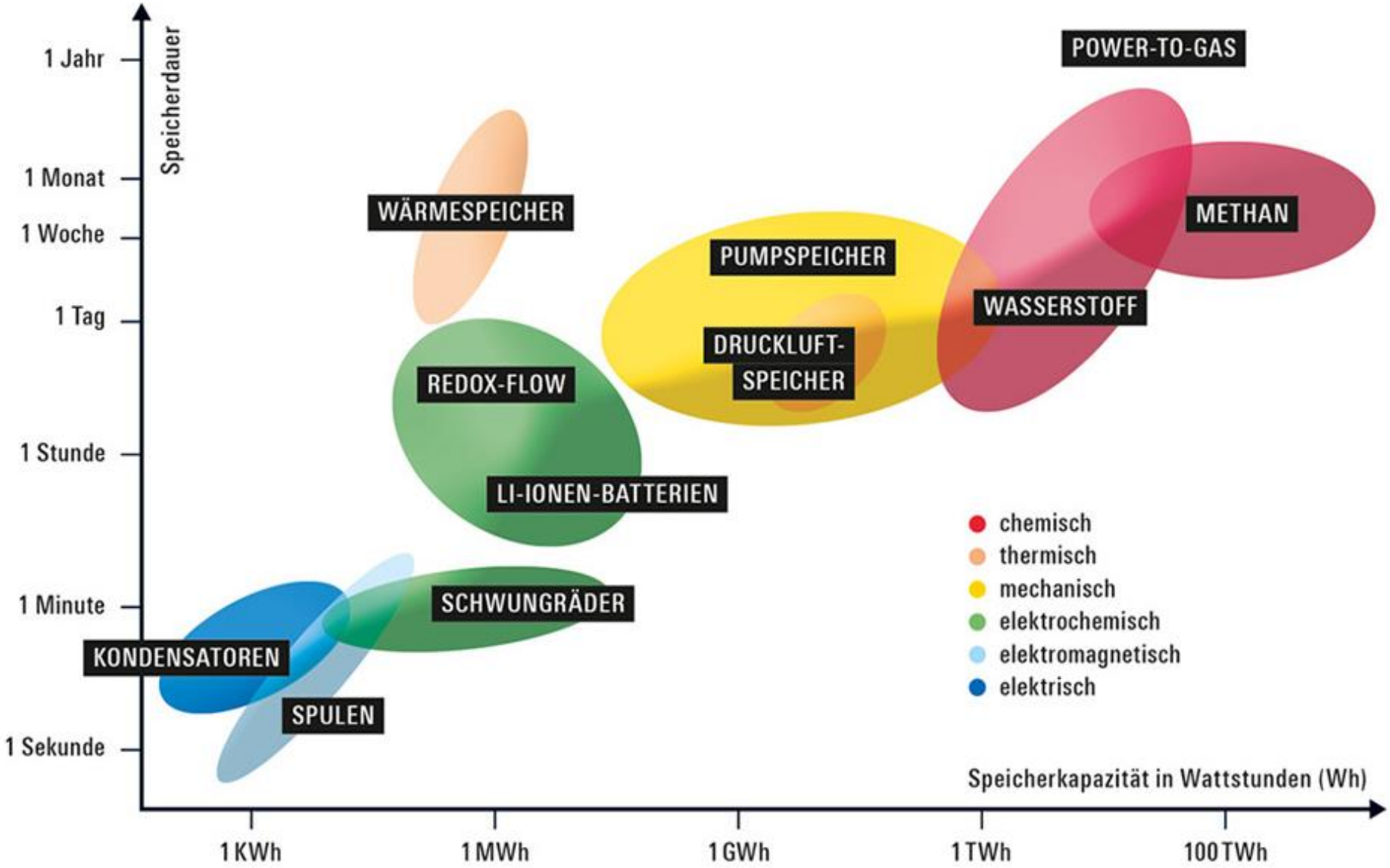
Speicherbedarf: 104 GW (2030)
in Leistung 180 GW (2045)
Speicherangebot: 15 GW (2020)

Krasser Speicher-Mangel im Energiewende-Musterland!

Quellen: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
ISE 2021: „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“
ISE 2022: „Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerkstandorten“
www.spektrum.de/ video/die-wahrheit-ueber-erneuerbare-energien/2074593



Typen: Energiespeicher in Abhängigkeit von Speicherdauer und Speicherkapazität



Strommenge
10 MWh = 10 Windräder (4 MWp) von 1 MW Durchschnittsleistung x 1h
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 MWp Nennleistung
= 1,25 MW erzeugte Durchschnittsleistung x 24 h = 30 MWh pro Tag & Nacht

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

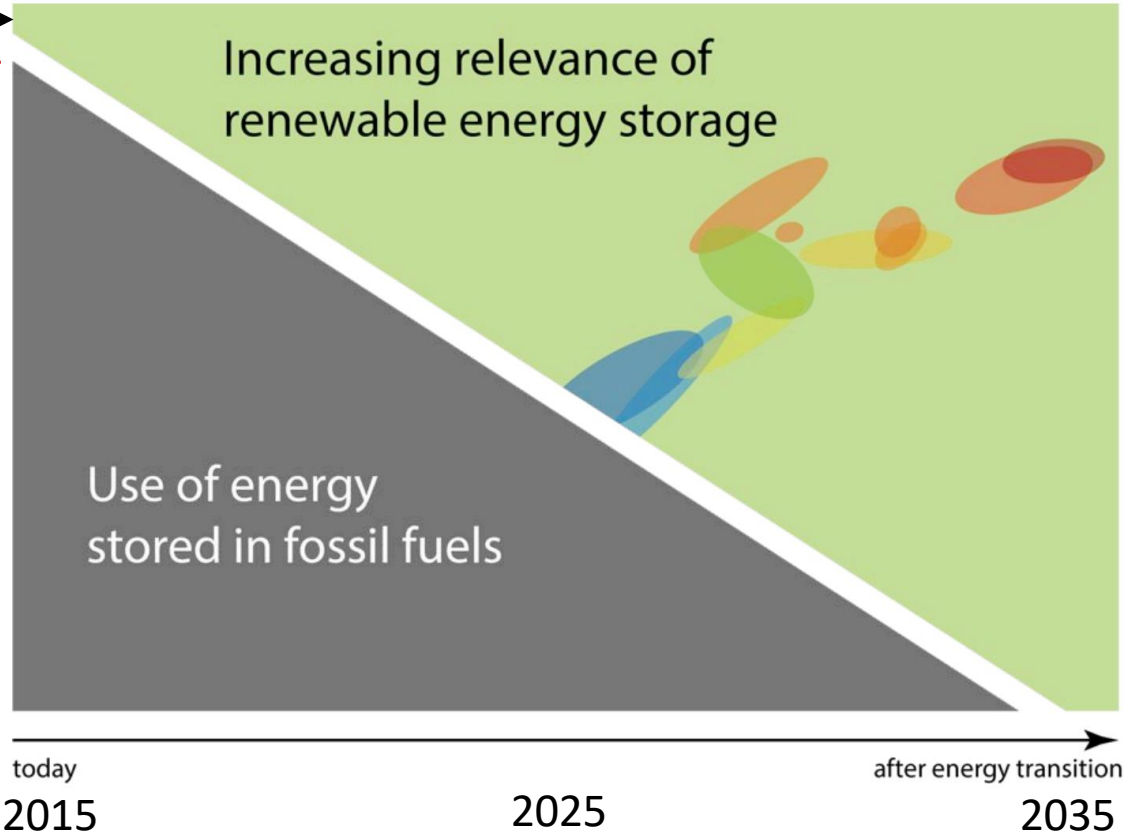
Wieviel Tagesspeicher-Kapazität benötigt Marburg dafür?
1 LIB oder 1 Redox-Flow-Tagesspeicher von 1 MWh Kapazität speichert 1/30 des Tagesverbrauchs von **Marburg 2018 !**
Decarbonisiertes Marburg 2030 gibt's nicht ohne Tagesspeicher und Saisonspeicher !

Quelle: https://www.energieportal-mittelhessen.de

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

Die **Energiewende** erfordert eine **Speicherwende**

0,04 TWh Pumpspeicher →
von 11 TWh Speicherbedarf



Notwendig für
Dekarbonisierung &
Versorgungssicherheit

Nicht nachhaltig,
aber verfügbar

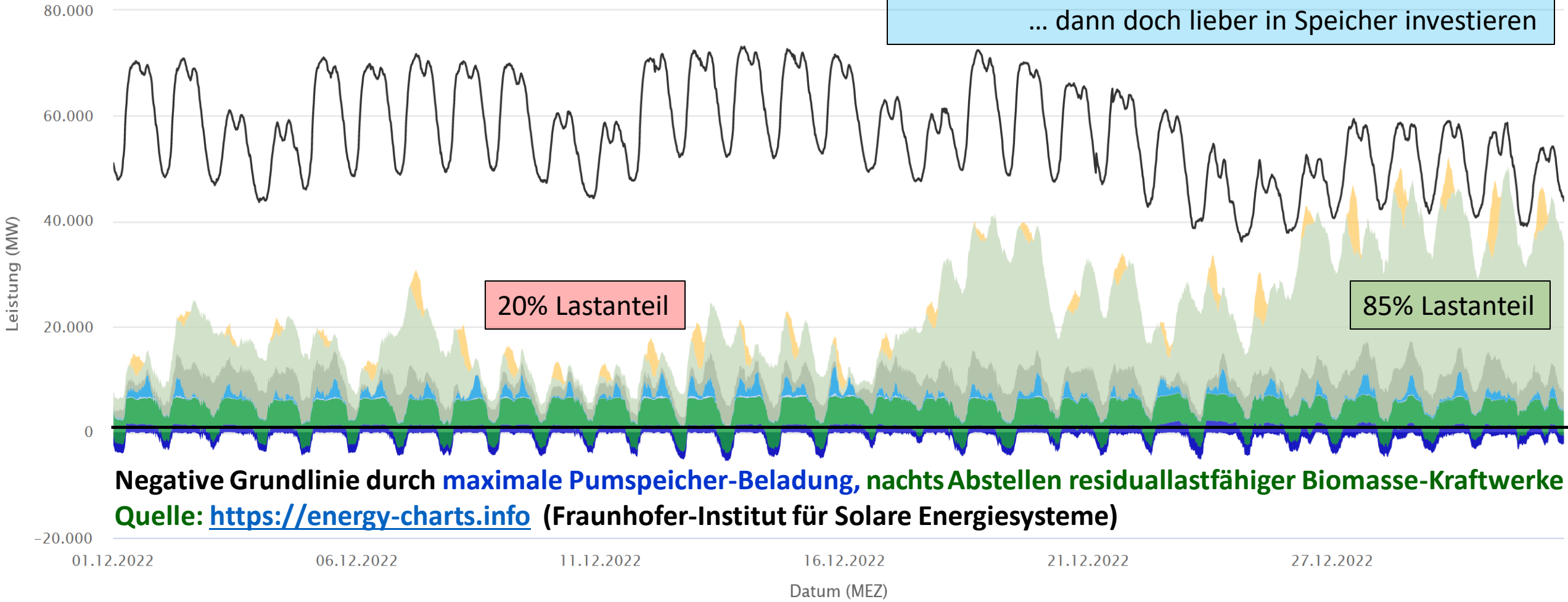
Quo vadis ?!

Quelle Prof. Sterner 2015: Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (*FENES*) der Ostbayerischen TH Regensburg

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Dezember 2022

Unser hausgemachtes Speicherdilemma

2022 Bedarf für Lastabdeckung: Erneuerbare x 5
2045 Bedarf = 3 x Last von 2022: Erneuerbare x 15?
… dann doch lieber in Speicher investieren



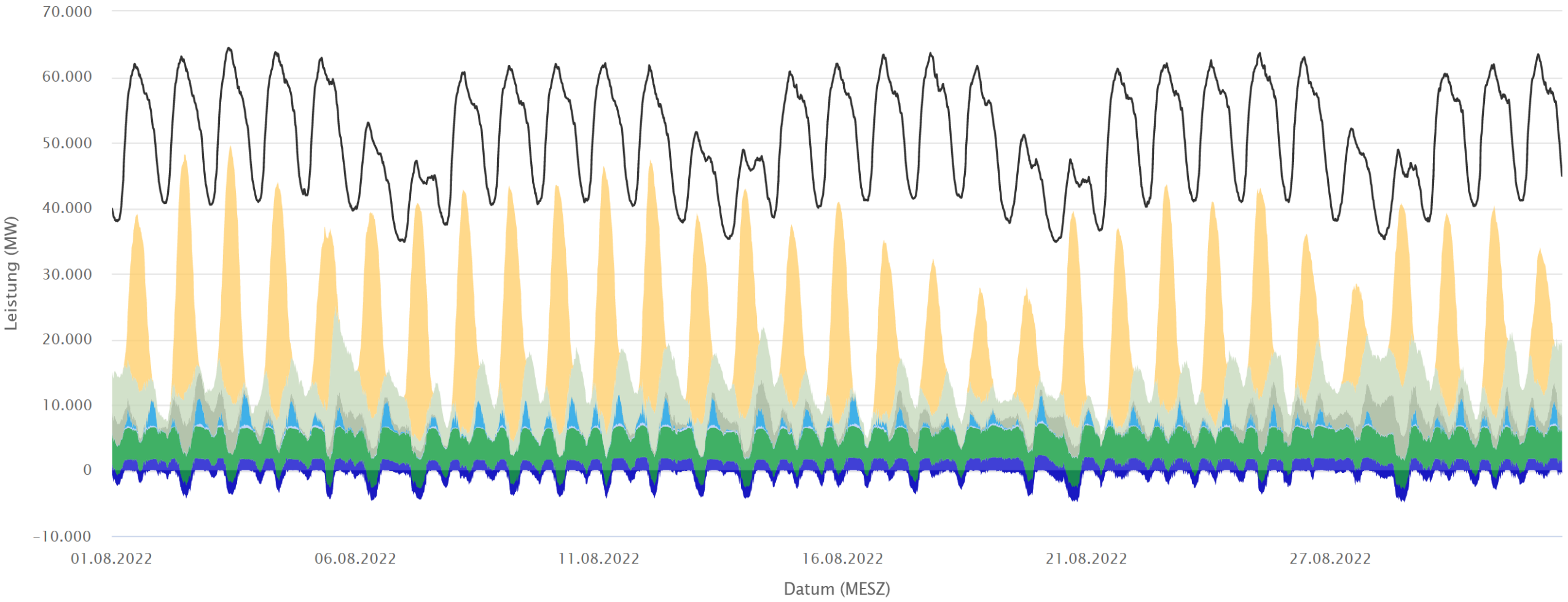
Negative Grundlinie durch maximale Pumspeicher-Beladung, nachts Abstellen residuallastfähiger Biomasse-Kraftwerke

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

Pumpspeicher Verbrauch
Braunkohle
Speicherwasser
Wind Onshore
Anteil EE an der Last
Import Saldo
Steinkohle
Pumpspeicher
Solar
Kernenergie
Öl
Andere
Last
Laufwasser
Erdgas
Müll
Residuallast
Biomasse
Geothermie
Wind Offshore
Anteil EE an der Erzeugung

Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im August 2022

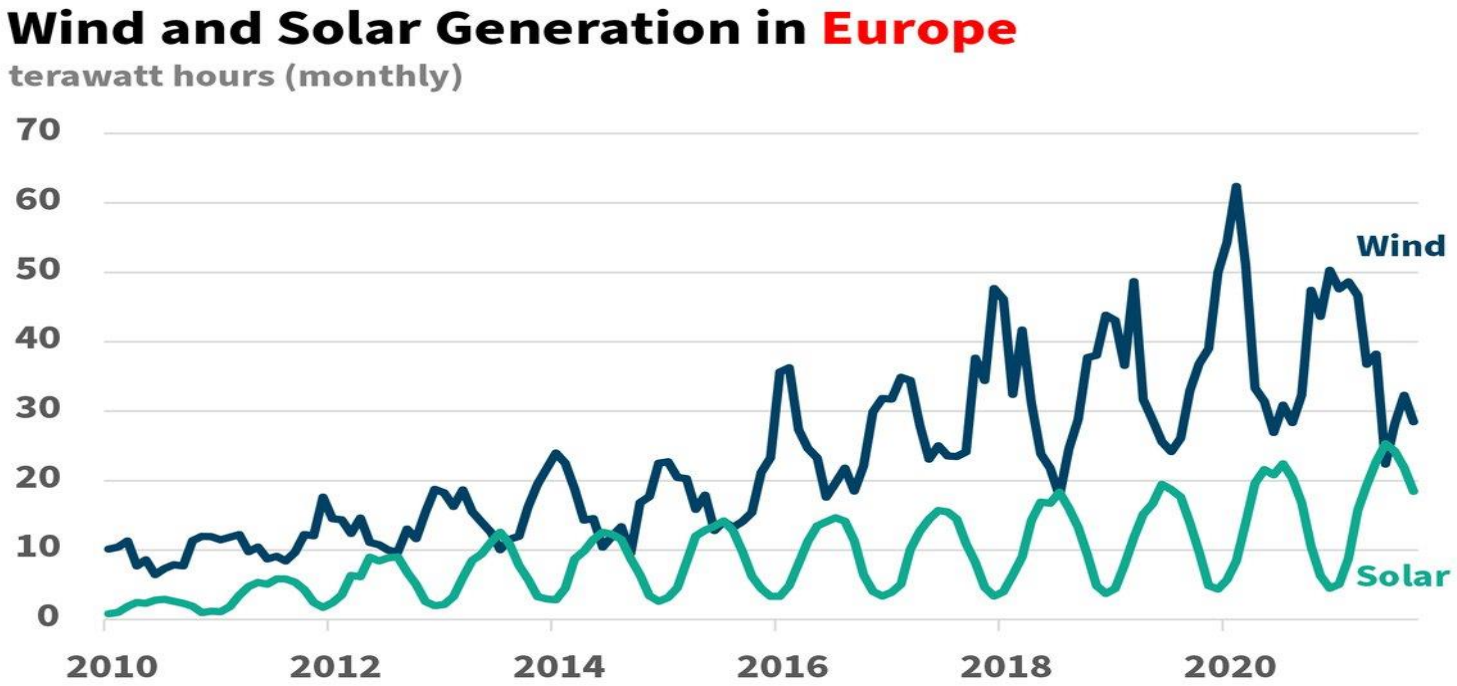
Energetisch korrigierte Werte



- Pumpspeicher Verbrauch
- Braunkohle
- Speicherwasser
- Wind Onshore
- Anteil EE an der Last
- Import Saldo
- Steinkohle
- Pumpspeicher
- Solar
- Kernenergie
- Öl
- Andere
- Last
- Laufwasser
- Erdgas
- Müll
- Residuallast
- Biomasse
- Geothermie
- Wind Offshore
- Anteil EE an der Erzeugung

Stromerzeugung durch Wind und Sonne ergänzen sich meist komplementär

- das reduziert Bedarf an Speichern & Residuallast-Kraftwerken für H_2 + Synthetic Natural Gas (SNG)



Quelle: Internationale Energie Agentur IEA;
Monthly Electricity Statistics,
Data for OECD Europe, December 2021

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 (MWp)**

  55 : 45 (Wind : PV) Anteilen bezogen auf die **erwartbare Stromerzeugung** wegen

  25 : 10 (Wind : PV) Anteilen der **erwartbaren Volllaststunden im Jahr**

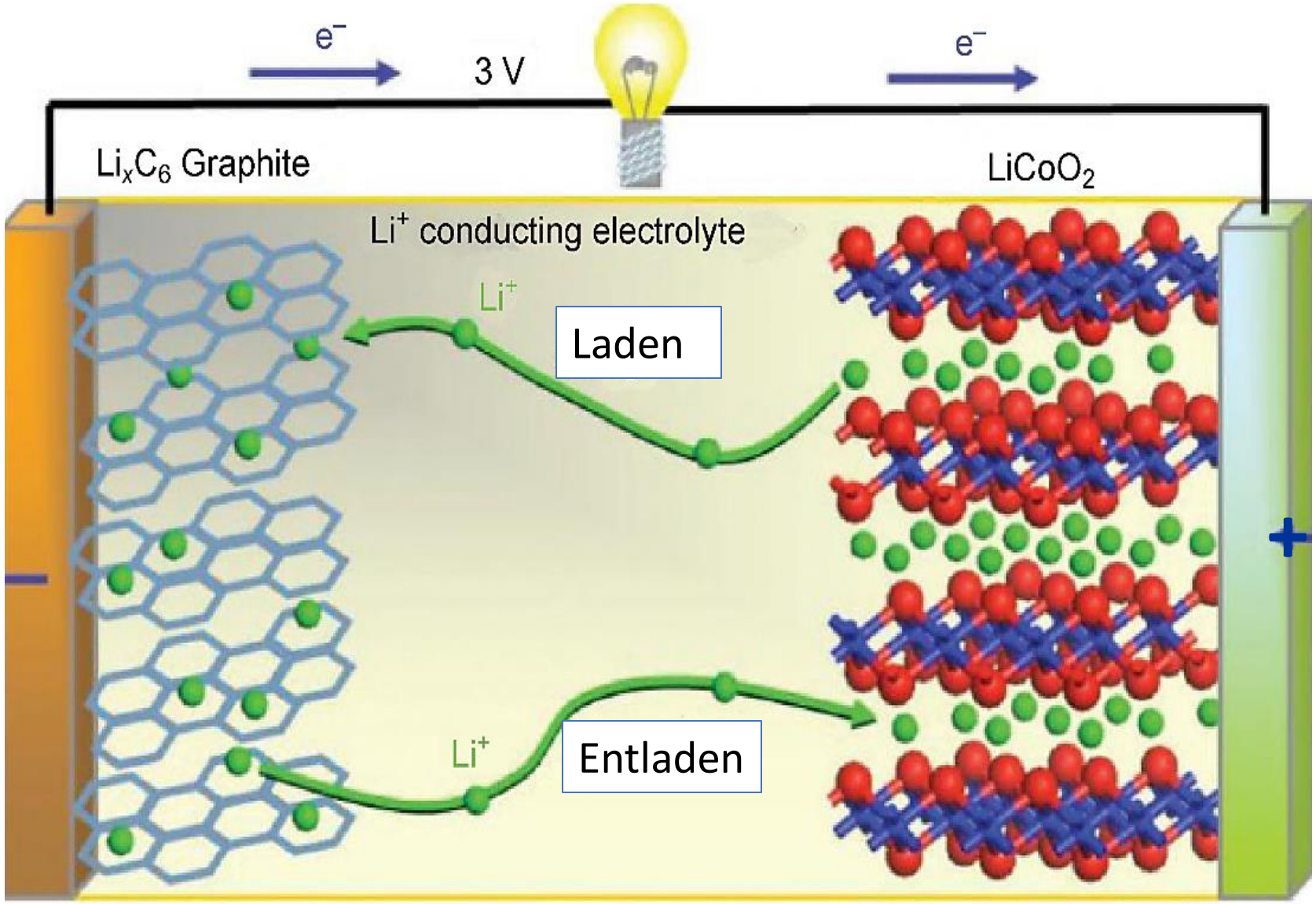
Quelle: Heidelberger Academy for Future: www.hadw-bw.de/news/events/potential-der-erneuerbaren-energie-europa-was-ist-moeglich

Lösungen? Die unbürokratische Vision: Der Energiewende-Boom könnte kommen!

Deutschland 2023: Solaranlage, Wärmepumpe und E-Auto bekomme ich staatlich oder kommunal gefördert: wechselhaft, ungerecht, falls ich kein Dach besitze und für (Ver)Mieter steuerlich zu aufwendig. 80 Prozent (%) meines erzeugten Stroms speise ich im Sommer für **6-8 Cent Vergütung ins Netz** und muss diesen Strom nur eine Stunde später oder im Winter **für den 6-8 fachen Preis pro Kilowattstunde (kWh) zurückkaufen**, dann, wenn im November bis Februar meine Wärmepumpe 90% ihres Jahresstrombedarfs anfordert und die Solaranlage nur 10% ihrer Jahreserzeugung einbringt. **So gelingt definitiv keine Motivierung und massenhafte Mobilisierung der Bürger für die Energiewende!**

Vorschlag Deutschland 2025: Einzig wichtige Förderung ist der Erlass der Mehrwertsteuer bei gezielten Investitionen in unsere Energiewende! Sie gilt für alle gleich, Hausbesitzer oder Mieter, die in kommunale Beteiligungsmodelle investieren. Der Trigger zur Auslösung des Booms ist das Net-Metering, etabliert bei vielen europäischen Nachbarn, nur nicht bei uns: Digitale Stromzähler können Einspeisung und Bezug aus dem Netz automatisch verrechnen. Wenn **Privaterzeuger für 5 kWh im Sommer eingespeisten PV-Stromüberschuss bei Bedarf im Winter 1 kWh Strom vom kommunalen Versorger kostenlos und steuerfrei** zurückbekämen, würde dieser **faire Handel einen Wirtschafts-Boom auslösen**: Jeder würde auch den letzten lohnenden Quadratmeter Dachfläche mit PV-Modulen ausstatten und damit weiteren Flächenfraß an unversiegelten Naturflächen durch Ökoenergie-Investoren verhindern. Jeder wäre darauf bedacht, einen möglichst hohen Anteil an selbst produziertem Strom zu verbrauchen, zu investieren in bidirektional ladende Elektroautos mit intelligenten Wallboxen für PV-Überschussladen sowie in Wärmepumpen mit Anbindung an die eigene Solaranlage! Die Amortisation aller Anlagen und E-Autos wäre wirtschaftlich langfristig verlässlich berechenbar. Die kommunalen **Netzbetreiber/-versorger wären gesetzlich verpflichtet, mit steuerfreien Handelsgewinnen** (5 kWh Strom kostenlos bezogen – 1 kWh kostenlos abgegeben) ihre **Ökostromspeicher und Netze aufzubauen**. Jeder Haushalt, der kein eigenes Dach besitzt, könnte sich an dieser Speicher- und Netz-Finanzierung vorteilhaft beteiligen. Verträge der großen Netzbetreiber garantierten, dass E-Autofahrer für 5 kWh zuhause eingespeisten Strom an jeder E-Ladesäule eines deutschlandweiten Verbundes 1 kWh Strom kostenlos laden. **Wer könnte bei derartigen Maßnahmen widerstehen, das finanziell Machbare in synergetische Technologien der Energiewende zu investieren?**

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 Li $Fe(PO_4)$!

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 km^2 (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 (Isar II).

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 km^2 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) !**

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-Speicher-nutzung zuzüglich Energiepreis!

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 5[illegible].000 USD

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

Skalierungseffekt: LIB-Speicherkosten um den **Faktor 2,5 „günstiger“** bezogen auf die Kapazität als bei meiner Hausbatterie!

Speicherkosten (4,7 x 350 MW ~ 10,8 Milliarden USD) **übertreffen Stromerzeugungskosten** (2,3 Milliarden USD) um den **Faktor 4,7 !**

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-Speicher-nutzung zuzüglich Energiepreis!**

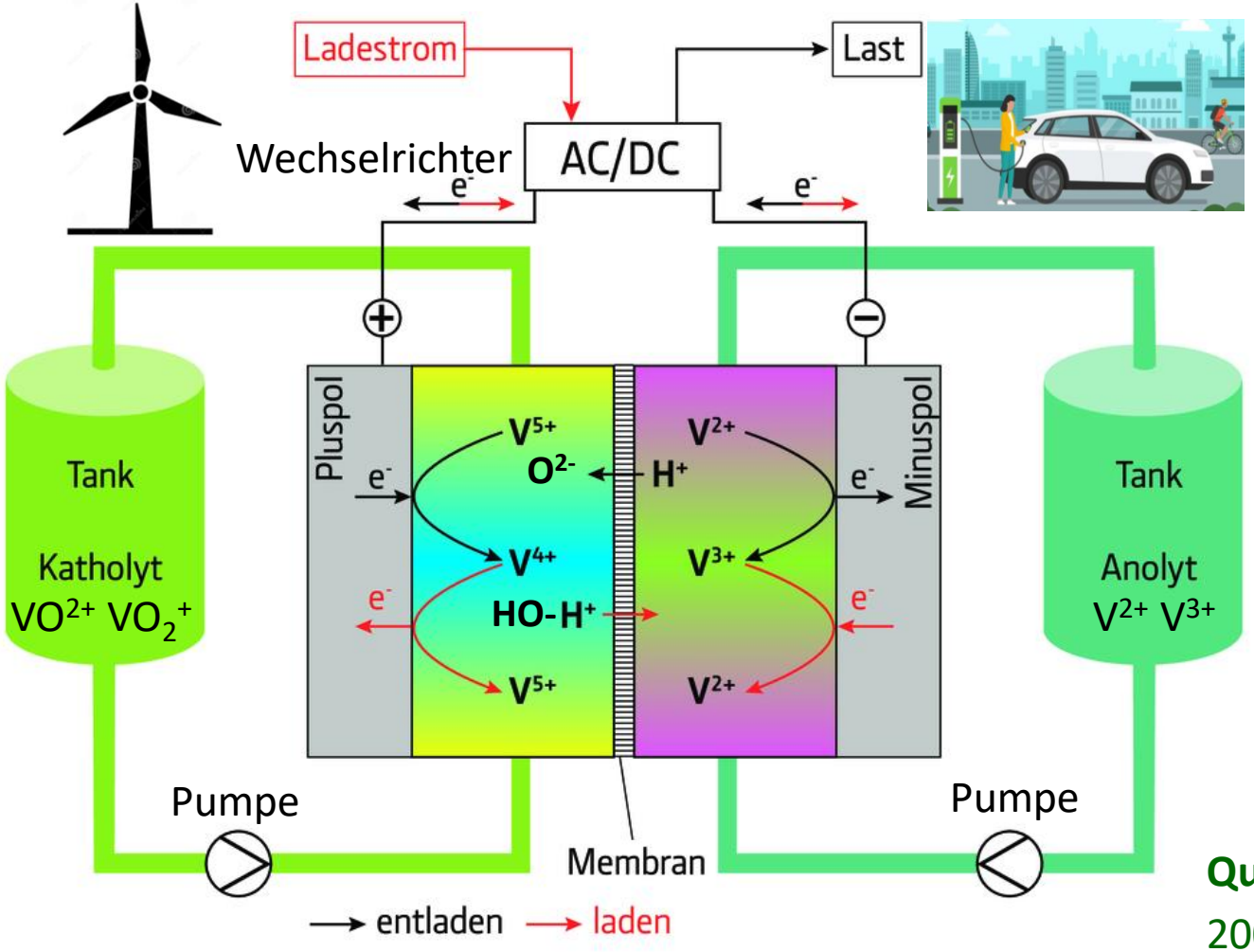
Weltgrößte Vanadium Redox-Flow (Fluss-) Batterie (RFB: 200 MW, 800 MWh)

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 2018.



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

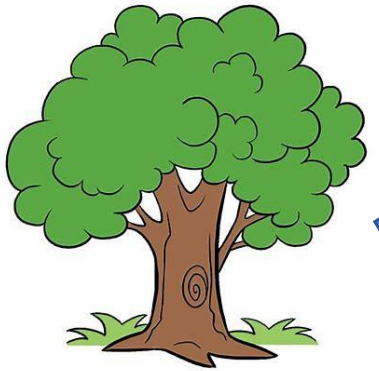
Über Lignin-Bioraffination zur „Holzbatterie“ aus nachwachsenden Rohstoffen

Natürliches Verbundmaterial Holz (Lignocellulose)

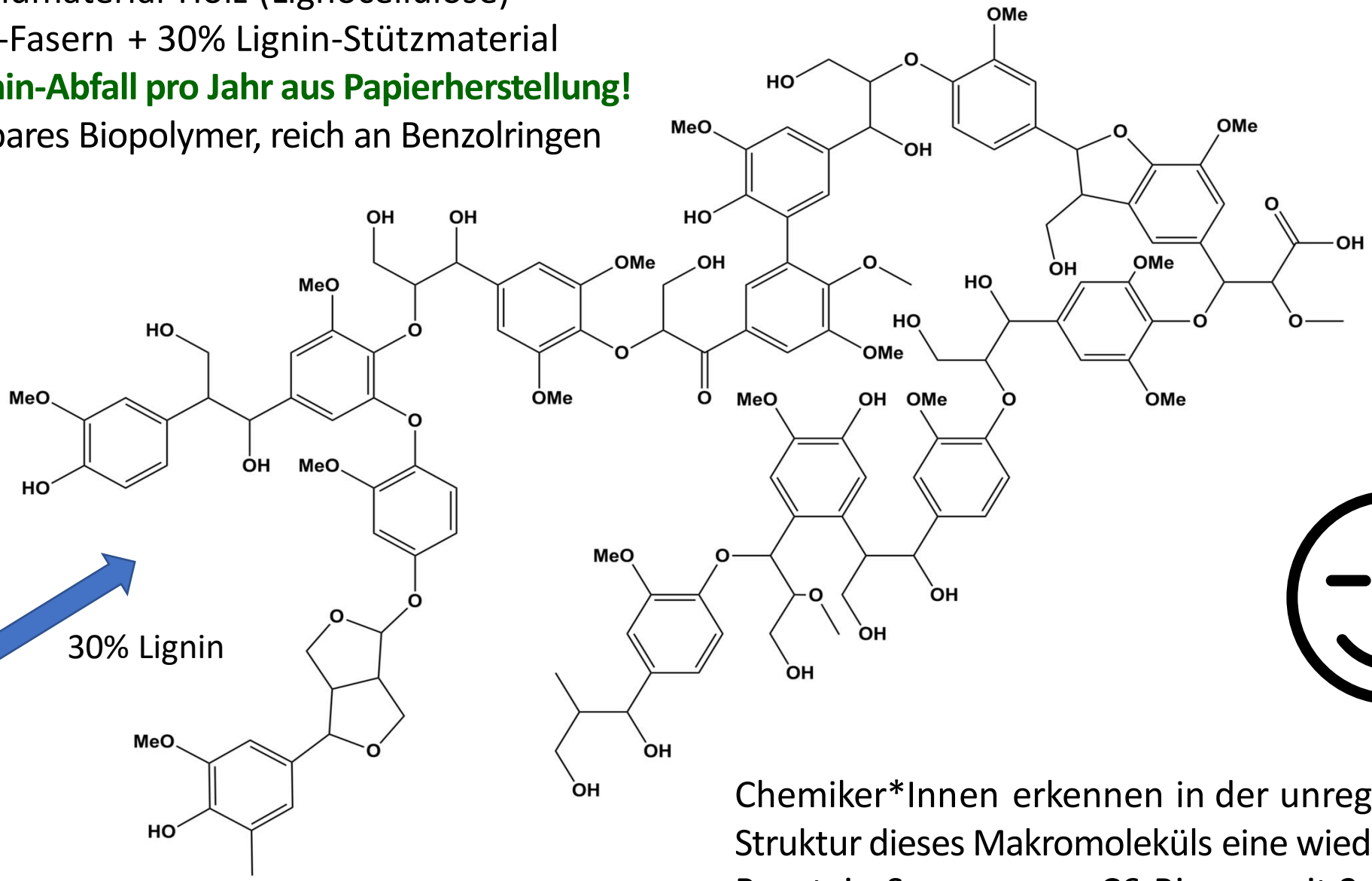
= 70% Cellulose-Fasern + 30% Lignin-Stützmaterial

50 Mio Tonnen Lignin-Abfall pro Jahr aus Papierherstellung!

Unbegrenzt verfügbares Biopolymer, reich an Benzolringen



30% Lignin

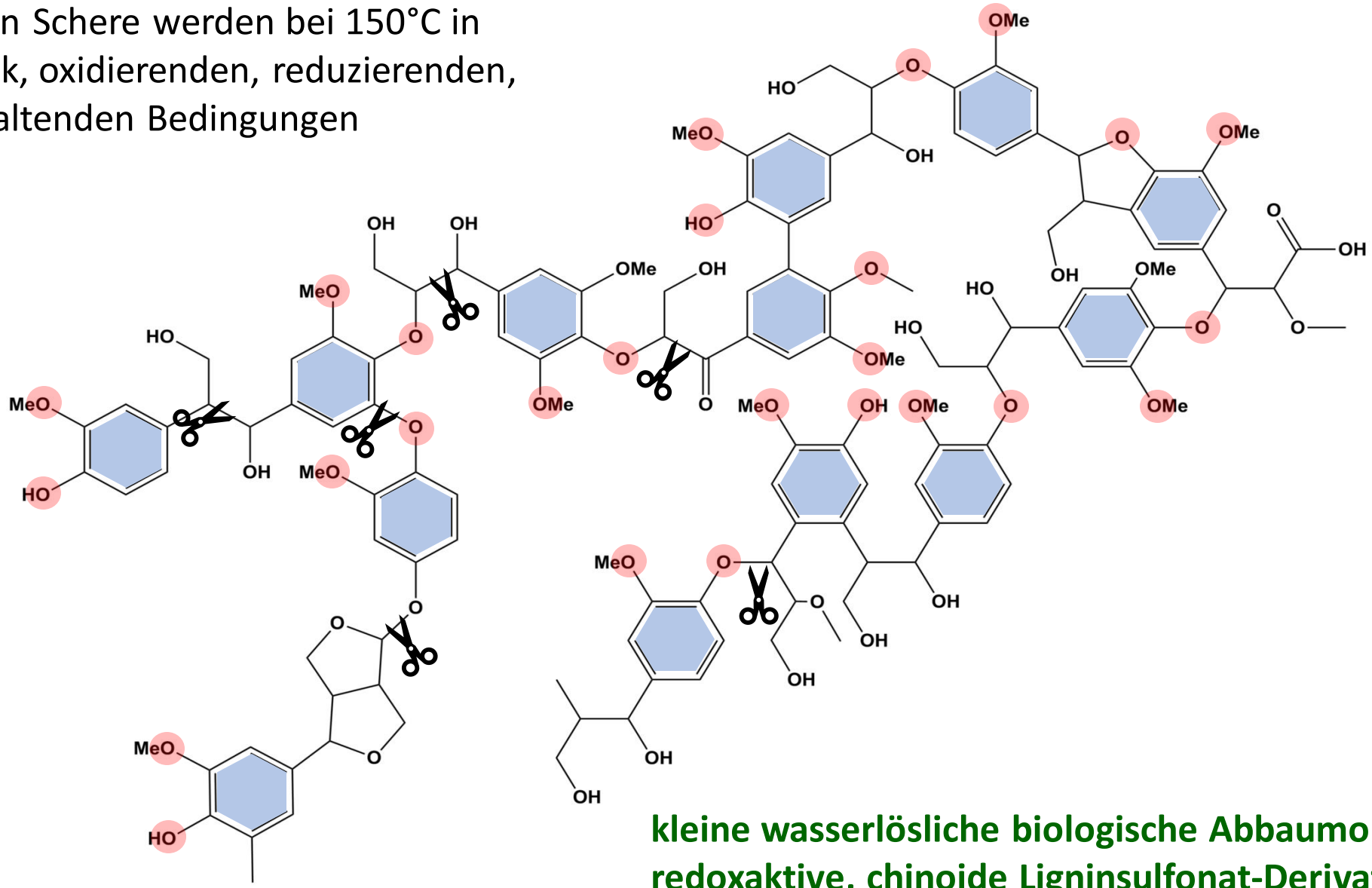


Chemiker*Innen erkennen in der unregelmäßigen Struktur dieses Makromoleküls eine wiederkehrende Baustein-Sequenz aus C6-Ringen mit 2 O-Atomen.

Formelzeichnung ©KIT-IKFT, M. Breunig

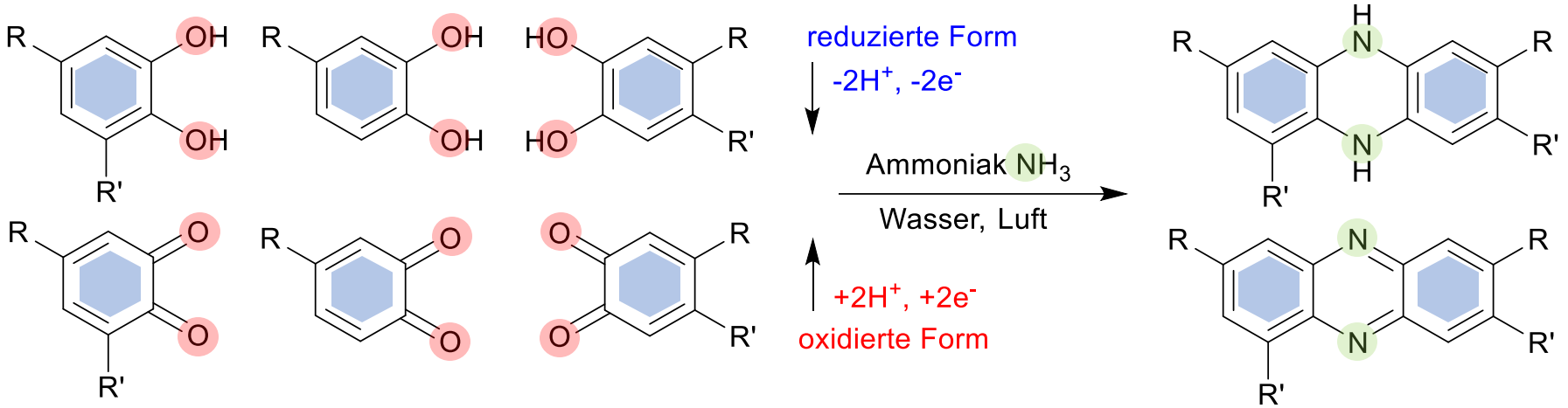
Über Lignin-Bioraffination zur „Holzbatterie“ aus nachwachsenden Rohstoffen

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



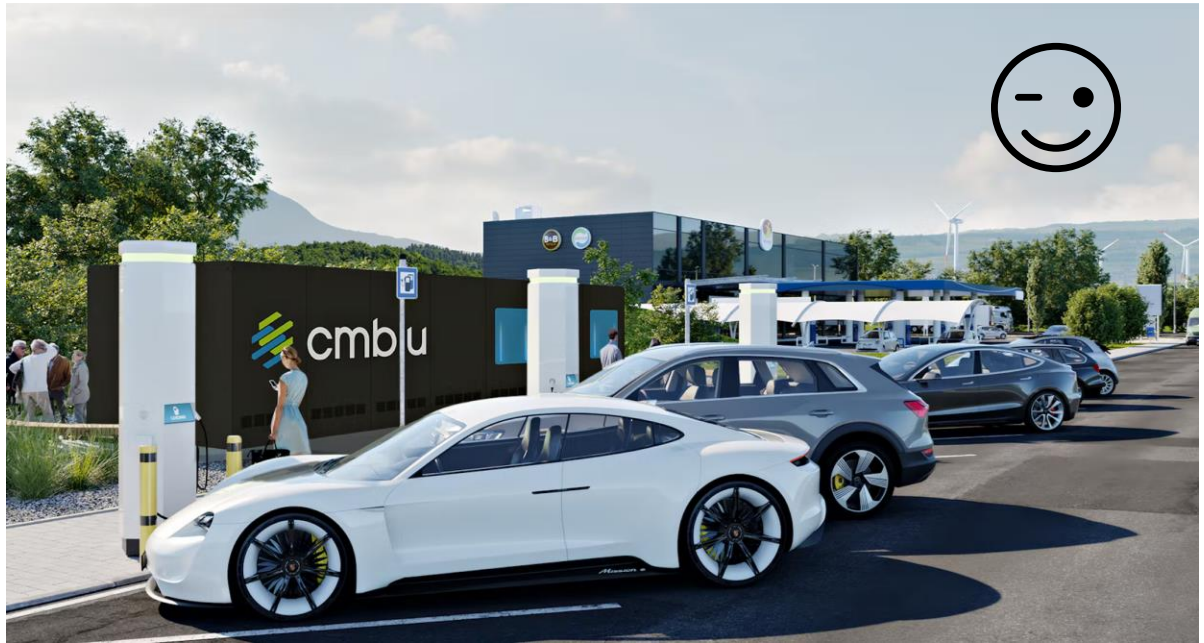
Phenazin-Derivate
als Elektronen &
Protonen Reservoir

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 H_2 ≈ 33 kWh vgl. 1 L Diesel / Benzin ≈ 10 kWh

Niedrige volumetrische Energiedichte: 12.000 L H_2 (1 bar, 20°C) ≈ 1 L Diesel / Benzin ≈ 10 kWh

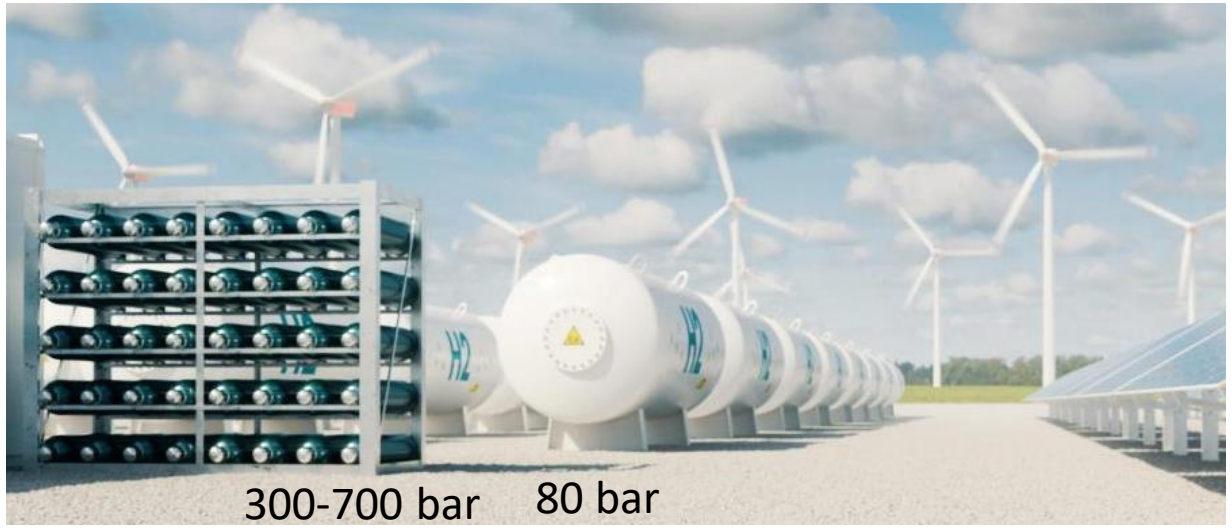
Komprimierung auf 80 bar: 7 kg/m³, 200-300 m³ Tanks, Verlust durch Volumenarbeit (x 0,95), Stahlcontainer preiswert

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

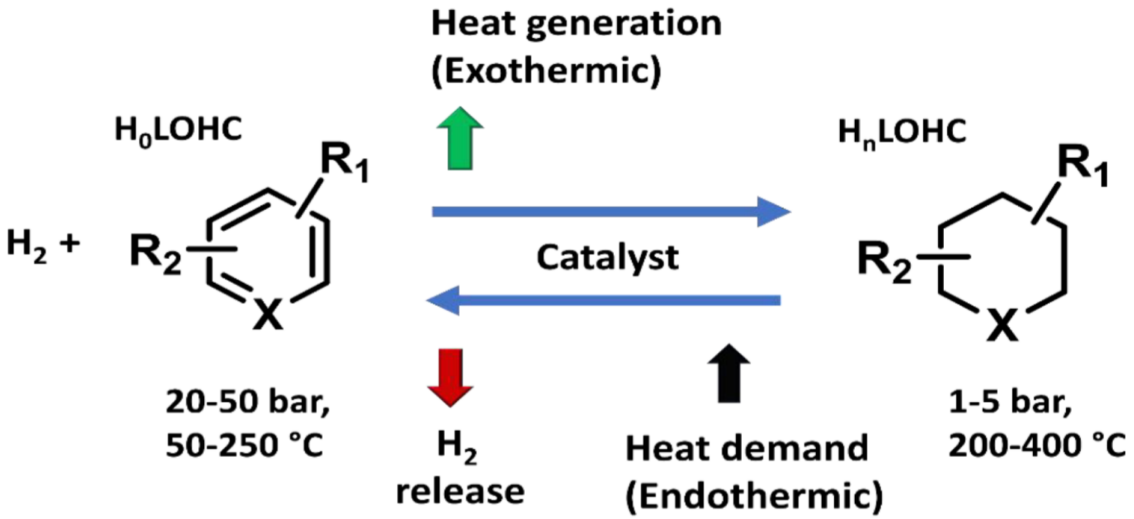
Komprimierung auf 700 bar: 40 kg/m³, 3-8 L Tanks, Verlust durch Volumenarbeit (x 0,85), Kohlefaserkugelbehälter teuer

Verflüssigung zu Kryowasserstoff (-253°C, 1 bar): 71 kg/m³ (< 0,80), 1 L Kryo-H_2 ≈ 0,27 L Benzin, Isolierung, Abdampfverluste

Speicherung von Wasserstoff



Liquid Organic Hydrogen Carriers LOHC



H_2-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 = H_2)

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-H_2
1,0 MW Leistung

alkalische Elektrolyse von Wasser in Wyhlen

$2\ H_2O$ + Energie → **$2\ H_2$ Wasserstoff** + O_2

$4\ H_2$ + CO_2 → CH_4 **Methan (SNG)** + $2\ H_2O$

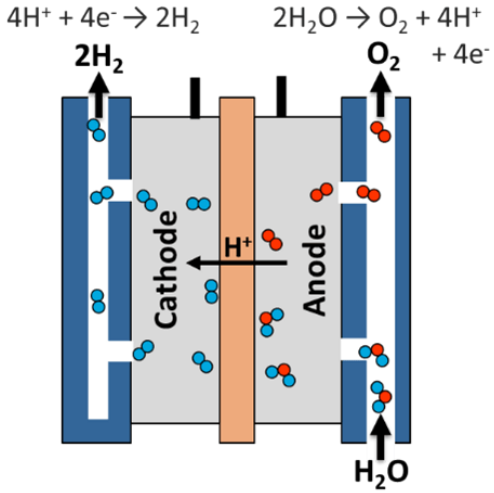
$3\ H_2$ + CO_2 → CH_3OH **Methanol** + H_2O

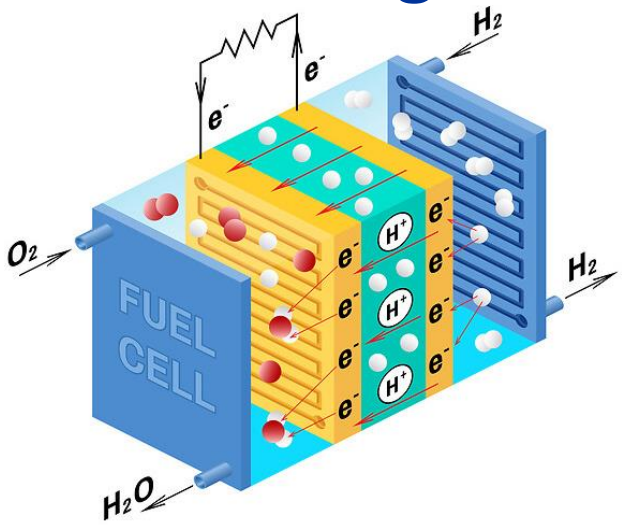
$3\ H_2$ + N_2 → $2\ NH_3$ **Ammoniak**

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

H_2 → Chemische Industrie

Schwerlast → H_2-elektrisch

Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs

(Nach M. Liebreich, 2021)

Alternativlos

A	Dünge-mittel	Hydrierung	Methanol	Hydro-cracken	Ent-schwefelung	
B	Schiff-fahrt*	Mobile Maschinen & Geräte	Chemischer Rohstoff	Stahl	Langfrist-Stromspeicher	
C	Langstrecken-flüge*	Küsten- & Binnenschifffahrt	Entlegener Zugverkehr	Oldtimer-Fahrzeuge*	Dezentrale Methanisierung	
D	Mittelstrecken-flüge*	Fernverkehr-Lkw und Reisebusse	Industrielle Hoch-temperatur-Wärme	Strom-erzeugung		
E	Kurzstrecken-flüge	Lokale Fähren	Gewerbliche Raumwärme	Insel-netze	Grüner Energieimport	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
F	Leicht-Flugzeuge	Ländlicher Zugverkehr	Lkw Verteiler-verkehr	Industrielle Niedertemp.-Wärme	Wohnraum-wärme	
G	U-Bahnen & Stadtbusse	Brennstoff-zellen-Pkw	Stadtliefer-wägen	Zwei- und Dreiräder	Massenproduk-tion von E-Fuels	Regel-leistung

Unwirtschaftlich

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

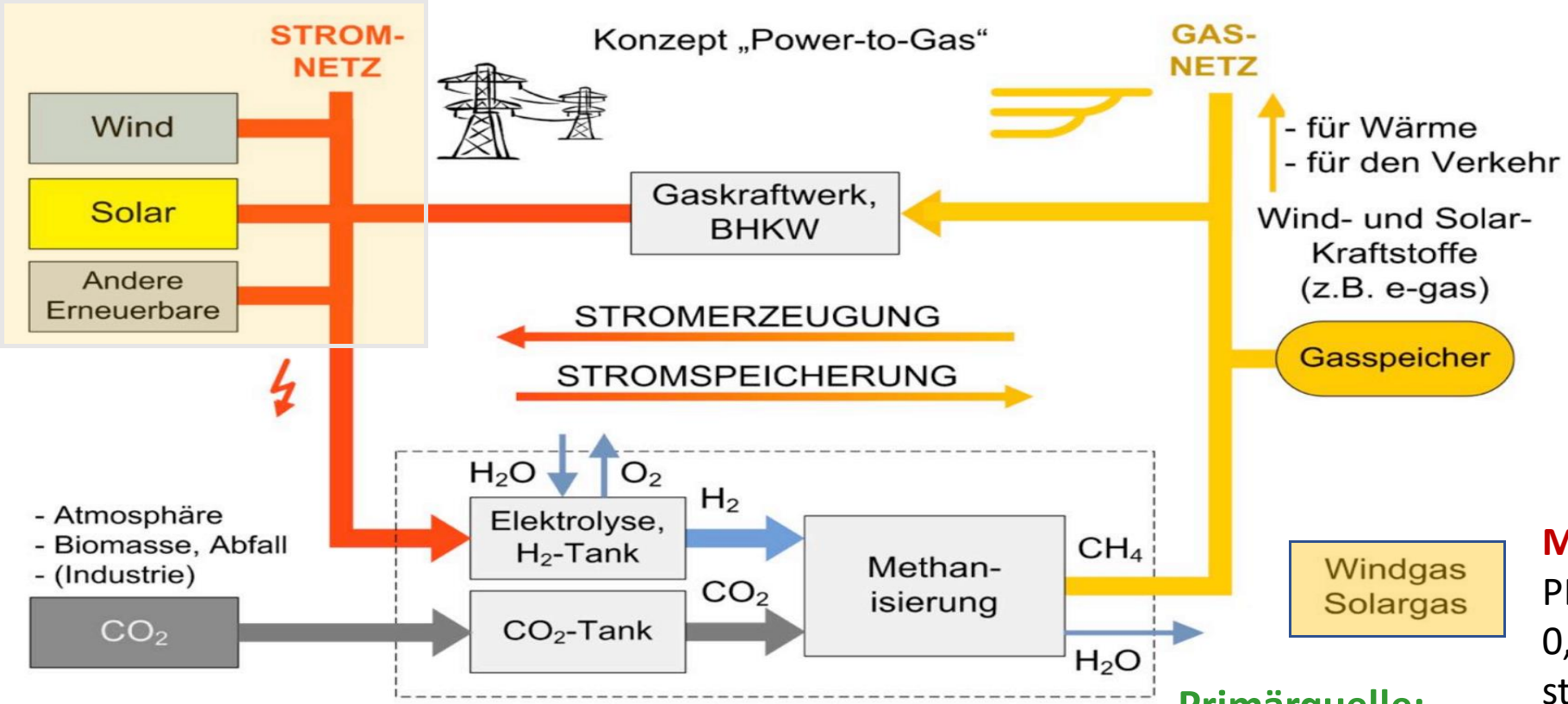
© Gregor Hagedorn, Wolf-Peter Schill & Martin Kittel, based on Michael Liebreich/Liebreich Associates, Clean Hydrogen Ladder, Version 4.1, 2021. Concept credit: Adrian Hiel, Energy Cities. CC-BY 4.0

Energiespeicher als Schlüssel zur erfolgreichen Energiewende

Key–Note

Prof. Dr.–Ing. Michael Sterner

OTH
OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE REGENSBURG



30-50% Kostenanteil **Power-to-Gas Anlage**

Energiespeicherung durch Power-to-Gas Wandlung:
in Wasserstoff, Methan

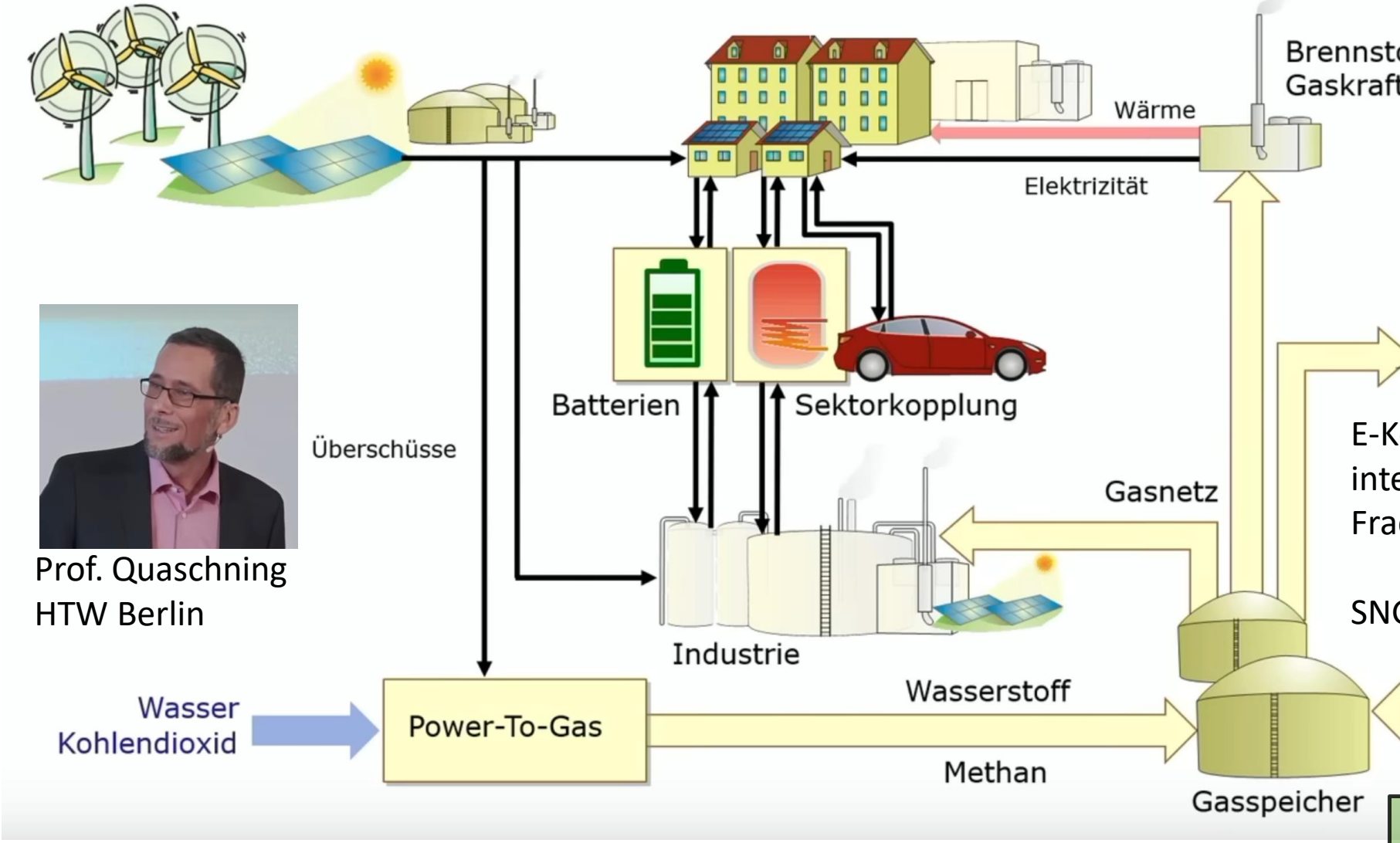
Auftaktveranstaltung der Speicherinitiative Österreichs

Ares Tower, Wien
12. Oktober 2015

Max. Stromeffizienz Power-to-Power:
PEM-Elektrolyse 0,75 x H_2-to-SNG 0,70 x Verdichtung 0,95 x Brennstoffzelle/BHKW 0,6 x 100 = **30%**

Primärquelle:
Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme **IWES 2008**

Sektorenverbund mit allen relevanten Komponenten - ohne Verlust-Energiebilanz



Prof. Quaschning
HTW Berlin

E-Kerosin und Ammoniak für interkontinentale Flüge und Frachtschiffe

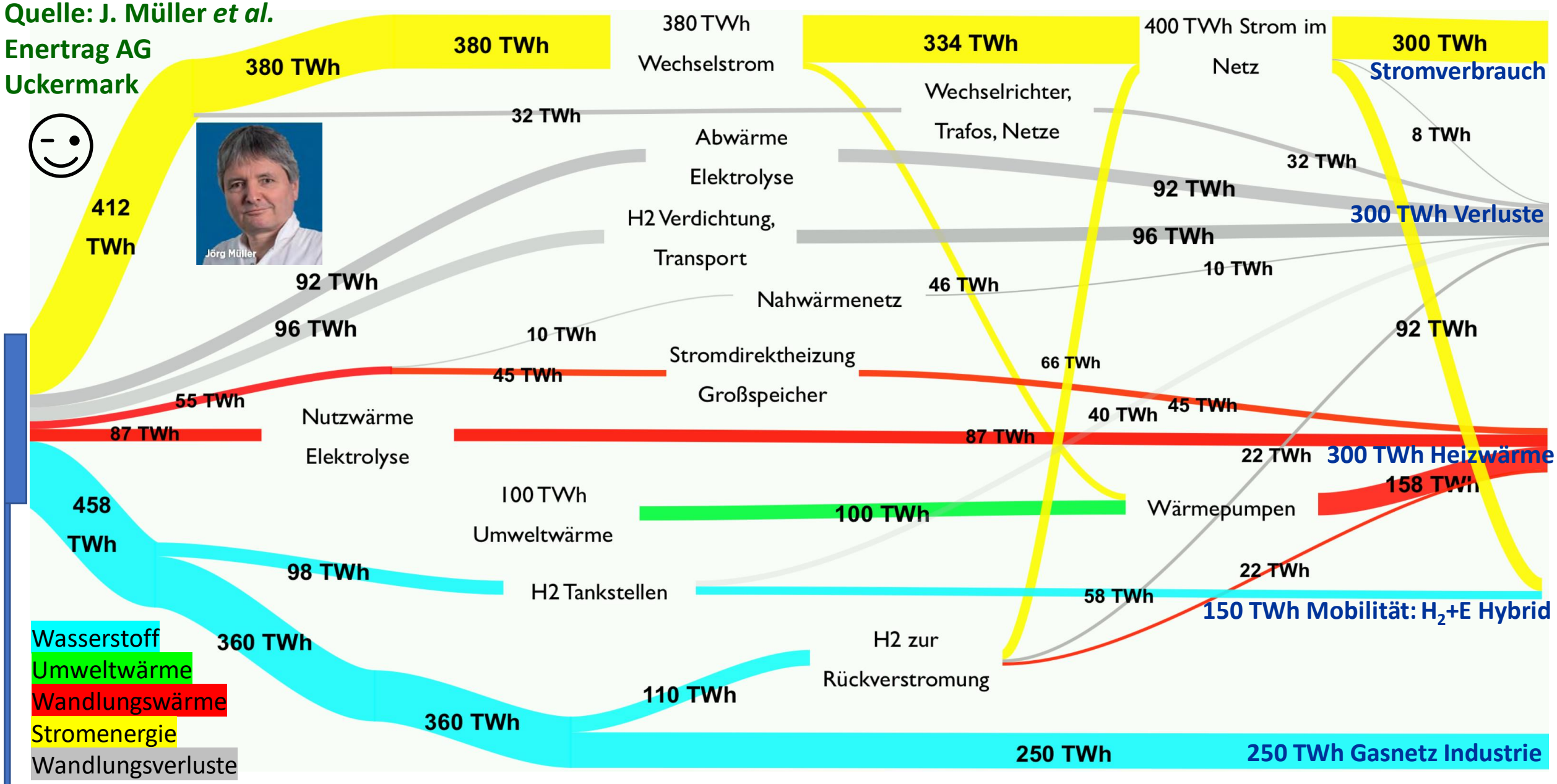
SNG statt LNG /Fracking Gas!

Deutschland ist gesegnet mit natürlichen Kavernen-**Gasspeichern der Kapazität 230 TWh ~4 Wintermonate SNG**

Quelle: Prof. Quaschning 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

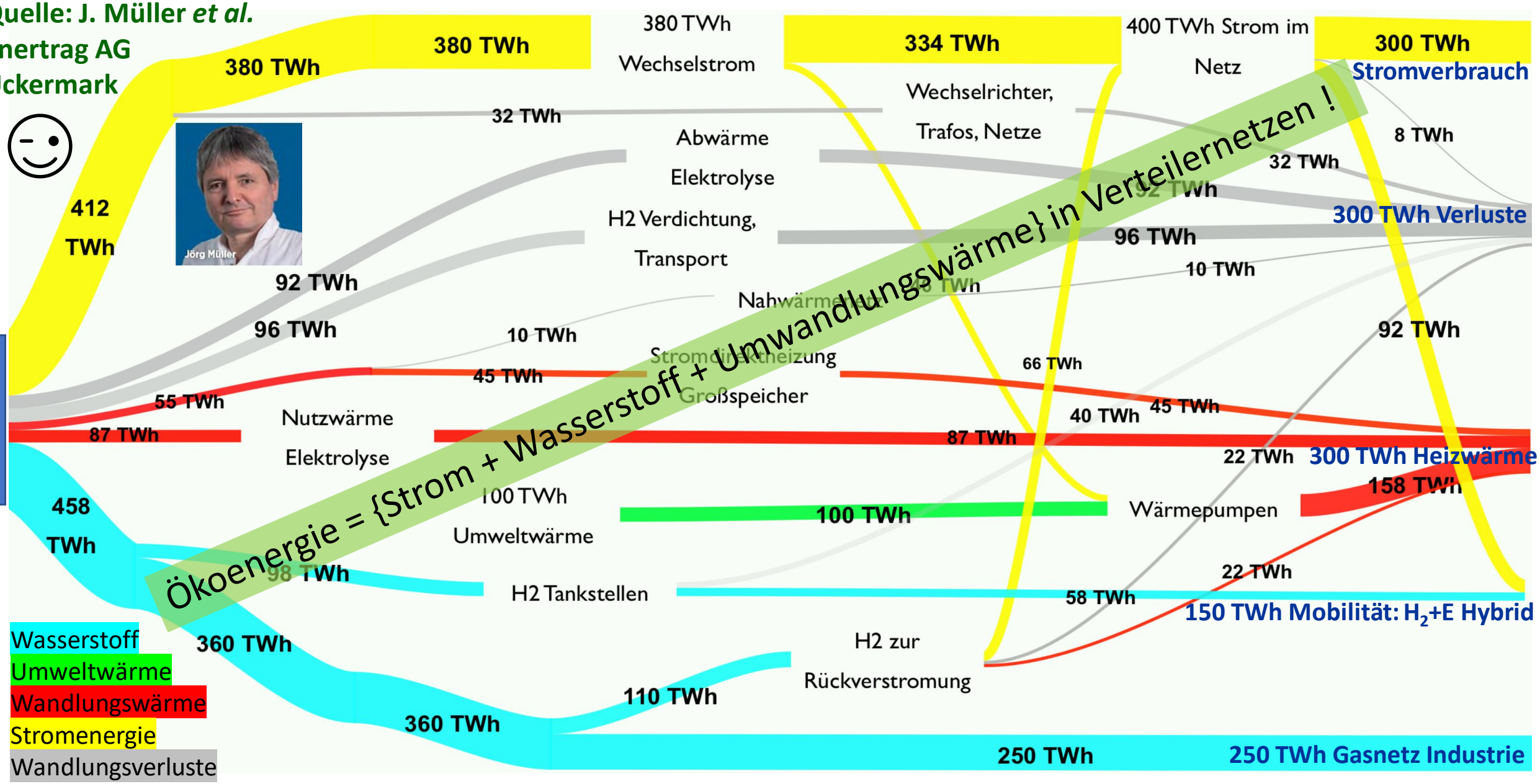
Quelle: J. Müller *et al.*
Enertrag AG
Uckermark



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

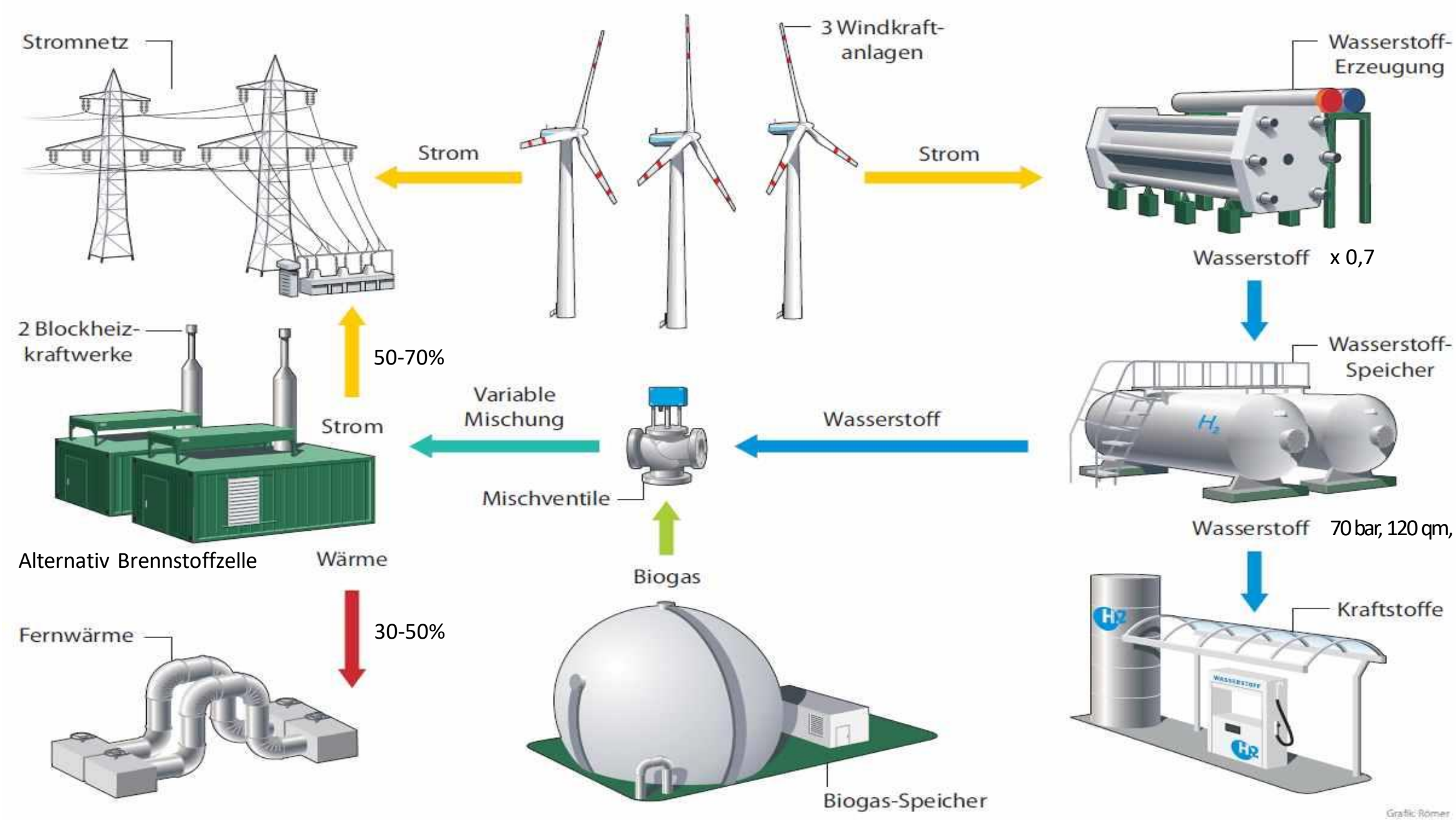
Wasserstoff-Verbund: Klimaneutrales Deutschland 2045 – versorgungssicher & 80% Speicher-Systemwirkungsgrad

Quelle: J. Müller *et al.*
Enertrag AG
Uckermark

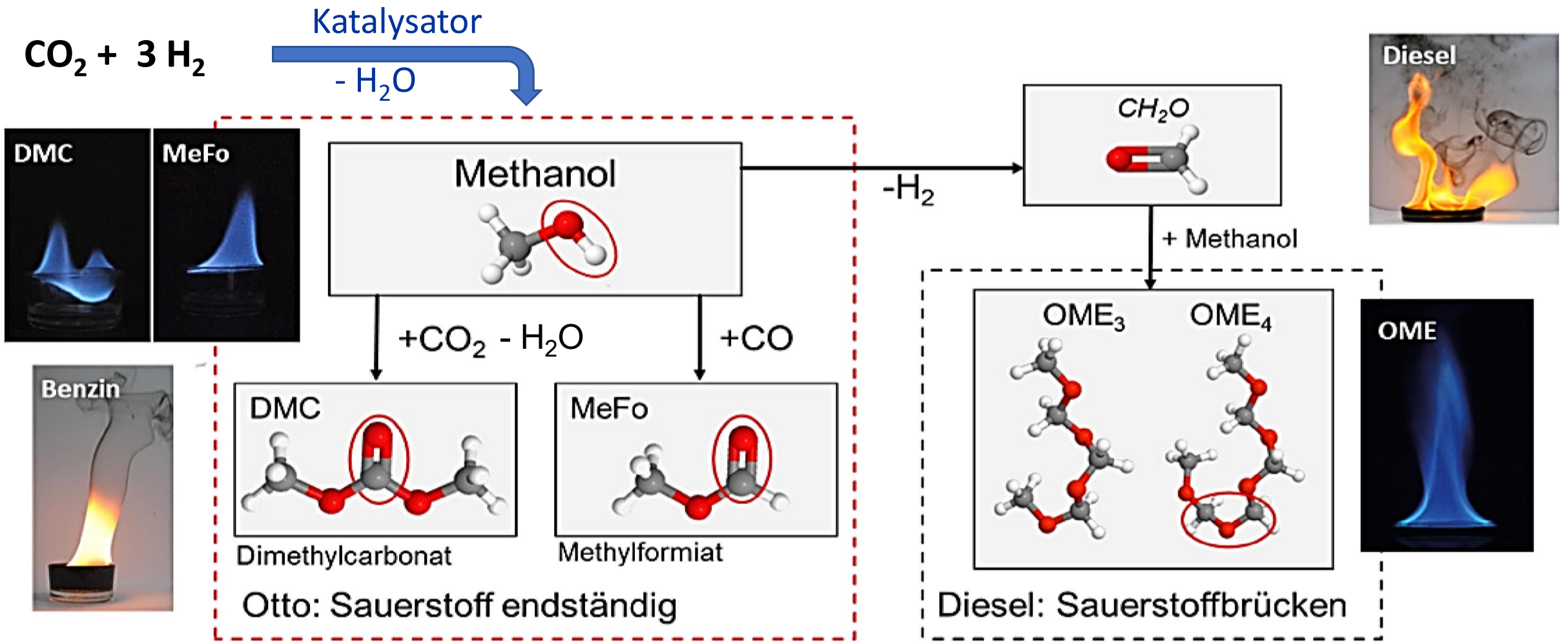


Bedarf 2045: 1.200 TWh Gleichstrom aus PV, Wind (und AKW?) – **Stand 2020:** 2.333 TWh Endenergie, davon 544 TWh ~Strom

ENERTRAG Hybridkraftwerk



Power-to-Liquid E-Fuels für Otto- und Dieselmotoren aus Wasserstoff und CO_2



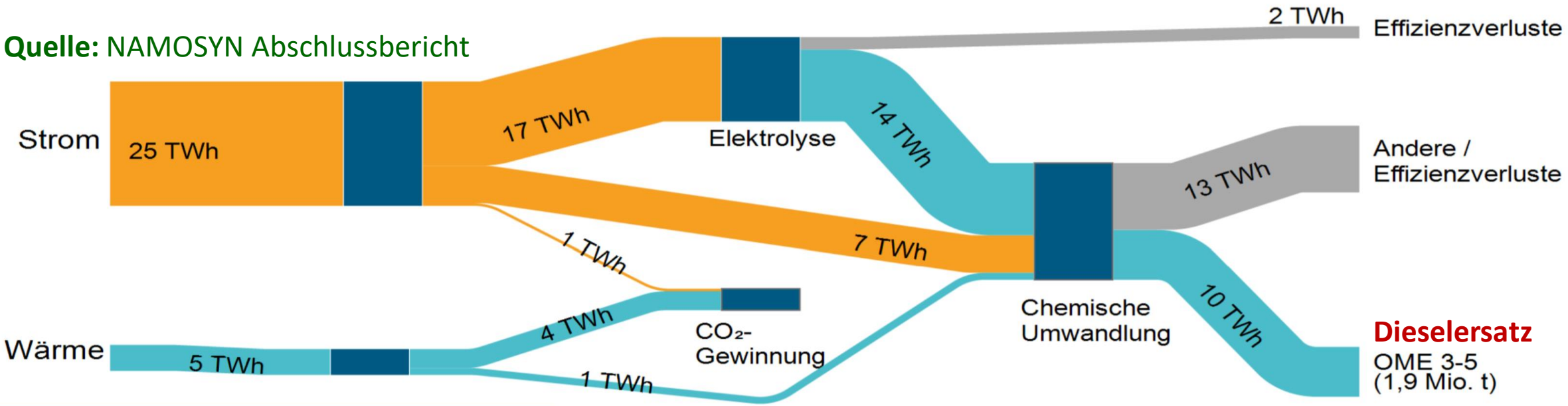
Vorteile: nahezu kein CO_2 Footprint, kein Ruß/Feinstaub

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

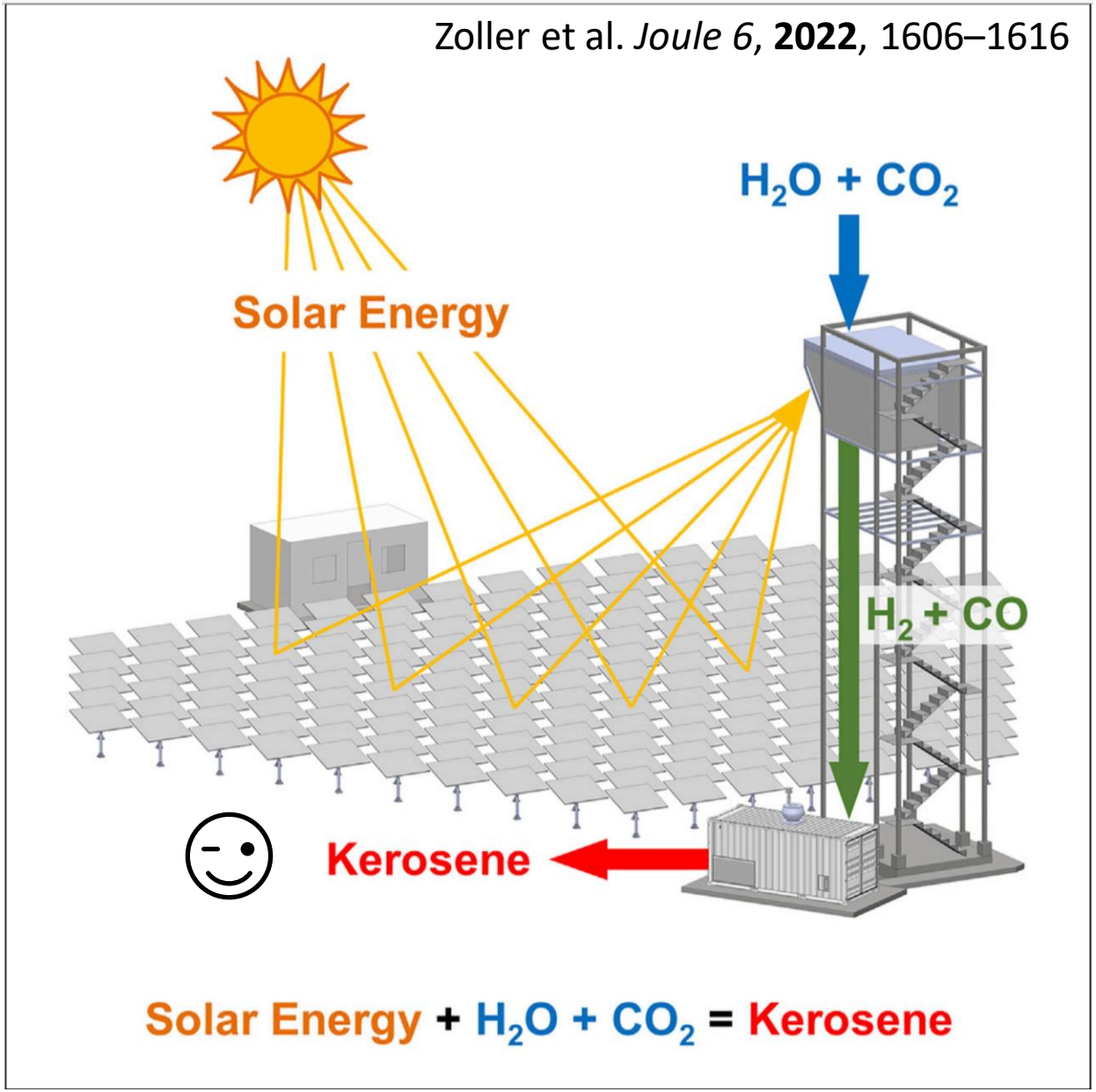


Energiebilanz: 30% Effizienz bis zum E-Fuel, 9% inkl. Verbrennermotor:
Aus 25 TWh Strom + 5 TWh HT-Nutzwärme, d.h. **aus Σ 30 TWh werden 10 TWh Dieselersatz OME** und 15 TWh NT-Abfallwärme (30% Effizienz).
Der Dieselmotor selbst bringt es auf 30% Effizienz, somit bringt man nur
0,3 x 0,3 x 100% = **9% 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!!)



$20\ CeO_2 + Heat = 20\ CeO_{1,8} + 2\ O_2$

$10\ CeO_{1,8} + 2\ CO_2 = 10\ CeO_2 + 2\ CO$

$10\ CeO_{1,8} + 2\ H_2O = 10\ CeO_2 + 2\ H_2$

$Heat + 2\ H_2O + 2\ CO_2 = 2\ H_2 + 2\ CO\ (+ 2\ O_2)$

$8\ CO + 17\ H_2$ Fischer Tropsch Katalyse **= C_8H_{18} (Octan) + $8\ H_2O$ + Heat**

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 H_2O-Dampf-Elektrolyse!

$Heat + Power + 2\ H_2O + 2\ CO_2 = 2\ H_2 + 2\ CO\ (+ 2\ O_2)$

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

Cathode: $CO_2(g) + 2e^- \rightarrow CO(g) + O^{2-}$

$H_2O(g) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + O^{2-}$

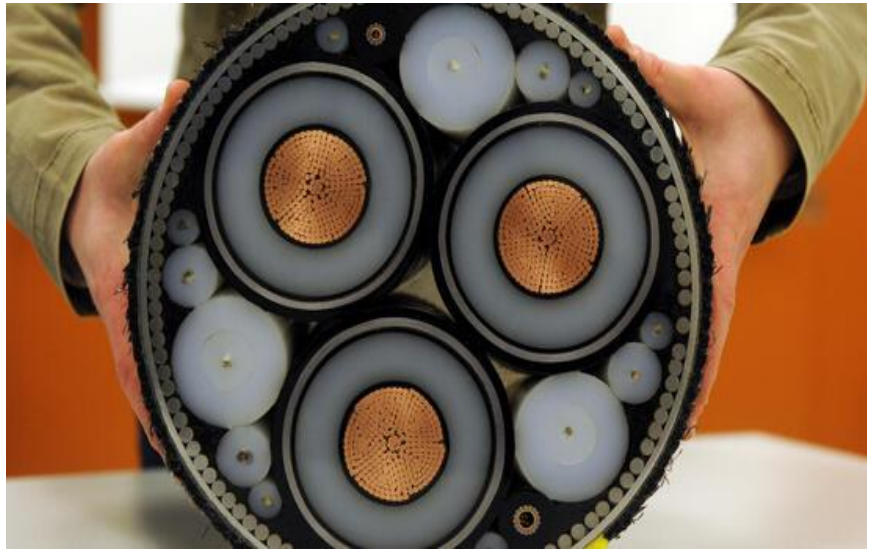
Anode: $2O^{2-} \rightarrow O_2(g) + 4e^-$

Festkörper-Elektrolyt (Oxidionenleiter)

Yttrium-stabilisiertes Zirconiumoxid YSZ

Pumpspeicherkraftwerke PSW in Deutschland und Norwegen

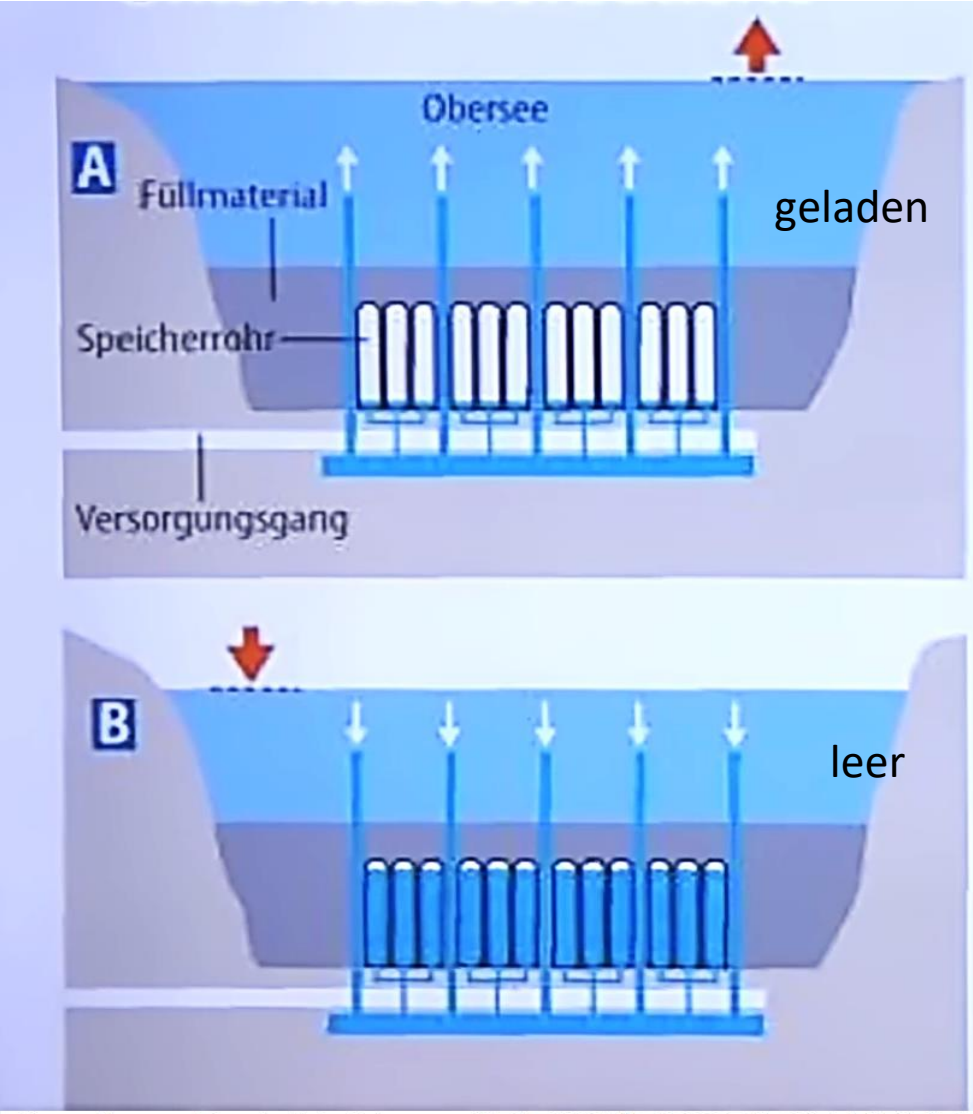
Hydro-PSW – Gesamtleistung und Kapazität Deutschlands: **ca. 15 GW / 40 GWh**
Hocheffizient: 75-85% Wirkungsgrad ohne Strom-Transport, aber Talsperren geographisch ausgeschöpft
AU + CH brauchen PSW für eigenes Geschäft mit D, aber **Norwegen hat Potential von 82.000 GWh!**
Es gibt bereits zwei Unterseekabel 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).



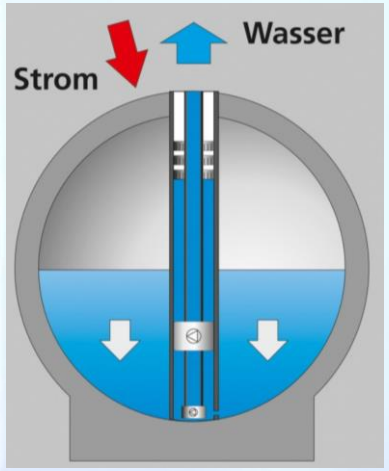
Problem: Bis zu **50% Gesamtverluste** durch das Produkt der Wirkungsgrade von Pumpen, Generatoren (0,8) x Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Mittelspannungsleitungen (0,9): 0,71 Hin- x 0,71 Rückweg von N = **0,5 Wirkungsgrad, Rest Wärme**.

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

Vom Hambacher Loch zum größten Pumpspeicher Deutschlands



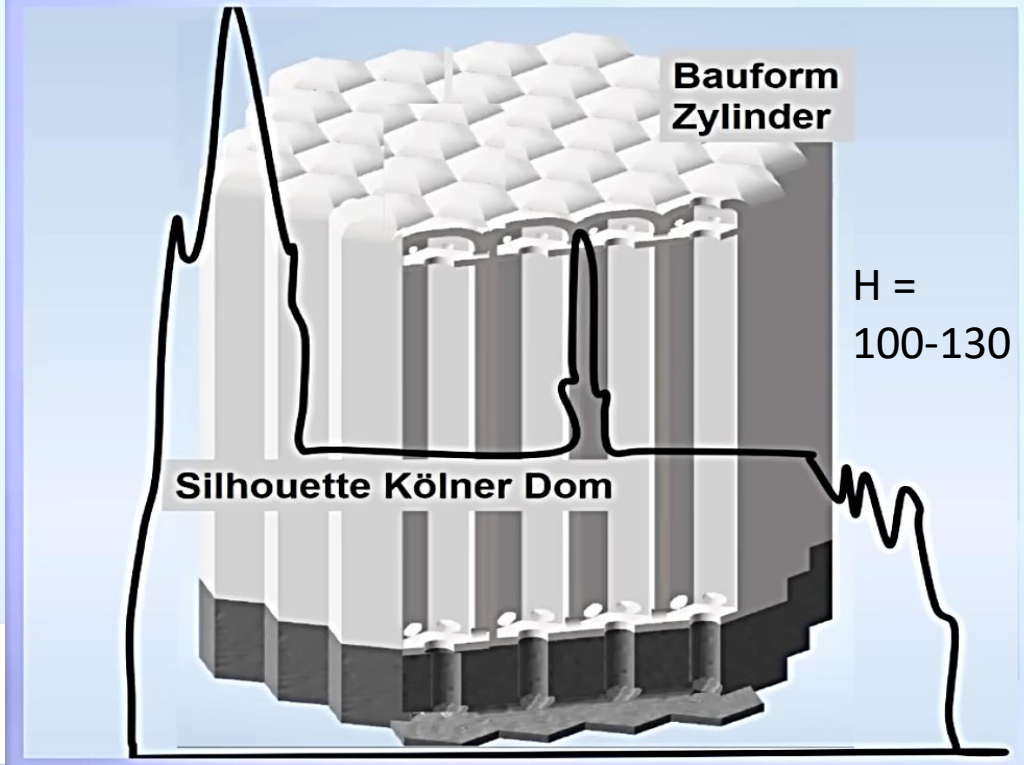
Auch 30-Meter-Betonkugeln am Meeresboden >500 m (50 bar): **Auspumpen zur Energie-speicherung**, Wasser-Einlass und Auslass über Turbine



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

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



H = 100-130 m

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

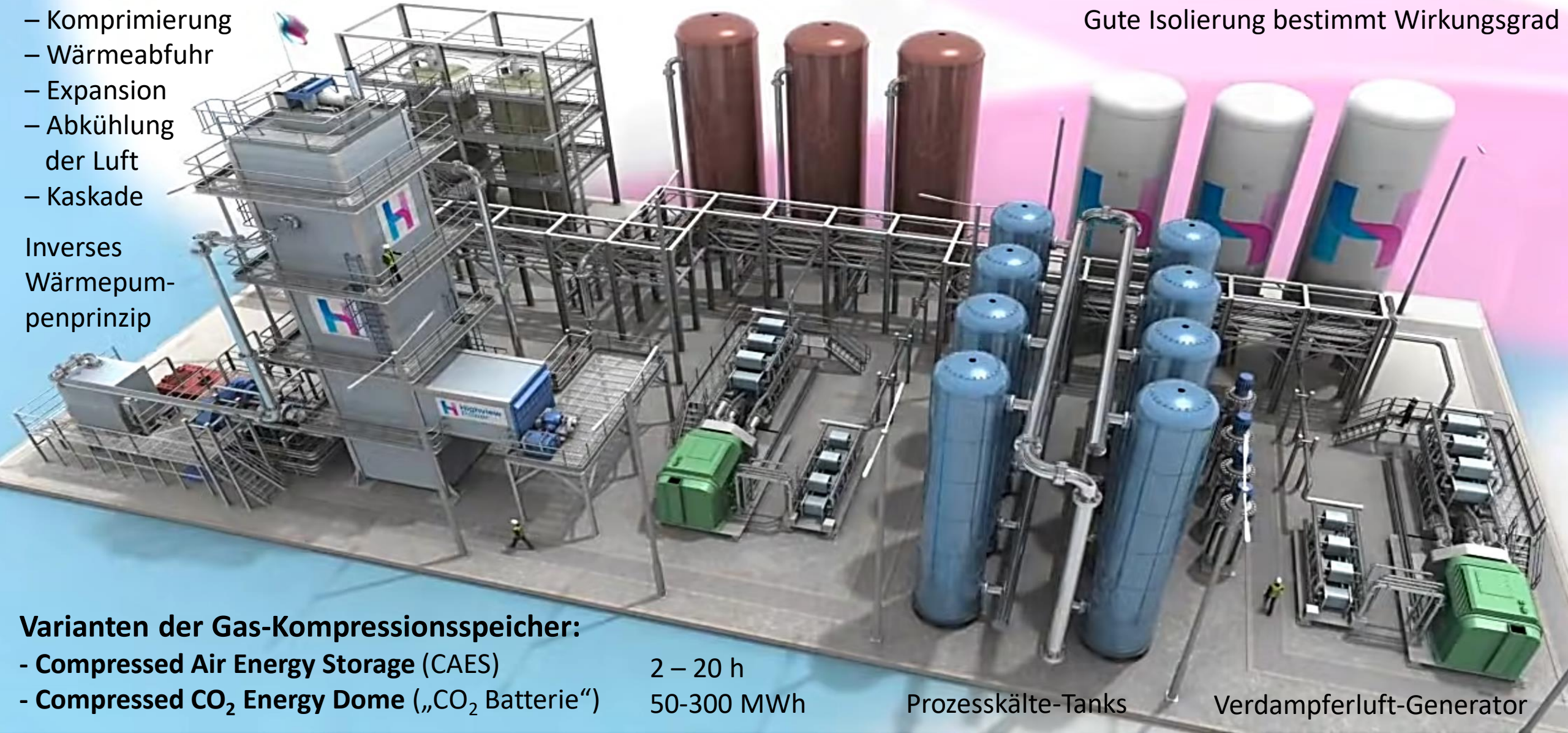
Luftverflüssiger
– Komprimierung
– Wärmeabfuhr
– Expansion
– Abkühlung der Luft
– Kaskade

Inverses Wärmepumpenprinzip

Luft-Trocknung

Prozesswärme-Tanks

Flüssigluft-Tanks -194°C
Gute Isolierung bestimmt Wirkungsgrad



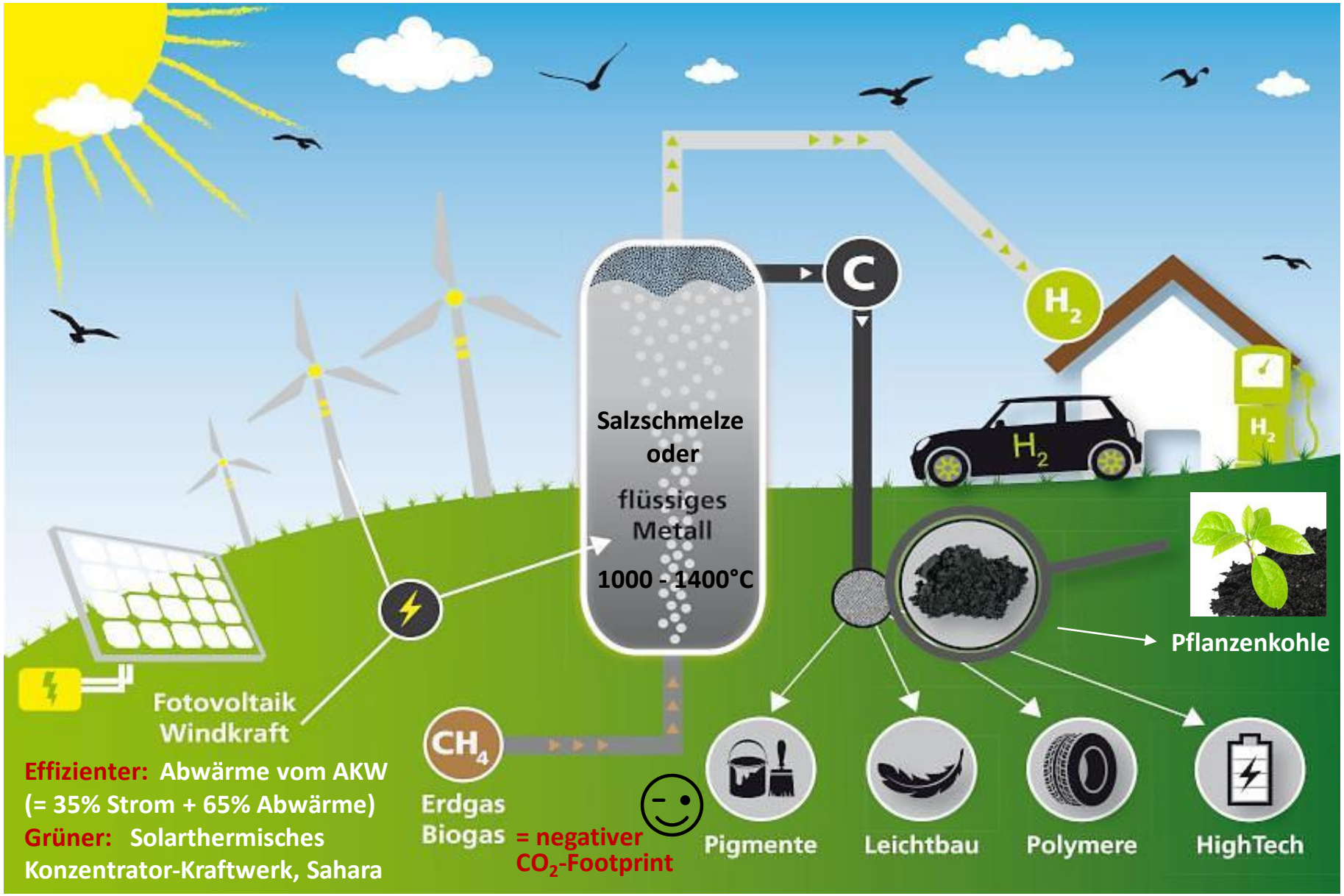
Varianten der Gas-Kompressionsspeicher:
- **Compressed Air Energy Storage** (CAES)
- **Compressed CO_2 Energy Dome** („CO_2 Batterie“)

2 – 20 h
50-300 MWh

Prozesskälte-Tanks

Verdampferluft-Generator

Speicherung thermischer und elektrischer Energie: Methan-Spaltung CH_4 zu 2 H_2 + C



Methan-Pyrolyse mittels Blasensäulenreaktor zu „türkisem Wasserstoff“

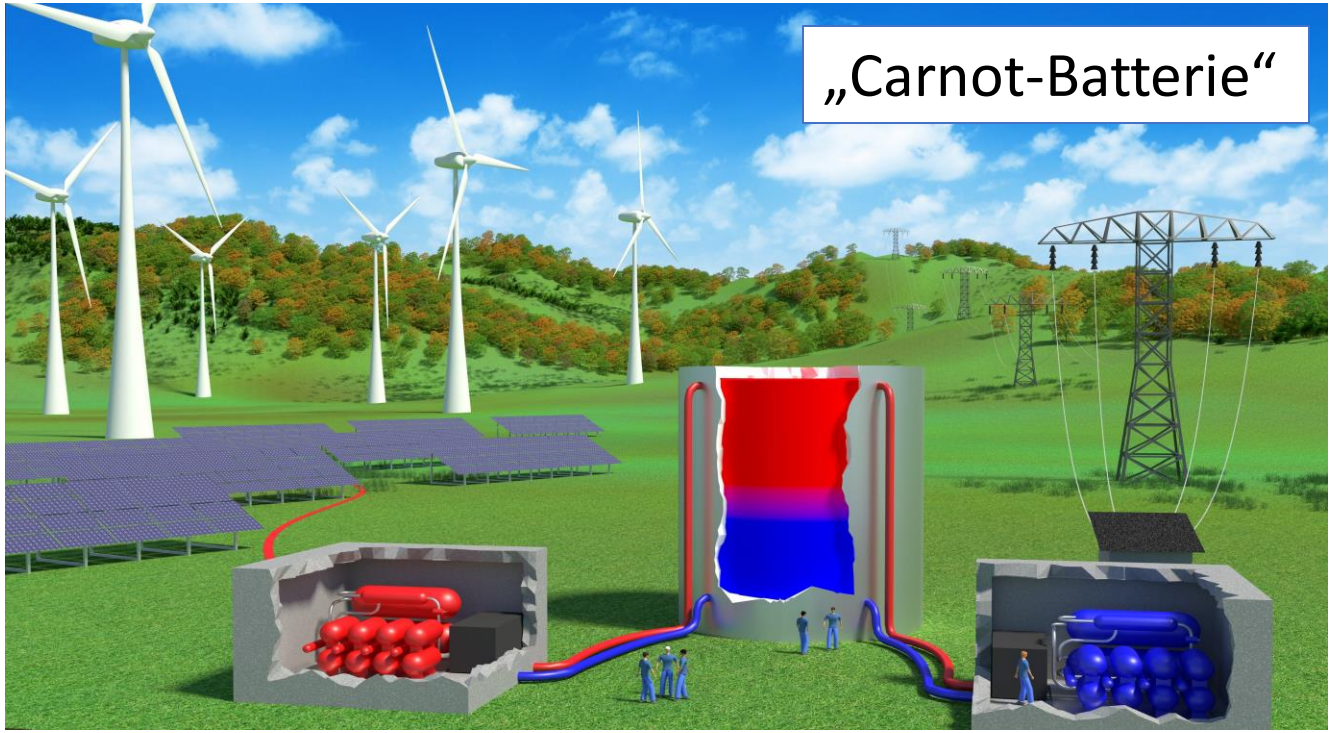
Skizze in Anlehnung an ©Kühner, KIT

Die thermische Spaltung von Methan (Erdgas) $CH_4 = 2\ H_2 + C$ bedarf **nur 13% der Energie** wie die elektrolytische Spaltung von Wasser $2\ H_2O = 2\ H_2 + O_2$

Wirkungsgrad 65%:
Brennwert von CH_4 (100%)
= 2 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

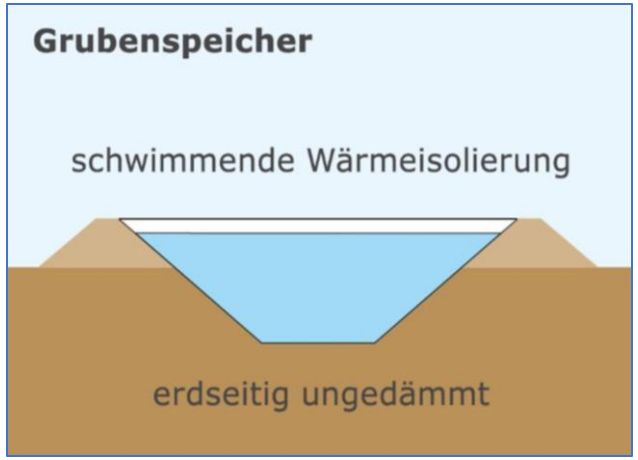


Quelle DLR Stuttgart: Weltrekord 20°C→300°C bei 200 kW Wärmeleistung.
Mit Argon als Arbeitsmedium lassen sich in einer aufwändigen Kaskade auch 400°C erreichen.
Arbeitszahl bislang leider unveröffentlicht.
Relevant für Hochtemperatur-Industrieprozesse.

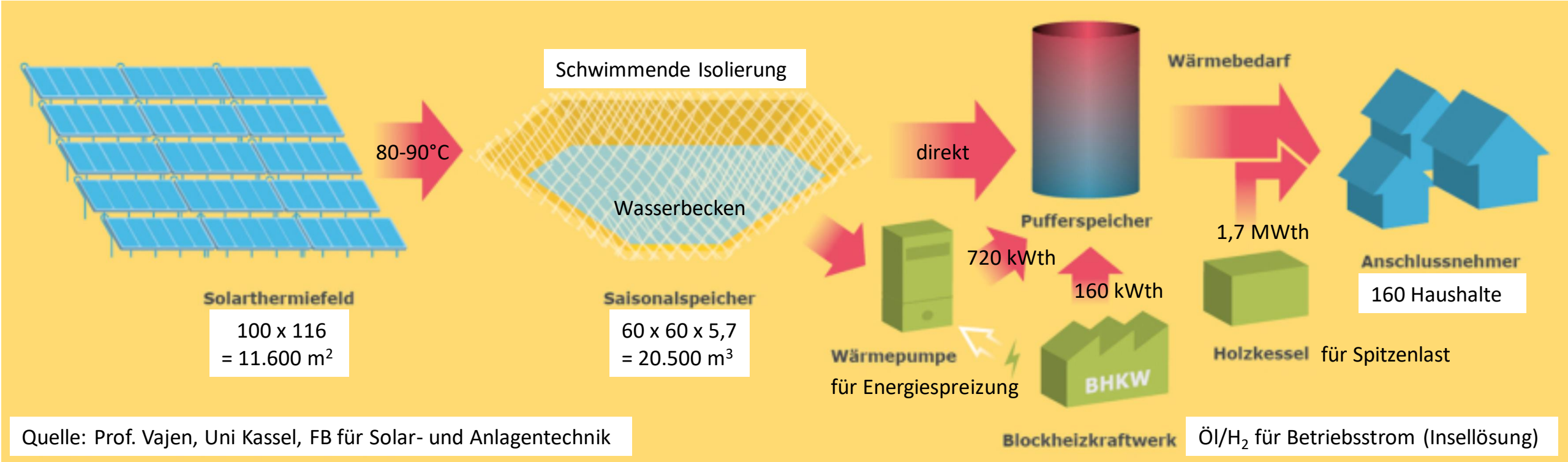
Latentwärmespeicher nutzen die latente Schmelzwärme beim Phasenübergang fest-flüssig als zusätzliches Wärmereservoir. Beispiel zuhause: **Eisspeicher** mit Smp. 0°C. Beispiel hier: **Flüssigsalzspeicher** mit Natriumnitrat Smp. 308°C. Dampf-Restwärme aus Dampfturbine rechts wird in Wärmepumpe links genutzt.
Quelle: Prof. A. Thess, DLR Institut für Technische Thermodynmik.

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?

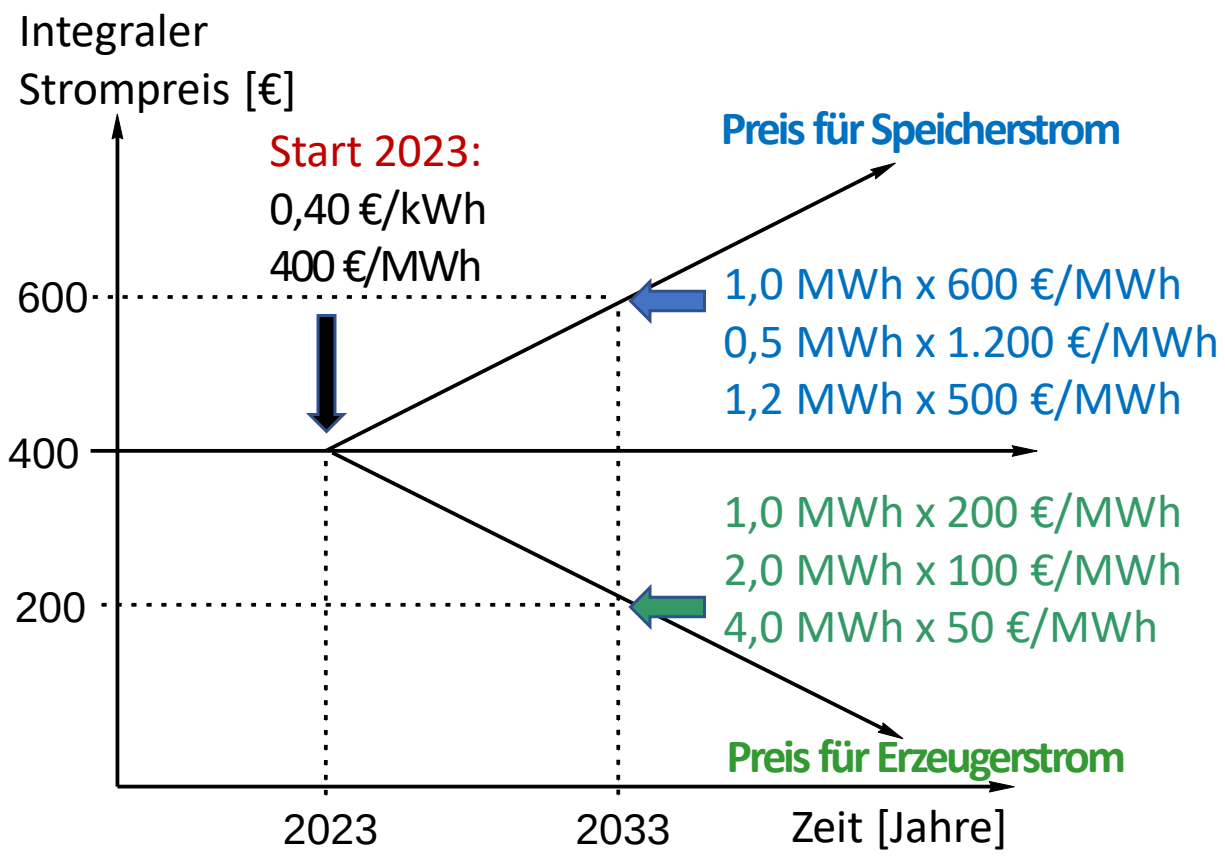


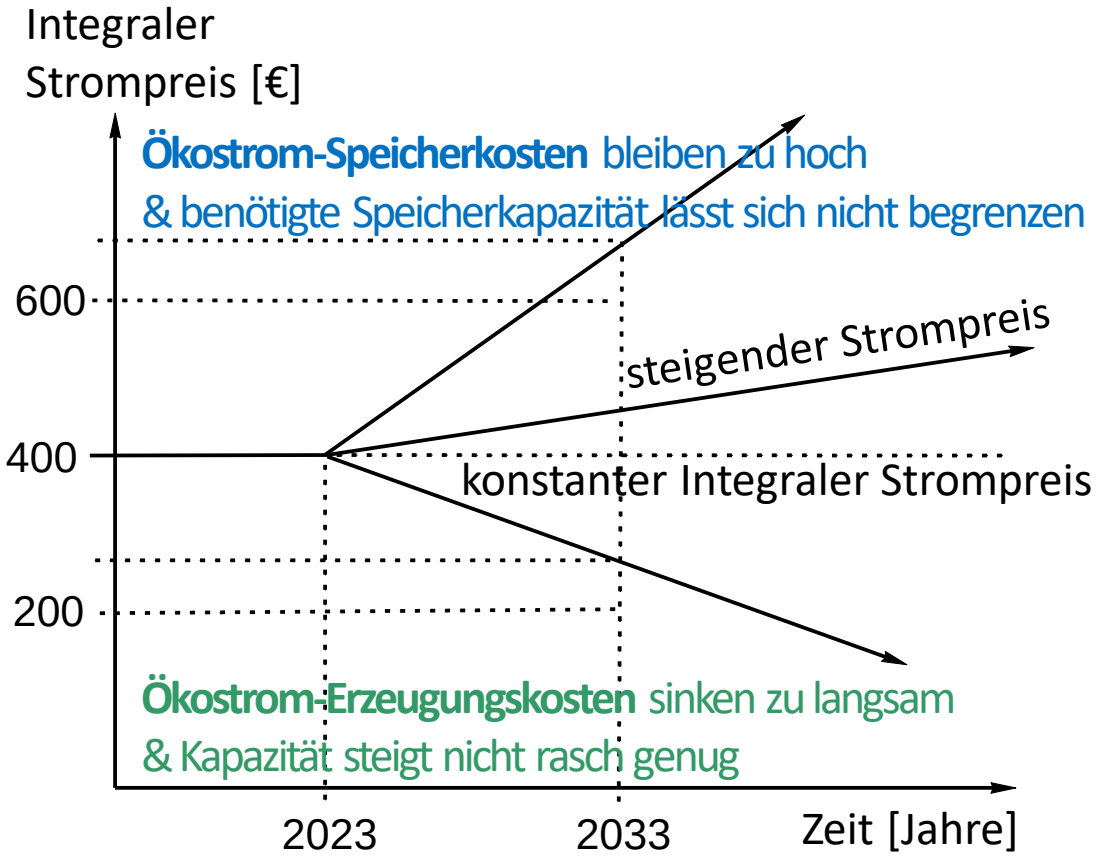
Quelle: Prof. Vajen, Uni Kassel, FB für Solar- und Anlagentechnik

Entwicklung des Integralen Ökostrompreises in Abhängigkeit von der auf den Strompreis bezogenen **Verfügungskapazität** an **Erzeugerstrom für Direktverbrauch** bzw. **Speicherstrom für Residualverbrauch** = Summe aller **Strom-Kapazitätskostenprodukte** (Strom-KKP) [€]

= Σ (Kapazität [Energiemenge MWh] x Kosten [€/MWh])

Strompreis: bislang 50-25-25 Steuern-Erzeugung-Netze, zukünftig + teure Speicherung





Quelle: Eigene Analyse, ähnlich lässt sich auch ein Wasserstoff-KKP oder Fernwärme-KKP definieren!

FAZIT: 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 Erzeugungsmethoden unseren Strompreis auf ein international kompetitives Maß runter, um unseren Wohlstand und die wirtschaftliche Stärke, somit unseren geschätzten Sozialstaat zu bewahren!