4. Sicherungstagung – Verein NH/HH-Recycling

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

House of Energy

Energiewende und Digitalisierung – Aufbau eines neuen Systems

Symposium am 14.05.2025 in Regensburg

Die Unterlagen sind ausschließlich zu Ihrer persönlichen Information

Prof. Dr.-Ing. Peter Birkner

Honorarprofessor Bergische Universität Wuppertal
Geschäftsführer House of Energy, e.V., Kassel

Gefördert durch
HESSEN
Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen

House of Energy – Innovationen im Dreieck von Politik, Wirtschaft & Wissenschaft generieren

Das House of Energy generiert **Innovationen** für eine **nachhaltige Energiewende**

Gefördert durch
HESSEN
Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr, Wohnen und ländlichen Raum

Ganzheitliches, transdisziplinäres und vernetztes Vorgehen des House of Energy

House of Energy – Holistischer & transdisziplinärer Denkansatz des Innovationsclusters

- **Systemverständnis** generiert Anforderungen
- **Technologie** schafft Realisierungsoptionen
- **Materialien** bilden die Grundlage; **Kreislaufwirtschaft** ist wichtig
- **Rechtlicher Ordnungsrahmen** beeinflusst Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit
- **Finanzierung** ist sicherzustellen; **Finanzströme** sind ein Transformationshebel
- **Akzeptanz** bestimmt Implementierung (Partizipation, Integration)
- **Erfahrungen** werden kommuniziert
- **Wissen** und **Fähigkeiten** sind zu entwickeln
- **Marktmodelle** mit ökologischen und sozialen Randbedingungen sind ein Optimierungswerkzeug komplexer und zeitvariabler Systeme

House of Energy e.V. –
Im Gründerzentrum
„Science Park“ in Kassel

SCIENCE PARK KASSEL

House of Energy e.V. –
Landesgefördertes
Innovationscluster

HESSEN

House of Energy – Vier Aktivitätssäulen & Programmatik „Von der Invention zur Innovation“

1 **System-verständnis** und **Projektimpulse**

2 **Projekte** mit transdiszipli-närem Ansatz

House of Energy

SMART GRID LAB

4 **Transfer in Wirtschaft und Gründungen**

3 Weitergabe von **Wissen**

genesis

Koalitionsvertrag Hessen 2024 – 2029 (S. 147)

Die Koalitionspartner

etablieren in Zusammenarbeit mit

- **Fraunhofer IEE** (Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnologie und dem
- **House of Energy**

das „Excellenz-Cluster“ **„Energie 2040“** für Innovationen im Energiesektor

House of Energy – Themenfelder & Angebote

Aktuelle **Projekte / Projektentwicklungen** in Hessen, Deutschland und der EU

Austausch mit **Partnern** u.a. in den USA, UK, Argentinien, Chile, Marokko, Indien, Korea sowie mehreren EU-Ländern

- Dekarbonisierung im **sozialen Wohnungsbau**
- Dekarbonisierung und Sektorenkopplung im **Gewerbebereich**
- Wasserstoff in der **Industrie**
- Digitalisierung **elektrischer Netze** (Smart Grids; IT/OT Security)
- Aktive Bauelemente in **Hochspannungsnetzen**
- Neue elektrische **Energiespeicher**
- **Kohlenstoffmanagement** (CC-S/U)
- Klimaneutraler **Wasserstoff** aus Erdgas

House of Energy Newsletter

Registrierung unter
www.house-of-energy.org

House of Energy Kongress

House of Energy – Themenfelder und Angebote

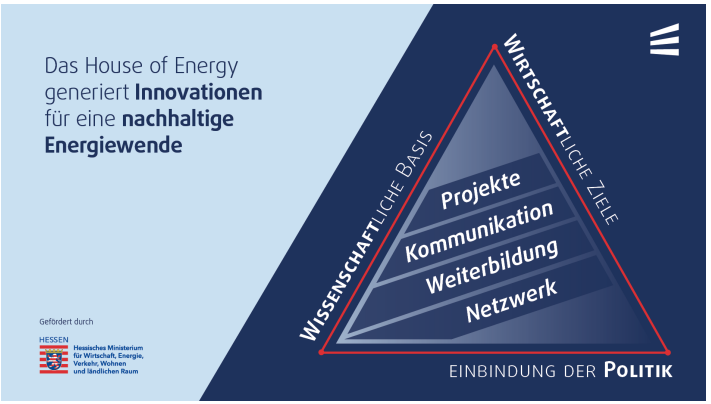
2025 – 10 Jahre House of Energy e.V.

Erfolgsfaktoren

- **Arbeitsweise:**
  Ganzheitlich, transdisziplinär, vernetzt, wissensbasiert, pragmatisch, zielorientiert

- **Basis:**
  Vertrauen und Kompetenz

- **Fokus:**
  Transformative Innovationen



Energiewende mit Zielsetzung Dekabonisierung – Optionen, Lösungsräume & Konsequenzen

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Dekarbonisierung:

- Bereitstellung von Nutzenergie ohne Emission von Klimagasen **(Variante Null)**
- Klimaneutrale Bereitstellung von Nutzenergie **(Variante Netto-Null)**
- Keine Verabschiedung aus der Kohlenstoffchemie (z.B. Kunststoffe, Pharmazeutika)

DL – nur, sofort und zuhause

Optionen international:

- **Grüne Energiequellen (Defossilisierung, Denuklearisierung)**
- Fossile Energiequellen mit **Kohlendioxidabscheidung und Speicherung** (CCS)
- Fossile Energiequellen und Umwandlung in **kohlendioxidfreie Brennstoffe** (z.B. H_2)
- **Nukleartechnologien**
- **Verbrauchsreduktion** (Effizienz, Suffizienz)

→ **Das Set an gewählten Methoden bestimmt die Konsistenz des Energiesystems**

Grüner Energiequellen biete einen unstrukturierten Überfluss (mit thermodynamischen Grenzen) an Energie. Es gibt keine **quantitativen** sondern **qualitative** Herausforderungen, wie: **geringe Energiedichte, volatil, intermittierend** und **geringe Verfügbarkeit.** Entsprechend ergeben sich die zentralen Themenfelder:

Leistung – **Finanzierung, Errichtung** und **Beherrschung (Flexibilität, Vernetzung)**
Fläche – **Verfügbarkeit, Akzeptanz** der Bürger und **Biodiversität**

Blickwinkel auf die Energiewende – Erlangung von Wohlstand durch Energieeinsatz

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Globale Entwicklung seit 1850

- Der **globale Norden und China** entwickeln ihren Wohlstand durch Einsatz von fossilen Energieträgern in Verbindung mit hohen CO_2-Emissionen
- Europa, die USA und China verantworten ca. 2/3 der bisherigen Emissionen (2.500 Gt)
- Der **globale Süden** möchte seinen Wohlstand auf das gleiche Niveau anheben. Dazu benötigt er **mehr Energie**. Ethisches Recht auf Ressourcennutzung und Entwicklung
- Eine **Kopie der Strategie des globalen Nordens** würde die globale Temperatur enorm erhöhen. **Nachhaltige und umsetzbare Alternativen** sind gefragt
- Zur Einhaltung des **2-K-Limits** („2 Grad Ziel“) können global maximal noch 1.000 Gt CO_2 (bei Kollateralschäden) emittiert werden

Herausforderungen 2025

- Versorgungsengpässe für **fossile Brennstoffe** sind mittelfristig nicht zu erwarten
- Global sind **über 80 %** der eingesetzten **Primärenergieträger** fossiler Natur
- Der **Klimawandel** hat eingesetzt, systemische Wetterverschiebungen existieren, globale Luft- und Meeresströmungen werden schwächer
- **Prävention und Adaptation** nötig
- Die verbleibende Aufnahmefähigkeit von CO_2 durch die **Atmosphäre** nimmt rapide ab
- CO_2 steht für ca. 75 % der **Klimagase**

Blickwinkel auf die Energiewende – Optionen für eine Transformation

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Lösungsansätze 2025

Der **Energiesektor** steht für ca. 75 % der Treibhausgasemissionen. Die **Klimaneutralität** des Sektors (Ziel) kann durch Nutzung der folgenden **Optionen** (Wege) erreicht werden:

- Grüne Energien
- Kerntechnologien
- Kohlenstoffmanagement
- Umgang / Leben mit Klimawandel (Temperatur, Wasser, Wind)

Kernfrage: Sind grüne Technologien ein Weg oder das Ziel in sich?

Dabei sind folgende Räume zu betrachten:

- Deutschland (Import von Energie und Technik, heimische Wertschöpfung von Energie und Technik)
- Europa (Export von Energie und Technik aus Deutschland)
- Welt (Export von Technik aus Deutschland)

Der internationale **Kunde** bestimmt, was er kauft und Energiepolitik ist immer auch Machtpolitik. Auch **der Umgang, das Leben mit dem Klimawandel** erfordert Technik

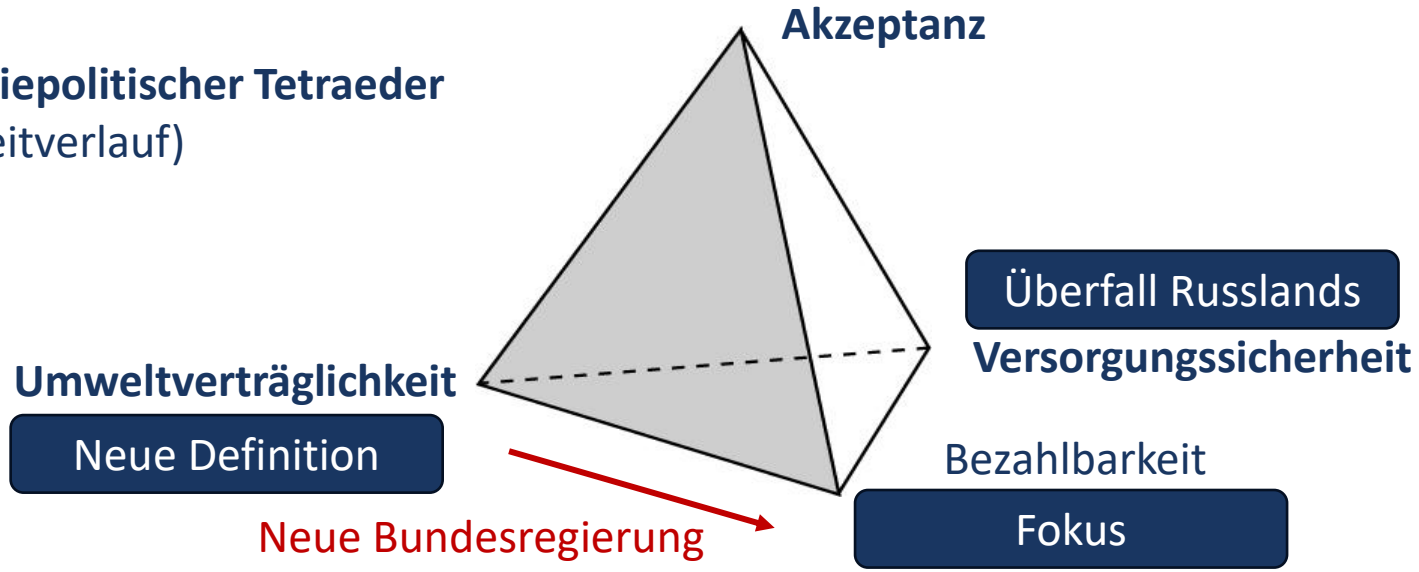
Blickwinkel auf die Energiewende – Sicherung von Wohlstand & Zielsystem

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Randbedingungen

- Preiswerte Energie und Exporte sichern den **Standort Deutschland**
- **Energieversorgung** muss auch sicher, umweltverträglich und akzeptiert sein
- Das Energiesystem der Zukunft wird verschieden **regionale Ausprägungen** haben (Modularität, Konsistenz)
- **Verbindungen** zwischen Quellen und Senken aber auch **Regionen** sind erforderlich (Interoperabilität)
- Vielversprechende Ansätze bestehen in der Neuordnung (Kombination) von **Energie- und Stoffströmen** in „Ökosystemen“ sowie in der Bereitstellung von vermarktbaren **Koppelprodukten** (Energie und Stoffe)

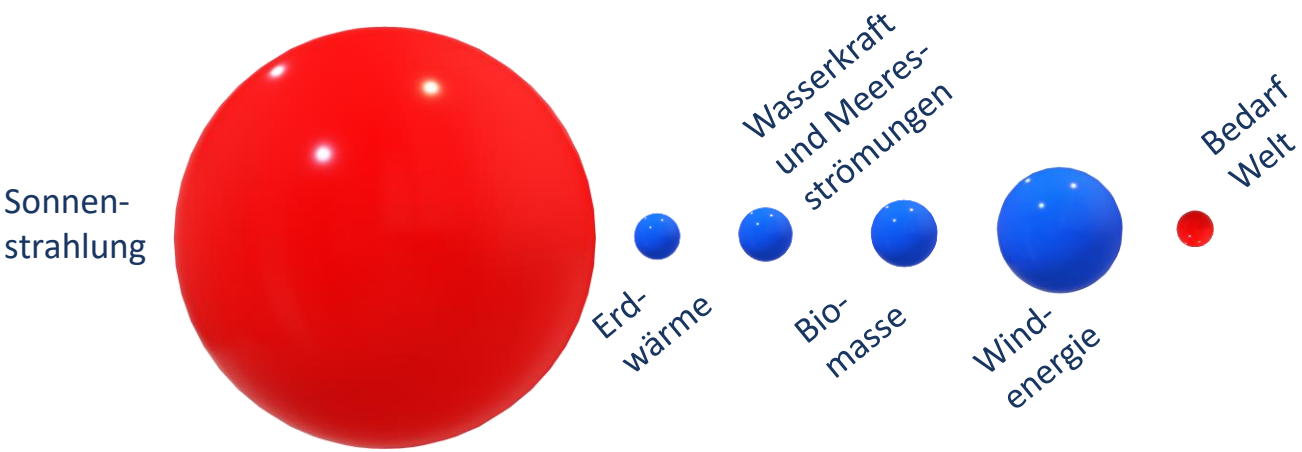
Energiepolitischer Tetraeder
(im Zeitverlauf)



Klimaschutz & Nachhaltigkeit durch Energiewende – Quantität & Qualität

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem ist von einem unstrukturierten Überfluss (mit thermodynamischen Grenzen) an Energie geprägt (**Quantität**)



Vereinfacht nach Nitsch (DLR): Das jährliche Angebot erneuerbarer Energien kann den Weltenergiebedarf ca. 20.000-fach decken

Thermodynamisch nach Kleidon (MPI): „nur“ ca. 1.000 TW nutzbar; davon aktuell 5 % genutzt

Die **Qualität** der Energie ist jedoch herausfordernd:

Geringe Energiedichte, volatil, intermittierend und **geringe Verfügbarkeit**

Entsprechend ergeben sich die zentralen Themenfelder:

Leistung – **Finanzierung, Errichtung** und **Beherrschung (Flexibilität)**
Fläche – **Verfügbarkeit, Akzeptanz** der Bürger und **Biodiversität**

Klimaschutz & Nachhaltigkeit durch Energiewende – Szenario der globalen Energieversorgung durch PV

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

(Fiktives) Szenario „Globale Energiewende in der Sahara“

- Globaler Endenergiebedarf
  ca. 132 · 10^{12} kWh = **132 Mrd. MWh**
- Solare Strahlung Sahara
  2.500 kWh / (m² a)
- Erforderliche Fläche **1.027 km x 1.027 km**
  (**12 % Sahara**; entspricht 12 % USA)

- Fläche – Leistung – Investitionen
  (1 ha ≙ 0,5 MW ≙ 0,7 Mio. €)
- PV-Leistung 52.800 GW (Deutschland ca. 100 GW) – ca. **528 x PV-Leistung in DL**
- Aktuelle globale PV-Jahresproduktion ca. 500 GW – ca. **106 x Globale Produktion**
- Weitere Infrastrukturelement (Fundamente, Träger, Leitungen, Speicher, …) nicht berücksichtigt
- Investitionsbedarf für PV-Anlage 74.920 Mrd. € – ca. **2/3 Welt-BSP**
- Welt-BSP 110.100 Mrd. $

Schlussfolgerung: Im Szenario im Grundsatz global konzertiert umsetzbar
Aber: Wie sieht es mit der globalen Zusammenarbeit aus?

Säulen der Energiewende – Konsistenz des Energiesystems der Zukunft

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Energiewende – Drei systemische Handlungsstränge – Generalistisch aber hier Fokus Deutschland – Digitalisierung als unterstützendes Element:

1. **Erneuerbare Energien als Basis (inkl. Netze und Stabilisierung – Ort und Zeit)**
   (Instrumente: Erneuerbare-Energien-Kraftwerke, Nutzung von bisheriger „Abwärme“, elektrische Energie, elektrische Netze, Wasserstoffnetze, Flexibilität, Sektorenkopplung, Digitalisierung)
2. **Bedarfs- und Komplexitätsreduktion durch Suffizienz (Vermeidung) und Effizienz (Verluste)**
   (Instrumente: Digitalisierung, Elektrifizierung, Organisation, Technik)
3. **Dauerhafte Bindung von Klimagasen** (v.a. Kohlendioxid)
   (Instrumente: Abscheidungstechnologien vor oder nach dem Prozess, Mehrfachnutzung von Kohlenstoff, permanente Bindung oder Lagerung; exakte Bilanzierung; neue Rolle von Holz; neue Verfahren Pyrolyse und Plasmalyse)

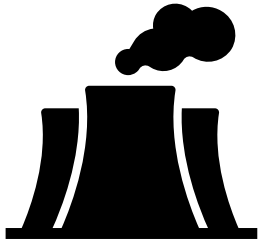
Diskussion der Konsistenz des technischen Zielsystems und des Überganssystems:

- Welche Säule spielt welche Rolle (**Konsistenz**)?
- Welchen **Technologien** kommen zum Einsatz? Welche Rolle spielen Kerntechnologien?
- Geht es um **Dekarbonisierung** oder die Etablierung **grüner Technologien**?

Grüne Energiewende – Flächen- & Infrastruktur-bedarf – Thermisches Kraftwerk vs. Solarparks (DL)

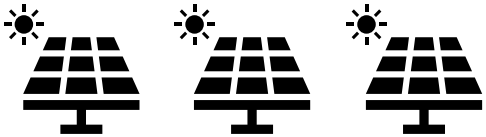
BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Thermisches Kraftwerk



- Exemplarische Leistung P = 1 GW
- Jahresbenutzungsdauer T = 6.000 h
- Bereitgestellte elektrische Energie: E = 6 TWh
- Flächenbedarf Kraftwerk (ohne Gewinnung Energieträger; 2 GW pro km²): **F = 0,5 km²**

Photovoltaisches Kraftwerk



- Exemplarische Leistung P = 6 GW
- Jahresbenutzungsdauer T = 1.000 h
- Bereitgestellte elektrische Energie: E = 6 TWh
- Flächenbedarf Kraftwerk (0,05 TWh pro 1 km²; 0,05 GW pro 1 km²): **F = 120 km²**

Faktor 240

Jahresbenutzungsdauer

Faktor 6

Faktor 40

Leistungsdichte

- Fundmental geändertes Energiesystem mit neuen Parametern
- Aufbau einer enormen Menge an Infrastruktur notwendig
- Deutlich erhöhter Platzbedarf
- Stabilisierung des Energiesystems erforderlich

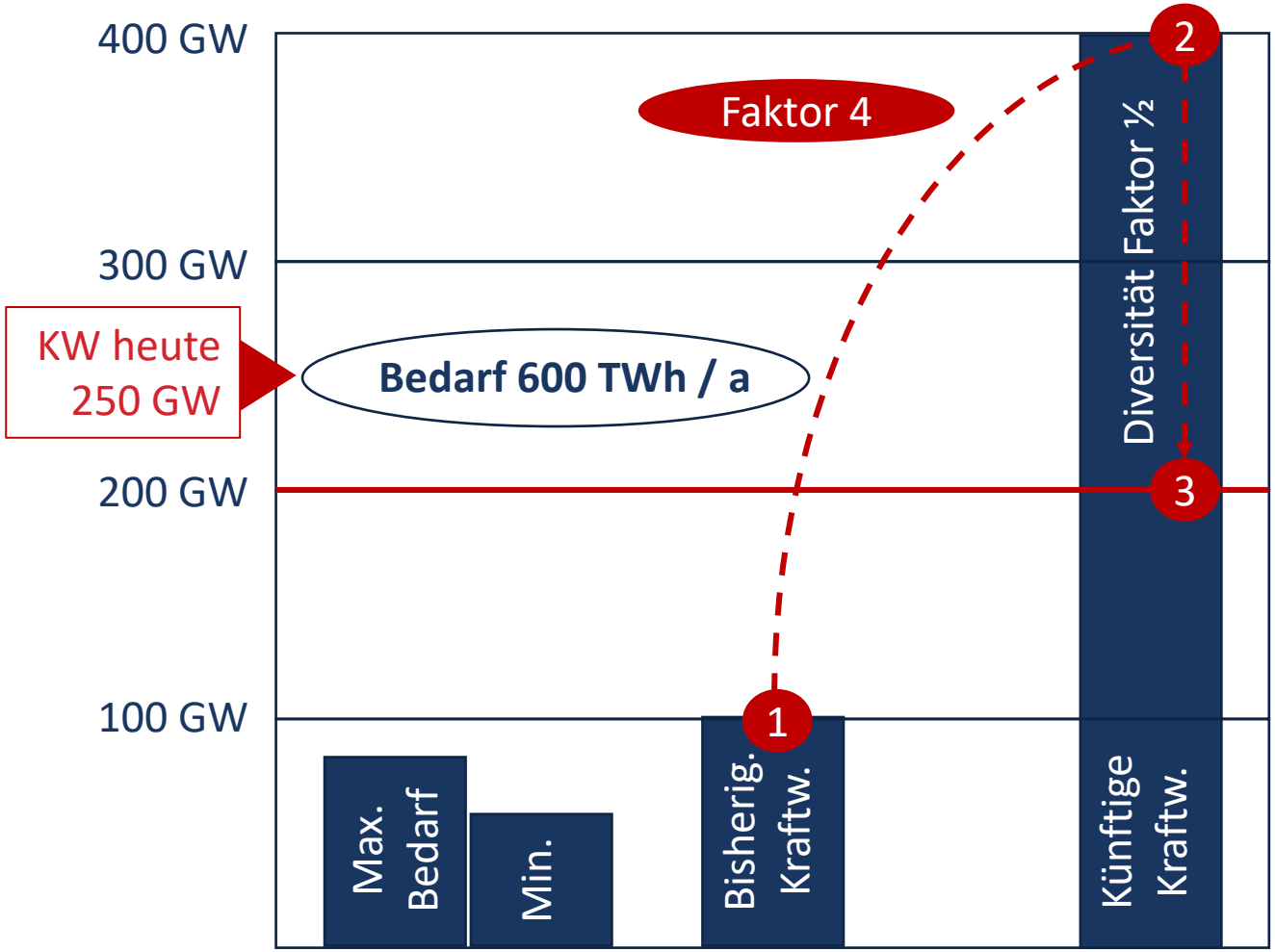
- Kapitalbedarf
- Zeitbedarf
- Bedarf an Arbeitskräften und Rohstoffen
- Managementaufgabe

Defossilisierung des Stromsektors in Deutschland – Hochrechnung der verfügbaren Technik – Leistung

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Stromwende in Deutschland mit aktuell verfügbarer Technologie (**80 % volatile erneuerbare Energien im Stromsektor**; zusätzlich steuerbare KWK und Gaskraftwerke auf Gas- oder Wasserstoffbasis)

Darstellung Stromwende



Geringe Betriebsdauer und Brennstoffkosten

Kapazität Verbundnetz

Dezentrale Leistungsbilanzierung

Von der Strom- zur Energiewende – Business Case der Defossilisierung von Wirtschaft & Gesellschaft

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

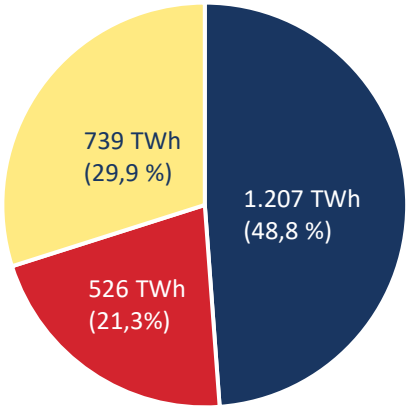
Die Energiewende ist eine **Infrastrukturwende.** Bisherige **Brennstoffkosten** werden volks- und betriebswirtschaftlich durch **Kapitalkosten** ersetzt. Energiewende wird damit zur Kapitalwende. Je kostengünstiger die neue Infrastruktur und je teurer die Brennstoffkosten, desto günstiger stellt sich der **Business Case** dar. Dennoch ist er nur mittelfristig positiv.

Endenergieverbrauch in Deutschland 2018 nach Strom, Wärme und Verkehr in TWh

Sektorenkopplung:

- Effizienz durch Elektrifizierung
- Stabilität für Stromsystem
- Suffizienz durch Digitalisierung

Quelle:
Agentur für EE 2019



Wärme und Kälte ohne Strom | Strom | Verkehr ohne Strom

Konsistenz / Summe heute:
2.473 TWh (2.500 TWh)

Effizienz
Suffizienz

Konsistenz / Summe Ziel:
1.500 TWh

Isolierte Stromwende ist **un**wirtschaftlich;
Energiewende muss auch Verkehr und Wärme / Kälte mit beinhalten;
Nur so kann der Infrastrukturwandel durch wegfallende Energieimporte finanziert werden

Isolierte Stromwende reicht **nicht** aus, um den Ausstoß an Treibhausgasen in ausreichendem Maße zu reduzieren; internationale Implikationen

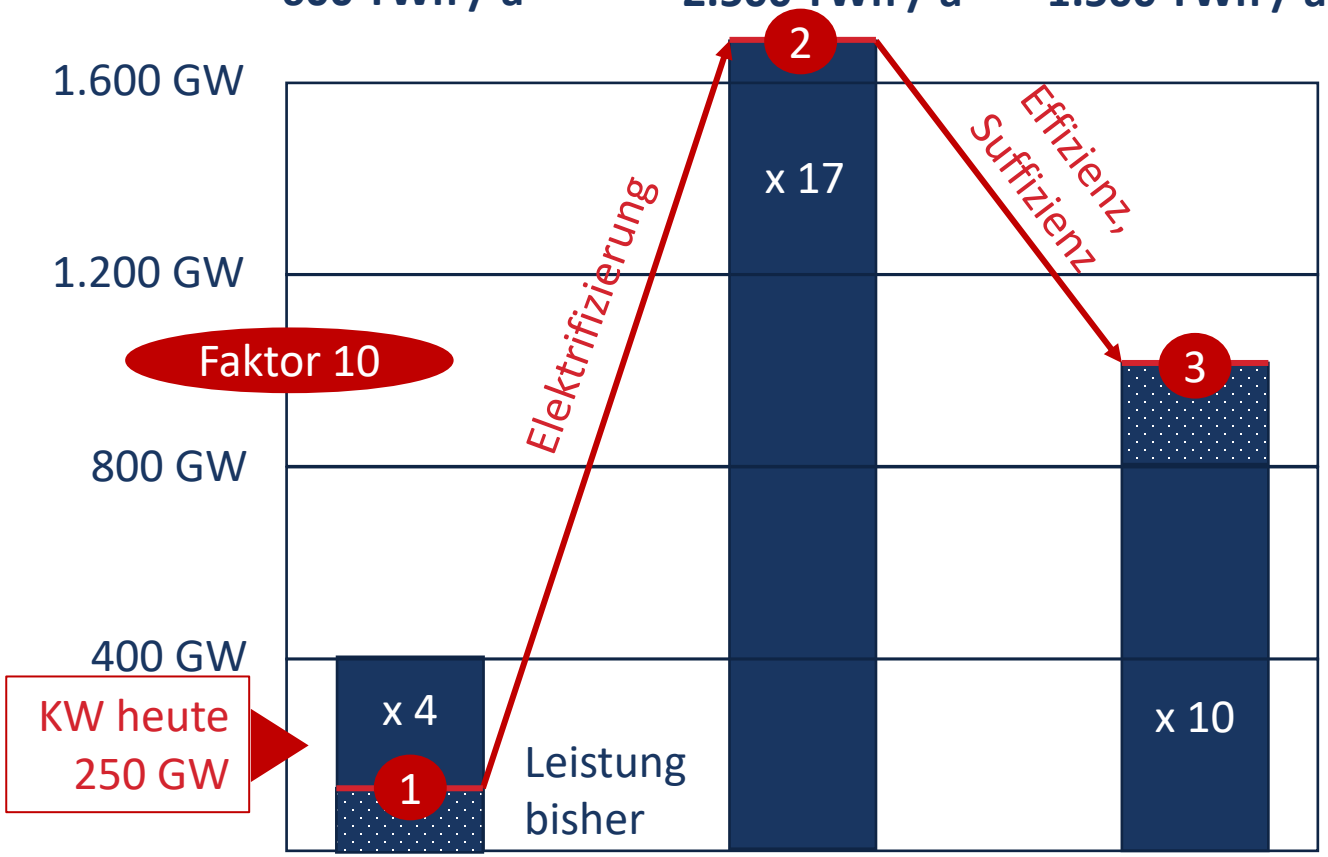
Grüne Energiewende – Elektrifizierung plus Zunahme von Suffizienz & Effizienz – Leistung (DL)

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Darstellung Energiewende

Stromwende, Energiewende, Suffizienz- und Effizienzwende in Deutschland mit aktuell verfügbarer Technologie
(80 % volatile erneuerbare Energien im Stromsektor; zusätzlich steuerbare KWK und Gaskraftwerke auf Gas- oder Wasserstoffbasis)

600 TWh / a **2.500 TWh / a** **1.500 TWh / a** **Jahresenergiebedarf**



Quellen:
EE und 300 TWh Gas (aktuell rund 950 TWh Erdgas)

Direktanwendung
EE und Gas 300 TWh

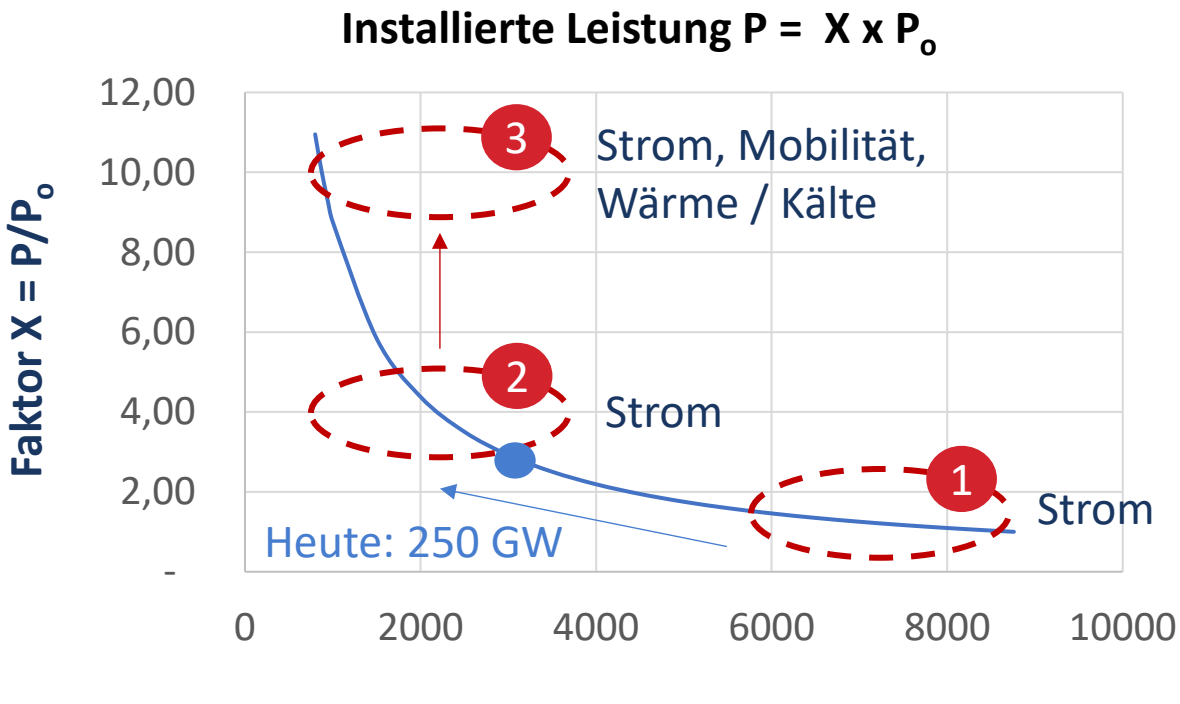
Netzeinspeisung
Strom aus EE und Gas 1.200 TWh

Rolle von Importen und Interimslösungen?

Strom- + Energie- + Effizienz- und Suffizienzwende + Kapitalwende

Grüne Energiewende & elektrisches System – Elektrizität, Fläche, Leistung & Flexibilität (DL)

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL



Im Ziel: Zentrale Endenergieform Elektrizität

1. Thermisches System „Strom“: E, T
2. Regenerativ System „Strom“: E, ¼·T
3. Regenerativ System „Energie“: 2,5·E, ¼·T

Installierte Leistung P = X x P_o
Jahresbenutzungsdauer T
Bereitgestellte Energie E

P_o = E / 8.760 h (mittlere Leistung)
P = E / T = (P_o x 8.760 h) / T
X = P /P_o = 8.760 h / T

Energiebereitstellung durch Quellen mit niedriger Jahresbenutzungsdauer erfordert hohe **Leistungen.** Quellen mit **niedriger Energiedichte** haben **hohen Flächenbedarf**

Volatilität und Intermittenz der Energiebereitstellung erfordert **Flexibilität** und **Koordination** zu ihrer Beherrschung

Strategische Eckpunkte für die Umsetzung der Energie- / Leistungswende – Digitalisierung

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

1 **Umfassender Ansatz (Anwendungsseite):**
- Elektrizität, Mobilität, Wärme / Kälte

2 **Problem reduzieren (Bedarfsreduktion und Anergienutzung):**
- Effizienz, Suffizienz (Technologiefrage, Elektrifizierung)
- Anergie als Basis für Exergie (Technologiefrage)
- Instrument **Digitalisierung** (Identifikation und Information)

3 **Problem beherrschen (regenerative Energie und Stabilisierung):**
- Konsistenz (Schwerpunktsetzung und Rollen)
- Diversität und Vernetzung (Strukturfrage)
- Flexibilität und Koordination (Technologiefrage)
- Subsidiarität und Zellularität (Strukturfrage)
- Sektorenkopplung (Technologiefrage)
- Modifikation von Infrastruktur (Technologiefrage)
- Instrument **Digitalisierung** (Koordination und Stabilisierung)

4 **Chancen (durch Digitalisierung) nutzen:**
- Prozessoptimierung, Predictive Maintenance, Qualitätssteigerung, Workforce Management, Augmented Reality, …

Markt und Regulierung (Rechtsrahmen)

Finanzierung

Geschäftsmodelle

Raum und Biodiversität

Akzeptanz

Recycling

Import / heimische Produktion

End- & Nutzenergie – Kategorien & Formen – Effizienz & Suffizienz – Weniger ist mehr

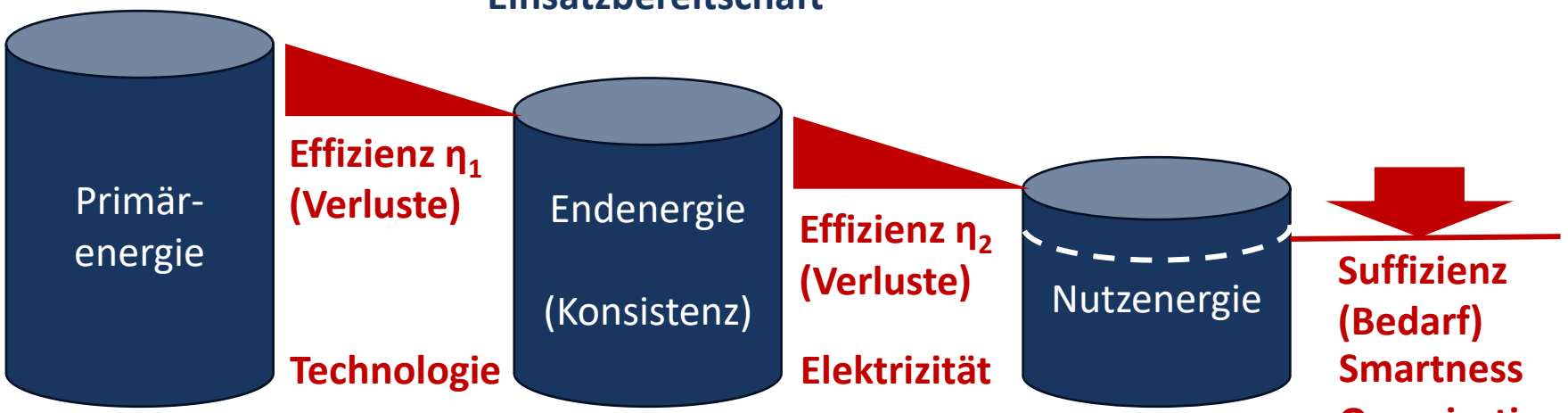
BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Ziel: Weniger Endenergieeinsatz, gleicher Komfort

Rohform – Vorliegende Form

Nutzbare Form – Verfügbarkeit, Einsatzbereitschaft

Gewünschte Form – Einsatz, Nutzung



- Erneuerbare
- Kernenergie
- Fossile

- Moleküle (fossil)
- Elektrizität
- Fernwärme

Vergangenheit

- Elektrizität
- Moleküle (grün, CO_2-neutral)
- Fernwärme

Zukunft

- Transport
- Antrieb
- Wärme / Kälte
- Licht
- Daten

Eigenschaften der Energie: Verfügbarkeit per se, **Qualität** (Umweltverträglichkeit, Preis, Sicherheit) and **Form** (Elektrizität, Moleküle, Wärme- / Kältemedium)

Grüne Energiewende Deutschland – Etablierung des aktuellen Zielsystems

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

1. **Endenergiebedarf senken durch kluge Effizienz und Suffizienz – ca. -40 %** (Elektrifizierung, Digitalisierung, energetische Sanierung)
2. **Elektrische Energie ausbauen und bisherige fossile Energieträger ersetzen – ca. + 100 %** (Mobilität, Wärme, Kälte, Industrie – Effizienz)
3. **(Grünen) Wasserstoff als ergänzenden Energieträger zu elektrischer Energie (wo nötig) aufbauen – ca. 50 % bis 60 % des heutigen Erdgasbedarfs** (McKinsey, Handelsblatt 10./11./12.09.2021)
   (Mobilität, Langzeitspeicher, Industrie – Effektivität; Zukunft Gasverteilungsnetze)
4. **Regenerative synthetische Treibstoffe als ergänzende Energieträger zu Wasserstoff und elektrischer Energie (wo nötig) aufbauen** (Mobilität – Effektivität)
5. **Kohlendioxidsenken etablieren**
   (für Klimagase aus Zementindustrie und Landwirtschaft)
6. **Optionen neuer Technologien im Auge behalten** (vor 2045)
   (Organische Solid-Flow Batterien; Wirkungsgrade und Integrationsfähigkeit von PV-Modulen; neue Materialien für PV-Module; technisches Kohlendioxidmanagement)
7. **Zeit nach 2045 überdenken – Weitere Technologieoptionen zu erwarten**

Grüne Energiewende – Endenergie in Deutschland künftig

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Elektrische Energie – aktuell 550 TWh
→ **Erweiterung** auf **1 200 TWh** bei Atom-, Kohle- und Erdgasausstieg, **1 000 GW Leistung**

Σ 650 TWh

Mobilität – aktuell 750 TWh
→ Deutliche **Reduktion** durch **Effizienzerhöhung** basierend auf **Elektrifizierung** und **Digitalisierung** (ca. Faktor 0,5) – **Neue Ladeinfrastruktur**

Wärme / Kälte – aktuell 1 200 TWh (ca. Faktor 0,5)
→ Deutliche **Reduktion** durch **Effizienzerhöhung** und **Elektrifizierung**
→ Zielsystem **Wärmepumpe** und **regenerativ gespeiste Fernwärmesysteme**

Σ 300 TWh

Gas*)

300 TWh

Strom

300 TWh

1 500 TWh
(bisher 2 500 TWh)

*) Im Sinne von Energiegas

Grüne Energiewende – Transformation des Energiesystems der Zukunft (Deutschland)

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Aktueller Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Endenergieeinsatz

▪ Strom	54,4 % EE	(550 TWh; 22 %)	**570,4 TWh** **22,8 % EE**
▪ Wärme	18,1 % EE	(1.200 TWh; 48 %)	(global ca. 13 % EE)
▪ Verkehr	7,2 % EE	(750 TWh; 30 %)	

Transformation des Energiesystems (Weniger Endenergie, mehr Elektrizität)

Endenergiebedarf aktuell: 2.500 TWh — **Anteil erneuerbarer Energien 22,8 %**
(**x 4,4** ohne Bedarfsreduktion; 1.700 GW)

x 0,6

Endenergiebedarf künftig: 1.500 TWh — **Anteil erneuerbarer Energien 38,0 %**

x 2,6

Anteil erneuerbarer Energien 100,0 %
(1.000 GW, nicht alles öffentliches Netz)

Interessante **Technologieentwicklungen** (Partielle „Game Changer“)

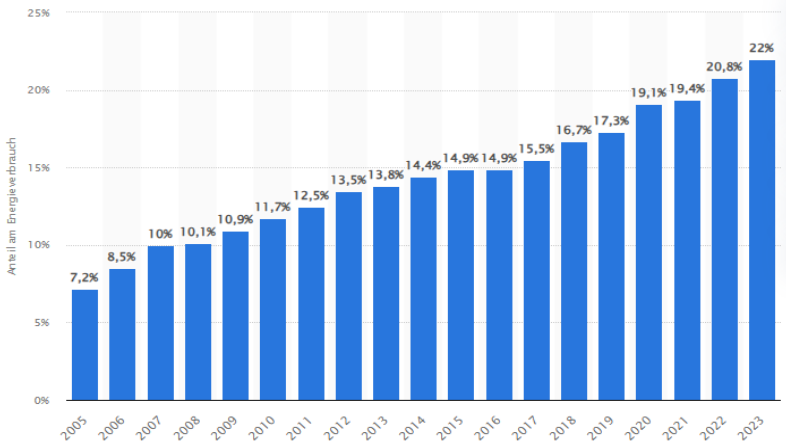
- Neue Solarzellen (Tandemzellen, bifaziale Zellen, Organische PV)
- Neue Speicher (Organic Solid Flow Battery, Feststoffbatterien)
- Geothermie und Floating Off-shore Wind

Grüne Energiewende – Transformation des Energiesystems der Zukunft (Deutschland)

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

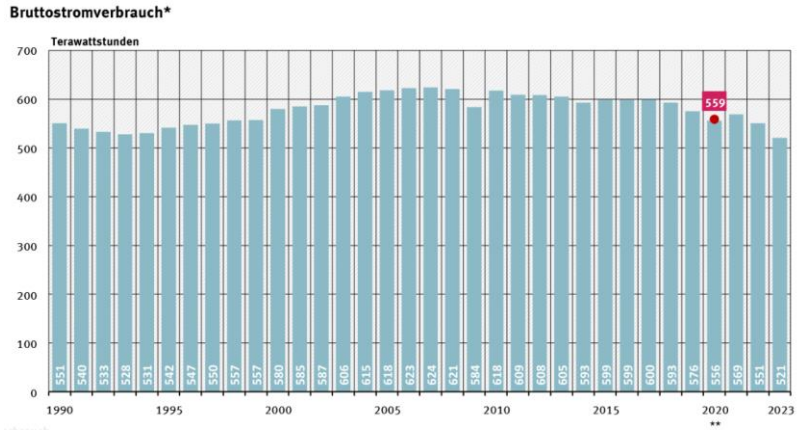
Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2023

(Quelle: Statista)



Bruttostrombedarf Deutschland

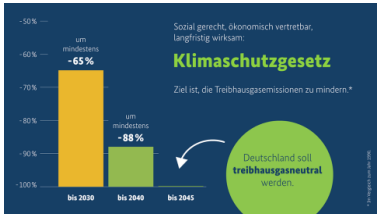
(Quelle: UBA)



Ein Wachstum des EE-Anteils von 14,8 % in 18 a entspricht einer Zunahme von **0,82 % p.a.**

Daraus lässt sich die Zeit für die Erreichung eines komplett auf EE basierenden Bruttoenergiebedarfs mit **95 a** abschätzen. Dies führt auf das Jahr **2118**. Das Ziel 2045 ein grünes Energiesystem zu haben, wird damit um 73 a verfehlt. Ein System mit 80 % EE-Anteil würde in **71 a**, also **2094** aufgebaut sein

Eine Zunahme der Elektrifizierung ist in Deutschland bisher nicht zu erkennen – „Bedarfsorientierte Transformation“



(Quelle: BMWU)

Energiesystem der Zukunft (Exempl. Modelle) – Energiebedarf & Effizienz vs. Systemkosten

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

1 Fokus heimische erneuerbare Energien (Flächenbedarf, Strom, Infrastruktur, Stabilität)

1 200 TWh

300 TWh

Heimische volatile regenerative Quellen, Abfall und Biogas

Import klimaneutraler Wasserstoff / Erdgas mit Dekarbon. im Inland

Stromnetz

Wasserstoff-netz

Klassische Stroman-wendungen

Wärme & Kälte, Mobilität

1 500 TWh

2 Fokus Import Moleküle (Abhängigkeit, Kosten für Import, Effizienz, Wertschöpfung)

720 TWh

980 TWh

Heimische volatile regenerative Quellen, Abfall und Biogas

Import klimaneutraler Wasserstoff / Erdgas mit Dekarbon. im Inland

Stromnetz

Wasserstoff-netz

Klassische Stroman-wendungen

Wärme & Kälte, Mobilität

1 700 TWh

Hinweis: www.mckinsey.de/news/presse/2024-01-19-zukunftspfad-stromversorgung

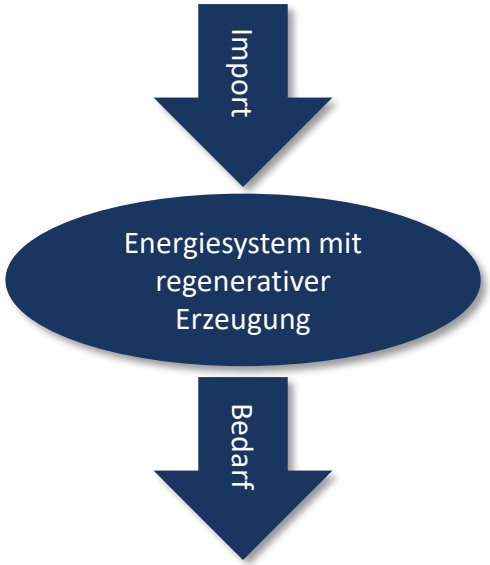
Energiesystem der Zukunft – Emissionen – Dekarbonisierung – Grüne Energie

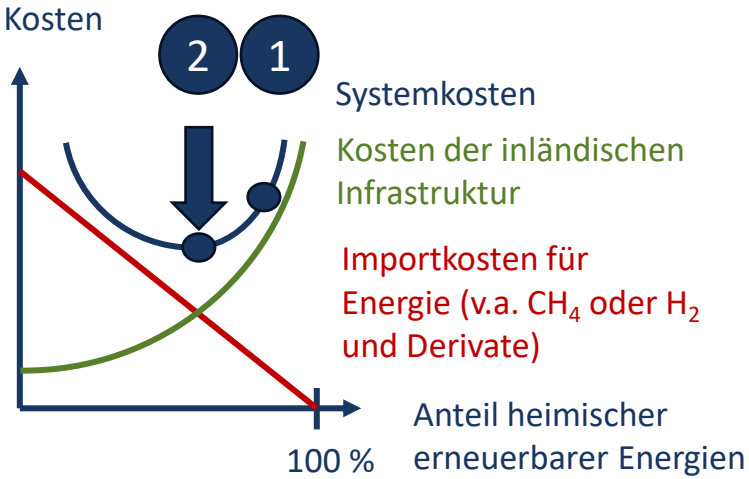
BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Systemkosten = Infrastrukturkosten Inland (inkl. Erzeugung) +
Importkosten Gas (Gewinnung plus Transport) + Mehrkosten Qualität

Erneuerbare Energien selbst sind in der Regel kostenfrei, ihre Nutzbarmachung erfordert jedoch einen enormen Infrastrukturaufbau und damit signifikante Investitionen.
Energiewende ist Kapitalwende; Technologie, Natur und Rechtsrahmen definieren Kosten

Die Konsistenz eines stabilen Energiesystems bestimmt Energiekosten und internationale Verflechtungen:
Heimische Erzeugung vs. Import; grün vs. dekarbonisiert, Zwischenschritte vs. Zielsystem



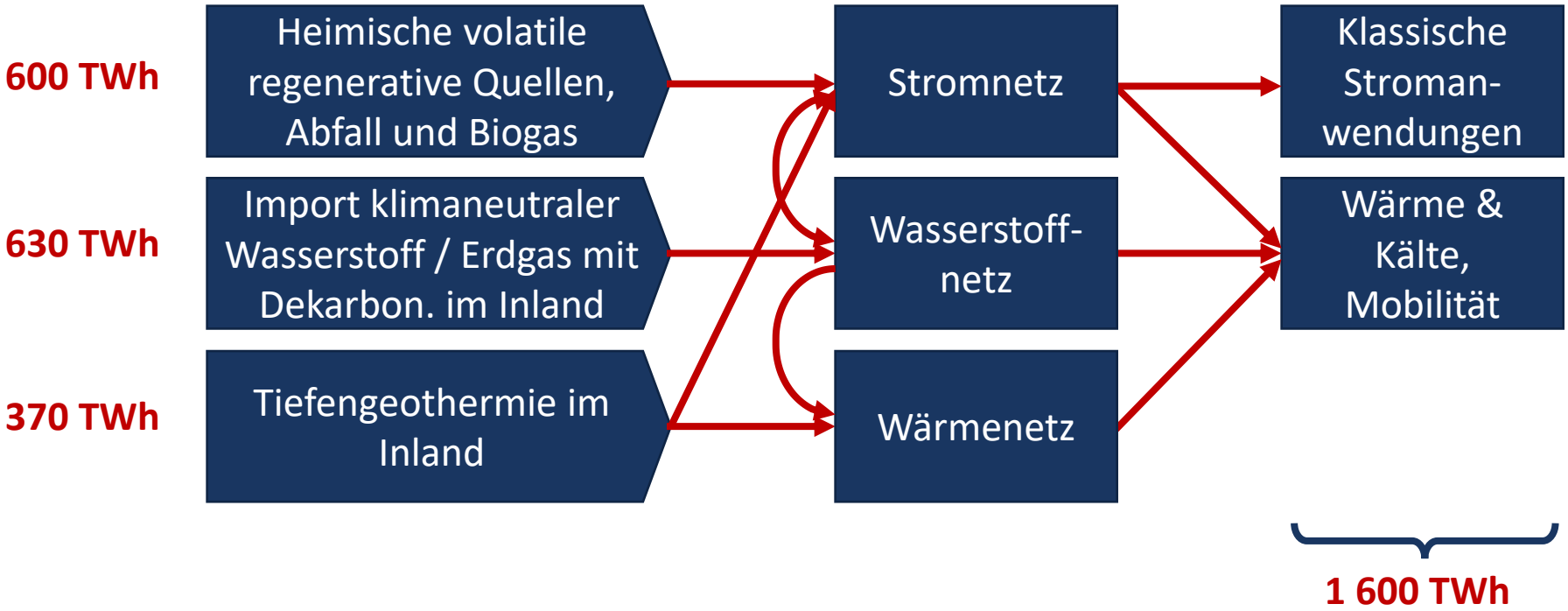


Referenz:

Energiesystem der Zukunft (Exempl. Modelle) – Veränderung durch Option Geothermie

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

3 **Fokus Integration Geothermie (Erschließung, Infrastruktur, Akzeptanz)**

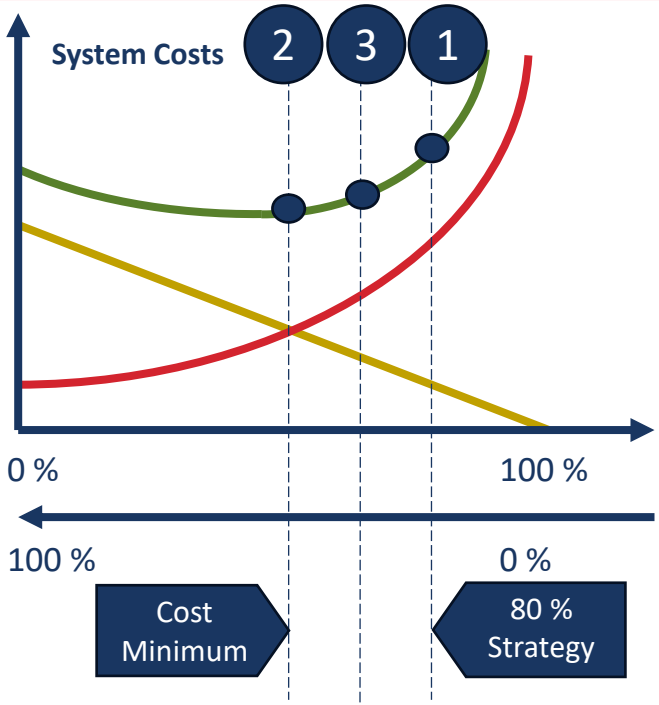


Systemstabilität:

- Dunkelflaute versus Hellbrise
- Dynamische versus statische Stabilität
- Resilienz

Energiesystem der Zukunft (Exempl. Modelle) – Gesamtsicht auf Konsistenz & Kosten

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

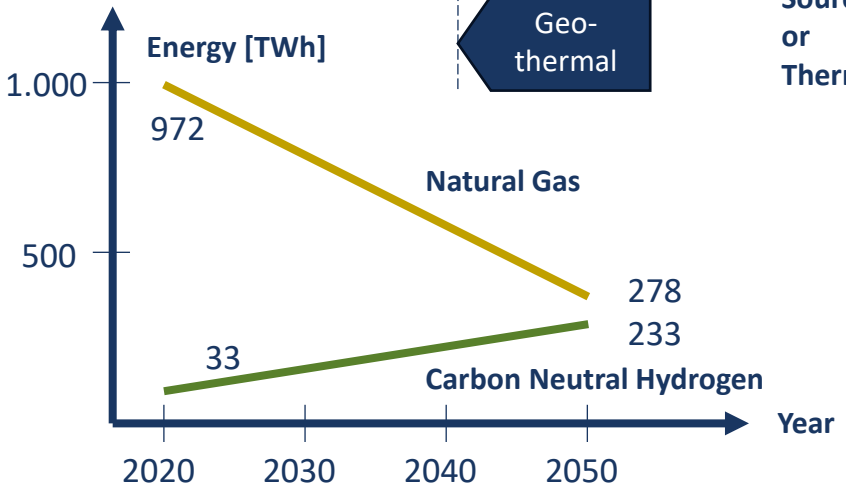


System costs = Costs for domestic infrastructure
(Gen., transp., storage, stabilization) +
Costs for gas / hydrogen import
(Exploration / production, transp., storage and conditioning) +
Surcharge for quality
(Security, safety, reliability, environmental impact, green or decarbonized)

→ **{Min}**

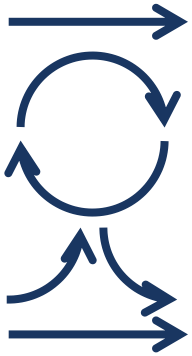
Domestic Volatile RES

Imported Gas / Hydrogen / Ammonia
or
Domestic Controllable RES (e.g. Geothermal Sources)
or
Thermal plus CCS



1.200 TWh Strom (Heimisch)

300 TWh Gas (Import)

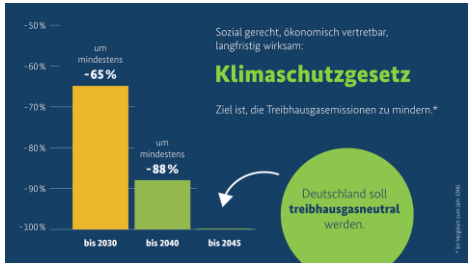


Anwendung

300 TWh Wasserstoff (Stabilität)

Anwendung

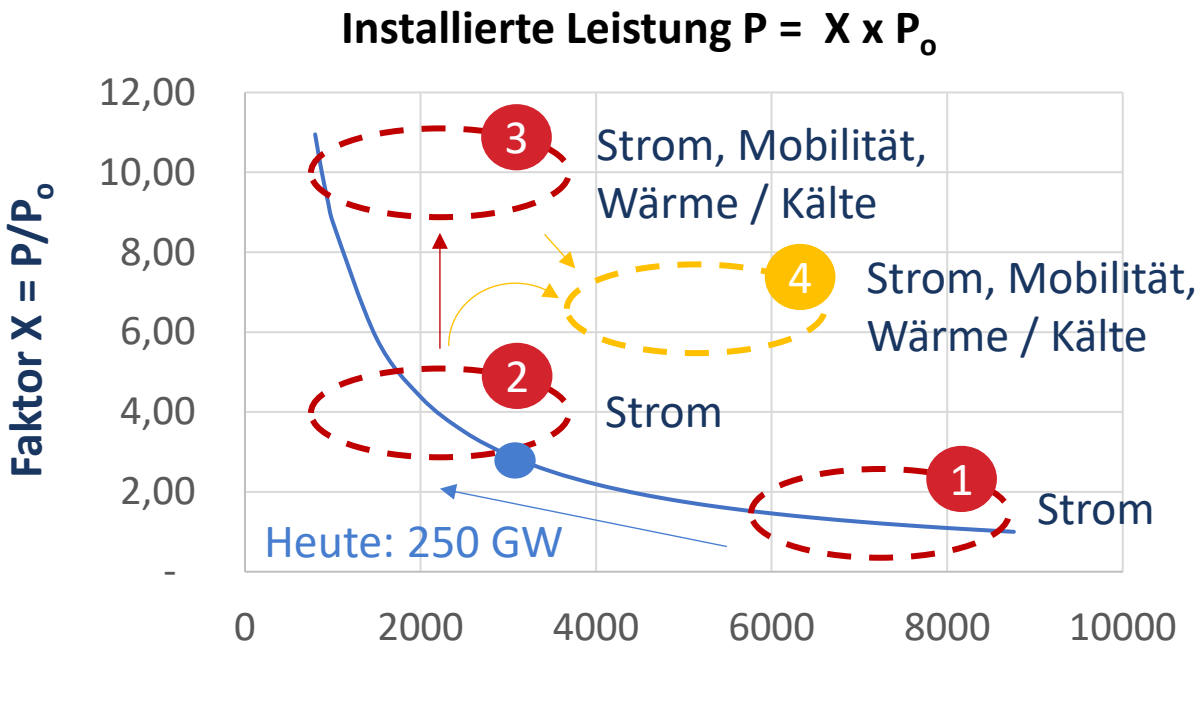
Reduktion aktueller Bedarf an Endenergie um 40 %



(Quellen: DNV – Energy Transition Outlook Deutschland 2025; McKinsey – Zukunftspfad Stromversorgung)

Grüne Energiewende & elektrisches System – Elektrizität, Fläche, Leistung & Flexibilität (DL)

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL



Im Ziel: Zentrale Endenergieform Elektrizität

1. Thermisches System „Strom“
2. Regenerative System „Strom“
3. Regenerative System „Energie“
4. Mehr steuerbare KW

Installierte Leistung $P = X \times P_o$
Jahresbenutzungsdauer T
Bereitgestellte Energie E

$P_o = E / 8.760\ h$
$P = E / T = (P_o \times 8.760\ h) / T$
$X = P / P_o = 8.760\ h / T$

Energiebereitstellung durch Quellen mit niedriger Jahresbenutzungsdauer erfordert hohe **Leistungen.** Quellen mit **niedriger Energiedichte** haben **hohen Flächenbedarf**

Volatilität und Intermittenz der Energiebereitstellung erfordert **Flexibilität** und **Koordination** zu ihrer Beherrschung

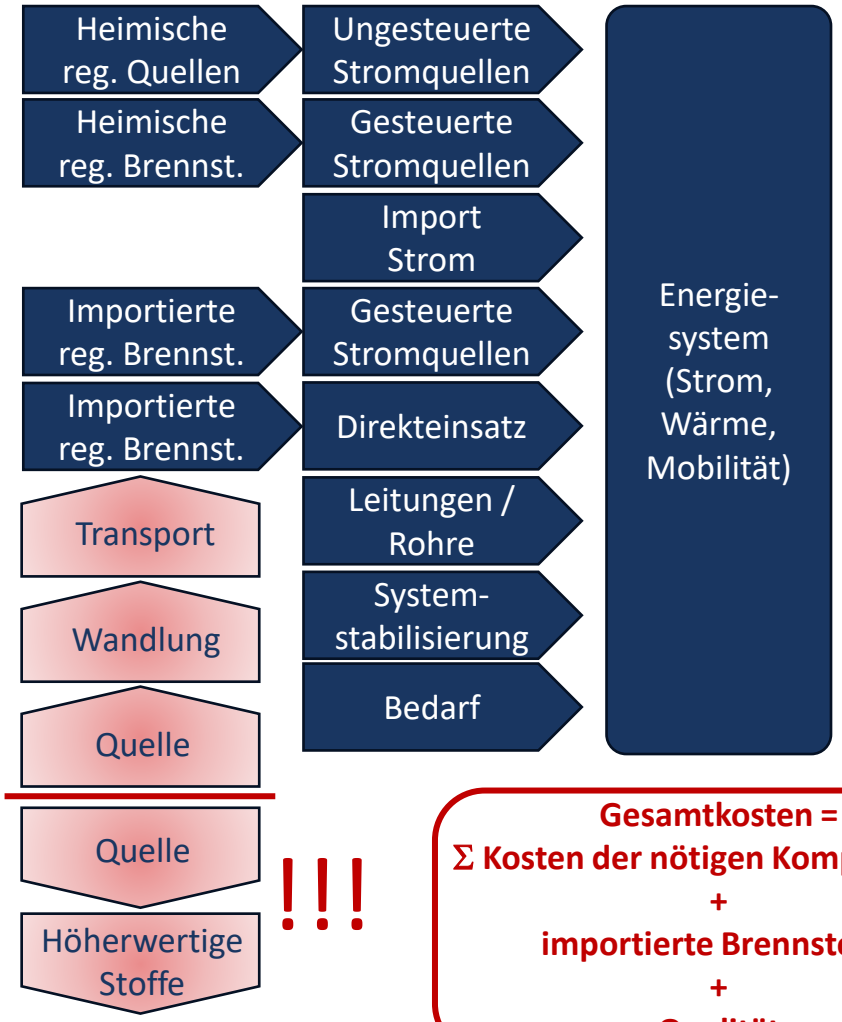
Energiesystem der Zukunft – Konsistenz – Heimische Quellen vs. Import

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Konsistenz des Energiesystems der Zukunft

Subsidiäre Aspekte Stromsystem

- Technologien und Potentiale
- Akzeptanz der Optionen
- Energieimporte
- Gesteuert / ungesteuert Quellen
- Wirkungsgrade / Verluste
- Wirksamkeit
- Gesamtkosten des Systems
- Verlagerung von Wertschöpfung



!!!

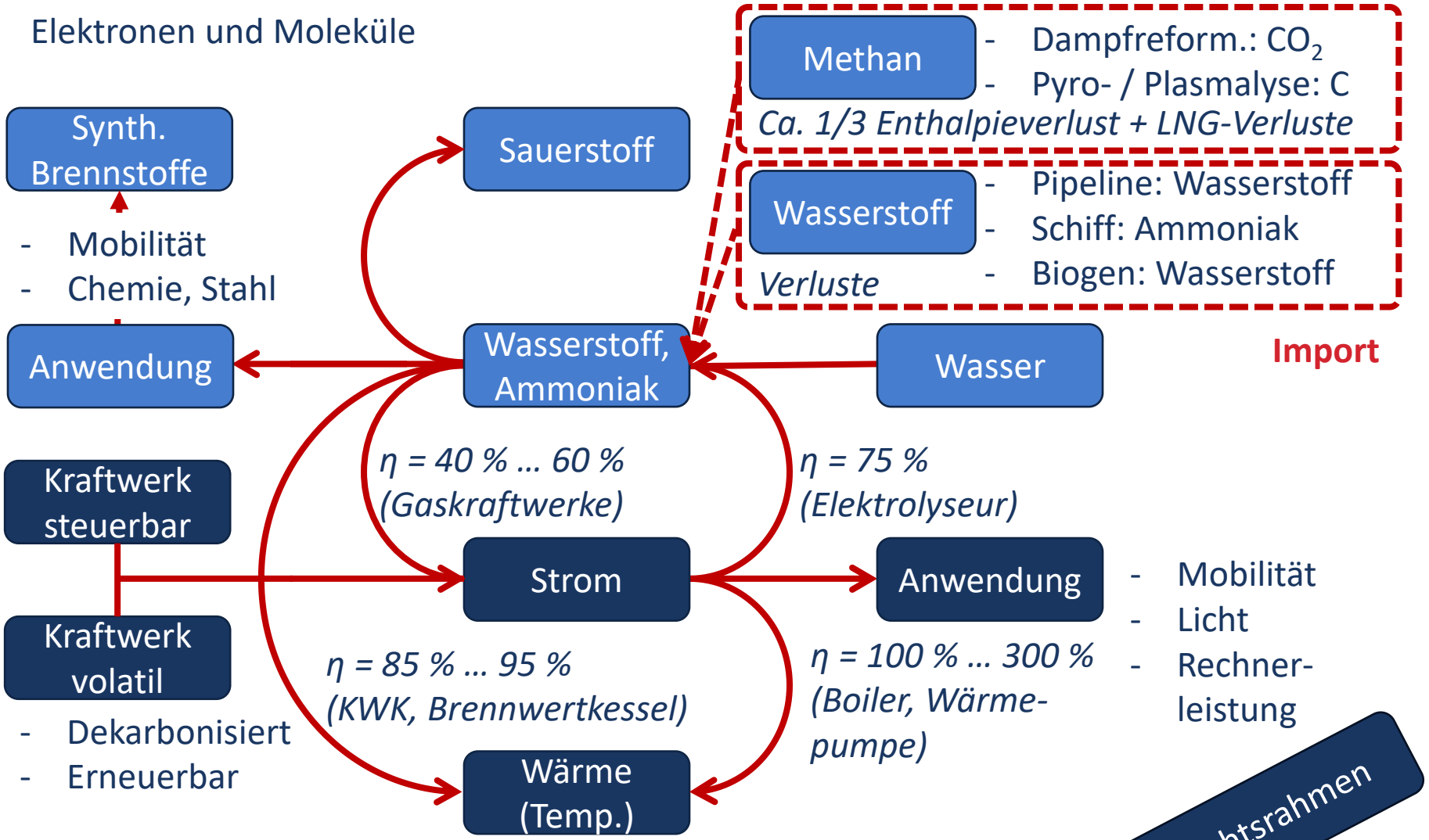
- **Kostentragung durch Kunden oder Volkswirtschaft (öffentliche Hand)**
- **Effizienz versus Kosten**
- **Sicherheit und Resilienz**
- **Infrastruktur im Ausland**
- **Wertschöpfung im In- oder Ausland (Arbeitsplätze)**

Gesamtkosten =
Σ Kosten der nötigen Komponenten
+
importierte Brennstoffe
+
Qualität

Multimodale Energiesysteme der Zukunft – Strom, Wasserstoff & Synth. Brennstoffe – Komplexität

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Elektronen und Moleküle



Konsistenz: lokal, regional, national, supranational –
Verfügbarkeit Energiequellen, Bedarf, Technologie

Gekoppelte multimodale Systeme (Auszug) – Neue Wechselwirkungen – Parallele Energieströme

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Wärmenetz

Großwärmepumpe

Brennstoffzelle / Gasturbine (KWK mit thermischem Puffer)

Elektromobilität E

Volatile regenerative Stromquellen

Stromnetz

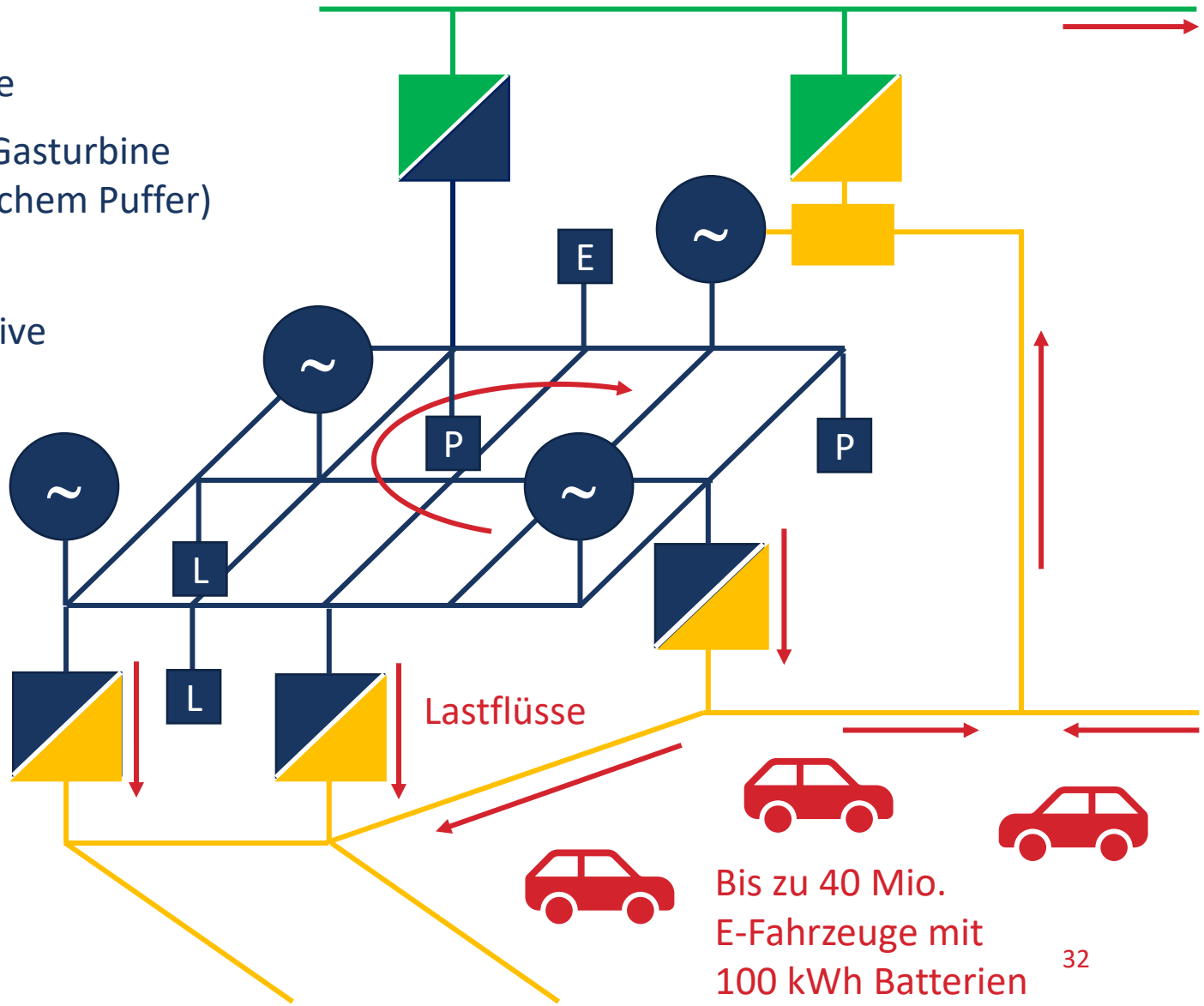
Lasten L

Prosumer P

Elektrolyseure

Wasserstoffnetz

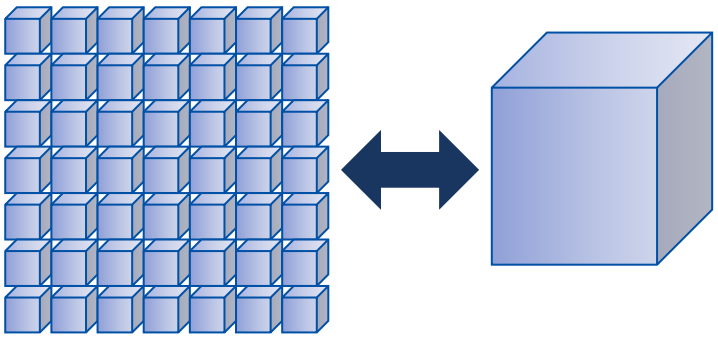
E-Mobilität (Bidirektionales Laden)



Energiesystem der Zukunft – Gesetz der Miniaturisierung schlägt Wachstumsgesetz mit der Zeit

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

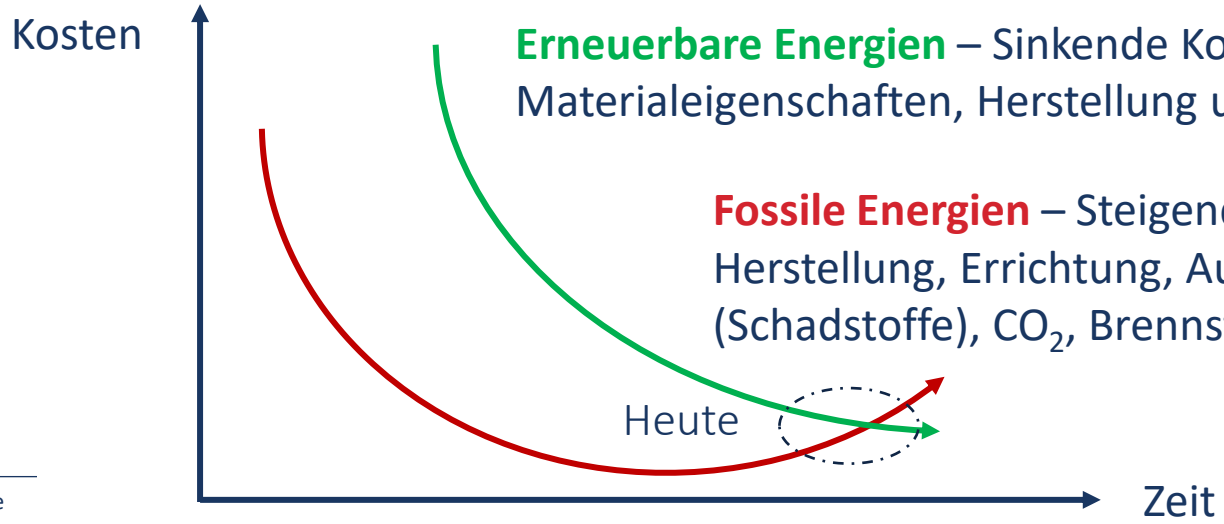
- Modularisierung
- Standardisierung
- Massenfertigung
- **Verbrauchsnähe**
- **Kombination von Funktionen**
- Resilienz
- **Demokratisierung**
- Keine Brennstoffe *)
- **Digitalisierung**



z.B. gebäude-integrierte PV

z.B. Kohlekraft-werk

- Wachstumsgesetz
- Singuläre Produkte
- Singuläre Funktion
- Zentral
- **Oligopol**
- Brennstoffe
- Emissionen



Erneuerbare Energien – Sinkende Kosten durch Materialeigenschaften, Herstellung und Errichtung

Fossile Energien – Steigende Kosten durch Herstellung, Errichtung, Auflagen (Schadstoffe), CO_2, Brennstoffe

*) außer bei Biomasse

Netzbetrieb & -entwicklung – Energie, Leistung & Flexibilität

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

$$E = \iiint_{x=0\ y=0\ t=0}^{X\ Y\ T} P\ dx\ dy\ dt$$

Energie
(Quelle)

$$P = \frac{dE}{dt}$$

Leistung
(Technische Infrastruktur)

$$F = \frac{dP}{dt}$$

Flexibilität
(Variation örtlich & zeitlich)

$$P_{inst} = \frac{E}{T} \qquad E = P_{inst} \cdot T$$

Steigender Energiebedarf E und geringe Nutzungsdauern T erhöhen den **Infrastrukturbedarf**

Effizienz, Suffizienz und Flexibilität reduzieren die **Infrastrukturkosten**

„Künstliche Erhöhung“ der Nutzungsdauer T durch **Smartness**

Optimierung Struktur & Betrieb **Bestand**; Minimierung **Zubau;** neue **Designgrundsäte**

EnWG §14a & Festlegung BNA

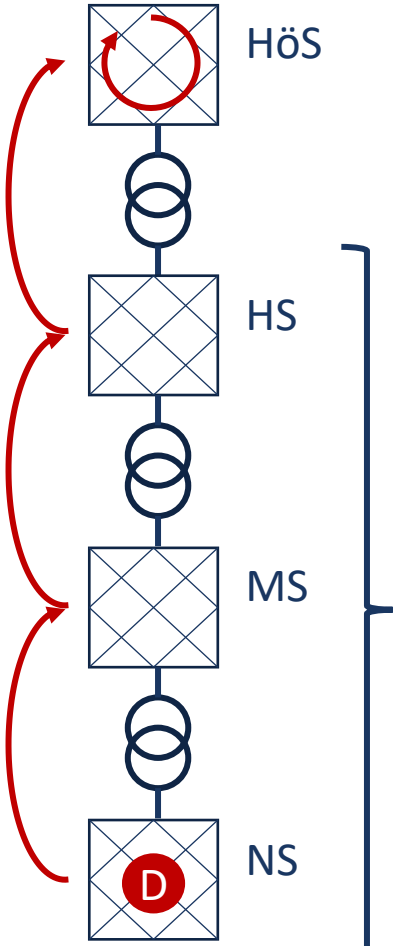
Stabilität durch Diversität – Leistungsstarke großräumige und steuerbare Vernetzung

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Aufrechterhaltung des Leistungsgleichgewichts – Zelluläre Strukturen künftig vorteilhaft

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Klassischer zentraler Ansatz –
Leistungsdifferenzen werden in die höheren Spannungsebenen verschoben



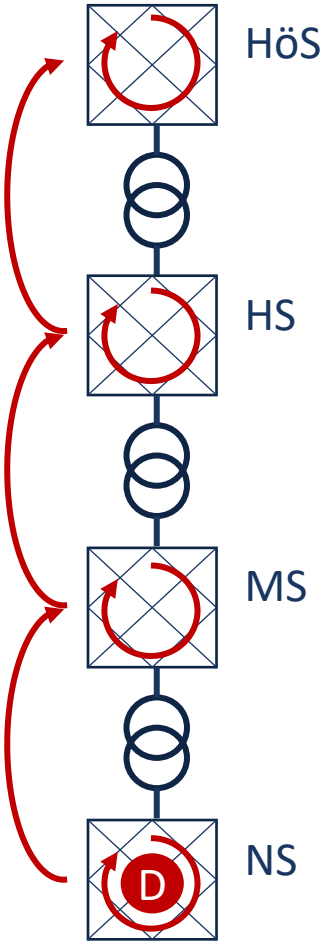
Ausgleich **aller** Differenzen D

Alle zeitlichen Differenzen zwischen Quellen und Senken innerhalb eines Netzbezirks werden an die vorgelagerte Netzebene übergegeben

Passive Nutzung der Diversität

Verstärkung der Netze und Umspannungen erforderlich

Künftiger Kaskadenansatz –
Partiell dezentraler Ausgleich von Leistungsdifferenzen



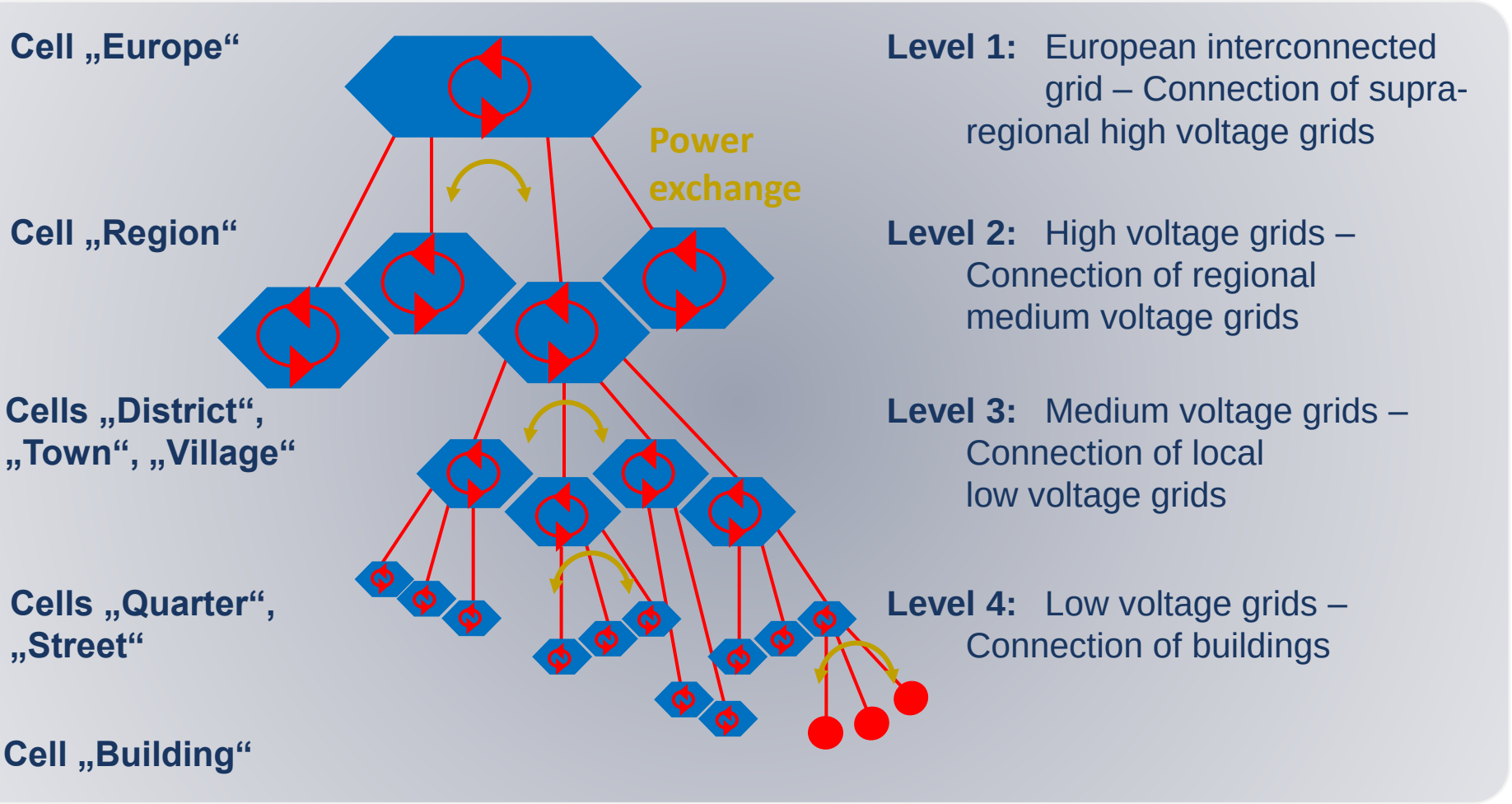
Ausgleich **verbleibender** Differenzen D

Verbleibende zeitliche Differenzen zwischen Quellen und Senken innerhalb eines Netzbezirks werden an die vorgelagerte Netzebene übergegeben

Aktiver Ausgleich von Differenzen durch den Einsatz aktiver Elemente (z.B. P2X)

Modulare Strukturen – Anreize zur Minimierung des Leistungsaustauschs – Zelluläre Strukturen

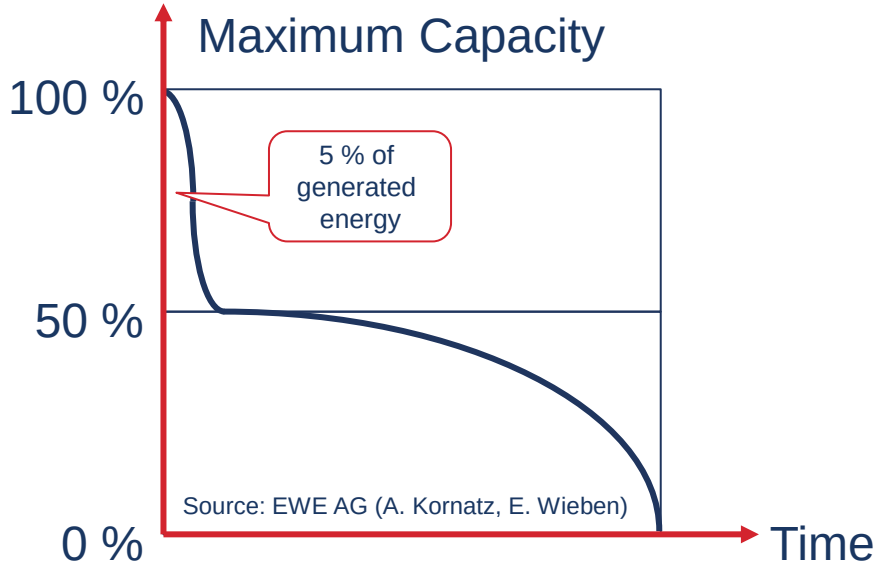
BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

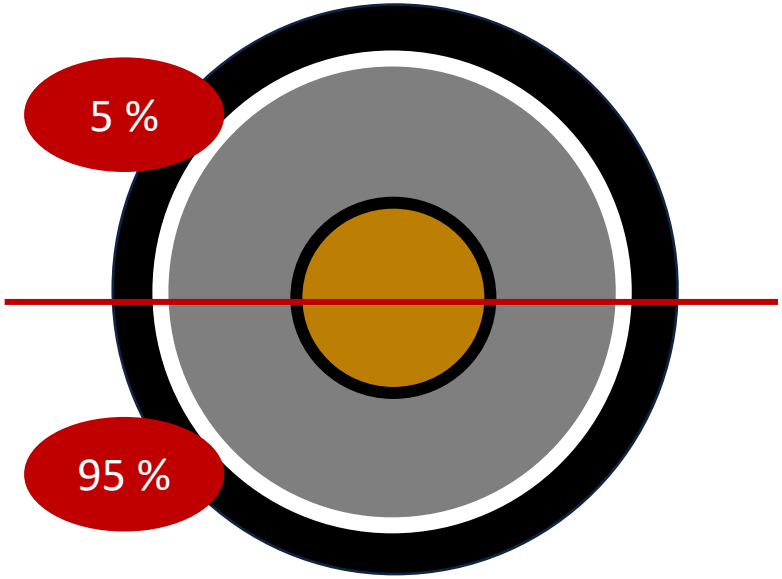


Partial self-sufficiency – Resilience and efficiency through subsidiarity – Stability through flexibility and diversity – Principle of Pareto

Nichtlinearitäten bestimmen das Stromsystem – Nutzung durch „Smartness“

95 % of the energy can be transported 50 % of the capacity
5 % of the energy require the second 50 % of the capacity





Active grids extend energy related capacity of passive infrastructure substantially by slightly reducing supply quality – Note: Design reserves offer additional options

- Interoperability of components
- **New design and operation principles**
- Less investments more operational cost
- Quality aspects to be considered
- Controlling breakdown of control unit
- Active grid elements and involvement of customer
- Aspects of data security (IT and OT)

Smart Grids – SCADA, Dezentralität, Automatisierung & Schutz

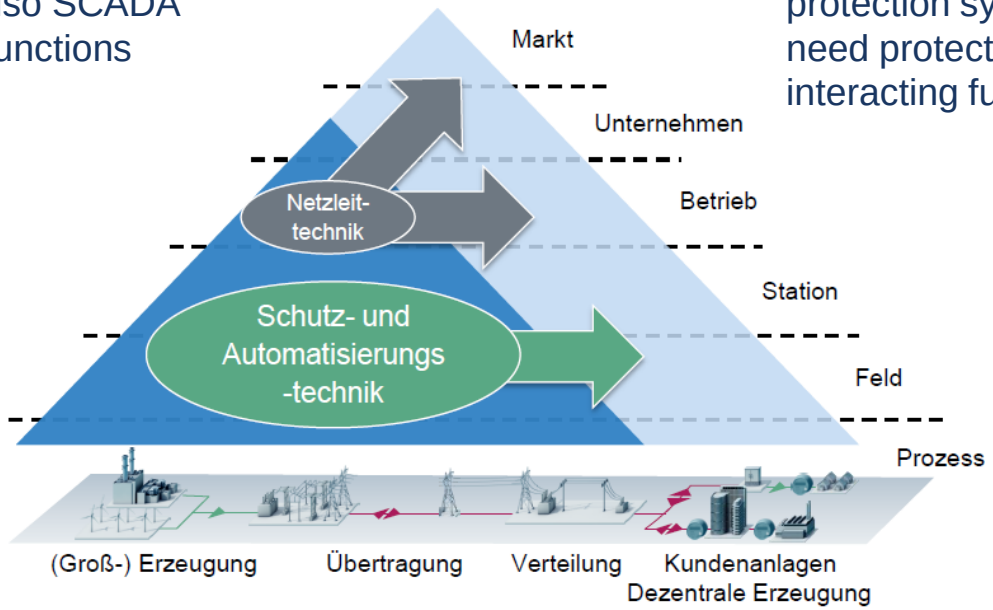
VDE ETG Energietechnische Gesellschaft

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

The key finding of the **ETG Study 2016** is: Active distribution grids …

… need more decentralized automation but also SCADA with new global functions

… do not need less decentralized protection systems, however, they need protective devices with more interacting functions



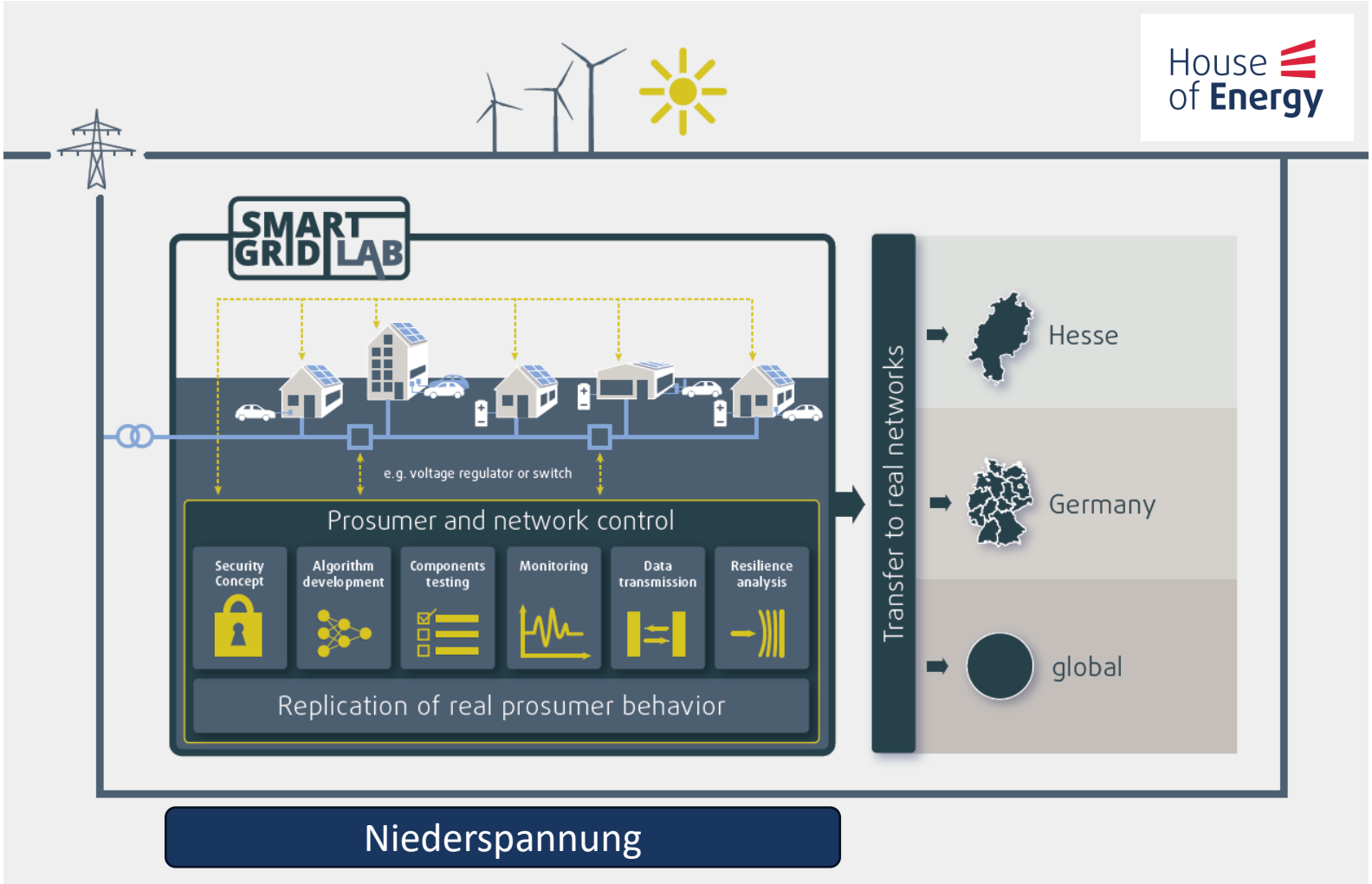
2025 – Cloud, Internet of Things

Source: Schutz- und Automatisierungstechnik in aktiven Verteilnetzen – Herausforderungen, Lösungskonzepte, Empfehlungen – ETG (2016)

Further topics for smart grids:

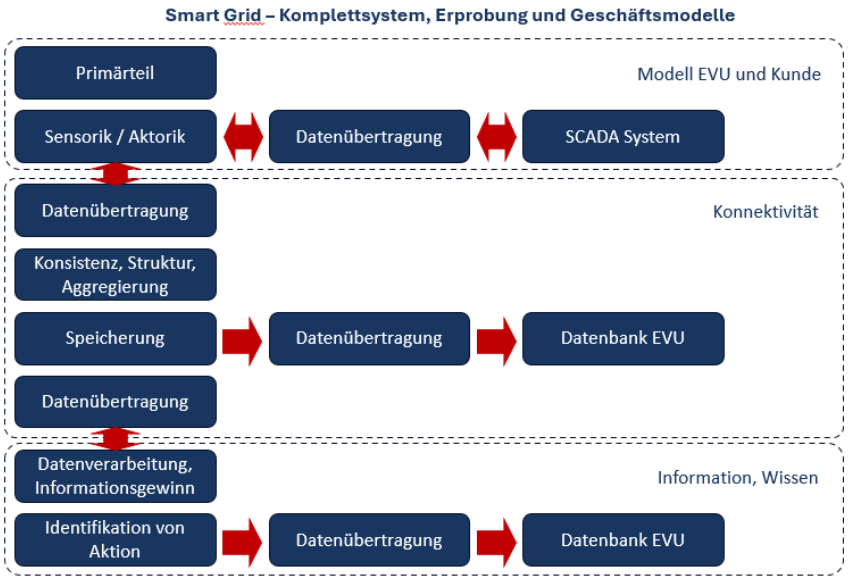
- Design rules for active grids with a passive basic infrastructure
- Grid operation „without“ smartness
- IT/OT security in active grids
- Safety for workforce in autonomously acting grids

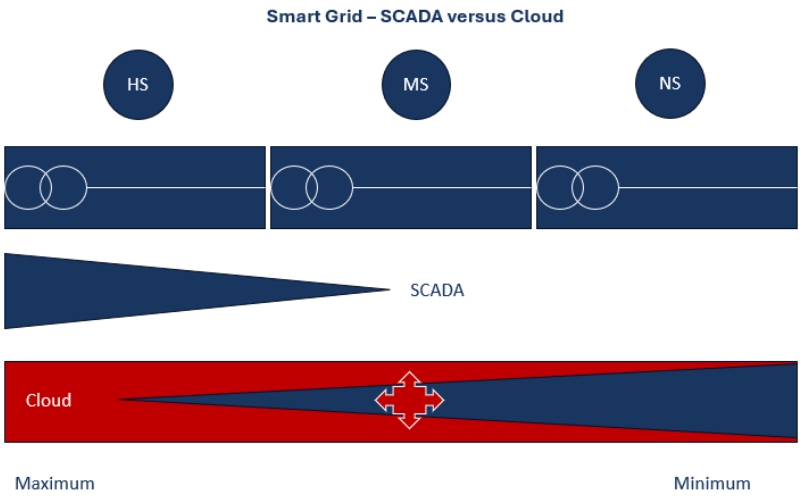
Das Smart Grid Lab Hessen – Flexibilität, Interoperabilität, IT/OT-Sicherheit & Cloud



„Straße der Zukunft“ – Funktionalität, Interoperabilität, IT/OT-Sicherheit

Das Smart Grid Lab Hessen – IoT – Edge Computing – Echtzeitenergiewirtschaft





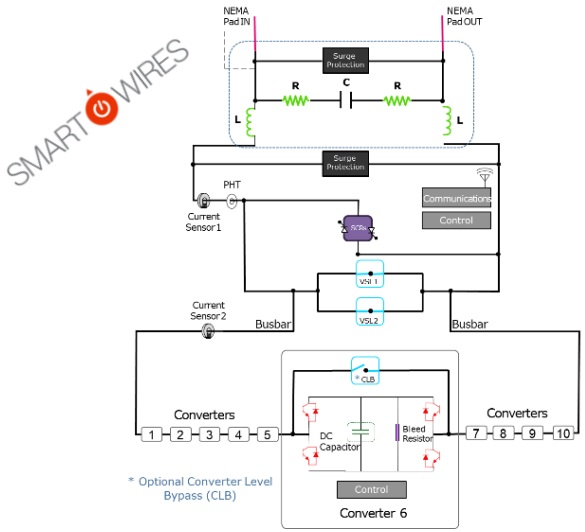
„Straße der Zukunft“ – Weiterentwicklung zu Internet of Things und Echtzeitwirtschaft:

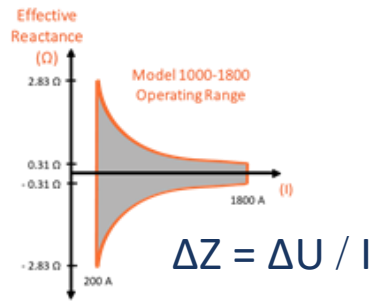
- Interoperabilität
- IT/OT-Sicherheit
- SCADA versus Cloud (IoT)
- Cloud-Auswertungen (offline) und Cloud-Steuerung (online)

Weitere Fragestellungen:

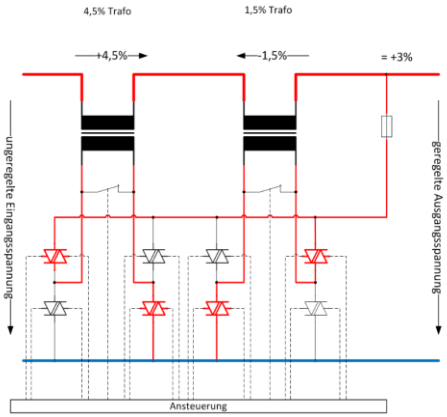
- EnWG §14 a
- Edge Computing Ortsnetzstation versus SCADA und Cloud (IoT)

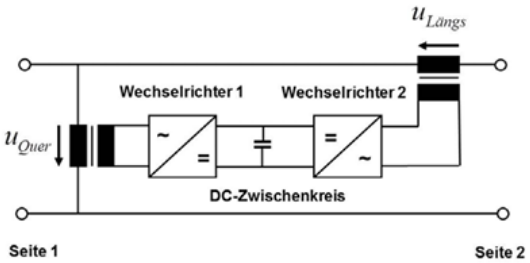
Smart Grids – Flexible Betriebsmittel für verschiedene Spannungsebenen

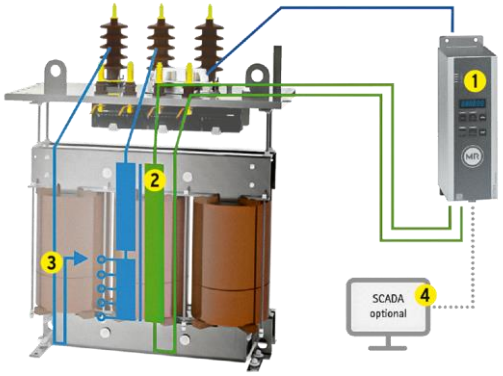


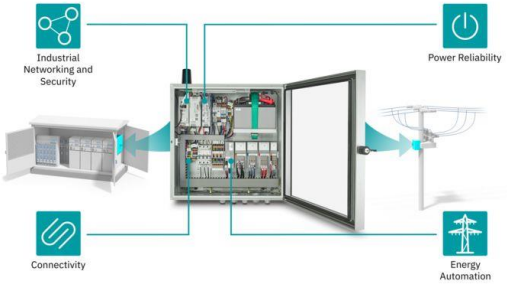


$\Delta Z = \Delta U / I$









HöS, HS

Modularer statischer synchroner Serien-kompensator (MSSSC)

MS, NS

Längsspannungsregler

MS/NS

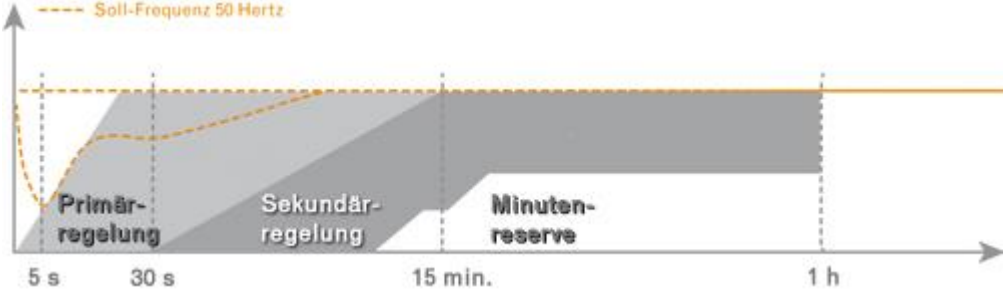
Regelbarer Ortsnetztrans-formator (RONT), Intelligen-te Ortsnetzstation (IONS)

Überregionale Energiemärkte (DL & EU) – Stabilitätsmarkt & Bilanzkreise

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

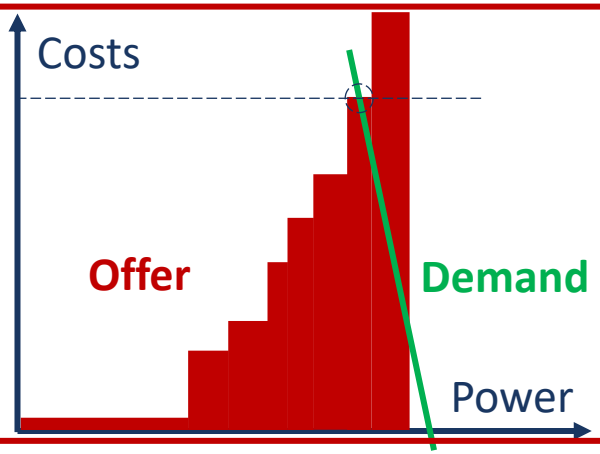
1. Stability Market – Instantaneous Stability – Technology:

- Frequency-Power-Control
- Auction based
- Instantaneous reaction
- Organized by TSOs
- Regional level



2. Energy-only-Market – Balancing – Traders:

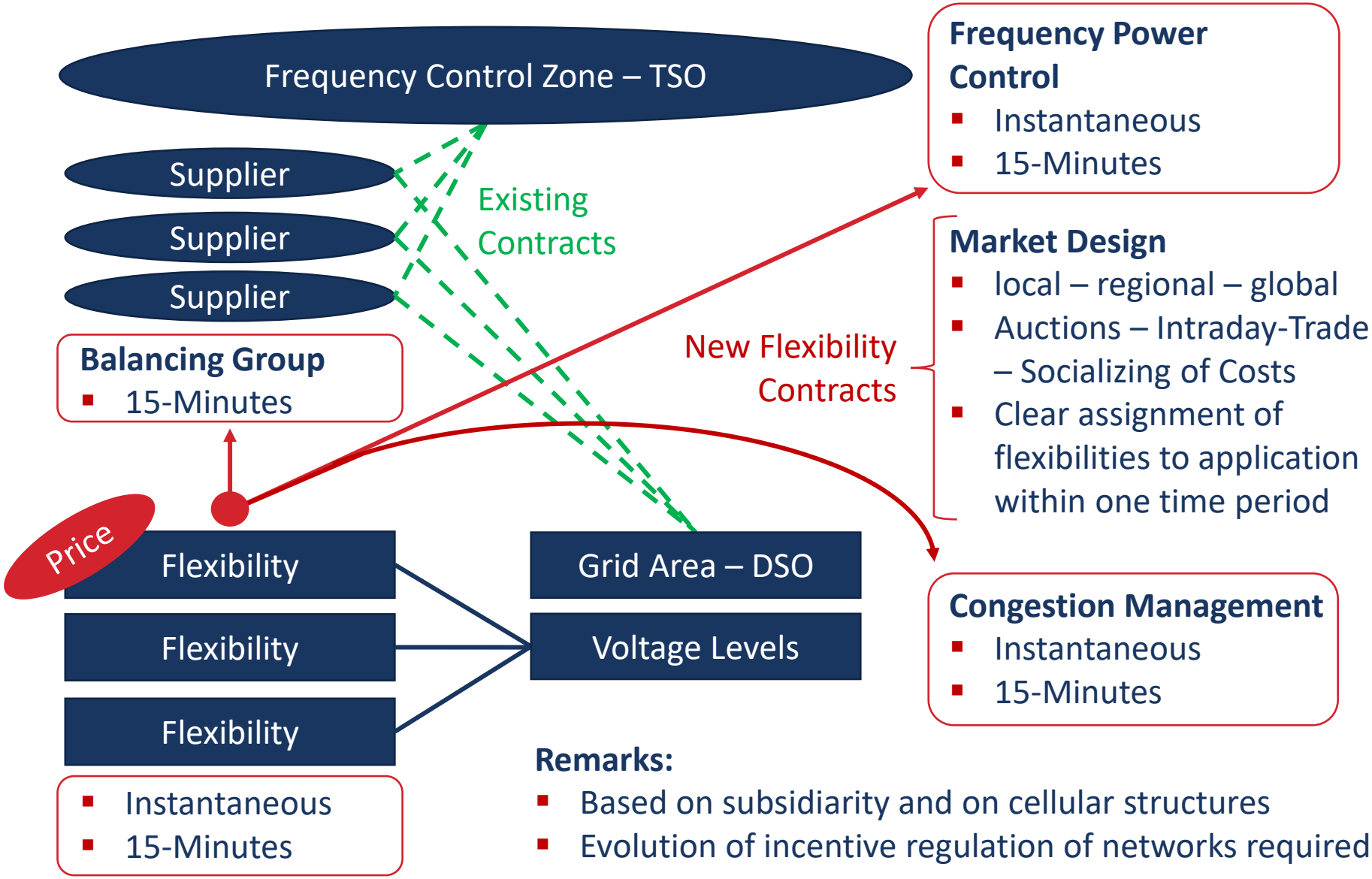
- 15-min-power balance of offer and demand
- Pricing based on **Merit Order** principle
- **Spot** and **Futures Markets**
- **Day-ahead**, **Intraday** and **Day-after Markets**
- Organized by Power Exchange
- European level



3. Fixed Energy Prices – Subventions – Fixed Prices (PPA)

- Renewables and CHP (Interaction with 1. and 2.)

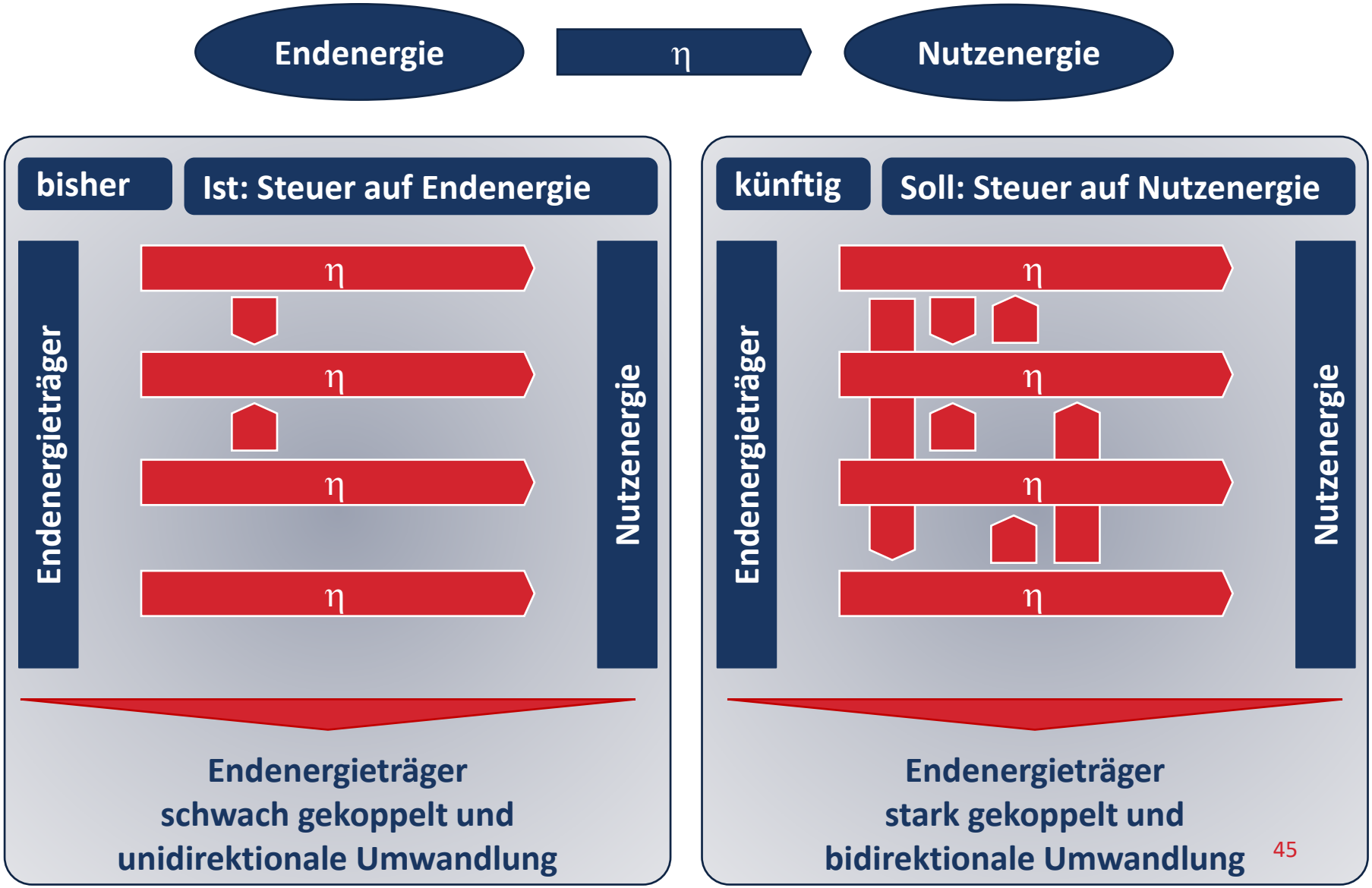
Power Markets Tomorrow – Considerations on Future Local Flexibility Markets – Interactions



Remarks:

- Based on subsidiarity and on cellular structures
- Evolution of incentive regulation of networks required

Sektorielle vs. gekoppelte Energieströme – Abbildung im Rechtsrahmen

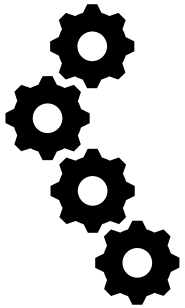


Energiewende und Digitalisierung – Aufbau eines neuen Systems – Schlussgedanken

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Technik

- In Deutschland entsteh ein weitgehend klimaneutrales Energiesystem
- Es wird technisch breiter aufgestellt sein, als bisher angenommen
- Die wichtigsten Nutzenergien werden Elektrizität, Wasserstoff, Methan und Fernwärme sein
- Die Energiewende wird auch nach 2045 fortgesetzt werden
- Digitalisierung wird zum zentralen Element (IT und OT)

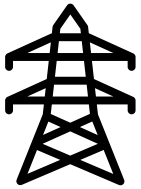


Wichtige (ordnungs-)politische Themen

- Integration von Flexibilität, Speicherung und Sektorenkopplung
- Anpassung der Netzentgeltsystematik (starr und entnahmebasiert)
- Anpassung der Besteuerungslogik (Endenergie vs. Nutzenergie)

Bau- und Betriebsgrundsätze elektrische Netze

- Kurzschlussleistung (MS, NS) wird variabler und nimmt ab (Synchronmaschine 8,0 … 12,0 I_N versus (viele) Wechselrichter 1,0 … 1,4 I_N)
- Passive Netzbasis und dynamische Kapazitätserweiterung



House of Energy

Vielen Dank für Ihr Interesse

House of Energy Newsletter

House of Energy Kongress

SAVE THE DATE!

19. / 20. März 2025,
Messe Frankfurt
Registrierung unter
www.house-of-energy.org

House of Energy e.V. –

Transdisziplinäres Projektdesign
auf wissenschaftlicher Basis
mit wirtschaftlichen Zielen
unter Einbindung der Politik

Gefördert durch
HESSEN
Hessisches Ministerium
für Wirtschaft, Energie,
Verkehr und Wohnen

A

CV – Peter Birkner

Prof. Dr.-Ing Peter Birkner is Honorary Professor at Bergische Universität Wuppertal in Germany. He is teaching at the Chair of Electrical Power Supply Systems, and he is focusing on the technical options for the efficient and effective establishment of energy systems based on renewables. He is tutoring master and doctoral thesis.

Since March 1 2016, Prof. Birkner is managing director of the House of Energy e.V. which is a think tank and competence centre as well as a transdisciplinary communication and coordination platform. The intension of House of Energy is to foster the turnaround in energy strategy – Energiewende – in the federal state of Hesse. Therefore, it is closely cooperating with the regional government. The institution is focusing on the cooperation between state, science, companies and utilities with respect to research and development in the energy sector. It is initiating, tutoring and mentoring R&D projects and takes care about the transfer of the results into science and practice.

He is member of the expert group “Environment and Energy” within the German Council of Economy in the federal state of Hesse. Prof. Birkner is also member of the German National Cired Committee. Furthermore, he is member of numerous advisory councils of start-up companies as well as renowned international companies and research centres. He is also investor of start-ups.

Prof. Birkner studied electrical engineering (Dipl.-Ing.) and holds a Dr.-Ing. – PhD – degree from Technical University Munich and worked for 8 years as guest professor at the Technical University Kosice, Slovakia.

He has a nearly 30 years’ experience in leading positions in regional and municipal utilities in Germany and the EU. At Eurelectric, Brussels he chaired for many years the DSO Committee, he has been member of the board of the Society for Energy Technology (ETG) within VDE and he has been member of the board of the Association of District Heating (AGFW).

He has published about 100 papers – scientific and popular science papers – and contributed to several books. Currently, he is working on his book “Transformation of the Energy System”. He is frequently lecturing in Germany, the EU and the USA. His field of interest is the design of future sustainable energy system, its interaction with IT, the options of new materials and the acceptance of society with respect to the fundamental changes.

Persönliche Perspektive – Editorial EnWZ

Stand 27.03.2025 – Editorial noch nicht veröffentlicht – Nur zur persönlichen Verwendung

Der Weg zur Klimaneutralität – Die Frage der Methode und der verfügbaren Zeit

Prof. Dr.-Ing. Peter Birkner ist Honorarprofessor an der Bergischen Universität Wuppertal und Geschäftsführer des House of Energy e.V. in Kassel.

Die Aussage: „Wenn man verliert, dann verliert man gegen die Zeit" enthält viel Wahrheit. So kann die Zeit abgelaufen sein, bevor die angestrebten Ziele erreicht sind. Man auch kann zur falschen Zeit am richtigen Ort oder zur richtigen Zeit am falschen Ort sein. Beides ist für die Transformation des Energiesystems anwendbar. Die zur Begrenzung des Klimawandels noch verfügbare und zur technischen Realisierung des künftigen Energiesystems erforderliche Zeit sind gleichermaßen relevant. Zeitdruck erhöht zudem die Kosten: „Entweder man hat Zeit oder Geld". Es ist entscheidend, die richtigen Maßnahmen zur richtigen Zeit und am richtigen Ort zu ergreifen. Der Klimawandel ist eine weltweite Herausforderung. Lokales Agieren und globale Lösungen sind erforderlich.

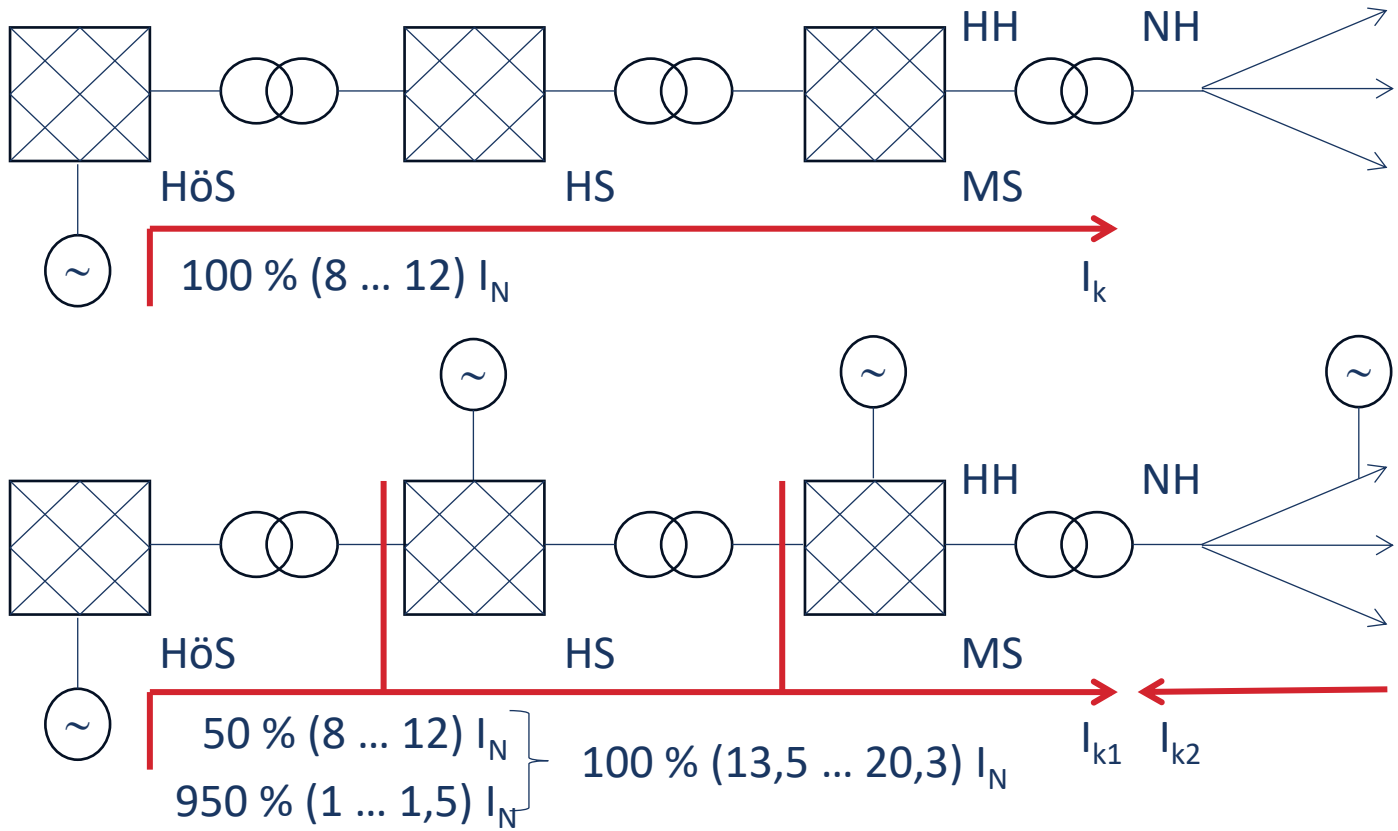
Bis in die 1970-er Jahre wurde die natürliche Umwelt als unbegrenzt verfügbares Gut angesehen. Externalitäten wurden akzeptiert. 1972 wies der Club of Rome in seinem Bericht „Die Grenzen des Wachstums" auf die begrenzten Ressourcen der Erde und die Folgen ihrer ungezügelten Ausbeutung hin. Er unterschätzte zwar die Höhe der Ressourcen, dennoch waren die Aussagen qualitativ richtig.

Der Treibhauseffekt ist in diesem Kontext zu sehen. Er wurde zuerst 1824 von Joseph Fournier beschrieben. Eingang in die öffentliche Diskussion fand er ab 1958. Charles D. Keeling wies den Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration und so den anthropogenen Treibhauseffekt nach. Das erste internationale Rahmenübereinkommen der UN zur Begrenzung der Klimaveränderungen wurde 1997 in Kyoto geschlossen. Es legte eine verbindliche Grenze für den Ausstoß von Klimagasen für die Industriestaaten fest. Bis zur Einführung des Treibhausgashandelssystems (ETS) der EU vergingen weitere sechs Jahre.

Legte der Club of Rome 1972 seinen Schwerpunkt noch auf die endliche Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern, so änderte sich spätestens 2005 der Blickwinkel. Hydraulic Fracturing (Fracking) erlaubt die Gewinnung von Erdöl und Erdgas in Schiefergestein. Die Vorkommen sind riesig. Es wurde erstmals 1949 in den USA eingesetzt und wird seit 2005 global in großem Stil genutzt. Die geförderten Öl- und Gasmengen stiegen deutlich an. Die Verfügbarkeit fossiler Energien verlängert sich auch bei weiterwachsender Weltbevölkerung signifikant. Dafür zeigte sich eine andere Begrenztheit umso deutlicher: Die maximal akzeptable Einlagerung von Klimagasen in die Erdatmosphäre. Die wichtigsten

Der Weg zur Klimaneutralität –
Die Frage der Methode und der verfügbaren Zeit

Veränderung des Kurzschlussstroms – Klassische top-down & bottom-up Flussrichtung



Bisher: Wenige zentrale Quellen mit top-down Stromflussrichtung und niedriger „Wegeimpedanz“

Künftig: Wenige zentrale und sehr viele dezentrale Quellen mit top-down und zum Teil auch bottom-up Stromflussrichtung mit im Schnitt höherer „Wegeimpedanz“ und reduzierter Verfügbarkeit (EE direkt, EE mit Batterie, Batterie direkt)