

# Vorlesung „Stromnetze“

*Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick*

Dr. Stephan Speith

---

# Stromnetze

## Physikalisch-technische Grundlagen

Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

SoSe 2021 | 02



# Organisatorisches

## Vorlesung – Stromnetze – SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Elektrische Energiespeicher im Verteilnetz	Murche
7	28.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Energienetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Energierrechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	?	?	Prüfungen	Benthaus / Netter
13	?	?	Prüfungen	Benthaus / Netter

# Literatur (I)

## Auswahl zur Vorlesung *Stromnetze*

BRONSTEIN; SEMENDJAJEW; ...	2013	Taschenbuch der Mathematik, Europa Lehrmittel, 9. Auflage
FISCHER	2010	Lineare Algebra; 17. Auflage; Vieweg + Teubner
GRIFFITHS	2011	Elektrodynamik, 3. Auflage, Pearson Studium
JACKSON	2014	Klassische Elektrodynamik, De Gruyter, 5. Auflage
LANG; PUCKER	2005	Mathematische Methoden in der Physik, Springer, 2. Auflage
LANGE	2002	An introduction to the Philosophy of Physics, Blackwell Publishing
LANDAU; LIFSCHITZ	1990 / 2014	Lehrbuch der Theoretischen Physik, Bd. II, Europa Lehrmittel
MESCHEDE	2010	Gerthsen Physik, Springer, 24. Auflage
MEYBERG; VACHENAUER	2003	Höhere Mathematik 1 u. 2; Springer, 6. Auflage
MÜLLER	1969	Foundations of the Mathematical Theory of Electromagnetic Waves, Springer
STÖCKER	2013	Taschenbuch der Physik, Europa Lehrmittel, 7. Auflage
WIKIPEDIA		

# Literatur (II)

## Vorlesung Elektrodynamik

Fakultät für Physik  
Technische Universität München



Startseite › Studium › Ressourcen › Lehrangebot › PH0006

## Theoretische Physik 2 (Elektrodynamik) *Theoretical Physics 2* *(Electrodynamics)*

### Modul PH0006 [ThPh 2]

Diese Modulbeschreibung enthält neben den eigentlichen Beschreibungen der Inhalte, Lernergebnisse, Lehr- und Lernmethoden und Prüfungsformen auch Verweise auf die aktuellen Lehrveranstaltungen und Termine für die Modulprüfung in den jeweiligen Abschnitten.

### Modulversion vom WS 2019/20 (aktuell)

Von dieser Modulbeschreibung gibt es historische Versionen. Eine Modulbeschreibung ist immer so lange gültig, bis sie von einer neuen abgelöst wird.



BACHELOR

LEHRAMT

KONTAKT

→ Studienorganisation und  
Studienberatung

E-Mail

### Inhalt

Elektrostatik und Magnetostatik  
Maxwellsche Theorie bei vorgegebenen Ladungs- und Stromverteilungen  
Maxwellsche Gleichungen in Materie  
Potentiale, Eichtransformationen  
Energie- und Impulssatz  
Wellen und Beugung  
Multipolentwicklung  
Feld einer bewegten Punktladung  
Spezielle Relativitätstheorie  
Energie-Impuls-Tensor

### Literatur

J.D. Jackson: Klassische Elektrodynamik (W. De Gruyter, 3. Auflage 2001)  
D.J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics

### Lernergebnisse

Nach der erfolgreichen Teilnahme an diesem Modul ist der/die Studierende in der Lage:

- 1.) Differentialgleichungen mit Randwertbedingungen zu lösen.
- 2.) die Maxwellgleichungen zur Berechnung von Feldverteilungen anzuwenden.
- 3.) Wellengleichungen im Vakuum und in Materie zu lösen.
- 4.) Felder von bewegten Ladungsverteilungen mit Greens Funktionen zu berechnen.
- 5.) Felder in gleichförmig bewegten Bezugssystemen zu berechnen.
- 6.) die Tensoralgebra zu beherrschen und mit Kugelflächenfunktionen rechnen zu können.

# Titelbild

## Technologie der Stromnetze



Quelle: NASA

Sichtbarkeit der elektrischen Energie

→ *Licht*

National/internationale Energieversorgungssysteme  
auf der Grundlage von zusammenhängenden\*  
Stromnetzen

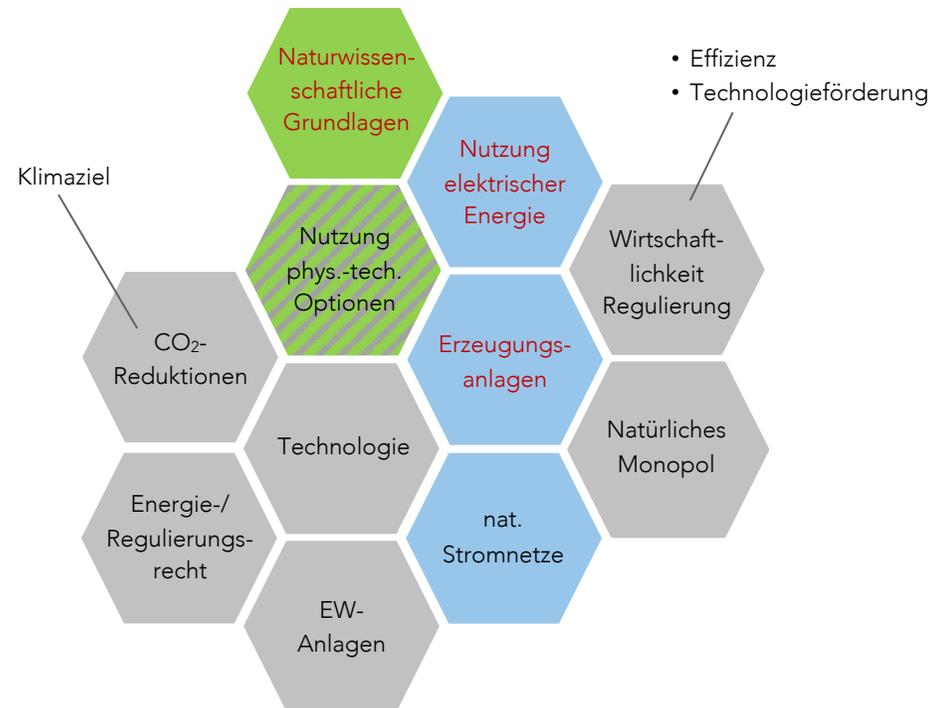
→ *Ausgangspunkt der Vorlesung*

\* mathematischer Begriff

# Einführung

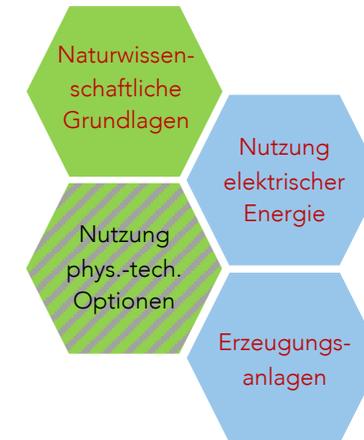
## Überblick

### Energiewirtschaft im technologischen IST



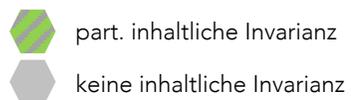
### Energiewirtschaft der Zukunft

#### Invarianten der Energiewirtschaft



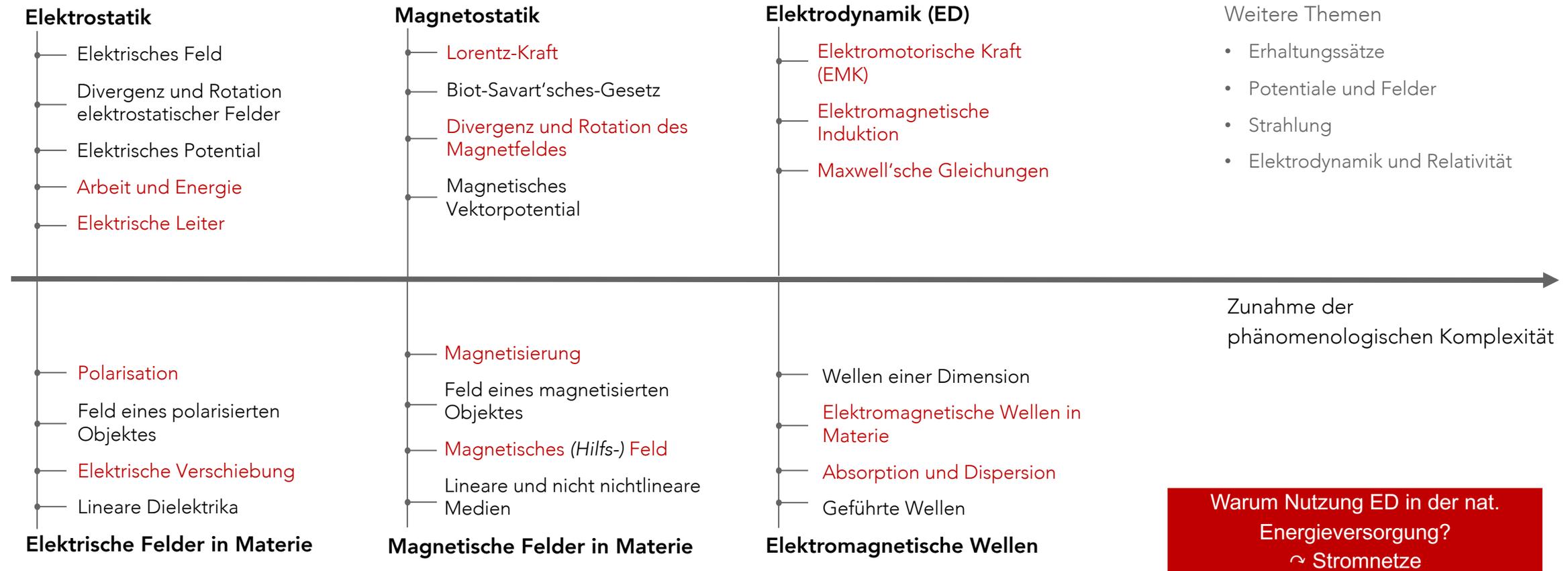
Fragestellungen/Randbedingungen für ein Zukunftssystem

- Ziele der Energiewirtschaft ?
  - ~ Klimaziele ?
  - ~ Volkswirtschaftliche Risiken ?
  - ~ Wirtschaftlichkeit ?
- Rechtssystem ?
- Technologische Möglichkeiten ?
- Steuerungsprozess ?



# Physikalisch-technische Grundlagen

## Energietechnik und Elektrodynamik | Themenüberblick



[Quelle – GRIFFITHS Inhaltsangabe]

# Physikalisch-technische Grundlagen

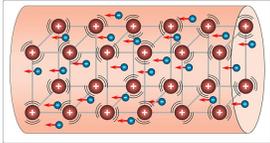
## Energietechnik und Elektrodynamik (I)

<b>Elektrostatik</b>	Stationäre Ladungen erzeugen zeitlich konstante el. Felder. Es gilt das Superpositionsprinzip.	
Punktladung $q$	$W = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = -q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ $= q[V(\mathbf{b}) - V(\mathbf{a})]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kraft auf eine Ladung in einem E-Feld <math>\mathbf{F} = q \cdot \mathbf{E}</math></li> <li>▪ Verschiebung <math>q</math> von <math>\mathbf{a}</math> nach <math>\mathbf{b}</math></li> </ul>
Kontinuierliche Ladungsverteilung $\rho$	$W = \frac{1}{2} \int_V \rho \cdot V dV$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Integral über (endliche) Ladungsverteilung</li> <li>▪ <math>\rho</math> kann positive und/oder neg. Ladungsträger enthalten</li> </ul>
	$\leadsto w = \frac{1}{2} \rho V \quad \text{Energiedichte}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie ist in räumlicher Ladungskonzentration</li> </ul>
	$W = \frac{1}{2} \int_{V=\infty} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} dV$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Felder sind unendlich</li> <li>▪ incl. Materialeigenschaften</li> </ul>
	$\leadsto w = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} E^2 \quad \text{Energiedichte}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Energie ist Feldbestandteil</li> </ul>
		s. (A3)
<b>Leiter</b>	Festkörperphysik   Elektronengas-Modell von Sommerfeld	
Eigenschaften	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Im Leiterinnern ist <math>\mathbf{E} = null</math></li> <li>2. Im Leiterinnern ist <math>\rho = null</math> (Nettoladung)</li> <li>3. Jede Nettoladung befindet sich auf der Oberfläche</li> <li>4. Ein Leiter ist eine Äquipotentialfläche</li> <li>5. An der Oberfläche gilt <math>\mathbf{E} = \mathbf{E}_\perp</math> und <math>\mathbf{E}_\parallel = null</math></li> </ol>	
Erläuterungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ein äußeres <math>\mathbf{E}</math>-Feld kann die beweglichen Ladungen verschieben und dadurch eine Ladungstrennung erreichen, induzieren. Die Nettoladung des gesamten Leiters ist null.</li> <li>▪ Auf einen Leiter können zusätzlich Ladungen (z.B. Elektronen) aufgebracht werden. Sie befinden sich dann an der Oberfläche und die Nettoladung ist ungleich null.</li> </ul>	
Beispiel Kupferdraht		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ linienförmiger materieller Leiter</li> <li>▪ Nettoladung gleich null</li> <li>▪ kein äußeres Feld</li> </ul>

[Quellen – GRIFFITHS | JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Energietechnik und Elektrodynamik (II)

Magnetostatik		Stationäre Ströme erzeugen konstante magnetische Felder		
Strom* $i$	$\mathbf{i}(t) := \frac{\partial q(t)}{\partial t} \Big _{r_0} \cdot \mathbf{n}_F$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Definition- Strom ist die ortsbezogene zeitl. Ladungsänderung</li> <li>Strom/Stromdichte ist ein Vektor</li> </ul>	Stationärer Strom* <i>...ein zeitlich unveränderlicher Fluss von Ladungen, bei dem nirgendwo Ladungen angehäuft werden.'</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ladungsfluss ist zeitunabhängig</li> <li>Idealvorstellung, da es real weder echte stat. Ströme oder Ladungen gibt</li> </ul>
Punktladung $q$	$\mathbf{F}_{mag} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ $\mathbf{F} = q[\mathbf{E} + (\mathbf{v} \times \mathbf{B})]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kraft auf Ladung <math>q</math> mit <math>\mathbf{v}</math> im <math>\mathbf{B}</math>-Feld</li> <li>incl. <math>\mathbf{E}</math>-Feld <math>\sim</math> Lorentz-Kraft</li> </ul>	<i>... <b>eine</b> bewegte Punktladung keinesfalls einen stat. Strom erzeugen kann.'</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superpositionsprinzip gilt hier nicht</li> </ul>
Magnetische Arbeit an Ladungen	$dW_{mag} = \mathbf{F}_{mag} \cdot d\mathbf{l}$ $= q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{v} dt = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bewegung von <math>q</math> um <math>d\mathbf{l}</math></li> <li>mag. Kräfte ändern nur die Richtung von Teilchen</li> </ul>	Stromrichtung $\mathbf{i}(\mathbf{t}) \rightarrow i(t) = \frac{\partial q(t)}{\partial t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bestimmung der Stromrichtung z.B. durch Richtungsvektor eines Drahtes, d.h. in Längsrichtung</li> </ul>
		Magnetfelder verrichten an Ladungen keine Arbeit		
Magnetische Feldenergie	$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} dV$ $w_m = \frac{dW_m}{dV} = \frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energie des mag. Feldes</li> <li>incl. Materieeigenschaften</li> </ul>	Leiter Magnetfeld außerhalb Leiter Gesetz von Biot-Savart	innerhalb Leiter <i><math>\sim</math> Diskussion: Quasistationäre Magnetfelder in Leitern</i>
			Beispiel Kupferdraht 	<ul style="list-style-type: none"> <li>linienförmiger materieller Leiter</li> </ul>

[Quellen – GRIFFITHS | JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Energietechnik und Elektrodynamik (III)

### Magnetostatik

**Quasistationäre Magnetfelder in Leitern** 'Doch wenn die zeitliche Änderung des Magnetfeldes nicht zu schnell erfolgt, bleibt das Magnetfeld vorherrschend, und man kann von quasistationären Verhalten sprechen. ... , dass die endliche Lichtgeschwindigkeit unberücksichtigt bleiben kann und die Felder so behandelt werden können, als breiten sie sich augenblicklich aus. ... Das betrachtete System ist dann klein im Vergleich zur elektromagnetischen Wellenlänge, die der dominierenden Zeitskala des Problems entspricht.'

~ '... dass unter dieser Voraussetzung der Maxwell'sche Verschiebungsstrom im verallgemeinerten Ampere'schen Gesetz vernachlässigt werden kann.' (s.u.)

Maxwell  
Gleichungen  
(s.u.)

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B} \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$$

### Energietechnik

#### Anwendungsfall

Weit verbreitete Meinung

- in der Energietechnik, da Magnetostatik gut anwendbar auf Ströme mit einer Frequenz von z.B.  $f = 50\text{Hz}$  ist.
- also keine Betrachtungen von EM-Wellen notwendig sind.
- **Aber: Gilt das voll umfänglich für die angewendete Energietechnik in heutigen el. EVS ?**

#### Besonderheit Großflächen- netze

- Abstand Erzeugungsanlagen – Nutzer klein ggü. EM-Wellenlänge?
- Berücksichtigung transienter Vorgänge im Energiefluss, d.h. der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Energie?



Also: Was bedeutet ‚klein‘ ggü. EM-Wellenlänge ?

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Physikalische Energie (I)

### Erkenntnissand – ‚Klassische‘ Physik

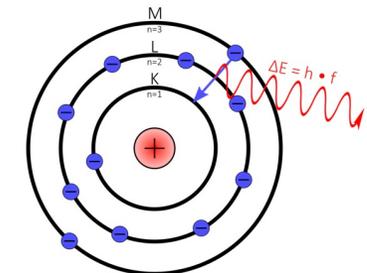
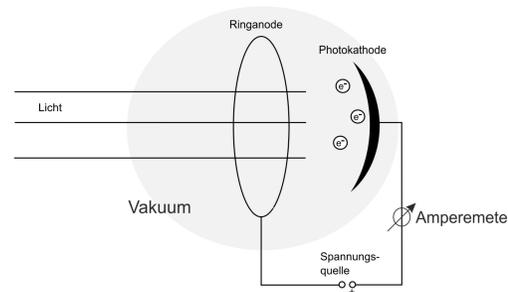
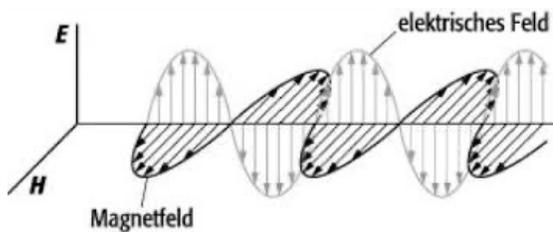
- Kontinuierliche Physik
- Klassische Feldtheorie
- Wellenphänomene → *Licht*
- $I \sim A^2$ , Intensität pro. **Amplituden**quadrat
- Energie  $W_{elmag} = \frac{1}{2} \int_V (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) dV$

### Phys. Experiment - Einstein Photoeffekt 1905

- Grundlagenexperiment zur Quantenphysik
- Teilchenphänomen → *Licht*
- $E = h \cdot \nu$  |  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} Js$  |  $I \nu =$  **Frequenz**
- Nobelpreis für Physik 1921

### Erkenntnissand – ‚Moderne‘ Physik

- Diskrete Physik
- Quantenmechanik, Quantenfeldtheorie, ...
- Teilchenphänomene → *Licht*
- Energie  $E = h \cdot \nu$



Das Bohrsche Atommodell - Positiver Atomkern und negative Elektronenschalen.

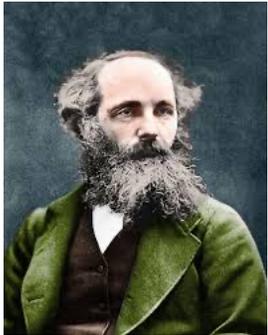
## Modelle

# Physikalisch-technische Grundlagen

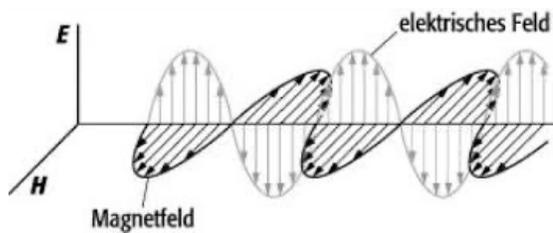
## Physikalische Energie (II)

### Klassische Physik -Wellenmodell

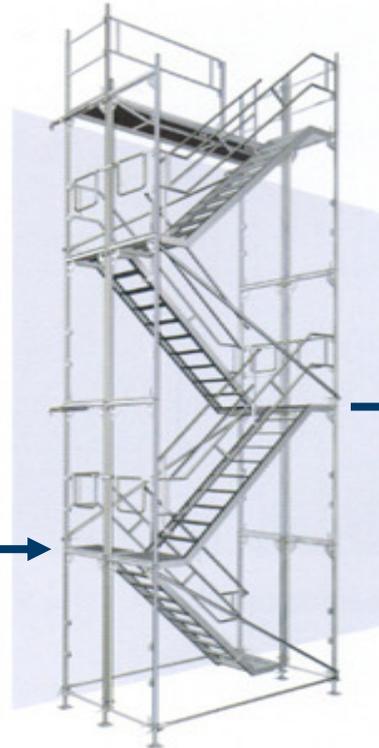
Maxwell



1831 - 1879



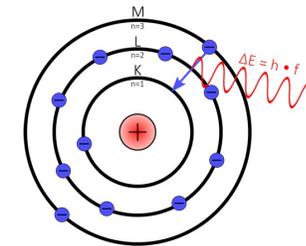
### Modelltreppe



### Moderne Physik – Teilchenmodell

Bohr

Wellengleichung  $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$   
Schrödinger



Wo ist die Energie ?

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Physikalische Energie (III)

### Schrödingergleichung –zeitabhängig

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$



Hamiltonoperator - Energieoperator



zeitliche Entwicklung möglicher Energiemesswerte

### Schrödingergleichung –zeitunabhängig | stationär

$$\hat{H} \varphi_E = E \varphi_E$$



Hamiltonoperator -Eigenwertgleichung



- HO ist hermitesch (oder *symmetrisch, selbstadjungiert, ...*) ist auf einen Hilbertraum definiert  $\leadsto$  Quantenmechanik
- $\varphi_E$  Eigenfunktionen des HO
- Eigenfunktionen haben reelle Eigenwerte  $\rightarrow$  **Energie**
- alle Messwerte der Physik sind reelle Größen!



Erwin Schrödinger

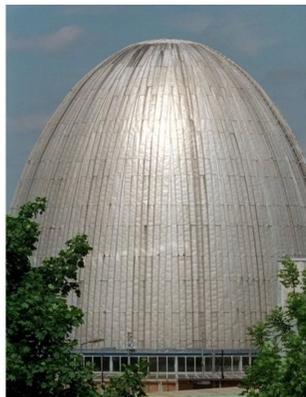
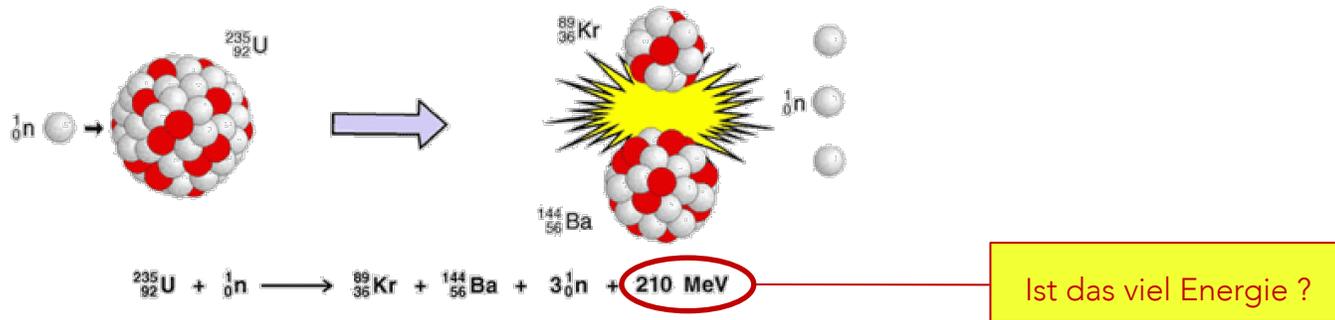
1887 – 1933 -1961

**Nobelpreis**

# Physikalisch-technische Grundlagen

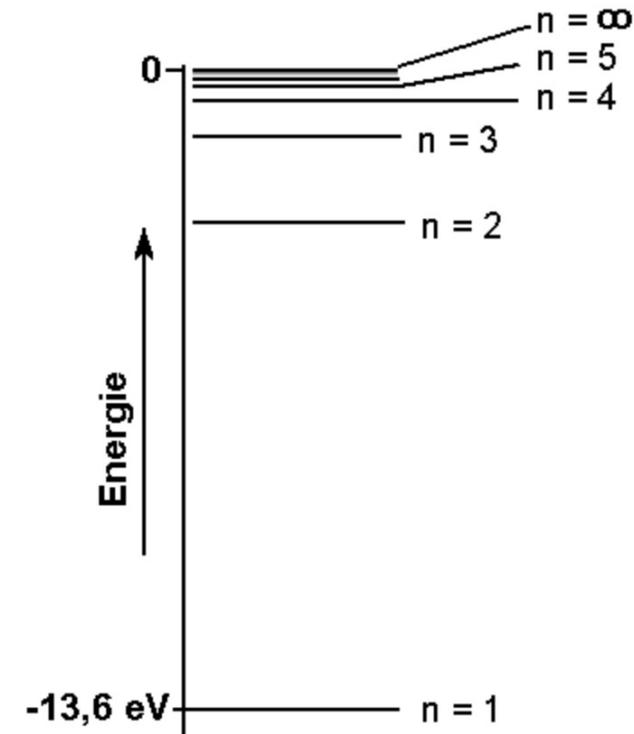
## Physikalische Energie (IV)

### Kernspaltung



Der inzwischen abgeschaltete Forschungsreaktor FRM I in Garching. Das sogenannte Garching „Atom-Ei“ der Technischen Universität München war vor 50 Jahren, am 31. Oktober 1957, als erste nukleare Anlage in Deutschland in Betrieb genommen worden. foto: dpa

### Bohr'sches Atommodell



Niels Bohr  
1885 – 1922 -1962

Nobelpreis

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Grundlegendes zum Feldbegriff (I)

<p><b>Sichtweisen</b></p> <p><i>Was ist richtig/wahr?</i></p>	<p><i>Mathematische Hilfsgröße</i></p> <p>Angabe der räumlich/zeitlichen Verteilung einer physikalischen Größe, z.B. Temperatur in einem Raum</p>	<p><i>Eigenständige physikalische Entität</i></p> <p>Ein Feld kann einen Impuls, Drehimpuls und Energie tragen, so wie z.B. ein anderes –materielles- physikalisches System auch.</p>	
<p><b>Historische Entwicklungen</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ physikalische Begriffe haben oftmals historische Wandlungen erlebt</li> <li>▪ Ursprung im 18. Jahrhundert in der Kontinuumsmechanik</li> <li>▪ keine eigene Entität -&gt; Newtonsche Mechanik</li> <li>▪ 19. Jahrt. ED-Dynamik wurde durch Faraday/Maxwell zu einer eigenen Entität, aber mit Äthermodell</li> <li>▪ Ausbreitung im Vakuum, d.h. kein Äther notwendig!</li> <li>▪ heute: Materie und Feld/Energie gleichwertig -&gt; Eigenschaften des Vakuums -&gt; QE</li> </ul>		 <p>Michael Faraday 1791- 1867</p>

[Quelle - WIKIPEDIA]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Grundlegendes zum Feldbegriff (II)

<p><b>Vorstellungen</b></p> <p><b>Modelle</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Feld <math>\leadsto</math> räumlich weitläufig <math>\leadsto</math> Kontinuum <math>\leadsto</math> Welle   Teilchen <math>\leadsto</math> räumlich lokal Dualismus Welle-Teilchen <math>\leadsto</math> Widerspruch <math>\leadsto</math> Modelle</li> <li>▪ Feld ist eine physikalische Größe, die an jedem Ort <math>\mathbf{x}</math> und zu jeder Zeit <math>t</math> definiert ist, d.h. einen physikalischen Wert annimmt</li> <li>▪ Feldvorstellung ist eine der bedeutenden Vorstellungen/Modell in der Physik</li> <li><math>\leadsto</math> Feld als Mittelwertbildung komplexer Mikroteilchenbewegungen: Skalarfelder <math>\leadsto F(\mathbf{x}, t)</math>, z.B. Temperatur   Vektorfelder <math>\leadsto \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)</math>, z.B. <math>\mathbf{v}</math></li> <li><math>\leadsto</math> Fundamentalfelder / Entität: Elektrisches Feld <math>\mathbf{E}(\mathbf{x}, t)</math>, da es eine Grundkraft der Natur erzeugt (?) Nachweis über Kraftwirkung auf Ladungen <math>\leadsto</math> Bedeutung der Lorentz-Kraft</li> <li>▪ Felder erfüllen DGL <math>\leadsto</math> Bewegungsgleichungen <math>\leadsto</math> Wellengleichungen</li> </ul>
<p><b>Wechselwirkungen</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Newton Fernwirkungstheorie</li> <li>▪ SRT <math>\leadsto</math> endliche Wirkungsgeschwindigkeit</li> <li>▪ Kraftwirkung zwischen zwei Körpern (Materie) im Raum wird durch die Wirkung erklärt, dass der eine Körper die Kraft/Energie an das Feld abgibt und es auf den anderen Körper überträgt</li> </ul>
<p><b>Elektrodynamik (ED)</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Feld klassisch <math>\leadsto</math> Klassische Feldtheorie</li> <li>▪ Feld gequantelt <math>\leadsto</math> Quantenelektrodynamik (QED)</li> <li>▪ Bewegungs- bzw. Feldgleichungen <math>\leadsto</math> Maxwell-Gleichungen <math>\leadsto</math> Wellengleichungen</li> <li>▪ Austauschteilchen ist das Photon <math>\leadsto</math> ‚Teilchen‘ ?</li> </ul>

# Physikalisch-technische Grundlagen

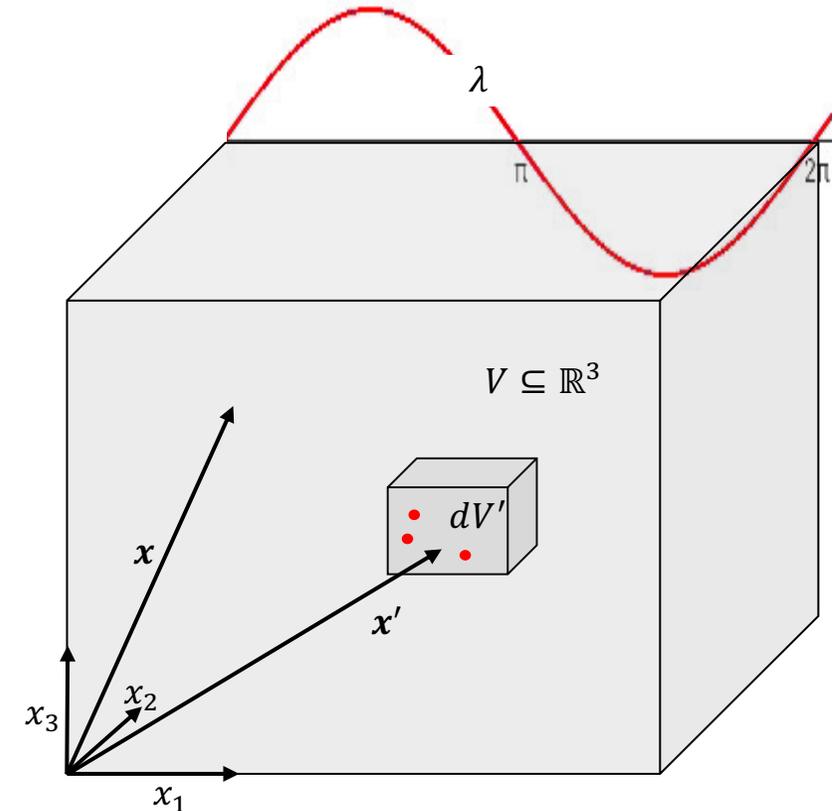
## Grundlegendes zum Feldbegriff (III)

<p><b>Dynamik</b></p>	<p>1. Felder sind orts- und zeitabhängige Funktionen</p> <hr/> <p>2. Bewegungsgleichungen sind die Feldgleichungen (FG)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aussage hat durchaus definatorischen Charakter</li> <li>▪ Lösungen von DGL (s. o.)</li> </ul> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Felder sind phy. Systeme mit <b>unendlich</b> vielen Freiheitsgraden</li> <li>▪ Teilchen bilden phy. Systeme mit <b>endlich</b> vielen Freiheitgrade</li> </ul>
<p><b>Elektrodynamik</b></p>	<p>1. FG - Maxwell-Gleichungen (MG)  <math>\leadsto</math> Wellengleichungen</p> $\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = 0 \text{ (homogen)}$ <hr/> <p>2. FG - Kovariante Formulierung (s. Vorlesung ED)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ System von gekoppelten DGL erster Ordnung (s.u.), in der Urformulierung nicht relativistisch</li> <li>▪ Überleitung DGL zweiter Ordnung, nicht gekoppelt (s. u.)  <math>\leadsto</math> Wellengleichungen</li> </ul> <hr/> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Formulierung incl. relativistischer Effekte</li> <li>▪ kovarianter Viererstrom: <math>\rho, \mathbf{j} \rightarrow j^\mu = (\rho, \mathbf{j})</math></li> <li>▪ kovariantes Viererpotential: <math>\phi, \mathbf{A} \rightarrow A_\mu = (\phi, \mathbf{A})</math></li> <li>▪ antisymmetrische Feldstärketensor: <math>F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu</math></li> <li>▪ ... -&gt; Energie-Impuls-Tensor <math>T^{\mu\nu}</math> ...</li> </ul>

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Makroskopische Phänomene | Betrachtungen

<b>Vorstellung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>mikroskopisch</b> – Phänomene im räumlich atomaren Bereich</li> <li>↳ Diskretheit von Photonen – Anzahl   Dichte   Photonenstrom</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>makroskopisch</b> – Phänomene im ‚überatomaren‘ Bereich</li> <li>↳ Vernachlässigung der Diskretheit des Photons und der elektrischen Ladung in den meisten Anwendungen</li> </ul>
<b>Beispiel</b> Antenne (Mobiltelefon)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>P = 100W, f = 10^8 Hz = 0,1 GHz</math>, isotrop, frequenzmoduliert</li> <li>▪ Entfernung 100 km -&gt; Mittleres E-Feld -&gt; <math>\hat{E} = 0,5 \frac{mV}{m}</math></li> <li>↳ Photonenfluss <math>\approx 10^{12} \text{ Photonen/cm}^2 \cdot s</math></li> <li>↳ Photonen im <b>Wellenlängenvolumen</b> <math>(3m)^3 \approx 10^9</math> Photonen</li> <li>↳ ‚Normalerweise spricht ein Gerät nicht auf die individuellen Photonen an; es ist der kumulative Effekt vieler emittierter oder absorbierter Photonen, der als kontinuierliche, <b>makroskopisch</b> beobachtbare Wirkung erscheint. In diesem Fall ist die rein klassische Betrachtungsweise durch die MG erlaubt und angemessen.‘</li> </ul>



• = mikroskopisch

$dV'$  = makroskopisch

$V$  = betrachtetes Gesamtvolumen

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Vakuum | Betrachtungen

<p><b>Definitive Beschreibung</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>Technisch: ‚Im Vakuum gibt es keine festen Objekte oder Flüssigkeiten, nur extrem wenig Gas und damit auch einen extrem niedrigen Gasdruck.‘</i></li> <li>▪ <i>Physikalisch: ‚... Vakuum bezeichnet ein theoretisches Konzept, die vollständige Abwesenheit von Materie in einem Raumgebiet.‘</i></li> </ul> <p style="background-color: yellow;">Gibt es physikalische <b>Vakuum-Energie</b> ?</p>	<p><b>Naturkonstanten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Primitivität/Influenzkonstante <math>\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}</math></li> <li>▪ Permeabilität <math>\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}</math></li> <li>▪ Wellenwiderstand <math>Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 376,73 \Omega</math></li> <li>▪ Lichtgeschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) <math>c_0 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 299\,792 \frac{km}{s} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}</math></li> </ul>
<p><b>Vakuum des Weltraumes</b> Universum</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <i>kein vollständiges Vakuum -&gt; im Mittel 1 Teilchen pro <math>cm^3</math></i></li> <li>▪ <i>gefüllt mit einem ‚dünnen‘ Wasserstoffgas</i></li> </ul>	<p><b>Felder und Teilchen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ EM-Felder- statisch und dynamisch -&gt; EM-Wellen</li> <li>▪ Gravitationsfelder</li> <li>▪ Elementarteilchen- real und virtuell</li> <li>▪ QED - Grundzustand/Vakuumzustand eines phy. Systems</li> </ul> <p><math>\leadsto</math> endliche Energie im Grundzustand -&gt; QM -&gt; harmonischer Oszillator</p> <p style="background-color: yellow;"><b>Technik -&gt; Anwendung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <b>Durchschlagfestigkeit von E-Feldern</b></li> <li>▪ <b>Isolatoren und Schaltgeräte in der Elektrotechnik</b></li> </ul>

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Maxwell'sche Gleichungen, makroskopischer Elektromagnetismus (I)

<p><b>Gauß'sches Gesetz (E)</b></p>	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ $[\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\mathbf{D}</math>-Feld ist ein Quellenfeld und die Ladungsdichte ist Quelle des elektrischen Feldes</li> </ul>	$\oint_{\text{Oberfläche}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = Q$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elektrischer Fluss durch die geschlossene Oberfläche eines Volumens ist proportional zur inneren/enthaltenen Ladung</li> </ul>
<p><b>Gauß'sches Gesetz (M)</b></p>	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ $[\nabla \cdot \mathbf{B} = 0]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\mathbf{B}</math>-Feld ist quellenfrei</li> <li>▪ Es gibt keine magnetischen Monopole</li> </ul>	$\oint_{\text{Oberfläche}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Magnetischer Fluss durch die geschlossene Oberfläche eines Volumens verschwindet.</li> </ul>

[MG im Vakuum, mit  $\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}$  und  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ]

[Quellen – JACKSON | MESCHÉDE | WIKIPEDIA]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Maxwell'sche Gleichungen, makroskopischer Elektromagnetismus (II)

### Induktionsgesetz

Faraday - 1831

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\left[ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right]$$

Wechselstromtechnik

- Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld -> Vektorpotential
- Harmonische Lösung  $\sim e^{-i\omega t}$  führt zur DGL-Vereinfachung  $\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}$

$$\oint_{\text{Kurve Leiterschleife}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{eingeschlossene Fläche der Kurve}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

- EMK  $\mathcal{E} = \oint_{\text{Kurve Leiterschleife}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -k \frac{\partial \phi_m}{\partial t}$

Wechselstromgenerator

### Durchflutungsgesetz

Ampere – ohne Verschiebungsstrom

Maxwell – mit Verschiebungsstrom

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}$$

$$\left[ \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} \right]$$

Verschiebungsstrom

Wechselstromtechnik

- Ein sich zeitlich änderndes E-Feld erzeugt ein magnetisches Wirbelfeld
- Harmonische Lösung  $\sim e^{-i\omega t}$  führt zur DGL-Vereinfachung  $\nabla \times \mathbf{H} = i\omega \mathbf{D} + \mathbf{j}$

$$\oint_{\text{Kurve Leiterschleife}} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{\text{eingeschlossene Fläche der Kurve}} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A} + I$$

Leitungsstrom

- Mag. Zirkulation über die Leiterschleife einer Fläche ist gleich der summe aus Leitungsstrom und der zeitlichen Änderung de el. Flusses durch die Fläche

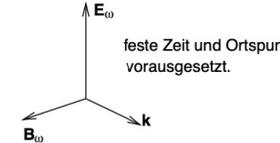
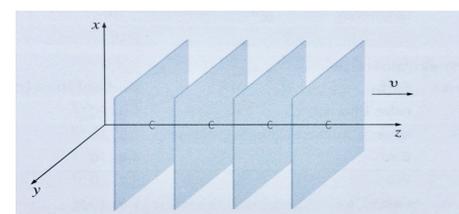
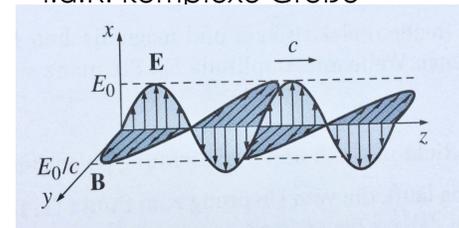
# Physikalisch-technische Grundlagen

## Wellengleichungen im Vakuum

Voraussetzungen			Herleitung	$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{F}}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{F} = 0$	DGL-Typ für 3-dim.
Ladungen	$\rho_{el}(\mathbf{r}) = 0$	$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \mathbf{D} = \mu_0 \mathbf{E}$	1. Durchflutungsgesetz	$\nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}}$	
Materie	$\mathbf{j}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}$	d.h. $\mu_r = \varepsilon_r = 1$	2. Zeitliche Ableitung und Satz v. Schwarz	$\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{H}) = \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}})$	$\sim \nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \varepsilon_0 \ddot{\mathbf{E}}$
Felder	$c_0^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}$		3. Induktionsgesetz	$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \dot{\mathbf{H}}$	$\sim \dot{\mathbf{H}} = -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E}$
Maxwell'sche Gleichungen	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$	Gauß'sches Gesetz (E)	4. Einsetzen 3. in 2.	$\nabla \times \left( -\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{E} \right) = \varepsilon_0 \ddot{\mathbf{E}}$	$\sim \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\mu_0 \varepsilon_0 \ddot{\mathbf{E}}$
	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Gauß'sches Gesetz (M)	5. Op. Identität und Gauß'scher Satz (E)	$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \Delta \mathbf{E}$ $\sim \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\Delta \mathbf{E}$	
	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Induktionsgesetz	6. Aus 4. und 5. folgt	$\Delta \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \ddot{\mathbf{E}}$	
	$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	Durchflutungsgesetz	<b>Wellengleichungen (WG)</b> Telegraphengleichungen $\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$ und analog $\Delta \mathbf{B} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$		
Satz v. Schwarz	$\partial_x \partial_y f(x, y) = \partial_y \partial_x f(x, y)$	[Forster, Analysis 2, S. 59]			
Differentialoperatoren	$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{F}) - \Delta \mathbf{F},$ ...	[Bronstein, Taschenbuch der Mathematik, Kap. 13.2.7.1-2]			

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Wellengleichungen - Lösungen im Vakuum (exemplarisch E-Feld)

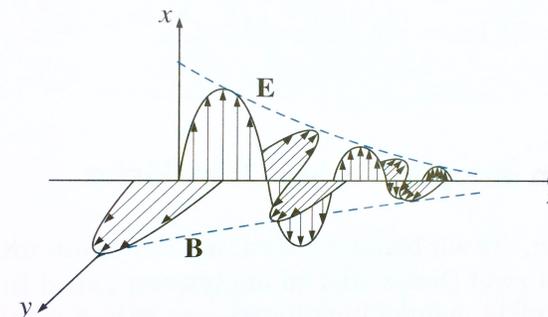
<b>Wellengleichung</b> homogen	$\Delta \mathbf{E} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$ vektorielle Darstellung	$\Delta E_i = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2}$ Komponentendarstellung	<b>Orthogonalität</b> $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}$ $i\mathbf{k} \times \mathbf{E}_k = i\omega \mathbf{B}_k$ $\mathbf{k} \times \mathbf{E}_k = \omega \mathbf{B}_k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\mathbf{k} \perp \mathbf{E}_\omega \perp \mathbf{B}_\omega</math></li> <li>▪ Skalarprodukt</li> <li>▪ <math>\sim L^2</math>-Norm (Hilbertraum)</li> </ul> 
<b>Lösung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>E_i(z, t) = g(z - vt) \sim</math> Felder beschreiben EM-Welle</li> <li>• <math>\mathbf{E}</math> und <math>\mathbf{B}</math> erfüllen (komponentenweise) homogene WG</li> </ul>		<b>Phasenfronten</b> Realteil der Lösungsfunktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t</math> Phase der Welle</li> <li>▪ <math>\sim</math> Fläche konstanter Phase = Ebenen</li> </ul>
Spektralzerlegung	$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) e^{-i\omega t}$ $\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) e^{-i\omega t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Definition <math>i \in \mathbb{C} = \text{Körper}</math></li> <li>▪ <math>\mathbb{C}</math> isomorph zu <math>\mathbb{R}^2 \sim i := (0,1)</math></li> <li>▪ Skalarprodukt in <math>\mathbb{C} \sim i^2 = -1</math></li> <li>▪ <math>(a, b) \cdot (a', b') = (aa' - bb', ab' + a'b)</math></li> </ul>	Ebenengleichung ( $E$ ) $E = \{(x, y, z)   ax + by = z\}$ für $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3, a, b \in \mathbb{R}$	
Lösungsansatz	$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_\omega(\mathbf{r}) \cdot e^{-i\omega t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mono. Lösung (<math>\omega = \text{const.}</math>)</li> </ul>	<b>Poyntingvektor (<math>\mathbf{I}</math>)</b> $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ oder	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SI-Einheit <math>\frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}}</math></li> </ul>
Ebene Welle als Fundamental-lösung	$E_i(\mathbf{r}, t) = E_{ik} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ mit $\omega = \omega(k) = c \mathbf{k} $	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\mathbf{k}</math>=Wellenvektor (reell)</li> <li>▪ <math> \mathbf{k}  = \frac{2\pi}{\lambda}</math> und <math>\mathbf{k} \perp</math> Wellenfront</li> <li>▪ <math>E_i</math> mind. 2mal stetig diff.-bar</li> <li>▪ Basisfkt. <math>\sim</math> nur punktuell</li> </ul>	Energiestromdichte Energieflussdichte mit $\mathbf{k} \parallel \mathbf{S} \parallel \mathbf{c}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ i.d.R. komplexe Größe</li> </ul> 

[Quellen – <http://www.itp.tu-berlin.de/fileadmin/a3233/lehrevorws06/lehress04/TPIII/lesson2.pdf> | MEYBERG, ... Teil 2 Kap.11 | JACKSON Kap. 6.7]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Maxwell'sche Gleichungen und EM-Wellen in Materie, spez. elektrischen Leitern

<b>Maxwell-Gl.</b> in Materie	Gleichungsformen wie im Vakuum	freie Ladungen, Strömen, Polarisation und Magnetisierung	<b>Maxwell-Gl.</b> el. Leiter	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \varepsilon^{-1} \rho_f$ $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}$ $\nabla \times \mathbf{B} = \mu \sigma \mathbf{E} + \mu \varepsilon \partial_t \mathbf{E}$
makroskopisch	Mittelwertbildungen	s. <i>Makroskopische Phänomene</i>	<b>Freie Ladungen</b> Energietechnik	$\rho_f(t) = \rho_f(0) \cdot e^{-\left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\right)t}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zeitkonstante <math>\tau = \varepsilon/\sigma</math></li> <li>▪ Ladung ‚zerfließt‘ → Oberfläche</li> <li>▪ idealer Leiter <math>\sigma \rightarrow \infty \rightsquigarrow \tau = 0</math></li> <li>▪ guter Leiter <math>\tau \gg 1/\omega</math></li> </ul>
<b>Materialgleichungen</b>	elektrisch	magnetisch			
Allgemein	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon}_r \mathbf{E}$	$\mathbf{B} = \mu_0 \tilde{\mu}_r \mathbf{H}$	<b>W'gleichungen</b> el. Leiter	$\Delta \mathbf{E} = \mu \varepsilon \partial_t^2 \mathbf{E} + \mu \sigma \partial_t \mathbf{E}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ inhomogen</li> <li>▪ <math> \rho_f(t) = 0 </math></li> </ul>
Linearität	$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$	$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$			
Homogenität	$\varepsilon$ ist ortsunabhängig	$\mu$ ist ortsunabhängig	<b>Lösungen</b> Ebene Wellen	$\underline{\mathbf{E}}(z, t) = \underline{\mathbf{E}}_0 \cdot e^{i(kz - \omega t)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wellenvektor (komplex)</li> <li>▪ Felder sind transversal</li> <li>▪ Ausbreitung mit Dämpfung</li> <li>▪ Warum braucht die Energietechnik Ladungen und damit Leitungen?</li> </ul>
<b>Ohm'sches Gesetz</b>	$\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{f}$ $\rightsquigarrow \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ $\rightsquigarrow \mathbf{j} \approx \sigma \cdot \mathbf{E}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\sigma</math> Leitfähigkeit</li> <li>▪ i.d.R. gilt: <i>Stromdichte</i> <math>\mathbf{j} \sim</math> zur Kraft pro Ladungseinheit <math>\mathbf{f}</math></li> <li>▪ Grundlage Lorentz-Kraft</li> <li>▪ Gleichspannung <math>U = R \cdot I</math></li> </ul>			



[Quellen - JACKSON Kap. 1.4; 5.8; 6.6 ; GRIFFITHS Kap. 6.4; 9.3; 9.4]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## EM-Wellen in Materie, spez. elektrischen Leitern

Wellenzahl komplex	$\underline{k} = k + i\kappa$ und $\underline{k}^2 = \mu\epsilon\omega^2 + i\mu\sigma\omega$	komplexe Größe, d.h. Rechenregeln in $\mathbb{C}$	Wellenwiderstand $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}}$ $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = Z_{\text{Vakuum}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>SI-Einheit <math>\Omega</math></li> <li>Vakuumwert <math>\approx 376,7 \Omega</math></li> <li><math>\sim</math> Naturkonstante</li> </ul>
Dämpfung	$\underline{E}(z, t) = \underline{E}_0 e^{-\kappa z} e^{i(kz - \omega t)}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imaginärteil</li> <li>Dämpfung in z-Richtung</li> </ul>	Leitung $\mu_r \approx 1 \mid \epsilon_r \approx 5$ $\sim Z_0 > Z_{\text{Leitung}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Annahmen</li> <li>Wellenwiderstand ist kleiner!</li> </ul>
Eindringtiefe	$d = \kappa^{-1} \approx e^{-1}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imaginärteil</li> <li>Skin-Effekt <math>\sim \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}</math></li> </ul>	Poyntingvektor (II) $\underline{S} = \underline{E} \times \underline{H}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>s. Poyntingvektor (I)</li> </ul>
Wellenlänge	$\lambda = 2\pi/k$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realteil</li> <li>sinusförmig</li> </ul>	Energiestrom $\underline{S} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}}  E_0 ^2 \underline{n}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energie pro Zeit- und Flächeneinheit</li> </ul>
Ausbreitungsgeschwindigkeit	$v = \frac{\omega}{k} = \lambda \cdot f$ $c = \lambda \cdot f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realteil</li> <li>Phasengeschwindigkeit</li> <li><math>\sim</math> keine Informationsübertrag.</li> <li><math>\sim</math> Analog zur Mechanik <math>s = v \cdot t</math></li> </ul>	Energiedichte $u = \frac{\epsilon}{2}  E_0 ^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>zeitliches Mittel</li> </ul>
Brechungsindex	$n = \sqrt{\frac{\mu}{\mu_0} \frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \frac{c_{\text{Vakuum}}}{c_{\text{Medium}}} = \frac{c_0}{c}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Realteil</li> <li>i. allg. gilt <math>n = n(\omega)</math> und <math>\underline{n} \in \mathbb{C}</math></li> <li>Maxwell-Bedingung</li> </ul>	<p><b>Geschwindigkeit</b> <math>v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}</math></p> <p><b>Energiestrom</b> <math>v = c_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r\epsilon_r}}</math></p> <p><b>Energietransport</b></p>	<p>Gruppen- geschwindigkeit <math>v_g = \frac{d\omega(k)}{dk}</math></p> <p><math>\sim</math> EM-Wellen gilt <math>\omega(k) = \frac{c \cdot k}{n(k)}</math></p> <p>Phasen- geschwindigkeit <math>v_p = \frac{\omega(k)}{k}</math></p>

[Quellen - JACKSON Kap. 5; 7; 8 ; GRIFFITHS Kap. 6.4; 9.3; 9.4]

# Physikalisch-technische Grundlagen

## Anlagen

- A1 Zentrale Bewegungsgleichungen der Physik
- A2 Elektrodynamische Größen (Auszug)
- A3 ***D*** und ***E***-Felder in Materie
- A4 Energieerhaltung im System Feld und Ladung

# Physikalisch-technische Grundlagen (A1)

## Zentrale Bewegungsgleichungen

Klassische Mechanik	Newton	1643 - 1727	Kräfte	$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} = m \cdot \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \sum_i \mathbf{F}_i$	
	Lagrange	1736 - 1813	Energien	$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$ mit $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ und $i \in [1; n]$	$\rightarrow L = T - V$ Euler – Lagrange – DGL
	Hamilton	1805 - 1865	Energien	$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} ; -\dot{p}_i = \frac{\partial H}{\partial q_i} ; -\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} ;$ mit $p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$	$\rightarrow H = T + V$ Variationsprinzip
Klassische Feldtheorie	Maxwell	1831 - 1879	E-Dynamik Felder	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} ; \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} ; \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 ; \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	mikroskopische MG
	Einstein	1879 - 1955	Gravitation Felder	$R_{\mu,\nu} = -\frac{1}{2} g_{\mu,\nu} R$ $R_{\mu,\nu}$	Riem. Krümmungstensor; $g_{\mu,\nu}$ metrischer Tensor; $R$ Krümmungsskalar
QM	Schrödinger	1887 - 1961	Wellenfunktionen	$i\hbar \frac{\partial}{\partial t}  \psi(t)\rangle = \hat{H}  \psi(t)\rangle$	allgemeinste SG – Form
	Heisenberg	1901 - 1976	Matrizenmechanik	$\frac{d}{dt} \hat{A}^H = \frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{A}^H] + \hat{U}(t) \left( \frac{\partial}{\partial t} \hat{A}^S \right) \hat{U}^\dagger(t)$	allgemeinste Form
QED	Dirac	1902 - 1984	verallg. E-Dynamik  relativis. QM	$\partial_\mu F^{\mu,\nu} = j^\nu$	$F^{\mu,\nu}$ Feldstärketensor; $j^\nu$ Viererstromdichte  relativistische SG – Gleichung

[Quellen -JACKSON | GRIFFITHS | LANDAU | FEYMNMAN | LECHNER]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A2)

## Elektrodynamische Größen (Auszug)

elektrisch	Ladung <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho(\mathbf{r}, t)</math> -&gt; Monopol als kleinste Einheit   SI-Einheit <math>C</math></li> <li>• Elektron <math>q = 1,602 \cdot 10^{-19}C</math>   Masse <math>m_0 = 9,109 \cdot 10^{-31}kg</math></li> <li>• Proton <math>q = 1,602 \cdot 10^{-19}C</math>   Masse <math>m_0 = 1,672 \cdot 10^{-27}kg</math></li> </ul>	Feld <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)</math>   SI-Einheit <math>\frac{V}{m}</math> <math>\sim</math> Extrabetrachtungen</li> </ul>
	Stromdichte <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)</math>   SI-Einheit <math>\frac{A}{m^2}</math></li> <li>• Flächen-Stromdichte -&gt; <i>Achtung keine Volumengröße!</i></li> <li>• Maß für elektrische Belastung eines Leiters -&gt; Joule-Wärme</li> </ul>	Flussdichte <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \equiv</math> Verschiebungsdichte   SI-Einheit <math>\frac{C}{m^2} = \frac{As}{m^2}</math></li> </ul>
magnetisch	Ladung <ul style="list-style-type: none"> <li>• kleinste Einheit Dipol <math>\sim</math> Grundlage Strom <math>\sim \dot{q}</math></li> <li><math>\sim</math> Stromdichte <math>\sim</math> technischer Strom</li> <li>• eine Quelle für das Magnetfeld <math>\sim I = \int_{\text{Leiterfläche}} \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}</math></li> </ul>	Feld <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)</math>   SI-Einheit <math>\frac{A}{m}</math></li> </ul>
		Flussdichte <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) \equiv</math> magnetische Induktion   SI-Einheit <math>\frac{Vs}{m^2}</math></li> </ul>

Kommunikationstechnik ?

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

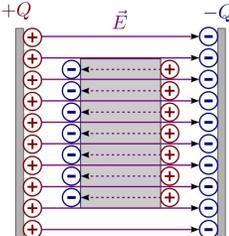
## D und E- Felder in Materie (I)

<p><b>Influenz</b> Feld-Leiter</p>	<p>Phänomen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Physikalische Basisexperimente</li> <li>• Verschiebung der beweglichen Ladungen in einem <b>Leiter</b>, wenn in ein elektrische gebracht wird.</li> <li>• WW Ladung &lt;-&gt; Feld</li> <li>↪ Faraday'scher Käfig</li> </ul>
<p><b>Polarisation</b> Feld-Nichtleiter  Dielektrische Polarisation</p>	<p>Phänomen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{P} \mid \frac{As}{m^2}</math> und <math>\mathbf{P} = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0\mathbf{E}</math> -&gt; <math>\epsilon_r</math> = Dielektrizitätszahl (nächste Seite)</li> <li>• Verschiebungspolarisation = Verschiebung der el. Ladungen in neutralen Atomen, Molekülen, ...gegeneinander. E-Feld induziert el. Dipolmomente.</li> <li>• Orientierungspolarisation = Ausrichtung permanenter Dipole (z.B. <math>H_2O</math>) längs eines E-Feldes.</li> <li>• Frequenzabhängigkeit -&gt; z.B. im Bereich des sichtbaren Lichts <math>\approx 10^{15}Hz</math> kommt es zu Resonanzen der Elektronen im E-Feld des Atomkern -&gt; <b>Richtungsänderung</b> von Lichtwellen im Glas -&gt; Brechungsindex</li> </ul>

[Quelle – STÖCKER | MESCHEDÉ | WIKIPEDIA ]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

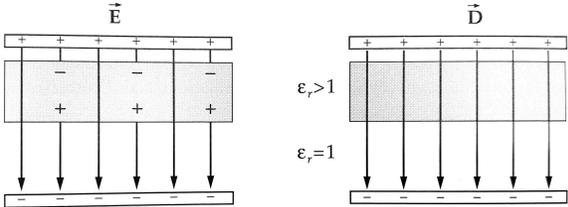
## D und E- Felder in Materie (II)

<p><b>Dielektrikum</b></p>	<p>Phänomen</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dielektrikum ist ein Isolator, der in ein el. Feld eingebracht wird</li> <li>• Wirkung der Polarisation führt zur Reduktion des elektrischen Feldes durch das Dielektrikum</li> </ul>
<p><b>Dielektrizitätszahl</b> Permittivitätszahl</p>	<p style="background-color: yellow; text-align: center;">Energietechnik - elektrische Isolationen</p>  <p><small>Das HGÜ-Kabel 525-kV P-Laser ist auch umweltverträglich. Bild: Prysmian Group</small></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\epsilon_r</math>   dimensionslos , materialabhängig</li> <li><math>\epsilon_{r,Vakuum} = 1,0</math></li> <li><math>\epsilon_{r,Luft} \approx 1,0006</math></li> <li><math>\epsilon_{r,Wasser} \approx 80</math></li> <li><math>\epsilon_{r,Porzellan} \approx 2 - 6</math></li> <li>• Kapazitätserhöhung in Kondensatoren <math>\rightarrow \epsilon_r = \frac{C}{C_{vak}}</math></li> <li>• Verhalten bei zeitlich sich ändernden Feldern ?</li> </ul>
<p><b>Permittivität</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad   \quad \frac{As}{Vm}</math></li> </ul>
<p><b>El. Suszeptibilität</b></p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\chi_e = \epsilon_r - 1</math>   dimensionslos</li> </ul>

[Quelle – MESCHÉDE | JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

## D und E- Felder in Materie (III)

<p><b>Verschiebungsdichte</b></p> <p>oder</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• dielektrische Verschiebung</li> <li>• Verschiebungsflussdichte</li> <li>• elektrische Flussdichte</li> </ul>	<p>Phänomen</p>  <p>Abbildung 15.13: <math>\vec{D}</math>- und <math>\vec{E}</math>-Feld im teilweise mit Dielektrikum gefüllten Plattenkondensator</p>	<p>Deutungen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{D} \mid \frac{As}{m^2} \sim</math> Flächenladungsdichte</li> <li>• <math>\mathbf{E}</math>-Feld wird durch polarisiertes Feld im Dielektrikum geschwächt</li> <li>• <math>\mathbf{D}</math>-Feld bleibt vom pol. Feld im Dielektrikum unbeeinflusst</li> <li>• <math>\mathbf{E}</math>-Feld übt auf Ladungen Kräfte aus</li> <li>• <math>\mathbf{D}</math>-Feld wird aus Ladungen erzeugt</li> </ul>
<p><b>Feldbeschreibende Größen</b></p>	<p>Elektrisches Feld <math>\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \sim \mathbf{E} = \frac{F}{Q}</math></p> <p>Beschreibung über Kräfte := Kraftwirkung des Feldes auf eine Probeladung</p>	<p>Elektrische Flussdichte <math>\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) \sim \mathbf{D} = \frac{Q}{A}</math></p> <p>Beschreibung über Ladungstrennung := Maß für die auf einer Fläche im el. Feld hervorgerufene Ladungstrennung</p>
<p><b>Materialgleichungen (E)</b></p> <p>(definitiver) Zusammenhang der Feldgrößen</p>	<p>richtungsgleich</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}</math></li> <li>• <math>\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}</math></li> <li>• <math>\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}</math></li> <li>• <math>\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \chi_e \epsilon_0 \mathbf{E}</math></li> </ul>	<p>nicht richtungsgleich</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{D} = \epsilon_0 \tilde{\epsilon}_r \mathbf{E}</math>    <math>\tilde{\epsilon}_r =</math> Dielektrizitätstensor</li> <li>• Beispiel <math>\sim</math> nichtlineare Optik <math>\sim</math> Lasertechnologie</li> </ul>

[Quelle – STÖCKER | MESCHÉDE ]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

## $D$ und $E$ - Felder in Materie (IV)

<p><b>Herleitung</b> <b>elektrische Flussdichte <math>D</math></b> Elektrostatik</p> <p>[JACKSON, Kap.4.3 S.176-179]</p>	<p>Grundlagen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anwesenheit von Ladungen, Leitern und anderen dichten Medien</li> <li>• Unterscheidung von mikroskopischen und makroskopischen Feldern</li> <li>• mikro. zu makroskopische MG := Mittelung über makro. kleine Bereiche, die mikro. groß sind</li> <li>• <i>„Zunächst wollen wir den Leser nur an die Hauptzüge der elementaren Behandlung der <b>Polarisation</b> erinnern, die über Schwierigkeiten und manchmal subtile Aspekte des Mittelungsprozesses und der Einführung makroskopischer Größen hinweggeht.“</i></li> </ul>
<p><b>E-Feld Übergang</b></p>	<p><math>\nabla \times \mathbf{E}_{mikro} = \mathbf{0} \rightarrow \nabla \times \mathbf{E} = \mathbf{0}</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\mathbf{E}</math> = gemittelttes E-Feld</li> <li>• <math>\leadsto</math> E-Feld ist in der makr. Elektrostatik weiterhin aus einem Potential <math>\phi(\mathbf{x})</math> ableitbar ist</li> </ul>
<p><b>E-Feld in Materie</b></p>	<p><math>\rho = \rho_{frei} + \rho_{gebunden}</math> <math>\rho = \rho_{frei} + \rho_P</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirkung auf freie Ladungen <math>\leadsto</math> Influenz</li> <li>• Wirkung auf gebundene Ladungen <math>\leadsto</math> Polarisation</li> </ul>
<p><b>El. Polarisation</b></p>	<p><math>\mathbf{P}(\mathbf{x}) = \sum_i N_i \langle \mathbf{p}_i \rangle</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verzerrungen im Medium durch das E-Feld</li> <li>• Ausbildung eines Dipolmomentes pro Volumeneinheit</li> <li>• <math>\mathbf{p}_i</math> Dipolmoment der i-ten Molekülart im Medium, mit der Mittelung über ein <math>dV</math> um <math>\mathbf{x}</math></li> <li>• <math>N_i</math> mittlere Anzahl der Moleküle des i-ten Typs pro Volumeneinheit um <math>\mathbf{x}</math></li> </ul>

[Quelle – JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

## D und E- Felder in Materie (V)

<p><b>Herleitung elektrische Flussdichte (II)</b></p>	<p>Grundlagen - Elektrostatisches Potential</p> $\Phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3x' \frac{\rho(\mathbf{x}')}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' }$	
<p><b>makroskopische Ladungsdichte</b></p>	$\rho(\mathbf{x}) = \sum_i N_i \langle e_i \rangle + \rho_{frei}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>e_i</math> Gesamtladung der Moleküle -&gt; i.A. ist die mittlere molekulare Ladung gleich Null</li> <li>• <math>\rho_{frei}</math> Überschuss freier Ladungen</li> </ul>
<p><b>makroskopische Potentialbetrachtungen</b></p>	$\Delta\Phi(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{\rho(\mathbf{x}')}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' } \Delta V + \frac{\mathbf{P}(\mathbf{x}') \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}')}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' ^3} \Delta V \right]$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta V</math> am Ort <math>\mathbf{x}'</math></li> <li>• <math>\rho(\mathbf{x}') \Delta V</math> Ladung in <math>\Delta V</math></li> <li>• <math>\mathbf{P}(\mathbf{x}') \Delta V</math> Dipolmoment des <math>\Delta V</math> (hier nur Dipole berücksichtigt)</li> </ul>
<p><b>Potential am Raumpunkt <math>\mathbf{x}</math></b></p>	$\Phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3x' \left[ \frac{\rho(\mathbf{x}')}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' } + \mathbf{P}(\mathbf{x}') \cdot \nabla' \left( \frac{1}{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' } \right) \right]$ $\Phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3x' \frac{[\rho(\mathbf{x}') + \nabla' \cdot \mathbf{P}(\mathbf{x}')] }{ \mathbf{x} - \mathbf{x}' }$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integration <math>d^3x'</math> über den gesamten Raum</li> <li>• partielle Integration</li> <li>• Potentialverschiebung <math>\rho(\mathbf{x}') \rightarrow [\rho(\mathbf{x}') + \nabla' \cdot \mathbf{P}(\mathbf{x}')] \rightarrow</math> Ladungsverteilung</li> </ul>

[Quelle – JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

## $D$ und $E$ - Felder in Materie (VI)

<b>Herleitung elektrische Flussdichte (III)</b>	$\mathbf{E} = -\nabla\phi$		<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenhang Feld und Potential in einem konservativen Kraftfeld</li> </ul>
<b>Maxwell Gleichung</b>	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} [\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}]$		<ul style="list-style-type: none"> <li><math>[\rho - \nabla \cdot \mathbf{P}]</math> = um Polarisationladungen erweiterte Ladungsdichte</li> </ul>
<b>Umformungen</b>	$\begin{aligned} \nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} &= \rho - \nabla \cdot \mathbf{P} \\ \nabla \cdot \epsilon_0 \mathbf{E} + \nabla \cdot \mathbf{P} &= \rho \\ \nabla \cdot (\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}) &= \rho \end{aligned}$		<ul style="list-style-type: none"> <li>Rechenregeln Nabla-Operator</li> <li><math>(\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P})</math> Feldverschiebung durch Polarisation</li> </ul>
<b>Verschiebungsdichte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>dielektrische Verschiebung</li> <li>elektrische Flussdichte</li> </ul>	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$		<ul style="list-style-type: none"> <li>Definition Verschiebungsdichte</li> <li>Maxwell'sche Gleichung, Gauß'sches Gesetz (E)</li> </ul>
<b>Mikros- und makroskopische Maxwellgleichungen</b>	$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{1}{\epsilon_0} \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{0} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{0} \end{aligned}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>incl. Polarisation</li> <li>Elektrostatik</li> </ul>

[Quelle – JACKSON]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A3)

## D und E- Felder in Materie (VII)

<p><b>MG – Durchflutungsgesetz</b></p>	$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{j} = \mathbf{j}_V + \mathbf{j}_L$ <p style="text-align: center; color: red;">↓ Verschiebungsstromdichte</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Verschiebungsstrom bedeutet, dass ein sich änderndes el. Feld selbst dann, <b>wenn kein Strom</b> (Ladungsstrom <math>I_L</math>) <b>fließt</b>, ein magnetisches Feld erzeugt.</li> <li>• Was passiert dann ? -&gt; Induktionsgesetz</li> </ul>
<p><b>Verschiebungsstrom (-dichte)</b></p>	<p>Modell</p> <p>[Abb. MESCHÉDE S. 443]</p>	<p>Verschiebungsstrom im Kondensator</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• im Innern <math>\mathbf{j}_L = 0</math>, aber <math>\mathbf{j}_V \neq 0</math>, nur wenn <math>\omega \neq 0</math></li> </ul> <p style="background-color: yellow;">Was bedeutet <math>\omega \neq 0</math> für die Energietechnik ? Drehstrom   Isolation   Verluste   Stromnetzebenen   Energieübertragung   ...</p> <p>Beispiel</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Harmonische Lösung der MG - Verschiebungsstromdichte</li> </ul> $\dot{D} = \epsilon_0 \dot{E} = \epsilon_0 \omega E \quad \rightarrow \quad \frac{j}{\dot{D}} = \frac{1}{\epsilon_0 \omega \rho}$ <p> <math>\sim</math> Leiter <math>\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m</math>   Leitungsstrom überwiegt bis <math>\omega \approx 10^{19} Hz</math>  <math>\sim</math> Isolator <math>\rho_{Porzellan} = 1,7 \cdot 10^{12} \Omega m</math>   Verschiebungsstrom überwiegt ab <math>\omega \approx 0,1 Hz</math> </p>

# Physikalisch-technische Grundlagen (A4)

## Energieerhaltung im System Feld und Ladung (I)

Ladung im Feld  
Annahme  
Es existiert eine kontinuierliche Ladungs- und Stromverteilung in einem Volumen und es gibt  $\mathbf{E}$ - und  $\mathbf{B}$ -Felder in diesem Volumen

Die von den Feldern geleistete Arbeit pro Zeiteinheit ist  $\int_V \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV$   
Um welche physikalische Größe handelt es sich ?

Energie-  
erhaltung (I)  
Satz von  
Poynting

$$\int_V \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV = \int_V \left[ \mathbf{E} \cdot (\nabla \times \mathbf{H}) - \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right] dV = - \int_V \left[ \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) + \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right] dV = - \int_V \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \right] dV \quad \rightarrow \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = - \mathbf{j} \cdot \mathbf{E}$$

- Durchflutungsgesetz
- Elimination von  $\mathbf{j}$

- Vektoridentität für  $\nabla \cdot (\mathbf{a} \times \mathbf{b})$
- Induktionsgesetz

- lineare EM-Eigenschaften des makroskopischen Mediums, keine Dispersion und Verluste
- $W_e$  u.  $W_m$  = EM-Energie, incl. zeitveränderlicher Felder

Beliebigkeit des Volumens

Bedeutung ‚Die physikalische Aussage der Integralbeziehung bzw. des differentiellen Erhaltungssatzes ist die, dass die Summe aus der zeitlichen Änderung der in einem Volumen enthaltenen elektromagnetischen Energie und dem Energiestrom, der pro Zeiteinheit durch die Begrenzungsflächen des Volumens hindurchtritt, gleich dem Negativen der Leistung ist, die die Felder an den Quellen innerhalb des Volumens verrichten.‘ (S. 300/301)  
[vereinfacht: Ein EM-Feld kann Arbeit verrichten, wenn es dabei ‚schwächer‘ wird (WIKIPEDIA)]

[Quelle - JACKSON Kap. 6.7]

# Physikalisch-technische Grundlagen (A4)

## Energieerhaltung im System Feld und Ladung (II)

Energie- stromdichte	Poynting- vektor $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$	Bedeutung	Dimension
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Dichte u. Richtung Energietransportes (Energieflussdichte) EM-Feld</li> <li>Energiefluss ist identisch mit der phy. Leistung -&gt; Leistungsdichte</li> </ul>	$\frac{\text{Energie}}{\text{Fläche} \cdot \text{Zeit}} = \frac{\text{Leistung}}{\text{Fläche}} = \frac{J}{m^2 \cdot s} = \frac{W}{m^2} = \frac{N}{m \cdot s}$ <p>Erinnerung: Leistung <math>P = \frac{dE}{dt}</math>   Kraft <math>F = \frac{dE}{dx}</math></p>
Energie- erhaltung (II)	System aus Teilchen und Feldern	Grundlage Energieerhaltung (I) / Satz von Poynting  $\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} (E_{mech} + E_{Feld}) = \int_V \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV + \frac{d}{dt} \int_V u dV = - \oint_F \mathbf{S} \cdot d\mathbf{F}$ <p>-&gt; Was bedeutet Energieerhaltung</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-left: 200px;">Satz von Gauß</div>	$\frac{dE_{mech}}{dt} = \int_V \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} dV$ <p><math>E_{mech}</math> = Gesamtenergie aller Teilchen in V</p> <hr/> $E_{Feld} = \int_V u dV$ $= \frac{\epsilon_0}{2} \int_V (\mathbf{E}^2 + c^2 \mathbf{B}^2) dV$ <p><math>E_{Feld}</math> = Gesamte Feldenergie in V</p>
Impuls- erhaltung	Erhaltung Linearimpuls	$\left\{ \frac{d\mathbf{P}}{dt} \right\}_\alpha = \left\{ \frac{d}{dt} (\mathbf{P}_{mech} + \mathbf{P}_{Feld}) \right\}_\alpha = \oint_F \sum_\beta T_{\alpha\beta} d\mathbf{F}_\beta$ <p>-&gt; Maxwellscher Spannungstensor <math>T_{\alpha\beta}</math></p> <p style="text-align: right;"><i>mit <math>\alpha, \beta \in \{1,2,3\}</math></i></p>	$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + v \times \mathbf{B})$ <p>Lorentzkraft</p> $\frac{d\mathbf{P}_{mech}}{dt} = \int_V (\rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV$ <p><math>\mathbf{P}_{mech}</math> = Gesamtimpuls aller Teilchen in V</p> $\mathbf{P}_{Feld} = \mu_0 \epsilon_0 \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{H} dV$ <p><math>\mathbf{P}_{Feld}</math> = Gesamtimpuls aller Felder in V</p>

[Quelle - JACKSON Kap. 6.7]

# Stromnetze

Technische elektrische Energieversorgungssysteme

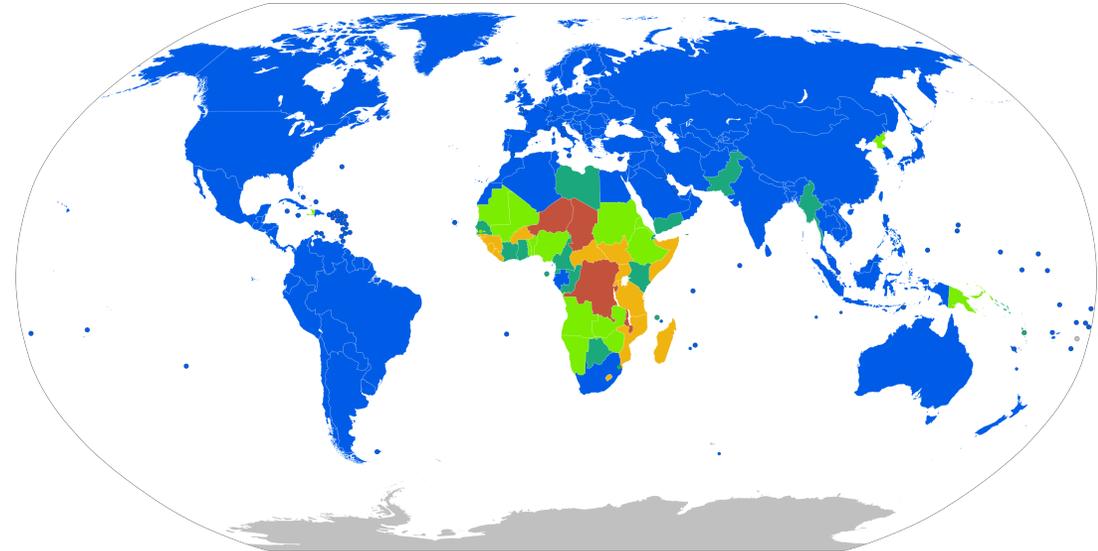
Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

SoSe 2021 | 03



# Organisatorisches

## Vorlesung – Stromnetze – SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.21	14:00 – 16:00 Uhr	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetze	Kabs
5	14.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Elektrische Energiespeicher im Verteilnetz	Murche
7	28.05.21	14:00 – 16:00 Uhr	Energienetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Energierrechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.21	14:00 – 16:00 Uhr	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.21	?	Prüfungen	Benthaus / Netter
13	09.07.21	?	Prüfungen	Benthaus / Netter

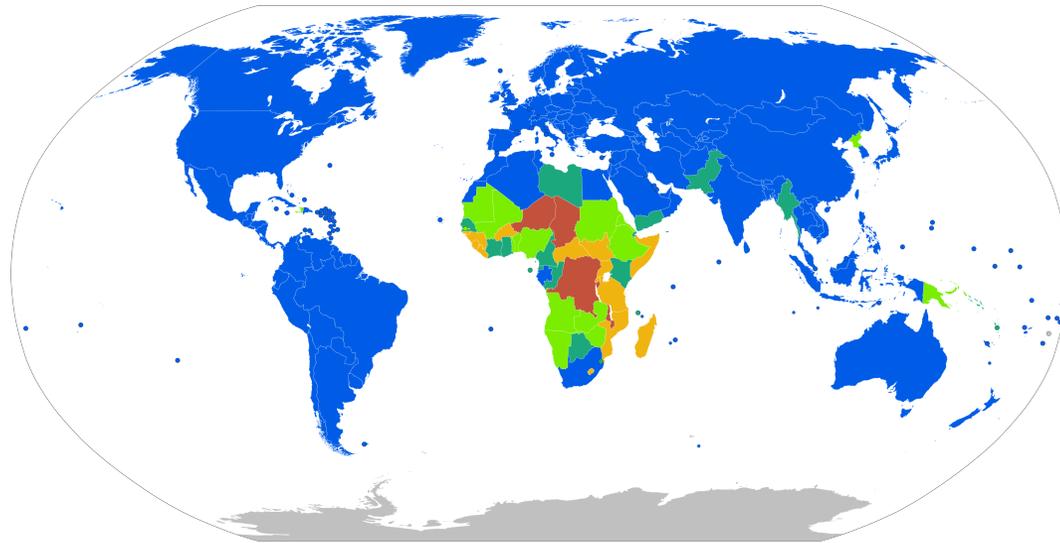
# Literatur (II)

## Auswahl zur Vorlesung *Stromnetze*

ABB		Glossary of technical terms commonly used by ABB; <a href="http://www.abb.com/glossary">www.abb.com/glossary</a>
ALTLAND; V. DELFT	2019	Mathematics for Physicists; Cambridge University Press
AMPRION	2017	Erdkabel im Übertragungsnetz; Firmeninformation
BDEW	2021	Installierte Leistung und Erzeugung 2020; Homepage BDEW
BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (Bfs)	2020	Elektromagnetische Felder, Mobilfunk, WLAN, Handys, Stromnetz, Haushaltsgeräte; Internet-VÖ
HEUCK; DETTMANN; SCHULZ	2013	Elektrische Energieversorgung; Springer Vieweg
KIERDORF	1997	Kraftwerke in historischen Photographien 1890 -1960; Wieland
KORIES; SCHMIDT-WALTER	2013	Taschenbuch der Elektrotechnik; 10. Auflage, Europa Lehrmittel
MATHIS; REIBIGER	2017	Küfpmüller Theoretische Elektrotechnik; Springer, 20. Auflage
OEDING; OSWALD	2011	Elektrische Kraftwerke und Netze; 7. Auflage; Springer-Verlag
SIEMENS		Hochspannungs-Leistungsschalter, <a href="http://www.siemens.com/energy">www.siemens.com/energy</a>
STÖCKER	2013	Taschenbuch der Physik, 7. Auflage; Europa Lehrmittel
VDI		VDI-Handbuch, Energietechnik; Beuth-Verlag (nur zur Information)
WIKIPEDIA		

# Titelbild

## Internationale Elektrifizierung | Niederspannung



Weltkarte des Zugangs der Bevölkerung zum Niederspannungsnetz (Stand 2017) als Maß für die Elektrifizierung<sup>[1]</sup>

- 80,1 %–100 %
- 60,1 %–80 %
- 40,1 %–60 %
- 20,1 %–40 %
- 0–20 %

[Quelle WIKIPEDIA]

~ 1900 n. Chr.

kein elektrischer Raum



Maya  
bis 900 n.Chr.



Bronzeräder  
1000 v. Chr.

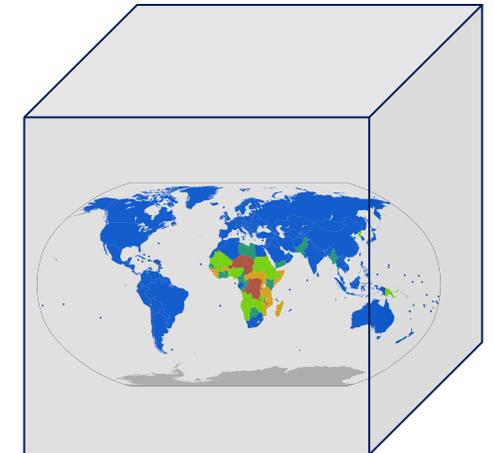


Chinesisches Porzellan  
~500 v. Chr.



Römisches Reich  
bis 7. Jahr. n.Chr.

elektrischer Raum



Warum weltweit diese Beschränkung ?

- J.C. Maxwell 1831 - 1879
- W. v. Siemens 1818 - 1892
- O. v. Miller 1855 - 1934
- N. Tesla 1856 - 1943

Zeit

...

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Thema für TUM Semesterarbeit

### Auswirkungen einer Pandemie

- Szenario SARS-CoV-2
- Zeitdauer sechs Monate
- normiert auf eine Nation, z.B. Deutschland
- Zeitliche Entwicklung der Ereignisse
- Zeitliche Entwicklung von Maßnahmen
- Auswirkungen - volkswirtschaftlich und klimatisch



### Auswirkungen eines Stromausfalles

- Ausfallszenario für flächendeckenden Blackout
- Gesamtzeit: sechs Monate
- normiert auf eine Nation, z.B. Deutschland
- Zeitliche Entwicklung der Ereignisse
- Zeitliche Entwicklung von Maßnahmen
- Auswirkungen - volkswirtschaftlich und klimatisch

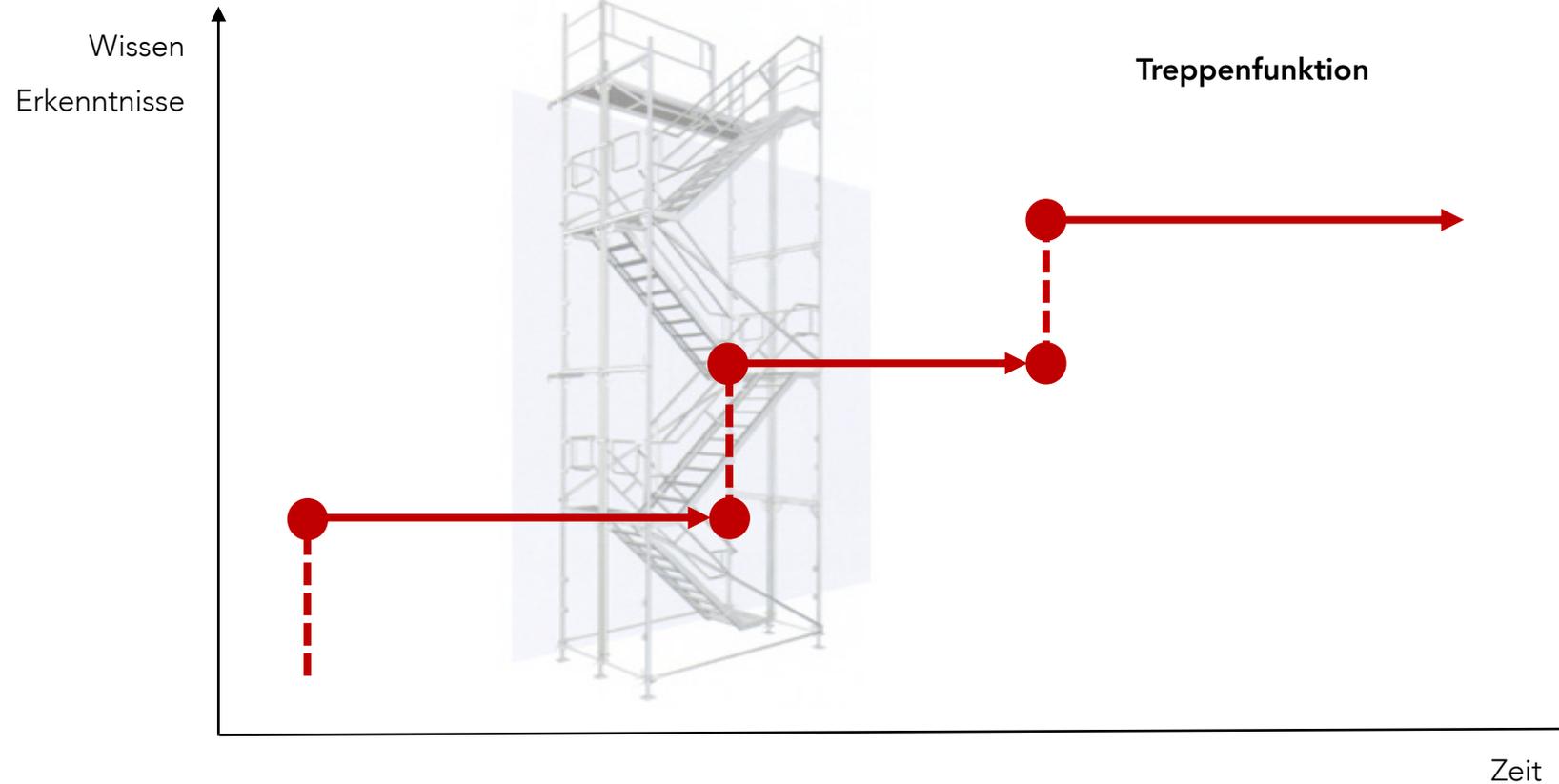
### Ergebnis

1. Gegenüberstellung der Auswirkungen der Pandemie und des Stromausfalles auf die Gesellschaft und eine beliebige Einzelperson
2. Publikation als Transfer Wissenschaft -> Gesellschaft
3. Medium: Video von max. 120 s (z.B. youtube)



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Rückblick auf Vorlesung 02 - Modelltreppe



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen – technischer Stromkreis

### Netzwerke (I)

**Definition** - Ein **elektrischer Stromkreis** besteht aus Quellen und Senken, die miteinander verbunden sind, so dass ein Strom fließen kann.



### Eigenschaften/ Aufgaben

- **Energiequelle** – Bereitstellung einer anthropogen definierten elektrischen Energie. Dies kann technologisch gleichwertig durch eine Spannungs- oder Stromquelle erfolgen [OEDING Kap. 2; KORIES Kap. 1.1.9; 1.1.10].
- **Energiesenke** – Nutzung der bereitgestellten elektrischen Energie für einen anthropogenen Zweck.
- Für den den **Stromkreis gilt die Energieerhaltung**, dabei nimmt die Entropie im System von der Quelle zur Senke zu, letztlich entsteht Joule'sche Wärme.

- **Netzstruktur** - Aufgabe ist die Übertragung der elektrischen Energie vom Bereitsteller (Quelle) zum Nutzer (Senke) über elektrotechnisch leitfähige geschlossene Strukturen. (Mathematisch: *einfach zusammenhängend*).
- **Netzstrukturqualität** - Die **Energieübertragung** von der Quelle zur Senke soll ohne Entropieänderung erfolgen  
 $\equiv$  die Übertragungsfunktion der Netzstruktur soll *eins* sein [KORIES Kap. 6, 7].
- **Leistung** – Die maximale **elektrische Leistung** in einem System ist ein spezielles **Qualitätsmerkmal**. Grundsätzlich gilt, je höher die Leistung einer Quelle, desto unabhängiger ist sie vom Nutzerverhalten. Grundsätzlich ist die Leistung die Änderung der bereitgestellten Energie mit der Zeit. Sie ist die relevante Größe für die Dimensionierung/technologische Auslegung von Quellen und Netzen.

s. Anlage (A1) -> Entropie -> Entropie – Technischer Stromkreis

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen – Vierpole im Stromnetz

### Netzwerk -allgemein



aktiver Zweipol	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spannungsquelle</li> <li>Stromquelle</li> </ul>
passiver Zweipol	<ul style="list-style-type: none"> <li>elektrisches Verbraucher-Netzwerk</li> <li>i.d.R. keine Quellen vorhanden</li> </ul>
Maxwell-Gleichungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>makroskopische Gleichungen</li> <li>Lösungen EM-Wellen</li> </ul>
Übertragungsfunktion ~ Bode-Diagramme	<ul style="list-style-type: none"> <li>Amplituden- und Frequenzgang</li> <li>Phasenlagen</li> </ul>
Kirchhoff'sche Gesetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maschen- und Knotenregel</li> </ul>

### Netzwerk -speziell

#### Wechselstrom-Technik

- Zeitabhängigkeit der elektrotechnischen Größen, d.h.  $\partial_t \dots \neq 0$
- makroskopische Maxwell-Gleichungen -> **Telegraphengleichungen**
- Lösungen der DGL sind komplexe Funktionen

#### Gleichstrom-Technik

- Zeitunabhängigkeit der elektrotechnischen Größen, d.h.  $\partial_t \dots = 0$
- Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{E} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_L$$

- alle elektrotechnischen Größen sind reell

s. Anlage (A2) -> Energiequellen – aktive Zweipole

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen – technische Energieübertragungssysteme

### Wechselgrößen

#### Einphasensysteme

- Grundsätzlich sinusförmig
- **Versorgung der Nutzer als Endverbraucher auf der NS-Ebene (s.u.)**
- Mittelherkunft-Stromversorgungskosten durch die Nutzer



Ferraris-Stromzähler |  
einfachstes Energiemessgerät

### Wechselgrößen

#### Mehrphasensysteme

- Grundsätzlich sinusförmig
- i.d.R. Drei-Phasen-Systeme
- **International genutzte Haupttechnologie**
- Bildung national/internationaler Großflächennetze (DHÜ)



Europäisches Verbundnetz |  
entso-e

### Gleichgrößen

- konstantes Zeitverhalten
- Wirtschaftliche Bedeutung nur im HGÜ-Bereich (?)
- **Stromkrieg' (ca. 1890) ~ Technologieentscheidung**  
Edison(–) vs.  
Westinghouse (~)



Lichtakkumulatoren zur  
Beleuchtung | Berlin 1905 |  
[KIERDORF]

### Hochspannungs-Gleichstrom- übertragung (HGÜ)

- konstantes Zeitverhalten
- **Wirtschaftliche Nutzung - 'Punkt-zu-Punkt' Verbindung**
- Singuläre Entkopplung von DHÜ-Netzen
- Neue Overlay-Netzstrukturen



ABB-Vision

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen – technische Versorgungsspannungsnorm

### EN 50160 [Quelle - WIKIPEDIA]

Die **EN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen** ist eine **Europäische Norm**, welche die wesentlichen Merkmale der **Netzspannung** am Netzanschlusspunkt unter normalen Betriebsbedingungen definiert und spezifiziert.

In Deutschland ist die **Norm** als **DIN-Norm** DIN EN 50160 gültig.

Die Merkmale der Versorgungsspannung werden hinsichtlich Frequenz, Höhe, Kurvenform und Symmetrie der Außenleiterspannungen festgelegt. Während des normalen Netzbetriebs führen **Lastschwankungen**, Störeinflüsse und das Auftreten von Fehlern wie z. B. Kurzschlüssen zu dauernden Änderungen der oben beschriebenen Merkmale.

Wesentliche Kennwerte sind die **Frequenz**, die **Spannungshöhe**, die **Kurvenform** und die **Symmetrie der Leiterspannungen**. Hierzu gibt die EN 50160:2010 für Netze mit synchroner Verbindung zu einem Verbundnetz bezüglich der Frequenz ein Intervall von 49,5 Hz bis 50,5 Hz für 99,5 % der Zeit vor, d. h. in rund 44 Stunden pro Jahr darf die Frequenz bis auf ein Intervall 47 Hz bis 52 Hz ausgeweitet werden.<sup>[1]</sup>

Die Spannungsänderungen sollen  $\pm 10\%$  der Nennspannung  $U_n$  nicht überschreiten, in Fällen ohne Verbindung zu einem Übertragungsnetz oder bei der Versorgung entlegener Kunden sind  $+10\%$  /  $-15\%$   $U_n$  zulässig. Unter normalen Betriebsbedingungen müssen 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte des gemessenen Effektivwertes jedes Wochenintervalls innerhalb der Grenzen von  $\pm 10\%$   $U_n$  liegen.

DIN	EN 50160
Bereich	Elektrizitätsversorgung
Titel	Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
Letzte Ausgabe	2011-02



**NORM [AKTUELL]** | 2020-11  
**DIN EN 50160:2020-11**  
Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019

Diese Norm enthält die Deutsche Fassung der Europäischen Norm EN 50160:2010 mit sämtlichen eingearbeiteten Änderungen A1:2015, A2:2019 und A3:2019 sowie das eingearbeitete Corrigendum:2010. Das ...

[> Kaufoptionen anzeigen](#)

ab **143,50 EUR** inkl. MwSt.  
ab 134,11 EUR exkl. MwSt.

[In den Warenkorb](#)

Zeitverlauf der Spannung, ...?

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen – Zeitverlauf technischer elektrische Größen in der Energieversorgung

### Mathematik | Sinusfunktion

Standardfunktion  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$f(x) = A \cdot \sin x \quad \text{mit } x, A \in \mathbb{R}$$

Euler  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$

$$\underline{f}(x) = e^{ix} = \cos x + i \sin x \quad \text{mit } x \in \mathbb{R}$$

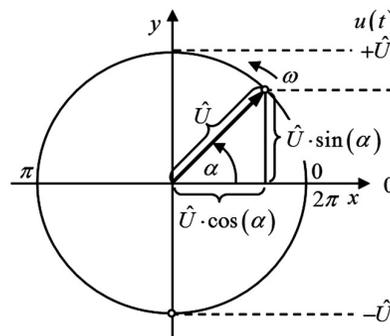
Taylor-Reihe (reell)  $n \in \mathbb{N}$

$$f(x) = \sin x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}$$

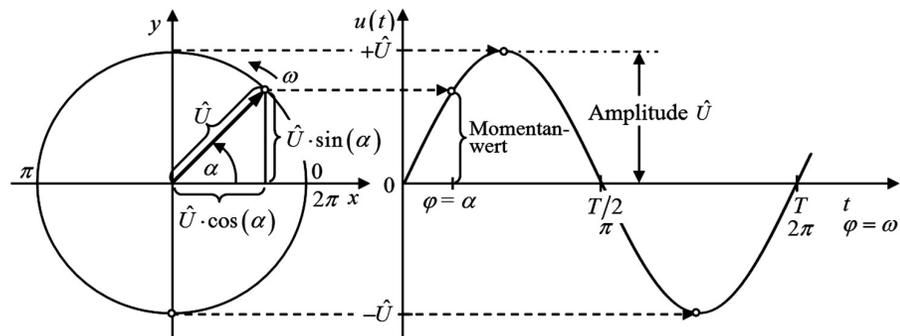
Eigenschaften

- Funktion ist über eine Periode hinaus nicht eindeutig
- $e^{i2\pi n} = 1$

Zeigerdiagramm



Liniendiagramm



### Technik | sinusförmiger Verlauf

Spannungsverlauf als reelle Zeitfunktion

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{mit } \varphi \in \mathbb{R}$$

Spannungsverlauf als komplexe Zeitfunktion

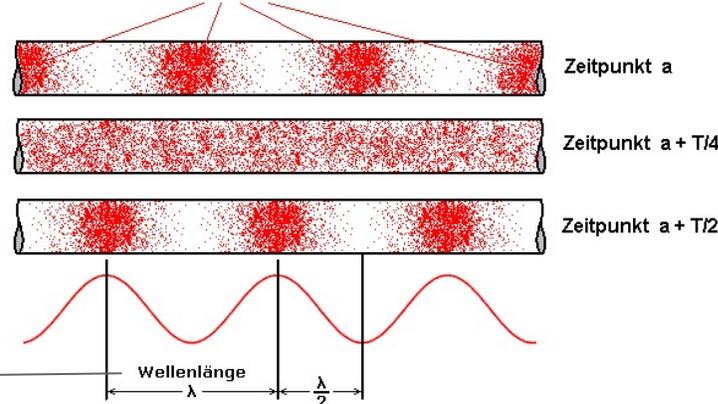
$$\underline{u}(t) = \hat{u} \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} = \hat{u} \cdot e^{i\varphi} \cdot e^{i\omega t} = \hat{u} \cdot e^{i\omega t}$$

komplexe Amplitude

$$\approx u(t) = \hat{u} \cdot \text{Re}\{e^{i(\omega t + \varphi)}\} = \text{Re}\{\hat{u} \cdot e^{i(\omega t + \varphi)}\}$$

$\mathbb{C}$  ist isomorph zu  $\mathbb{R}^2$  !

Überschuss an Elektronen



-> quasistationär

EM-Wellen

- harmonische Lösung
- $\approx \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_\omega(\mathbf{r}) \cdot e^{-i\omega t}$
- ebene Welle
- $\approx E_i(\mathbf{r}, t) = E_{ik} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$

Aber warum passt das gut zusammen ?

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen - Induktionsgesetz und technische Drehbewegung | Einphasensystem

### Induktionsgesetz

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

Harmonische Lösung  $\sim e^{-i\omega t}$  führt zur DGL-

Vereinfachung

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}$$

Wechselstromtechnik

### Generatorprinzip $\sim$ Werner v. Siemens

Funktionsweise

- Permanentes Magnetfeld  $NS$
- **Drehbare Leiterschleife  $\omega$**
- Potentialdifferenz  $U_{ab}(t) = U_{ind}(t)$
- Verbraucherwiderstand  $R$
- Stromfluss  $i(t)$
- Einphasensystem

Elektromotorische Kraft (EMK)

- längs einer Leiterschleife  $L$
  - Induzierte Spannung am Ende einer Leiterschleife / Leiters
- $\sim U_{ind}(t) = -\frac{\partial \phi_m}{\partial t}$
- bei n-Schleifen n-fache Wirkung

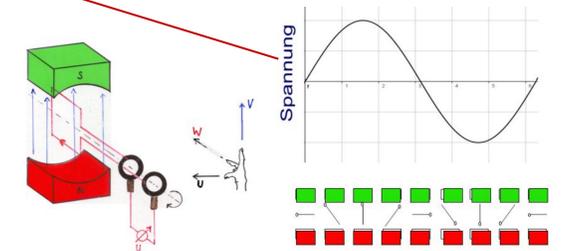
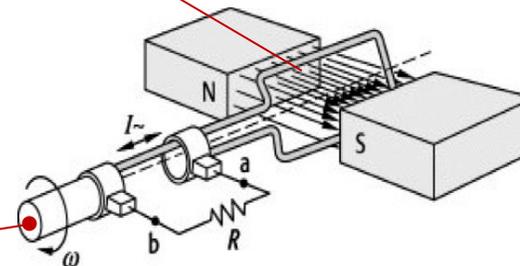
$$\oint_{\text{Leiterschleife}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{\text{eingeschlossene Fläche der Kurve}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Skalarprodukt

Elektromotorische Kraft (EMK,  $\mathcal{E}$ ) längs einer Leiterschleife

$$\mathcal{E} = \oint_{\text{Leiterschleife}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -k \frac{\partial \phi_m}{\partial t}$$

Wechselstromgenerator

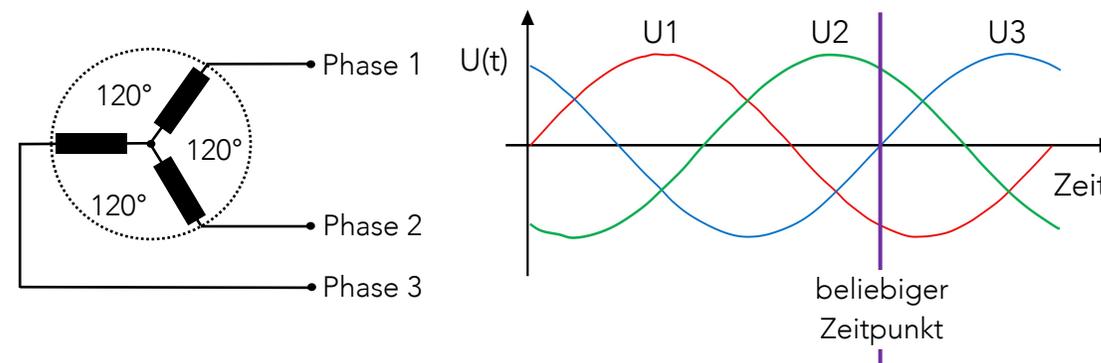


# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen - Mehrphasensystem – Dreiphasentechnik

### Dreiphasentechnik

Dreiphasenwechselstrom  $\equiv$  Drehstromtechnik (kurz)



- Parallele Betrachtung von drei sinusförmigen Wechselspannungen bzw. –strömen
- Frequenz der einzelnen Spannungen ist konstant
- Amplituden sind im Idealfall gleich
- Phasenverschiebung jeweils  $120^\circ$  oder  $\frac{2}{3}\pi$

#### ▪ Was ist das besondere an dieser Technik?

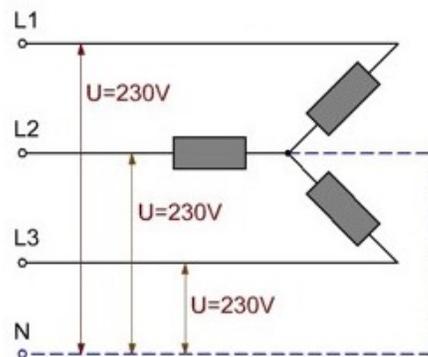
- ↪ Wie wird der Stromkreis geschlossen ?
- ↪ Drei Einzelleitungen auf einer Strecke. Ist das betriebswirtschaftlich sinnvoll ?
- ↪ Warum Symmetrie in den Leitungen ?

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen - Dreiphasentechnik

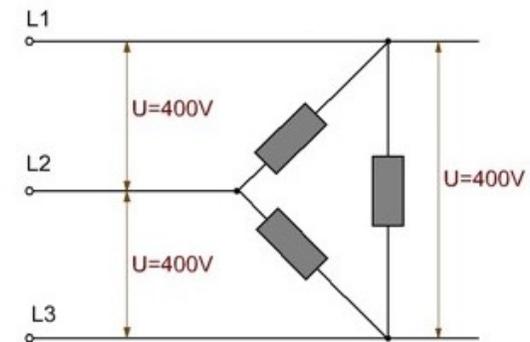
### Dreiphasentechnik - Sternpunktbehandlungen in Generatoren und Netzen

#### Sternschaltung



- Zusammenschaltung der drei Phasenstränge -> **Sternpunkt**
- Bei symmetrischen Belastungen heben sich die Ströme im Sternpunkt auf (gleiche Impedanz)
- Abgriff von zwei Spannungen
  - Leiter – Sternpunkt  $\approx 230\text{ V}$
  - Leiter - Leiter  $\approx 400\text{ V}$
- Verkettungsfaktor  $230\text{ V} \cdot \sqrt{3} = 400\text{ V}$

#### Dreiecksschaltung

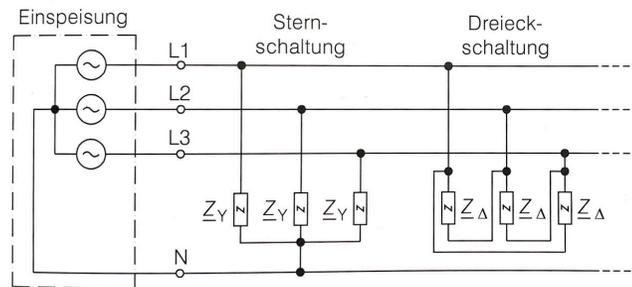


- Reihenschaltung der Phasenstränge -> **Dreieck**
- kein physischer Sternpunkt vorhanden
- Außenleiter haben eine Spannung gegen Erde von  $230\text{ V}$
- Einsatz z.B. bei Drehstrommotoren und anderen symmetrischen Lasten

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen - Dreiphasentechnik

### Dreiphasentechnik - Energieübertragung

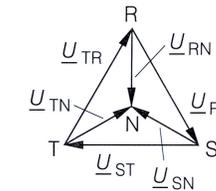
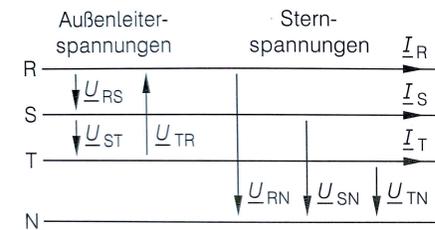


- Bei einem drei-phasigen Netz werden -> **Dreieck- oder Sternschaltung** ausgeführt
- Ein Leitungssystem besteht mindestens aus **drei physischen elektrischen Leitern**
- Symmetrisches dreiphasiges Spannungs- bzw. Stromsystem -> Außenleiter-spannungen bzw. -ströme sind betragsgleich und um  $120^\circ$  phasenverschoben (s.o.)

#### Dreileitersystem (symmetrisch)

- Nur die drei Außenleiter liegen technologisch vor
- Leistungsübertragung entspricht der von drei Einphasensystemen mit sechs physischen Leitungen -> **Betriebswirtschaftlicher Vorteil**

[Quelle – HEUCK, Kap. 3]



**Bild 3.2**

Zählpfeile und Zeigerdiagramm bei einem symmetrisch gespeisten Vierleitersystem

#### Vierleitersystem (symmetrisch)

- Vierter Leiter N – Neutral- oder Sternpunktleiter- ist am Sternpunkt angeschlossenen
- Systemvorteil, es liefert unterschiedliche Spannungen -> **Sternpunkt**
- **Die Außenleiterströme addieren sich zu jedem Zeitpunkt zu null, d.h. der Neutralleiter ist stromlos! -> Drei-Phasentechnik**

~ Drei –und Vierleitersysteme unterscheiden sich in ihrem elektrotechnischen Verhalten nicht.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Grundlagen - Dreiphasennetz

### Drehstromnetztechnologie - Systemmerkmale

Klassische ED mit makroskopischen MG

Nutzung zeitabhängiger elektrischer und magnetischer Felder  $\leadsto$  quasistationär ?

Elektrotechnische Symmetrie in den drei Phasen

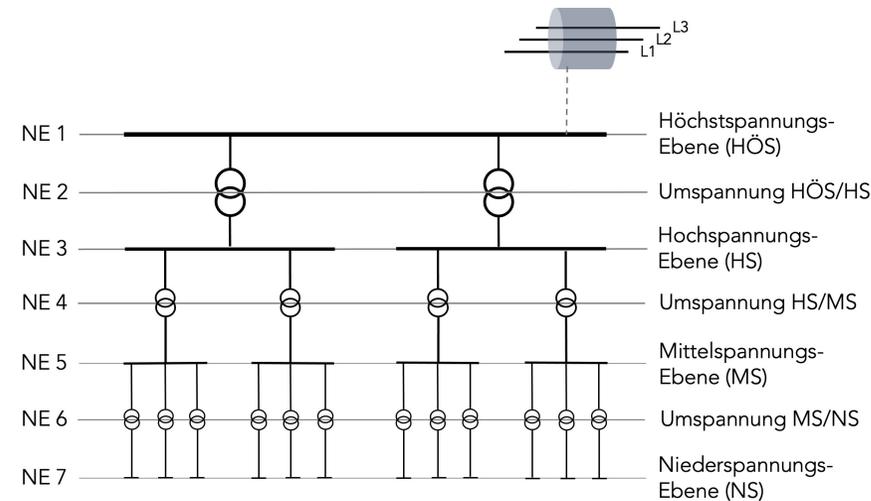
Nutzung hierarchisch gestaffelter technologischer Spannungsebenen

Zeitaktuelle Leistung-Frequenzregelung, d.h. keine Nutzung elektrischer Energiespeicher

Primärtechnik

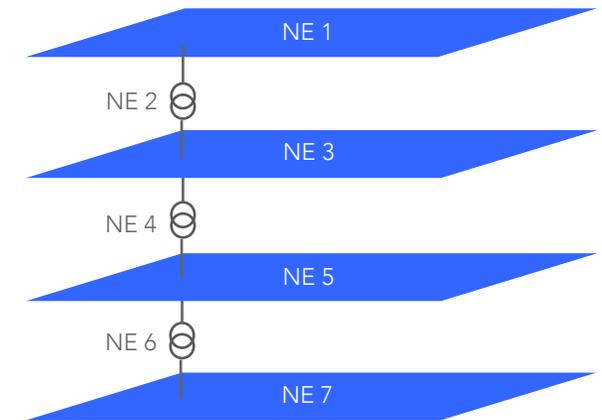
1. Energieübertragung mittels Leitungen (Freileitungen und Kabel) und Transformatoren
2. Energiesteuerung mittels Schaltgeräten

### Netzstruktur-Modell



- Mögliche Stromflussrichtungen ?
- Unter welchen technischen Bedingungen kann man auf einer NE einspeisen ?
- Unter welchen technischen Bedingungen kann man auf einer NE Energie entnehmen ?

### Multilayer-Modell

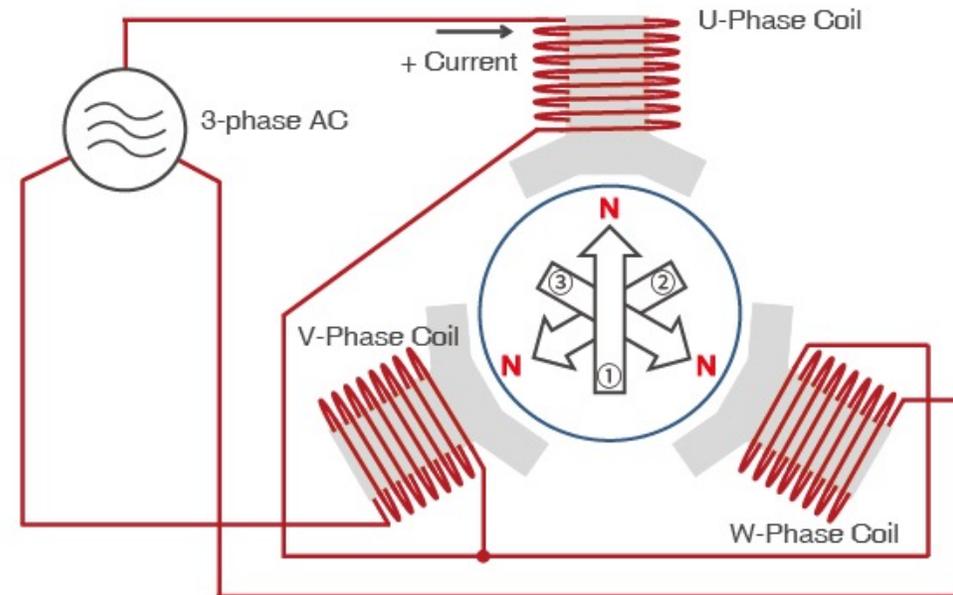


Internationale Haupttechnologie in der elektrischen Energieübertragung öffentlicher Energieversorgungssysteme

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel - Drehstromnetz

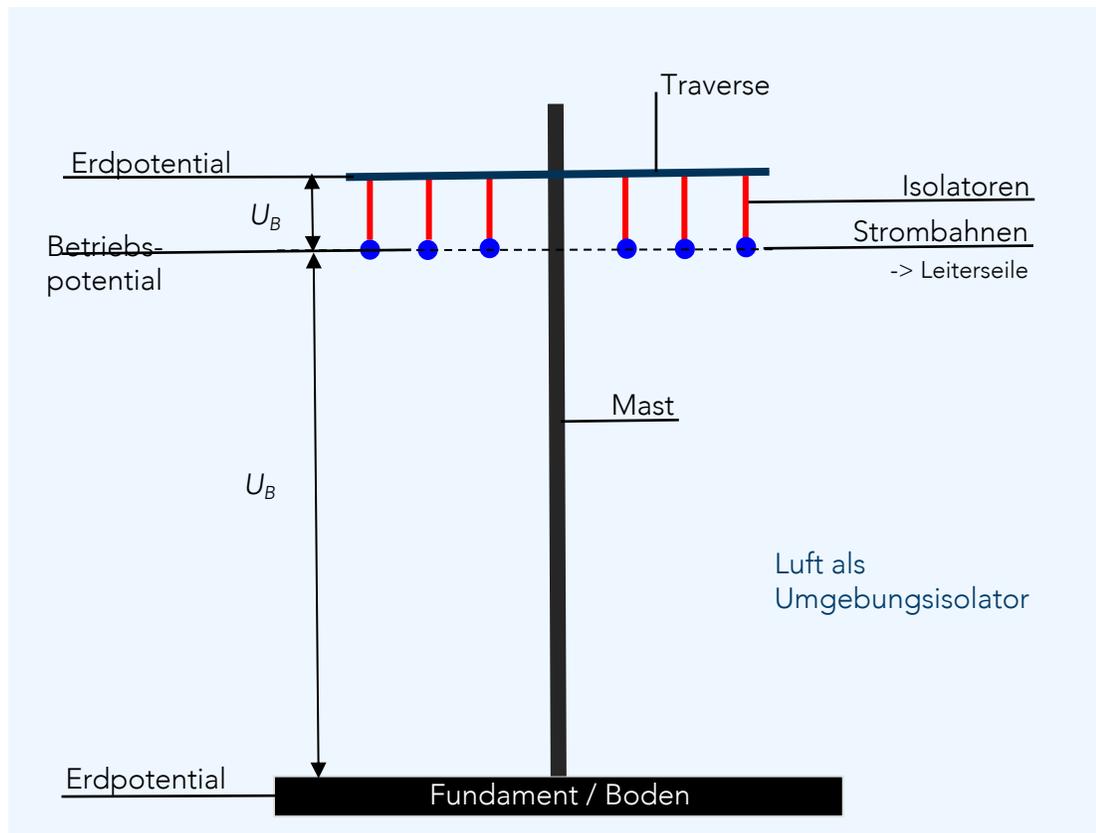
- **Leitung**  
Freileitung und Kabel
- **Schalter**  
Leistungsschalter und Trennschalter
- **Transformator**  
Umspanner
- **Energieflusssteuerung**  
Schaltanlage und Umspannwerk
  
- Energiequellen -> s. Anlage **A2**



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Leitung – Freileitung (I)

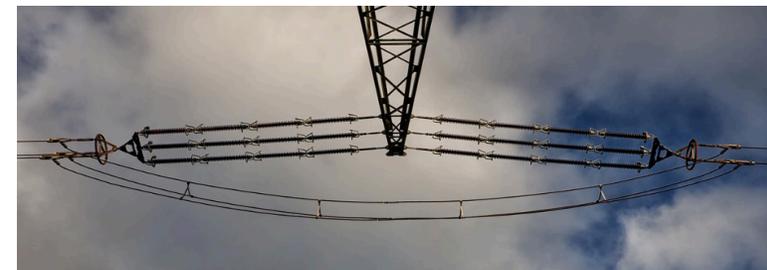
### Prinzip – Mast – Isolatoren – Leitungen



### Leitungstrassen - Freileitung



- Freileitungen sind grundsätzlich **induktiv** -> Ersatzschaltbild
- Betriebsrichtung - beidseitig
- Achtung – ein System ist Teil des Bahnstromnetzes



- 400-kV-Isolatorenkette
- ~ Dreier-Bündel
- ~ eine Phase
- ~ Sicherheitsabstand ?

s. Anlage (A3) -> Leitungen -> Leitungen - Technische Daten Freileitungen

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Leitung - Freileitung (II)

### Technische Spezifikationen nach VDE (Auszug)

Netzstrukturmodell Zuordnung		Nennspannung* kV	Leiterquerschnitt Al /mm <sup>2</sup>	Thermische Grenzleistung MVA	Natürliche Leistung** MW	Wellenwiderstand Ω	Bemerkungen
NE 5	MS	20	150	16	1,29	311	* Nennspannung := Spannung im Normalbetrieb
NE 3	HS	110	300	140	34,8	348	** Natürliche Leistung vereinfacht -> Leitungswellenwiderstand ≈ Lastwiderstand des angeschlossenen elektrischen Netzwerkes <sup>+</sup>
NE 1	HÖS	220	2x 240	490	160	300	▪ Skin-Effekt und Leitungs Bündel
NE 1	HÖS	380	4x 240	1700	600	240	▪ Unterschied MW und MVA ? ▪ Vakuum-Wellenwiderstand = <b>376,73 Ω</b>

- Welche Größe wird zur Dimensionierung von Energieanlagen genutzt?

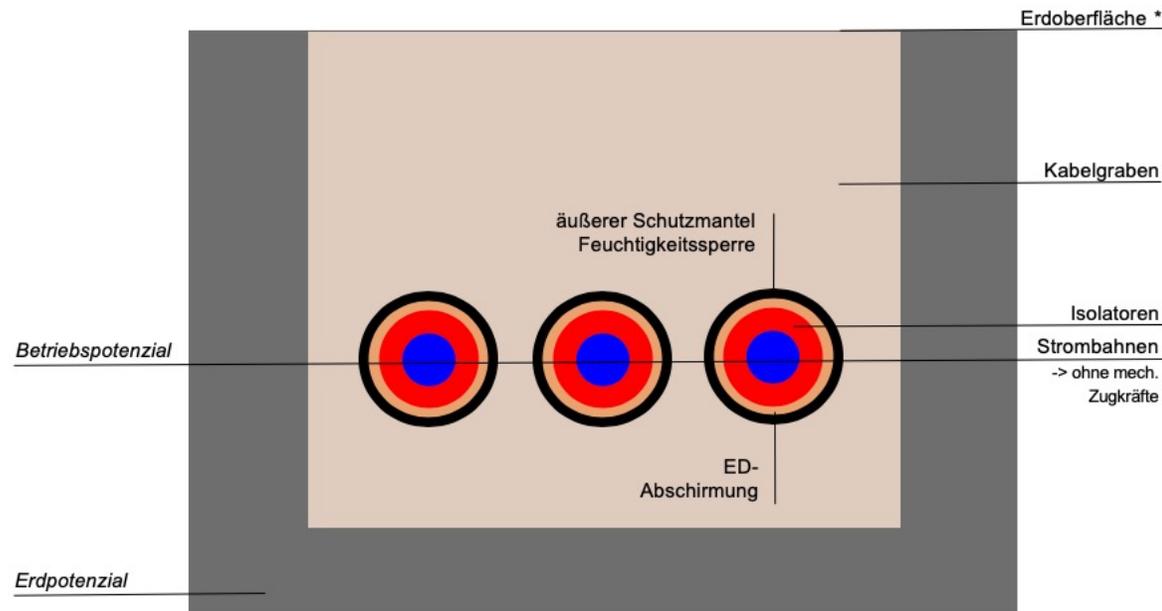
<sup>+</sup> s. HEUCK, Kap. 4.5.3.1 für eine ausführliche Information

s. Anlage (A3) -> Leitungen -> Leitungen - Technische Daten Freileitungen (vollständige VDE-Tabelle)

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Leitung – Kabel (I)

### Prinzip – Erdkabel



s. Anlage (A3) -> Leitungen -> Leitungen - Technische Daten Kabel

### Leitungstrassen Erdkabel



- Zwei 400-kV-Drehstromsysteme
- Kabel sind grundsätzlich kapazitiv
- ↳ Blindleistungsbedarf ?
- Betriebsrichtung - beidseitig



- 100-kV-Einleiter-Erdkabel
- Isolator (VPN)
- ↳ Durchflutungsgesetz

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}$$

Verschiebungsstrom

↳ harmonische Lösung

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega \mathbf{D} + \mathbf{j}$$

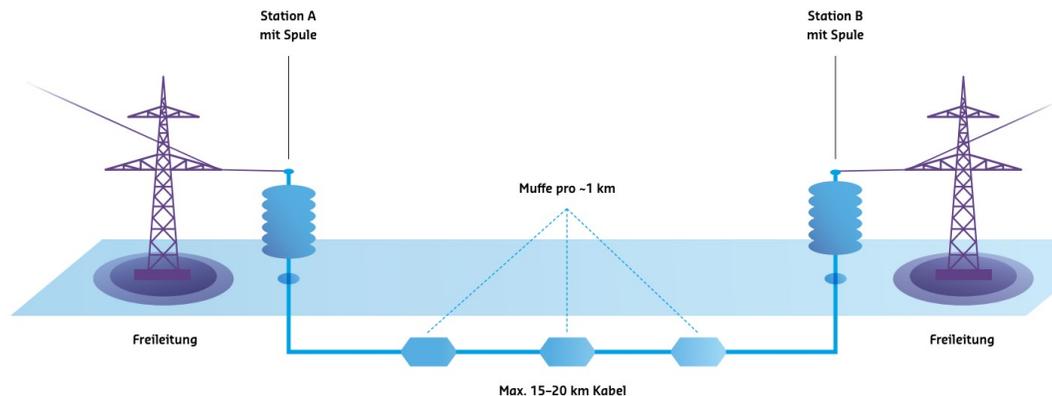
# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Leitung – Kabel (II)

### Im Übertragungsnetz

#### TEILVERKABELUNG IM WECHSELSPANNUNGSNETZ

Aus Kabelübergabestationen, Spulen und Muffen, die die etwa einen Kilometer langen Erdkabelabschnitte verbinden, kann ein komplexes technisches System entstehen (einphasige Darstellung).



#### WECHSELSPANNUNG

### Blindleistungskompensation

Teilweise beheben lässt sich das Problem der Blindleistung durch die sogenannte Blindleistungskompensation. Diese Aufgabe übernehmen Spulen, die großen Transformatoren ähneln und Blindleistung bereitstellen.

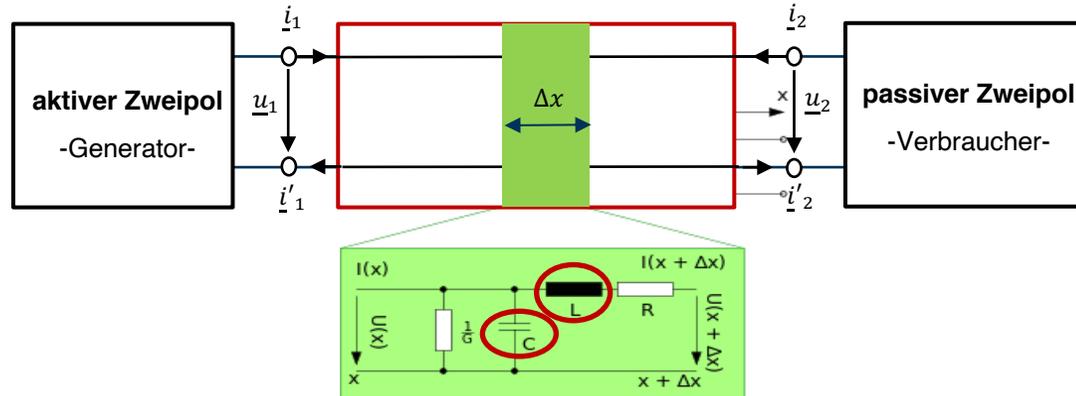
Diese Kompensation verursacht jedoch noch ein anderes physikalisches Phänomen. Schaltet man Spulen und Kabel elektrisch zusammen und verbindet diese mit einer Wechselspannungsquelle, so fließen kontinuierliche Ausgleichsströme zwischen diesen Elementen. Es kommt hierdurch zu Resonanzerscheinungen, die im Extremfall sogar die Netzstabilität gefährden können. Diese Resonanzen begrenzen ebenfalls den maximal möglichen Umfang der Verkabelung im Wechselspannungsnetz. Vergleichbar ist dies mit dem Effekt, der auftreten kann, wenn viele Fußgänger im Gleichschritt über eine Brücke gehen und diese durch die ausgelösten Resonanzen sogar zum Einsturz bringen können.

[Quelle - AMPRION –Erdkabel im Übertragungsnetz]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Leitung - Ersatzschaltbild

### Leitungsersatzschaltbild - einphasig



- Vierpoltheorie in der Elektrotechnik
- Betrachtung infinitesimales Leitungsstückes  $\Delta x$  mit Gesamtlänge  $l = \int dx$
- Ersatzschaltbild im Element  $\Delta x$  besteht nur aus passiven Bauelementen
- Für die Aufstellung der DGL werden konstante Leitungsbeläge angenommen, z.B.  $R' = \frac{R}{\Delta x} \dots \leadsto$  Kirchhoff'sche Gesetze  $\leadsto \dots$
- DGL  $\leadsto \partial_x^2 u - L'C' \partial_t^2 u = (L'G' + R'C') \partial_t u + R'G' u$  | Strom analog  $\leadsto$  DGL-Typ - Wellengleichung
- Lösungen  $\leadsto u(x, t) = u_0 e^{j\omega t - kx}$  und  $i(x, t) = i_0 e^{j\omega t - kx}$

### Freileitung

- Bestimmende Größe  $\leadsto$  Induktivitäten  $\leadsto$  parallele Leiterseile, Boden  $\leadsto$  Merksatz – Freileitung ist induktiv

### Kabel

- Bestimmende Größe  $\leadsto$  Querkapazitätsbelag  $\leadsto$  Isolation  $\leadsto$  Merksatz – Kabel ist kapazitiv  $\leadsto$  Einsatz im DHÜ-Netz  $\rightarrow$  s.o.

**Warum keine aktiven Elemente? Welche könnten das sein? Z.B. Verstärker wie in der IT wären doch gut.**

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Schaltelemente

### Leistungsschalter

#### Aufgaben / Eigenschaften

1. Durchleitung - max. Betriebsstromes unter allen klimatischen Bedingungen
2. Schalthandlung - Löschung des Lichtbogens und Isolation
3. Schaltfähigkeit ( $\ll T_{Netzfrequenz}$ ) bei beliebigen Netzzuständen
4. Sofortreaktion trotz geringer Schalthandlungsanzahl
5. Mehrfache serielle Schaltfähigkeit ohne Nachspannen
6. Thermische und dynamische Kurzschlussfestigkeit muss gewährleistet sein
7. Schaltverhalten darf nicht zu Spannungsüberhöhungen führen, die die Isolation des Netzes schädigen können
8. Erschütterungsfreiheit
9. Wartungsintervalle > 25 Jahre
10. Konstante Selbstüberwachung und ggf. Fehlermeldung
11. Geringe operative Kosten

[Quelle – OEDING – Kap. 11]

#### Betrieb



#### Datenblatt exemplarisch

Typ		3AP1			3AP2/3		3AP4/5			
Bemessungsspannung	kV	72,5	123	145	170	245	300	420	550	800
Anzahl der Unterbrechereinheiten je Pol		1			2		4			
Bemessungs-Kurzzeit-Stehwechselfspannung	kV	140	230	275	325	460	460	610	800	830
Bemessungs-Stehblitzstoß-Spannung/min	kV	325	550	650	750	1050	1050	1425	1550	2100
Bemessungs-Schaltstoß-Spannung	kV					850	1050	1175	1425	
Bemessungs-Betriebsstrom, bis	A	2500	4000	4000	4000	4000	4000	5000	5000	5000
Bemessungs-Kurzzeitstrom (1 s – 3 s), bis	kA <sub>eff</sub>	31,5	40	40	40	50	40	63	63	63
Bemessungs-Kurzschluss-Ausschaltstrom, bis	kA	31,5	40	40	40	50	40	63	63	63
Temperaturbereich	°C	-55 bis +55								
Bemessungs-Schaltfolge		0-0,3 s-CO-3 min-CO oder CO-15 s-CO								
Bemessungs-Ausschaltzeit		3 cycles			2 cycles					
Bemessungsfrequenz	Hz	50 oder 60								
Wartung nach		25 Jahren								



[Quelle - SIEMENS –Hochspannungsleistungsschalter]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Betriebsmittel – Übersetzer - Transformator

### Transformator $\equiv$ Umspanner

#### Aufgaben / Eigenschaften

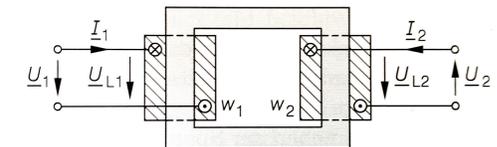
- Leitfähiges Material – Kupfer in den Spulen / Eisen in der Spulenverbindung
- Isolationsmaterial – Öle und Kunstharze
- Hauptfunktion – Transformation von Spannungen/Ströme auf andere Ebenen bei konstanter elektrischer Leistung
- Filtereigenschaften – Hochpassverhalten
- Betriebsmittel – Drehstromnetz mit vollständigen Energiedurchfluss
- Netztrennungen – galvanische Entkopplung von Netzen
- Energieübertragung – elektromagnetische Induktion
- Wirkungsgrad – ca. 98%
- Energiespeicherung - keine
- Mechanik – keine drehenden Teile
- Netzverluste - Reduzierung
- Lebensdauer – technisch > 40 Jahre, regulatorisch = 40 Jahre
- Zuordnung – elektrische Maschinen

- Netzebenen (NE) – Erzeugung in Drehstromnetzen
- Sternpunkt – Stern- oder Dreieckschaltungen für die Netzteile
- Energie - auf der jeweiligen Transformatorebene magnetisch

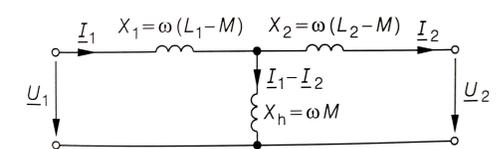
- Verteilnetztransformator bis 315 kVA
- ~ Was bedeutet kVA?



- Vierpol-Funktionsbild
- ~ einphasiger Zwe Wicklungstransformator



- Vierpol-Ersatzschaltbild
- ~ T-Glied (kein  $\pi$ -Glied wie bei Leitungen)



s. Anlage (A4) -> Transformatoren -> Anwendungsbeispiel

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

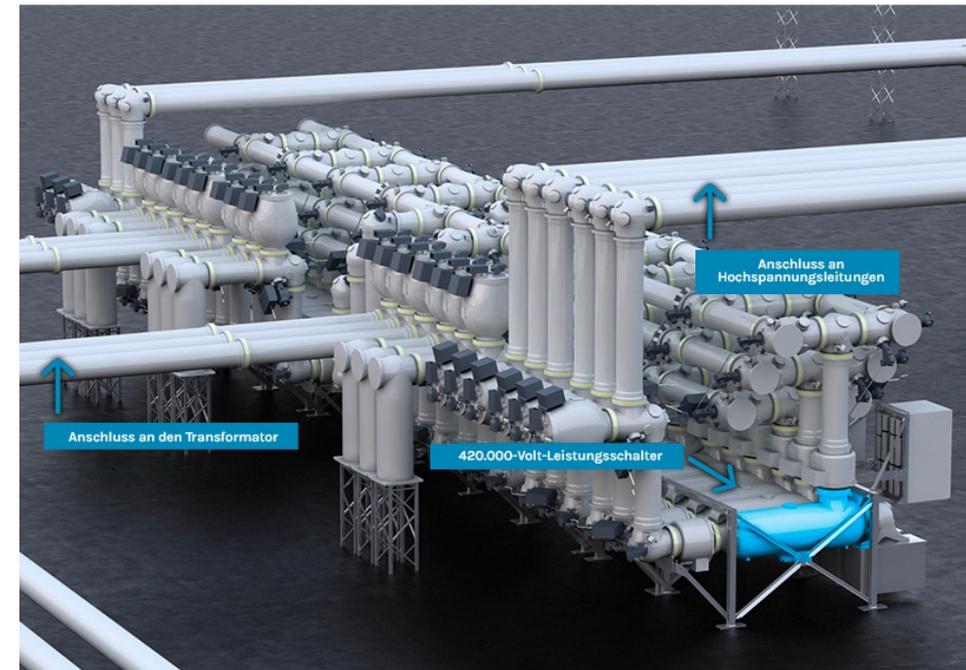
## Betriebsmittel – Schaltanlage

### Energieflusssteuerung in einer NE

#### Aufgaben / Eigenschaften

- Hauptfunktion – Lenkung von elektrischen Strömen in verschiedene Netzteile
- Netzebene – keine Änderung von NE
- Isolation – Luft, Vakuum und Schutzgase, z.B.  $SF_6$
- Primärtechnik - Bauteile Leistungsschalter, Lasttrenner, Trenner und Sammelschienen
- Lebensdauer Primärtechnik – technisch > 40 Jahre, regulatorisch = 40 Jahre
- Sekundärtechnik – Messen, Steuern und Regeln
- Lebensdauer Sekundärtechnik – technisch und regulatorisch  $\approx$  20 Jahre

#### ▪ Beispiel



- Gasisolierte 400-kV-Leistungsschalteranlage, nicht auf  $SF_6$ -Basis

[Quelle – LifeGrid, life.grid@ge.com]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

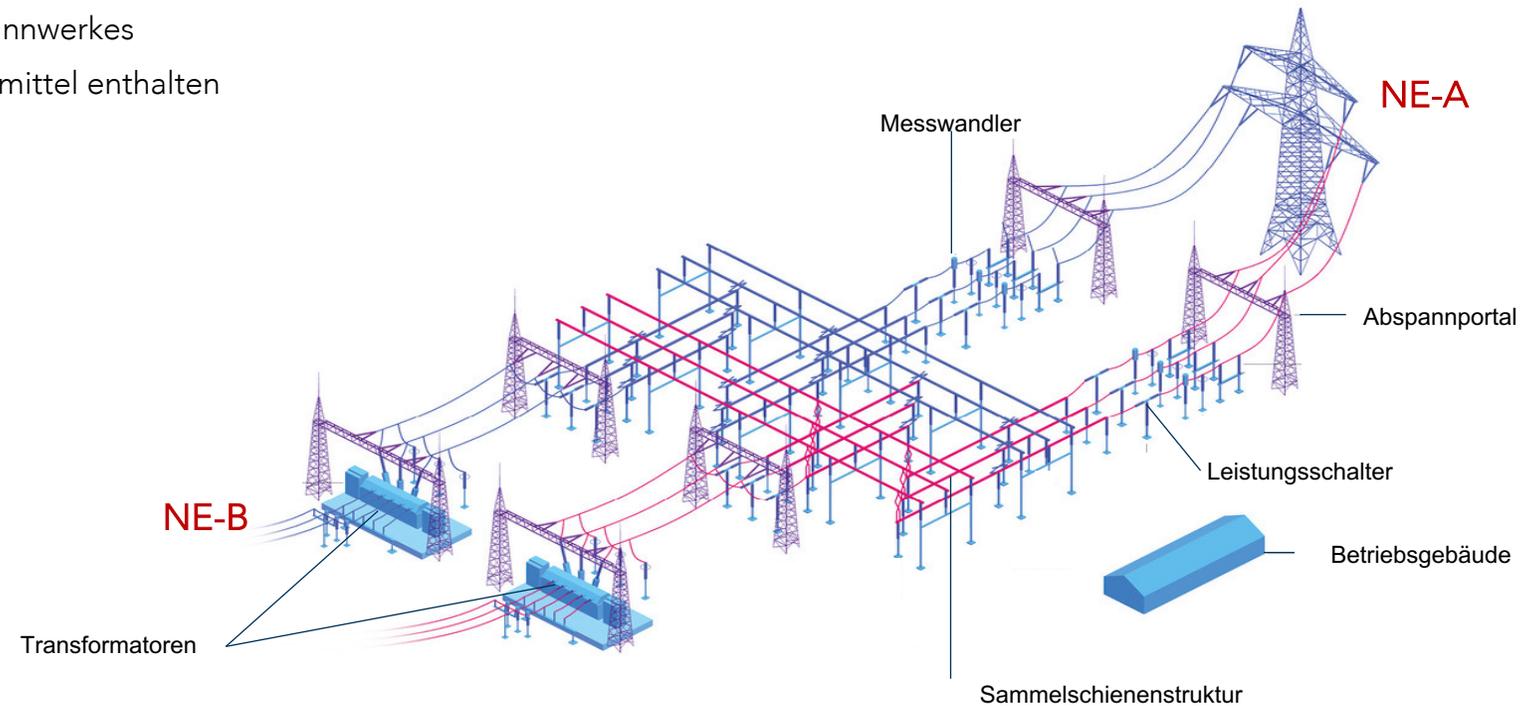
## Betriebsmittel – Umspannwerk

### Energieflusssteuerung in mehreren NE

#### Aufgaben / Eigenschaften

- Schaltanlage – Bestandteil eines Umspannwerkes
- Transformator – als zusätzliches Betriebsmittel enthalten

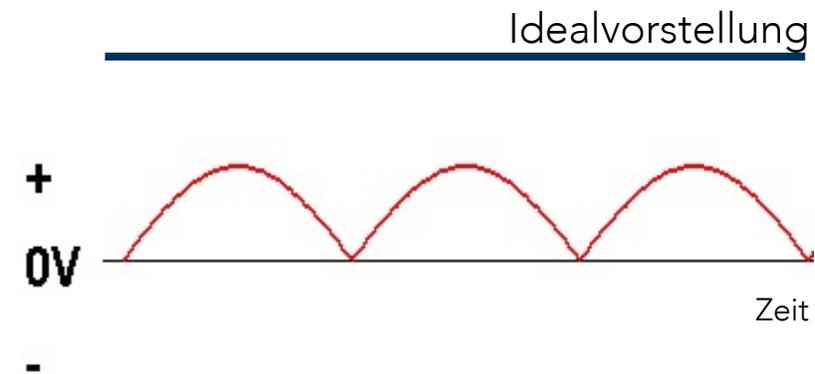
- Funktionsbild eines Umspannwerkes



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Gleichstrom

- **Eigenschaften**  
Grundlegend
- **Punkt zu Punkt Verbindungen**  
Wirkungsweise
- **Gleichstromnetze**  
HVDC-Netze



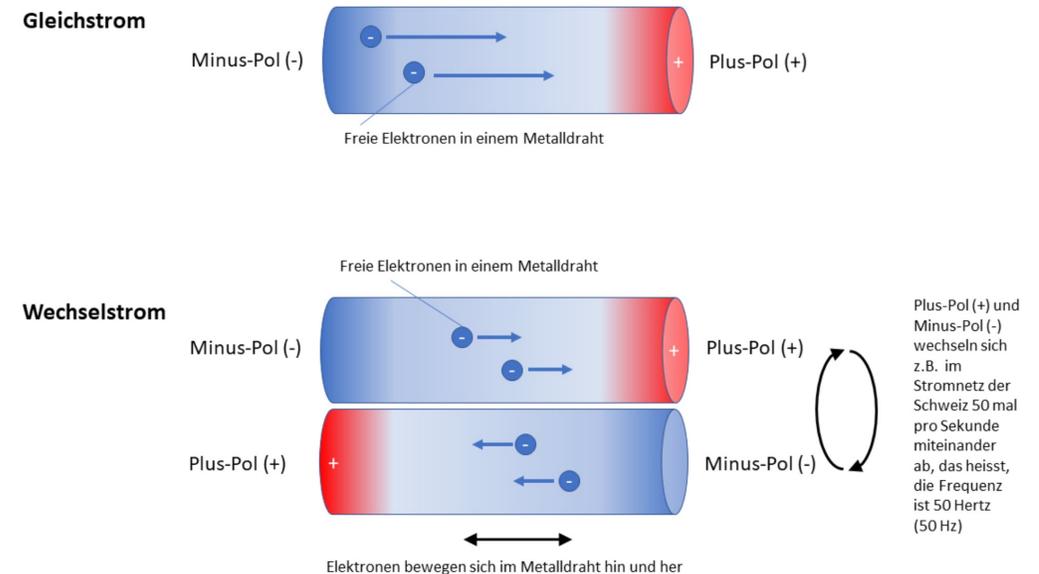
# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Gleichstrom (I)

### Eigenschaften - grundlegend

- Zeitverhalten -  $\omega = 0$  | alle Größen reell
- Maxwell'sche Gl.
  - Ohm'sches Gesetz  $U = R \cdot I$
  - Potential  $U = \varphi_2 - \varphi_1$
  - Durchflutungsgesetz  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}$  | kein Verschiebungsstrom
  - Quellenfreiheit  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
- Übertragungsfunktion – reell
- Leistungsübertragung – nur Wirkleistung
- Leistungsübertragung - über lange Strecken mit nur einem Einleiter
- Skineneffekt – nicht vorhanden
- Schaltbarkeit – schlecht, wg. Lichtbogenbildung
- Transformation – kein ED-Prozess im Transformator, kein vergleichbar vermaschter Netzbetrieb wie in Drehstromnetzen
- Transformation -> **Konvertertechnologie**
- Netzkupplungen – Verbindung von (asynchronen) Drehstromnetzen

- Modell - Gleich- und Wechselstrom



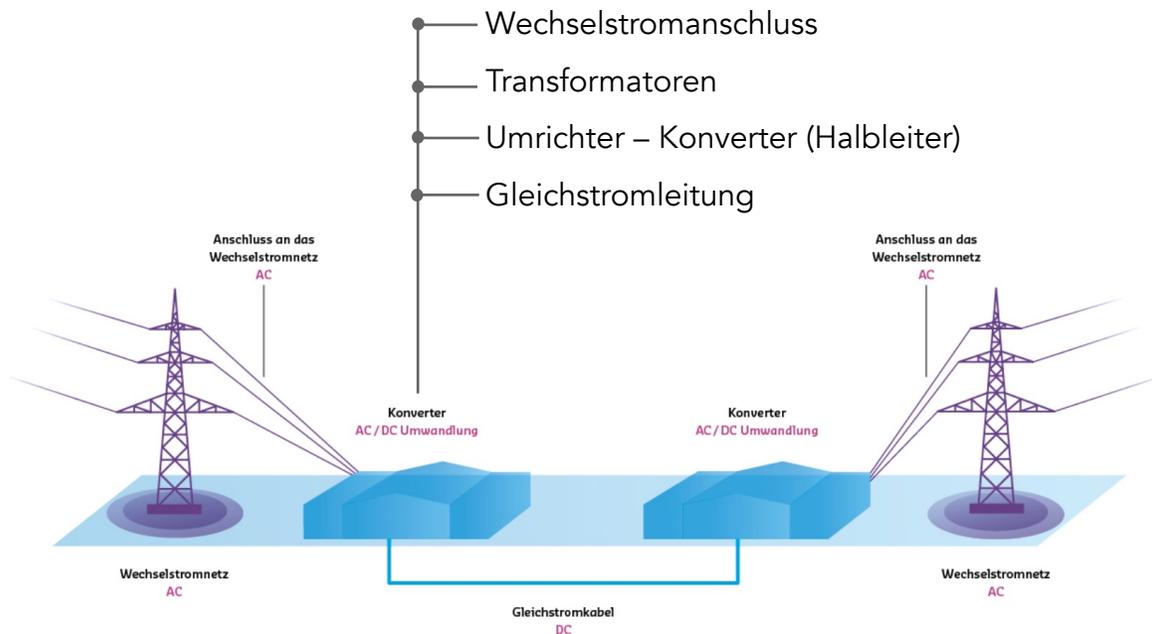
[Quelle – Energiepfad Grab]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Gleichstrom (II)

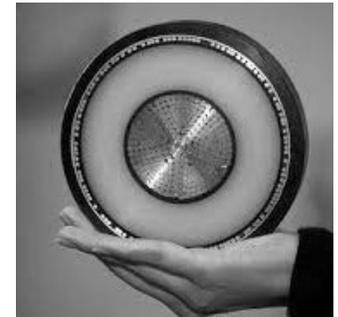
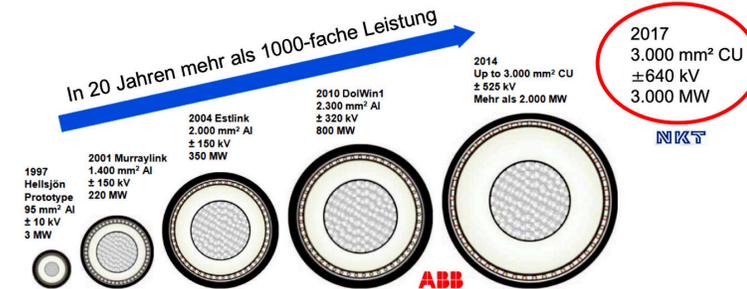
### Punkt-zu-Punkt Verbindungen

Einbindung einer HGÜ-Leitung in ein DHÜ-Netz



[Quelle - AMPRION –Konverter und Konverterstationen]

Kabelentwicklung



HVDC-Konverterstation

- Ventilhalle zur Verbindung Dänemark-Deutschland als Kurzkupplung
- Projektkosten 140 Mio. €
- Hersteller ABB
- Betreiber Energinet (DK) und 50 Hertz-Transmission (D)



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Gleichstrom (III)

### HVDC - Stromnetz

- HVDC-Netzknoten – Realisierung für ein vermaschtes Netz, nach dem ‚Vorbild‘ eines AC-Netzes, ist zwingend notwendig
- Leistungsschalter – technologische Entwicklung zwingend notwendig\*
- Netzstruktur – überlagerte Verbindung von internationalen -> DHÜ-Verbundnetzsystemem -> Multi-Terminal-Systeme
- Lastflusskontrolle – bei Störungen im internationalen Lastfluss
- Leistungsfluss – Nutzung der schnellen Lastflussumkehr ( $< 0,5\text{ s}$ ) in Punkt-zu-Punkt Verbindungen (einiges tausend MW)
- Aufgabe – Verbundnetzstabilität und Einbindung großer regenerativer Energieerzeugungsanlagen -> Großerzeugungsanlagen
- Netzstörungen – ggf. Entkopplung von internationalen DHÜ-Verbundnetzen und Schaffung von temporären stabilen Netzinseln
- Overlay-Netz – internationale Gleichstrom-Verbindungen von Ländern und Kontinenten

s. Anlage (A5) -> \*ABB Pressemitteilung

### Vision einer Overlay-Netzstruktur für Europa



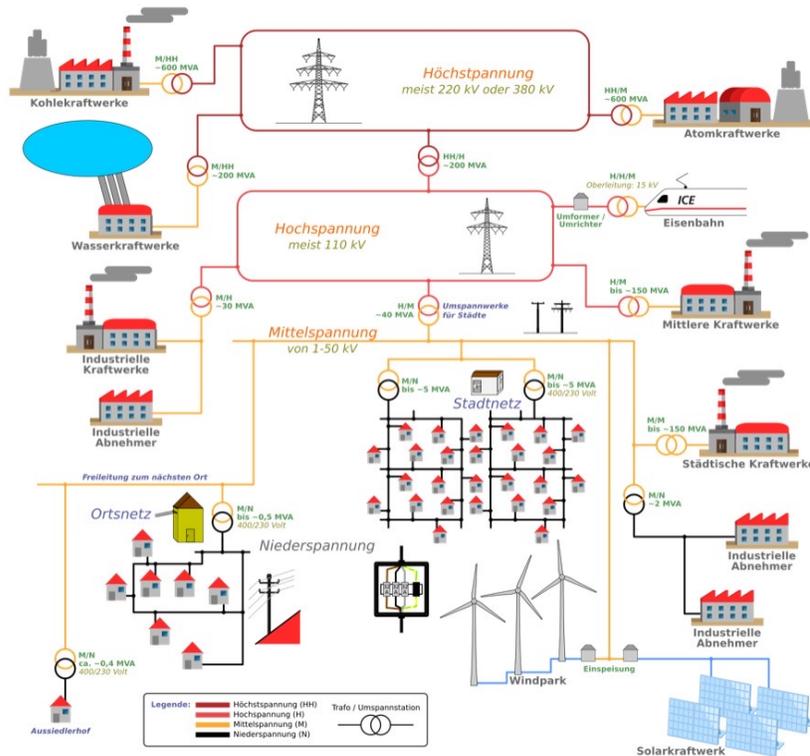
[Quelle - GÖRNER-Technologien für Gleichstrom-Overlay-Netze, ABB]



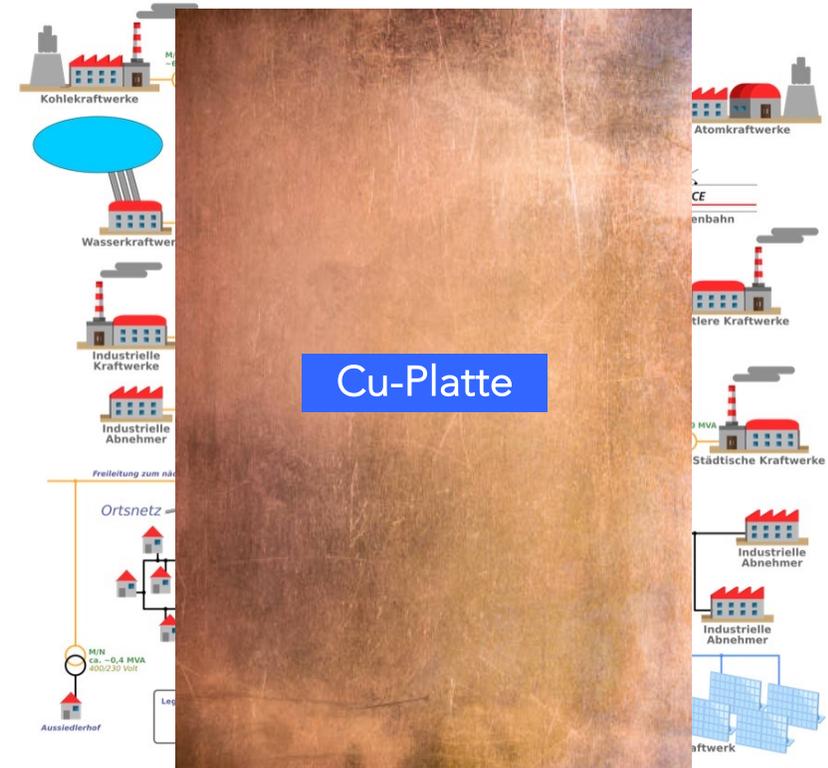
# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Energietechnik – Modelle für ein nat. elektrisches Energieversorgungssystem

Modell – Darstellung Gesamtzusammenhang



Modell mit Netz-Cu-Platte

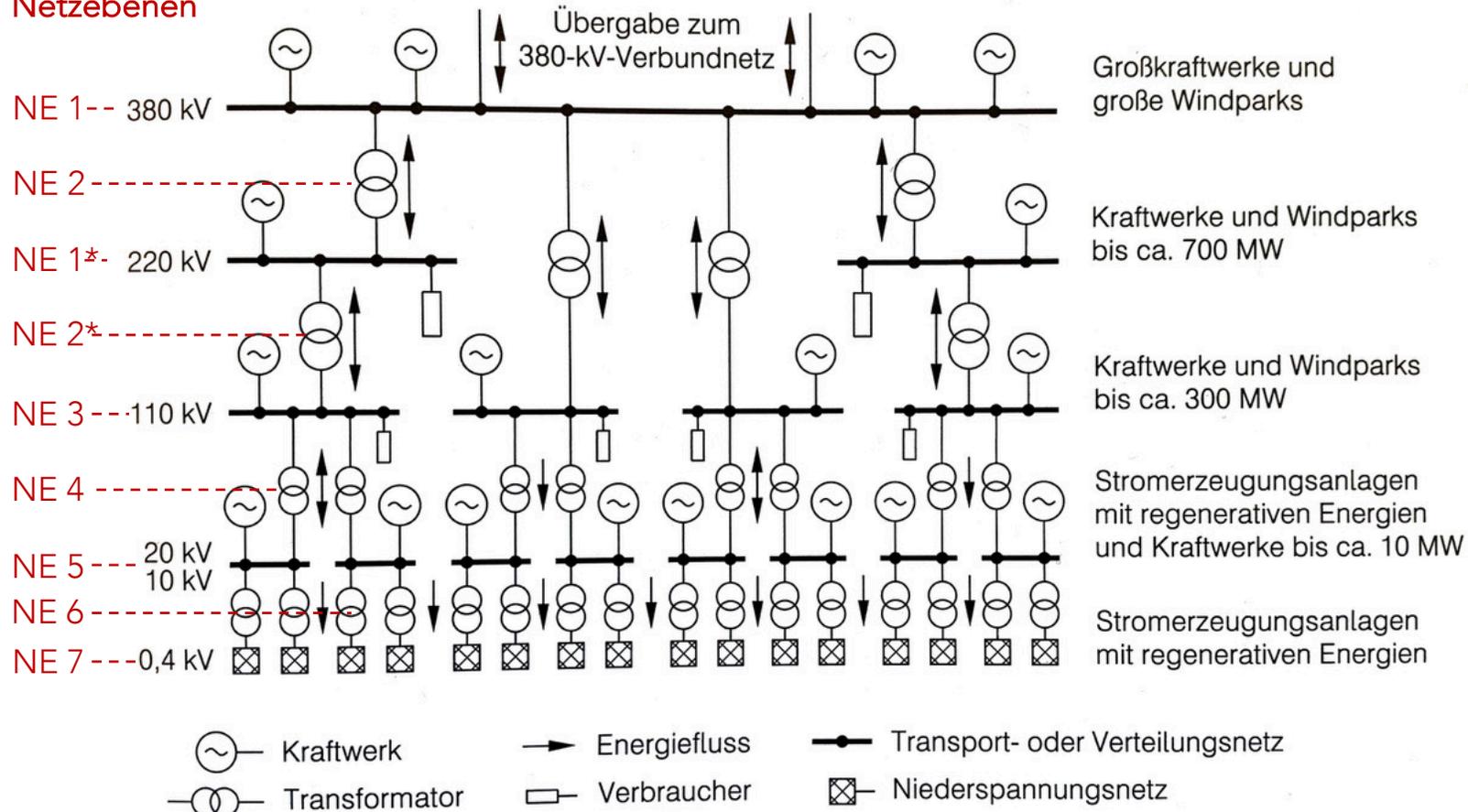


[Quelle - Wikiwand]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Nationales Verbundnetz - zusammenhängendes Drehstromnetz (Beispiel Deutschland)

### Netzebenen



### Einspeisungen



Was ist die elektrotechnische Notwendigkeit für eine Einspeisung?

### Netz-Cu-Platte



Wo ist die Kupferplatte?

[Quelle: HEUCK..., *Prinzipieller Aufbau des Energieversorgungsnetzes der Bundesrepublik Deutschland*]

s. Anlage (A6) -> Beispiele für reale 110-kV und 380-kV-Netze

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Nationales Verbundnetz – Beispiel Deutschland

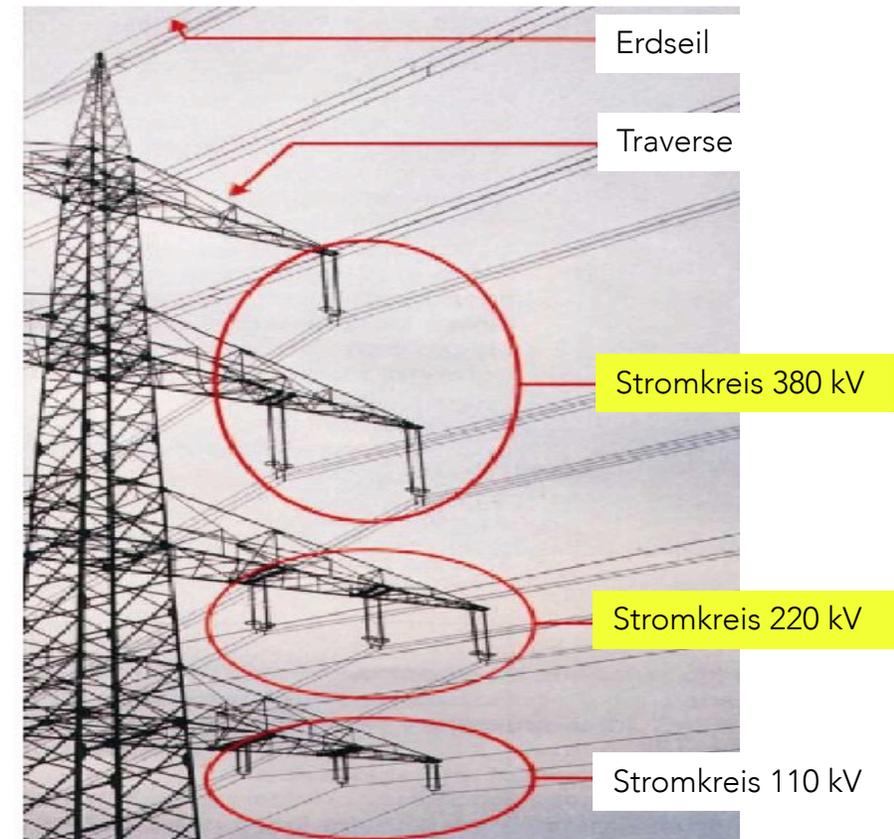
### Kennzahlen zur Orientierung

Netzebenen (NE)	NE 1 und 2
Spannungsebenen	380 kV und 220 kV
Gesamtlänge	~ 30 Tkm
Anteil Freileitung	~ 98 %
Anteil Maste	~ 30 T
Erzeugungsleistung* (angeschlossen)	> 200 GW (netto)
mittlere Transportleistung	~ 60 GW 540 TWh* /8760 h
max. Transportleistung	100 – 120 GW

[Quelle: \* BDEW – Installierte Leistung und Erzeugung 2020]

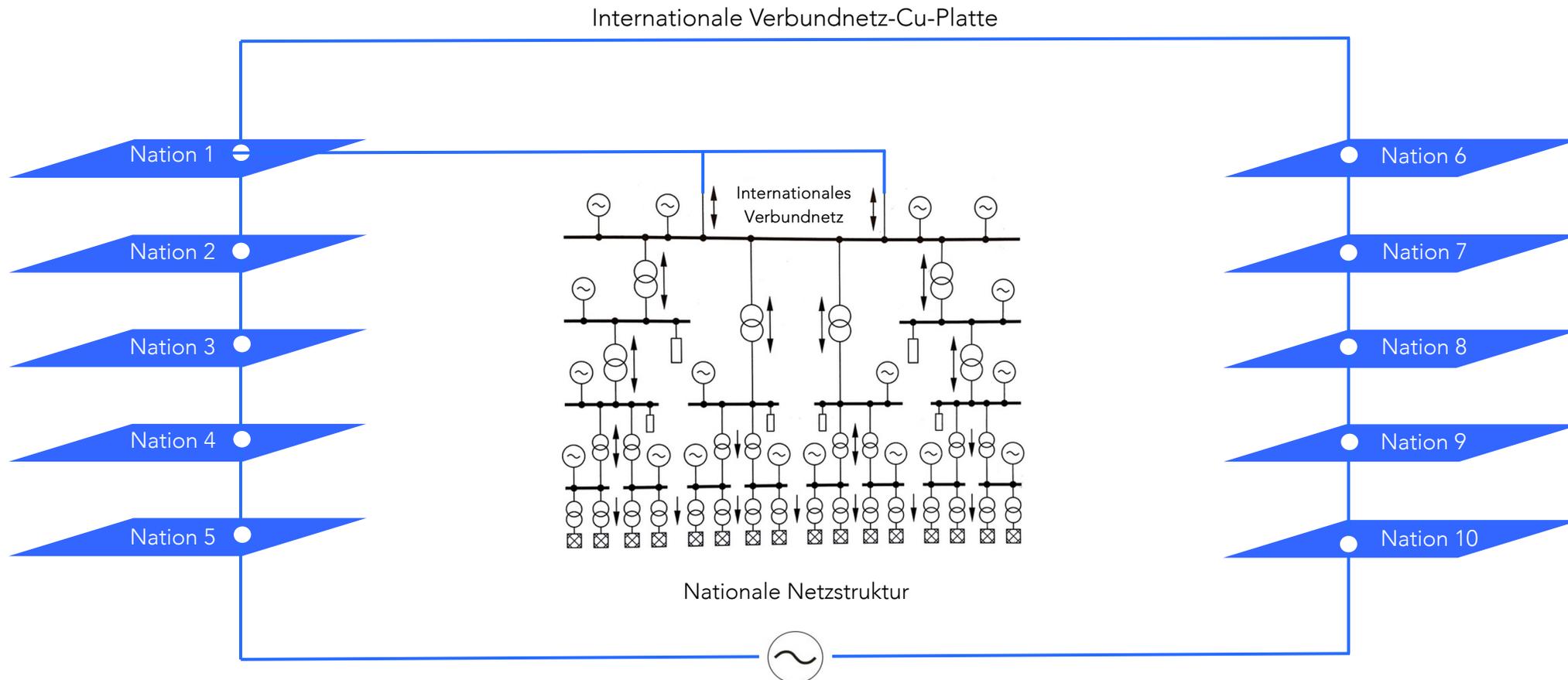


[Quelle: VDE FFN: Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE]



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

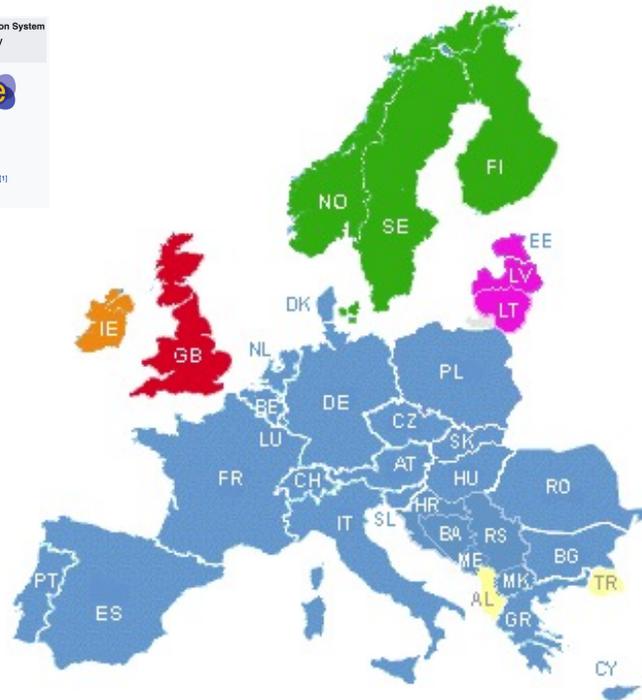
## Internationales Verbundnetz - Modell



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Europäische Verbundnetze – Organisation der Verbundnetzbetreiber

### ENTSO-E

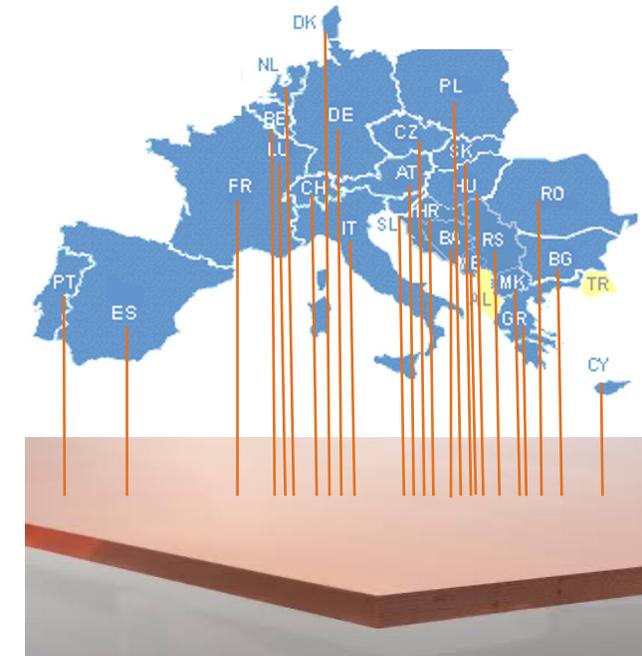


Die fünf Verbundsysteme der EU unter dem Dach der ENTSO-E

UCTE Nordel UKTSOA ATSOI BALTSO

Albanien	Österreich
Belgien	Polen
Bosnien-Herzegowina	Portugal
Bulgarien	Rumänien
Dänemark	Schweden
	Schweiz
Deutschland	Serbien
	Slowakei
Estland	Slowenien
Finnland	Spanien
Frankreich	Tschechien
Griechenland	Türkei
Irland	Ungarn
Island	
Italien	Vereinigtes Königreich
Kroatien	
Lettland	Zypern
Litauen	
Luxemburg	
Mazedonien	
Montenegro	
Niederlande	
Norwegen	

### UCTE



- Zusammenhängendes DHÜ-Netz auf dem Festlandssockel
- Nutzer - ca. 400 Mio.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Elektromagnetische Felder – Mobilfunk, WLAN, Stromnetz, Haushaltsgeräte, ...

### Was sind elektromagnetische Felder?

- Elektrische und magnetische Felder beschreiben die räumliche Verteilung einer Kraftwirkung, die auf elektrische Ladungen und Ströme ausgeübt werden kann.
- Elektromagnetische Felder können künstlich erzeugt werden, kommen aber auch natürlich in der Umwelt vor. Sie gehören zur "nichtionisierenden Strahlung".
- Bei statischen und niederfrequenten Feldern betrachtet man die elektrische und die magnetische Komponente getrennt voneinander. Bei hochfrequenten Feldern sind die beiden Komponenten eng miteinander gekoppelt, so dass man hier von elektromagnetischen Feldern spricht.
- Niederfrequente elektrische und magnetische Felder können elektrische Felder und Ströme im Körper erzeugen. Durch hochfrequente elektromagnetische Felder kann biologisches Gewebe erwärmt werden.
- Aufgabe des Strahlenschutzes ist es, dafür zu sorgen, dass die Stärke der Felder so gering ist, dass keine Gesundheitsschäden auftreten.

Elektromagnetische Felder sind ein Teil des elektromagnetischen Spektrums. Dieses erstreckt sich über den gesamten Bereich von den statischen elektrischen und magnetischen Feldern über die optische Strahlung bis zur sehr energiereichen Gammastrahlung (siehe Abbildung). Den Teil des Spektrums zwischen den statischen elektrischen und magnetischen Feldern und der Infrarot-Strahlung bezeichnet man üblicherweise mit dem Oberbegriff "elektromagnetische Felder".

[Quelle – BfS – Elektromagnetische Felder]

ELEKTROMAGNETISCHE FELDER

Feld	Frequenz	Wellenlänge
Statische elektrische und magnetische Felder	0 Hertz	--
Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	oberhalb von 0 Hertz bis zu 100 Kilohertz (kHz)	mehr als 300.000 Kilometer bis 3 Kilometer
Hochfrequente elektromagnetische Felder	100 Kilohertz bis 300 Gigahertz (GHz)	3 Kilometer bis 1 Millimeter

Energie-  
versorgung

Oberhalb von 300 Gigahertz verwendet man üblicherweise den Begriff "Strahlung". Der Begriff "Feld" ist für diesen Bereich des Spektrums nicht mehr gebräuchlich.

### Wie wirken elektromagnetische Felder?

Aufgrund ihrer unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften üben die verschiedenen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums unterschiedliche Wirkungen auf biologische Organismen aus. Besonders bedeutsam ist dabei die Energie der einzelnen Photonen. Sie nimmt mit zunehmender Frequenz kontinuierlich zu.

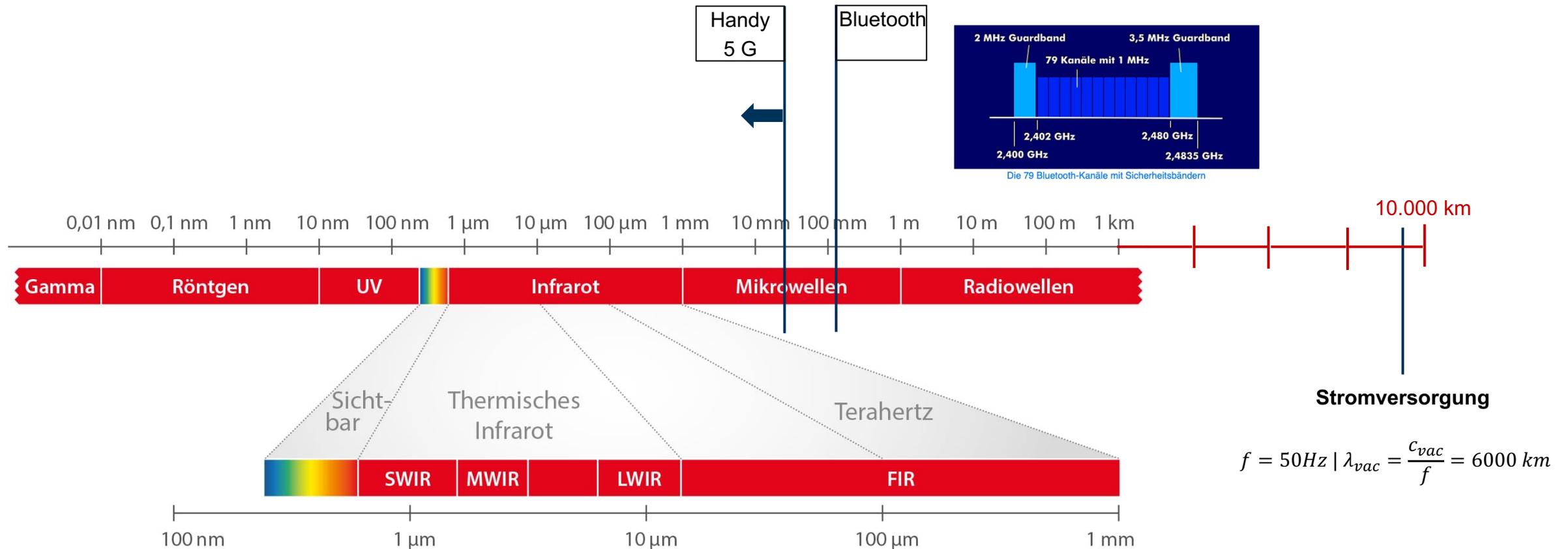
Elektromagnetische Felder gehören zur "nichtionisierenden Strahlung". Die Photonen der nichtionisierenden Strahlung besitzen im Gegensatz zur ionisierenden Strahlung nicht genügend Energie, um Atome und Moleküle zu ionisieren, das heißt aus der Hülle Elektronen "herauszuschlagen" und damit positiv geladene Teilchen (Ionen) zu erzeugen. Dies bedeutet unter anderem, dass im Gegensatz zum Beispiel zur Röntgenstrahlung ihre Energie zu gering ist, um das Erbmaterial direkt zu schädigen und damit unmittelbar an der Entstehung von Krebs beteiligt zu sein.

Elektromagnetische Felder können aber auf anderem Wege gesundheitliche Schäden auslösen:

- Niederfrequente elektrische und magnetische Felder können elektrische Felder und Ströme im Körper erzeugen.
- Durch hochfrequente elektromagnetische Felder kann biologisches Gewebe erwärmt werden.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Elektromagnetisches Spektrum



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Solarkonstante

- Definition**
- Solarkonstante  $E_0$  - langjährig gemittelte extraterrestrische senkrechte Bestrahlungsstärke (Intensität) der Sonne
  - keine Naturkonstante

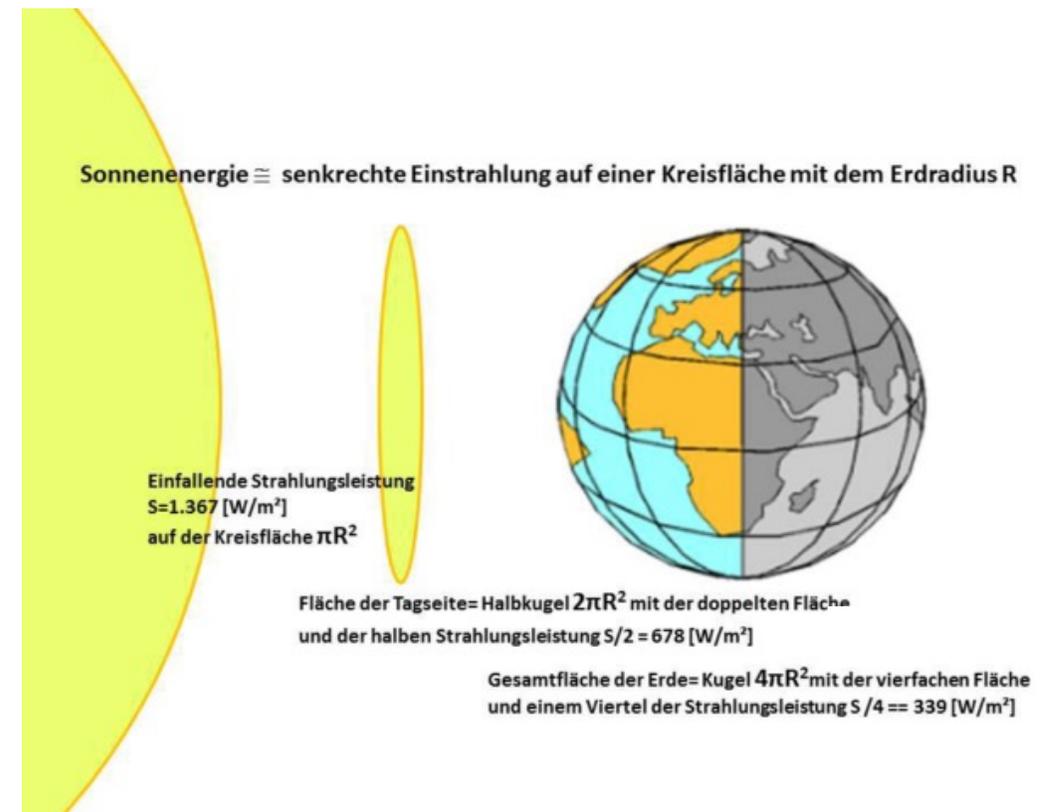
- Werte**
- Vakuum  $E_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$  Festlegung WMO\* 1982
  - Schwankungsbreite im Jahr ca. +/- 3%

▪ Boden

Wetter (Bewölkung)	Sommer (bis)	Winter (bis)
klar	$1000 \frac{W}{m^2}$	$500 \frac{W}{m^2}$
leicht -mittel	$600 \frac{W}{m^2}$	$300 \frac{W}{m^2}$
stark	$300 \frac{W}{m^2}$	$150 \frac{W}{m^2}$

- Winkelabhängigkeit  $E(\alpha) = E_0 \cdot \sin\alpha$

\* Weltorganisation für Meteorologie (WMO) / Teil der Vereinten Nationen / Hauptsitz Genf/Gegründet 1950



[Quelle – Wikipedia]

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Energie – Haben wir ein Energieproblem ?

physikalisch

- **Nein.**
- Problemlösung – Energie aus der **Kernfusion**
- Standort des Fusionsreaktors – 150 Mio. km von der Erde
- Reaktorbetrieb 24/7
- Natürliche Transformation der Fusionsenergie in anthropogen nutzbare elektromagnetische Strahlungsenergie
- Ubiquitäre Energiebereitstellung



Erzeugungsanlage I

technologisch

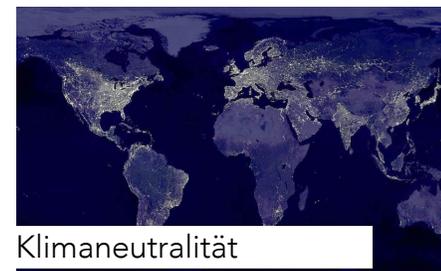
- **Nein**, in der operativen Erfüllung der Anforderungen der Industrienationen
- **Ja**, im inhärenten Betriebsrisiko.
- **Ja**, in den klimatischen Wirkungen
- **Ja**, in der Speicherung elektrischer Energie



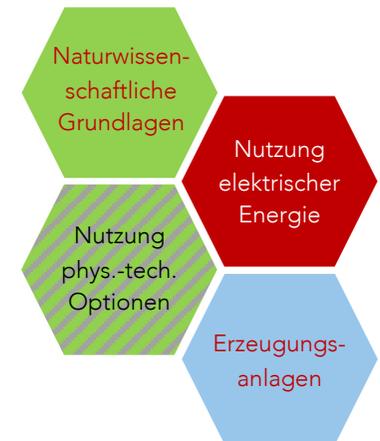
Erzeugungsanlage II

volkswirtschaftlich  
(in einem  
Zukunftssystem)

- Betriebsrisiken – keine
- Betriebskosten – keine für Reaktorbetrieb 24/7
- Betriebskosten – keine für Primärenergie
- Betriebskosten – Energietransport  $\approx 0,00\text{€}/kWh$



Klimaneutralität



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme

## Anlagen

- A1 Entropie
- A2 Energiequellen
- A3 Leitungen
- A4 Transformatoren
- A5 Gleichstrom Leistungsschalter
- A6 Reale 110-kV- und 380-kV-Netze

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Entropie – Begriffe im Umfeld (I)

**Thermodynamik** – Aufgabe ist es, -> *makroskopische* Eigenschaften der Materie durch geeignete physikalische Größen zu beschreiben und allgemein gültige Beziehungen zwischen diesen aufzustellen.

**Thermodynamisches System** – Eine beliebige Ansammlung von Materie, deren Eigenschaften durch die Angabe *makroskopischer Zustandsgrößen* (Volumen, *Energie*, Teilchenzahlen,...) eindeutig und vollständig beschrieben werden kann.

- Materie ist. i. Allg. durch Wände gegen die Umgebung abgegrenzt.

**Abgeschlossenes oder isoliertes System** – Es gibt *keine Wechselwirkung* (WW) zwischen dem isolierten System und der Umgebung.

- WW weder materiell noch energetisch.
- ↪ In einem abgeschlossenen System ist die -> *Gesamtenergie* (mechanisch, elektrisch, ...) konstant.
- ↪ Energie und Teilchenzahl sind -> *Erhaltungsgrößen*.
- ↪ Teilchenzahl  $N$ , Volumen  $V$  und Energie  $E$  sind bestimmende Systemgrößen

Bezug zur -> *Entropie*

- Systeme streben einem -> *Gleichgewichtszustand* zu, der durch ein *Maximum an Entropie* gekennzeichnet ist.
- ↪ Zustand mit den meisten mikroskopischen Realisierungsmöglichkeiten (Folgerung aus 2. Hauptsatz)
- ↪ Alle in einem abgeschlossenen System von selbst ablaufenden (irreversiblen) Prozesse vergrößern die Entropie, bis im Gleichgewicht ihr Maximum erreicht ist.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Entropie – Begriffe im Umfeld (II)

**Geschlossenes System** – Der *Energieaustausch mit der Umgebung* ist zulässig, der *Materieaustausch jedoch nicht*.

- ↪ Die Energie ist keine Erhaltungsgröße, die Teilchenzahl bleibt erhalten.
- ↪ Im Gleichgewicht des Systems mit seiner Umgebung stellt sich ein Mittelwert der Energie ein, den man mit einer Temperatur des Systems oder Umgebung in Zusammenhang bringen kann.
- ↪ Zur Kennzeichnung eines Makrozustandes kann neben  $N$  und  $V$  die Temperatur  $T$  verwendet werden.

**Nicht abgeschlossene oder offene Systeme** – Der *Austausch von Energie und Materie* mit der Umgebung ist zulässig.

- ↪ Weder Energie noch Teilchenzahl sind Erhaltungsgrößen.
- ↪ Prinzip eines durchströmten Systems.
- ↪ Im Gleichgewicht des offenen Systems mit seiner Umgebung stellt sich ein Mittelwert der Energie und Teilchenzahl ein.
- ↪ Analog zur Beziehung zwischen mittlerer  $E$  und der  $T$  kann man die mittlere  $N$  mit dem chemischen Potenzial  $\mu$  in Verbindung bringen kann.  $T$  und  $\mu$  können ebenfalls zur Kennzeichnung des offenen Systems verwendet werden.

---

Spezielle energetische Eigenschaften

- In der Mechanik und der **Elektrodynamik** sind nichtabgeschlossenen Systeme bestrebt, *ihre Energie zu verringern*.
- Mechanische Systeme streben nach einem lokalen Minimum an pot. Energie.
- ↪ Ein nicht abgeschlossenes System mit konstanter Energie strebt nach minimaler Energie.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

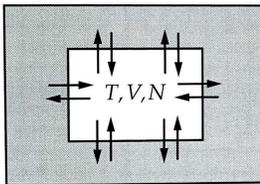
## Entropie – Begriffe im Umfeld (III)

**Gleichgewichtszustand** – Makroskopischer Zustand eines abgeschlossenen Systems, der sich nach ‚hinreichend‘ langer Zeit einstellt.

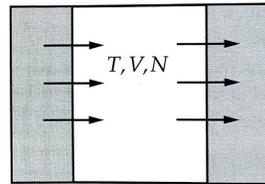
- Zustandsgrößen sind zeitlich konstant.
  - **Thermodynamische Zustandsgrößen sind streng nur für Gleichgewichtszustände definiert.**
- ↪ Sind die Zustandsänderungen zeitlich nur gering, kann man von einem Quasi-Gleichgewichtszustand sprechen -> technische Anwendungen.

**Stationärer Zustand** – Ein Zustand, in dem sich die makroskopischen Zustandsgrößen zwar zeitlich nicht ändern, aber ein Energiefluss auftritt.

- Kennzeichnet für ein stationäres System ist, dass es nicht abgeschlossen ist, sondern Energie zu- als auch abgeführt wird.



Gleichgewichtszustand



Stationärer Zustand

↪ quasistationär Energietechnik

### Zustandsgröße

- Eine **makroskopische** physikalische Größe, die nur vom Gleichgewichtszustand des Systems abhängt.
- ↪ Beispiele: Temperatur, Druck, Ladung, Dipolmoment, Brechungsindex, ...
- ↪ keine Zustandsgrößen sind mikroskopische Eigenschaften, wie z.B. Ort oder Impulse von einzelnen Teilchen

### Zustandsgröße – extensiv

- Eine Größe die **proportional** zur Stoffmenge in einem Zustand ist.
- ↪ Vervielfachung der Stoffmenge bedeutet Vervielfachung extensiven Größen
- ↪ Beispiele: Volumen, Gesamtenergie, Gesamtmasse
- ↪ Das Produkt einer extensiven und einer intensiven Größe ist extensiv.
- ↪ Die Gesamtladung ist das Produkt aus Ladungsdichte (intensiv) und des Volumens (extensiv)

Die für die Thermodynamik und statistische Mechanik charakteristische extensive Zustandsgröße ist die Entropie.

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Entropie – Begriffe im Umfeld (IV)

### Zustandsgröße - intensiv

- Eine Größe die **unabhängig** von der Stoffmenge und für die einzelnen Phasen eines Systems **nicht additiv** ist.
- ↪ Beispiele - Dichte, Druck, Temperatur, Brechungsindex
- ↪ Die Größen können lokal unterschiedlich sein, z.B. Dichte der Erdatmosphäre

### Zustandsgleichung

Eine funktionale Gesetzmäßigkeit, die verschiedene Zustandsgrößen miteinander verbindet.

- ↪ Beispiel - Zustandsgleichung des **idealen Gases**  $p \cdot V = \lambda \cdot T$  mit  $\lambda = \text{const.}$

### Arbeit $W$ – in thermodynamischen Systemen | Einheit $J$

- Die am System geleistete Arbeit (Energie) wird positiv und die dem System entzogene Arbeit wird negativ bewertet.
- ↪ Grundlage - mechanische Definition
- ↪  $dW = -\mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} \Leftrightarrow W_{12} = -\int_{s_1}^{s_2} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$
- Beispiel – Betrag bei Volumenänderungen  $dW = -p dV$
- ↪ Beispiel – Elektrostatik – Bewegung Probeladung im Feld einer konstanten Ladungsverteilung

### Chemisches Potenzial $\mu$ – in thermodynamischen Systemen | Einheit $J$

- Arbeitsmenge [besser Energie] die aufgebracht werden muss, um die Veränderung der Teilchenzahl zu ermöglichen, so, dass das System im Gleichgewicht bleibt.
- $dW = \mu dN$

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Entropie – Begriffe im Umfeld (V)

**Innere Energie  $U$**  – als thermodynamisches Potential | Einheit  $J$

- Die in einem physikalischen System enthaltenen **Gesamtenergie** (-> extensive Zustandsgröße).
- Funktion  $U = U(S, V, N)$  der natürlich extensiven Variablen Entropie  $S$ , Volumen  $V$  und Teilchenzahl  $N$

$$\leadsto dU = \frac{\partial U}{\partial S} dS + \frac{\partial U}{\partial V} dV + \frac{\partial U}{\partial N} dN \quad \text{mit } \frac{\partial U}{\partial S} = T; \quad \frac{\partial U}{\partial V} = -p; \quad \frac{\partial U}{\partial N} = \mu$$

$$\leadsto dU = T dS - p dV + \mu dN$$

mit intensiven Variablen  $T$ =Temperatur,  $p$ = Druck und  $\mu$  = chem. Potential

**Energieumwandlung – elektrische Energie**

[STÖCKER Kap. 21.2; S. 616]

- Elektrische Energie kann im ohmschen Widerstand eines elektrischen Leiters vollständig in Wärmeenergie umgewandelt werden. Die Umkehrung gilt nicht.
- ~ Die Gesamtenergie ist eine Erhaltungsgröße (abgeschlossenen System).
- ~ Wärmeenergie kann nicht vollständig in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden -> **2. Hauptsatz der TD**

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Entropie

**Entropie  $S$**  – als extensive Zustandsfunktion | Einheit  $\frac{J}{K}$

- Ist eine extensive Zustandsfunktion, die die ‚System-Unordnung‘ beschreibt.
- Entropieänderung kann bei kleinen Temperaturänderungen über die reduzierte Wärme [-> Adiabaten] definiert werden  $\leadsto \Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$
- $\leadsto$  Die Entropie am absoluten Nullpunkt ist null -> 3. Hauptsatz der TD.

**Entropie  $S$**  – in der mikroskopischen Betrachtung

- D.h. auf der Ebene der einzelnen Teilchen wird durch deren Eigenschaften ein Systemzustand definiert.
- Zu jedem makroskopischen thermodynamischen Zustand gibt es eine große Anzahl mikroskopischer Realisierungsmöglichkeiten.
- $\leadsto$  Beispiel – Soll eine bestimmte Anzahl von Kugeln auf zwei Behälter verteilt werden, so wird der **Makrozustand** durch die Anzahl der Kugeln in jedem Behälter bestimmt, der **Mikrozustand** jedoch dadurch, welche Kugel sich in welchem Behälter befindet.

- $\leadsto$  Der Zustand mit den meisten Realisierungsmöglichkeiten ist der wahrscheinlichste Zustand.
- $\leadsto$  Der Gleichgewichtszustand ist der Zustand mit den meisten Realisierungsmöglichkeiten.
- $\leadsto$  Da die Entropie mit der Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten anwächst, ist die Entropie des Gleichgewichtszustandes maximal.
- Zusammenhang zwischen Entropie und Anzahl der Mikrozustände  
 $S = k \ln \Omega$  mit  $k$  = Boltzmann-Konstante und  $\Omega$  = Anzahl der Mikrozustände

**Entropie  $S$**  – als thermodynamisches Potential

- Sie beschreibt die **Anzahl möglicher Mikrozustände** im System.
- Für die Funktion  $S = S(U, V, N, \dots)$
- $\leadsto dS = \frac{\partial S}{\partial U} dU + \frac{\partial S}{\partial V} dV + \frac{\partial S}{\partial N} dN + \dots$  mit  $\frac{\partial S}{\partial U} = \frac{1}{T}$ ;  $\frac{\partial S}{\partial V} = \frac{p}{T}$ ;  $\frac{\partial S}{\partial N} = -\frac{\mu}{T}$
- $\leadsto dS = \frac{1}{T} dU + \frac{p}{T} dV - \frac{\mu}{T} dN + \dots$
- $\leadsto$  unter div. mathematischen Annahmen und den Hauptsätzen der TD.
- $\leadsto$  Sie ist in abgeschlossenen Systemen eine zentrale Variable (wie  $U$ )

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

## Thermodynamische Hauptsätze

**Hauptsatz** – Eine fundamentale Beziehung zwischen Zustandsgrößen, die erfahrungsgemäß (!) für alle bekannten Systeme gilt.

**Nullter Hauptsatz** – Ein **Gleichgewichtszustand** ist derjenige makroskopische Zustand eines abgeschlossenen Systems, der sich nach hinreichend langer Wartezeit von selbst einstellt.

- Im Gleichgewichtszustand ändern sich die makroskopischen Zustandsgrößen nicht mit der Zeit.

↪ Alle Systeme, die mit einem System im thermischen Gleichgewicht stehen, sind auch untereinander im thermischen Gleichgewicht.

**Erster Hauptsatz** – Die **totale Energieänderung** eines Systems erfolgt durch den Austausch von Arbeit und Wärme.

⇔ Die innere Energie  $U$  eines Systems ist eine Zustandsfunktion. D.h. der totale Energieinhalt eines Systems nach wiederholtem Einnehmen desselben Makrozustandes immer derselbe ist.

⇔ Die Änderung der inneren Energie  $U$  bei einer beliebigen infinitesimalen Zustandsänderung ist ein totales Differenzial.

$$dU = dW + dQ \quad \text{mit } W = \text{Arbeit und } Q = \text{Wärme.}$$

$dU < 0$  ist Arbeit, die vom System geleistet wird

$dU > 0$  ist Arbeit, die am System verrichtet wird.

**Zweiter Hauptsatz** – Es gibt keine **natürlichen Prozesse**, in denen die Gesamtentropie abnimmt.

⇔ Jedes abgeschlossene makroskopische System strebt nach dem **wahrscheinlichsten Zustand**. Das ist der Zustand, der durch die meisten mikroskopischen Realisierungsmöglichkeiten, also durch die größte Entropie (Unordnung) gekennzeichnet ist.

- Reversible Prozesse – die Entropie bleibt konstant, d.h.  $dS = 0$ .
- Irreversible Prozesse – die Entropie nimmt zu, d.h.  $dS > 0$ .

Nach einer Zustandsänderung muss ein abgeschlossenes System wieder ins Gleichgewicht laufen, wobei die Entropie ansteigt.

**Dritter Hauptsatz** -> Literatur (Festkörperphysik)

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A1)

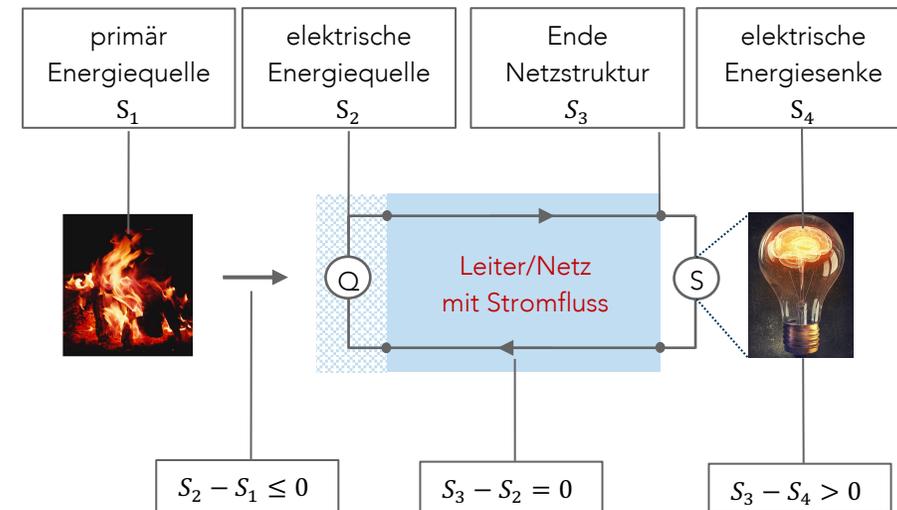
## Entropie – Technischer Stromkreis

### Technischer Stromkreis



- ↪ Stromkreis gilt die Energieerhaltung
- ↪ Entropie nimmt von der Quelle zur Senke zu
- ↪ Für das Netz gilt ideal, die Entropie bleibt bei der Übertragung erhalten

### Entropie



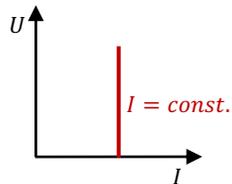
Entropie-Prozess von

- der Erzeugung (z.B. klassisch Wärmeenergie) zur elektrischen Bereitstellungsenergie in der Quelle Q
- dem Transport in einer Netzstruktur zum Verbraucher
- der Rückwandlung in z.B.  $\sim$  *Licht* und Wärme  $\sim$  bis zur vollständigen Umwandlung in Joule'sche Wärme, mit dann der max. Entropie

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A2)

## Energiequellen – aktive Zweipole

### Stromquelle

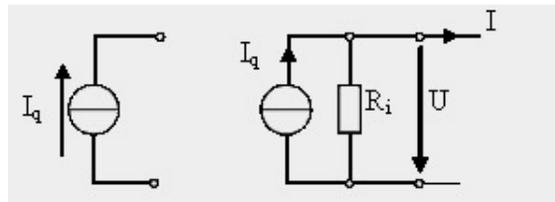


$U(I)$ -Diagramm  
ideale Stromquelle

### Definition

Eine –ideale- Stromquelle speist in ein Netzwerk, unabhängig vom Verbraucherwiderstand, einen konstanten Strom ( $i_q = const.$ ) ein.

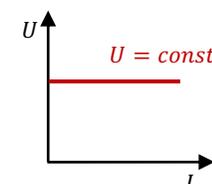
### Ersatzschaltbild



### Erläuterungen

- Ideale Quelle  $\rightarrow R_i = \infty$
- Reale Quelle  $\rightarrow R_i \in (0 \Omega; \infty)$ , d.h. endlich
- Widerstand  $R_i$  gibt es explizit nicht
- Reale Quelle muss den Verluststrom  $I_{R_i}$  über einen weiten Anwendungsbereich –aktiv- klein halten

### Spannungsquelle

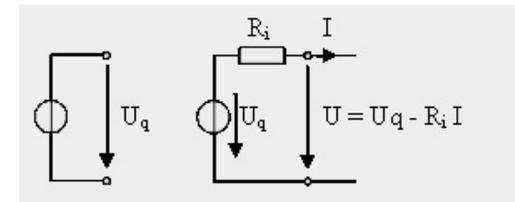


$U(I)$ -Diagramm  
ideale Spannungsquelle

### Definition

Eine –ideale- Spannungsquelle hält ihre Ausgangsspannung/ -differenz unabhängig vom Verbrauchswiderstand/-netzwerk konstant ( $u_q = const.$ ).

### Ersatzschaltbild



### Erläuterungen

- Ideale Quelle  $\rightarrow R_i = 0 \Omega$
- Reale Quelle  $\rightarrow R_i \in (0 \Omega; \infty)$
- Widerstand  $R_i$  gibt es explizit nicht
- Reale Quelle muss den Spannungsabfall über  $U_{R_i}$  über einen weiten Anwendungsbereich –aktiv- klein halten

Strom- und Spannungsquellen können elektrotechnisch gleichwertig ineinander überführt werden

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A3)

## Leitungen – Technische Daten Freileitungen

### VDE-Datenblatt

Spannung/kV	20	110	220	380
Querschnittsfläche (Al) (mm <sup>2</sup> )	150	300	Bündel 2 × 240	Bündel 4 × 240
Leiterdurchmesser (mm)	17,1	24,5	2 × 21,9	4 × 21,9
thermische Grenzleistung (MVA)	16	140	490	1700
thermischer Grenzstrom (kA)	0,462	0,735	1,29	2,58
Grenzstromdichte (A/mm <sup>2</sup> )	3,08	2,45	2,68	2,69
Wirkwiderstandsbelag bei 20 °C (Ω/km)	0,20	0,10	0,062	0,031
induktiver Widerstandsbelag bei 50 Hz (Ω/km)	0,34	0,38	0,32	0,26
Betriebskapazitätsbelag (nF/km)	11,2	10	11,5	14,4
Ladeleistungsbelag (kvar/km)	1,41	38,0	175	650
Erdkapazitätsbelag (nF/km)	3,6	4,2	6,3	6,5
Erdschlussstrombelag (A/km)	0,0392	0,251	(0,76)	(1,35)
Wellenwiderstand (Ω)	311	348	300	240
natürliche Leistung (MW)	1,29	34,8	160	600

**Tabelle 6.1** Kenndaten von Drehstromfreileitungen (Aluminium-Stahl-Seile; Werte für ein System einer Doppelleitung) [94]

### Strombelastbarkeit

**Tab. A.5** Strombelastbarkeit von Seilen [8.1]

Nennquerschnitte Kupfer Aldrey- und Aluminiumseile (mm <sup>2</sup> )	Aluminium Stahl-Seile (mm <sup>2</sup> )	Dauerstrom* Kupfer (A)	Aluminium (A)	Aldrey (A)	Aluminium- Stahl (A)
10		90			
16	16/2,5	125	110	105	105
25	25/4	160	145	135	140
35	35/6	200	180	170	170
50	50/8	250	225	210	210
70	70/12	310	270	255	290
95	95/15	380	340	320	350
120	120/20	440	390	365	410
	125/30				425
150	150/25	510	455	425	470
	170/40				520
185	185/30	585	520	490	535
	210/35				590
	210/50				610
	230/30				630
240	240/40	700	625	585	645
	265/35				680
300	300/50	800	710	670	740
	305/40				740
	340/30				790
	380/50				840
	365/35				850

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A3)

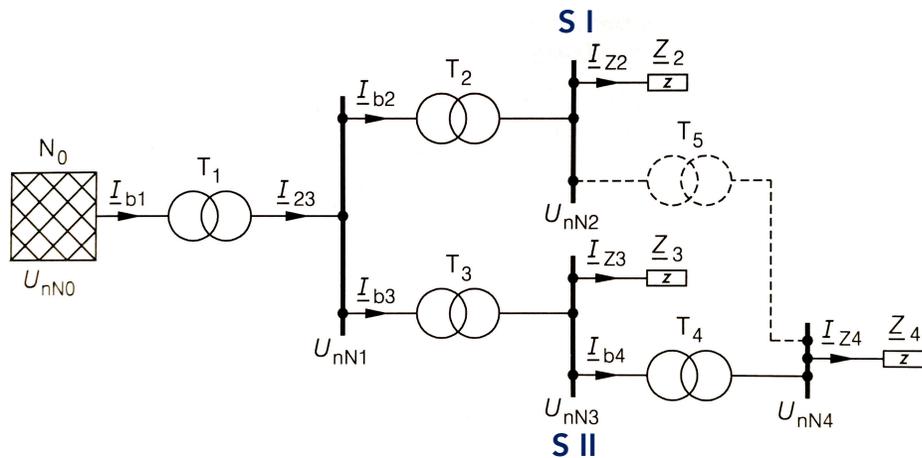
## Leitungen – Technische Daten Kabel

Isolation	Aufgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>Isolation des <b>vollständigen</b> Leiters ggü. anderen Potenzialen</li> <li>Isolationstrecke nur sehr kurz, Anforderungen an <math>\rightarrow \epsilon_r</math> !!!</li> </ul>			VPE – Isolationstrecke	Bei $U_B = 100 \text{ kV}$ beträgt die Strecke ca. 20 mm
	Material	Isolierstoff 20°C	$\epsilon_r$	$E_{\text{Durchschlag}}$ kV/ mm		
		Öl	2,2 – 2,8	15 - 25	Kabelfehler	Water Treeing <ul style="list-style-type: none"> <li>Inhomogenitäten</li> <li>Fertigungsprozess</li> <li><b>Teilentladungen</b></li> </ul>
		Papier getränkt	3,3 – 4,2	15 -40		
		PVC	3,0 – 4,0	40		
		PE	2,3	60		
		VPE	2,4	95		
		Luft (0°C)	1,05	3,3		
		Widerspruch ? -> spez. Isolationswiderstand -> OEDING Kap. 10 S. 327				
Beispiel	VPE – Isolationsmaterial					3. Water-treeing <p>Man bezeichnet als Water-treeing eine Erscheinung in PE, VPE – aber auch in anderen polymeren Isolierungen – unter gleichzeitiger Einwirkung des elektrischen Feldes und Feuchtigkeit, eine von Störstellen ausgehende bäumchenartige, in Feldrichtung ausgerichtete Struktur. Diese Strukturen sind irreversibel und stellen eine bleibende Veränderung mit erhöhter elektrischer Leitfähigkeit dar. Es werden je nach Entstehungsort (siehe Abb. 2) zwei Arten unterschieden:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>„Vented trees“ (vt), diese beginnen an Störstellen an der Grenzfläche der Isolierung in Richtung der Isolierung zu wachsen.</li> <li>„Bow-tie trees“ (btt), diese beginnen ihr Wachstum an Störstellen im Inneren der Isolierung.</li> </ol> <p>Abb. 2. Schematische Darstellung der wt-Strukturen</p>
					[Moreau]	

# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A4)

## Transformatoren - Anwendungsbeispiel

### Schaltung

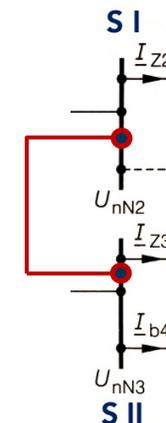


Beispiel - Zweiwicklungstransformatoren im Netzverband

[Quelle – HEUCK, Kap. 4]

### Fragen zum Verständnis

1. Aufgabe der exemplarischen Netzstruktur ?
2. Aufgabe der Transformatoren?
3. Wo wirken Kirchhoff'sche Regeln ?
4. Wieviele NE gibt es ? Wenn die unterste das NS ist, zu welcher NE gehört dann das einspeisende Netz  $N_0$  ?
5. Wie hoch ist die nachgelagerte Netzlast ?
6. Unter welchen Bedingungen könnte man die Sammelschienen I und II galvanisch koppeln ?



# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A5)

## Gleichstrom - Leistungsschalter

ABB Pressemitteilung aus 2012

### ABB löst 100 Jahre altes zentrales Rätsel der Elektrotechnik

**Durchbruch bei der Entwicklung eines Gleichstromschalters für die Hochspannungsübertragung wird Stromübertragung der Zukunft prägen**

Zürich, Schweiz, 7. November 2012 – ABB hat heute eine bahnbrechende Entwicklung in der Schaltung von Gleichströmen bekannt gegeben. Damit löst das Unternehmen ein 100 Jahre altes Rätsel der Elektrotechnik und ebnet den Weg für ein effizienteres Übertragungsnetz.

In mehrjähriger Forschung hat ABB den weltweit ersten Leistungsschalter für die Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) entwickelt. Der Schalter kombiniert schnellste Mechanik mit Leistungselektronik. Er wird in nur 5 Millisekunden – dreissigmal schneller als ein Wimpernschlag – Gleichstrom „unterbrechen“ können, der der Leistung eines Grosskraftwerks entspricht.

Dieser Durchbruch beseitigt eine seit 100 Jahren bestehende Hürde für die Entwicklung von Gleichstromübertragungsnetzen, die eine effiziente Integration von erneuerbaren Energien über grosse Entfernungen ermöglichen. Darüber hinaus werden Gleichstromnetze (DC) die Stabilität der bestehenden Wechselstromnetze (AC) verbessern. ABB führt derzeit Gespräche mit Übertragungsnetzbetreibern, um Pilotprojekte für das neue Produkt zu vereinbaren.

„ABB hat ein neues Kapitel in der Geschichte der Elektrotechnik aufgeschlagen“, sagt Joe Hogan, Vorsitzender der Konzernleitung von ABB. „Dieser historische Durchbruch macht es möglich, das Netz der Zukunft zu errichten. Gleichstrom-Overlaynetze werden effizient und stabil Länder und Kontinente miteinander verbinden und die bestehenden Wechselstrom-Übertragungsnetze stärken.“

Die Entwicklung des HGÜ-Hybridschalters zählt zu den Vorzeige-Forschungsprojekten von ABB, das jährlich über 1 Milliarde US-Dollar in die Forschungs- und Entwicklungsarbeit investiert. Das breit gefächerte Portfolio des Unternehmens und der einzigartige Vorteil, sowohl Leistungshalbleiter, Stromrichter und Hochspannungskabel (Schlüsselkomponenten eines HGÜ-Systems) im eigenen Haus zu fertigen, waren bei dieser Neuentwicklung entscheidend.

HGÜ-Technologie ermöglicht den Ferntransport von Strom von entlegenen Wasserkraftwerken, die Anbindung von Offshore-Windparks, die Entwicklung visionärer Solarprojekte und die Verbindung verschiedener Stromnetze mit unterschiedlichen Frequenzen. ABB hat die HGÜ-Technologie vor fast 60 Jahren in Pionierarbeit entwickelt und ist auch heute noch mit vielen Innovationen Technologie- und Marktführer in diesem Bereich. Das Unternehmen hat über 70 HGÜ-Projekte mit einer installierten Leistung von insgesamt über 60.000 Megawatt (MW) ausgeführt und ist damit für die Hälfte der weltweit installierten Systeme verantwortlich.

Der Einsatz der HGÜ-Technik hat in verschiedenen Teilen der Welt zu einer wachsenden Zahl von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen geführt. Der nächste logische Schritt besteht nun darin, die Leitungen zu verbinden und das Netz zu optimieren. ABB arbeitet bereits am Bau von Multi-Terminal-Systemen, und der innovative DC-Schalter markiert einen bedeutenden Schritt in der Entwicklung von HGÜ-Netzen. Parallel zur Arbeit am neuen Hybrid-Schalter hat ABB ein HGÜ-Netzsimulationszentrum errichtet, das Lösungen für den Betrieb zukünftiger DC-Overlaynetze konzipiert.

Weitere Informationen, Multimedia Formate, sowie die Möglichkeit mit ABB Experten zu diskutieren finden Sie [hier](#).

ABB ([www.abb.com](http://www.abb.com)) ist führend in der Energie- und Automationstechnik. Das Unternehmen ermöglicht seinen Kunden in der Energieversorgung und der Industrie, ihre Leistung zu verbessern und gleichzeitig die Umweltbelastung zu reduzieren. Die Unternehmen der ABB-Gruppe sind in rund 100 Ländern tätig und beschäftigen etwa 145.000 Mitarbeitende.

Zur Erklärung jeglicher Fachbegriffe in diesem Text beachten Sie bitte: [www.abb.com/glossary](http://www.abb.com/glossary)

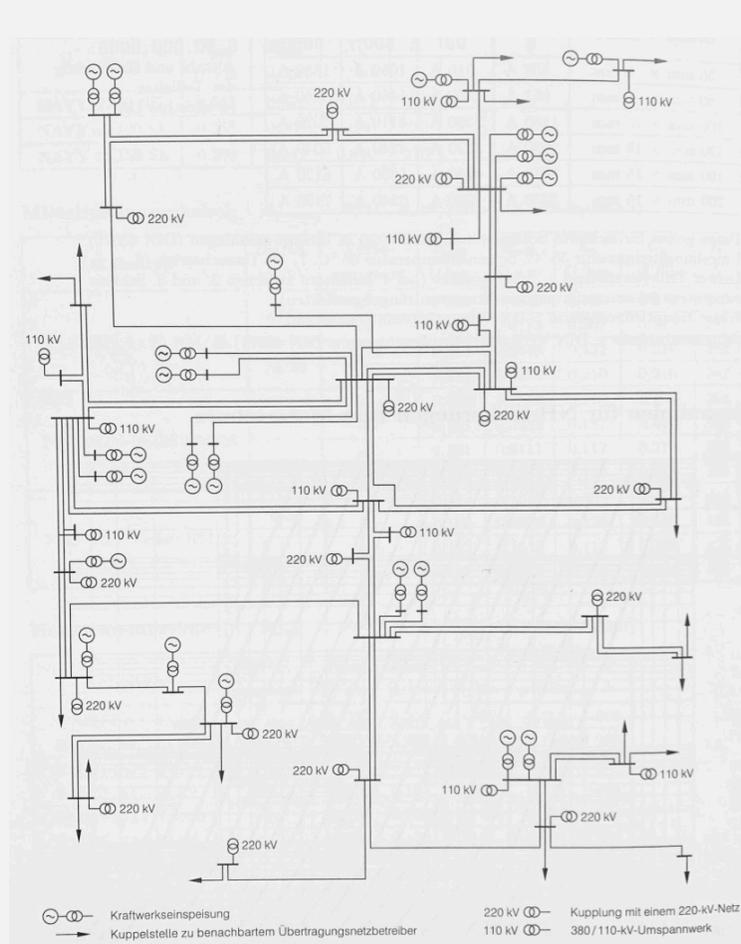
# Technische elektrische Energieversorgungssysteme (A6)

## Reale Netze – Beispiele

### Reales 380-kV-Freileitungsnetz

Kraftwerkeinspeisungen mit Leistungen bis 1300 MVA

UW versorgen unterlagerte Netze (Betriebsspannungen 220 kV/110 kV)

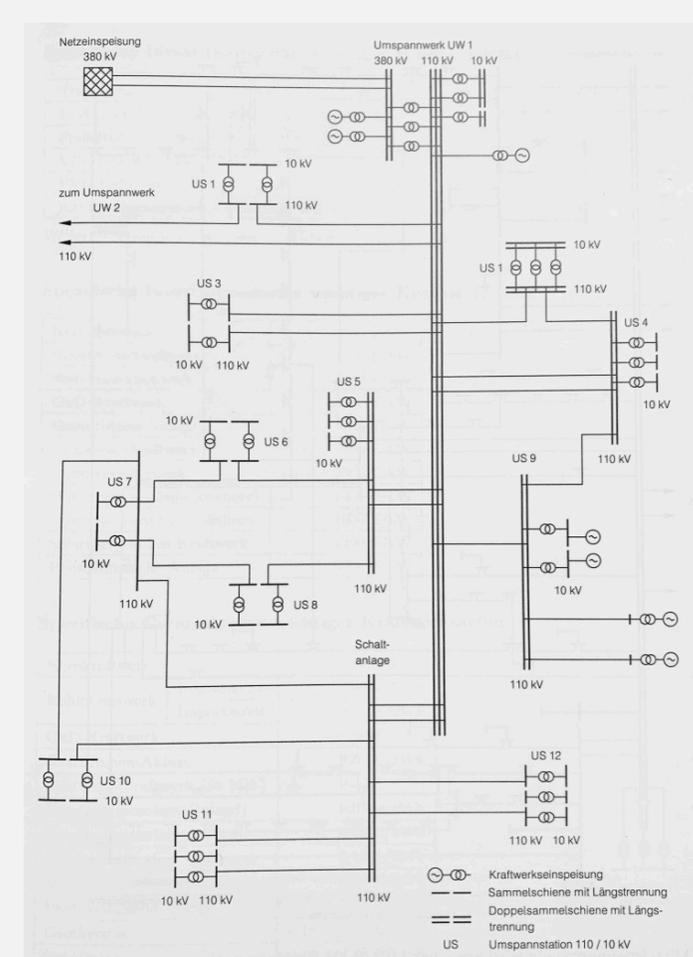


[Quelle - HEUCK]

### Reales 110-kV-Freileitungsnetz

HS-Netz wird aus eigensicherem 380/110-kV-UW versorgt

UW versorgen unterlagerte Netze (Betriebsspannung 10 kV)





# „Digitalisierung der Energie- wirtschaft“ im Verteilnetz

Vorlesung  
7.5.2021

Dr. Joachim Kabs

bayernwerk  
netz

 Schleswig-Holstein  
Netz

# Vorlesung – Stromnetze

## Grundlagen der Stromnetzregulierung | 05

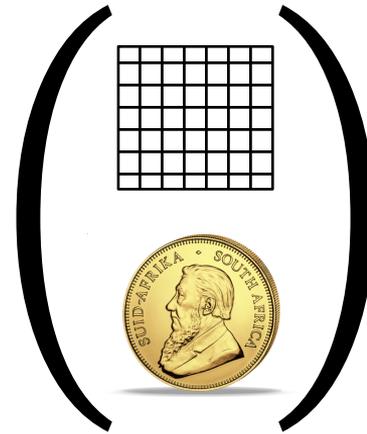
Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 14.05.2021



# Organisatorisches

## Vorlesung Stromnetze SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.	14:00 – 16:00	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.	14:00 – 16:00	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.	14:00 – 16:00	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.	14:00 – 16:00	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.	14:00 – 16:00	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.	14:00 – 16:00	Elektrische Energiespeicher - Verteilnetz	Murche
7	28.05.	14:00 – 16:00	Energienetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.	14:00 – 16:00	Energierechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.	14:00 – 16:00	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.	14:00 – 16:00	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.	14:00 – 16:00	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.	?	Prüfungen	Benthaus / Netter
13	09.07.	?	Prüfungen	Benthaus / Netter

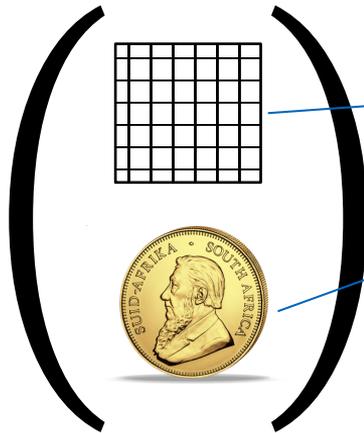
# Literatur

## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze | 05

BUNDESNETZAGENTUR	2021	Stromnetzentgelte im Bundesschnitt 2021 weitgehend konstant, Pressemitteilung
BUNDESNETZAGENTUR	Internet	Entflechtung von Transportnetzbetreibern, <a href="https://www.bundesnetzagentur.de">https://www.bundesnetzagentur.de</a>
BUNDESNETZAGENTUR	Internet	Entflechtung von Verteilnetzbetreibern, <a href="https://www.bundesnetzagentur.de">https://www.bundesnetzagentur.de</a>
ENERGIE-CONTROL AUSTRIA	2016	Leitfaden Netzanschluss, Stromanschluss leicht gemacht, <a href="http://www.e-control.at">www.e-control.at</a>
EUROPÄISCHES PARLAMENT	2020	Kurzdarstellung zur Europäischen Union, Energiebinnenmarkt
EUROPÄISCHE UNION	2009	Richtlinie 2009/72/ EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES über gemeinsame Vorschriften für den Elektrizitätsbinnenmarkt, Amtsblatt der EU
EUROPÄISCHE UNION	2021	EU WHOISWHO OFFICIAL DIRECTORY OF THE EUROPEAN UNION, Acer , ...
EGLITIS-MEDIA	Internet	Laenderdaten.info, <a href="mailto:info@eglitismedia.com">info@eglitismedia.com</a>
EHRICKE	2017	Energierrecht, 17. Auflage, Nomos Verlagsgesellschaft
GABLER	2013	Kompakt-Lexikon Wirtschaft, Springer Gabler
STERNER, STADLER	2017	Energiespeicher, 2. Auflage, Springer Vieweg
STROM-REPORT	Internet	STROM-REPORT Zahlen. Fakten Daten., <a href="http://Strom-Report.de">Strom-Report.de</a>

# Titelbild

## Grundlagen der Stromnetzregulierung



**Stromnetzregulierung** umfasst i. W.

- Netzzugang
  - Netzkosten
  - Zuverlässigkeit der Energieversorgung
  - ~ Verfügbarkeit der technologischen Infrastruktur
- 
- Netzbetreiberaufgaben
  - Regulierungsbehörde

**Regulierungsfrage I - Wie realisiert man einen diskriminierungsfreien Netzzugang ?**

**Regulierungsfrage II - Was sind die sachgerechten Kosten für den Netzbetrieb ?**

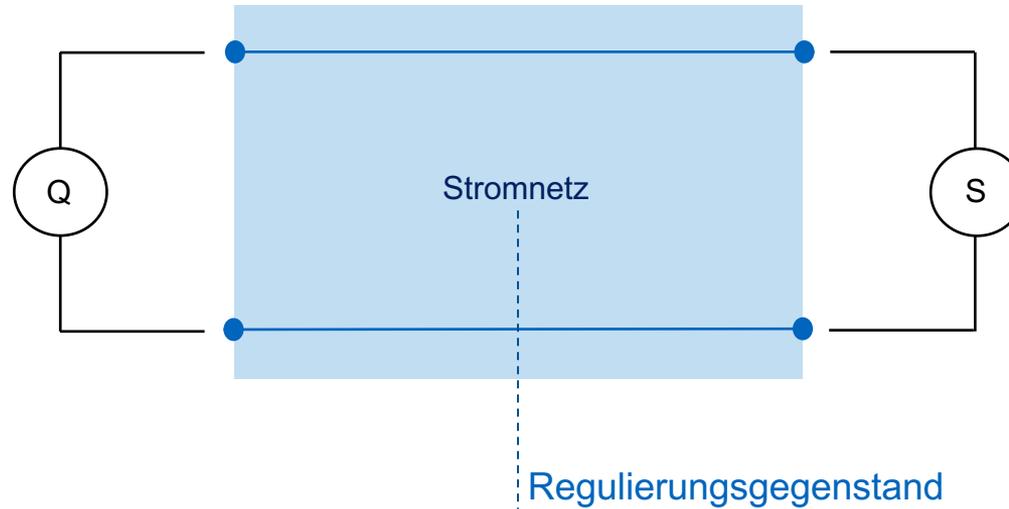
# Entwicklungskette technologischer Systeme

Energiewirtschaft -> elektrische Energie -> Teiltechnologie Stromnetz

Phase I – Technik	Phase II – Wirtschaft	Phase III - ...	Phase IV - ...
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Machbarkeit</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Definition Theorie – Übertragungsfkt. Praxis - Kupferplatte</li> <li>2. Naturwissenschaftliche Möglichkeiten</li> <li>3. Technische Machbarkeit</li> <li>4. Technologische F+E</li> <li>5. Realisierung Basis-Technologie</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Etablierung</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kosten Basistechnologie</li> <li>2. Klärung technologisch- betriebswirtschaftlicher Risiken</li> <li>3. Nutzer-Akzeptanz</li> <li>4. Stabilität für Investitionen und Gewinnerwartungen</li> <li>5. Technologische Effizienz- und Gewinnsteigerung</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ökologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachhaltigkeit</li> </ul>
<p>↪ <a href="#">Stromnetztechnologie</a></p> <p>↪ diskri-freier Netzzugang</p>	<p>↪ <a href="#">Stromnetzkosten</a></p> <p>↪ regulatorische Netzerlöse</p>		

# Stromnetz

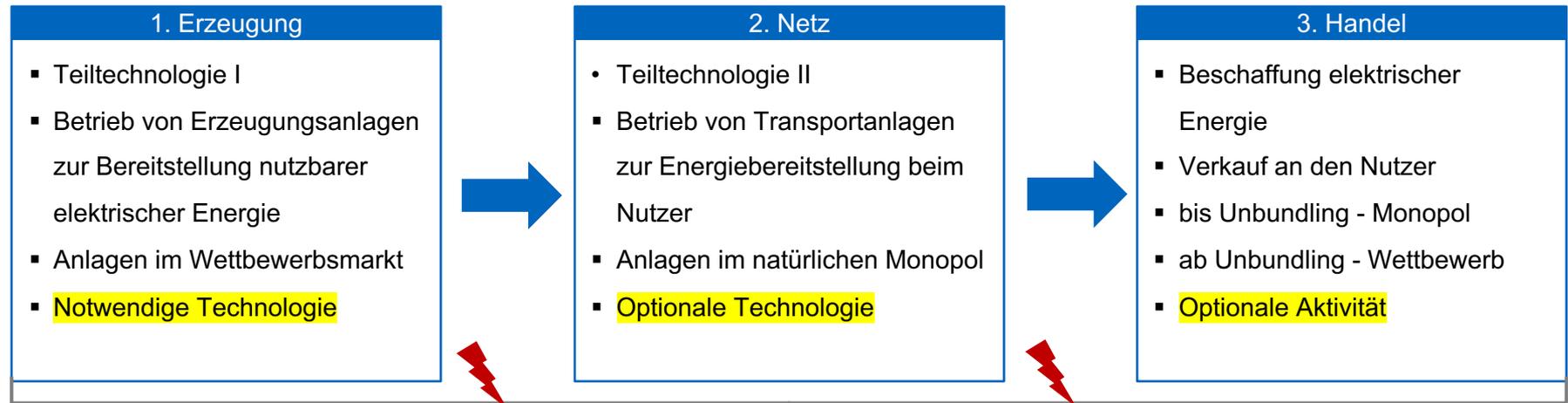
## Regulierungsgegenstand im IST



# Stromnetzzugang

## Wertschöpfungsstufen in der Energiewirtschaft (IST)

Situation **nach** der Entflechtung/Unbundling - alle drei Stufen separiert



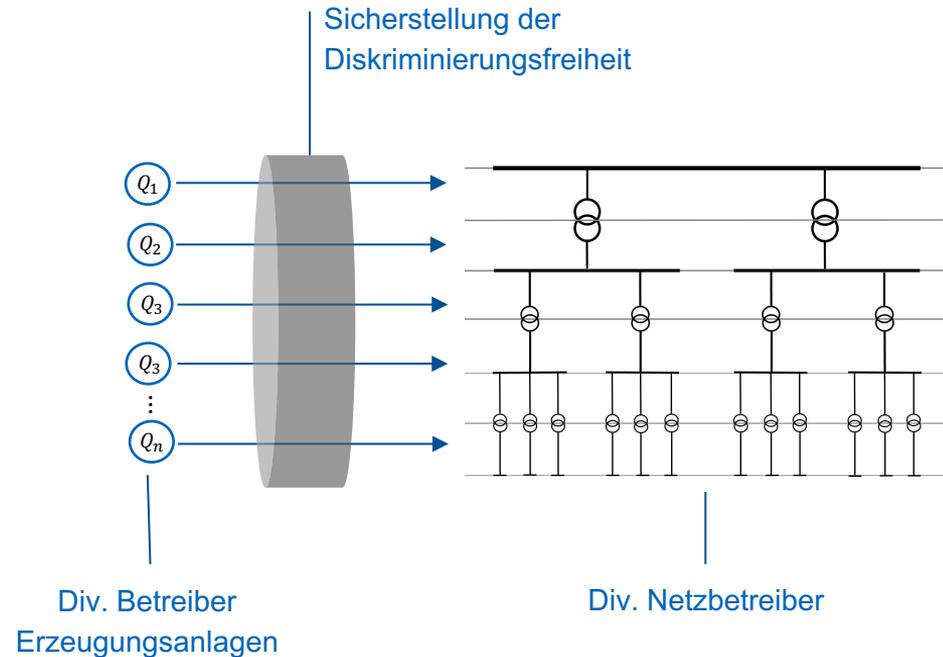
Situation **vor** der Entflechtung/Unbundling - alle drei Stufen in einem Unternehmen gebündelt

[s. Vorlesung 01|2021]

# Stromnetzzugang

## Technischer Sachverhalt

- Netzzugang ist der Netzanschluss von Erzeugungsanlagen  $Q_{\dots}$
  - Netzzugang kann auf jeder Spannungsebene erfolgen
  - Erzeugungsanlagen müssen angeschlossen werden
  - Vorhandene Netzkapazitäten müssen zur Verfügung gestellt werden
  - Nicht vorhandene Netzkapazitäten müssen geschaffen werden
  - Erwartungshaltung an die Netzkapazität
- ↷ Modell - massive Cu-Platte



# Stromnetzzugang

## Regulierungsfrage I –Wie realisiert man einen diskriminierungsfreien Netzzugang ?

### Leitlinien für den Netzbetrieb

- |   |  |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Rechtliche Trennung der Wertschöpfungskette, d.h. jedes Unternehmen kann nur in genau einer Wertschöpfungsstufe aktiv sein</li> <li>2. Die Kosten für den Netzzugang einer Erzeugungsanlage sind vom Netzbetreiber zu minimieren</li> <li>3. Clusterbildung von Erzeugungsanlagen für einen Netzzugang sind möglich</li> <li>4. Priorisierung (im Cluster), z.B. durch ‚Windhund-Prinzip‘</li> <li>5. Zuordnung Rechtsverhältnis Einspeiser-Netzbetreiber durch räumliche Lagen und einspeisende Netzebene</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>6. Schaffung einer nat. geeigneten Rechtsgrundlage zur Umsetzung</li> <li>7. Regulierungsbehörde als Kontrollinstanz zur Umsetzung</li> </ol> <p><b>aber</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>8. Netz-Demarkationen bleiben erhalten<br/>-&gt; <b>Gebietsdemarkierungen</b></li> <li>9. Konzessionsgebiete bleiben erhalten -&gt; <b>deutsches Recht</b></li> <li>10. Netzmonopole bleiben erhalten -&gt; <b>natürliche Monopole</b></li> </ol> <p>~ <b>keine freie Wahl des NB</b>, weder für den Einspeiser noch dem Strom-Kunden</p> |
|---|--|

# Netzkosten

## Volkswirtschaftlicher Ordnungsrahmen – Natürliches Monopol

### Definition – Natürliches Monopol

- „Ein natürliches Monopol liegt dann vor, wenn ein einzelnes Unternehmen den Markt kostengünstiger beliefern kann als mehrere Unternehmen gemeinsam.“
- Ein natürliches Monopol ist durch eine subadditive Kostenfunktion im relevanten Nachfragebereich charakterisiert. Das bedeutet, dass ein einziges Unternehmen ... (s.o.)

### Definition - Subadditive Kostenfunktion (Ein-Produkt-Fall)

- Gesamtmenge  $x_{ges} = x_1 + x_2 + \dots + x_n = \sum_{k=1}^{k=n} x_k$
- Produktionskosten  $K(x_k)$  der Menge  $x_k$
- $K(x_{ges.}) < K(x_1) + K(x_2) + \dots + K(x_n)$

### Irreversibilität der Investitionen

- Wie hoch ist die Irreversibilität der notwendigen Investitionen ?
- ~ geringe Irreversibilität ~ geringer Handlungsbedarf ~ geringe Marktmacht der Teilnehmer
- ~ hohe Irreversibilität / hohe Marktmacht der Teilnehmer / monopolistische Preisbildung / Ineffizienzen ~ hoher regulatorischer Handlungsbedarf ~ **Stromnetze**

### Stromversorgung

- „Bei der Stromversorgung ist ausschließlich die Durchleitung von Strom als natürliches Monopol aufzufassen: Für die Produktion der doppelten Energiemenge ist mehr oder weniger die doppelte Anzahl von Kraftwerken notwendig.“
- ~ **Stromnetze operieren im natürlichen Monopol**

# Netzkosten

## 'Urangst' gegenüber Stromnetzbetreiber

Für die Stromnetze gilt,

1. sie sind in den vorhandenen nationalen elektrischen Energieversorgungen systemrelevant
2. die getätigten Investitionen für Anlagenkomponenten zeichnen sich durch eine hohe Irreversibilität aus, z. B. Leitungssysteme



3. **Netzbetreiber sind natürliche Monopolisten**, d.h. sie können/könnten u.a. ihre Preise monopolistisch festlegen
4. die Nicht-Verfügbarkeit von technischen Anlagen kann zu umfassenden, schnellen und nachhaltigen Schädigungen der Nutzer/ Gesellschaft führen



Für die Elektrizitätsversorgung gilt,

1. sie ist Bestandteil der staatlichen -> **Daseinsvorsorge (D)** -> **Sercive public (CH)**, ... und gilt damit auch für die Stromnetze
2. grundlegend das politisch motivierte -> **Energiewirtschaftliche Dreieck**



~ Was bedeutet das ?

- Es sind drei Variablen  $u, w, v$  einer Funktion, d.h.  $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^?$
- Was ist  $f$  ? ~ Es könnten ggf. Kosten sein ? ~ Wenn ja, wird ein Kostenminimum gesucht? Gibt es obere untere Schranken für die Variablen oder die Funktionswerte ?
- **Gibt es ein Oberziel ? ~ Einführung Regulierung im natürlichen Monopol der Stromnetze ~ Netzkosten ~ Wettbewerb ?**

# Netzkosten

## Natürliches Monopol und Wettbewerb (I)

### Ziel

Finden effizienter Netzbetriebs-Kosten in einem Wettbewerbs-

Prozess

### Randbedingungen

1. Versorgungsaufgabe ist für alle Netzbetreiber (NB) gleich



~ Grundlage EW-Dreieck

~ Anmerkung - Sind das die sachgerechten Netzkosten?

~ Herstellung und Betrieb einer elektrisch-energietechnischen Verbindung –voll oder teilweise – zwischen Erzeugungsanlage und Nutzer, entsprechend der gestellten Nutzeranforderungen

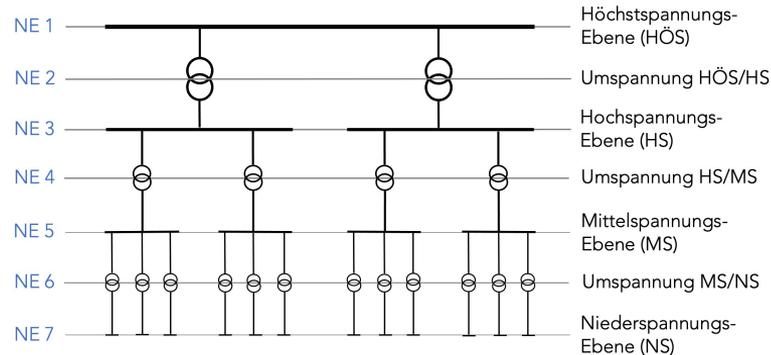


# Netzkosten

## Natürliches Monopol und Wettbewerb (II)

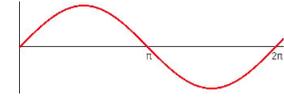
2. Produkt –elektrische Energie- ist für alle Netzbetreiber identisch

3. Kostenfunktionen nach Netzebenen (NE)



[s. Vorlesung 03|2021]

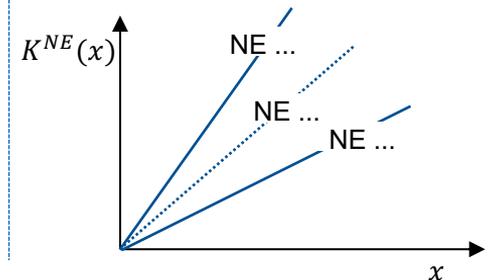
~ EU – Normen  
~ Nat. - Normen



- NE-Struktur ist eine eindeutige regulatorische Struktur
- Technologischen Feinstrukturen in den Spannungsebenen (z.B. MS) entsprechen nicht mehr den heutigen Standards
- Grundlage für die Dimensionierung der Stromnetze ist die zu übertragende elektrische Leistung, also  $\partial_t E(t)$ .

~  $P \sim$  Anlagenvolumen

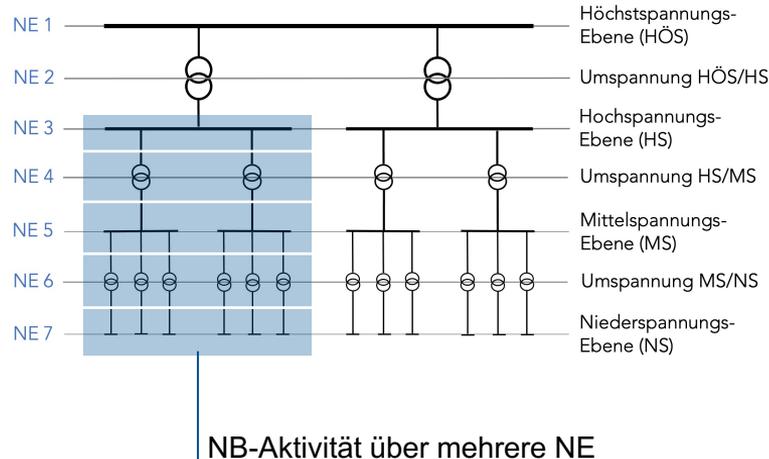
Annahme -  
Kostenfunktion  $K^{NE}(x)$  ist in jeder NE linear abhängig vom Anlagenvolumen  $x$



# Netzkosten

## Natürliches Monopol und Wettbewerb (III)

### 4. Kostenfunktionen nach Netzbetreibern (NB)

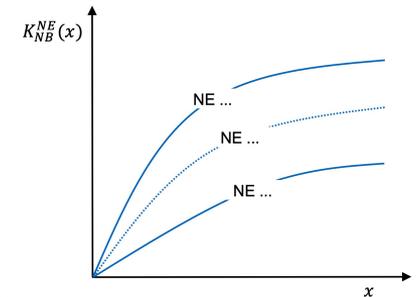


- Die beschriebene technologisch-regulatorische Situation der NE gilt auch für die Betrachtungen zu den NB
- Die sich ergebende nat. NB-Struktur folgt nicht technischen, sondern rein wirtschaftlich-rechtlichen Rahmenbedingungen
- Netzbetreiberaktivitäten können über mehrere NE erfolgen

#### Konsequenzen -

- Jede NE wird regulatorisch separat behandelt
- Auf jeder NE gibt den Effekt der spez. Kosten-Größenvorteile  
[-> s. Anlage A1]

#### NB-Kostenfunktionen



# Netzkosten

## Regulierungsfrage II - Was sind die sachgerechten Kosten für den Netzbetrieb ?

### Randbedingungen für ein Regulierungssystem

1. Es gilt das energiewirtschaftliche Dreieck
2. Der Netzbetrieb erfolgt im natürlichen Monopol
3. Die Versorgungsaufgabe ist für alle Netzbetreiber gleich
4. Das Produkt ist für alle Netzbetreiber identisch
  - ~ absolute Bedingungen
5. Die Kostenfunktionen sind NE-spezifisch
6. Die nat. Netzbetreiberstruktur ist nicht NE-orientiert bestimmt
7. NB agieren geschäftlich nur im Bereich der Netz-Technologie
8. Größenvorteile in einzelnen NE -> **Economies of Scale** bei CAPEX und OPEX

### Anforderungen an ein Regulierungssystem

1. **Ziel** - Finden der **sachgerechten** Netzkosten
  - ~ das ist eine **absolute** Fragestellung, d.h. EURO/Netzteil
2. Sachrechte Kosten-Zuordnung zu Netzbetreibern in einer regulatorisch zufälligen und zeitlich nicht konstanten Struktur
3. Wettbewerb - Finden **effizienter** Netzbetriebs-Kosten
  - ~ das ist, mit den standard-betriebswirtschaftlichen Benchmarking-Methoden, eine **relative** Fragestellung, d.h. EURO-Vergleich zwischen –vergleichbaren- NB
4. Verhindern des Auscashes\* der Netzinfrastruktur
5. Berücksichtigung von Größeneffekten

\* Managementbegriff – Ausstieg eines Investors aus einem Geschäft, ggf. zu Lasten der getätigten Investitionen im Unternehmen

# EU-Energiepolitik

## Energiebinnenmarkt - Stromnetze

*„Zur Harmonisierung und Liberalisierung des Energiebinnenmarktes der EU sind seit 1996 Maßnahmen verabschiedet worden, die ...  
Transparenz und Regulierung, ..., Förderung von Verbundnetzen und Versorgungssicherheit betreffen. Ziel dieser Maßnahmen ist der  
Ausbau eines kundenorientierten, ... und diskriminierungsfreien EU-Strommarktes mit marktorientierten Lieferpreisen.  
Auf diese Weise werden die Rechte einzelner Kunden und Energiegemeinschaften gestärkt und ausgeweitet, ... die Aufgaben und  
Zuständigkeiten von Marktteilnehmern und Regulierungsbehörden werden geklärt, und es wird auf die Sicherheit der Strom-, Gas-, und  
Ölversorgung sowie den Aufbau transeuropäischer Netze für den Transport von Strom und Gas eingegangen.“*

---

Rechtsgrundlage – Artikel 194 und Artikel 114 des Vertrages über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEUV)

Quelle – EP – Kurzdarstellung zur EU - Energiebinnenmarkt

# EU-Energiepolitik

## Stromnetze - Wettbewerb

### EU-Energiepolitik

- ab 1980 - Entwicklung von Wettbewerbsgedanken für die Energieversorgung (Stromversorgung)
- 1996 – 1. BM-Richtlinie (Strom) enthält Grundlagen zur Liberalisierung, d.h. auch zum Wettbewerb
- 2003 – Beschleunigungsrichtlinie enthält Unbundlin-Vorschriften, unabhängige Regulierungsbehörden, ...
- 2009 – 3. BM-Richtlinie enthält Inhalte zur Harmonisierung der Energiemärkte, Stärkung Kundenrechte, Entflechtung ÜNB, ...
- 2009 – Gründung von ACER - Agentur für die Zusammenarbeit der Energieregulierungsbehörden



[siehe auch: EU – WHOISWHO]

### Deutsche Energiepolitik / Deutsches Energierecht

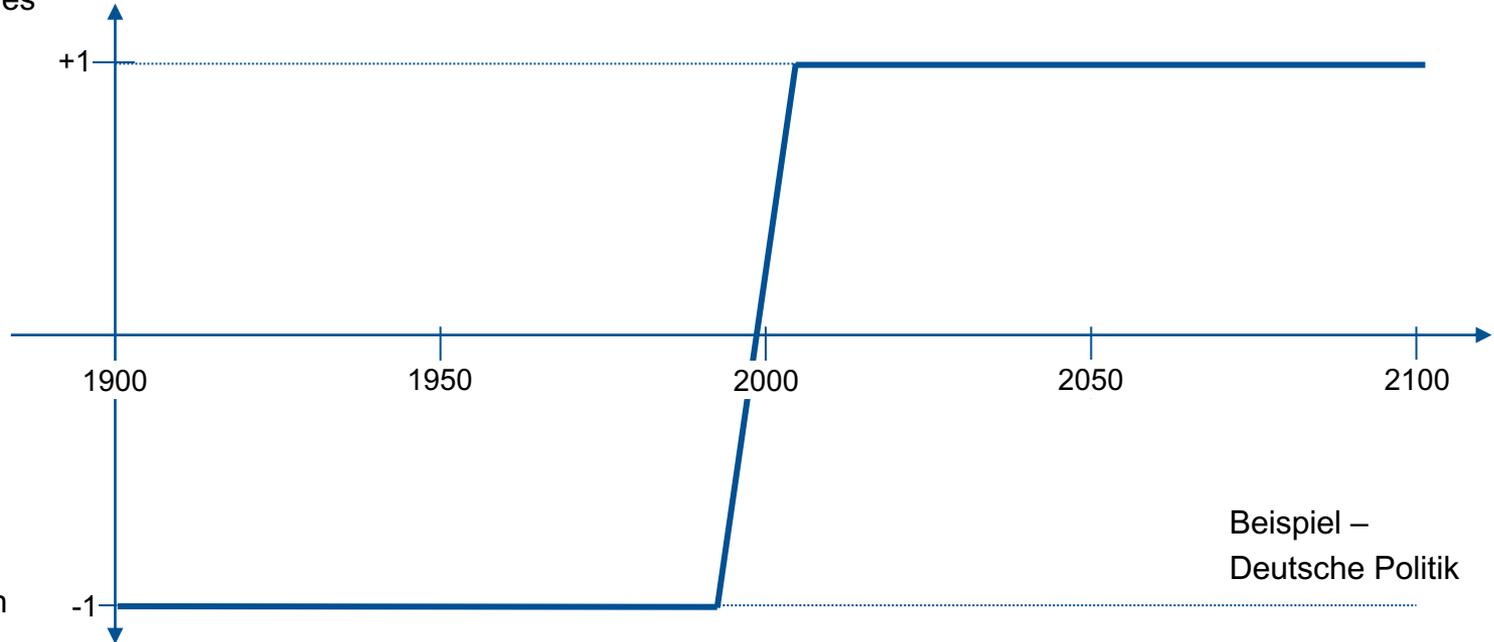
- bis 1998 - ‘... die Gewährleistung einer möglichst sicheren und billigen Energieversorgung. Zu diesem Zweck sollten u.a. die *volkswirtschaftlich schädlichen Auswirkungen des Wettbewerbs* verhindert werden.’
- ab 1998 – ‚Die *Regulierung* der Elektrizitätsversorgungsnetze dient den Zielen der Sicherstellung eines wirksamen und unverfälschten *Wettbewerbs* bei der Versorgung.’

↪ **Regulierung**  $\equiv$  **Wettbewerb** = **Kosteneffizienz** ?

# Grundlagen der Stromnetzregulierung

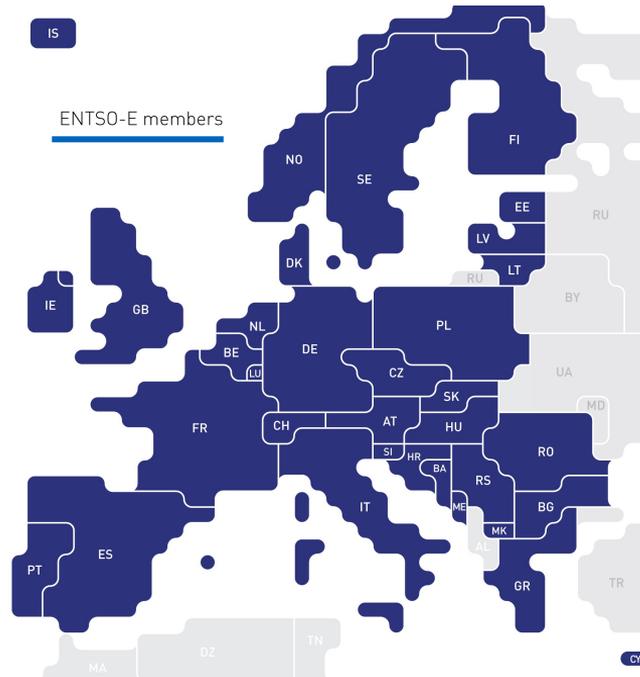
## Politische Entscheidungsgeschwindigkeit zur Thematik – Wettbewerb

Sicherstellung eines  
wirksamen  
unverfälschten  
Wettbewerbes



# Stromnetze in Europa

Betrachtungen zur EU und europäischen nicht EU-Länder (z.B. Norwegen, Schweiz)



Einordnung Netzkosten –  
Worum geht es eigentlich ?

# Stromnetze in Europa – Einordnung Netzkosten

## Auswahl mit Abschätzungen\*

Deutschland	Frankreich	Norwegen	Österreich
Gesamtstromverbrauch <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 500 Mrd. kWh</li> </ul>	Gesamtstromverbrauch <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 450 Mrd. kWh</li> </ul>	Gesamtstromverbrauch <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 120 Mrd. kWh</li> </ul>	Gesamtstromverbrauch <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 60 Mrd. kWh</li> </ul>
Strompreis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\varnothing = 30,34 \text{ ct/kWh}</math></li> </ul>	Strompreis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\varnothing = 18,99 \text{ ct/kWh}</math></li> </ul>	Strompreis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\varnothing = 13,55 \text{ ct/kWh}</math></li> </ul>	Strompreis <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>\varnothing = 21,02 \text{ ct/kWh}</math></li> </ul>
Regulierungsvolumen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ spez. <math>\approx 7,6 \text{ ct/kWh}^{**}</math></li> <li>▪ absolut <math>\approx 38 \text{ Mrd. €}</math></li> </ul>	Regulierungsvolumen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ spez. <math>\approx 4,7 \text{ ct/kWh}^*</math></li> <li>▪ absolut <math>\approx 21 \text{ Mrd. €}</math></li> </ul>	Regulierungsvolumen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ spez. <math>\approx 3,4 \text{ ct/kWh}^*</math></li> <li>▪ absolut <math>\approx 4,1 \text{ Mrd. €}</math></li> </ul>	Regulierungsvolumen <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ spez. <math>\approx 5,3 \text{ ct/kWh}^*</math></li> <li>▪ absolut <math>\approx 3,2 \text{ Mrd. €}</math></li> </ul>
Volkswirtschaftliche Bedeutung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BIP <math>\approx 3449 \text{ Mrd. €}</math></li> <li>▪ Anteil am BIP <math>\approx 1,1\%</math></li> </ul>	Volkswirtschaftliche Bedeutung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BIP <math>\approx 2426 \text{ Mrd. €}</math></li> <li>▪ Anteil am BIP <math>\approx 0,9\%</math></li> </ul>	Volkswirtschaftliche Bedeutung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BIP <math>\approx 362 \text{ Mrd. €}</math></li> <li>▪ Anteil am BIP <math>\approx 1,1\%</math></li> </ul>	Volkswirtschaftliche Bedeutung <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BIP <math>\approx 398 \text{ Mrd. €}</math></li> <li>▪ Anteil am BIP <math>\approx 0,8\%</math></li> </ul>

\*s. Anlage A2

[\*\* Quelle –BNetzA – Pressemitteilung]

# Anlagen

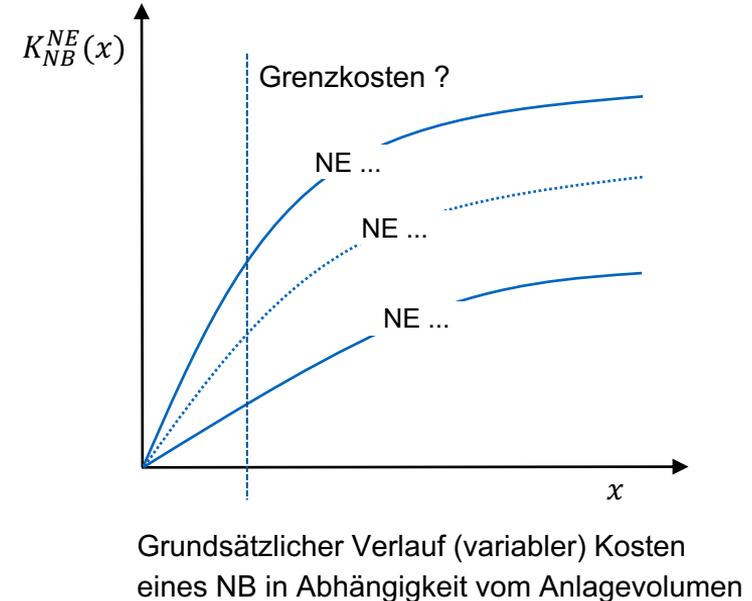
- A1 NB-Kostenfunktion
- A2 Strompreise und Netzerlöse in Europa

# Netzkosten (A1)

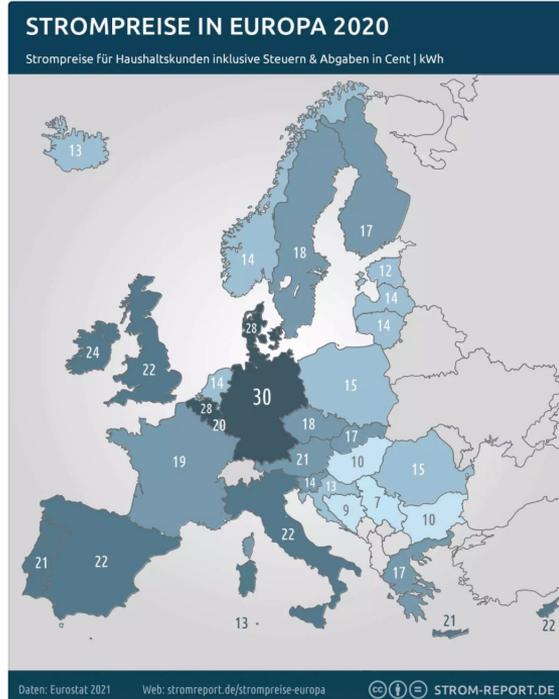
## NB-Kostenfunktion - Erläuterungen

- In den Kosten (TOTEX) für eine NE wirkt der Größenvorteil\* eines NB kostensenkend
- Kostenarten sind Fixkosten (z.B. Immobilien, Maschinen) und variable Kosten (z.B. Rohstoffe, Personal)
- Kostentreiber sind CAPEX (Investitionen) und OPEX (Instandhaltung, Personal)
- Kostenfunktion  $C(x) = C_f(x) + C_v(x)$
- ◊ kurzfristig  $dC(x) = dC_v(x)$
- ◊ langfristig  $dC(x) = dC_f(x) + dC_v(x)$
- Eine Unterscheidung der NB in Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) und Verteilnetzbetreiber (VNB) ist nicht notwendig

\* Economies of Scale := Skalenvorteile, die Kosten mit steigender Produktionsmenge (Unternehmensgröße) reduzieren



# Strompreise in Europa (A2)



Strompreise Europa 2020

Land	Strompreis in Cent kWh
EU	21,27
Belgien	27,92
Bulgarien	9,97
Dänemark	28,33
Deutschland	30,34
Estland	12,36
Finnland	17,40
Frankreich	18,99
Griechenland	16,81
Irland	24,13
Italien	22,26
Kroatien	13,01
Lettland	14,20
Litauen	14,26
Luxemburg	19,86
Malta	12,84
Niederlande	14,27
Norwegen	13,55
Österreich	21,02
Polen	14,75
Portugal	21,20
Rumänien	14,59
Slowakei	16,86
Slowenien	14,48
Spanien	22,39
Schweden	18,26
Tschechien	18,41
Ungarn	10,31
UK	22,03
Zypern	21,33

Quelle: Eurostat Strom in EU | Jan. 2021

## Thema - Abschätzung nat. Netzerlöse

### Annahmen

1. Nat. Netzerlöse  $\equiv$  nat. Regulierungsvolumen
2. Netzerlöse haben den Wert  $= \frac{1}{4}$  des Strompreises aus der anliegenden Tabelle

### Beispielrechnung – Nation = Deutschland

- spez. Netzerlös  $= \frac{1}{4} \cdot 30,4 \approx 7,5 \text{ ct/kWh}$
- Gesamtstromverbrauch  $\approx 500 \text{ Mrd. kWh}$
- $\sim$  nat. Netzerlöse  $\approx 35 \text{ Mrd. €}$
- BIP (2018)  $\approx 3.400 \text{ Mrd. €}$
- $\sim$  Anteil Netzerlöse  $\approx 1\%$

Infografik "Karte: Strompreise in Europa 2020" von STROM-REPORT.de

Quelle – STROM-REPORT

**WEMAG**

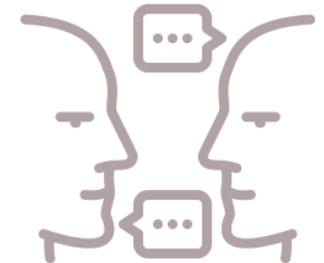
## **WEMAG-Speichersysteme**

Elektrische Energiespeicher im Verteilnetz

- Über die WEMAG
- Der Verteilnetzbetreiber 2.0
- Grundlagen Batteriespeicher
- Speichersysteme der WEMAG
- Das Projekt Kickstarter
- Wettbewerbliches Umfeld
- Sektorkopplung vs. Speicher



Mit anschließender  
Diskussionsrunde.



***WEMAG***

**Über die WEMAG**

**337 Mio. € Gesamtumsatz\***  
**15.856 km Stromnetz**  
**~45 Mio. €/a Investitionen in das Stromnetz**  
**~123 Mio. €/a Investitionen in Glasfasernetze**

## WEMAG Netzgebiet

Kundencenter  
 Netzdienststellen

Stand 2020

**161.100 Netzkunden**   
**786 Mitarbeiter**   
**609 GWh Stromabsatz**   
**1.984 GWh Gasabsatz**   
**186,8 GWh Ökostrom**

\* ohne Energiesteuern, sonstige Handelsaktivitäten und EEG-Weiterverkauf, inklusive Erlöse aus Netznutzung<sup>1</sup>

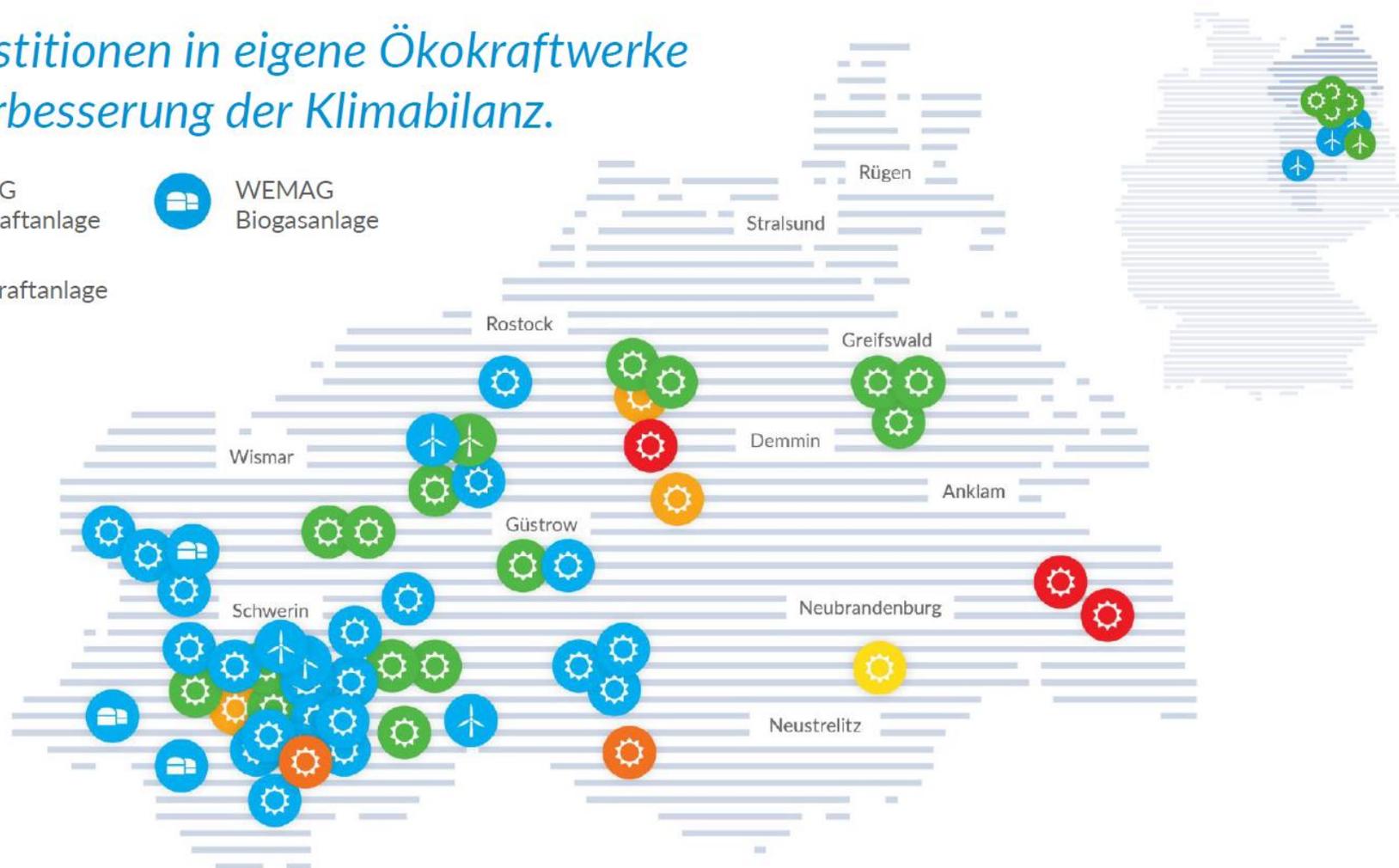
# Wo befindet sich das Netzgebiet der WEMAG und wo stehen unsere Erzeugungsanlagen?

Wir leisten mit den Investitionen in eigene Ökokraftwerke einen Beitrag zur Verbesserung der Klimabilanz.

-  WEMAG Photovoltaikanlage
-  \* NEG Photovoltaikanlage
-  \* SEG Photovoltaikanlage
-  \* Energiepark Linstow GmbH Photovoltaikanlage
-  \* Kirchliches EnergieWerk Photovoltaikanlage
-  \* E&M Photovoltaikanlage
-  WEMAG Windkraftanlage
-  \* NEG Windkraftanlage
-  WEMAG Biogasanlage

## Jahresstromerzeugung aller Anlagen in 2020

Photovoltaik	35.043.654 kWh
Windkraft	140.418.453 kWh
Biogas	11.379.920 kWh
<b>gesamt</b>	<b>186.842.027 kWh</b>



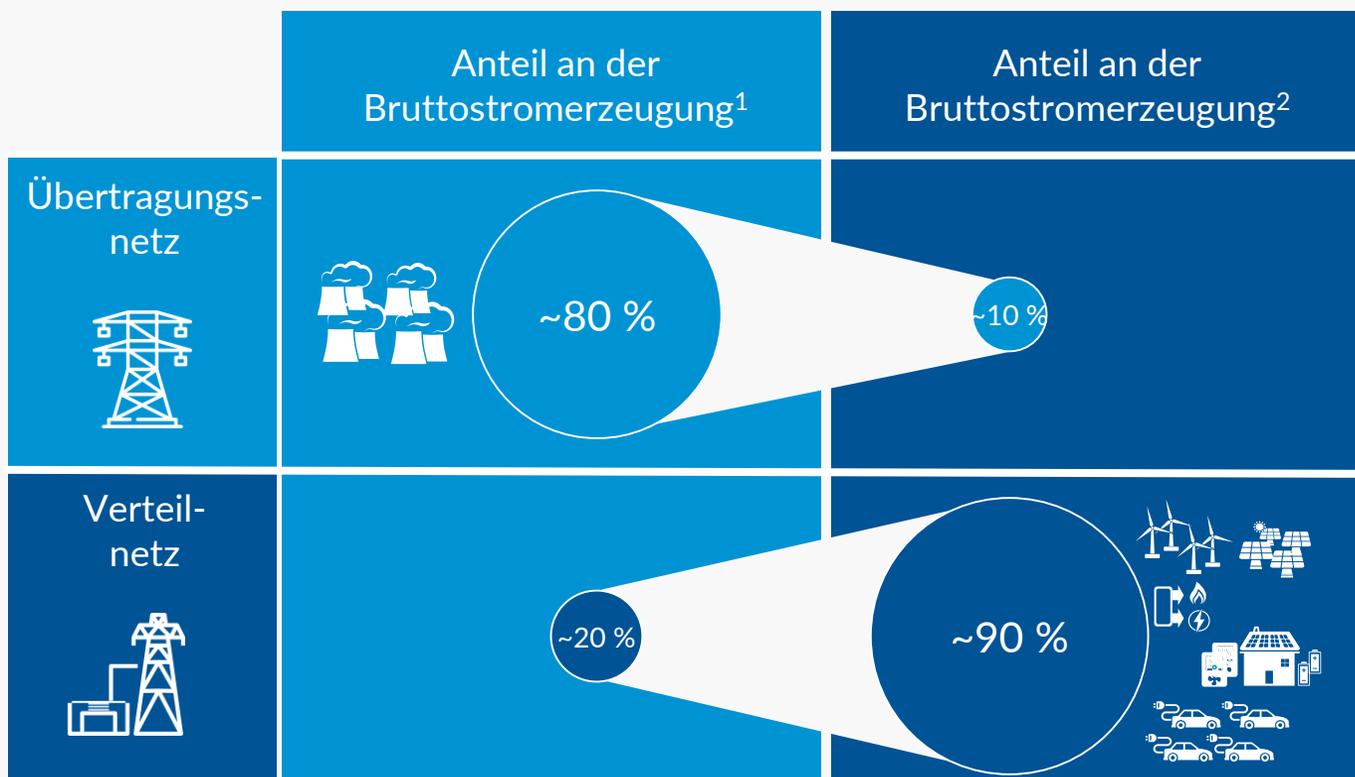
\* Bei diesen Anlagen: technische und kaufmännische Betriebsprüfung durch die WEMAG

***WEMAG***

**Der Verteilnetzbetreiber 2.0**

## Alte Welt

## Neue Welt



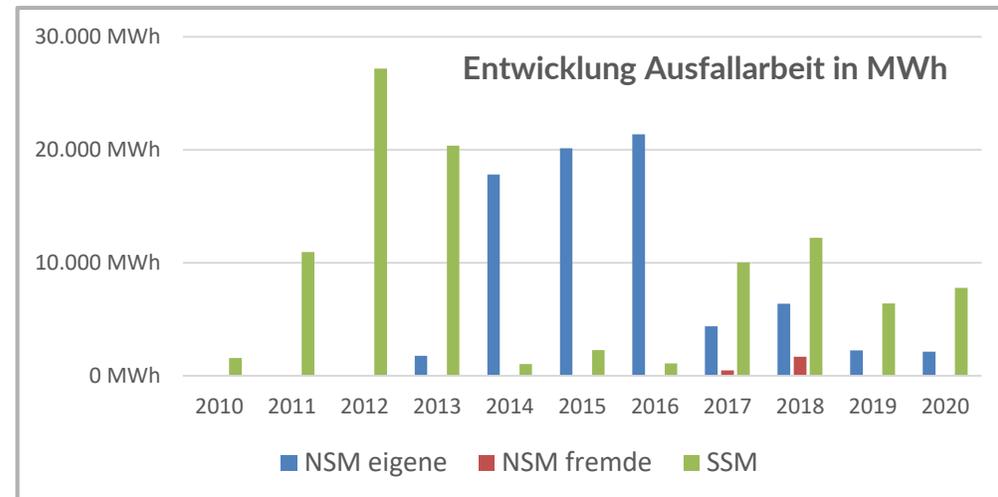
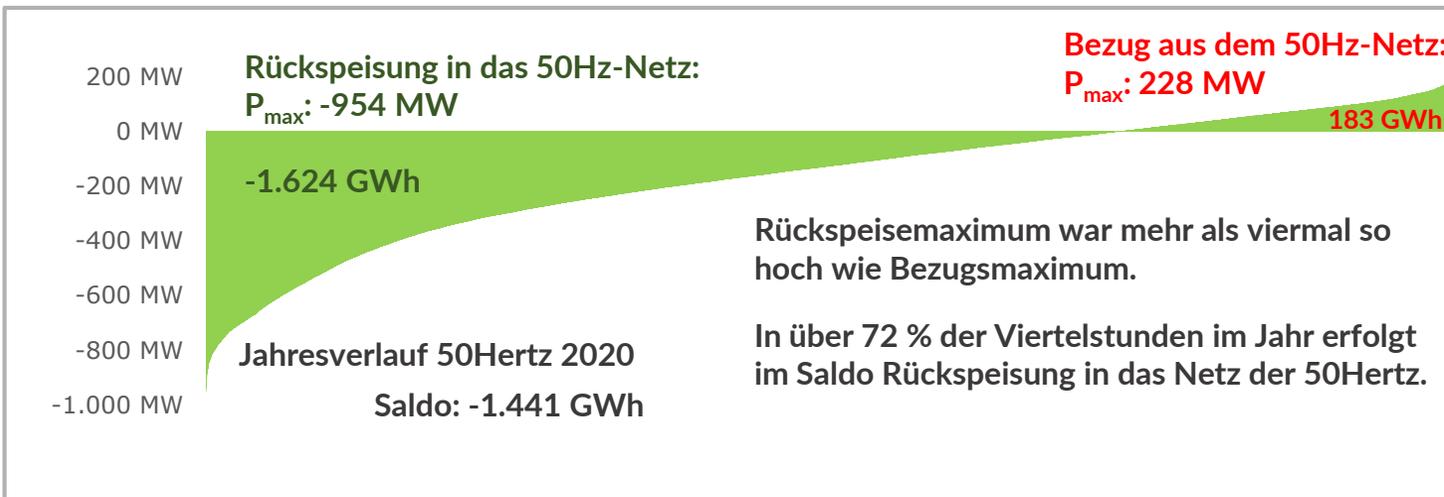
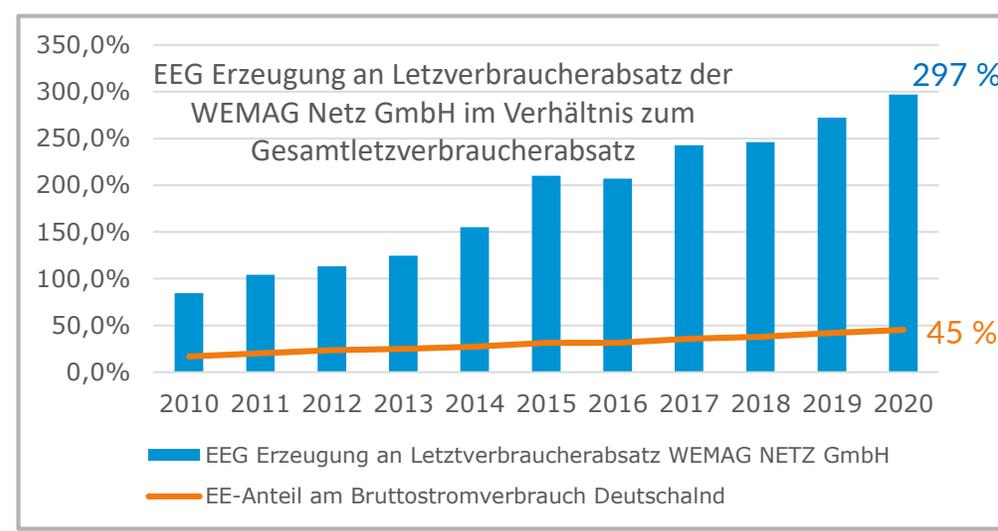
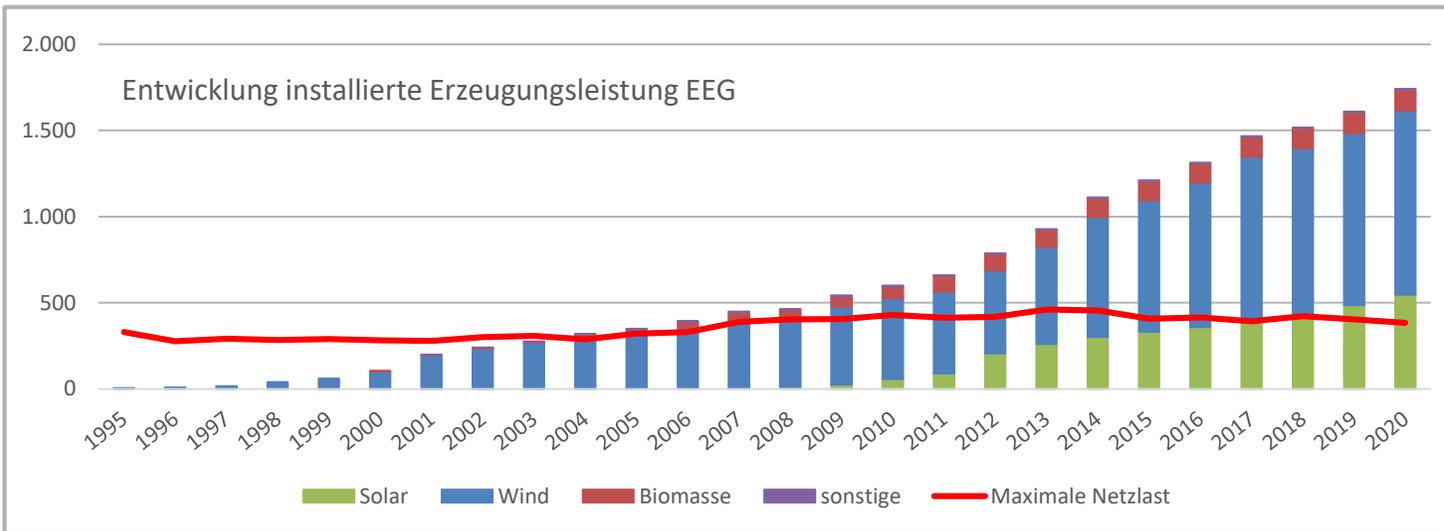
1 Strommix Deutschland 2008 (statista) – 20 % im Verteilnetz setzen sich aus EE und sonstigen Energieträgern zusammen

2 Abschätzung auf Basis d. Zahlen d. Studie „Energiesystem Deutschland 2050“ vom Fraunhofer ISE, ca. 80 % aus fluktuierende EE, ca. 7 % aus kleinen - mittleren KWK-Anlagen und ca. 3 % aus Wasserkraft

- In Zukunft wird **90 % der Energie** dezentral am Verteilnetz erzeugt
- **Großkraftwerke** werden **verdrängt**
- Kundenverhalten verändert sich: die **Anzahl von Verbrauchern mit hohen Lastspitzen** nimmt rapide zu
- **Übertragungsnetzbetreiber** werden ihrer **Systemverantwortung**, ohne das Zutun der Verteilnetzbetreiber nicht mehr nachkommen können

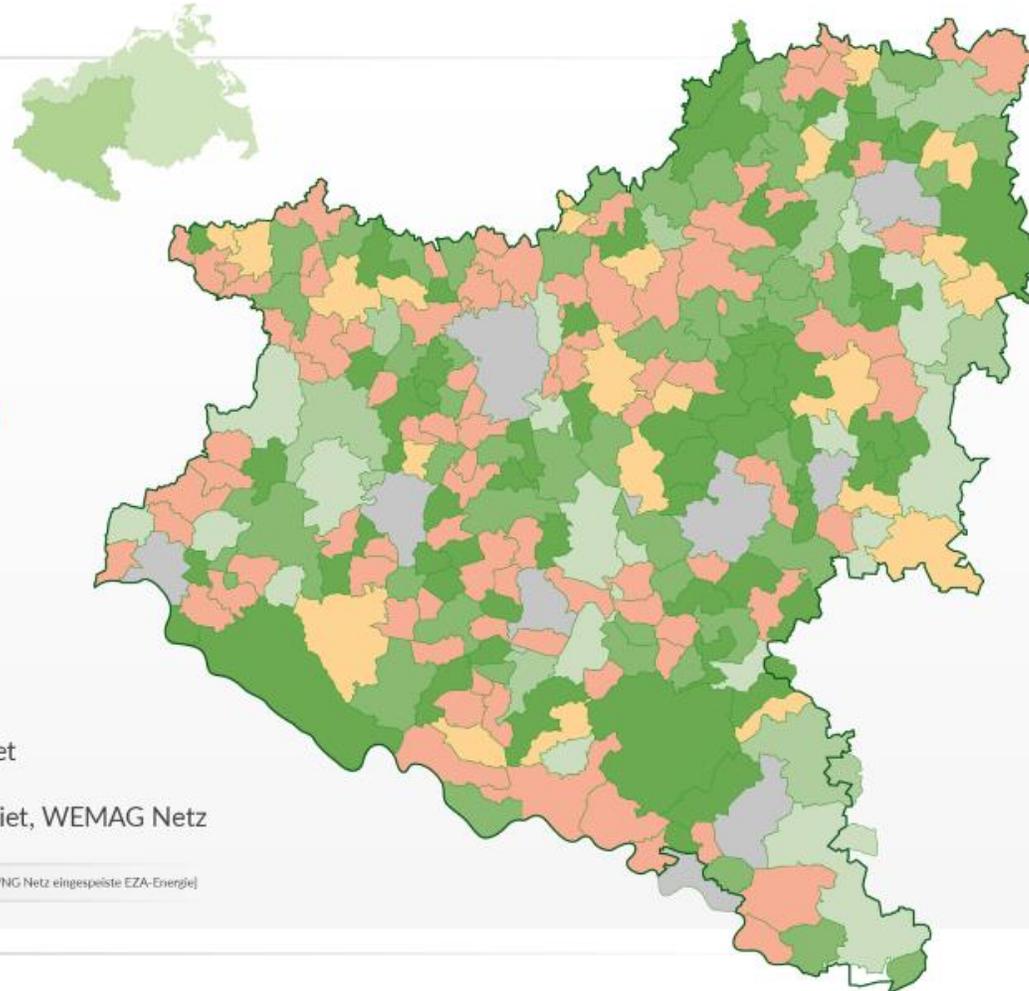
In Zukunft wird der Beitrag zur Systemverantwortung aus den Verteilnetzen immer größer.

# Erzeugung und Verbrauch im Netz der WEMAG



## Ökobilanz im Versorgungsgebiet der WEMAG Netz GmbH

Verhältnis zwischen Letztverbrauch und Einspeisung erneuerbarer Energien auf Gemeindeebene



## Mehr als 100 % erneuerbare Energie

Im Stromnetz der WEMAG Netz GmbH inklusive Stadtwerksgebiete könnten schon seit 2015 alle Kunden mit dort eingespeister regenerativer Energie versorgt werden, wenn der Verbrauch und die Erzeugung zeitgleich stattfinden würden oder die Energie gespeichert werden könnte.

## Der Verteilnetzbetreiber 2.0

Redispatch im  
Verteilnetz

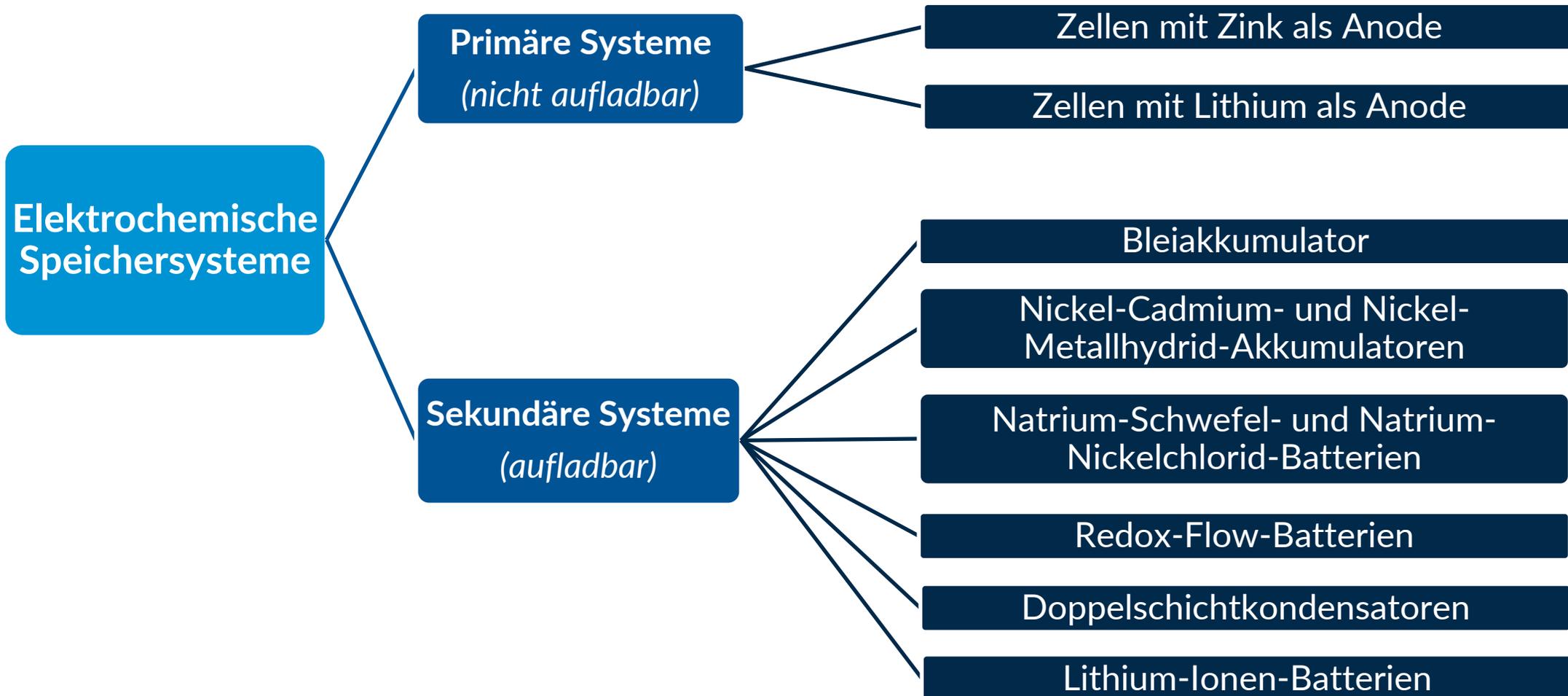
Digitalisierung  
bis ins Nieder-  
spannungsnetz

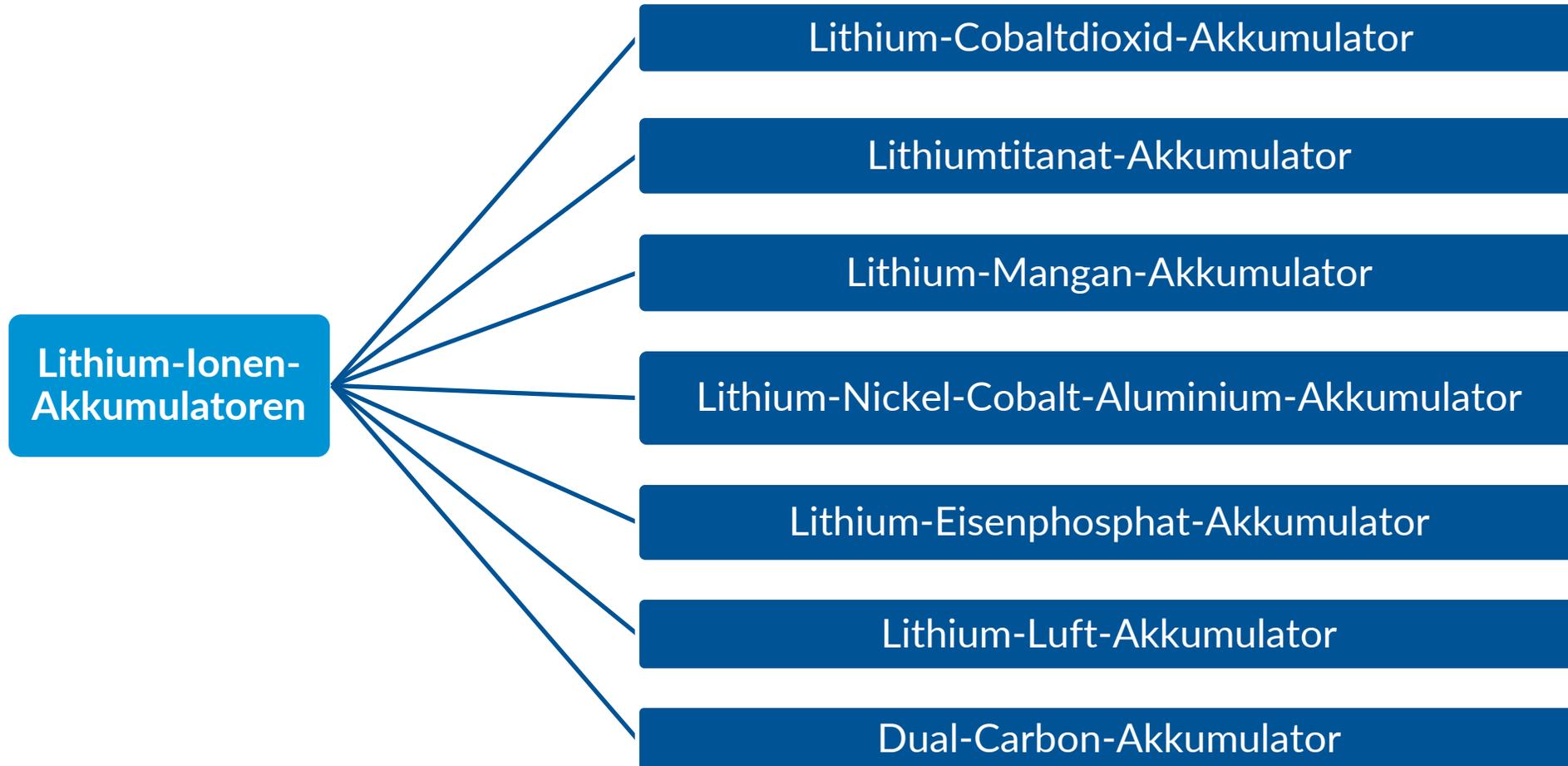
Elektromobilität  
und  
Sektorkopplung

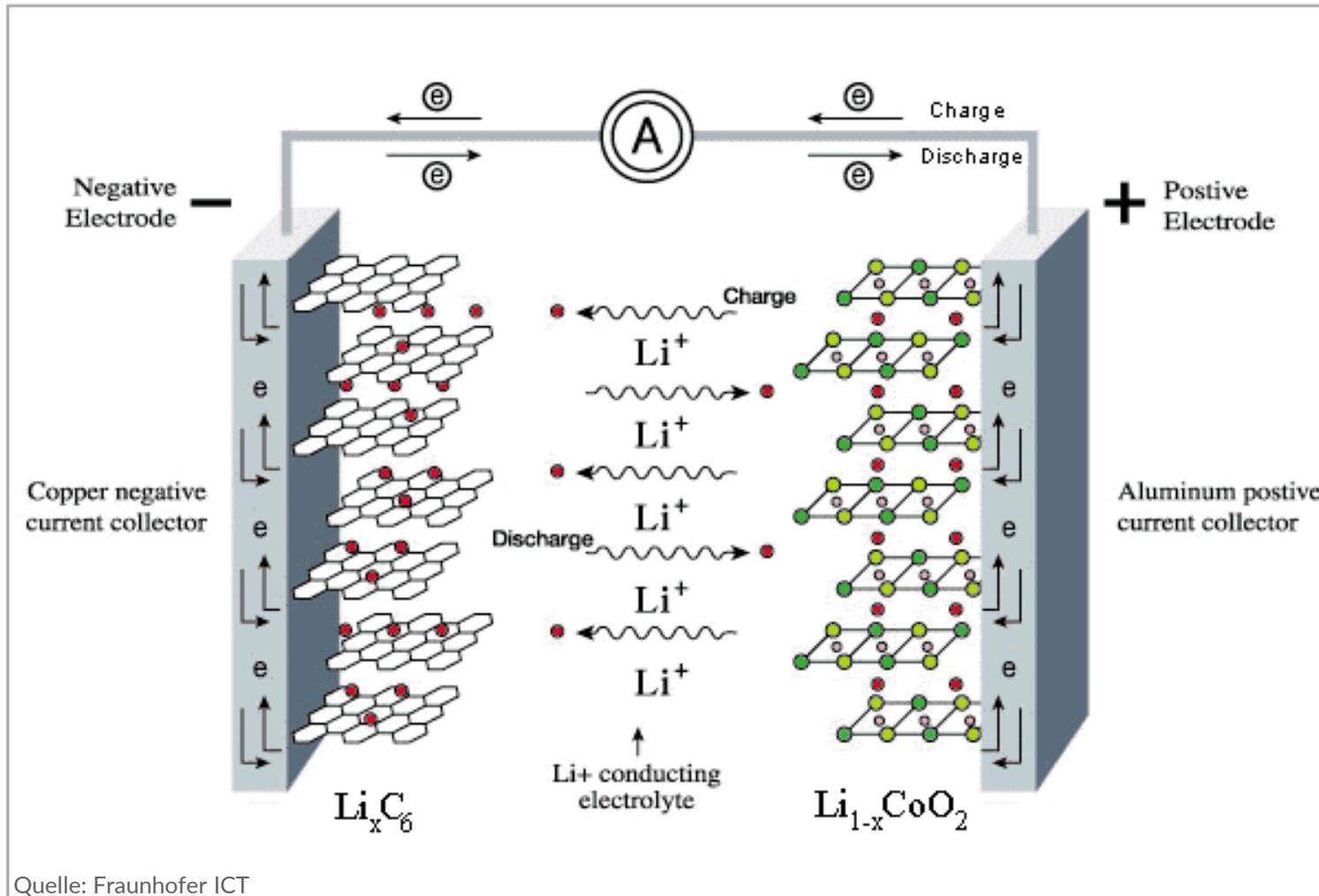
Netzausbau und  
Flexibilisierung

***WEMAG***

# Grundlagen Batteriespeicher







## Vereinfachte Elektrochemische Reaktionsgleichung

← laden

→ entladen

Negative Elektrode:

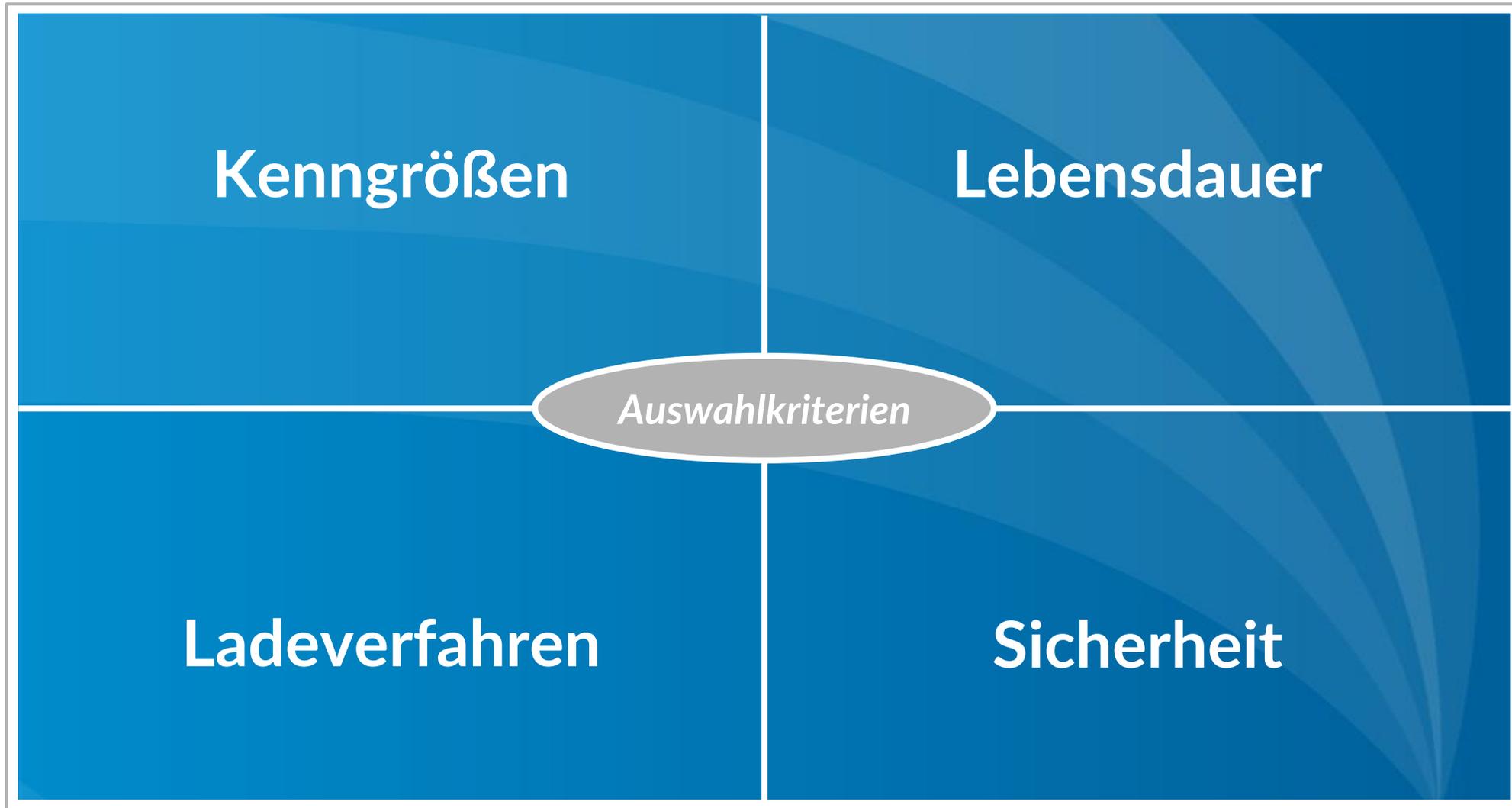


Positive Elektrode:



Summe:





## Kenngößen

- Die wichtigsten Kenngößen für Batterien sind ihre Kapazität, Wirkungsgrad, elektr. Energie und elektr. Leistung
- **Kapazität [Ah]:** Menge der elektr. Ladung die unter spezifischen Entladebedingungen von Leistungsquelle geliefert wird
- **Leistung [W]:** Produkt aus Strom und Spannung
- **Energie [Wh]:** Produkt aus Kapazität und mittlerer Entladespannung
- **Spezifische Energie [Wh/kg] bzw. [Wh/l]:** Energie nach Masse bzw. Energie nach Volumen
- **Wirkungsgrad [%]:** Entladeenergie dividiert durch eingesetzte Ladeenergie (bei LI-Batterien meist größer 95 %)

## Lebensdauer

- Batteriesysteme altern durch chemische Reaktionen sowie mechanische Belastung und verlieren an Kapazität und Leistung
- in LI-Batterien gibt es drei Alterungseffekte
- **Aufbau von Deckschichten auf SEI:** Ablagerung auf Solid Electrolyte Interface der negativen Elektrode durch chemische Reaktionen  
→ Bindung von Lithium-Ionen ( $C\downarrow$ ) und Anstieg des Stofftransportwiderstandes ( $P\uparrow$ )
- **Mechanische Belastung:** bei Einlagerung von Lithium-Ionen in Aktivmaterialien entstehen mech. Spannungen die zum Auseinanderbrechen der Partikel der Aktivmaterialien führen können und so die elektr. Leitpfade unterbrechen ( $P\uparrow$ )

## Ladeverfahren

- Li-Batterien werden i.d.R. mit CC-CV (constant current–constant voltage) Verfahren geladen
- zunächst Ladung mit konstanten Strom bis zu bestimmter max. Spannungsgrenze
- danach weiter Laden mit konstanter Spannung bei abnehmender Stromstärke
- Ladeprozess wird entweder nach definierter Zeit oder Erreichen einer bestimmten Stromgrenze beendet
- Li-Batterien können bis zu bestimmter Spannung geladen werden, wird diese überschritten kommt es zu Zerfallsreaktionen
- zu hohe Ladeströme können thermische Schäden verursachen

## Sicherheit

- Unterteilung der Sicherheitsbewertung nach chemischer, elektrischer, mechanischer und funktionaler Sicherheit
- Chemische Sicherheit: durch Auslegung der Batteriezellen
- Elektrische Sicherheit: durch Isolierung der Kabel und Komponenten
- Mechanische Sicherheit: durch Konstruktion, z.B. Crash-Box oder Entgasung
- Funktionale Sicherheit: durch Aktuatoren, Sensorüberwachung und Steuergeräte (BMS)

***WEMAG***

**Speichersysteme der WEMAG**



## Eckdaten zum Batteriespeicherkraftwerk

### Batteriespeicher Schwerin

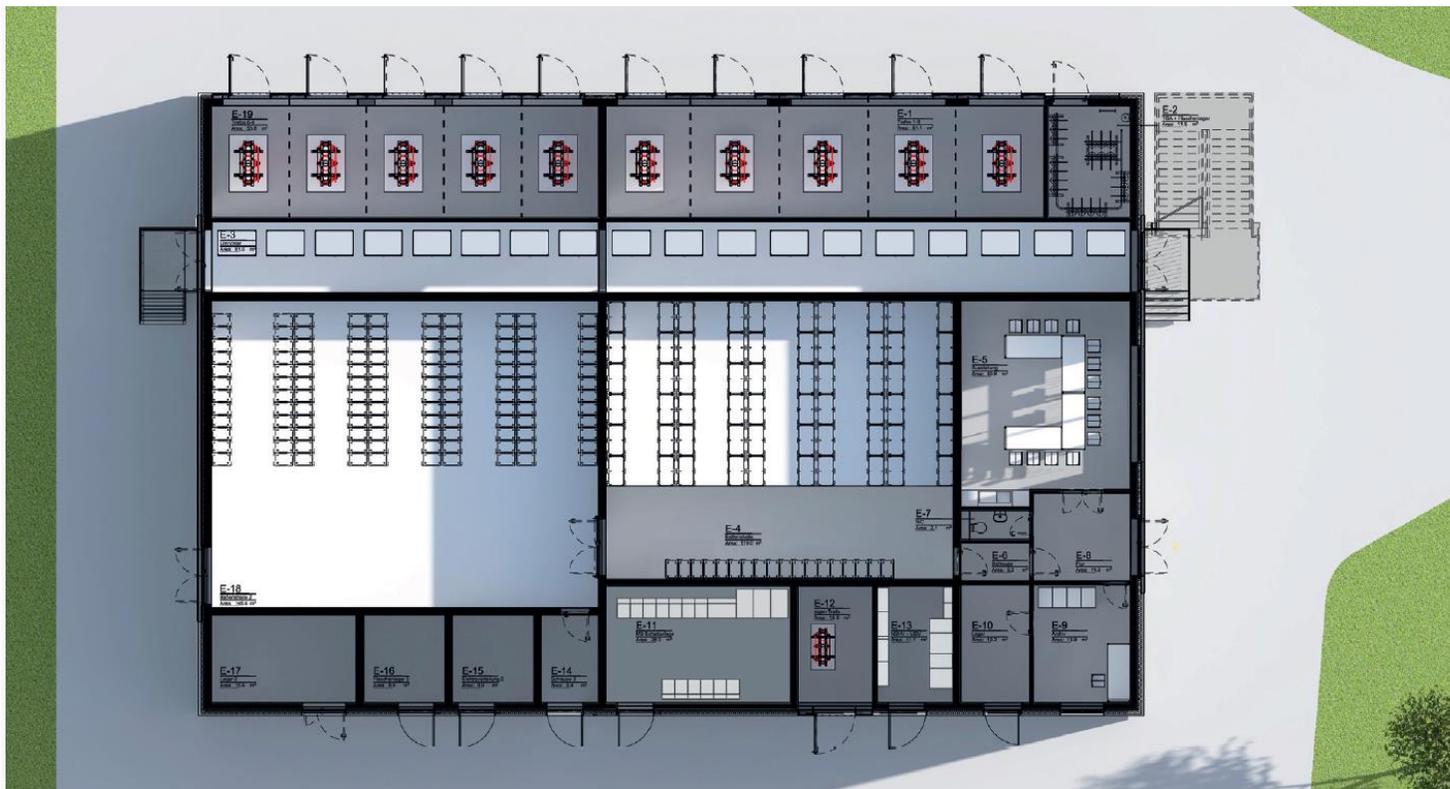
- ✓ Leistung: von 7,3 MW auf 13,7 MW
- ✓ Kapazität: von 5,4 MWh auf 15 MWh
- ✓ Anwendung: PrimärRegelleistung (PRL), Netzwiederaufbau
- ✓ Gewinner des „GreenTec Award“ 2014

### WEMAG Batterie Station (WBS)

- ✓ Leistung: von 250 kW auf 2.000 kW
- ✓ Kapazität: von 250 kWh auf 2.000 kWh
- ✓ Anwendung: PRL, PeakShaving, LadeBooster, Blindeistung, ...
- ✓ Gewinner des „Green Renewable Award“ 2019
- ✓ Auszeichnung mit „Grüner Strom Label“



# Faktenblatt Batteriespeicherkraftwerk Schwerin



SN 2: Erweiterung 2017    SN 1: Errichtung 2014

Installierte Leistung:	14 MW
Präqualifizierte Leistung:	10 MW
Kapazität:	15 MWh
Gebäude:	716 m <sup>2</sup>
Anzahl Akkus SN 1:	30.212
Anzahl Akkus SN 2:	23.232
Wechselrichter SN 1:	10 Stück
Wechselrichter SN 2:	8 Stück
Trafos SN 1:	5 Stück / 1600 kVA
Trafos SN 2:	4 Stück / 1600 kVA
Trafos Eigenstrom:	1 Stück



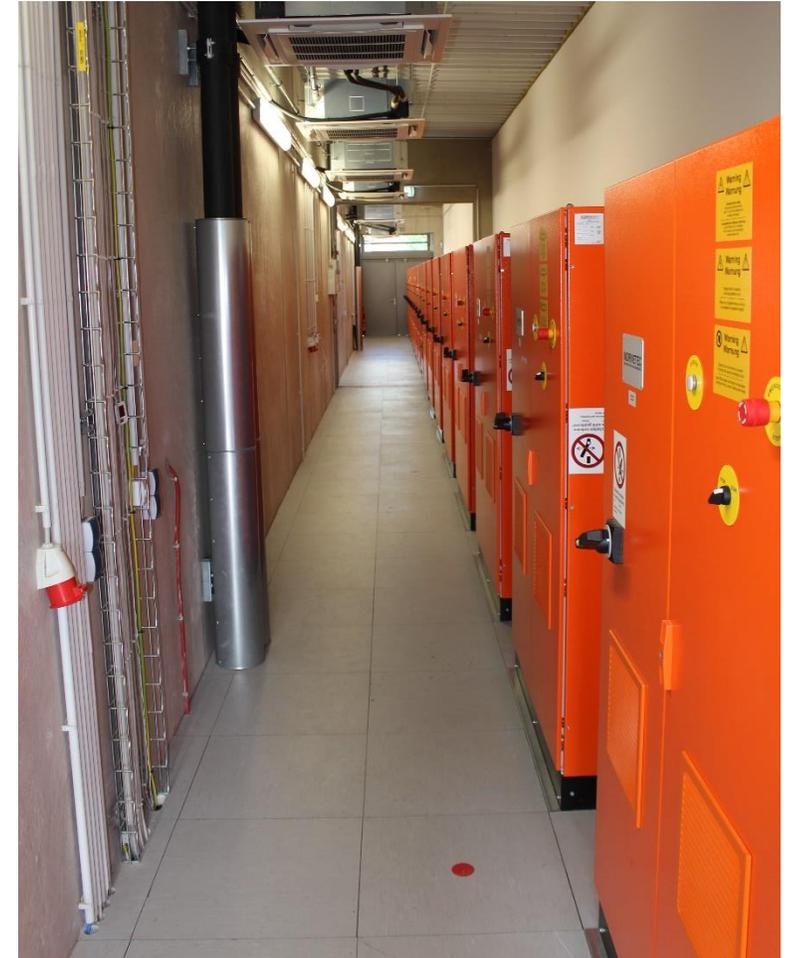
9 x 1600 kVA Transformatoren



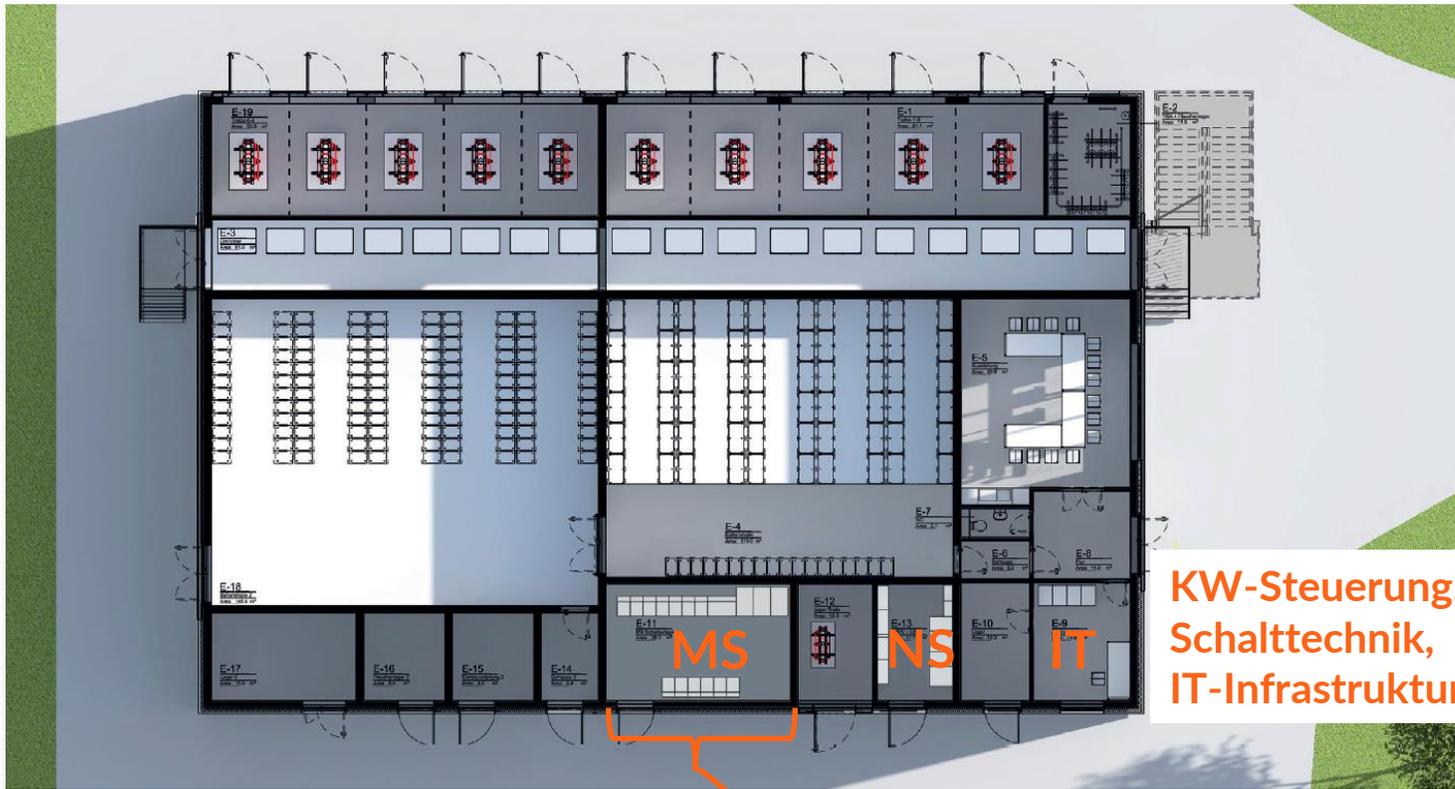
# Wechselrichter Batteriespeicherkraftwerk Schwerin



18 x Wechselrichter



# Schaltanlagen Batteriespeicherkraftwerk Schwerin

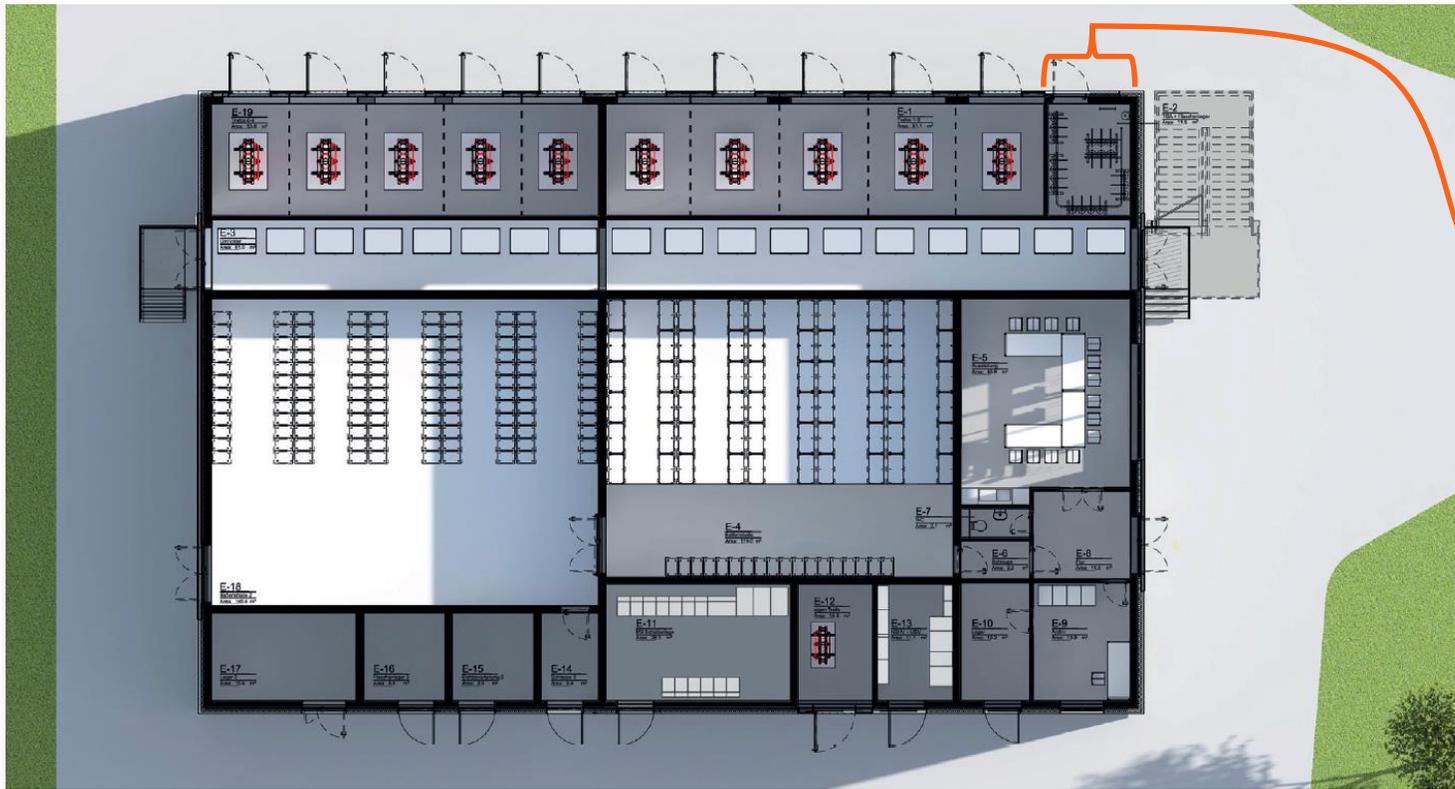


KW-Steuerung,  
Schalttechnik,  
IT-Infrastruktur

MS / NS Schaltraum



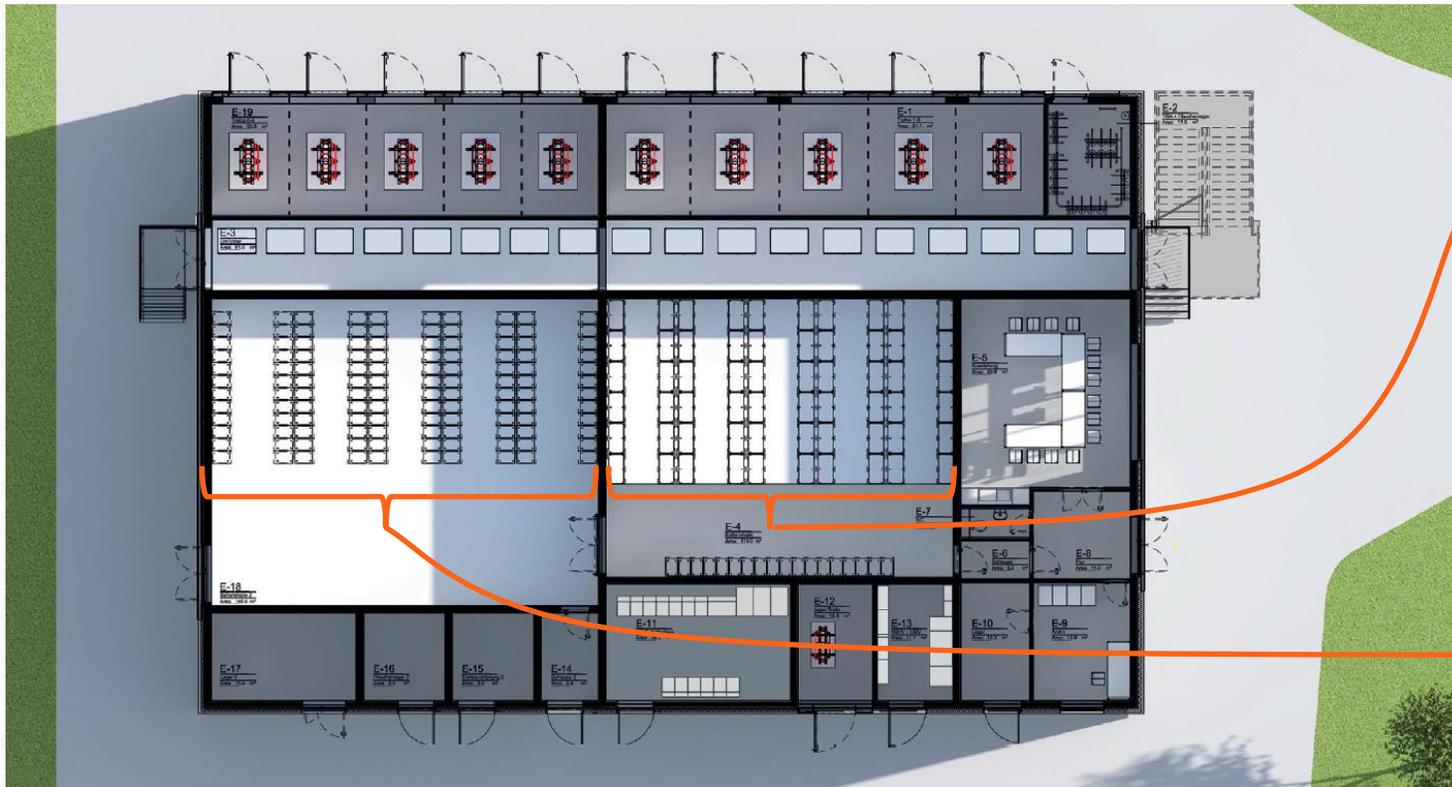
# CO<sub>2</sub>-Löschsystem Batteriespeicherkraftwerk Schwerin



CO<sub>2</sub>-Löschsystem



# Batteriezellen Batteriespeicherkraftwerk Schwerin



SN 2: 23.232 x Samsung SDI  
Lithium-Manganoxid-Akkus  
20 Jahre Garantie bei 80 % Restkapazität

SN 1: 30.212 x Samsung SDI  
Lithium-Manganoxid-Akkus  
20 Jahre Garantie bei 80 % Restkapazität

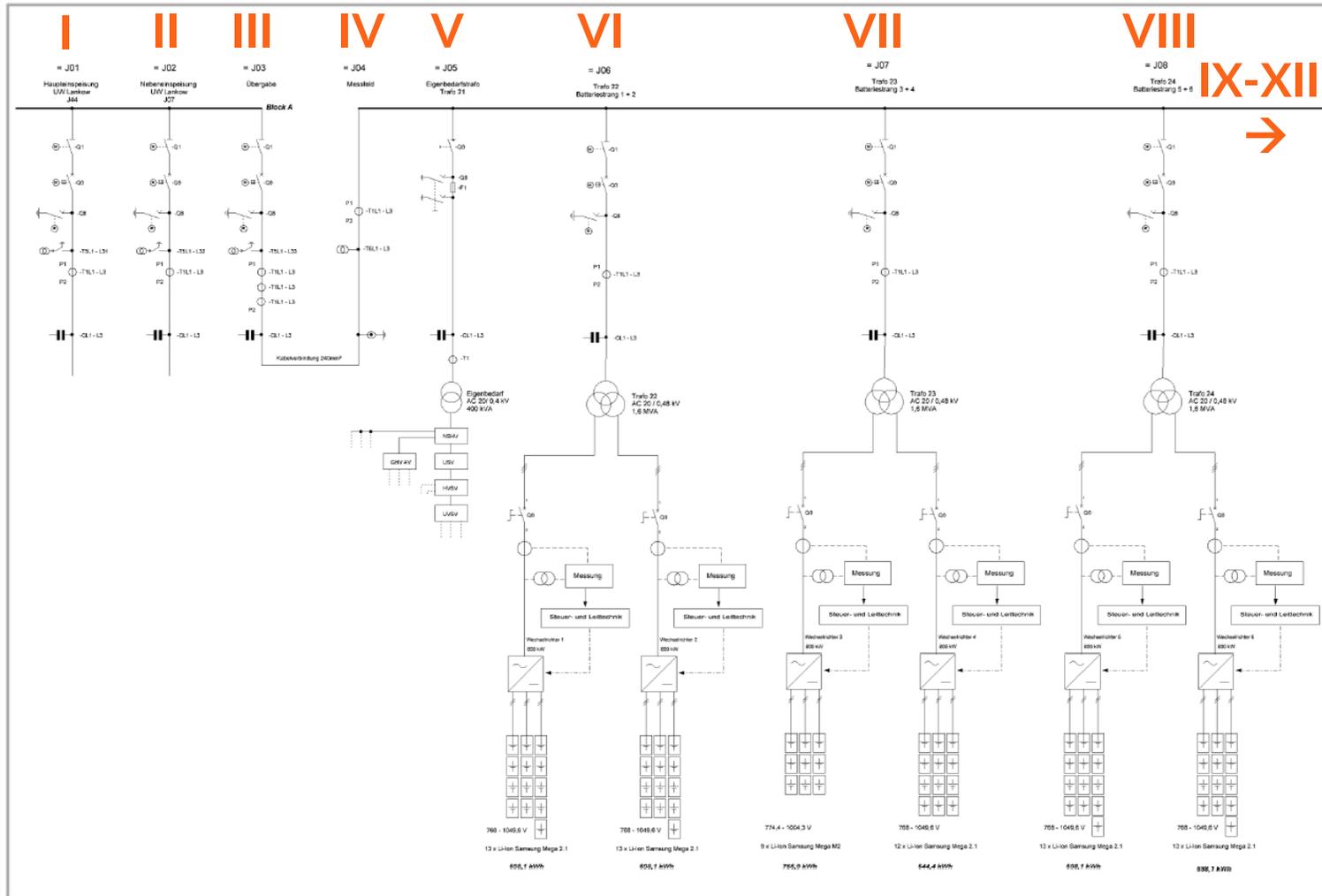




## Samsung SDI M2F

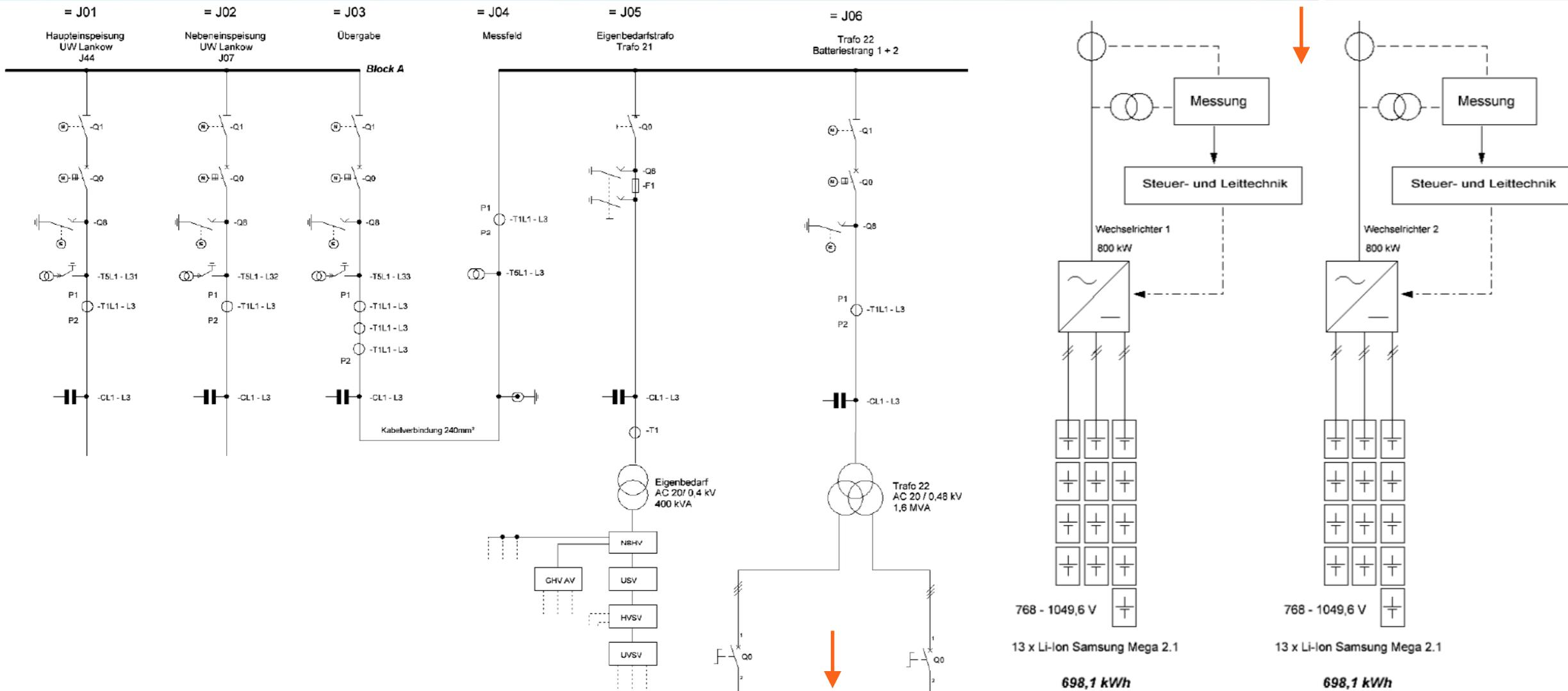
- Zelltyp: LMO 60 Ah
- System: Constant Power (ent-)laden
- Maximale Stromstärke: 90 A
- DC Spannung: 768 ~ 1054,7 V
- Nennleistung: 50 kW
- Ladetemperatur:  $23 \pm 5$  °C
- Arbeitstemperatur: 0 ~ 40 °C
- Luftfeuchtigkeit: 0 ~ 85 %
- Lagertemperatur: -20 ~ 60 °C

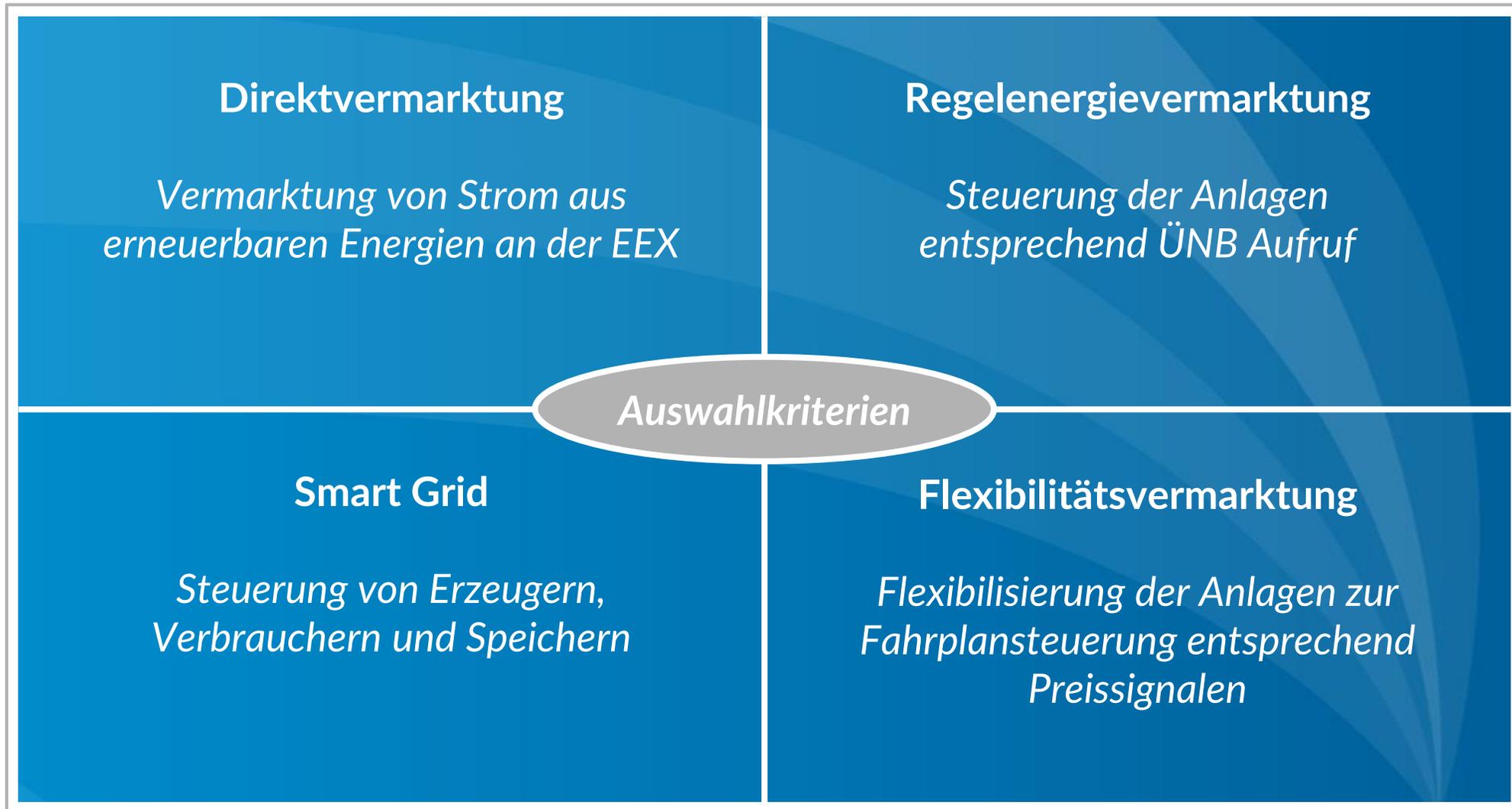
# Schaltplan Batteriespeicherkraftwerk Schwerin



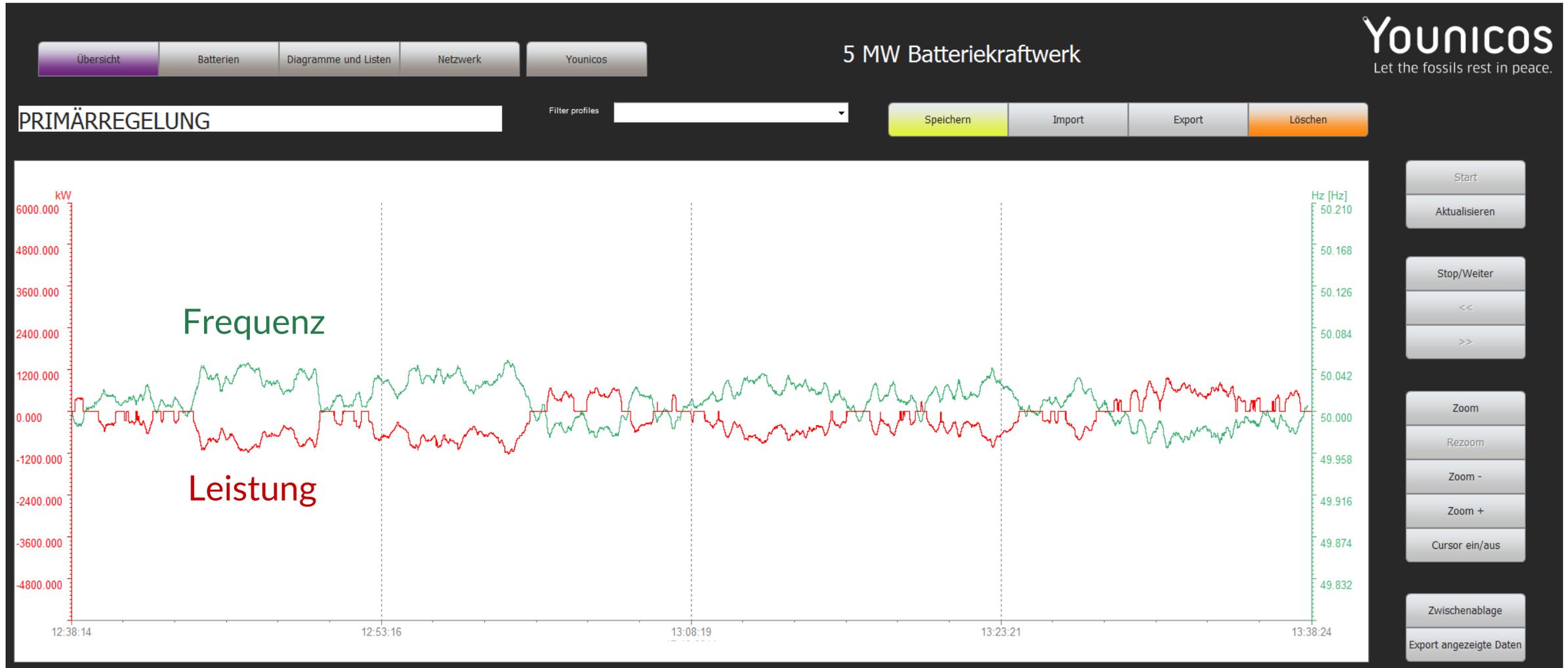
- I. Hauptversorgung UW Lankow
- II. Nebeneinspeisung UW Lankow
- III. Übergabe
- IV. Messfeld
- V. Eigenbedarfstrafo
- VI. Batteriebank 1+2 (SN1)
- VII. Batteriebank 3+4 (SN1)
- VIII. Batteriebank 5+6 (SN1)
- IX. Batteriebank 7-10 (SN1)
- X. Längskupplung
- XI. Hochführung
- XII. Batteriebank 11-18 (SN2)
- XIII. Reserve

# Zoom Schaltplan Batteriespeicherkraftwerk Schwerin





# 24 / 7 autonome Bereitstellung von Primärregelenergie



Überwachung SN1 (getrennte Systeme SN1 und SN2, da unterschiedliche Batteriegenerationen)

# Marktteilnahme und Betriebszeiten

Zuschlag / Normalbetrieb PRL	Gebotspreis zu hoch, Ersatzwartung
Teilzuschlag	planmäßige Wartung
kein Zuschlag	Systemfehler

1 = 100 % (24 h-Produkt)  
 6/6 = 6 von 6 Geboten  
 5/6 = 5 von 6 Geboten  
 usw.

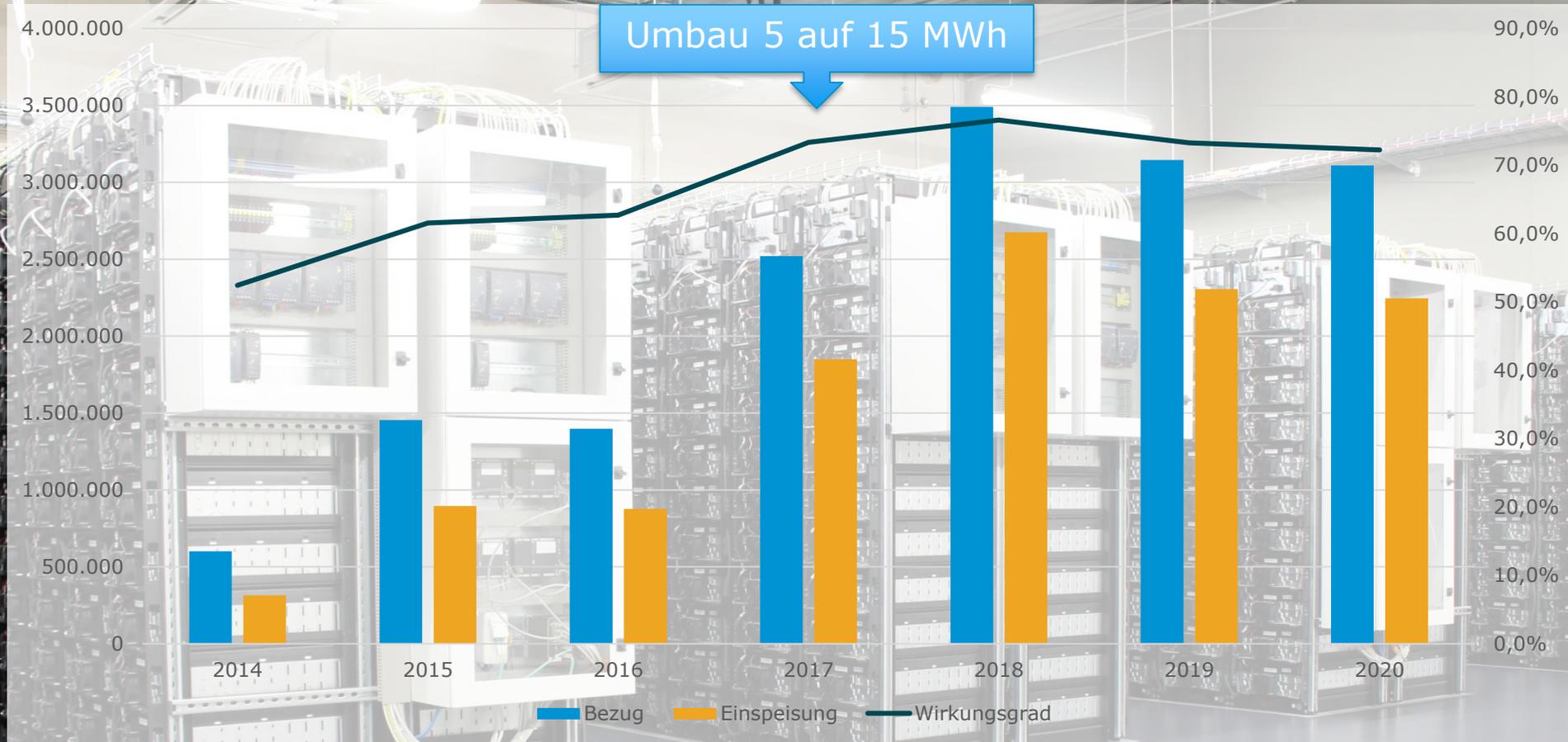
Kalenderwoche 2020 - 24 Stundenprodukt																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Montag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
Dienstag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mittwoch	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Donnerstag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Freitag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Samstag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Sonntag	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Hinweis: bis 30.06.2020 (= 27 KW) bestehen Tagesprodukte, danach Wechsel auf 6 x 4 Stundenprodukte pro Tag!

Kalenderwoche in 2020 - 6 Stundenprodukt																											
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
Montag		6/6	6/6	4/6	6/6	0/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Dienstag		6/6	5/6	4/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Mittwoch	6/6	6/6	5/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	0/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Donnerstag	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Freitag	6/6	6/6	6/6	4/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	0/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Samstag	6/6	5/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6
Sonntag	6/6	6/6	6/6	6/6	0/6	5/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6	6/6

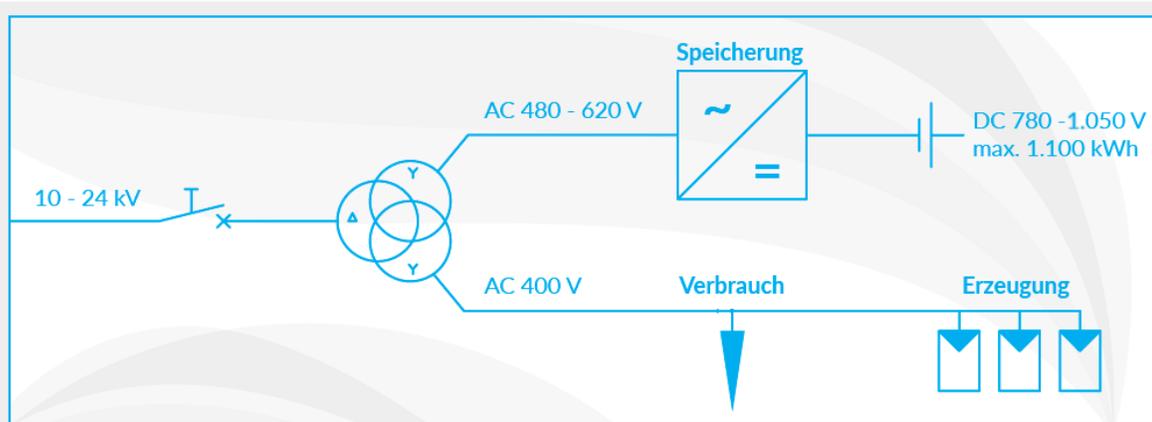
Hinweis: von 1.104 Geboten wurden 1.070 Gebote vermarktet --> 34 mal keine Vermarktung

# Wirkungsgrad gesamt

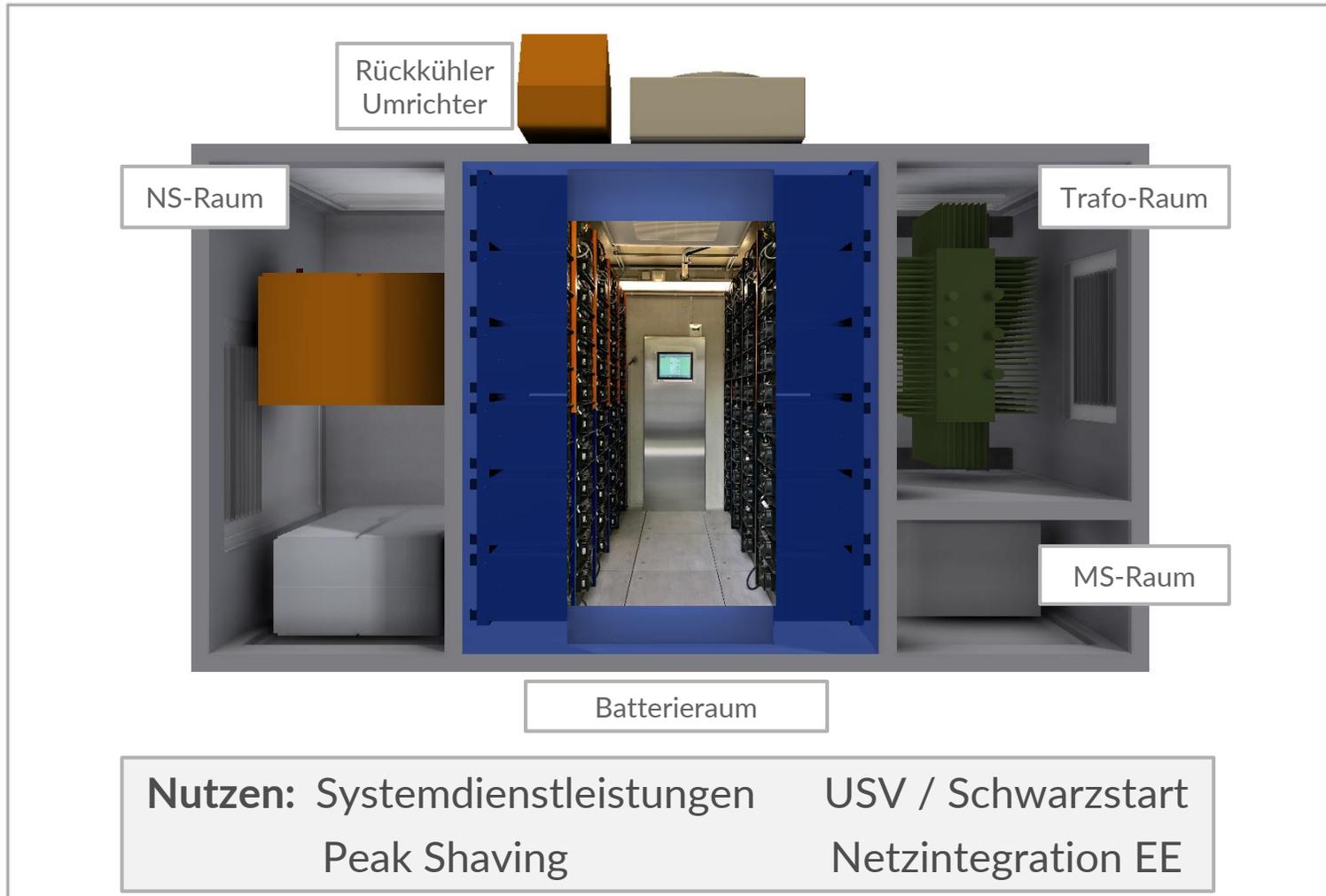


# Die WEMAG-Batteriespeichersysteme

	WBS 200	WBS 500	WBS 800
Transformator	250 kVA	630/800 kVA	1.000 kVA
Speicherkapazität	502 - 1.004 kWh (Samsung SDI M2) / 550 - 1.100 kWh (LG Chem M48126)		
Wechselrichter	Indrivetec FC250	Indrivetec FC750	Indrivetec FC1.000
Standalone-Betrieb			
Leistung	250 kW	750 kW	1.000 kW
Pool-Betrieb			
max. Präqualifizierbare Leistung PRL-Betrieb	200 kW	500 kW	800 kW
Peak-Shaving @PRL	-	125 kW @ 500 kW	125 kW @ 700 kW
Abmessungen	BLH 3,0 m x 5,40 m x 3,32 m (Lichte Höhe 2,50 m)		
Gewicht	40 - 44 t (austattungsabhängig)		



Kompaktspeicher für Industrieanlagen und Netzbetreiber



## WEMAG-Speichersysteme im Überblick

Systemvergleich	SN1	SN2	WBS 500
Kapazität	15 MWh		1 MWh
Installierte Leistung	14,4 MW		750 kW
	8 MW	6,4 MW	
Präqualifizierte Leistung	10 MW		500 kW
Fläche	716 m <sup>2</sup>		16,2 m <sup>2</sup>
Trafos	5	4	1
Umrichter	10	8	1

***WEMAG***

**Das Projekt Kickstarter**

# Kickstarter – Sind Speicher Schwarzstartfähig?

1

2

a

b



## Kickstarter

**Projektpartner:** Uni Rostock, WEMAG  
 Younicos, SW Schwerin

**Ziel:** Anfahren des GuD-Kraftwerks  
 Schwerin Süd mit Batteriespeicher

**Versuchsaufbauten:**

1. a) Anfahren KW über Gasturbine und Spannungsaufbau durch Speicher
1. b) Netzaufbau / Synchronisierung und Zuschalten Einspeiser
2. a) Anfahren KW über Bio-BHKW und Spannungsaufbau durch Speicher
2. b) Netzaufbau / Synchronisierung und Zuschalten Einspeiser

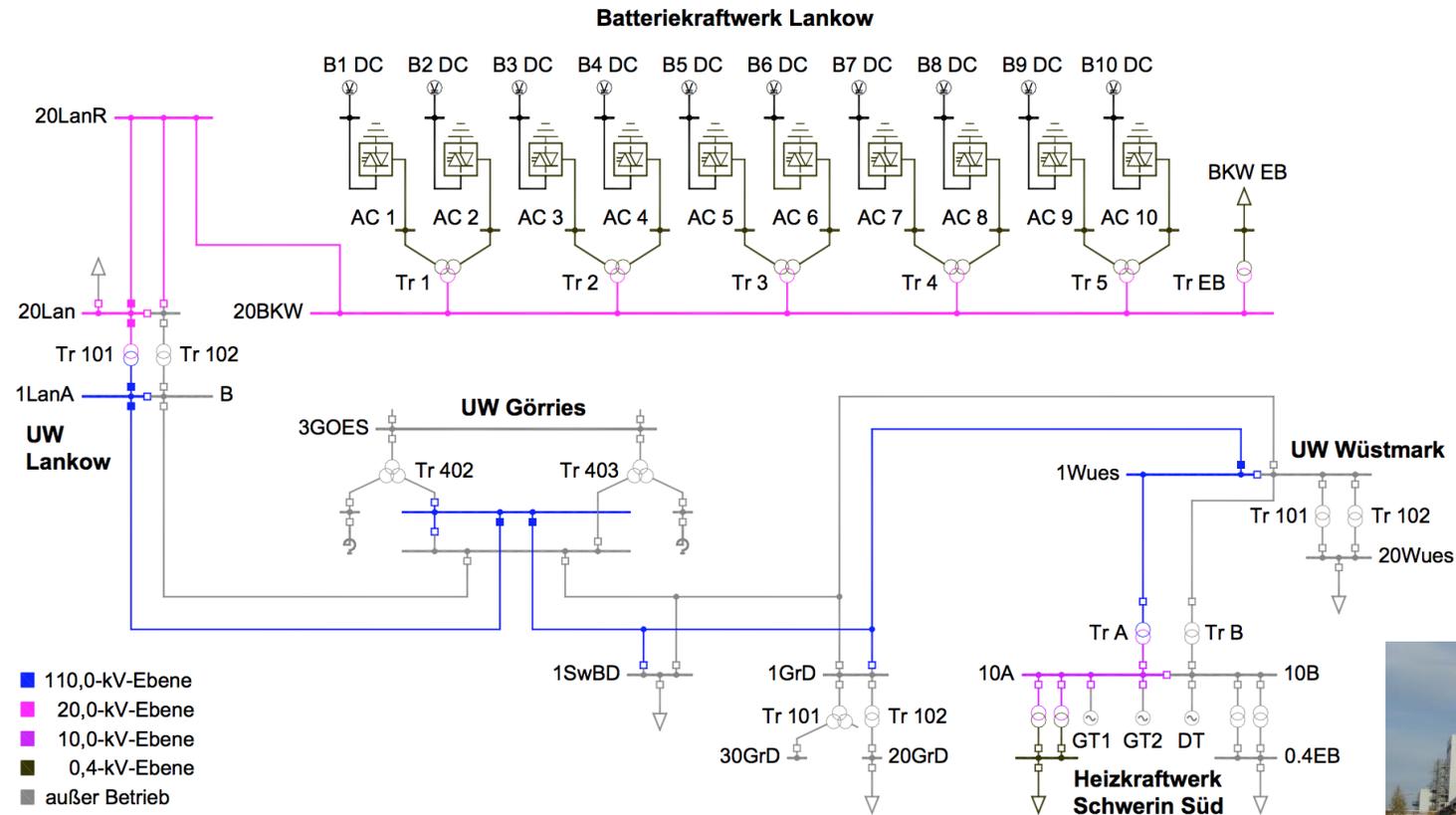
## Kickstarter 1

1. Speicher setzt Netz zum KW unter Spannung (reine Blindleistung)
2. KW wird durch Gasturbine angefahren
3. KW wird an Netz unter Spannung geschaltet und der Speicher durch das KW geladen (durch Last Blind- und Wirkleistung)
4. Hinzuschalten weiterer EE-Anlagen als Erzeuger (Test mit Biogasanlage)
5. Synchronisation des Inselnetzes mit dem Verbundnetz

## Kickstarter 2

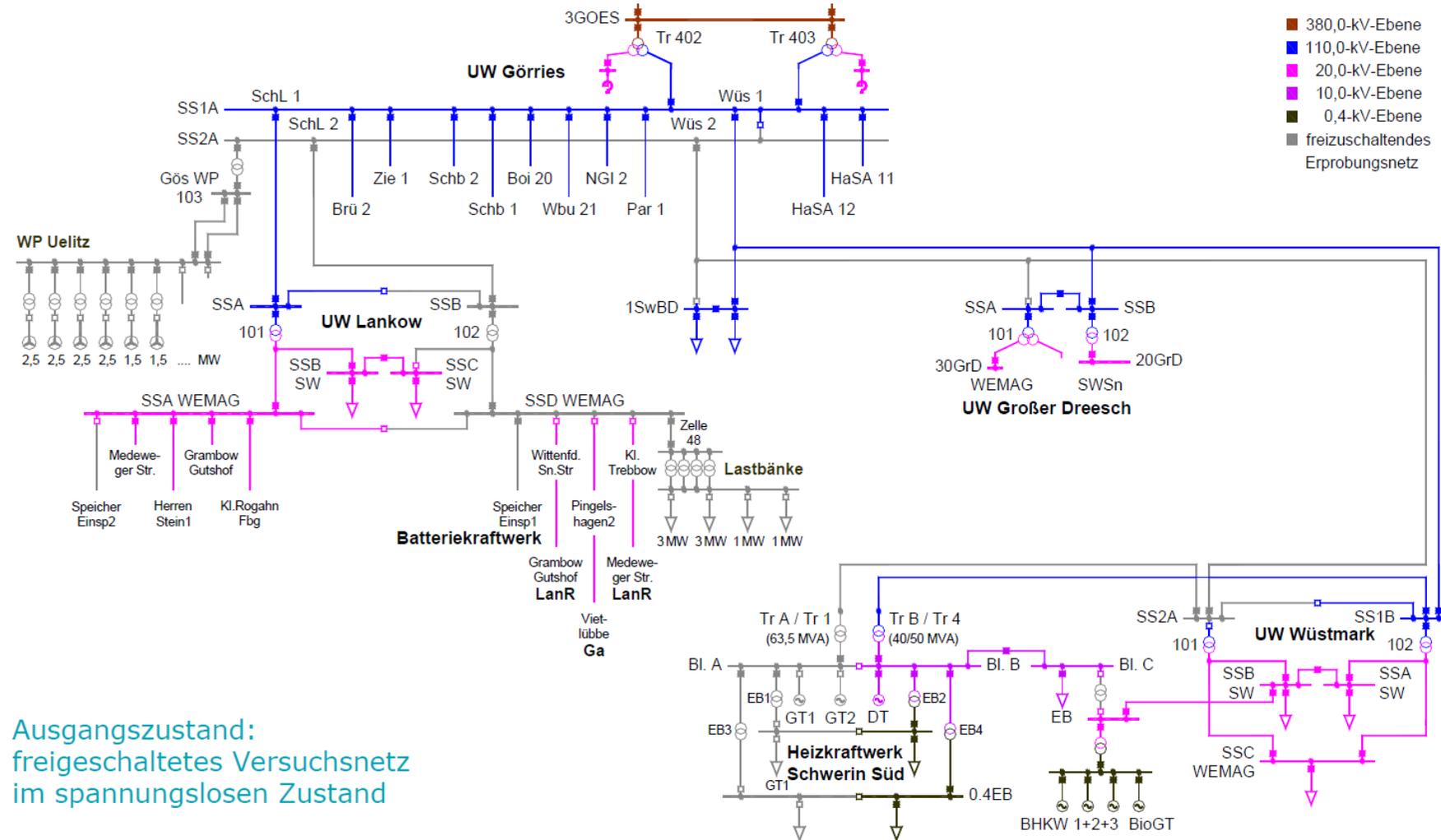
1. Speicher setzt Netz zum KW unter Spannung (reine Blindleistung)
2. KW-Dampfturbine wird durch BHKW / Biogasanlage angefahren
3. KW wird an Netz unter Spannung geschaltet und der Speicher durch das KW geladen (durch Last Blind- und Wirkleistung)
4. Hinzuschalten weiterer EE-Anlagen als Erzeuger (Test mit Windpark)
5. Synchronisation des Inselnetzes mit dem Verbundnetz

## Schwarzstart der KWK-Anlage Schwerin Süd Lankow



# Kickstarter 2 Erprobungsnetz

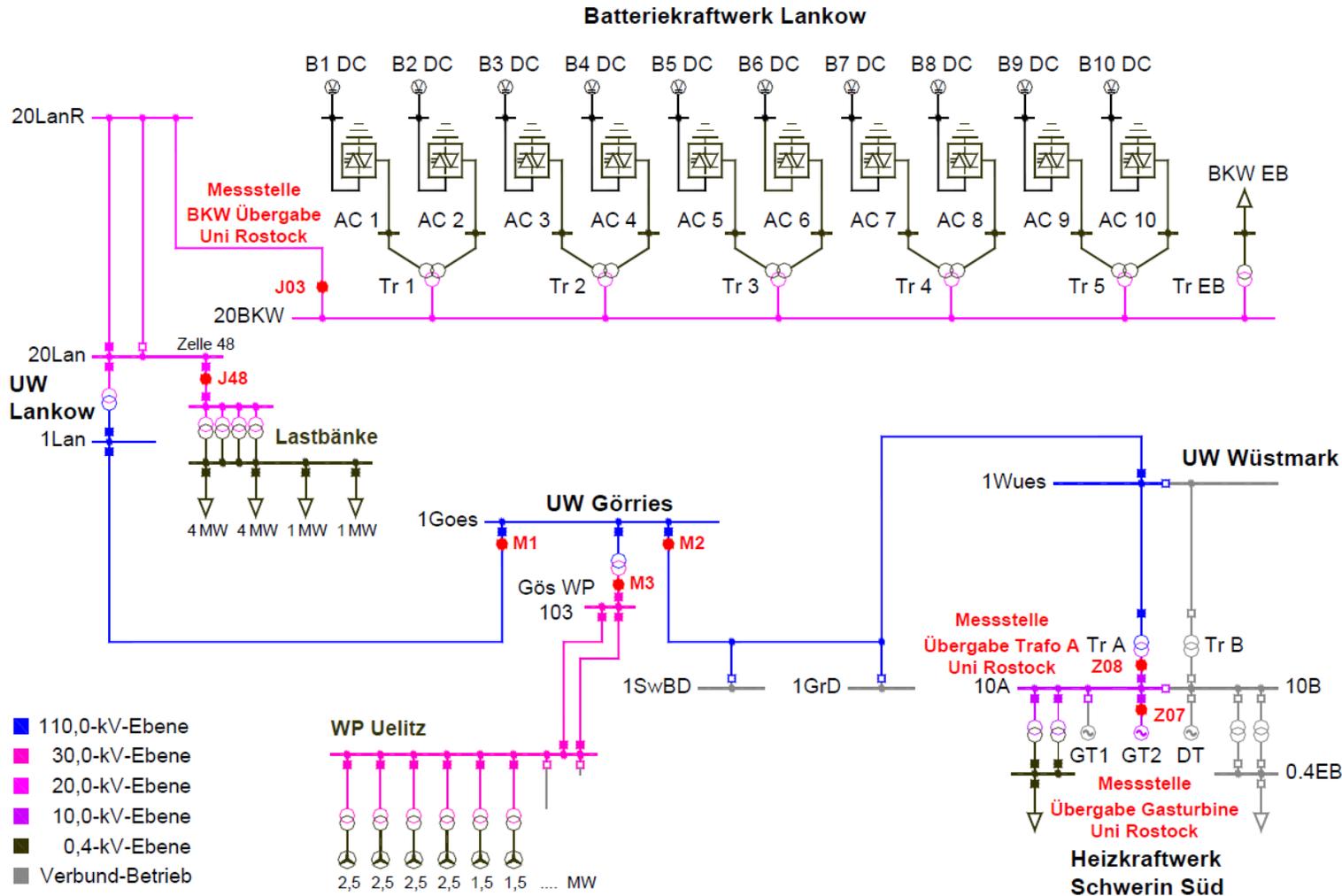
Praktische Erprobung 16.05.2019: 1A) Batteriespeicher Schwarzstart und Anfahren einer GT im HKW Süd



Ausgangszustand:  
freigeschaltetes Versuchsnetz  
im spannungslosen Zustand

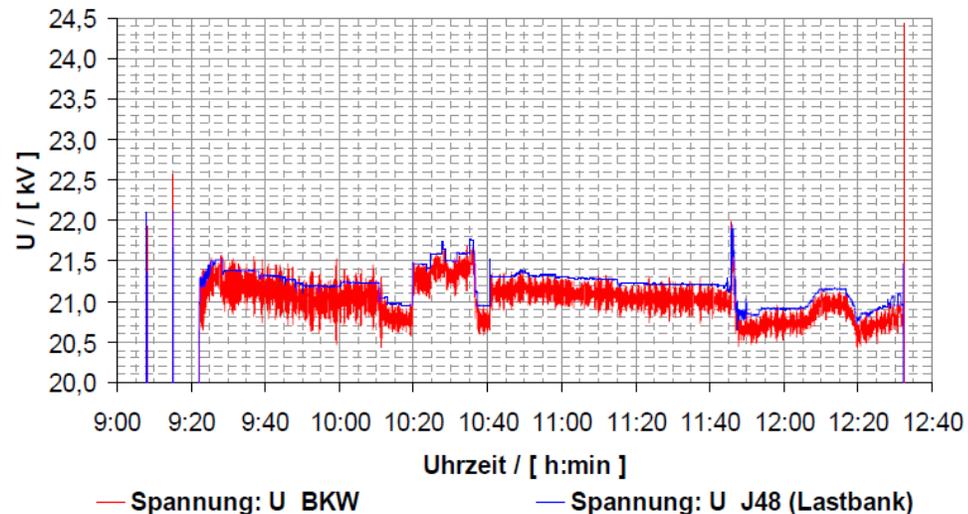
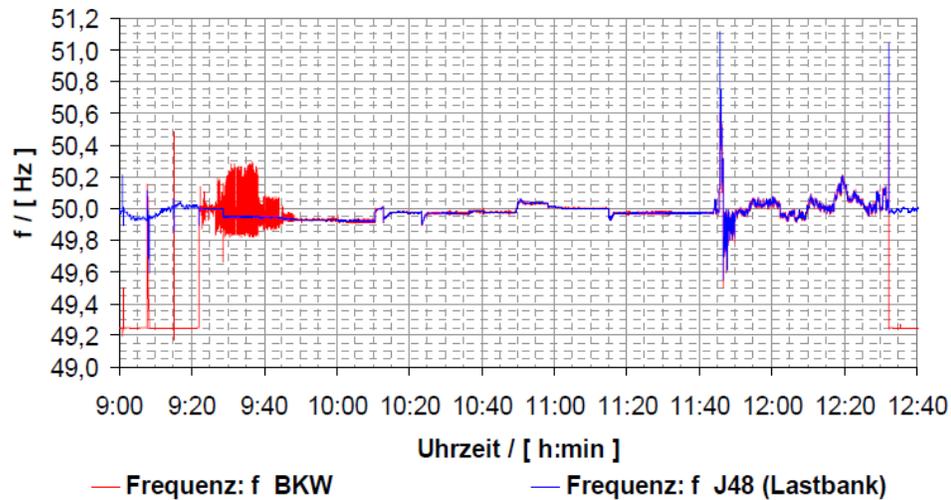
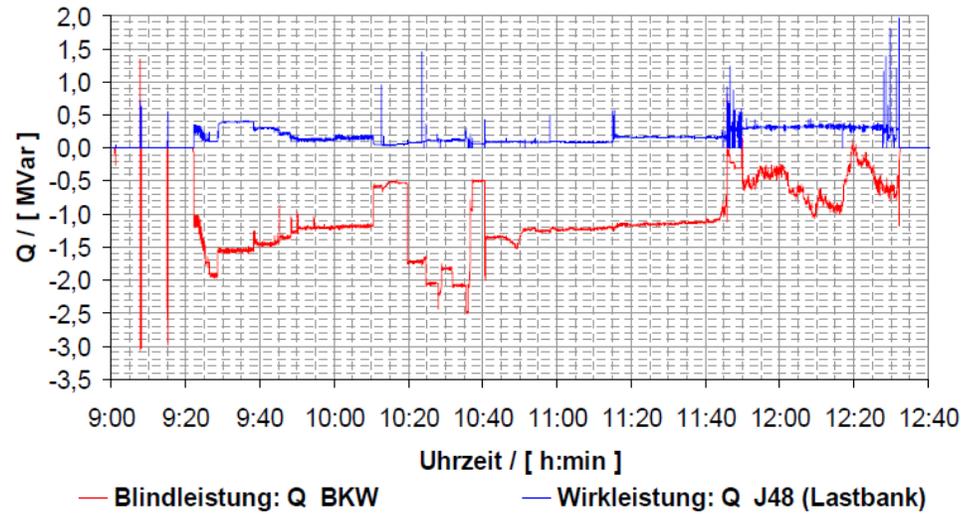
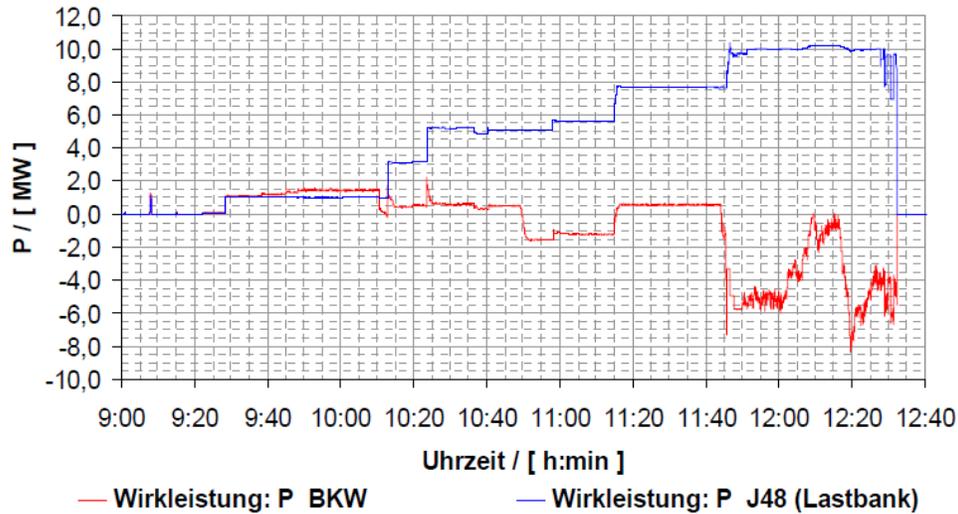


# Kickstarter 2 Messstellen für praktische Erprobung



# Ergebnisse Kickstarter 2

- 1.) 09:20-10:10 Schwarzstart und Inbetriebnahme HKW Süd
- 2.) 10:20-10:50 Synchronisation Gasturbine und Lastsprünge
- 3.) 10:40-11:30 Vorbereitung Anfahren Windpark
- 4.) 11:40-12:35 Anfahren Windpark und Lastsprünge

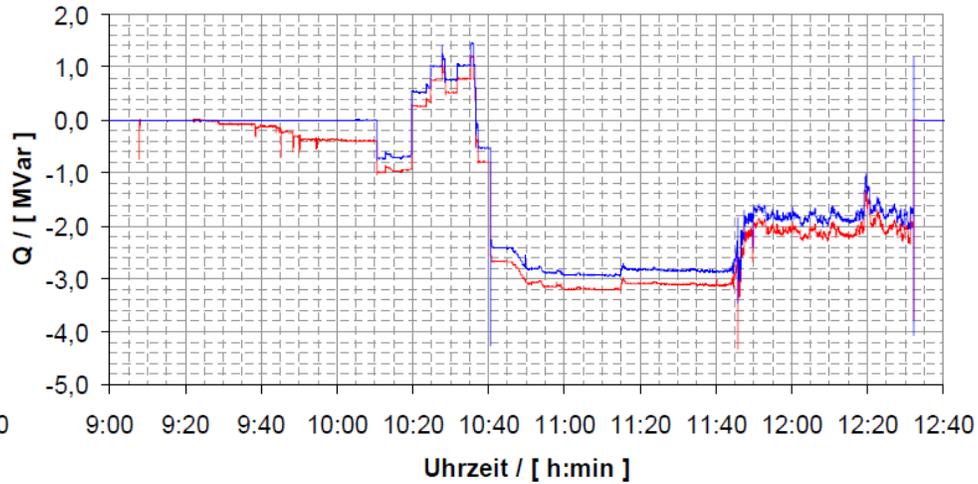
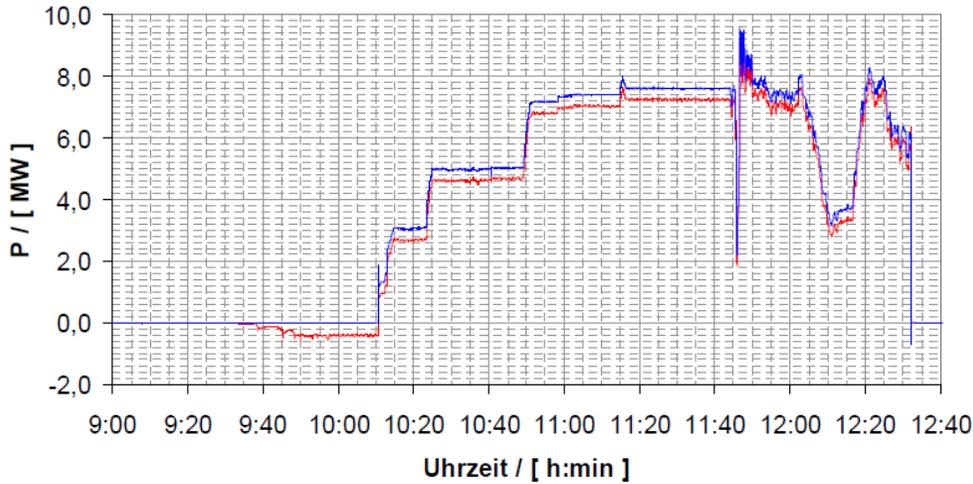


Universität  
Rostock



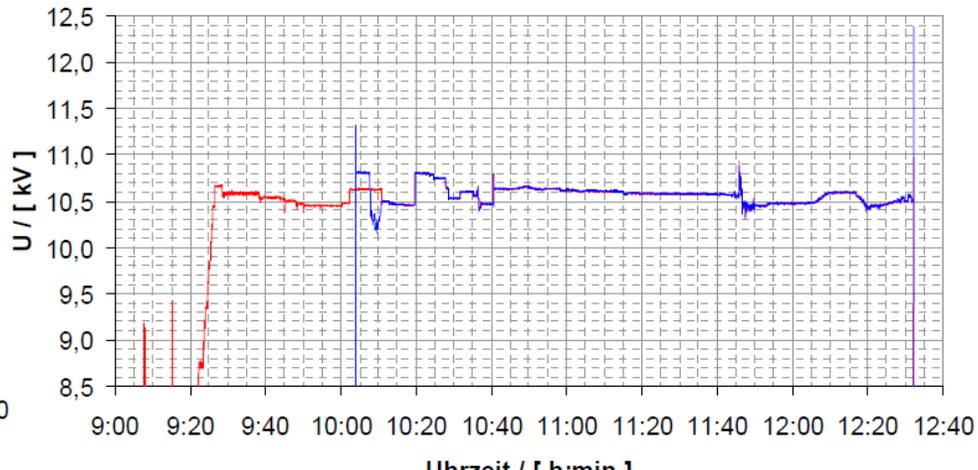
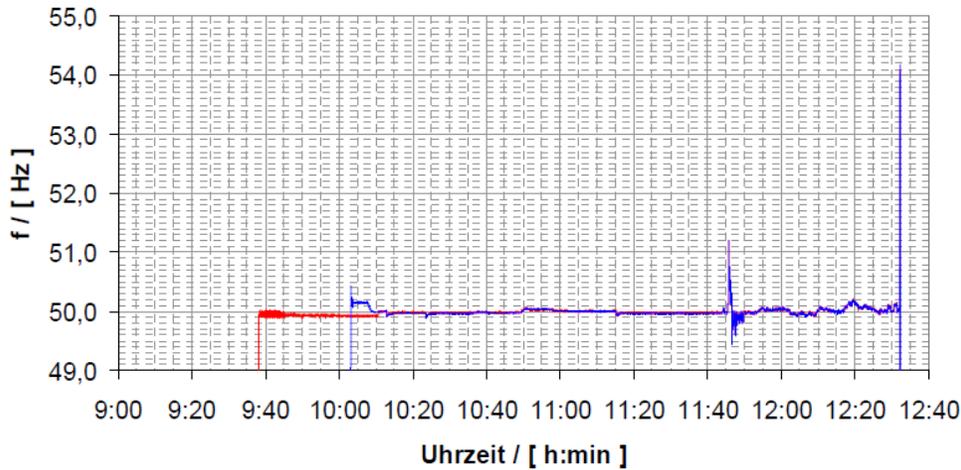
# Ergebnisse Kickstarter 2

- 1.) 09:20-10:10 Schwarzstart und Inbetriebnahme HKW Süd
- 2.) 10:20-10:50 Synchronisation Gasturbine und Lastsprünge
- 3.) 10:40-11:30 Vorbereitung Anfahren Windpark
- 4.) 11:40-12:35 Anfahren Windpark und Lastsprünge



— Wirkleistung: P HKW Z08      — Wirkleistung: P HKW Z07 (GT2)

— Blindleistung: Q HKW Z08      — Blindleistung: Q HKW Z07 (GT2)



— Frequenz: f HKW Z08      — Frequenz: f HKW Z07 (GT2)

— Spannung: U HKW Z08      — Spannung: U HKW Z07 (GT2)

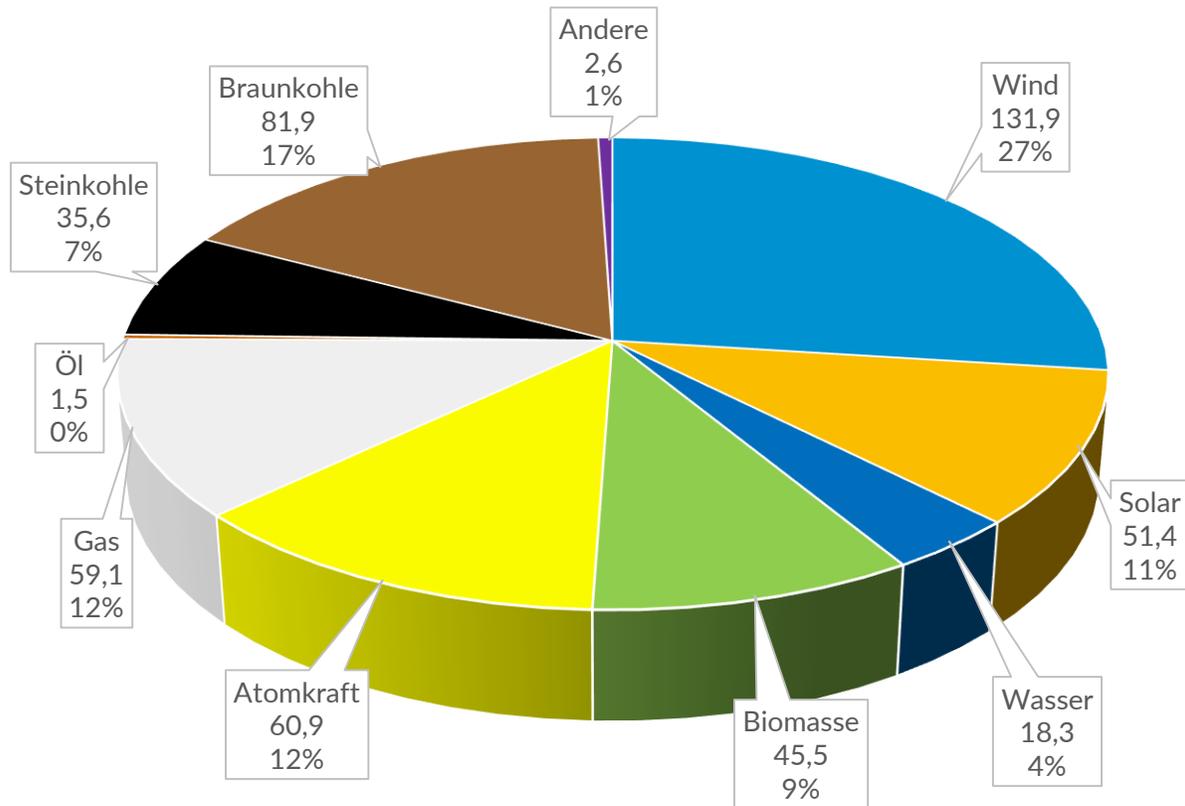
**YOUNICOS**  
Let the fossils rest in peace.



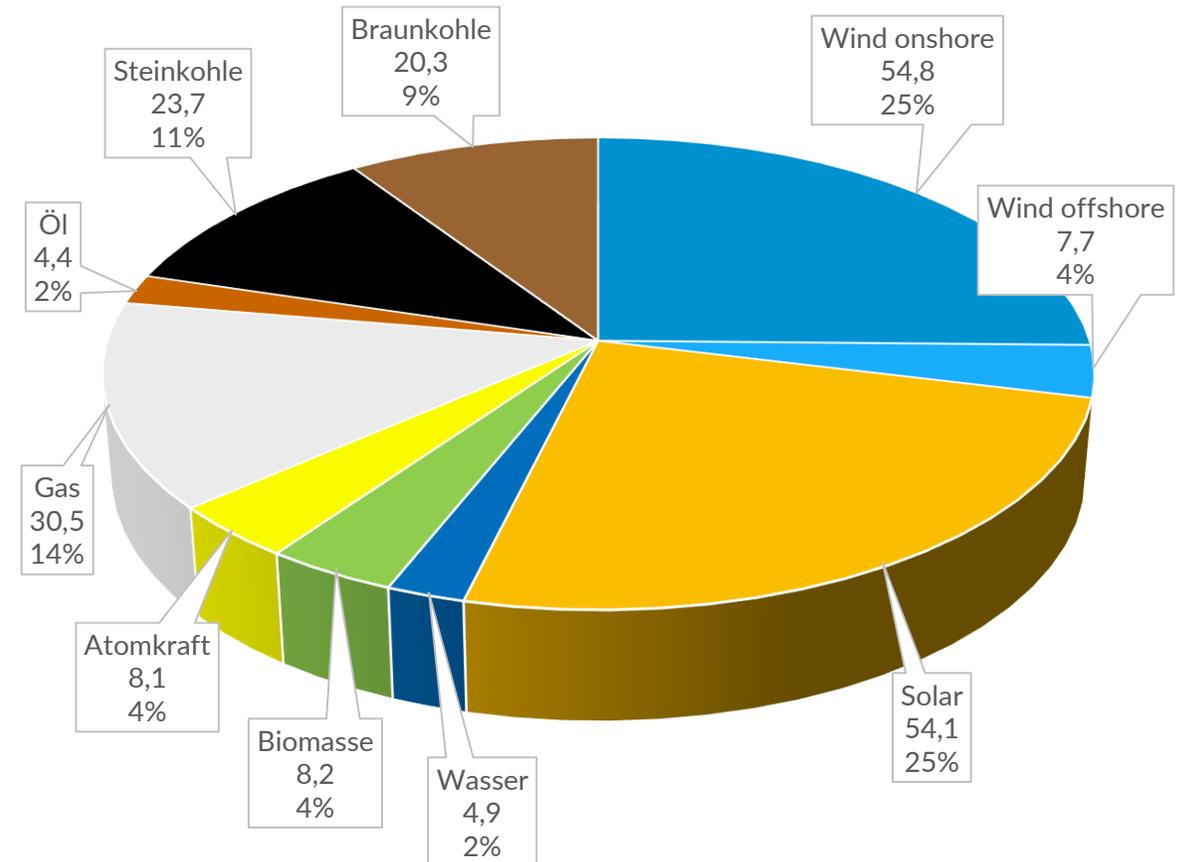
***WEMAG***

**Wettbewerblesches Umfeld**

## Nettostromerzeugung [TWh]

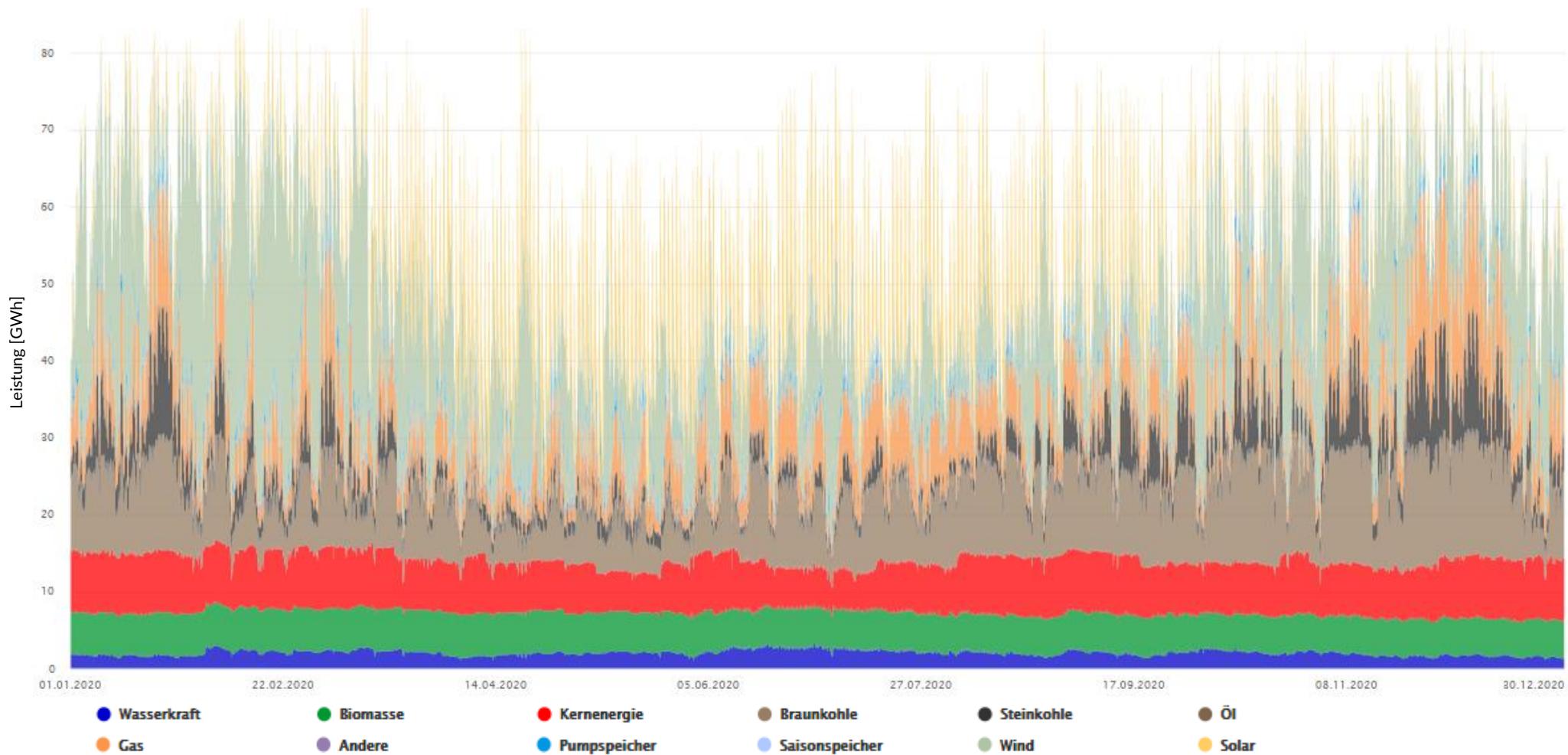


## Installierte Leistung [GW]



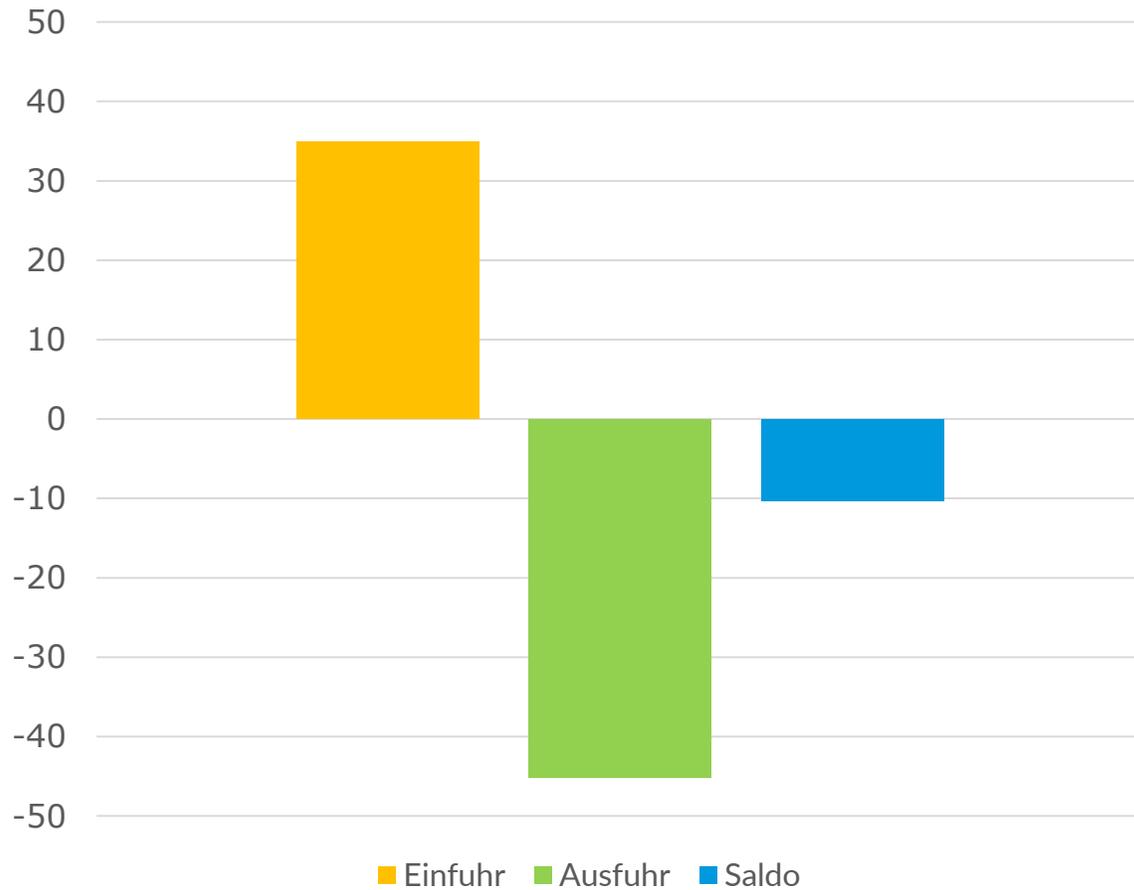
Quelle: Fraunhofer ISE Energy Charts

# Strommarktzahlen 2020



Quelle: Fraunhofer ISE Energy Charts

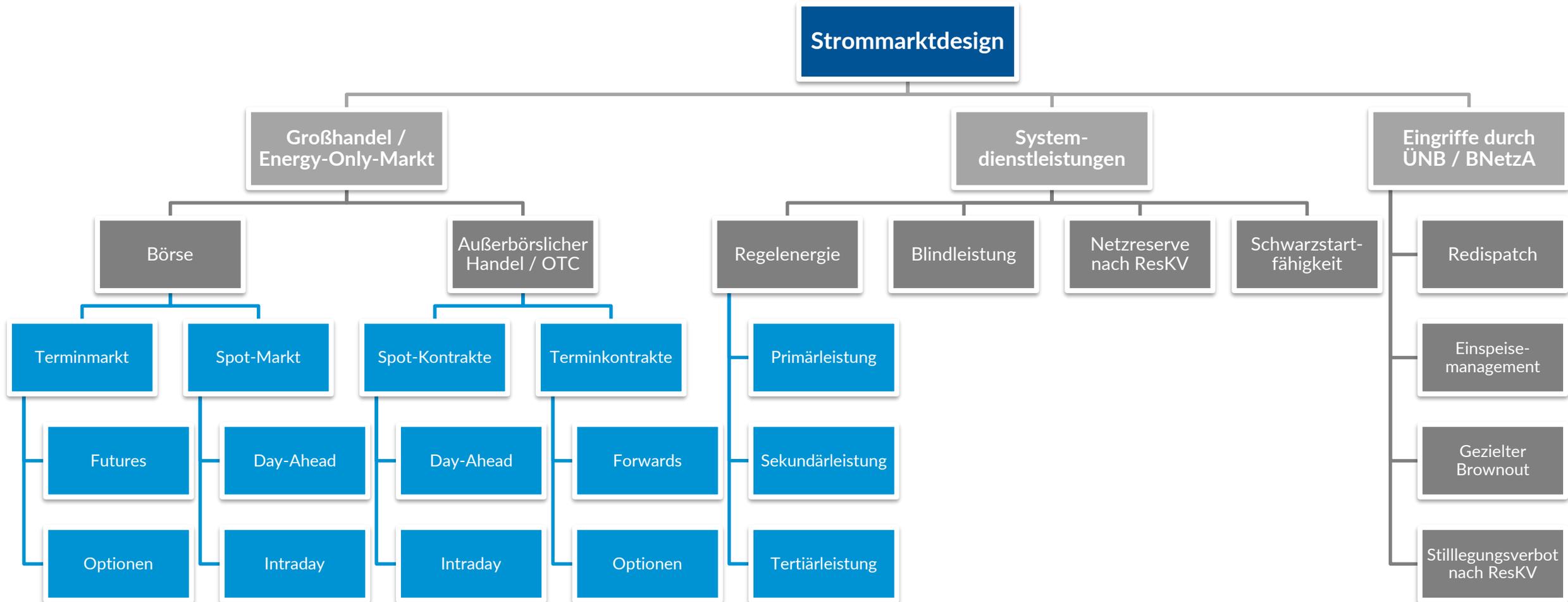
## Außenhandelsbilanz Strom in TWh 2020



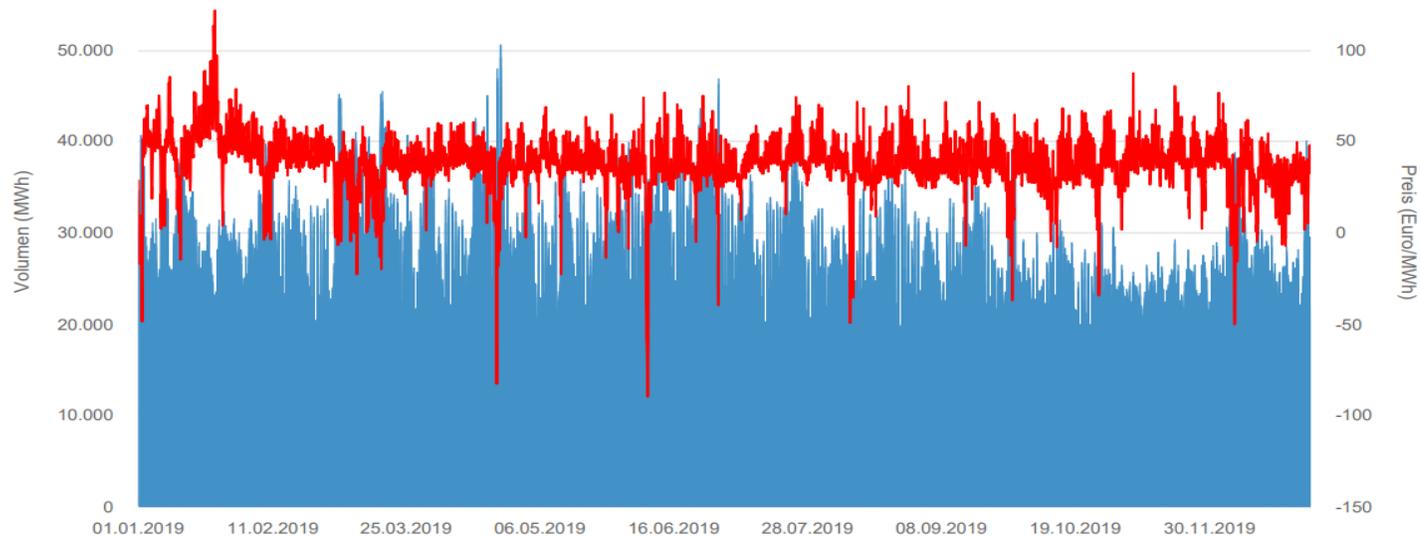
## Außenhandelsbilanz Strom in Mio.€ 2020



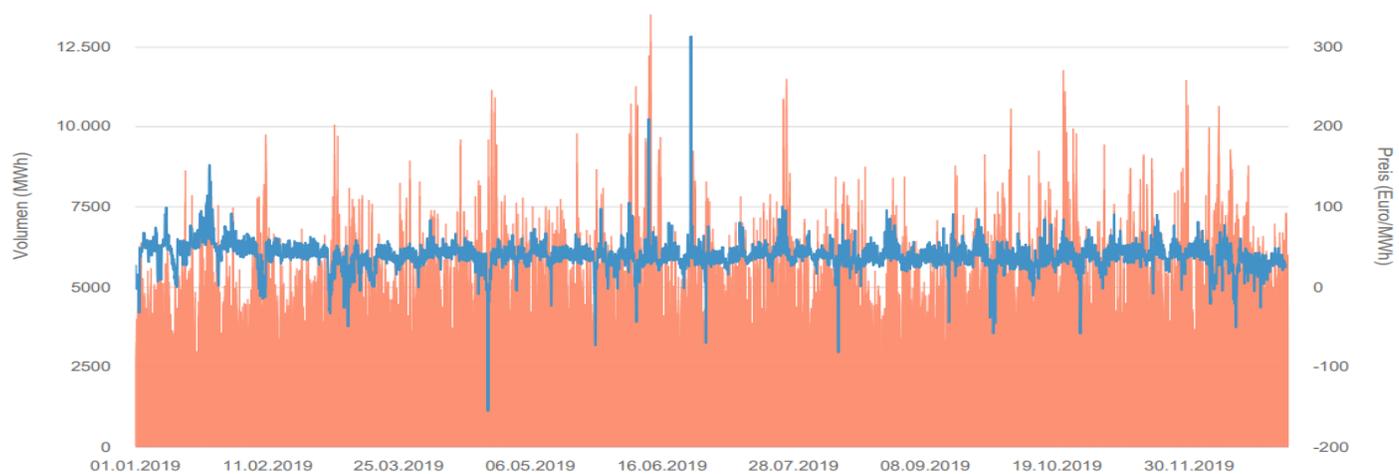
Quelle: Fraunhofer ISE Energy Charts



# Mengen und Preise an der EPEX Spot 2019



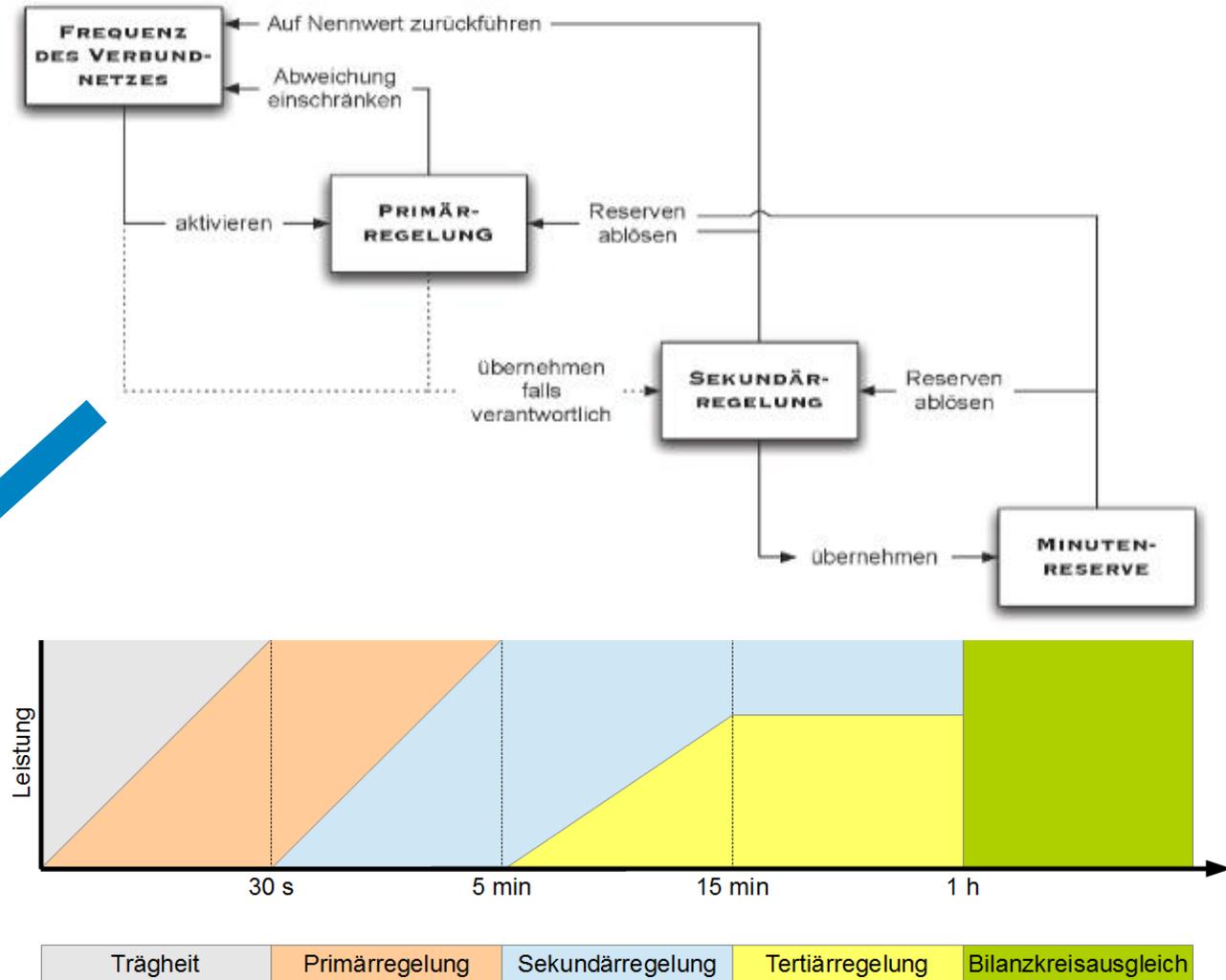
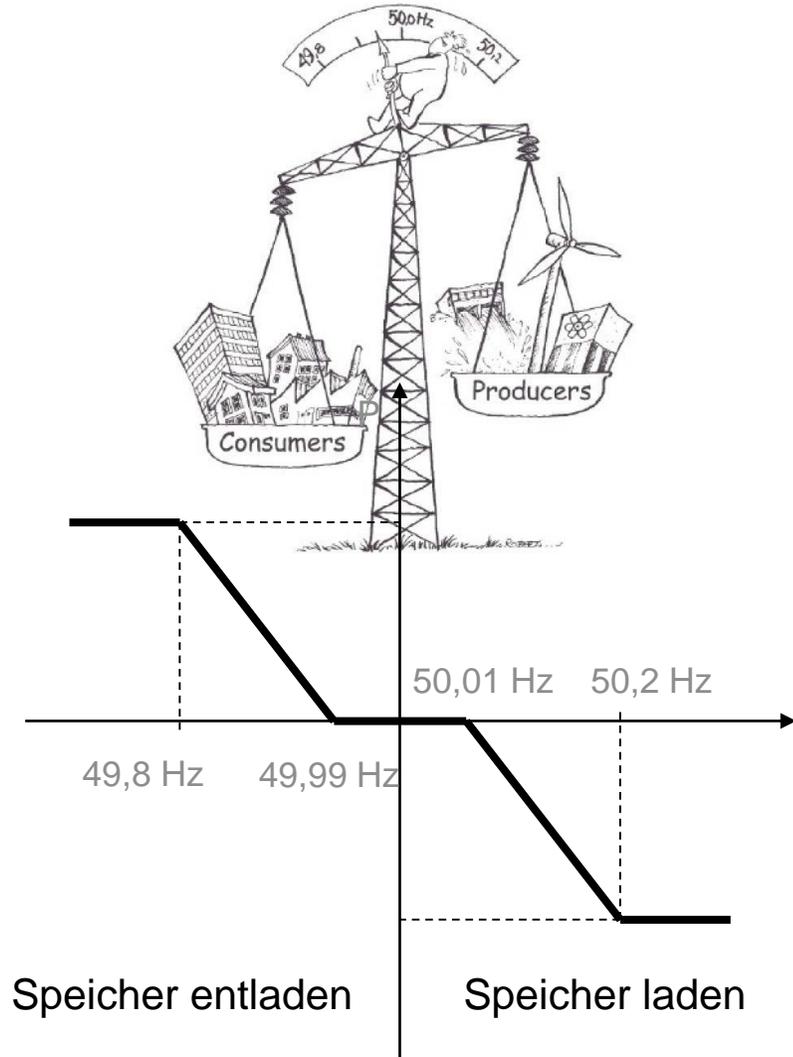
- Day Ahead Volumen
- Day Ahead Auktion



- Intraday kontinuierlich, Volumen
- Intraday kontinuierlich, Indexpreis

Quelle: Fraunhofer ISE Energy Charts

# Prinzip des Regelenergiemarktes



- es gibt positive und negative Regelenergie (Einspeisung und Einsenkung)
- Regelenergie wird an einem Auktionsmarkt gehandelt
- Nachfrage durch ÜNB, Gebote durch Flexibilitätsanbieter
- Regelenergiemärkte sind Pay-as-Bid-Märkte: jeder wird in Höhe seines Gebotes vergütet, wenn das Gebot unterhalb des Schnittpunktes zw. Angebots- und Nachfragekurve liegt
- Primärregelenergie wird nach Leistung vergütet
- für Sekundär- und Tertiärregelenergie werden Gebote mit einem Leistungs- und einen Arbeitspreis abgegeben
- Leistungspreis: Vergütung für die Bereitstellung der potential abrufbaren Regelleistungskapazität
- Arbeitspreis: Vergütung des Regelenergieabrufs

Quelle: next-kraftwerk.de

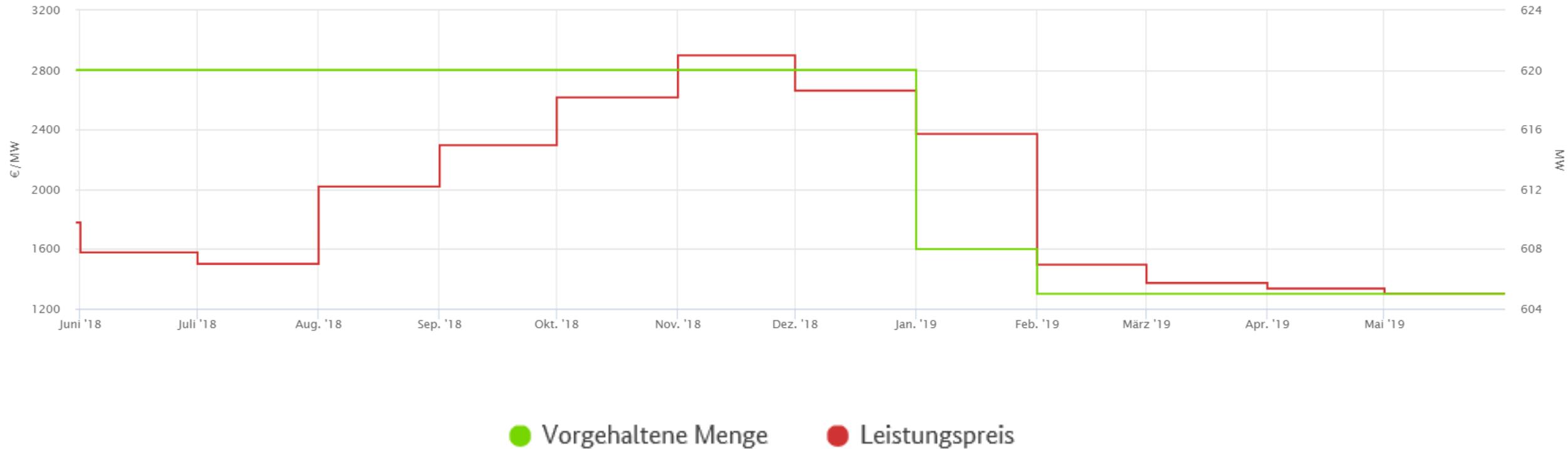


- Primärregelleistungsgebote müssen in gleicher Höhe einspeise- und einsenkfähig sein
  - für Sekundär- und Tertiärregelleistung werden Gebote getrennt nach Einspeisung und Einsenkung abgegeben
  - Entscheidung bei Sekundär- / Tertiärregelleistungsauktion nach Mischpreisverfahren (Gewichtung von LP und AP nach Abrufwahrscheinlichkeit)
  - Regelenergieabruf erfolgt in Reihenfolge der niedrigsten Arbeitspreise der bei der Auktion gezogenen Gebote
- 
- Regelenergie vs. Redispatch
  - Redispatch ist die nachträgliche Veränderung des Kraftwerksfahrplans durch den Bilanzkreisverantwortlichen aufgrund der regionalen Überlastung von Betriebsmitteln.

Quelle: next-kraftwerk.de



# Primärregelleistung 2019 in Deutschland

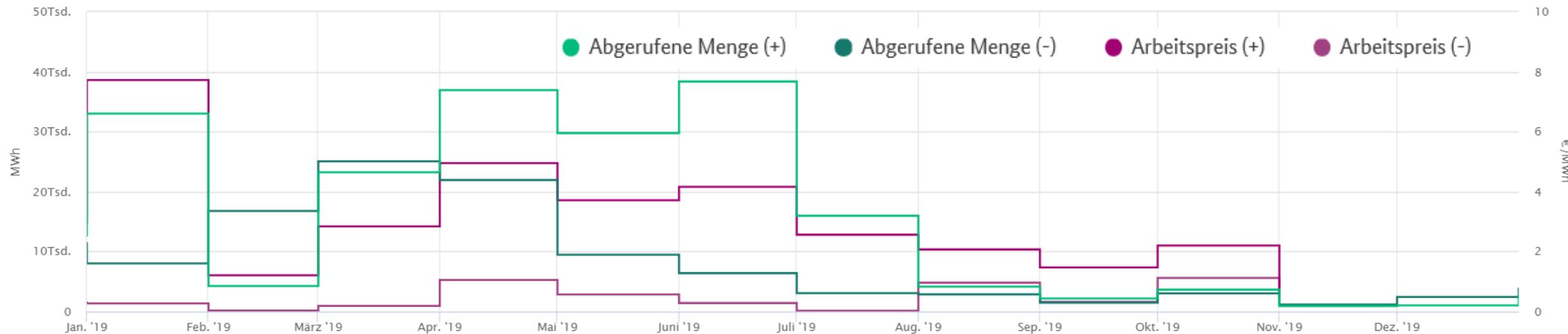
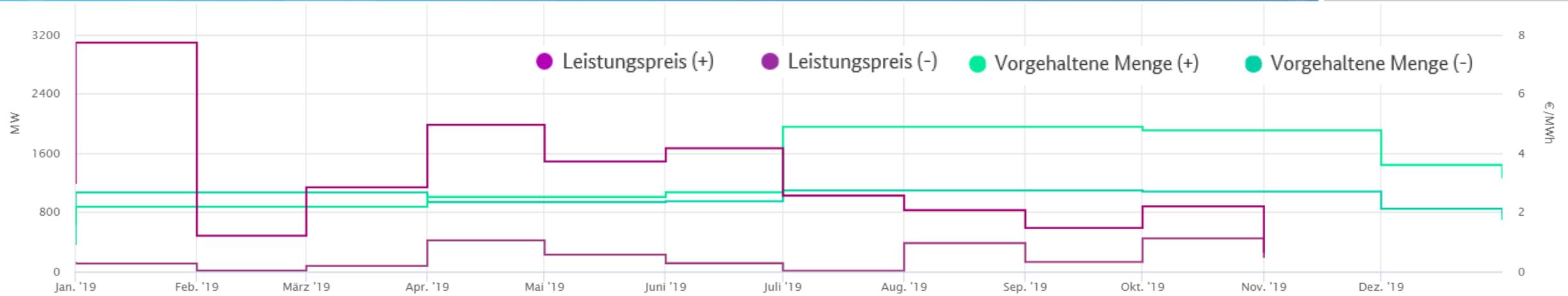


# Sekundärregelleistung 2019 in Deutschland



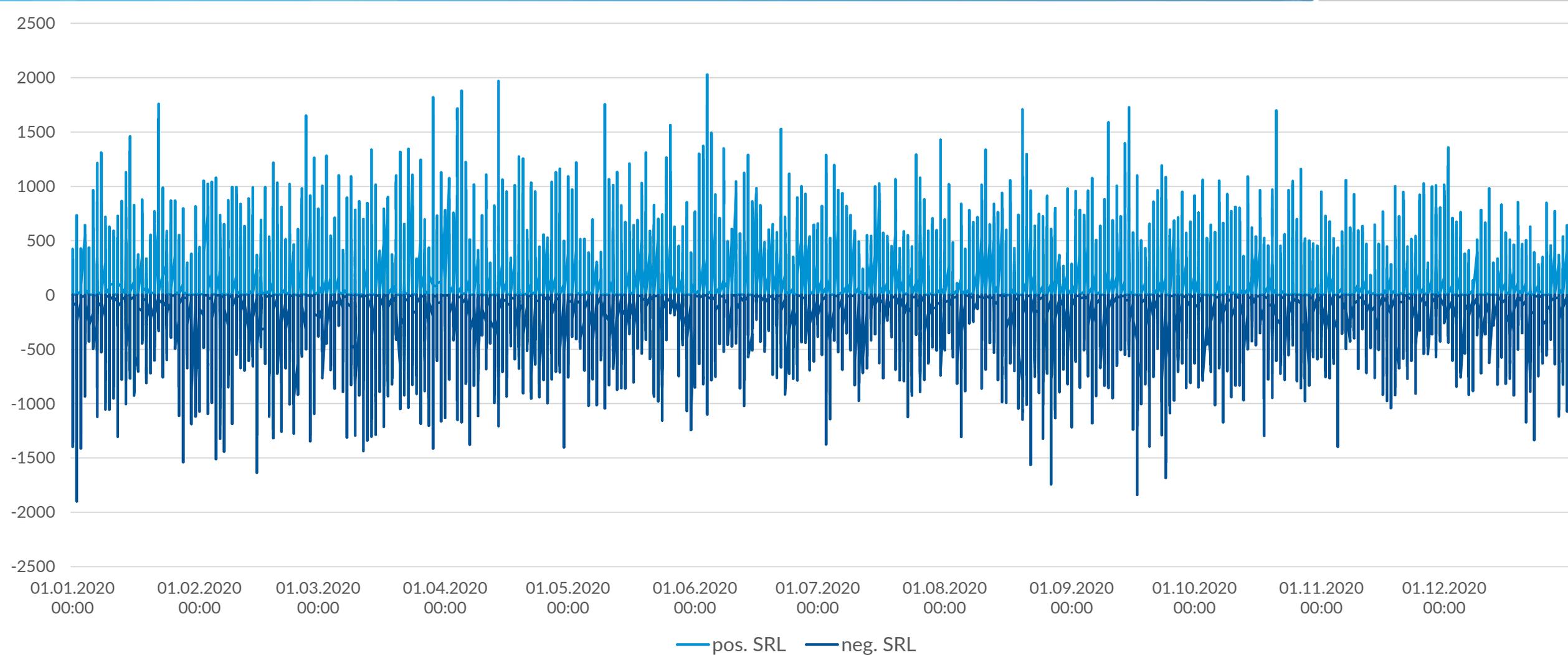
Quelle: BNetzA SMARD Strommarktdaten-Portal

# Tertiärregelleistung 2019 in Deutschland



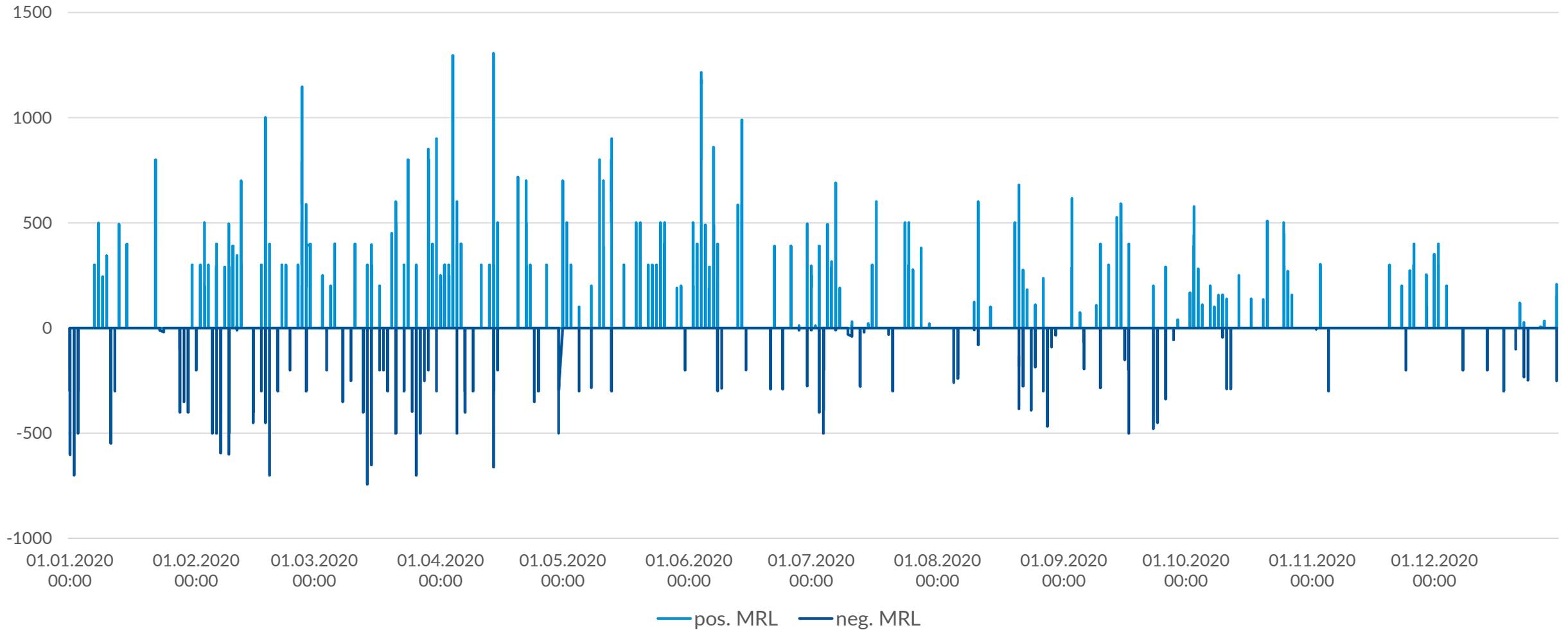
Quelle: BNetzA SMARD Strommarktdaten-Portal

# Sekundärregelleistungsabrufe in Deutschland 2020 in MW (1/4 h)

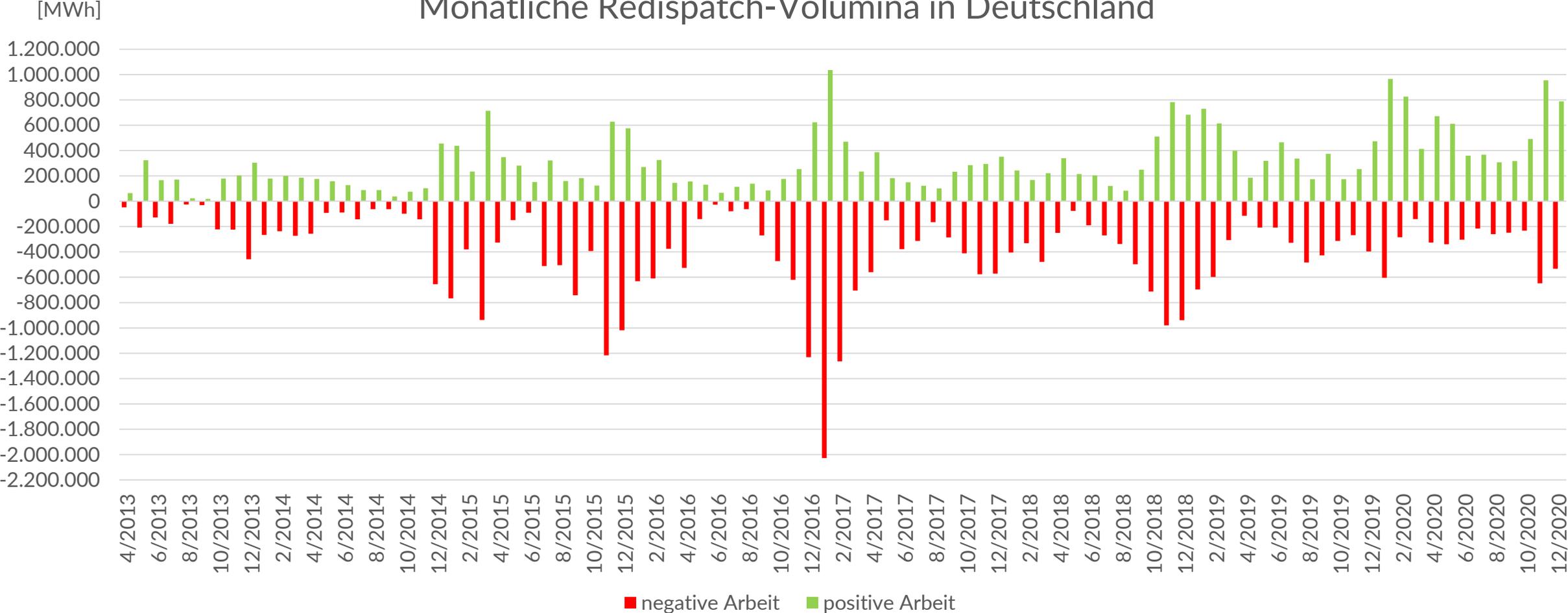


Daten: regelleistung.net

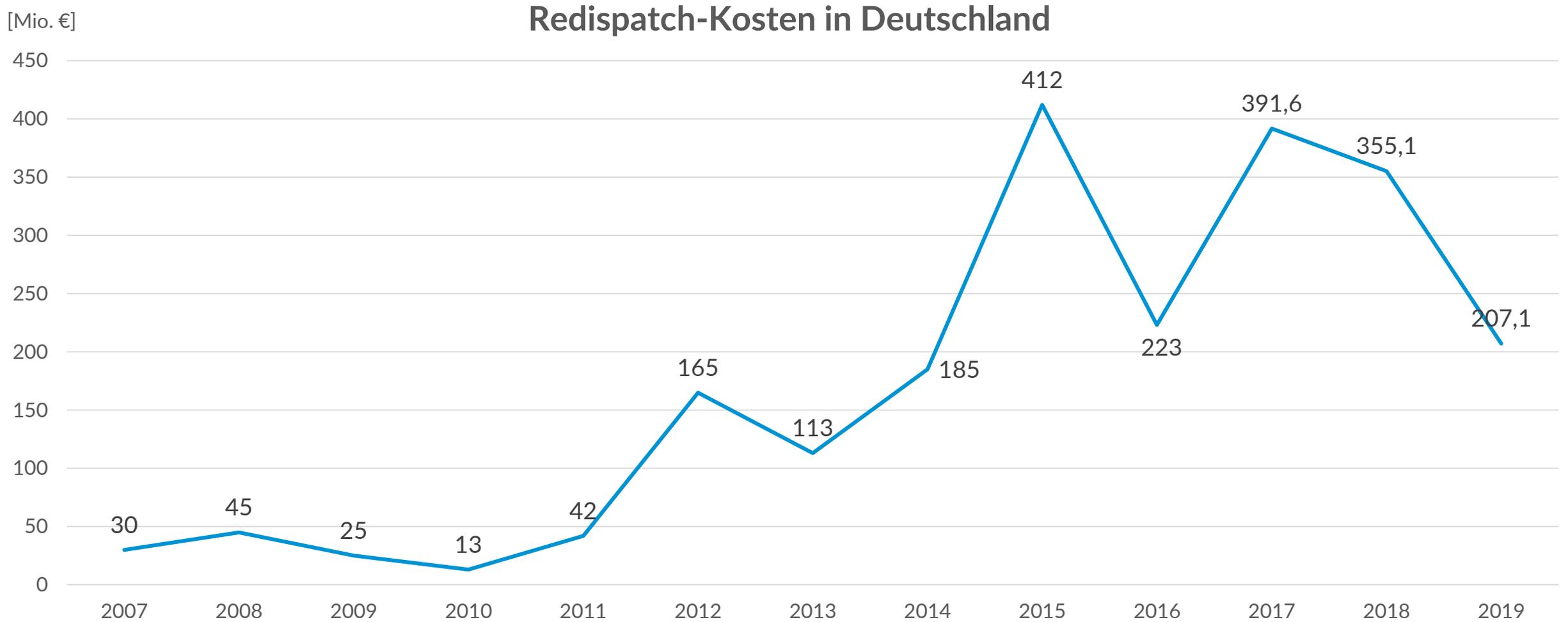
# Tertiärregelleistungsabrufe in Deutschland 2020 in MW (1/4 h)



## Monatliche Redispatch-Volumina in Deutschland



Daten: netztransparenz.de



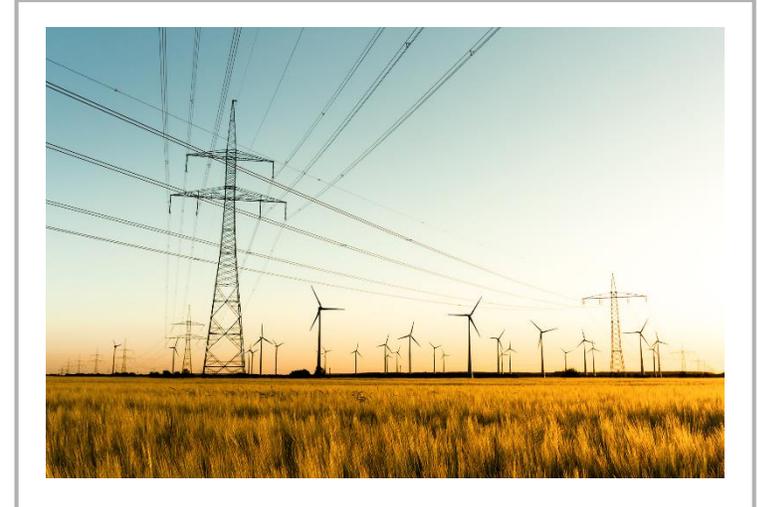
Daten: BDEW & BNetzA

***WEMAG***

**Sektorkopplung vs. Speicher**

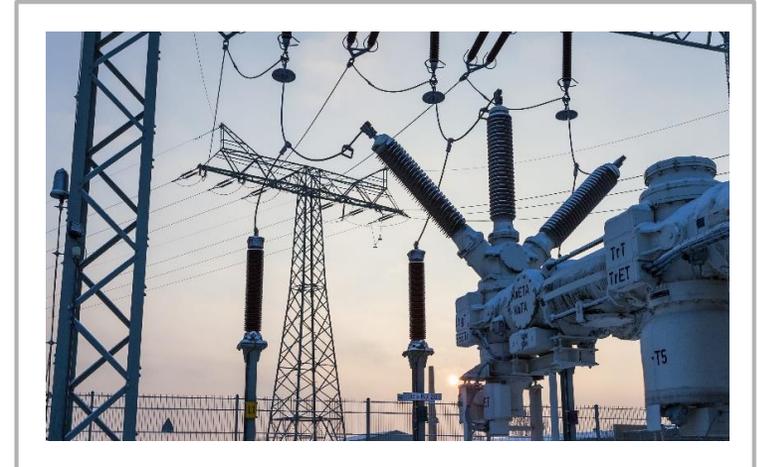
Das „alte“ abwärts orientierte Stromnetz wurde nach Peak-Lasten dimensioniert. Die Einspeisespitzen fluktuierender erneuerbarer Energien können größer als die Lastspitzen sein und damit das Stromnetz punktuell überlasten.

→ **Netzengpässe entstehen**



Strategien zur Bewirtschaftung von Netzengpässen:

- **Abschaltung von Einspeisung → Redispatch**
- **Zuschaltung von Verbrauchern vor der Engpassstelle**
- **Zuschaltung von Speichern / Power-to-X Anlagen**





Power to Gas



H<sub>2</sub>-Fahrzeuge

Kühlhauspeicher



## Sektorkopplung

- + kombinierte Anlagennutzung
- + geringe Kosten durch Kuppelinsatz
- nicht immer netzoptimaler Standort
- Vermischung netzdienlicher und funktionaler Anforderungsprofile
- teilweise nur Einsenkung
- teilweise lange Reaktionszeiten

## Speicher

- + sowohl Einsenkung als auch Einspeisung
- + sehr schnelle Reaktionszeiten
- + netzdienliche Standorte
- meist geringe Kapazität
- hohe Kosten



Batteriespeicher – unerlässliche Systemdienstleister in der Energiewelt von morgen?

VNB's – die „Ermöglicher“ der Energiewende?

Batteriespeicher „und“ oder „oder“ Sektorkopplung?

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

**WEMAG**

Obotritenring 40  
19053 Schwerin  
Tel.: 0385 . 755-0  
Fax: 0385 . 755-2222  
E-Mail: [kontakt@wemag.com](mailto:kontakt@wemag.com)  
[www.wemag.com](http://www.wemag.com)

**WEMAG**

UNTERNEHMENSGRUPPE

# Vorlesung – Stromnetze

## Energienetz - Regulierungssysteme | 07

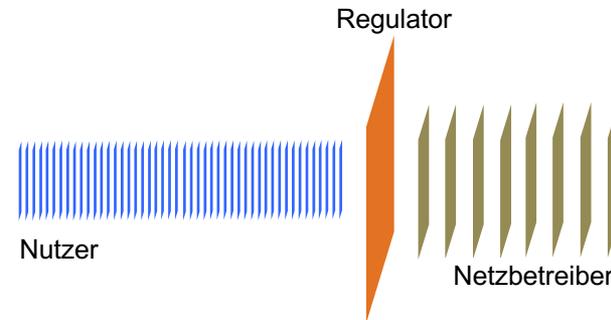
Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 28.05.2021



# Organisatorisches

## Vorlesung Stromnetze SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.	14:00 – 16:00	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.	14:00 – 16:00	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.	14:00 – 16:00	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.	14:00 – 16:00	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.	14:00 – 16:00	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.	14:00 – 16:00	Elektrische Energiespeicher - Verteilnetz	Murche
7	28.05.	14:00 – 16:00	Energiernetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.	14:00 – 16:00	Energierechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.	14:00 – 16:00	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.	14:00 – 16:00	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.	14:00 – 16:00	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.	14:00 – 16:00	Abschluss Vorlesungen und Fragestunde zu Prüfungen	Benthaus / Netter
13	05.- 07.07.	ganztägig	Prüfungen	Benthaus / Netter

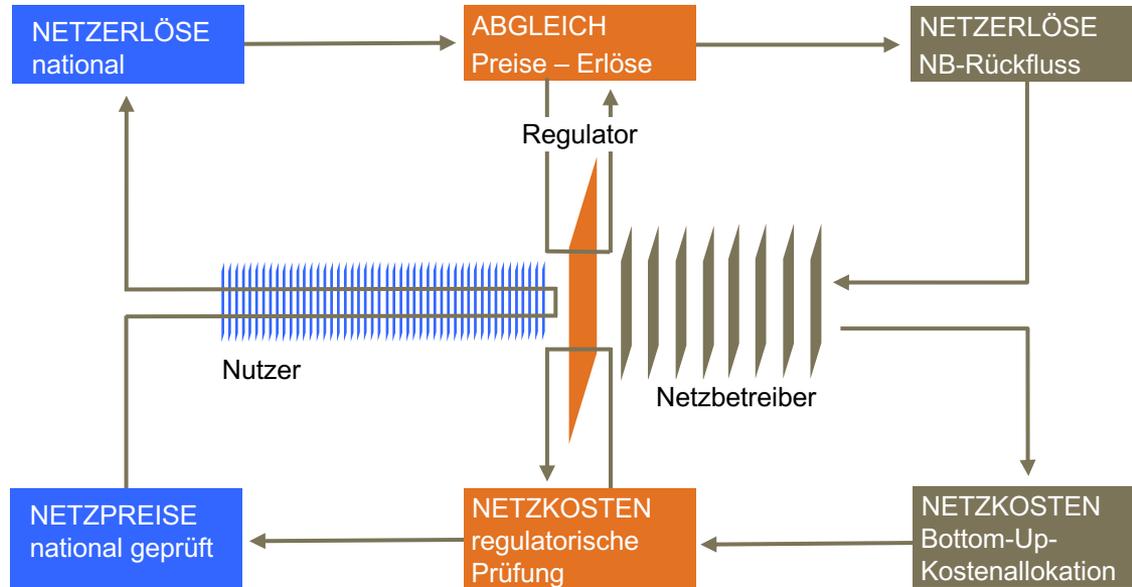
# Literatur

## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze 07

BENTHAUS	2015	Schrittweise Evolution oder Quantensprung?, Bulletin electro suisse, VSE
BUNDESNETZAGENTUR BUNDESKARTELLAMT	2021	Monitoringbericht 2020, monitoring.energie@bundesnetzagentur.de
BUNDESNETZAGENTUR	2015	Evaluierungsbericht nach § 33 Anreizregulierungsverordnung
EIDGENÖSSISCHE ELEKTRIZITÄTSKOMMISSION	2021	Dokumentation zur Sunshine-Regulierung 2020, ECom
GABLER	2019	Gabler Wirtschaftslexikon, Springer Fachmedien
GILBERT, KAHN	1998/2006	International Comparisons of Electricity Regulation, Cambridge University Press
KÜHN	2006	Yardstick Regulierung für Verteilnetzbetreiber, Oldenburg Industrieverlag
PEREZ - ARRIAGA (EDITOR)	2013	Regulation of the Power Sector, Springer
SHLEIFER	1985	A Theory of Yardstick Competition; The RAND Journal of Economics, Vol.16, No.3 (Autumn, 1985), pp. 319-327

# Energienetz - Regulierungssysteme

## Titelbild – Überblick IST-Regulierungssysteme



### Nat. Netzerlöse\*

	≈ 38 Mrd. €/a
	≈ 21 Mrd. €/a
	≈ 4,1 Mrd. €/a
	≈ 3,2 Mrd. €/a

\* s. Vorlesung 05

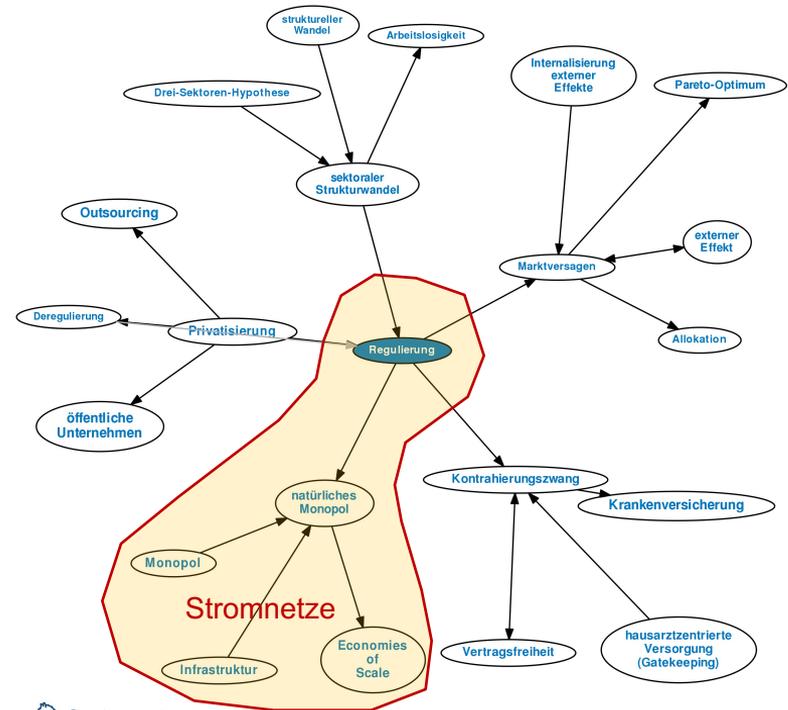
Systemerhaltung

# Rückblick -Regulierung

## Regulierung

- Definition - ‘Gesetzgeberische Maßnahmen zur Verhaltensbeeinflussung von Wirtschaftssubjekten mit dem Ziel der Korrektur oder Vermeidung unerwünschter Marktergebnisse.’
- Erläuterungen – ‚Regulierung bezeichnet Verhaltensbeeinflussung von Unternehmen und Konsumenten durch gesetzgeberische, meist marktspezifische Maßnahmen mit dem Ziel der Korrektur bzw. Verhinderung von vermuteten Marktversagen, z.B. monopolistischen Machtmissbrauchs und ruinöser Konkurrenz. Regulierung bezieht sich im Wesentlichen auf Marktzugang, Preise, Qualität ...‘

[Quelle – Gabler Wirtschaftslexikon]



Springer Gabler

Quelle: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/regulierung-46038>

# Rückblick - Regulierung - Stromnetze - Netzkosten

## Regulierungsfrage II - Was sind die sachgerechten Kosten für den Netzbetrieb ?

### Randbedingungen für ein Regulierungssystem

1. Es gilt das energiewirtschaftliche Dreieck
2. Der Netzbetrieb erfolgt im natürlichen Monopol
3. Die Versorgungsaufgabe ist für alle Netzbetreiber gleich
4. Das Produkt ist für alle Netzbetreiber identisch
  - ~ absolute Bedingungen
5. Die Kostenfunktionen sind NE-spezifisch
6. Die nat. Netzbetreiberstruktur ist nicht NE-orientiert bestimmt
7. Größenvorteile in einzelnen NE -> **Economies of Scale** bei CAPEX und OPEX

[s. Vorlesung 05| 2021]

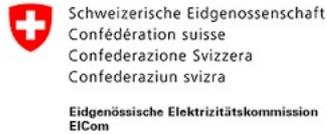
### Anforderungen an ein Regulierungssystem

1. **Ziel** - Finden der **sachgerechten** Netzkosten
  - ~ das ist eine **absolute** Fragestellung, d.h. EURO/Netzteil
2. Sachrechte Kosten-Zuordnung zu Netzbetreibern in einer regulatorisch zufälligen und zeitlich nicht konstanten Struktur
3. Wettbewerb - Finden **effizienter** Netzbetriebs-Kosten
  - ~ das ist, mit den standard-betriebswirtschaftlichen Benchmarking-Methoden, eine **relative** Fragestellung, d.h. EURO-Vergleich zwischen –vergleichbaren- NB
4. Verhindern eines Auscashes\* der Netzinfrastruktur
5. Berücksichtigung von Größeneffekten

\* Managementbegriff – Ausstieg eines Investors aus einem Geschäft, ggf. zu Lasten der getätigten Investitionen im Unternehmen

# Regulierungssystem - Stromnetze

## Europäische Stromnetzregulatoren (Auswahl)

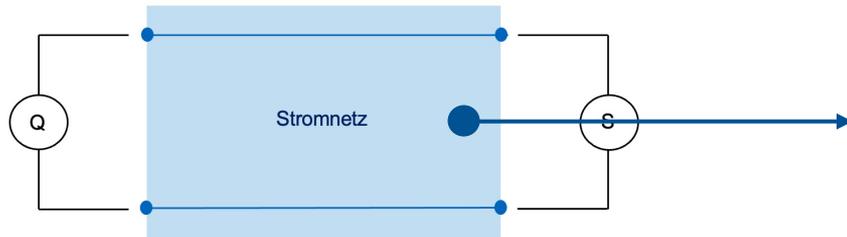


# Regulierungssystem - Stromnetze

Regulatorisches externes Oberziel – Gesellschaft / Politik

- Was sind die sachgerechten Netzbetriebskosten ?

~ grundlegende Systemerhaltung



## Anmerkung zum Oberziel

- keine volkswirtschaftliche Nachhaltigkeit ~ z.B. Blackouts
- keine klimatische Nachhaltigkeit ~ z.B. Erzeugung D und F

## Volkswirtschaft

- Vermeidung Missbrauch im natürlichen Monopol

## Betriebswirtschaft

- Netzkosten
- Netzpreise
- Wettbewerbsanalyse

## Ökologie

- Netzzugang für die regenerativen Erzeugungstechnologien

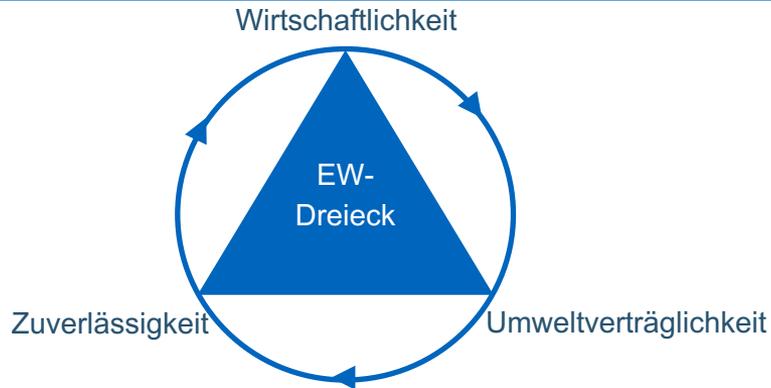
## Technik

- Qualitätssicherung in der Technologie I – nat. zusammenhängendes Stromnetz

# Regulierungssystem – Regulator ↔ Netzbetreiber

## „Dreiecke“ in der leitungsgebundenen Energiewirtschaft

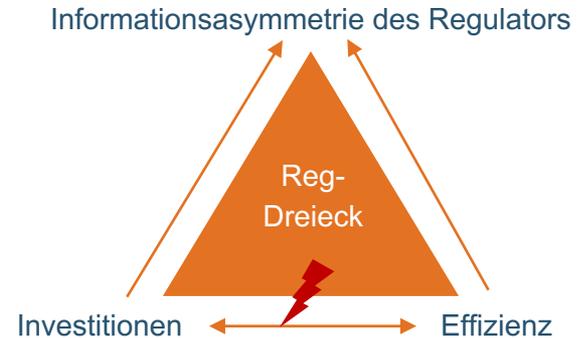
energiewirtschaftlich



- Unklarheit über die Wirkungsweise der drei Variablen
- Annahme - Es handelt sich um eine Kostenfunktion, d.h.  $C_{EW}(t) = C_{EW}(w(t), z(t), u(t))$ , die zu jedem zeitlichen Fixpunkt ein Minimum annehmen soll.

[s. Vorlesung 05]

regulatorisch



- Oberziel – Bestimmung der sachgerechten Netzkosten
- ~ Bei jeder NB bestimmten Kostenermittlung hat der Regulator einen systembedingten Nachteil
- ~ Kosten sind eine individuell-substantielle Größe eines NB
- ~ Ein (nat.) Regulator i.d.R. gegen mehrere NB
- ~ Regulatorische Informationsasymmetrie ~ s.u.

# Regulierungssysteme - Überblick

## Systeme im Einsatz

Oberziel	IST-Systeme / Entwicklungsstufen	Eigenschaften - Einordnung
Finder der sachgerechten Netzkosten	4. Kombinationssysteme	
Informationsasymmetrie (Regulator)	3. Anreizregulierung II	
	2. Anreizregulierung I	
	1. Kostenregulierung	

# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Systemvarianten

### 1.1 System – cost plus

- Feststellung der **betriebsnotwendigen** Kosten eines NB
- Grundsätzliche Akzeptanz der Asset-Base
- **Marktübliche Verzinsung** des eingesetzten Kapitals als Kostenzuschlag
- Genehmigung von spezifischen Netzpreisen auf der Basis der Gesamtkosten -> **Price-Cap-Regulation**
- ~ **Inflationwirkung ?**
- Einführungssystem zur Netzregulierung im natürlichen Monopol, -Angleichungssystem für heterogene NB-Struktur

### 1.2 System - rate of return (-> Rendite)

- wie cost plus
- wie cost plus
- Angemessene Vergütung/Verzinsung auf das eingesetzte Kapital - Verzinsung **muss nicht marktüblich** sein
- ~ **Potenzialentfaltung in einem Regulierungssystem der Zukunft**
- wie cost plus
- wie cost plus

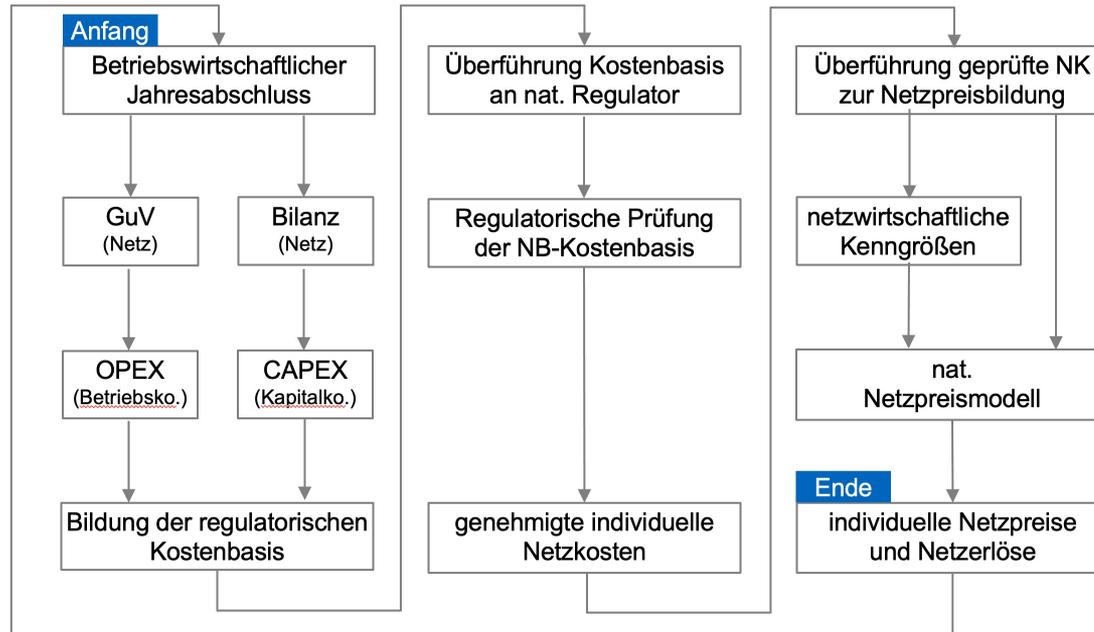
# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Kostenstrukturen

Begriffe – universelle BW	Kostenstruktur eines Netzbetreibers (z.B. D)	Erläuterungen
<p>OPEX - Operational Expenditures</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ lfd. Betriebsausgaben</li> <li>↷ keine Abschreibungen</li> </ul>		<p>1 FK-Zinsen für Investitionen wirken kostenmindernd</p> <p>2 gewöhnliche nat. Steuern/Abgaben sind ansetzbar</p>
<p>CAPEX - Capital Expenditures</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Investitionen in Anlagegüter</li> <li>↷ Regulated Asset-Base</li> <li>↷ Erhöhung Aktiva</li> </ul>		<p>3 nicht aus eigenem Betrieb</p> <p>4 → CAPEX - RAB</p> <p>5 Bezahlung von Anlagenteilen durch Nutzer, z.B. Windpark</p> <p>6 nat. Sonderabgaben</p>
<p>TOTEX - Total Expenditures</p> $TOTEX = \lambda_1 CAPEX + \lambda_2 OPEX$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Annahmen für NB-Verteilung</li> <li><math>OPEX \geq 0,5 \cdot TOTEX</math></li> </ul>	<p>↷ Anlage zum Finden der sachgerechten Netzkosten.</p> <p>↷ Warum ?</p>	<p>7 Unternehmerischer Gewinn</p>

# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Prozess (Grundlage deutsches Modell)



### Erläuterungen zum Prüfungszyklus

- |    |   |
|----|---|
| 1. | Anfang – betriebswirtschaftlicher Jahresabschluss Netz  |
| 2. | Bildung der spez. regulatorischen Kosten-basis (i.d.R. ungleich betriebswirtschaftlicher Abschluss)                               |
| 3. | Regulatorisch Prüfung der eingereichten Netzkosten  |
| 4. | genehmigte Netzkosten   |
| 5. | Bildung der spez. Netzpreise  |
| 6. | Ende – Veröffentlichung Netzpreise und Einnahme Netzerlöse beim Nutzer für das betrachtete Zeitintervall, i.d.R. ein Kalenderjahr |

# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Systemeigenschaften nach inhaltlichen Merkmalen

### 1) Volkswirtschaft

- **Marktsituation - Aktivitäten im natürlichen Monopol**
  - ↷ grundlegend kein Wettbewerb
  - ↷ Missbrauchspotential für NB vorhanden/nutzbar
  - ↷ kein Kundenwechsel möglich
  - ↷ Netzpreise sind nicht Ergebnis eines Effizienz-Wettbewerbs
- **EW-Dreieck**
  - ↷ Wirtschaftlichkeit Markt → s.o.
  - ↷ Wirtschaftlichkeit Risiko → Wirkungen signifikanter Ausfälle der Energielieferungen ?
  - ↷ Zuverlässigkeit → i.d.R. Erfüllung der Nutzerbedürfnisse
  - ↷ Umweltverträglichkeit i.S. der Herstellerprodukte und Einhaltung originärer gesetzlicher Auflagen

### 2) Betriebswirtschaft

- **Technologie - Netzkupferplatte**
  - ↷ grundlegende Befriedigung der energiewirtschaftliche Interessen von Erzeugern und Nutzern
- **Kosten**
  - ↷ Erstattung aller Netzkosten, CAPEX und OPEX
  - ↷ geringe Betriebsrisiken
  - ↷ Margen/Gewinne für alle möglichen Geschäftssituationen  $> 0$

### 3) Ökologie

- **rechtliche Vorgaben** → Einhaltung

### 4) Nachhaltigkeit

- **klimatisch** → Einhaltung rechtlicher Vorgaben
- **volkswirtschaftlich** → keine Berücksichtigung → 1)

# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Systemeigenschaften nach Akteuren (I)

### 5) Nutzer

- **Netzpreise**  
 ~ regulatorisch genehmigte Netzpreise sind zu bezahlen
- **Systemrisiken**  
 ~ sind vom Nutzer nicht zu beeinflussen
- **Entschädigungen**  
 ~ keine bei ‚Stromausfällen‘
- **Konsumentenrente**  
 ~ minimal

### 6) Netzbetreiber

- **Netzkosten - Bottom-Up-Ermittlung durch NB**  
 ~ Weitegehende regulatorische Anerkennung betriebsnotwendiger Kosten

- **Unternehmerisches Risiko - gering**

- ~ kein Investitionsrisiko, Mittelrückfluss praktisch garantiert
- ~ kein Inflationsrisiko, Netzpreise floaten mit

- **Netz-Kunden**

- ~ keine Kundenverluste, kein Kundenkontakt im Erlösbereich

- **Produzentenrente**

- ~ maximal

- **Renditeerwartungen**

- ~ bei cost-plus-System (1.1) ~ marktüblich
- ~ bei rate-of-return-System (1.2) ~ **regulatordefiniert** ~ NB-Risiko ~ Asset-Owner-Risiko ~ **‚Achilles-Ferse‘ des NB**
- ~ NB-interne Kapitalverzinsungsanforderungen müssen nicht erfüllt werden

# Regulierungssysteme - Kostenregulierung

## Systemeigenschaften nach Akteuren (II)

### 7) Regulator

- Netzpreise/Netzentgelte
- ~ i.d.R. Netzpreisgenehmigungen
- Investitionen – NB
- ~ Überinvestitionen ~ Anstieg der Netzkosten - CAPEX und OPEX → Wartung ~ Anstieg der Netzqualität, der technischen Verfügbarkeit
- ~ Unterinvestitionen ~ Absenkung der Netzkosten, kurzfristig nur CAPEX-Wirkung ~ Reduktion der Netzqualität, der technischen Verfügbarkeit
- ~ regulatorisches Oberziel-Dilemma - Finden der sachgerechten Netzkosten
- Auscashen – des Netzbetriebes durch NB

- ~ NB erreicht hohe Renditen, da weniger Neuinvestitionen
- ~ Substanzverlust im Anlagenbestand
- ~ regulatorische Verhinderung schwierig -> Informationsasymmetrie
- ~ **Achilles-Ferse' des Regulators**
- Effizienz – im Netzbetrieb
- ~ regulatorisch unbestimmt

### Gesamtsystem

- ~ grundsätzlich auf Systemerhaltung ausgelegt
- ~ Bestimmung von absoluten Netzkosten der NB
- ~ nahe System vor der Regulierung ~ Wertschöpfungskette, d.h. cost-plus-fee System
- ~ Systemveränderung in der ‚rate-of-return‘ - Regulierung möglich

# Regulierungssysteme

## Systemwechsel



**Kostenregulierung**



**Anreizregulierung**

# Energierrechtliche Grundlagen

Dr. iur. Frank Eßlinger/Michael Hill

München, 4. Juni 2021

## Quellen

- Präsentation „Grundlagen und aktuelle Entwicklungen des Energierichts“ von Rechtsanwalt Michael Hill
- Stuhlmacher, Stappert, Schoon, Jansen: Grundriss des Energierichts



# Was verstehen wir unter Energierecht?

- Energierecht ist das Recht der leitungsgebundenen Energieversorgung mit Elektrizität und Gas (*sowie Wasser und Fernwärme*).
- Hintergrund ist die gemeinsame Wurzel der grundsätzlichen „Daseinsvorsorge“
- Heute im Fokus: Elektrizität

# Was verstehen wir unter Energierecht?

## **Energierecht im weiteren Sinn:**

alle Gesetze/Regelungen, die sich auf die Energieerzeugung und -Versorgung auswirken:  
 Energiewirtschaftsrecht, Energiekartellrecht, Energieverbraucherschutzrecht,  
 Energieumweltrecht, Energiesicherheitsrecht, Energiesteuerrecht.

daneben: Völkerrecht (Euratom, EGKS, Energiecharta), Grundgesetz,  
 Baurecht, BGB, BörsenG, KWG, StGB, WEG, Wertpapierhandelsgesetz

**Energierecht im engeren Sinn:** Energiewirtschaftsgesetz und seine Ausführungsverordnungen

# Energierrecht durch Bundesregierung, BNetzA/Verbände

## **Bundesregierung (auch einzelne Ministerien)**

- ARegV (Bundesregierung)
- Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung (BMWV)

**BNetzA** kann mit „Festlegungen“ Regelungen Einzelthemen treffen (§ 29 Abs. 1 EnWG):

- GPKE
- WiM

Festlegungen haben „Normcharakter“ und sind verbindlich einzuhalten. Bei deren Nichteinhaltung kann ein Missbrauchsverfahren eingeleitet werden.

**Technische Vereine:** zB Vorgaben zur Eichung von Messgeräten

**Verbände:** veröffentlichen nicht verbindliche „Leitfäden“, zB zur Abwicklung des EEG

# Historische Entwicklung des Energierechts

Von 1935 bis 1998 war die Energiewirtschaft reine „Monopolwirtschaft“

- Erzeugung teilweise auch Privat
- Netz und Vertrieb mittels Demarkationsverträgen „exklusiv“ im jeweiligen Gebiet.
- „Tarife“ wurden genehmigt.

1991: Stromeinspeisungsgesetz

**1998: Deregulierung Strom:** Verhandelter Netzzugang, Verbändevereinbarungen

# Wettbewerb bei Stromerzeugung und Handel/Vertrieb



**Erzeugung**



**Netzbetrieb**



**Handel / Vertrieb**

Hier nur Wettbewerb um Netz herum sinnvoll, nicht um das günstigste Netz, nicht um den Anschluss (keine Parallelnetze)!

# Historische Entwicklung des Energierechts

2000: Erstes EEG

2002: KWKG

2005: Unbundling: Rechtliche, Organisatorische, Buchhalterische und Informationelle Trennung von Netz und Vertrieb

2011: „Unbundling 2.0“, Änderungen GVV

2012: Weitere Änderungen EnWG und EEG („PV-Novelle“)

2014: Neues EEG 2014, Weitere Änderungen GVV

2016: Strommarktgesetz, EEG 2017, KWKG 2017, Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, geänderte Anreizregulierung, etc.

2017: Neues Energie- und Stromsteuergesetz, „Interimsmodell“ Geschäftsprozesse, Mieterstromgesetz

# Entwicklung des EnWG

## **EnWG 1935** (35 Paragraphen)

Ziel: Sichere, Flächendeckende **Elektrifizierung** Deutschlands, dezentrale Erzeugung

Mittel: Gebietsmonopole, ausschließliche Konzessionsverträge

„volkswirtschaftlich schädigende Auswirkungen des Wettbewerbs“ sollten vermieden werden.

## **EnWG 1998** (19 Paragraphen!)

Ziel: **Wettbewerb** in der Energiewirtschaft (zunächst Strom), wo möglich; Günstige, sichere Versorgung mit Strom und Gas

Mittel: Aufhebung Gebietsmonopole, Durchleitung mittels verhandeltem Netzzugang

# Wettbewerb bei Stromerzeugung und Handel/Vertrieb



**Erzeugung**



**Netzbetrieb**

Hier nur Wettbewerb um Netz herum sinnvoll, nicht um den Anschluss (z.B. Parallelnetze)!



**Handel / Vertrieb**

# Entwicklung des EnWG

**EnWG 2005** (118 Paragraphen!):

Ziel: **Wettbewerb** in der Energiewirtschaft, wo möglich; **Günstige, sichere, verbraucherfreundliche** und **umweltbewusste** Versorgung mit Strom und Gas – Verschärfung des Wettbewerbs!

Mittel: **Unbundling** (Entflechtung) von Netzbetrieb und Vertrieb

**EnWG 2012** (aktuell 221 Paragraphen!)

Ziel: **Wettbewerb** in der Energiewirtschaft, wo möglich; **Günstige, sichere, verbraucherfreundliche** und **umweltbewusste** Versorgung mit Strom und Gas, die auf **erneuerbaren Energien** beruht!

Mittel: Weiteres Unbundling, neues Messwesen, neue Vorgaben Leitungsplanung, neue Verbraucherschutzregeln...

# Stromerzeugung Kernenergie

Das Atom-Gesetz zur Regelung der Kernenergie in Deutschland wurde auf Basis der Euratom Verträge verabschiedet und regelt die Anforderungen an den Betrieb von Kernkraftwerken in Deutschland.

Grundsatz, Kernenergie so sicher wie möglich zu nutzen, durch:

- Erteilung/Entzug von Betriebsgenehmigung
- z.B. Regulierung von Einfuhr und Ausfuhr von Brennstoffen
- Haftung für Kernkraftwerke und Prozesse
- Meldepflichten

Ende der Kernenergieerzeugung in Deutschland am 1. Januar 2023 (Verstoß gegen Euratom-Vertrag?).

# Stromerzeugung konventionell (Kohle, Gas, Wasser)

Neben dem im EnWG geregelten Kraftwerksregularien (systemrelevante KW, etc.) gibt es noch viele – v.a. Umweltschutzrelevante – Kraftwerksspezifische Regelungen. Dies sind u.a.:

- Immissionsschutzrecht (BImSchG)
- Emissionsschutzrecht
- Vorgaben zur Gewässernutzung (Wasserhaushaltsgesetz, BayWG)
- Eigene Regelungen zur Bau- und Raumplanung
- Potentielle Enteignung zum Bau von Kraftwerksanlagen, wenn diese dem öffentlichen Wohl dient
- Zukaufspflicht von Verschmutzungszertifikaten

Je nach Kraftwerkstyp verschiedene Zulassungsvoraussetzungen

# Stromerzeugung – Emissionsrechte

Zur Verringerung des Ausstoßes von CO<sub>2</sub> ist in Europa ein Handelssystem mit „Verschmutzungsrechten“ eingeführt worden. Folgende Eckpunkte (nach TEHG):

- Anlagen haben einen „Emissionswert“
- Zuteilung von kostenfreien Zertifikaten unter Berücksichtigung eines Kürzungsfaktors
- Seit 2013: Erzeugungsanlagen in der Energiewirtschaft ab einer Feuerungswärme von 20 MW (bei Verbrennung gewisser Stoffe) keine kostenfreie Zertifikate mehr
- Zertifikate werden an der Börse gehandelt und müssen für den Emissionswert beschafft werden
- Zudem muss eine Anlagenspezifische Emissionsminderung erreicht werden

# Stromerzeugung – Emissionsrechte: Was hat es gebracht?

Die Entwicklung der Börsenpreise für CO<sub>2</sub> hatte lange keine Auswirkung auf die sog. „Merit Order“, also die Reihenfolge der Bestellung von Erzeugungskapazitäten.

Daher waren lange diejenigen **fossilen** Kraftwerke mit dem günstigsten Energieträger im Markt: Braunkohle.

Der Plan war dann diese Kraftwerke mit einer gesonderten Klimaabgabe zu belasten. Damit wären die CO<sub>2</sub>-Kosten gestiegen und die Kraftwerke nicht mehr lukrativ geworden.

Auf Widerstand der Bundesländer, in welchen Braunkohle-Kraftwerke stehen (NRW, Thüringen, Brandenburg, u.a.) wurde die Klimaabgabe nicht weiter verfolgt.

Aktuell starker Preisanstieg für CO<sub>2</sub> Zertifikate

# Stromerzeugung – EEG-Anlagen

Ein Großteil der Erzeugung besteht heute aus vorrangig einzuspeisenden und abzunehmenden EEG-Anlagen, die Strom erzeugen mit:

- Wasserkraft,
- Solarenergie,
- Windenergie,
- Geothermie,
- Biomasse.

EEG-Anlagen dürfen immer vorrangig einspeisen, für 20 Jahre nach Inbetriebnahme, dh die Netzbetreiber müssen den Strom abnehmen und an der Börse verkaufen (zu jedem Preis und zu jeder Zeit). Folge: Negative Strompreise!!!

Einspeisevergütung bei Inbetriebnahme ab 1.4.2021:

- Solar Dach: 7,81 Ct./kWh
- Solar Außenbereich 5,35 Ct./kWh

EEG-Umlage 2021: 6,5 Ct./kWh

# Stromerzeugung erneuerbar – zB Biomasse

[Gesetze im Internet \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de)

[§ 42 EEG 2021 - Einzelnorm \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/342_EEG_2021.html)

[§ 2 BiomasseV - Einzelnorm \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/BiomasseV_2021.html)

[§ 3 BiomasseV - Einzelnorm \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/BiomasseV_2021.html)

[§ 44 EEG 2021 - Einzelnorm \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/44_EEG_2021.html)

# Wettbewerb bei Stromerzeugung und Handel/Vertrieb



**Erzeugung**



**Netzbetrieb**

Hier nur Wettbewerb um Netz herum sinnvoll, nicht um den Anschluss (z.B. Parallelnetze)!



**Handel / Vertrieb**

# Entflechtung Übertragungsnetz – EU Binnenmarktpaket

Vor EU-Binnenmarktpaket **Unbundling** „light“, dh Trennung Netzbetrieb von anderen Funktionen, dann **EU-Binnenmarktpaket 2009 Übertragungsnetz (220/380 kV) mit folgenden Möglichkeiten:**

- Ownership-Unbundling, integrierte Energiekonzerne müssen Übertragungsnetz verkaufen
- Independent System Operator (ISO) im integrierten Unternehmen: Netzbetreiber (ISO) und Netzeigentum sind rechtlich getrennt, Netzeigentümer kann am ISO beteiligt sein, Netzbetreiber beschließt/Netzeigentümer finanziert Investitionen (hat sonst wenig zu sagen)
- Independent Transmission Operator (ITO) im integrierten Unternehmen: Netzeigentum und – betrieb werden auf ITO übertragen, Eigentümer des ITO idR eine Holding, Einfluss über AR vorhanden
- In allen Fällen: Netz muss nach allgemeinen Kriterien diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt werden

# Stromübertragung – Genehmigungen, Leitungsrechte

- Genehmigungen?
- Leitungsrechte
  - Gestattungsverträge mit Entschädigungen
  - Dienstbarkeiten (im Grundbuch eingetragen), Entschädigungen

# Entflechtung Verteilungsnetz

- Verteilnetzbetreiber muss unabhängig sein
- kann im integrierten Konzern bleiben
- darf im integrierten Konzern auf „shared services“ zurückgreifen
- muss sich von Vertrieb-/Versorgungssparte unterscheiden, zB durch Namen/Logo
- eigener Internetauftritt
- in allen Fällen: Netz muss diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt werden
- Zuständigkeit für Stromablesung?

# Stromverteilung – Genehmigungen/Leistungsrechte

## Genehmigungen?

## Leistungsrechte

- **Öffentliche Wege**
  - Verteilnetzbetrieb vereinbart mit Gemeinde exklusives Nutzungsrecht der öffentlichen Wege
  - Nutzungsrecht heißt „Konzession“, also „Konzessionsverträge“, max. 20 Jahre
  - Für Nutzung zahlt Netzbetreiber „Konzessionsabgabe“ nach Konzessionsabgabenverordnung (Betrag / kWh).
  - **Einziger Wettbewerb im Netzbereich:** nach Ablauf werden Konzessionsverträge von Gemeinde öffentlich ausgeschrieben, keine Nebenleistungen
  - Netzbetreiber, der Konzession verliert, muss Netz an neuen Netzbetreiber übereignen (ewiger Streitpunkt: Wert des zu übertragenden Netzes)
- **Privatgrund**
  - Privatrechtliche Gestattungen
  - Dienstbarkeiten (im Grundbuch eingetragen)

# Stromübertragung und -verteilung – Netzentgelte

Netzentgelte für Netznutzung des Netzes zu entrichten (Netzmiete), auf Grundlage der von Regulierungsbehörden genehmigten Kosten. Sie umfassen die Vorhaltung und den Betrieb des Netzes.

Netzentgelte variieren nach Spannungsebenen (Hoch-, Mittel- und Niederspannung). Bei Haushaltskunden machen sie rund ein Drittel des Strompreises aus

Die Höhe der Netzentgelte hängt ab von:

- Kosten für Errichtung, Instandhaltung und Betrieb des Netzes
- Kosten für Kunden- und Laststruktur des Netzes
- Geographische Besonderheiten
- Kosten vorgelagerter Netze
- Eigenkapitalverzinsung

## Warum haben Netzbetreiber voneinander abweichende Netzentgelte?

- Keine „Briefmarke“
- Netzentgelte sind abhängig von der individuellen Struktur des Netzes.
- Unterschiede bei Kundenzahl, Stromverbrauch, geographischen Gegebenheiten und Investitionen beeinflussen die Kosten für die Unterhaltung des Netzes und damit die Höhe der Netzentgelte.
- In Ostdeutschland liegen die Netzentgelte tendenziell (noch) höher als in Westdeutschland.

# Stromübertragung und -verteilung - Netzentgelte

Die Entwicklung der Netzentgelte heute definiert durch die **Anreizregulierung** (ARegV), was heißt das?

- Früher (vor 2009) **Preisobergrenze**:
  - Obergrenze/MWh transportierten Strom
  - Anreiz zur Erhöhung der Transportmenge
- Heute **Erlösobergrenze**:
  - Obergrenze für Jahreserlöse (= Umsatz) eines Netzbetreibers über Regulierungsperiode (fünf Jahre, aktuell bis 2023)
  - Obergrenze wird festgelegt auf Basis historischer Kosten (Fotojahr), kann der Netzbetreiber seine Kosten darunter senken, darf er die Differenz bis zum Ende der Regulierungsperiode behalten
  - Also Anreiz zur Kostensenkung, kein Anreiz zur Erhöhung der Transportmenge

# Netzentgelte - Streitthemen

- Was sind angemessene Kosten?
  - Nicht beeinflussbare Kosten:
    - Konzessionsabgaben
    - Steuern
  - Beeinflussbare Kosten: alles was nicht beeinflussbar ist
  - Umgang mit Konzernumlagen
  - Angemessene Eigenkapitalverzinsung

# Verträge in der Elektrizitätswirtschaft

## Netzverträge:

- Netzanschlussvertrag: zwischen Grundeigentümer (auch Kraftwerke) und Netzbetreiber
- Anschlussnutzungsvertrag: Grundeigentümer (auch Kraftwerke)/Mieter und Netzbetreiber
- Netznutzungsvertrag:
  - zwischen 1. Letztverbraucher (= idR Industrie) und Netzbetreiber 2. Händler und Netzbetreiber
  - Lösung für Haushalte: **Lieferantenrahmenvertrag** zwischen Stromlieferant und Netzbetreiber

## Beispiel Kraftwerkanschluss:

- Geregelt in KraftNAV
  - Kraftwerk ab 100 MW
  - Anspruch auf Anschluss auf 110 kV oder mehr („Kontrahierungszwang“)

# Verträge in der Elektrizitätswirtschaft

- **Stromliefervertrag:** was ist das eigentlich?
  - Kein Kaufvertrag nach § 433 BGB, da keine Sache (anders Gas)
  - Aber: Behandlung wie Kaufvertrag (§ 453 BGB: Kaufrecht gilt für Kauf von „sonstigen Gegenständen“)
  - Behandlung von „Mängeln“

# Verträge in der Elektrizitätswirtschaft

## Handelsverträge

- zwischen Importeuren, Exporteuren, Erzeugern, Brokern und Versorgungsunternehmen, also Kauf / Verkauf von Ansprüchen auf Energielieferungen in der Zukunft, entweder als
  - Termins- oder
  - SpotgeschäftNicht nur die physikalische Erfüllung liegt im Fokus des Handels, sondern zB die Mitnahme von Kursschwankungs-Effekten
- Stromhandel an der Börse mit Standardhandelsprodukten
  - Terminmarkt: Erfüllungsansprüche in weiterer Zukunft, bis zu sechs Jahre, Wochen-, Monats-, Quartals- und Jahresfutures
  - Spotmarkt: Intraday oder Day-Ahead
- Derivate

# Verträge in der Elektrizitätswirtschaft

**Verträge mit Kunden** = Vertriebsverträge, also die Verschaffung eines Lieferanspruchs zur Erfüllung bei einem „Letztverbraucher“ oder Versorger (ugs.: „Lieferung“)

- Der „normale“ Stromliefervertrag heißt Norm (- Sonderkundenvertrag), § 41 EnWG
- Grundversorgungsverträge, §§ 36 EnWG, 1 Abs. 1 Satz 1 und 2 GVV
- Ersatzversorgungsverträge, §§ 38 EnWG, 1 Abs. 1 Satz 3 GVV
- Mieterstromvertrag mit Vermieter über Strom aus PV-Anlage
- Beschaffungsverträge

# Verträge in der Elektrizitätswirtschaft

**Verträge mit Kunden** = Vertriebsverträge, also die Verschaffung eines Lieferanspruchs zur Erfüllung bei einem „Letztverbraucher“ oder Versorger (ugs.: „Lieferung“)

- „Echte“ Sonderkundenverträge mit Letztverbrauchern
  - Gewerbekunden/Geschäftskunden
  - Industriekunden
  - Multi-Site-Verträge
  - „abschaltbare“ Verträge
- Streitthema: Preisanpassungsklauseln

# Vorlesung – Stromnetze

Energienetz - Regulierungssysteme | 07

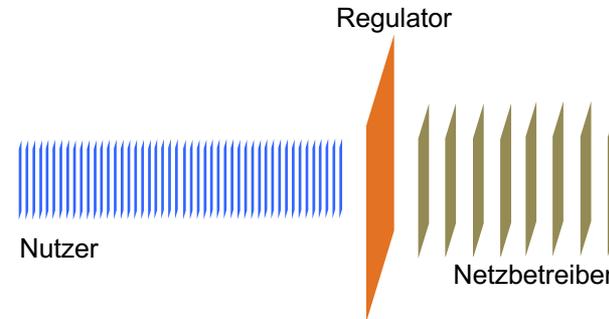
Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 28.05.2021



# Organisatorisches

## Vorlesung Stromnetze SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.	14:00 – 16:00	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.	14:00 – 16:00	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.	14:00 – 16:00	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.	14:00 – 16:00	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.	14:00 – 16:00	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.	14:00 – 16:00	Elektrische Energiespeicher - Verteilnetz	Murche
7	28.05.	14:00 – 16:00	Energiernetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.	14:00 – 16:00	Energierechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.	14:00 – 16:00	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.	14:00 – 16:00	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.	14:00 – 16:00	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.	14:00 – 16:00	Abschluss Vorlesungen und Fragestunde zu Prüfungen	Benthaus / Netter
13	05.- 07.07.	ganztägig	Prüfungen	Benthaus / Netter

# Literatur

## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze 07 (I)

BENTHAUS	2015	Schrittweise Evolution oder Quantensprung?, Bulletin electro suisse, VSE
BUNDESNETZAGENTUR BUNDESKARTELLAMT	2021	Monitoringbericht 2020, monitoring.energie@bundesnetzagentur.de
BUNDESNETZAGENTUR	2015	Evaluierungsbericht nach § 33 Anreizregulierungsverordnung, BNetzA
BUNDESNETZAGENTUR	2005	1. Referenzbericht Anreizregulierung, Price-Caps, Revenue-Caps und hybride Ansätze, BNetzA → WIK-Bericht Nr. 267
CLAUSEN, SCHEELE	2001	Benchmarking und Yardstick Competition - Ansätze vergleichenden Wettbewerbs in der Wasserwirtschaft, Universität Oldenburg
COOPER, SEIFORD, TONE	2006	Introduction to Data Envelopment Analysis and its Uses, Springer
EIDGENÖSSISCHE ELEKTRIZITÄTSKOMMISSION	2021	Dokumentation zur Sunshine-Regulierung 2020, EICom
GABLER	2019	Gabler Wirtschaftslexikon, Springer Fachmedien
GILBERT, KAHN	1998/2006	International Comparisons of Electricity Regulation, Cambridge University Press
KÜHN	2006	Yardstick Regulierung für Verteilnetzbetreiber, Oldenburg Industrieverlag
PEREZ - ARRIAGA (ED.)	2013	Regulation of the Power Sector, Springer

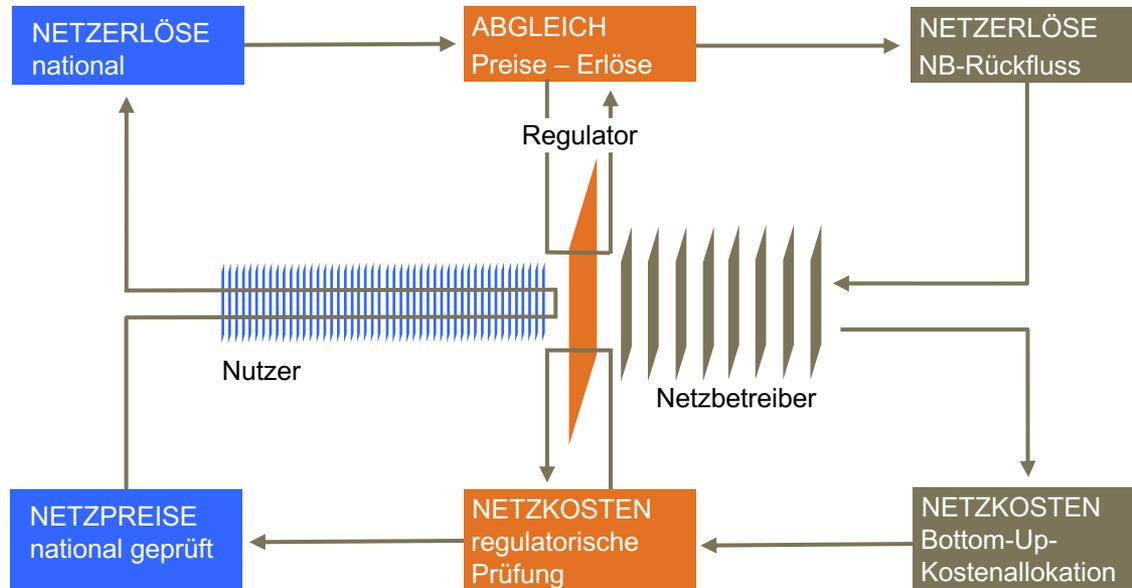
# Literatur

## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze 07 (II)

SHLEIFER	1985	A Theory of Yardstick Competition; The RAND Journal of Economics, Vol.16, No.3 (Autumn, 1985), pp. 319-327
WISSENSCHAFTLICHES INSTITUT FÜR INFRA- STRUKTUR UND KOMMUNIKATIONSDIENSTE	2005	Grundformen der Entgeltregulierung: Vor- und Nachteile von Price-Cap, Revenue-Cap und hybriden Ansätzen, WIK-Bericht Nr. 267, Autoren - Franz, Schäffner, Trage → BNetzA – Bericht 2005

# Energienetz - Regulierungssysteme

## Titelbild – Überblick IST-Regulierungssysteme



### Nat. Netzerlöse\*

	≈ 38 Mrd. €/a
	≈ 21 Mrd. €/a
	≈ 4,1 Mrd. €/a
	≈ 3,2 Mrd. €/a

\* s. Vorlesung 05

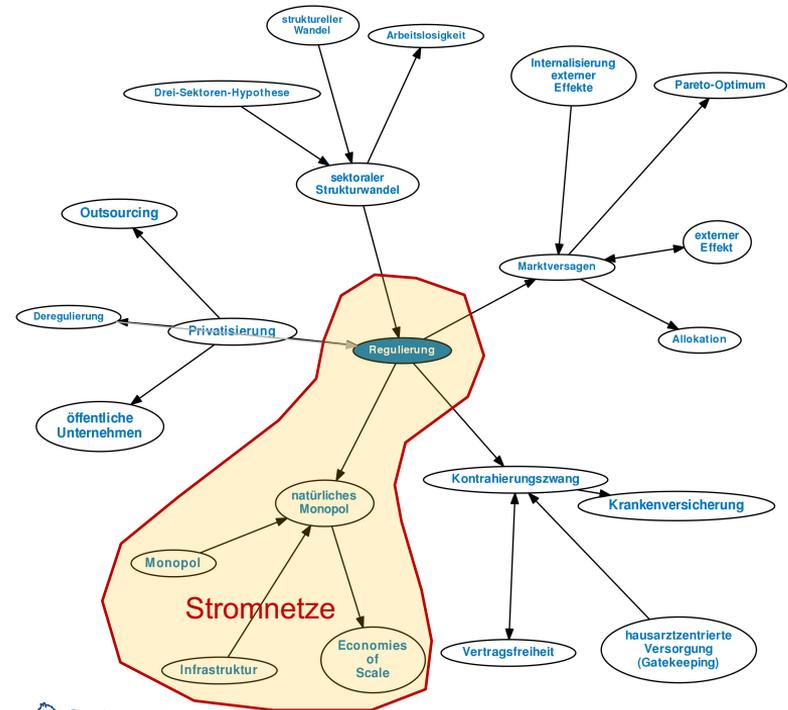
Systemerhaltung

# Rückblick -Regulierung

## Regulierung

- Definition - ‘Gesetzgeberische Maßnahmen zur Verhaltensbeeinflussung von Wirtschaftssubjekten mit dem Ziel der Korrektur oder Vermeidung unerwünschter Marktergebnisse.’
- Erläuterungen – ‚Regulierung bezeichnet Verhaltensbeeinflussung von Unternehmen und Konsumenten durch gesetzgeberische, meist marktspezifische Maßnahmen mit dem Ziel der Korrektur bzw. Verhinderung von vermuteten Marktversagen, z.B. monopolistischen Machtmissbrauchs und ruinöser Konkurrenz. Regulierung bezieht sich im Wesentlichen auf Marktzugang, Preise, Qualität ...‘

[Quelle – Gabler Wirtschaftslexikon]



Springer Gabler

Quelle: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/regulierung-46038>

# Rückblick - Regulierung - Stromnetze - Netzkosten

## Regulierungsfrage II - Was sind die sachgerechten Kosten für den Netzbetrieb ?

### Randbedingungen für ein Regulierungssystem

1. Es gilt das energiewirtschaftliche Dreieck
2. Der Netzbetrieb erfolgt im natürlichen Monopol
3. Die Versorgungsaufgabe ist für alle Netzbetreiber gleich
4. Das Produkt ist für alle Netzbetreiber identisch
  - ~ absolute Bedingungen
5. Die Kostenfunktionen sind NE-spezifisch
6. Die nat. Netzbetreiberstruktur ist nicht NE-orientiert bestimmt
7. Größenvorteile in einzelnen NE -> **Economies of Scale** bei CAPEX und OPEX

[s. Vorlesung 05 | 2021]

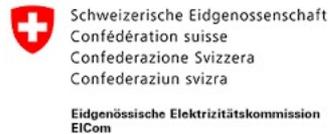
### Anforderungen an ein Regulierungssystem

1. **Ziel** - Finden der **sachgerechten** Netzkosten
  - ~ das ist eine **absolute** Fragestellung, d.h. EURO/Netzteil
2. Sachrechte Kosten-Zuordnung zu Netzbetreibern in einer regulatorisch zufälligen und zeitlich nicht konstanten Struktur
3. Wettbewerb - Finden **effizienter** Netzbetriebs-Kosten
  - ~ das ist, mit den standard-betriebswirtschaftlichen Benchmarking-Methoden, eine **relative** Fragestellung, d.h. EURO-Vergleich zwischen –vergleichbaren- NB
4. Verhindern eines Auscashes\* der Netzinfrastruktur
5. Berücksichtigung von Größeneffekten

\* Managementbegriff – Ausstieg eines Investors aus einem Geschäft, ggf. zu Lasten der getätigten Investitionen im Unternehmen

# Regulierungssystem - Stromnetze

## Europäische Stromnetzregulatoren (Auswahl)

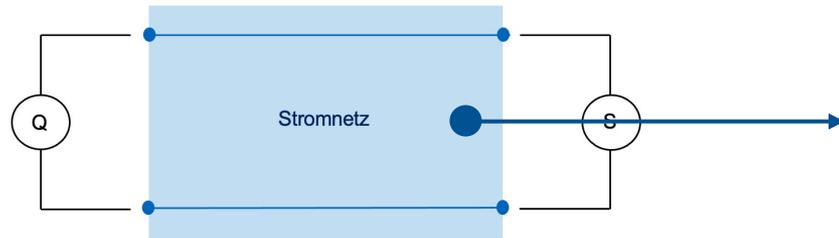


# Regulierungssystem - Stromnetze

**Regulatorisches externes Oberziel** – Gesellschaft / Politik

~ Was sind die sachgerechten Netzbetriebskosten ?

~ grundlegende Systemerhaltung



**Anforderungen an Regulatoren**

## Volkswirtschaft

- Vermeidung Missbrauch im natürlichen Monopol

## Betriebswirtschaft

- Netzkosten
- Netzpreise
- Wettbewerbsanalyse

## Ökologie

- Netzzugang für die regenerativen Erzeugungstechnologien

## Technik

- Qualitätssicherung in der Technologie I – nat. zusammenhängendes Stromnetz

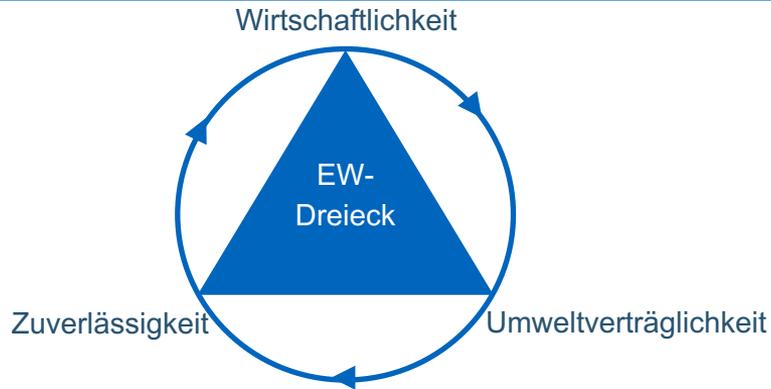
## Anmerkung zum Oberziel

- keine volkswirtschaftliche Nachhaltigkeit ~ z.B. Blackouts
- keine klimatische Nachhaltigkeit ~ z.B. Erzeugung D und F

# Regulierungssysteme

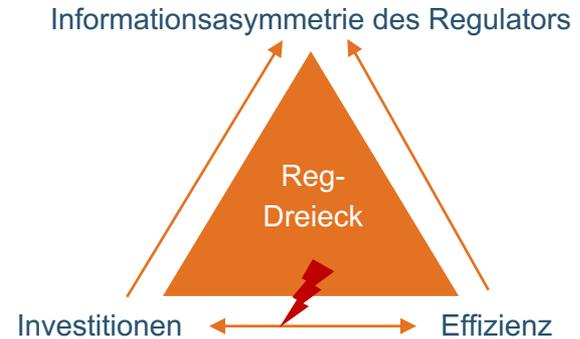
## „Dreiecke“ in der leitungsgebundenen Energiewirtschaft

energiewirtschaftlich



- Unklarheit über die Wirkungsweise der drei Variablen
- Annahme - Es handelt sich um eine Kostenfunktion, d.h.  $C_{EW}(t) = C_{EW}(w(t), z(t), u(t))$ , die zu jedem zeitlichen Fixpunkt ein Minimum annehmen soll.  
[s. Vorlesung 05]

regulatorisch



- Oberziel – Bestimmung der sachgerechten Netzkosten
  - Bei jeder NB bestimmten Kostenermittlung hat der Regulator einen systembedingten Nachteil
  - Kosten sind eine individuell-substantielle Größe eines NB
  - Ein (nat.) Regulator i.d.R. gegen mehrere NB
  - Regulatorische Informationsasymmetrie  $\sim$  s.u.

# Regulierungssysteme

## Systeme im Einsatz | ein Überblick

Oberziel	IST-Systeme / Entwicklungsstufen	Eigenschaften - Einordnung
<b>Finder der sachgerechten Netzkosten</b>	<b>4. Kombinationssysteme</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systementwicklungspfad – evolutionär 1. → 2. → 3. → 4. <math>\sim</math> Abnahme Informationsasymmetrie</li> </ul>
<b>Ziele</b>	<b>3. Anreizregulierung II</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostenregulierung – Einzelfallbetrachtungen   Nutzung absoluter Größen   Netzpreise (PCR)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der regulatorischen Informationsasymmetrie (Grenzkosten)</li> </ul>	<b>2. Anreizregulierung I</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anreizregulierung I – Branchenbetrachtung   sys. Effizienzbestimmung   rel. Größen   Netzerlöse</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung der Konsumentenrente</li> </ul>	<b>1. Kostenregulierung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anreizregulierung II – I + Reduktion der Informationsasymmetrie   PCR</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion von NB-Ineffizienzen</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Gewährleistung einer nat. akzeptierten Netzverfügbarkeit</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sicherstellung eines diskriminierungsfreien Netzzuganges aller Erzeuger</li> </ul>		

# Kostenregulierung (KR)

## Systemvarianten

### 1.1 System – cost plus

- Feststellung der **betriebsnotwendigen** Kosten eines NB
- Grundsätzliche Akzeptanz der Asset-Base
- **Marktübliche Verzinsung** des eingesetzten Kapitals als Kostenzuschlag
- Genehmigung von spezifischen Netzpreisen auf der Basis der Gesamtkosten -> **Price-Cap-Regulation (PCR)**
- ↳ **Inflationwirkung ?**
- Einführungssystem zur Netzregulierung im natürlichen Monopol – Angleichungssystem für heterogene NB-Strukturen

### 1.2 System - rate of return (-> Rendite)

- wie cost plus
- wie cost plus
- Angemessene Vergütung/Verzinsung auf das eingesetzte Kapital - Verzinsung **muss nicht marktüblich** sein
- ↳ **Potenzialentfaltung in einem Regulierungssystem der Zukunft**
- wie cost plus
- wie cost plus

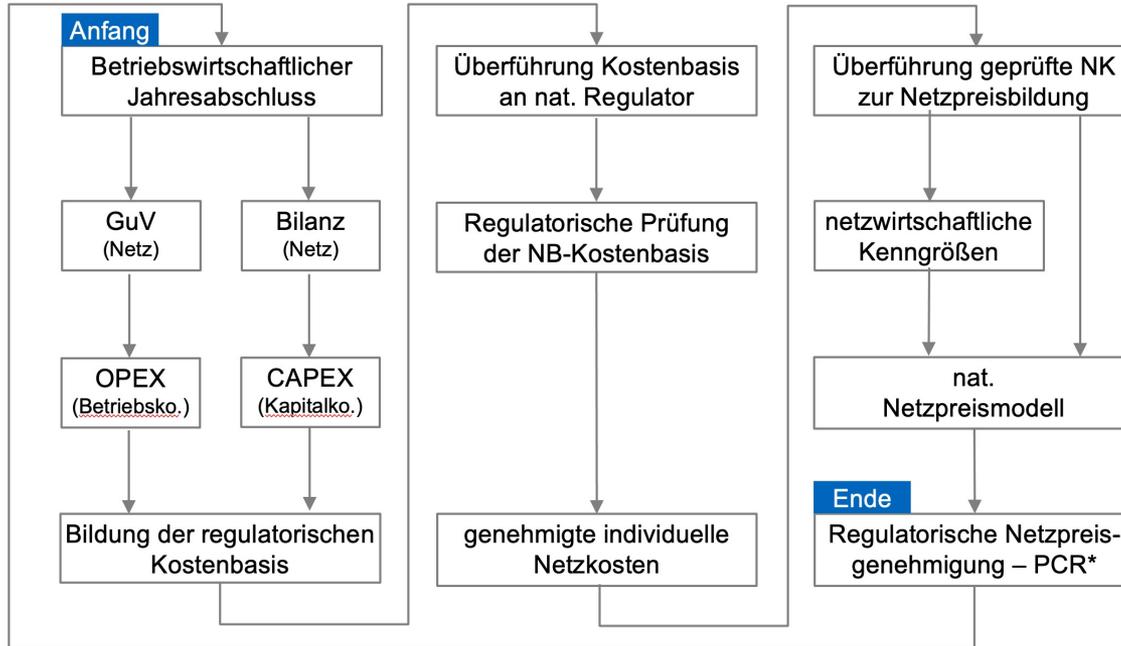
# Kostenregulierung

## Kostenstrukturen

Begriffe – universelle BW	Kostenstruktur eines Netzbetreibers (z.B. D)	Erläuterungen
<p>OPEX - Operational Expenditures</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ lfd. Betriebsausgaben</li> <li>– keine Abschreibungen</li> </ul>		
<p>CAPEX - Capital Expenditures</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Investitionen in Anlagegüter</li> <li>– Regulated Asset-Base</li> <li>– Erhöhung Aktiva</li> </ul>		<p>1 FK-Zinsen für Investitionen wirken kostenmindernd</p> <p>2 gewöhnliche nat. Steuern/Abgaben sind ansetzbar</p> <p>3 nicht aus eigenem Betrieb</p> <p>4 → CAPEX - RAB</p> <p>5 Bezahlung von Anlagenteilen durch Nutzer, z.B. Windpark</p> <p>6 nat. Sonderabgaben</p> <p>7 Unternehmerischer Gewinn</p>
<p>TOTEX - Total Expenditures</p> $TOTEX = \lambda_1 CAPEX + \lambda_2 OPEX$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Annahmen für NB-Verteilung</li> </ul> $OPEX \geq 0,5 \cdot TOTEX$	<p>~ Anlage zum Finden der sachgerechten Netzkosten.</p> <p>~ Warum ?</p>	

# Kostenregulierung

## Prozess (Grundlage deutsches Modell)



### Erläuterungen zum Prüfungszyklus

- |    |  |
|----|--|
| 1. | Anfang – betriebswirtschaftlicher Jahresabschluss Netz   |
| 2. | Bildung der spez. regulatorischen Kosten-basis (i.d.R. ungleich betriebswirtschaftlicher Abschluss)  |
| 3. | Regulatorisch Prüfung der eingereichten Netzkosten   |
| 4. | genehmigte Netzkosten  |
| 5. | Bildung der spez. Netzpreise   |
| 6. | Ende – Veröffentlichung genehmigter Netzpreise und Einnahme resultierender Netzerlöse beim Nutzer für das betrachtete Zeitintervall (Kalenderjahr) |

[Quellen – \*BNetzA 2005 | WIK-Bericht 267]

# Kostenregulierung

## Systemeigenschaften (I)

### Volkswirtschaft

- **Marktsituation - Aktivitäten im natürlichen Monopol**
  - grundlegend kein Wettbewerb
  - Missbrauchspotential für NB vorhanden/nutzbar
  - kein Kundenwechsel möglich
  - Netzpreise sind nicht Ergebnis eines Effizienz-Wettbewerbs
- **EW-Dreieck**
  - Wirtschaftlichkeit → keine Schaffung eines Marktes
  - Wirtschaftlichkeit Risiko → Wirkungen signifikanter Ausfälle der Energielieferungen ?
  - Zuverlässigkeit → i.d.R. Erfüllung der Nutzerbedürfnisse
  - Umweltverträglichkeit i.S. der Produkthaftung

### Betriebswirtschaft

- **Technologie - Netzkupferplatte**
  - grundlegende Befriedigung der energiewirtschaftlichen Interessen von Erzeugern und Nutzern
- **Kosten**
  - Erstattung aller Netzkosten, CAPEX und OPEX
  - geringe Betriebsrisiken
  - Margen/Gewinne für alle möglichen Geschäftssituationen  $> 0$
- **Erlöse**
  - Price-Cap-Regulierung (**unipolare PCR**) setzt regul. Preisobergrenzen, d.h. es gibt grundlegende Entkopplung von Gewinnen und Kosten **in und mit** einem Unternehmen
  - ggf. regul. Branchen-Effizienzanforderung, z.B.  $x_{gen} \rightarrow D$

# Kostenregulierung

## Systemeigenschaften (II)

### Ökologie

- Einhaltung rechtliche Vorgaben

### Nachhaltigkeit

- klimatisch
- Einhaltung rechtlicher Vorgaben
- volkswirtschaftlich
- keine Berücksichtigung
- keine Schadensersatzansprüche im Rechtssystem vorgesehen

### Nutzer

- Netzpreise
- regulatorisch genehmigte Netzpreise sind zu bezahlen
- Systemrisiken
- sind vom Nutzer nicht zu beeinflussen

### Entschädigungen

- keine bei ‚Stromausfällen‘

### Konsumentenrente

- minimal
- Grad der Trennung von Kosten und Erlösen gering

### Netzbetreiber

#### ▪ Netzkosten - Bottom-Up-Ermittlung durch NB

- Weitegehende regulatorische Anerkennung als betriebsnotwendige Kosten

#### ▪ Unternehmerisches Risiko

- gering
- kein Investitionsrisiko, Mittelrückfluss praktisch garantiert
- kein Mengen Inflationsrisiko durch regulatorische Anpassung

# Kostenregulierung

## Systemeigenschaften (III)

zu Netzbetreiber

- **Netz-Kunden**
  - keine Kundenverluste, kein Kundenkontakt im Erlösbereich
- **Produzentenrente**
  - maximal (im natürlichen Monopol) (s. Anlage A1)
- **Renditeerwartungen**
  - bei cost-plus-System (1.1) → marktüblich
  - bei rate-of-return-System (1.2) → **regulatordefiniert**
    - ↷ NB-Risiko ↷ Asset-Owner-Risiko
    - ↷ **„Achilles-Ferse“ des NB**
  - PCR – Risiko und –Chance
    - ↷ regulatorische Effizienzanforderung an **einen** NB

## Regulator

- **Netzpreise/Netzentgelte**
  - i.d.R. Netzpreisgenehmigungen
  - PCR → reduziert Informationsasymmetrie
- **NB – Investitionen**
  - Überinvestitionen möglich
    - ↷ Anstieg Netzkosten - CAPEX und OPEX
    - ↷ Anstieg der Netzqualität, der technischen Verfügbarkeit
  - Unterinvestitionen möglich
    - ↷ Absenkung Netzkosten, kurzfristig nur CAPEX-Wirkung
    - ↷ Reduktion der Netzqualität, der technischen Verfügbarkeit
- **Investitionsverhalten der NB als Teil des regul. Oberziel-Dilemmas - Finden der sachgerechten Netzkosten**

# Kostenregulierung

## Systemeigenschaften (IV)

zu Regulator

- **Auscashen** – des Netzbetriebes durch NB möglich
- (kurzfristig) hohe Renditen, durch weniger Neuinvestitionen
- Substanzverlust im Anlagenbestand
- regulatorische Verhinderung schwierig -> Informationsasymmetrie
- ↷ **„Achilles-Ferse“ des Regulators**
- **Effizienz – im Netzbetrieb**
- regulatorisch in geringem Umfang durch PCR

### Gesamtsystem

- grundsätzlich auf Systemerhaltung ausgelegt
- Bestimmung von **absoluten** Netzkosten der NB
- Bestimmung betriebswirtschaftlicher Ineffizienzen (PCR) sind singular schwierig
  - ↷ Problem – Auswirkungen auf die technische Systemverfügbarkeit für den Nutzer
- nahe energiewirtschaftlichen System vor der Regulierung
  - ↷ Wertschöpfungskette, d.h. cost-plus-fee System
- Besonderheit zur **Systemveränderung in der „rate-of-return“** Regulierung

# Regulierungssysteme

## Systemwechsel



**Kostenregulierung**  
 ~ Individualbetrachtungen

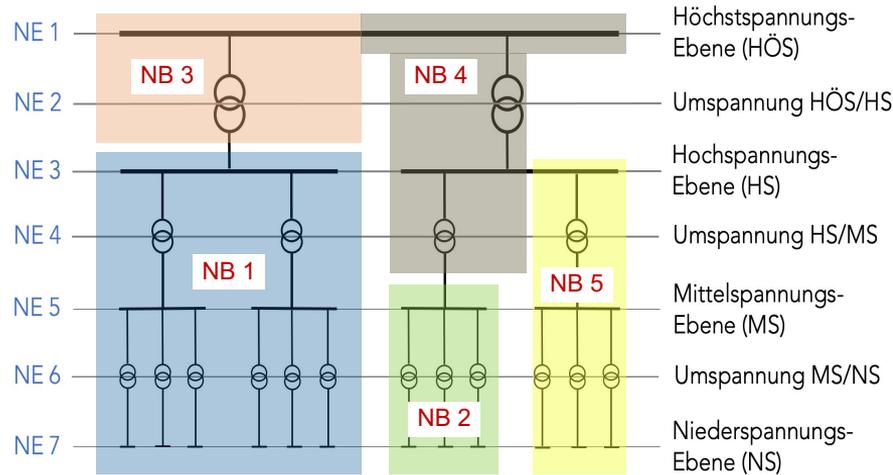


**Anreizregulierung**  
 ~ Gruppenbetrachtung(en)

# Anreizregulierung (AR)

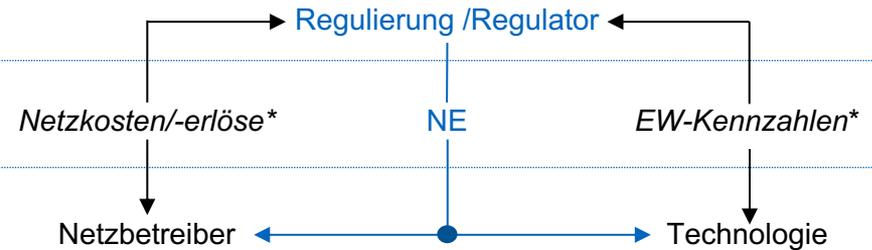
## Strukturproblem – Gruppenbildung

### Technologiestruktur vs. NB-Strukturen



- NB-Verteilung ist zufällig – i.S. der Technologiestruktur

### Problemlösung durch NE-Struktur



~ Entkopplung einer technologisch zufälligen NB – Struktur in der gewählten Technologiestruktur möglich

~ Grundlage für ein NB-Wettbewerb

\* s. Benchmarking/-bedeutung

# Anreizregulierung

## Grundgedanken

### Netzkostenvergleiche

- Systematisierte Netzkostenvergleiche
- Vergleiche können national und international erfolgen
- Vergleiche in **abgeschlossenen** NB-Gruppen, d.h. es sind nur relative Effizienzvergleiche möglich
- Netzkosten werden relativ
- Entkopplung von Netzkosten und Netzerlösen möglich
- Grad der Entkopplung verringert die regulatorische Informationsasymmetrie



### Potentiale für die NB

- Eine regulatorisch-zeitliche Festschreibung von Netzerlösen (ex ante) für eine längerfristige Regulierungsperiode (RP) führt zu
  - einer hohen betriebswirtschaftlichen Planungssicherheit
  - möglichen individuellen Zusatzgewinnen in der RP, wenn die Kosten niedriger als die Erlöse sind → EBIT\*- Zuwachs

### Potentiale für den Regulator

- Relative und bedingt absolute Annäherung an die **sachgerechten** Netzkosten
- **Annäherung** an die *Erfüllung des regulatorischen Oberzieles*
- Langfristige Erhöhung der Konsumentenrente (s. Anlage A1)

\*EBIT = earnings before interest and taxes | Gewinn vor Zinsen und Steuern

# Anreizregulierung

## Systembestandteile

Akteure	Instrumente	Ergebnisse/Ziele
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aktiv – Regulator und NB</li> <li>▪ Passiv – Nutzer/Kunde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regulierungsrecht</li> <li>▪ NK** sind regul. Steuerungsgröße</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ermittlung sachgerechter NK (Oberziel)</li> <li>▪ Ermittlung effizienter NK</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Anmerkung</li> <li>– nat. VBN* als Inselnetz führt zu rein nat. Betrachtungen</li> <li>– nat. VBN als Teil eines internationalen VBN führt zu gesonderten Betrachtungen der NE 1 und 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Standard → AR I</li> <li>– NB spez. bottom-up ermittelte NK (ggf. regul. geprüft) bilden den Ausgangspunkt</li> <li>– Ermittlung von effizienten NK eines NB nach einer BM*** - Logik</li> <li>▪ YC**** → AR II</li> <li>– Ermittlung von effizienten Kosten eines NB nach der YC-Methode</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grenzkosten als regulatorische Führungsgröße</li> <li>▪ Realisierung Wettbewerb im natürlichen Monopol Stromnetz</li> <li>▪ Erhöhung der Konsumentenrente</li> <li>▪ Abbau der regulatorischen Informationsasymmetrie</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vergleichsobjekte sind die NB, ggf. aufgeteilt in spez. Gruppen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ew-Kennzahlen als spez. Prozessgrößen</li> </ul>	

\*Verbundnetz | \*\*Netzkosten | \*\*\* Benchmarking | \*\*\*\*Yardstick – Competition

# Anreizregulierung

## Wettbewerb im natürlichen Monopol Stromnetz (I)

### Sichtweise Regulator (Akteur)

1. Versorgungsaufgabe ist für alle NB gleich
2. Das Produkt ist für alle NB gleich
3. Kostenfunktion ist NE-spezifisch, aber in dieser Struktur für alle beteiligten NB gleich
4. Es gibt Größenvorteile der NB in den einzelnen NE
5. Langfristige Realisierung von Grenzkosten im Netzbetrieb, d.h. **max. Konsumentenrente** (s. Anlage A1)
6. Reduktion der Informationsasymmetrie

### Schokoladen-Modell



### Sichtweise Netzbetreiber (Akteur)

- 1'. Versorgungsaufgabe ist ortsunabhängig, **aber** im Detail nicht zu vergleichen ~ Stadt vs. Land / Flachland vs. Gebirge etc.
- 2'. Produkt für alle gleich normiert, **aber** die Qualitätssicherung ungleich aufwendig ~ Netzausläufer in ländlichen Regionen / regenerative Einspeisungen
- 3'. identisch zu 3.
- 4'. identisch zu 4.
- 5'. **Max. Produzentenrente** (s. Anlage A1)
- 6'. Grundsätzliche Anerkennung

# Anreizregulierung

## Wettbewerb im natürlichen Monopol Stromnetz (II) !

### Resultierende Annahmen/Randbedingungen

1. Es gilt das energiewirtschaftliche Dreieck
2. Regulierungsrecht ist bildet den Rechtsrahmen
3. Die Versorgungsaufgabe ist für alle NB gleich, gleichwohl mit unterschiedlichem Aufwand in der Umsetzung
4. Das Produkt ist für alle NB gleich, die Aufwendungen zur Einhaltung der Qualität sind unterschiedlich
5. Netzkosten sind die zentrale Größe im Regulierungsprozess und sind in der Drehstromtechnologie NE abhängig (→ 8.)
7. Gebietsmonopole (Demarkationen) der NB bleiben erhalten
  - Regionale Monopole bilden den Gesamtmarkt
  - Kein Wettbewerb i.S. des klassischen Wirtschaftsmarktes
8. Wettbewerbsprozess
  - NE-spezifische Kostenfunktionen, d.h. spez. Ineffizienzen
  - Es gibt Größenvorteile (Economies of Scale) in den NE
  - NB mit ihren NK sind die Vergleichsobjekte
  - Wettbewerb umfasst die Gesamtkosten der nat. NB-Branche
  - Internat. Netzverbände führen zu technologisch geprägten spez. NB-Gruppen
9. Die Netzbetreiberstruktur in einem nat. elektrischen Energieversorgungssystem folgt nicht technologischen Bedingungen

# Anreizregulierung

## BM – grundlegendes zur Effizienzbestimmung

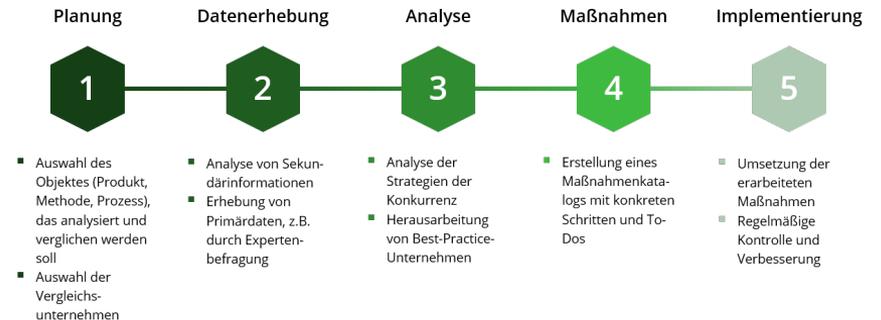
### Instrument

**Definition** – *... ein Vergleichsmaßstab ... die vergleichende Analyse von Ergebnissen oder Prozessen mit einem festgelegten Bezugswert oder Bezugsprozess.*<sup>4</sup>

- Vergleich unternehmensinterne Prozesse und Funktionen
- Vergleiche können branchenweit oder -übergreifend sein
- Vergleiche können auch Organisationen, Staaten,... umfassen

**Ziel** - Feststellung von (monetären) Leistungsunterschieden zum jeweils Klassenbesten und Maßnahmen, um ggf. einen Abstand zu verringern, d.h. Steigerung der wirtschaftlichen Effizienz von Unternehmen

### BM – Verfahren



### Wirkung – relative Vergleiche zum Besten/Peergroup

**Beispiel** – deutsche Strompreise im europäischen Vergleich

- Wie würde hier ein BM ausfallen ?
- Zu welchen Konsequenzen könnte/müsste das führen ?

# Anreizregulierung

## BM – Methodenüberblick

### Vergleich mit Ingenieurmodellen

Referenznetz mit absoluter Vergleichsperspektive

Modellnetz	Vergleichsnetz
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ansatz einer Modell-VA*</li> <li>– Ermittlung kostenminimalen Anlagen-Mengengerüst</li> <li>– Einbeziehung Historie</li> <li>– Beurteilung der Beeinflussbarkeit von Kostentreibern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ansatz reales VG**</li> <li>– Bestimmung Minimalnetz</li> <li>– Ermittlung der spez. NK</li> <li>– Historie implizit enthalten</li> <li>– Ermittlung wettbewerbsanaloger Kosten</li> </ul>
<p>Absolute Bestimmung der sachgerechten NK möglich → Oberziel</p>	

### Vergleich mit Unternehmen

Relative Unternehmensvergleiche

nicht-parametrische Methoden	parametrische Methoden
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Art u. Anzahl der Parameter sind flexibel und nicht von vornherein festgelegt</li> <li>– Parameter anwendbar, ohne Verteilungsfunktion</li> <li>– kein funktionaler Zusammenhang zwischen Input- und Outputgrößen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aussagen über eine unbekannte Grundgesamtheit</li> <li>– Voraussetzung – Beobachtungen entsprechen einer Wahrscheinlichkeitsverteilung</li> <li>– funktionaler Zusammenhang zwischen Input- und Outputgrößen (Schätzfunktion)</li> </ul>

\* Versorgungsaufgabe | \*\* Versorgungsgebiet

# Anreizregulierung

## BM – Relative Unternehmensvergleiche

nicht-parametrische Methoden			parametrische Methoden			
DEA-NDRS	DEA-CRS	DEA-VRS	SFA	OLS	COLS	MOLS
non decreasing return to scale	constant retrun of scale	variable returns to scale	stochastic frontier analysis	ordinary least squares	corrected OLS	modified OLS
Vergleich kleiner Unternehmen untereinander	Annahme für alle gleiche Input- und Outputverhältnisse	angepasste, d,h, unterschiedliche Input- und Outputverhältnisse	Effizienzbestimmung auf Grundlage einer Schätzfunktion	Bestimmung einer mittleren Effizienz	Einzelwert / Beobachtung bildet Eff-grenze	Verteilung der Beobachtungen bestimmt Eff-grenze
größere/mittlere Unternehmen werden nicht differenziert			Differenz zwischen Ineffizienzen und zufälligen Abweichungen	keine Frontier-Methode, d.h. keine Durchführung von Effizienzmessungen	gesamte Abweichung zur Effizienzgrenze wird als Ineffizienz interpretiert	Eff-grenze wird um statistische Abweichungen nach unten korrigiert
Gruppenbildung notwendig	Gleichbehandlung aller Teilnehmer	Differenzierung über einzelne NB oder NB-Gruppen	nicht deterministische Methode	deterministische Methode	deterministische Methode	deterministische Methode

DEA = Data envelopment analysis

# Anreizregulierung

## BM – Vergleich DEA – SFA (exemplarisch)

DEA (nicht parametrisch)

### Vorteile

- möglich kleiner Stichprobennutzung
- keine Annahmen über konkreten funktionalen Zusammenhang erforderlich
- einfach anwendbar

### Nachteile

- gesamter Abstand zur Effizienzgrenze wird als Ineffizienz interpretiert
- sensitiv auf Datenfehler oder Extrempunkte
- keine statistische Überprüfung, i. S. einer Schätzfunktion

SFA (parametrisch)

### Vorteile

- Trennung zwischen Effizienz und Stochastik; gewisses Ausmaß an Datenfehlern kann aufgefangen werden
- weniger anfällig auf Ausreißer, da Orientierung an Durchschnittsfunktion, Mittelwertbildungen
- statistische Überprüfung, d.h. bei Konvergenz mehr mathematische und juristische Belastbarkeit

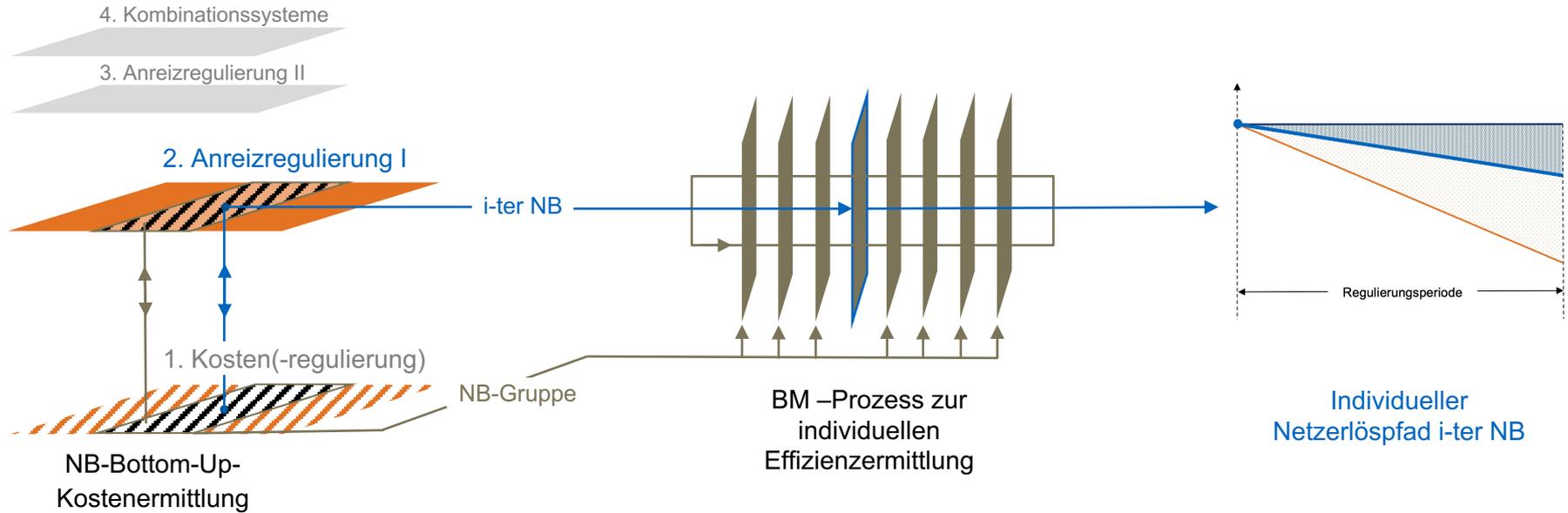
bei Datenproblemen in der Tendenz eher höhere Effizienzwerte  
 ~ Vorteil NB ~ Nachteil Konsumentenrente

### Nachteile

- große Stichprobe erforderlich (ca. n=100)
- Annahmen funktionale Form ~ Verteilung Ineffizienzen

# Anreizregulierung

## AR I (Standardtyp) – Funktiogramm | Revenue Cap Regulation



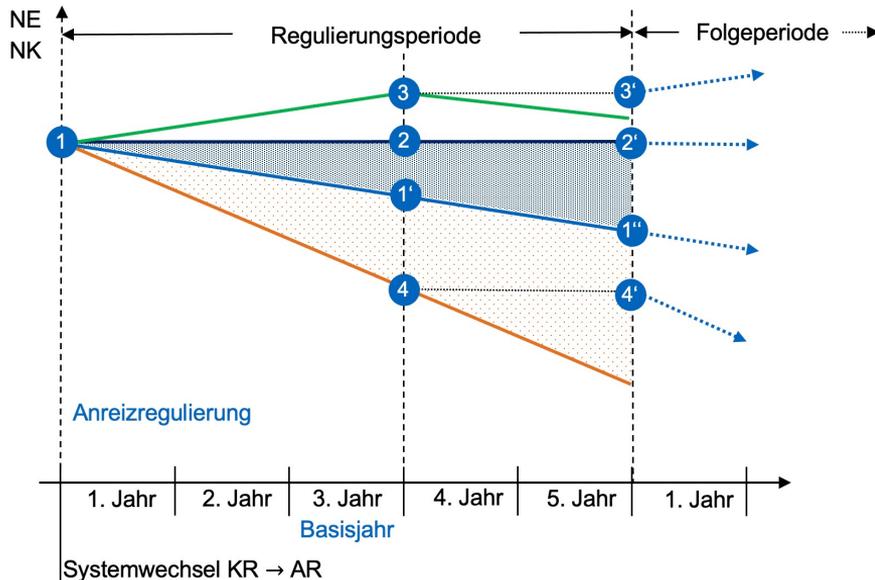
Ist ein kollusives\* Verhalten der regulatorisch festgelegten NB-Gruppe möglich ?

\* kollusiv = unerlaubt zum Nachteil eines Dritten zusammenwirkend

# Anreizregulierung

## AR I – Wirkungsweise und mögliche Handlungsoptionen

Zeitlicher Verlauf für den i-ten NB



Erläuterungen

Regulierungsperiode (RP) exemplarisch 5 Jahre

1, 1', 1'' → Netzerlöse – vom Regulator (RG) geschätzte Entwicklung der Erlösobergrenze (EOG)  
**RG-Unsicherheit** ~ hohe Informationsasymmetrie des Regulator

1, 2, 2' →  $NK_{2'} > NE_1 \sim \delta$  zu Lasten des NB  
**NB-Strategie**  
 $NE_{2'} = NE_1$   
 ~ höhere Ausgangsposition für Folge RP

1, 3, 3' → wie 1, 2, 2' mit weiterer NB-Optimierung, Kostenabstieg im Basisjahr mit Kostenabsenkung zum Ende der RP  
**NB-Strategie**  
 $NE_{3'} > NE_1$

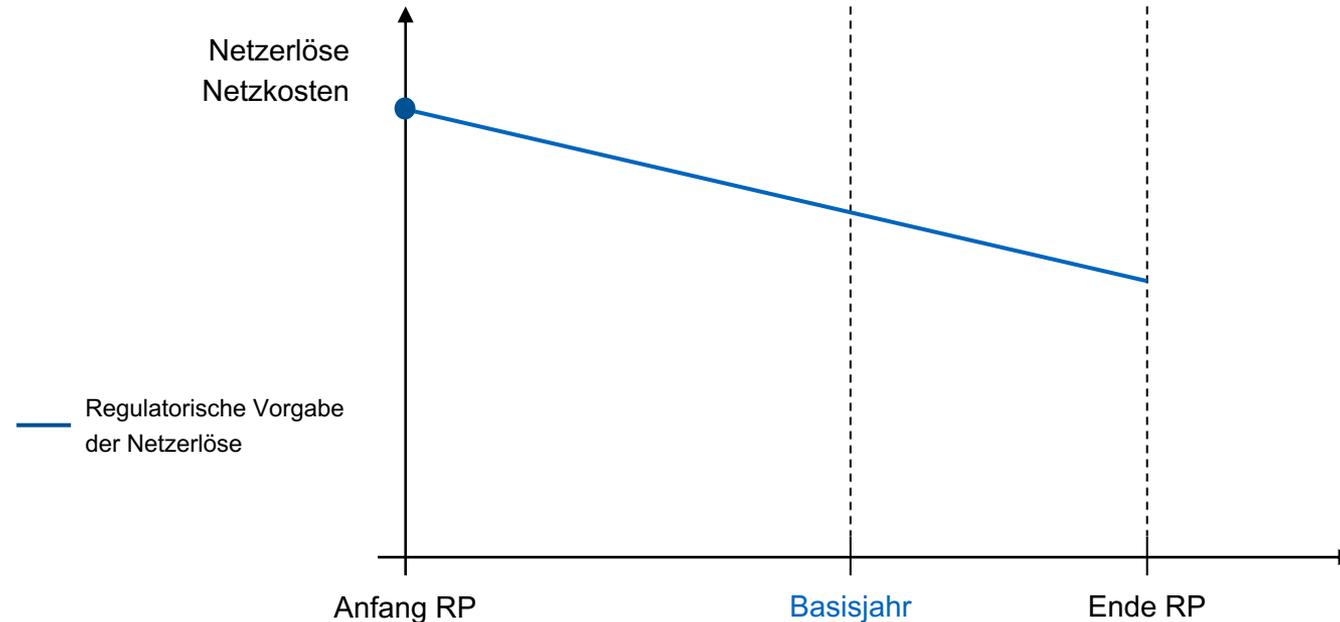
1, 4, 4' →  $NK_4 < NE_1 \sim \delta$  zu Gunsten des NB,  
**RG-Strategie**  
 $NE_{4'} \leq NE_1$   
 ~ Kostensenkung des NB durch RG  
 ~ Erwartungshaltung RG

NB-Barwert\* für Kostensenkungsmaßnahmen ist zu Beginn einer RP positiv und wird zum Ende hin negativ → Warum ?

\*Barwert = Wert für zukünftige Zahlungen (~ Zinsen) → Finanzmathematik

# Anreizregulierung

## AR I – Strategische Optimierung der Produzentenrente des i-ten NB (Idealverhalten)



### Aufgabe

Geben Sie einen idealtypischen Verlauf der Netzkosten an, der als Leitlinie für strategische Unternehmensentscheidungen dienen kann, um eine Gewinnmaximierung zu erreichen

# Anreizregulierung

## Systemeigenschaften YC\* (I)

### Idee

- nach Shleifer - ,Shleifer hat einen Mechanismus entwickelt, durch den der Preis, den ein reguliertes Unternehmen erhält, von den Kosten identischer Unternehmen abhängt.‘

### Anwendung

- regulierte Unternehmen
- Unternehmensvergleiche → BM

### Ziel

- Kosten- Erlösentkopplung
- Entkopplung der Preise eines regulierten Unternehmens von seinen selbstgewählten Kosten- oder Investitionsniveau

\* Yardstick – Competition

[Quellen – SHLEIFER | CLAUSEN]

### Unternehmensleistung/ - performance

- ,... eines Unternehmens wird stattdessen in Relation zu der über ein Benchmarking ermittelten Leistung anderer Unternehmen bewertet und durch die Regulierung entsprechend ökonomisch belohnt oder sanktioniert.‘

### Extragewinne /-EBIT

- ,Gelingt es einem U., die Kennzahlen des angewandten Vergleichsmaßstabes zu übertreffen, mithin effizienter zu operieren, erwirtschaftet es einen Extragewinn.‘
- Referenzdaten – vom Best Practice-, dem Branchendurchschnitt oder einem fiktiven Unternehmen dienen.
- Fiktives Unternehmen → [Schwerpunktregulierungssystem](#)
- VL Regulierungssystem der Zukunft

# Anreizregulierung

## Systemeigenschaften YC (II)

### Bedeutung in der Regulierung

- YC ist ein eigenständiges Regulierungssystem
  - Erweiterung der unipolaren PRC → **Kostenregulierung**
  - Erweiterung bezieht sich auf Informationen/Verhalten von Vergleichsunternehmen
    - ~ Nutzung von unternehmensbezogenen BM-Verfahren
- **Informationsasymmetrie**
  - Verbesserung ggü. unipolarer PCR
  - Verbesserung ggü. AR I

### Grundlogik der YC

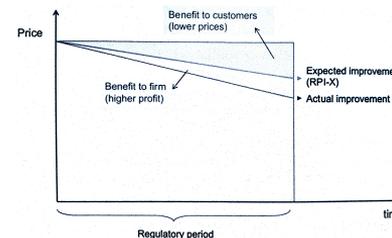
- s. **Funktiogramm**
  - Kollusives der NB – Verhalten möglich ?

[Quellen – SHLEIFER | CLAUSEN | BNetzA 2005 | WIK-Bericht 267]

Dr. Benthaus (TUM) | Vorlesung – Stromnetze - 07 | 2021

### Price-Cap-Regulierung (PCR)

- **Kosten und Erlöskopplung eines Unternehmens**
  - Regulatorische Preisfestsetzung für eine kWh el. Energie, d.h. die Einnahmen des U. sind durch die abgegebenen Energiemengen und nicht durch die (eigenen) Kosten (→ Investitionen) bestimmt
  - grundlegender unternehmerischer **Effizienzanreiz gegeben**



[Quelle – PEREZ-ARRIAGA]

- bei der unipolaren PCR gibt es keine Branchenwettbewerbselemente, aber ggf. Maßnahmen wie z.B. ein allg. Produktivitätsfortschritt →  $x_{gen}$

# Anreizregulierung

## Systemeigenschaften YC (III)

### Anwendungsvoraussetzungen – Erfordernisse

- *Marktversagen* → natürliches Monopol
- keine vollständige Nutzung von Effizienzpotentialen
- kein Marktausscheiden von Unternehmen
- Regulierung honoriert Effizienzsteigerungen nicht adäquat
- Marktzustand → subadditiv
- Marktzugangsbarrieren → Irreversibilitätsgrad von Anlagen

---

- *Asymmetrische Informationsverteilung*
- BM als selbständiges Instrument oder als Bestandteil einer YC ist nur sinnvoll, wenn es eine Informationsasymmetrie gibt
- Um YC anzuwenden, muss der Regulator nicht die effizienteste Produktion kennen, sondern wissen welches das effizienteste Unternehmen ist in einer geeigneten Gruppe ist

- Multiple Datenerfassung verringert die Informationsasymmetrie
- Ohne Informationsasymmetrie kann eine regulatorische *Auflagen - Strategie* erfolgen
- ↷ VL 'Regulierungssystem der Zukunft'

- 
- *Vergleichbarkeit und Verifizierbarkeit der Daten*
  - Voraussetzung und Grundlage der Leistungsvorgaben
  - Effizienzunterschiede sind nur bei vergleichbaren U. allein ursächlich, Abweichungsgründe sind im → 'Schokoladenmodell' beschrieben ↷ Fehlerreduktion durch Anwendung statistischer Verfahren, wie z.B. OLS → s. BM-Methoden
  - Unternehmens – Insolvenzen sind in der YC möglich, ebenso Über- und Untereffizienzen

# Anreizregulierung

## Systemeigenschaften YC (IV)

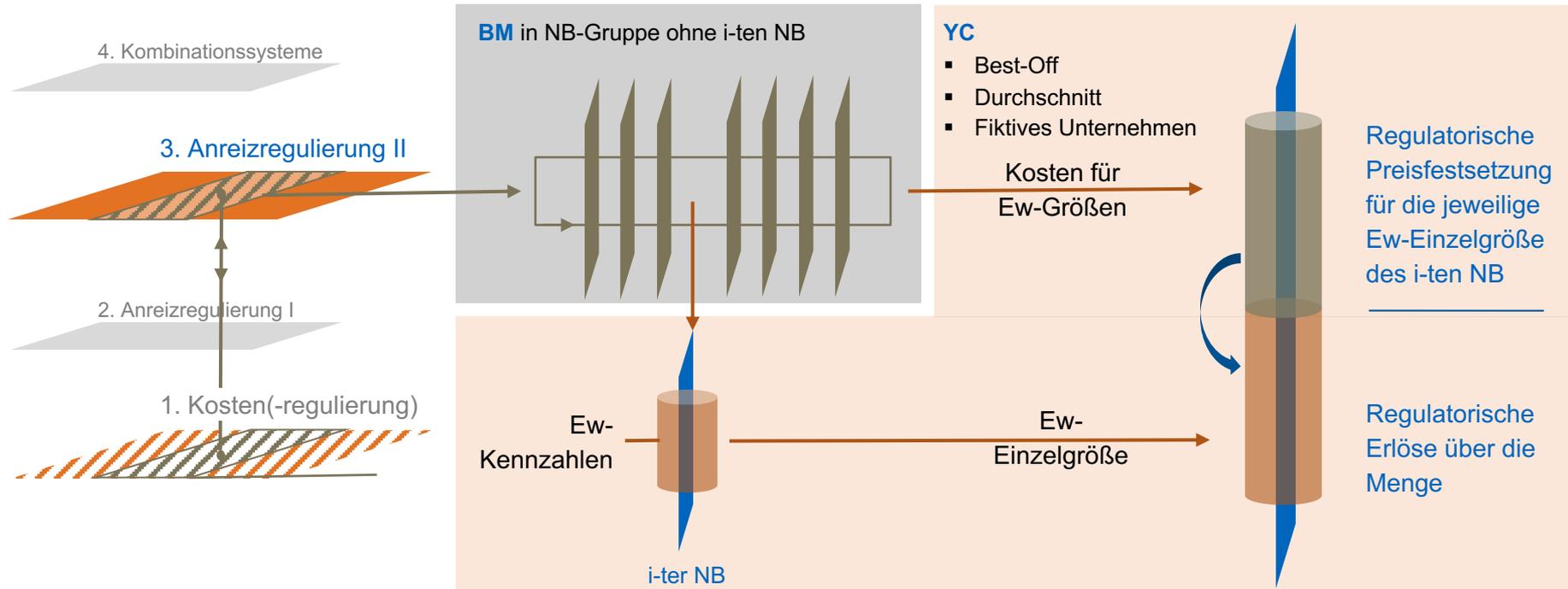
### Anwendungsvoraussetzungen - Zusammenfassung

<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BM und YC bezeichnen <b>nicht</b> identische Sachverhalte</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BM</li> <li>– Beteiligten (NB) übernehmen selbst die Effizienzbewertungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ YC</li> <li>– Regulator macht die Effizienzbewertungen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Anwendung in Märkten mit und ohne Wettbewerb</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– YC nur in Märkten ohne klassischen Auslese-Wettbewerb</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bewertungsprobleme/ Regulierungsrisiken</li> <li><u>Freiwilliges BM</u> kaum Bewertungsprobleme/ R-risiken, aber auch wenig Wirkung Monopol-Märkten <math>\leadsto</math> R-untauglich</li> <li><u>Verpflichtendes BM</u> Verbesserung des regulatorischen Kenntnisstandes über Branchen-Kennzahlen   Vergleichbarkeit der U. schwierig, aber weitgehende Methodenakzeptanz   Reduktion der Informationsasymmetrie ggü. KR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bewertungsprobleme/ Regulierungsrisiken</li> <li><u>Idealfall</u> ggü. BM erhebliche Potentiale zur Reduktion der regulatorischen Informationsasymmetrie</li> <li><u>Realfall</u> Problem im Finden einer vergleichbaren NB-Gruppe, d.h. U-Unterschiede resultieren nur aus Effizienzunterschieden <math>\leadsto</math> i.d.R. exakt nicht möglich <math>\leadsto</math> Unsicherheit</li> </ul>

[Quelle – CLAUSEN, Kap. 3]

# Anreizregulierung

## AR II (YC) – Funktiogramm | Price Cap Regulation

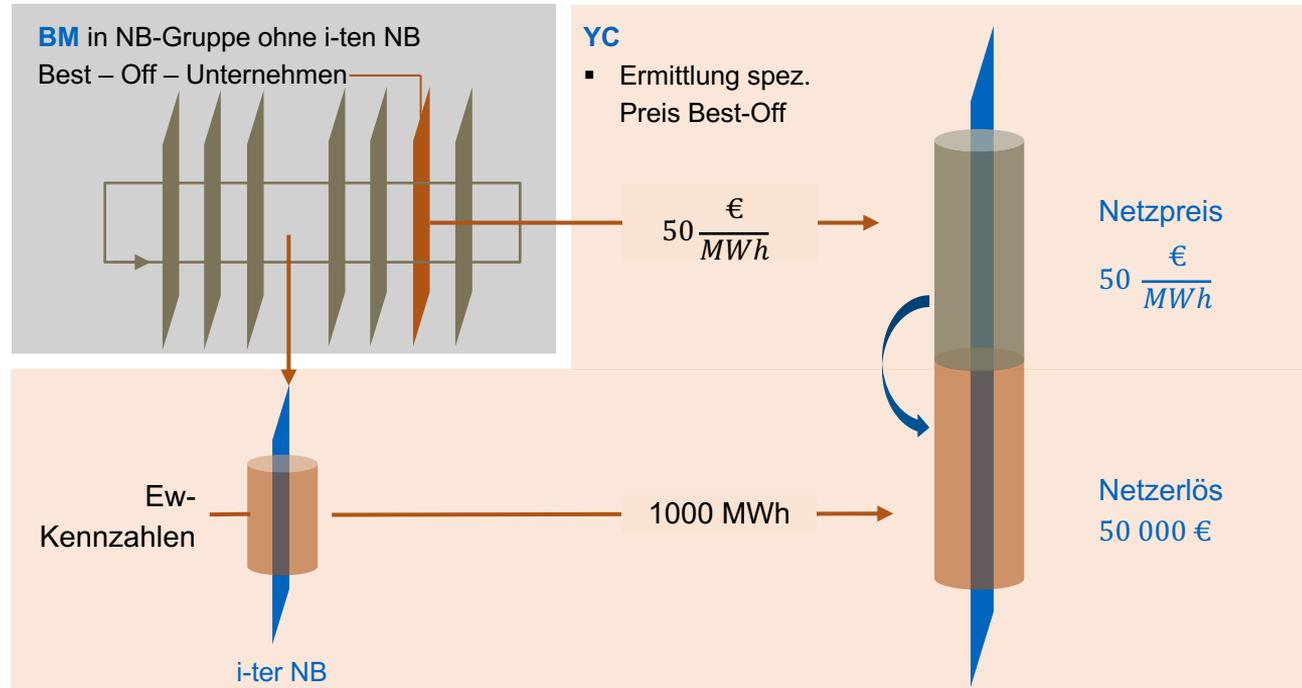


# Anreizregulierung

## AR II – Beispiel

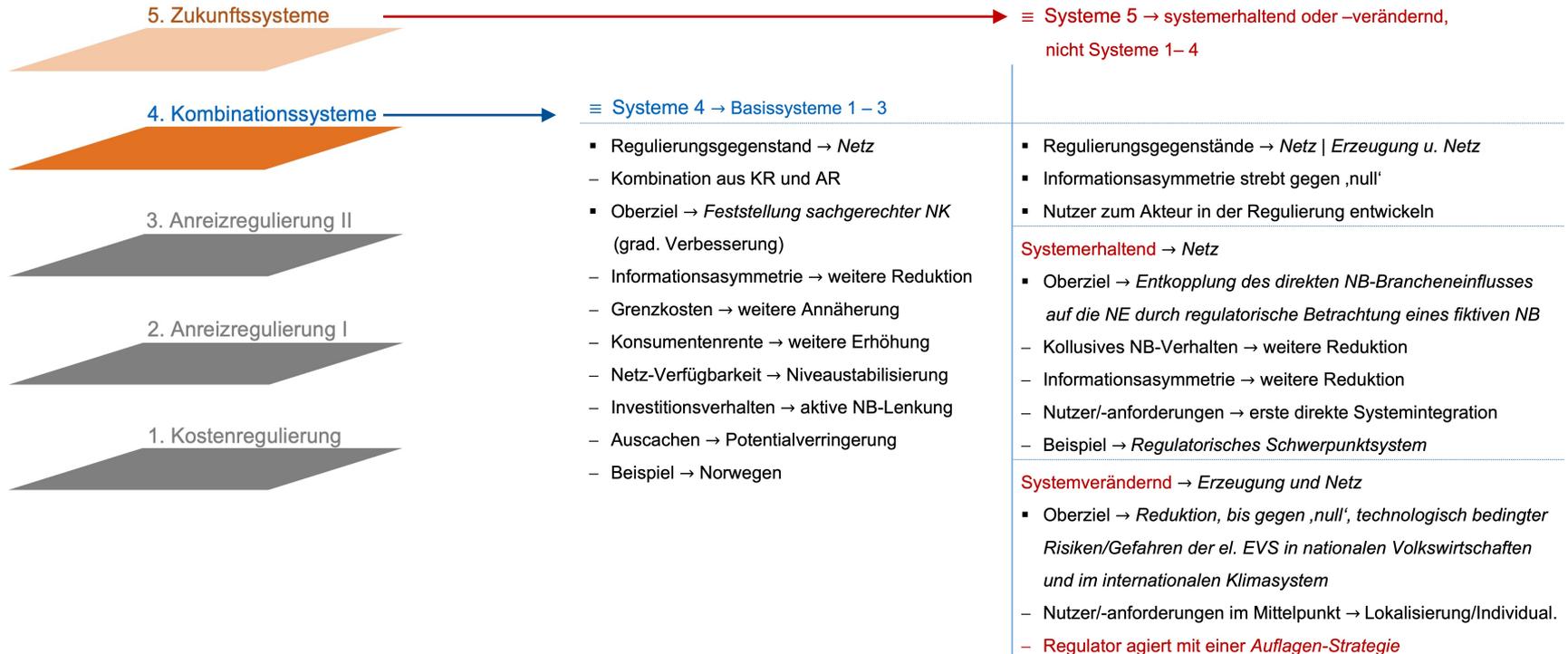
- **Aufgabe** – Bestimmung des Netzpreise für eine transportierte MWh elektrischer Energie
- **Voraussetzungen**
  - Bestimmung NB – Gruppe ist sachgerecht
  - BM – Effizienz- Ermittlung für Best-Off-Unternehmen
  - (NE-bezogene) transportierte Energiemenge des i-ten NB ist bekannt

### Modell für die Stromnetzregulierung → BM + YC



# Regulatorische Kombinations- und Zukunftssysteme

## Zwischenfazit



# Kombinationssysteme

## Systeme 4 (I)

### Ausgangssituation

- **Systemgrundlagen**
  - Fokus auf nat. Module mit entsprechendem Rechtsrahmen
  - Kostenregulierungssystem (KR) mit Kostenstrukturen
  - Anreizregulierungssystematik I (AR I) mit Standard – BM
  - Anreizregulierungssystematik II (AR II) mit YC/BM
- **Kostenbereitstellung**
  - NB ermittelte Bottom-Up-Kosten in einer nat. Kostenbasis mit der Separationsmöglichkeit einzelner Bestandteile
  - Regulatorische Vor-Prüfung der Kostenbasis
- **Linearkombination von KR und AR**
  - Funktionsprinzip im nat. Rechtsrahmen vorgegeben, wichtig !

### Oberziel

- *Verbesserung in der Feststellung sachgerechter Netzkosten unter gesonderter Hinzunahme individueller Investitionlenkung*

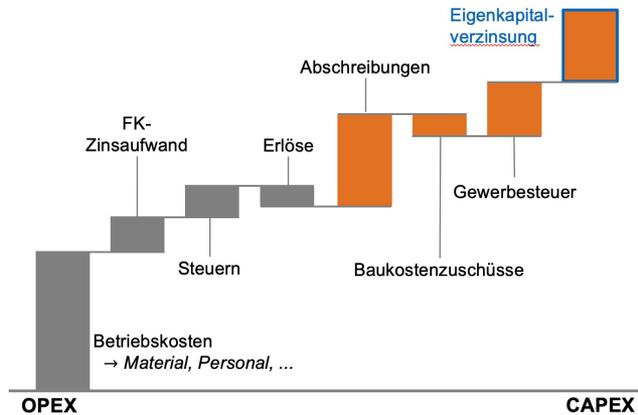
### Ziele

- Weitere Absenkung der regulatorischen **Informationsasymmetrie** ggü. der jeweiligen nat. Ausgangssituation
- Weitere Reduktion vorhandener **Ineffizienzen** mit einer weiteren **Grenzkostenannäherung**
- **Konsumentenrentenerhöhung** durch weiteren Ineffizienz-Abbau
- Stabilisierung der **Netz-Verfügbarkeit** zur Netzerhaltung
- Steuerung des **individuellen NB-Investitionsverhaltens** im Rahmen einer individuellen regul. ‚rate of return‘ Steuerung
- Verhinderung eines **Auscachen** des Netzes zur Systemerhaltung

# Kombinationssysteme

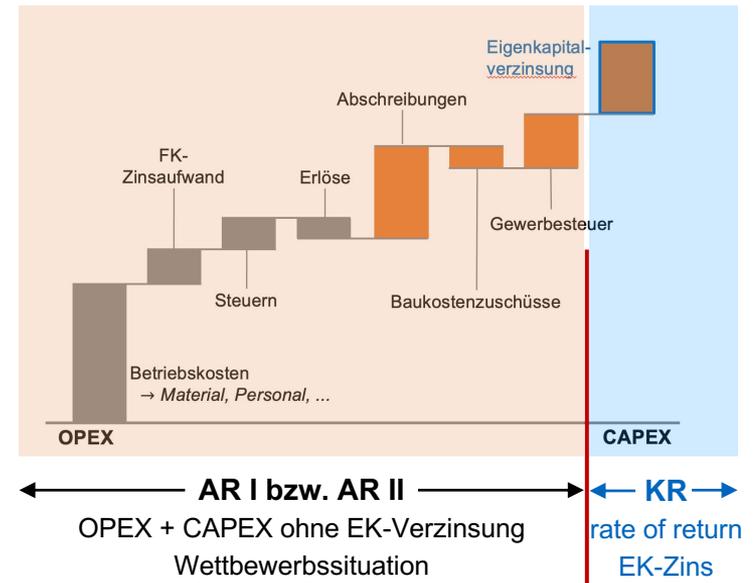
## Systeme 4 (II)

### Kostenstrukturen eines NB



[Abb. s. Kostenregulierung / Kostenstrukturen]

### Vorschlag – für ein Kombinationssystem



# Kombinationssysteme

## Systeme 4 (III)

### Kombinationssystem - Vorschlag

- **Systemgestaltung**
- **Gruppenbetrachtung** durch AR-Systematiken
  - ↷ Einhaltung zu den formulierten Annahmen/Randbedingungen zum Wettbewerb im natürlichen Monopol - Stromnetz
  - ↷ Kostenvolumen in einer Effizienzregulierung > 50%\*
- **Individualbetrachtung** zur Investitionssteuerung
  - ↷ rate-of-return Kostenregulierung
  - ↷ Kostenvolumen zur EK-Zins-Einstellung < 50%\*
- **Netz-Kostengleichungen für i-ten NB**
  - ↷  $c_i(t) = \lambda_1 \cdot c_i^{BM}(t) + \lambda_2 \cdot c_i^{KR}$  nach AR I
  - ↷  $c_i(t) = \lambda_1 \cdot \sum_{k=1}^n c_{k,i}^{YC}(t) + \lambda_2 \cdot c_i^{KR}$  nach AR II

\* spez. Regelungen im Rechtsrahmen vorzusehen

- ↷ erweiterte regulatorische Steuerung mittels Gewichtungsfaktoren  $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  und  $k \in \mathbb{N} \rightarrow$  Ew-Kennzahlen
- ↷ Periodendauern für beide Komponenten müssen nicht identisch sein, i.d.R. für die Gruppenanteil 3-5 Jahre und Individualanteil einjährig, d.h.  $c_i^{KR}$  nicht explizit zeitabhängig

### Beispiel Norwegen

- s. Anlage A2



# Regulierungssystem – Stromnetze Anhang

A1          Produzentenrente und Konsumentenrente

A2          Beispiel Kombinationssystem – Regulierungssystem in Norwegen

# Regulierungssystem – Stromnetze Anhang (A1)

## Produzentenrente (PR)

*„Nach Marshall (1890) die Differenz aus dem Gleichgewichtspreis, den der Produzent ... als Marktpreis tatsächlich erhält und dem Preis, den er mindestens benötigt, um rentabel zu bleiben.“*

- PR ergibt sich als Differenz von Erlös und variablen Kosten
- Gewinn ist die Differenz von Erlös und Gesamtkosten (variable und feste Kosten)

### Beispiel

- Ein Gerät wird zum Marktpreis von 100 € verkauft.
- Anbieter A hätte es für 80 € verkaufen können (z.B. geringere Herstellungskosten). Er erwirtschaftet einen Zusatzgewinn von 20€/Gerät -> Produzentenrente

## Konsumentenrente (KR)

*‘... die Differenz aus dem Preis, den der Konsument für ein Gut zu zahlen bereit ist und dem Gleichgewichtspreis, den der Konsument tatsächlich bezahlen muss (Marktpreis).‘*

- KR ist die Differenz aus Maximalpreis des Kunden und dem Marktpreis
- PR und KR verhalten sich inversiv zueinander, d.h. die Optimierung des einen erfolgt zu lasten des anderen
- **Regulatoren wollen im natürlichen Monopol langfristig die Konsumentenrente verbessern**

# Aufgaben und Systeme der Stromnetzregulierung

## Systeme – Anreizregulierung | Ebene D

(A2)



### YC | Beispiel Norwegen

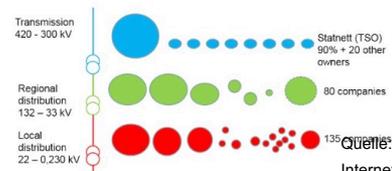
- ① **Regulator:** Norwegisches Wasserressourcen u. Energie Direktorat (NVM)
- ② **Kernanforderungen Energiesetz:**
  - i. NB sollen ‚faire‘ oder sachgerechte Vergütung erhalten
  - ii. Netze sollen effizient betrieben und ausgebaut werden
- ③ Network structure

The Norwegian electricity network is made up of three main categories: transmission (central), regional and local distribution:

- the transmission network (400kV-132kV)
- the regional distribution network (132kV-33kV)
- the local distribution network (22kV-240V)

Statnett is the only Transmission System Operator (TSO) and responsible for the transmission tariffs.

There are 146 network companies that own and operate regional distribution and/or distribution networks. Some also own minor parts of the transmission network.



Quelle:  
Internetseite NVM

nach [4.6]

Benthaus 2017

- ④ **Benchmarking**
    - i. Grundlage ist eine YC auf der Basis eines DEA – Benchmarking für ÜNB und VNB, d.h. es handelt sich um ein **Peer-Group-Vergleichsverfahren**
    - ii. ÜNB  
kein nationaler Vergleich möglich, da nur 1 NB, d.h. intern. Vergleich
    - iii. **VNB -> nationaler Yardstick-Vergleich**  
DEA – Methode, Wirkungsweise s. nächsten Seiten H  
DEA-Berechnungsergebnisse jeweils ohne betrachteten NB
- Kostenermittlung:
1. DEA-Input Gesamtkosten – Output Netzlänge, ...  
d.h. Kostenvergleich NB mit gew. Durchschnitt einer Peer-Group
  2. Anpassung an regionale Strukturunterschiede /-kosten
  3. YC- wird jährlich durchgeführt
- ⑤ **Eckdaten**
    - i. Regulierungsperiode 5 Jahre, d.h. YC-Modell unverändert
    - ii. Erlösobergrenzen werden jährlich auf der Basis bilanzieller Kosten (t-2) sowie der Kostennorm angepasst
    - iii. Effizianzanreize nur aus YC
    - iv. Derzeitiger Regulierungsansatz hat das Ziel Investitionen stärker zu fördern -> Vergütung über WACC-Ansatz
    - v. **Kombinationsansatz -> s.u.**

## Aufgaben und Systeme der Stromnetzregulierung

### Systeme - Kombination von Kosten- und Anreizregulierung | Ebene D

(A2)



#### Kopplung von Branchen- Kosteneffizienz und Investitionslenkung | Beispiel Norwegen

##### ① Ausgangssituation/Ziel

- i. NB-Gruppe = VNB
- ii. Ermittlung Branchenkosteneffizienz
- iii. Förderung von Investitionen
- iv. Reduktion der regulatorischen Informationsasymmetrie

##### ② Regulierungssystem

- i. Kostenregulierung: einheitliche regulatorische Vorgaben und Prüfung
- ii. Anreizregulierung: einheitliche Vorgabe als YC mit einer DEA als Wettbewerbsinstrument, d.h. Kombination YC mit Peer-Group-System
- iii. Aus YC können Effizienzwerte größer als 100 % für NB entstehen. In Norwegen sind diese mit einer festgelegten Obergrenze auch zugelassen.

##### ③ Erlösobergrenze als Kombination beider Systeme

$$F1: \quad R_i = \underbrace{(1-p) \cdot C_i}_{1. \text{ Term}} + \underbrace{p \cdot C^{DEA}}_{2. \text{ Term}}$$

mit:

$R_i$	Revenues des i-ten Netzbetreibers	$i \in \mathbb{N}$
$C_i$	Kosten nach Kostenregulierungssystematik	des i-ten Netzbetreibers
$C^{DEA}$	Kosten nach Anreizregulierungssystematik	incl. DEA-Yardstick-Competition
$p$	Kopplungsfaktor zwischen Regulierungssystemen	$p \in \mathbb{R}$ und $p \in [0,6; 1]$

##### ④ Erläuterungen

- i. Zeitlich parallele Nutzung von Kosten- und Anreizregulierung in der Form einer Linearkombination
- ii. Regulatorisch schafft man sich hier eine Dimension mehr, d.h. mehr Steuerungsmöglichkeiten
- iii. Gewichtung über den Kopplungsfaktor  $p$  (s.o.)
- iv. Der Branchenwettbewerb wirkt anteilig mit mindestens 60 %, d.h. Wettbewerbskosten nach YC sind systemführend
- v. **Gewichtung ist für alle NB gleich, d.h. keine Bildung von Untergruppen**

# Aufgaben und Systeme der Stromnetzregulierung

## Systeme - Kombination von Kosten- und Anreizregulierung | Ebene E

(A2)



### Kopplung von Branchen- Kosteneffizienz und Investitionslenkung | Systemerweiterung von Ebene D

- ① **Ziel**
- i. Aktive 2 dim. Regulierungssteuerung der gesamten Branche durch den nationalen Regulator, durch gleichzeitige Darstellung einer Markt-Wettbewerbs-situation und einer Bewertung und Abbildung von individuellen NB-Situationen (z.B. Anlagenalters-struktur, Umsetzung pol. Vorgaben ,Energiewende')
  - ii. Reduktion der regulatorischen Informations- asymmetrie auf eine vernachlässigbare Größe
  - iii. Setzen von generellen und spezifischen Innovationsimpulsen für zukünftige Veränderungen im Netzbetrieb, in der Stromversorgung

- ② **Regulierungssystem**
- i. Norwegisches System als Grundlage (Ebene D)
  - ii. Regulator gibt vor:
    - wirkendes Wettbewerbsinstrument in der YC
    - Art u. Umfang der individuellen Kostenregulierung
    - Auswahl u. Bildung von NB-Gruppen (Cluster) zur Wirkung der Kostenregulierung im Sinne der regulatorischen Ziele
  - iii. Rechtliche Anpassungen zur Ermöglichung der Durchführung individuell verschiedener / nach [4.8] abweichender Behandlungen von NB in der Branche

③ **Erlösobergrenzenbestimmung**

$$F2: \quad EOG_i(t) := \underbrace{\{ (1 - \varphi_k(t)) \cdot C_i^{BM-YC}(t) \}}_{\text{I. Term}} + \underbrace{h_i \cdot \varphi_k(t) \cdot C_i^{IST}(t)}_{\text{II. Term}} \cdot \alpha_{i,k}$$

mit:

t	Laufzeit in der Regulierung
i	Laufindex regulatorisches NB-Ensemble $N := \{NB_1, \dots, NB_i, \dots, NB_{n_0}\}$ mit $i, n_0 \in \mathbb{N}$ und $i \leq n_0$
k	Laufindex für NB-Cluster $K := \{(NB)_k \mid k \in \mathbb{N} \text{ und jedes NB, eindeutig in einer Clustermenge}\}$
$EOG_i(t)$	Erlösobergrenze des i-ten NB
$C_i^{BM-YC}(t)$	Kostenverlauf des i-ten NB nach Anreizregulierungssystematik; incl. YC
$C_i^{IST}(t)$	Kostenverlauf des i-ten NB nach Kostenprüfungssystematik
$\varphi_k(t)$	Gewichtungsfunktion der Wirkungen aus Kosten- und Anreizregulierung $\varphi_k(t)$ ist eine eindimensionale reelle Funktion, mit jeweils eigener Definition für jedes k
$h_i$	Steuerungsfaktor des Kostenprüfungsergebnisses des i-ten NB; $h \in \mathbb{R}$ und $h \in [0,2]$
$\alpha_{i,k}$	Filterelement für die Zuordnung eines i-ten NB zur bestimmten zur k-ten Gewichtungsgruppe $\alpha_{i,k} \geq 1$ , wenn $NB_i \in (NB)_k$ ; sonst = 0

- ④ **Erläuterungen**
- i. Zeitlich parallele Nutzung von Kosten- und Anreizregulierung
  - ii. Führungssystem (1. Term): gewichtete Kosten des Markt-Wettbewerbs
  - iii. Individualsystem (2. Term): systemische Wirkung der spez. Kosten zwischen 0% und 200% ( $h_i$ )
  - iv. Erläuterungen zur Gewichtungsfunktion ( $\varphi_k$ ) n. S.
  - v. Filterelement  $\alpha_{k,i}$  ordnet NB aus dem gesamten Ensemble einem bestimmten NB-Cluster zu, zur Erfüllung einer definierten Gruppenaufgabe
  - vi. **Gewichtung nicht für alle NB gleich, d.h. Bildung von Untergruppen**

# Vorlesung – Stromnetze

Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen | 10

Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 18.06.2021



# Organisatorisches

## Vorlesung Stromnetze SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.	14:00 – 16:00	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.	14:00 – 16:00	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.	14:00 – 16:00	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.	14:00 – 16:00	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.	14:00 – 16:00	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.	14:00 – 16:00	Elektrische Energiespeicher - Verteilnetz	Murche
7	28.05.	14:00 – 16:00	Energiernetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.	14:00 – 16:00	Energierechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.	14:00 – 16:00	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.	14:00 – 16:00	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.	14:00 – 16:00	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.	14:00 – 16:00	Abschluss Vorlesungen und Fragestunde zu Prüfungen	Benthaus / Netter
13	05.- 07.07.	ganztägig	Prüfungen	Benthaus / Netter

# Literatur

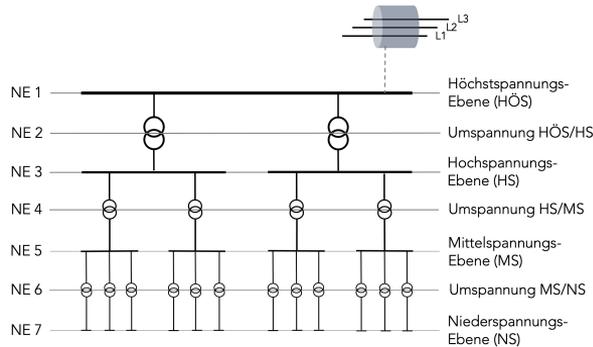
## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze 10

BENTHAUS	2019	A coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. <i>Energy Sustain Soc</i> <b>9</b> , 50 <a href="https://doi.org/10.1186/s13705-019-0221-4">https://doi.org/10.1186/s13705-019-0221-4</a>
BENTHAUS (et al.)	2019	Zentral-lokale Blackout-Steuerung, e m w, Ausgabe 2 19, energate
D-STATIS	2020	Bruttoinlandsprodukt je Einwohner/-in 2019, Statistisches Bundesamt, <a href="https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/wirtschaft-finanzen/Wirtschaftsleistung">https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Internationales/Thema/wirtschaft-finanzen/Wirtschaftsleistung</a>
EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EEA)	2017	Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 / EEA-Report   No 1/2017 Chap. 5.4 pp. 251 / EU Publications ISBN 978-92-9213-835-6
ELSBURG	2012	Blackout – Morgen ist es zu spät, Blanvalet, München   <b>Roman</b>
ENTSO-E	2018	LOAD-FREQUENCY CONTROL – Annual Report 2018, <a href="http://www.entsoe.eu">www.entsoe.eu</a>
HEUCK, DETTMANN, SCHULZ	2013	Elektrische Energieversorgung, 9. Auflage, Springer Vieweg
ÖSTERREICHISCHER ZIVILSCHUTZ	2017	Blackout-Ratgeber, <a href="http://www.zivilschutzverband.at">www.zivilschutzverband.at</a>
UMWELTBUNDESAMT	2020	Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, <a href="http://www.umweltbundesamt.de">www.umweltbundesamt.de</a>

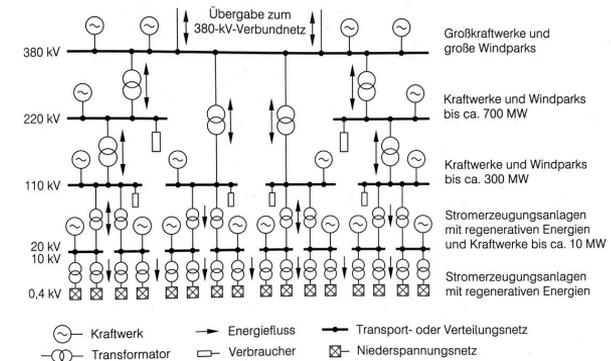
# Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen

## Welche können das sein ? - Ein Überblick

### 1. Teil-Technologie – Stromnetz/Energietransport



### 2. Gesamt-Technologie – Erzeugung und Netz



Technik – beide IST-Technologien sind eng miteinander verbunden/verwoben → Vorlesungen 02 und 03

Stromnetze – Betrachtung positiver und negativer Wirkungen

~ Konzentration auf die negativen Wirkungen → **Risiken**

Erzeugung und Netz

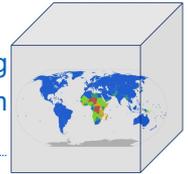
~ positive Wirkungen bereits diskutiert

~ Konzentration auf negative Wirkungen → **Risiken**

# Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen

## Was sind/wären große Wirkungen der Stromnetze? (I)

Erinnerung  
elektrischer Energieraum

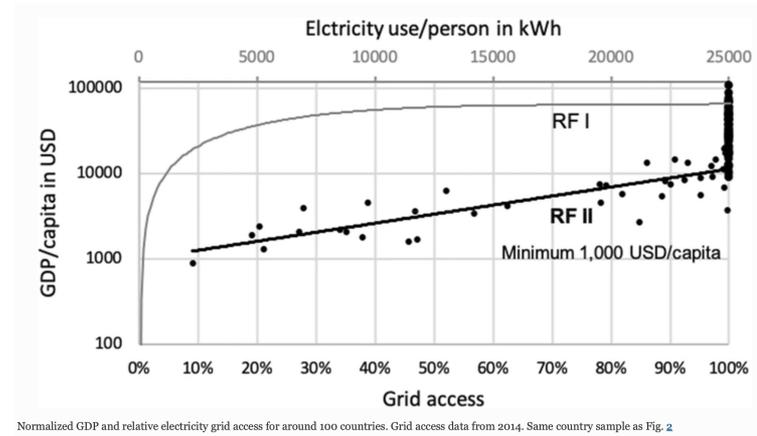


### Wirtschaft - Volkswirtschaft

- **positiv**
  - extremes Wirtschaftswachstum (BIP/Kopf) bereits bei niedrigen Stromnetzzugangswerten der Nutzer
  - Maximalwerte der Wirtschaftsleistung eindeutig bei einer Netzverfügbarkeit von 100 %
- **negativ**
  - Maximalrisiko einer Volkswirtschaft ist der längerfristige Totalausfall der el. Energieversorgung (durch Netzstörung möglich)
  - Schäden können quantifizierbar und nicht quantifizierbar sein
  - Beispiel – Österreich  $\approx$  Anteil quantifizierbar  $\approx$  1 Mrd. €/Tag

### Bruttoinlandsprodukt (BIP)

- BIP – Abhängigkeit vom Stromnetzzugang / el. Energieverbrauch von etwa 100 Nationen



# Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen

## Was sind/wären große Wirkungen der Stromnetze? (II)

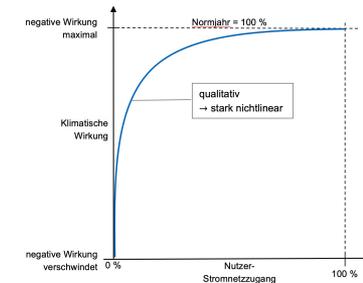
### Klima

- Dimensionen klimatischer Wirkungen
  - Mittelwertbildungen von physikalischen Größen (z.B. Temperatur) über einen längeren Zeitraum (z.B. 30 Jahre)
  - Räumliche Module sind national, international und global
- Klimatische Wirkungen von Stromnetzen
  - direkte Wirkungen → genutzte Anlagentechnologie für den Energietransport
  - indirekte Wirkung → Schaffung von Kapazitäten für Erzeugungstechnologien und -anlagen

[Quelle – EEA-Report No 01/2017]

### Arbeitshypothese

- Annahmen
  - Nutzung el. Energie erfolgt wesentlich über Stromnetze
  - Normjahr grundsätzlich beliebig, z.B. 1990 für D [s. Anlage (2)]



- Schlussfolgerung
  - Verfügbarkeit von Stromnetzen ermöglicht stark nichtlineare neg. Klimawirkungen
  - Ist eine klimaneutrale elektrische Energieversorgung möglich ?

# Titelbild

## Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen



Engpass Suezkanal – Blockade; Ever Given‘ 2021

Quelle – tagesschau

Was bedeutet das auf's Stromnetz übertragen?

# Stromnetze

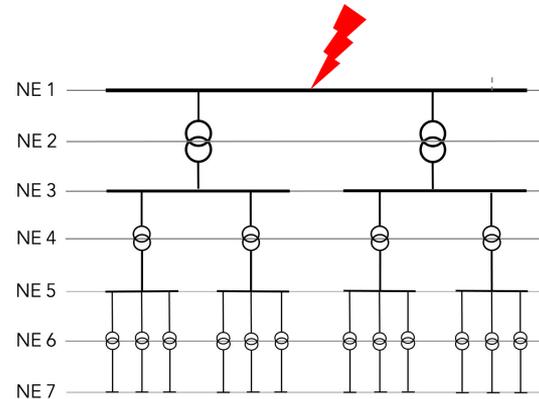
## Engpassvergleiche für max. technische Störungen

### Infrastruktur – Schiffsroute



Bei Nicht-Verfügbarkeit ist der globale Warenhandel massiv gestört

### Infrastruktur – Stromnetz



Bei Nicht-Verfügbarkeit kommt das nationale/internationale gesellschaftliche Leben zum Erliegen

### Infrastruktur – Bahnnetze



Bei Nicht-Verfügbarkeit kommt der Bahn-Fernverkehr in Frankreich zum Erliegen

# Stromnetze

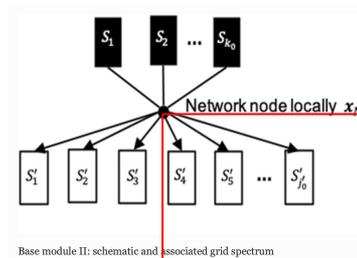
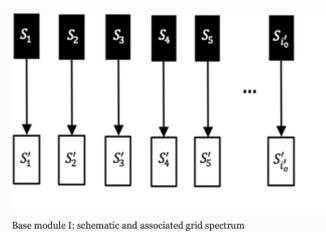
## Technologische Grundmodule

### Netzbasis- oder Elementarmodule

- Stromkreis



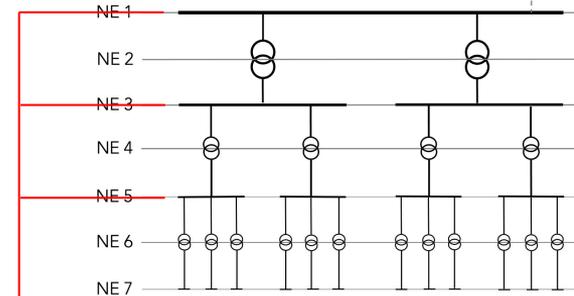
- Quellen  $Q \rightarrow S_1, S_2, \dots$
- Senken  $S \rightarrow S'_1, S'_2 \dots$
- Basismodul I  $\rightarrow$  Mikro-Netzstruktur
- Basismodul II  $\rightarrow$  Makro-Netzstruktur
- $\leadsto$  Netzknoten - zwingend



### Netzstruktur

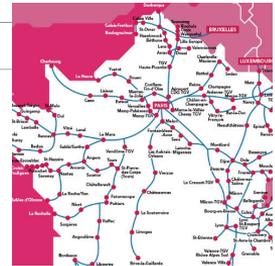
- Prinzip Drehstromnetzstruktur

- Base – Modul I und Base – Modul II



- Mathematik

- $\leadsto$  Metrische Räume
- $\leadsto$  Zusammenhang in metrischen Räumen
- $\leadsto$  Netzmetrik  $\rightarrow$  Französische Eisenbahnmetrik



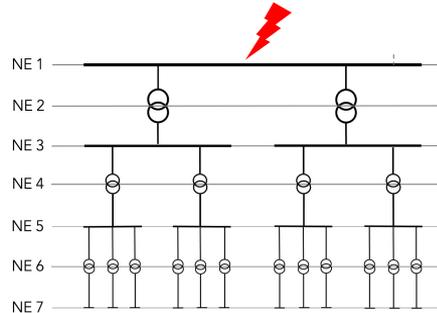
[Quelle – BENTHAUS, A coupled ...]

# Stromnetze

## Maximale technische Störungen

### NE 1 und 2

→ nat. und inter. Verbundnetzebenen



- ~ Wirkung – max. gesamte CU-Platte
- ~ Störungsart (I) – betriebsbedingt incl. meteorologischer Ereignisse
- ~ Störungsart (II) – extern gewaltsam, **mechanisch** oder IT

### Infrastruktur – Freileitungen



- ~ Großflächennetze sind technische Großflächenbauwerke
- ~ nat. el. EVS enthalten mehrere tausend Masten
- ~ Masten sind tatsächlich **nicht schützbar**

### Infrastruktur – Mastbruch

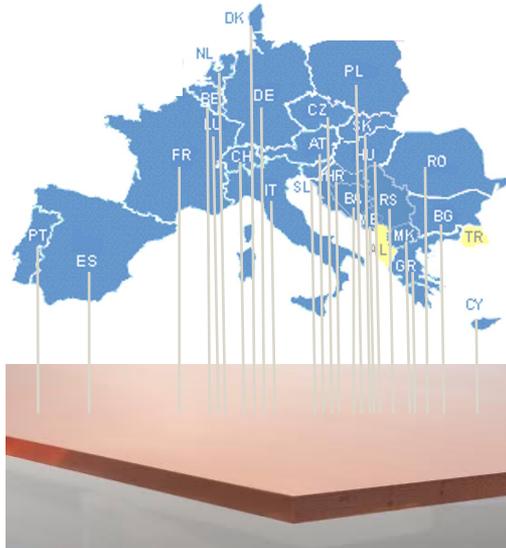


- ~ Mastbruch auf der Verbundnetzebene
- ~ Grund – beide Störungsarten möglich
- ~ physischer Ersatz nur langfristig möglich, da Masten Einzelanfertigungen sind
- ~ **langfristige Störungsdauer**

# Stromnetze

## Europäische Dimensionen

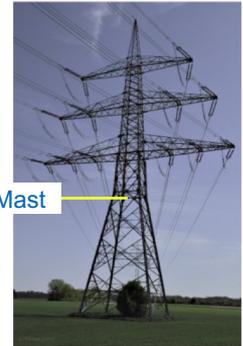
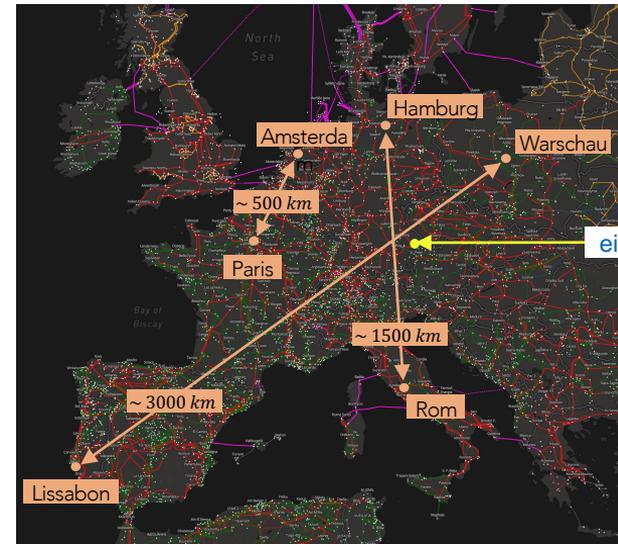
UCTE-Netzverbund – der europäische Festlandssockel



Europäische CU-Platte

- ENTSO-E Teilnetz
- **Zuhäng.** kontinentales Drehstromverbundnetz
- ca. 400 Mio. Einwohner
- jeder Nutzer mit jedem Nutzer und jeder Erzeugungsanlage verbunden
- ~ max. Netzstruktur
- ET – Fehlerausbreitung auf CU-Platte möglich
- ~ **Blackout** → mindestens auf gesamter Platte möglich

Dimensionen/Entfernungen | ~ quasistationäres System?



Wie groß war nochmal die EM – Wellenlänge für 50 Hz im Vakuum?

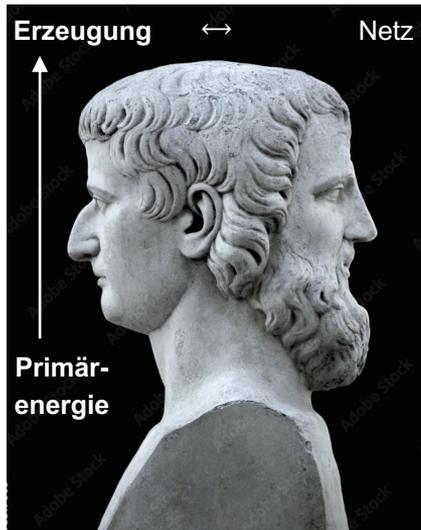
DHÜ – Festlandssockelstromnetz

[Quelle – ENTSO-E Grid Map | Auszug]

# Erzeugung und Netz

## Zusammenspiel (I)

### Modell - Januskopf



### Erzeugung - Primär-Technologie

Anthropogen nutzbare el. Energie muss technologisch bereitgestellt werden

Erzeugungstechnologie ist von der genutzten Primärenergie abhängig

Kapazitäten von Erzeugungsanlagen bedingen eine geeignete Netzstruktur

~ Kirchhoff'sche Gesetze

~ **Großerzeugungsanlagen (IST)**

**Merksatz** – Erzeugung ist hinreichend nur von Mikro-Netzstrukturen abhängig

### Netz - Sekundär-Technologie

Nutzung einer physikalischen Option  
~ Kupferplatte

Netztechnologie ist nicht von der genutzten Primärenergie in der Erzeugung abhängig

Je größer die Erzeugungsanlagen, desto mehr Netz ist notwendig

~ Kirchhoff'sche Gesetze

~ **Großflächennetze (IST)**

**Merksatz** - Netz ist notwendig von der Bündelung von Erzeugungsanlagen abhängig

# Erzeugung und Netz

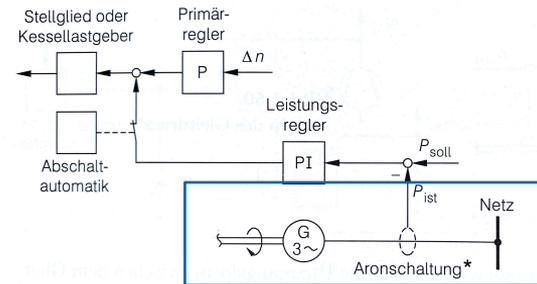
## Zusammenspiel (II)

### Notwendige Leistungs-Frequenzregelung im System



- keine signifikante Nutzung el. Speicher im nat. System
- ↪ Nutzerseitig angeforderte Bereitstellungenergie (S) muss zu jedem Zeitpunkt (Q) erzeugt werden
- ↪ Leistungs-Frequenz-Regelung – im nat./intern. Verbundnetz

### Wirkungsprinzip



**Bild 2.51**  
Wirkungsweise eines Leistungsreglers

\* Aronschaltung – Leistungsmessungen in Drehstromnetzen

[Quelle – HEUCK, Regelung im Insel- und Verbundnetz, Kap.2.5.1.2]

Weiterführende Informationen, z.B. entso-e

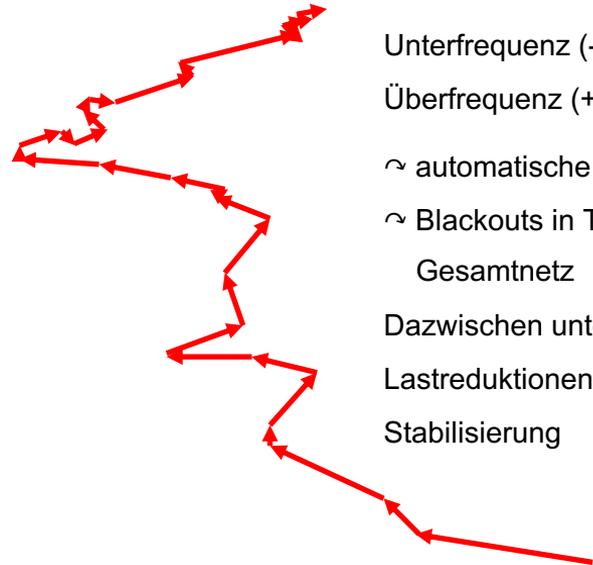
[https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/oh/Policy1\\_final.pdf](https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/oh/Policy1_final.pdf)

Anmerkung - Wie funktioniert das eigentlich bei einem Kfz ?

# Erzeugung und Netz

## Leistungs- Frequenzregelung – intuitives Verständnis (I)

### Nutzerpfad – Netzfrequenzen

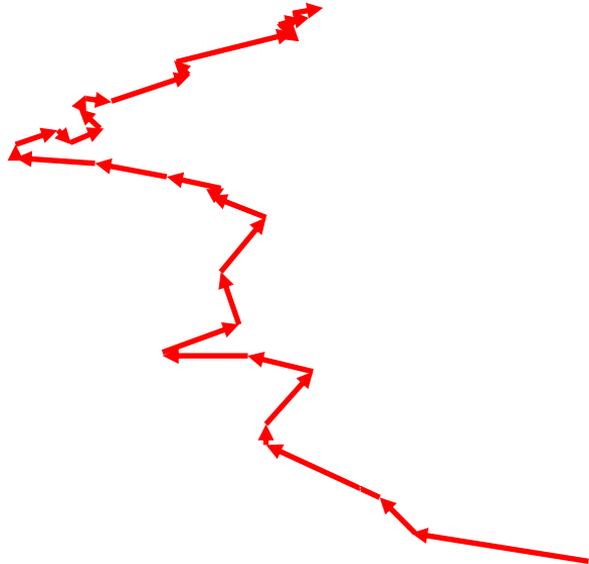


Normalfrequenz	50 Hz
Unterfrequenz (-5%)	47,5 Hz
Überfrequenz (+ 5%)	52,5 Hz
↪ automatische Netztrennungen	
↪ Blackouts in Teilnetzen oder Gesamtnetz	
Dazwischen unterschiedliche Lastreduktionen zur Stabilisierung	

# Erzeugung und Netz

## Leistungs- Frequenzregelung – intuitives Verständnis (II)

### Nutzerpfad - Netzfrequenzen



### Asymmetrisches Modell



# Erzeugung und Netz

## Beispiel – Europäische Verbundnetzstörung am 04.11.2006

### Sachverhalt

---

Am Abend des 4. November 2006 fiel ab 22:10 Uhr in einigen Teilen Europas der Strom aus. Seinen Ausgangspunkt hatte der Stromausfall im Emsland, wo eine Höchstspannungsleitung von E.ON Netz GmbH (im Folgenden: E.ON Netz) ausgeschaltet worden war, um die gefahrlose Überführung eines Kreuzfahrtschiffes aus Papenburg zu ermöglichen. Es kam zur Überlastung der Verbindungsleitung Landesbergen - Wehrendorf, die sich automatisch abschaltete. Kaskadenartig fielen daraufhin von Nord nach Süd quer durch Europa weitere Leitungen aus, und das europäische Verbundnetz zerfiel in drei Teilnetze unterschiedlicher Frequenzen. Etwa 15 Millionen Menschen waren europaweit von dem Stromausfall betroffen. Die Stromversorgung war nach rund 1,5 Stunden wieder komplett hergestellt, die Zusammenschaltung der drei Teilnetze um 23:47 Uhr beendet. E.ON Netz und andere Netzbetreiber haben die Bundesnetzagentur über die Stromausfälle informiert.

Quelle - BNetzA-Bericht 2007

# Klimatische u. wirtschaftliche Wirkungen | Anhang

- A1 BIP/Kopf G20-Staaten
- A2 CO<sub>2</sub> – Emissionen in Deutschland

# Klimatische u. wirtschaftliche Wirkungen | Anhang (A1)

## BIP/Kopf G20-Staaten in 2019



Die Vereinigten Staaten können in der Gruppe der 20 (G20) die höchste Wirtschaftsleistung pro Kopf vorweisen: Unter Berücksichtigung der Kaufkraft lag das Bruttoinlandsprodukt (BIP) je Einwohner 2019 bei rund 65 300 **internationalen US-Dollar**. Deutschland lag den Schätzungen des Internationalen Währungsfonds (IWF) zufolge mit 56 200 internationalen US-Dollar auf Platz 2. Es folgte Australien mit 52 700 internationalen US-Dollar.

In der EU stieg das kaufkraftbereinigte Bruttoinlandsprodukt pro Kopf 2019 auf 46 600 int. US-Dollar. Schlusssicht der G20-Staaten war Indien mit einer Pro-Kopf-Wirtschaftsleistung von rund 7 000 int. US-Dollar.

Die G20 umfasst 19 Industrie- und Schwellenländer sowie die Europäische Union. Zusammen erwirtschaftet die Gruppe rund 80 % des jährlichen globalen Bruttoinlands-

produkts.

Diese und weitere Daten zum [BIP und zum Wirtschaftswachstum](#) finden Sie in der IWF World Economic Outlook-Datenbank. Ausführliche Daten zum [Bruttoinlandsprodukt Deutschlands](#) finden Sie im Bereich Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen.

Quelle – Statistisches Bundesamt (D)

# Klimatische u. wirtschaftliche Wirkungen | Anhang (A2)

## CO<sub>2</sub> – Emissionen Deutschland

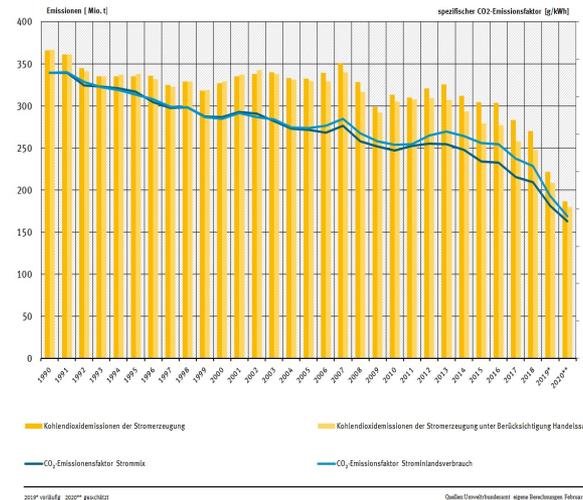
### Wie viel CO<sub>2</sub> verursacht eine Kilowattstunde Strom im deutschen Strommix?

Der Indikator „direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen je Kilowattstunde Strom“ wird auch als „Emissionsfaktor“ oder spezifische Emission bezeichnet. Er charakterisiert die Klimaverträglichkeit der Stromerzeugung.

Die Veröffentlichung "**Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix**" zeigt den Verlauf der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren in der Zeitreihe und den Einfluss des Stromhandelsaldos darauf. Sie enthält auch eine Beschreibung der zugrundeliegenden Berechnungsmethoden.

Bei der Erzeugung einer Kilowattstunde Strom für den Endverbrauch ohne Berücksichtigung des Stromhandelsaldos wurden in Deutschland im Jahr 2018 durchschnittlich 471 Gramm Kohlendioxid als direkte Emission aus der Verbrennung fossiler Energieträger emittiert. Das sind ca. 293 Gramm pro Kilowattstunde oder 38 Prozent weniger als im Jahr 1990. Für das Jahr 2019 auf der Basis vorläufiger Daten sind dies 408 Gramm pro Kilowattstunde. Hochgerechnete Werte für das Jahr 2020 ergeben 366 Gramm pro Kilowattstunde und somit 398 Gramm und ca. 52 Prozent weniger als 1990. Der Einfluss der Corona-Pandemie kann mit den verfügbaren Daten nicht hinreichend quantifiziert werden.

Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2019 und erste Schätzungen 2020 im Vergleich zu CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stromerzeugung



Jahr	Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung (Mio. t)	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor Stromhandelsverbrauch [g/kWh]	Kohlendioxidemissionen der Stromerzeugung unter Berücksichtigung Handelsaldos (Mio. t)
1990	366	764	763	347
1991	361	764	765	361
1992	345	730	739	341
1993	335	726	725	335
1994	335	722	718	337
1995	335	713	706	338
1996	336	685	692	332
1997	325	669	673	323
1998	329	671	672	329
1999	318	647	646	319
2000	327	644	640	329
2001	336	659	656	337
2002	338	654	646	343
2003	340	635	639	338
2004	333	615	618	331
2005	333	610	616	330
2006	339	603	622	329
2007	351	621	640	340
2008	328	581	602	316
2009	299	566	580	292
2010	313	555	570	305
2011	310	568	572	308
2012	321	573	595	309
2013	326	572	606	307
2014	312	557	593	293
2015	304	527	575	279
2016	304	523	572	277
2017	283	485	533	258
2018	270	471	515	247
2019*	227	468	426	208
2020**	187	366	380	180

Quelle – Umweltbundesamt (D)

# Vorlesung – Stromnetze

Regulierungssystem der Zukunft | 11

Dr. Manfred Benthous

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Energiesysteme

München, 25.06.2021



# Organisatorisches

## Vorlesung Stromnetze SoSe 2021

Nr.	Termin	Zeit	Inhalt	verantwortlich
1	16.04.	14:00 – 16:00	Nationale elektrische Energieversorgung im Überblick	Speith
2	23.04.	14:00 – 16:00	Physikalisch-technische Grundlagen	Benthaus
3	30.04.	14:00 – 16:00	Technische elektrische Energieversorgungssysteme	Benthaus
4	07.05.	14:00 – 16:00	Digitalisierung der Energiewirtschaft - Verteilnetz	Kabs
5	14.05.	14:00 – 16:00	Grundlagen der Stromnetzregulierung	Benthaus
6	21.05.	14:00 – 16:00	Elektrische Energiespeicher - Verteilnetz	Murche
7	28.05.	14:00 – 16:00	Energiernetz Regulierungssysteme	Benthaus
8	04.06.	14:00 – 16:00	Energierechtliche Grundlagen	Eßlinger
9	11.06.	14:00 – 16:00	Deutsche Stromnetznetzregulierung	Benthaus
10	18.06.	14:00 – 16:00	Stromnetze – Klimatische und wirtschaftliche Wirkungen	Benthaus
11	25.06.	14:00 – 16:00	Regulierungssystem der Zukunft	Benthaus
12	02.07.	14:00 – 16:00	Abschluss Vorlesungen und Fragestunde zu Prüfungen	Benthaus / Netter
13	05.- 07.07.	ganztägig	Prüfungen	Benthaus / Netter

# Literatur

## Auswahl zur Vorlesung Stromnetze 11

ALTLAND, v. DELFT	2019	Mathematics for Physicists, Cambridge University Press
BENTHAUS	2019	A coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. <i>Energ Sustain Soc</i> <b>9</b> , 50 <a href="https://doi.org/10.1186/s13705-019-0221-4">https://doi.org/10.1186/s13705-019-0221-4</a>

# Titelbild

## Regulierungssystem der Zukunft



Nutzer elektrischer Energie – selbstbestimmte Akteure in einem Zukunftssystem

## Kern – Anforderungen für ein Zielsystem

1. Rollentausch bei den **aktiven Akteuren** (→ Vorlesung 10), vom Netzbetreiber/Regulator zum **Nutzer/Regulator** realisieren
2. Den Regulator in die Lage versetzen eine **Auflagenstrategie** (→ Vorlesung 10) zu entwickeln und umzusetzen, d.h. l'aymmetrie (→ 0)
3. **Ausweitung der Regulierung** auf Erzeugung und Netz
4. **Reduktion** (→ 0) volkswirtschaftlicher Risiken aus der el. EVS durch Nutzung einer geeigneten Technologie
5. Ausschließliche Nutzung **EM-Strahlung als Primärenergie**
6. Realisierung eines vollständig klimaneutralen nat. el. EVS
7. Jedem Nutzer eine **technologisch selbstbestimmte** el. EVS ermöglichen

### → Stromnetze

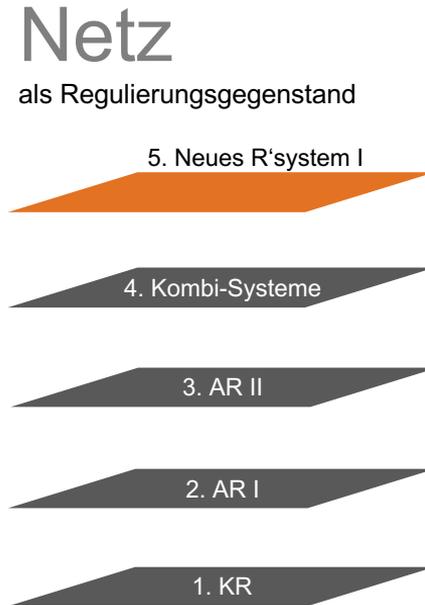


# Regulierungssystem der Zukunft

## Entwicklungsstufen

### Satellitensystem - systemerhaltend

- Oberziel → Entkopplung des direkten Brancheneinflusses durch regulatorische Schaffung eines fiktiven nat. NB
- Ausschluss kollusives NB-Verhalten
- Informationsasymmetrie → 0, d.h. gilt auch für Effizienzunterschiede
- Beginn Systemintegration von direktem Nutzeranforderungen



### Ganzheitliche Regulierungssystem - systemverändernd

6. Neues R'system II

**Erzeugung und Netz**  
als Regulierungsgegenstand

- Oberziel → Reduktion, bis gegen ‚null‘, technologisch bedingter Risiken/Gefahren der el. EVS in nationalen Volkswirtschaften und im internationalen Klimasystem
- Nutzer/-anforderungen stehen im Systemmittelpunkt → Lokalisierung/Individualisierung
- **Regulator agiert mit einer Auflagen-Strategie**

# Regulierungssystem der Zukunft

## Zu beachtende Begriffe – Begriffssammlung

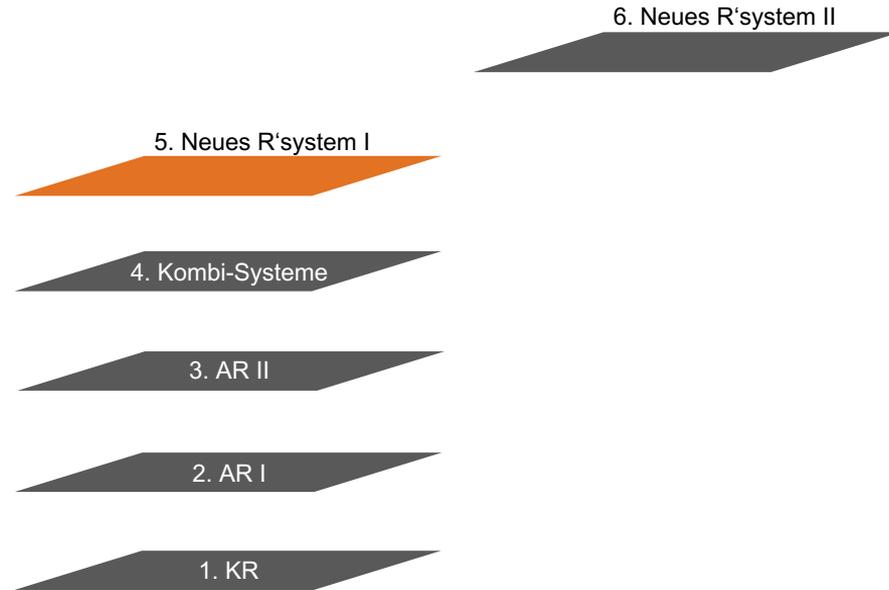
Organisationen	Netzbetreiber	Technik	Regulierung
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzer – aktiv</li> <li>– Anzahl</li> <li>– Individualisierungsgrad</li> <li>– Einführung</li> <li>– Schadenersatzanspruch</li> <li>▪ Regulator – aktiv</li> <li>– national, genau einen</li> <li>▪ Netzbetreiber – passiv</li> <li>▪ Gesetz- und Verordnungsgeber</li> <li>– Regulatorisches Oberziel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Netzkosten</li> <li>– Investitionsverhalten</li> <li>– NE-spezifisch</li> <li>▪ Netzerlöse / Preise</li> <li>▪ Kosteneffizienz</li> <li>– Größeneffekte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verfügbarkeit</li> <li>– ggf. begleitende Kontrollgröße</li> <li>▪ Technologieveränderungen</li> <li>– Reduktion der CU-Platte</li> <li>▪ Innovationsförderung</li> <li>– z.B. el. Speichertechnologien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Informationsasymmetrie</li> <li>▪ Auflagenstrategie</li> <li>▪ Instrumente</li> <li>– Kostenregulierung</li> <li>– Anreizregulierungen I + II</li> <li>– Benchmarking</li> <li>– Yardstick-Competition</li> <li>– Grenzkosten</li> <li>▪ Regulierungsgegenstand</li> <li>– Netz</li> <li>– Erzeugung und Netz</li> <li>▪ Investitionslenkung</li> <li>▪ Klima/Primärenergieeinsatz</li> <li>▪ volkswirtschaftliche Risiken</li> </ul>

# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem\*

## Netz

als Regulierungsgegenstand | systemerhaltend



\*Zur Namengebung → Satellit

Satellit (von lateinisch *satelles* ‚Begleiter‘) steht für:

- Satellit (Astronomie), ein Himmelskörper („Mond“) auf einer Umlaufbahn um ein anderes Objekt

# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Idee auf der Basis eines phys. Schwerpunktsystems

### Regulierungsgegenstand – nat. Stromnetz

- |  |   |
|--|---|
| 1. Ausgangspunkt ist die nat. gegebene NB – Struktur   | 5. Der <i>SNB</i> wird in der Ausgangssituation auf der Grundlage aller vorhandenen realen NB gebildet  |
| 2. Vollständige Beschreibung der NB<br>– mindestens durch die Variablen <b>Nutzeranzahl</b> , <b>Netzkosten</b> , <b>Effizienz</b> und <b>technische Verfügbarkeit</b>       | 6. Direkte Realisierung der max. Konsumentenrente aus der Ausgangssituation   |
| 3. Aufhebung der regulatorischen Informationsasymmetrie<br>– Bildung eines fiktiven NB, <b>Schwerpunktnetzbetreiber <i>SNB</i></b> , zur weiteren Reduktion der I'asymmetrie | 7. Bildung <b>eines weiteren fiktiven nat. NB (<i>LNB</i>)</b> , auf der Grundlage von Modellnetzen (→ BM-Ing.modelle), mit angestrebter Grenzkostenbasis zur Erhöhung der Konsumentenrente |
| 4. Der <i>SNB</i> repräsentiert <b>genau einen nat. Stromnetzbetreiber</b> und ist zentraler Regulierungsgegenstand  | 8. Entwicklung <i>SNB</i> in <i>LNB</i> auf der Zeitachse<br>9. Schaffung von Voraussetzungen für einen <b>internationalen Effizienzvergleich</b> der <i>LNB</i>                            |

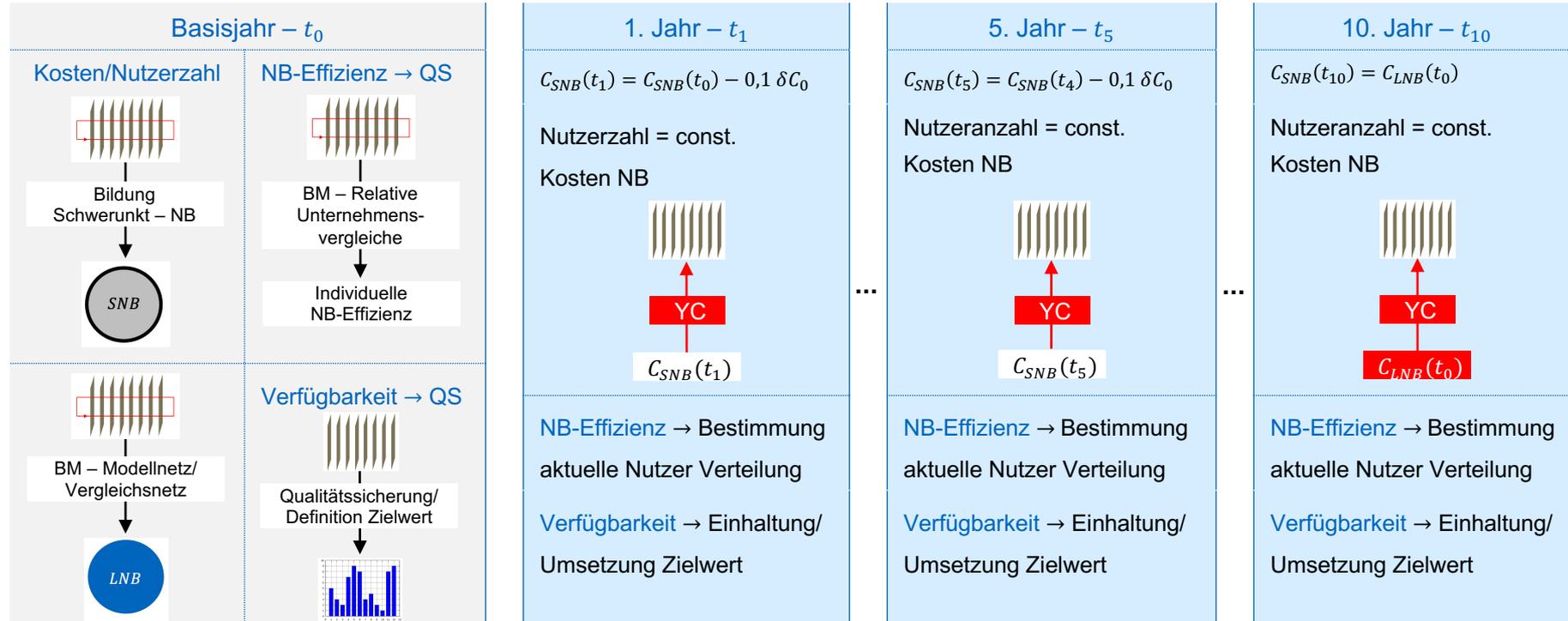
# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Grobe Prozessstruktur

Ausgangssituation/Basisjahr $t_0$ → Kosten und Nutzeranzahl	Ausgangssituation/Basisjahr $t_0$ → NB - Effizienz	Zeitentwicklung → Kosten und Nutzeranzahl	Zeitentwicklung → NB - Effizienz
1. Feststellung Netzkosten und Nutzeranzahl aller NB 2. Bildung eines fiktiven nat. Schwerpunkt-NB 3. Bildung eines nat. Modell-NB (Grenzkostenniveau)	1. Ermittlung ind. Effizienzwerte 2. Bestimmung/Gewichtung der Nutzerzahl-Verteilung 3. Qualitätssicherung (QS)	<b>Nutzerzahlen</b> – Annahme NB-Zahlen bleiben const.	<b>Effizienzwerte</b> – BM-Verfahren nach U-vergleichen (→ VL 07)
→ Kostendifferenz $\delta C_0$ zwischen nat. fiktiven NB $C_{SNB}$ und nat. Modell-NB $C_{LNB}$ $\sim \delta C_0 := C_{LNB}(t_0) - C_{SNB}(t_0)$	→ <b>Verfügbarkeit</b> 1. Feststellung NB-spez. Werte 2. Def. nat. Verteilungs-Zielwert z.B. Ausgangszustand, Peer-Group-Wert oder Mittelwert 3. Qualitätssicherung	<b>Kosten</b> – der NB Netzpreise (PCR) nur nach YC aus Schwerpunkt-NB bestimmt	Zuordnung einer rel. und ind. NB-Effizienz <b>Ziel</b> – effizienzbezogene Nutzerverteilung der jährlichen Systemzustände → QS
		Prozesslaufzeit – 10 Jahre $t_0   t_1 \dots t_{10}$	
		<b>Ziel</b> – Grenzkostenniveau nach 10 Jahren im nat. System für alle NB erreicht	→ <b>Verfügbarkeit</b> <b>Ziel</b> – Jährliche Einhaltung des definierten Zielwertes → QS

# Regulierungssystem der Zukunft (I)

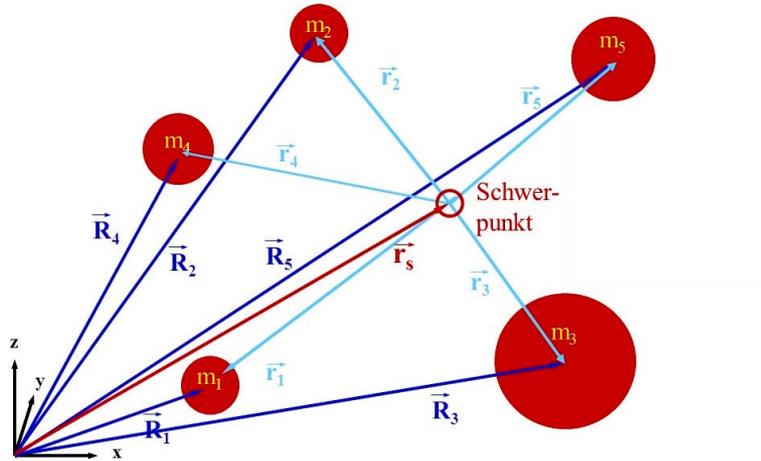
## Satellitensystem – Grobe Prozessstruktur | Graphik



# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Physikalische Grundlagen

### Mechanisches Schwerpunktsystem



### Eigenschaften

1. Mechanik der Massenpunkte, d.h. diskrete  $M'$ -Verteilungen
2. Die Anzahl der Massepunkte sei  $n \in \mathbb{N}$ , die einzelnen individuellen Massen  $m_i$  und die Gesamtmasse  $M = \sum_{i=1}^n m_i$
3. Anwendung bei Stoßprozessen → **Laborsystem**  $L$
4. Physikalisch abgeschlossenes System
5. Im **Schwerpunktsystem**  $S$  ruht der Schwerpunkt, d.h. sein Gesamtimpuls gleich Null,  $\sum_{i=1}^n \mathbf{P}_i = \mathbf{0}$
6.  $S$  befindet ggü. einem  $L$  am Ort,  $\mathbf{r}_S = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{R}_i}{M}$
7. Der Schwerpunkt ist eine fiktive Größe, der die Gesamtmasse an einem Raumpunkt (Ortsvektor) in sich vereinigt
8. Bewegung von  $S$  im Laborsystem  $L$  beschreibt die **Systemdynamik exakt** (nicht die einer Einzelmasse)

# Regulierungssystem der Zukunft (I)

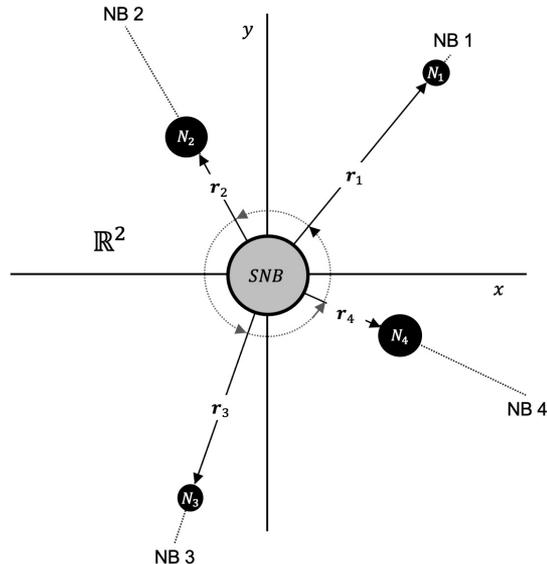
## Satellitensystem – Transformation (I)

Physikalisches System		Regulatorisches System	
Mathematischer Raum	$\mathbb{R}^3$	Mathematischer Raum	$\mathbb{R}^2$ ( $\rightarrow$ Polarkoordinaten)
Unterscheidung der Massen	$i \in \mathbb{N}$ (Laufindex)	Unterscheidung der NB	$i \in \mathbb{N}$ (Laufindex)
$i$ – te Massengröße	$m_i$	Nutzeranzahl $i$ – ter NB	$N_i$
Abstand der $i$ – ten Masse vom Schwerpunkt	$\mathbf{r}_i = (x, y, z)$	Kostenabstand $i$ – ter NB von $SNB$	$ \mathbf{r}_i  = \rho_i$
		NB-Effizienz	$\phi_i$
Ursprung Laborsystem	$\mathbf{r}_L = (0,0,0)$	Ursprung Laborsystem $LNB$	$\mathbf{r}_L = (0,0)$
Abstand Schwerpunkt vom Laborsystem	$\mathbf{r}_S = (x_s, 0, 0)$	Abstand Schwerpunkt ( $SNB$ ) vom Laborsystem ( $LNB$ )	$\mathbf{r}_S = (\rho_s, 0)$
		Verfügbarkeit	$\theta_i$
		Kugelkoordinaten $\rightarrow$ ALTLAND	$\mathbb{R}^3$
		Werte im Transformationsprozess	$\approx const.$ , deshalb keine explizite Betrachtung

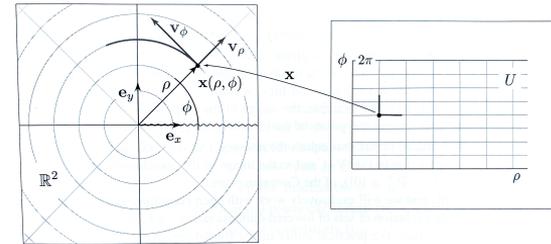
# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – regulatorisches Schwerpunktsystem

Schwerpunktsystem → regul. Schwerpunkt – NB (SNB)



Polarkoordinaten



The construction of polar coordinates. Each coordinate pair,  $(\rho, \phi)^T \in U$ , describes a point,  $\mathbf{x}(\rho, \phi) \in \mathbb{R}^2$ , in the Cartesian coordinate plane. The concentric and radial lines are lines of constant radius  $\rho$  or angle  $\phi$ , respectively. Tangent to these lines are the vectors of the coordinate basis discussed in Section V2.2 (see Eq. (V20)). The wriggly line denotes the non-negative real axis,  $\mathbb{R}_0^+ \times \{0\} = \{(x, y)^T | x \geq 0, y = 0\}$ , which is not covered by the coordinate map.

Darstellung Vektoren

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \rho \\ \phi \end{pmatrix}$$

Transformationen

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} \rho \\ \phi \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x(\rho, \phi) \\ y(\rho, \phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho \cos \phi \\ \rho \sin \phi \end{pmatrix}$$

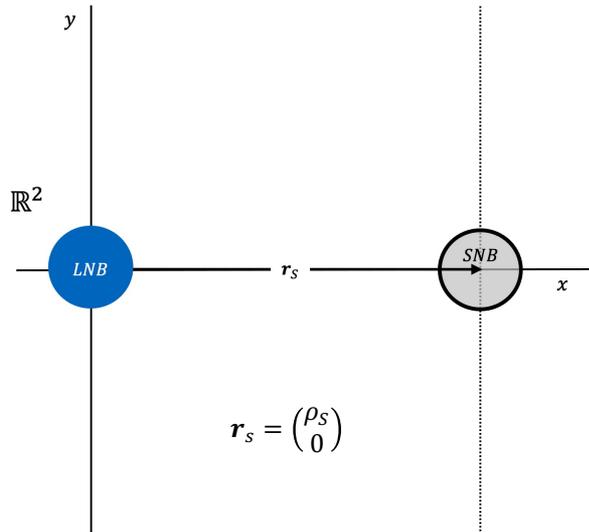
$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \rho(x, y) \\ \phi(x, y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2 + y^2} \\ \arctan(y/x) \end{pmatrix}$$

[Quelle – ALTLAND, Chap. V2.1]

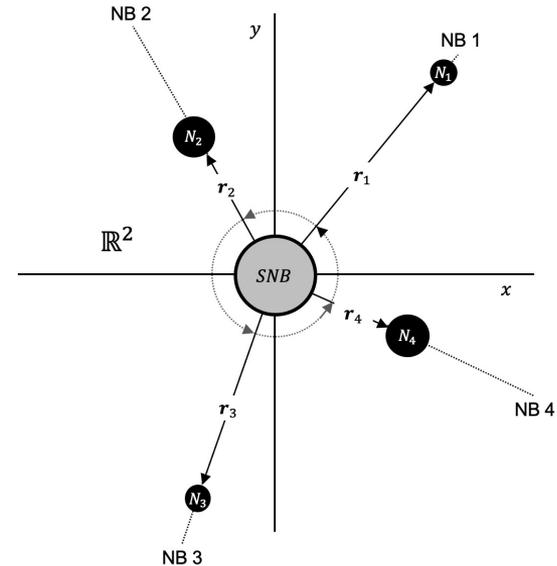
# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – regulatorisches Schwerpunkt- und Laborsystem

Laborsystem → regul. Minimalnetz – NB (LNB)

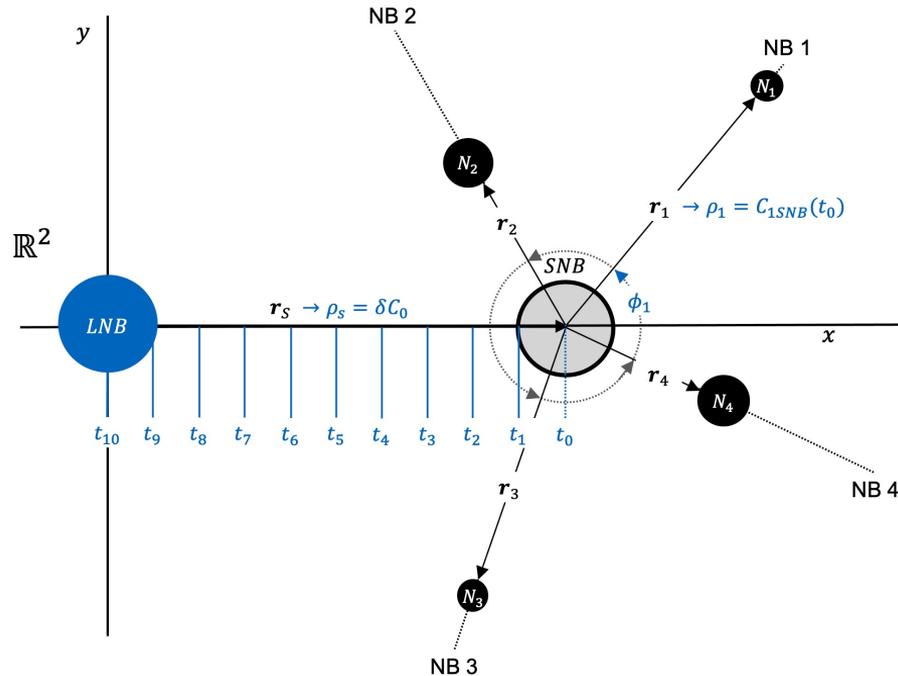


Schwerpunktsystem → regul. Schwerpunkt – NB (SNB)



# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Gesamtsystem | Überblicks – Graphik



# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Prüffragen (I)

Kern – Anforderungen für ein Zielsystem (→ Folie ‚Titelbild‘)	Umsetzungsgrad (→ Schätzung)
1. Rollentausch bei den <b>aktiven Akteuren</b> (→ Vorlesung 10), vom Netzbetreiber/Regulator zum <b>Nutzer/Regulator</b> realisieren	50 %
2. Den Regulator in die Lage versetzen eine <b>Auflagenstrategie</b> (→ Vorlesung 10) zu entwickeln und umzusetzen, d.h. l'asymmetrie (→ 0)	30 %
3. <b>Ausweitung der Regulierung</b> auf Erzeugung und Netz	0 %
4. <b>Reduktion (→ 0)</b> volkswirtschaftlicher Risiken aus der el. EVS durch Nutzung einer geeigneten Technologie	0 %
5. Ausschließliche Nutzung <b>EM-Strahlung als Primärenergie</b>	0 %
6. Realisierung eines vollständig klimaneutralen nat. el. EVS	0 %
7. Jedem Nutzer eine <b>technologisch selbstbestimmte</b> el. EVS ermöglichen	0 %

# Regulierungssystem der Zukunft (I)

## Satellitensystem – Prüffragen (II)

Operative Anforderungen (→ Folie ‚Satellitensystem – Idee ...‘)

1. Ausgangspunkt ist die nat. gegebene NB – Struktur	100%	5. Der <i>SNB</i> wird in der Ausgangssituation auf der Grundlage aller vorhandenen realen NB gebildet	100%
2. Vollständige Beschreibung der NB	~ 80%	6. Direkte Realisierung der max. Konsumentenrente aus der Ausgangssituation	< 80%
– mindestens durch die Variablen <b>Nutzeranzahl, Netzkosten, Effizienz und technische Verfügbarkeit</b>	100%	7. Bildung <b>eines weiteren fiktiven nat. NB (<i>LNB</i>)</b> , auf der Grundlage von Modellnetzen (→ BM-Ing.modelle), mit angestrebter Grenzkostenbasis zur Erhöhung der Konsumentenrente	100%
3. Aufhebung der regulatorischen Informationsasymmetrie	~ 80%	8. Entwicklung <i>SNB</i> in <i>LNB</i> auf der Zeitachse	100%
– Bildung eines fiktiven NB, <b>Schwerpunktnetzbetreiber <i>SNB</i></b> , zur weiteren Reduktion der I'asymmetrie	100%	9. Schaffung von Voraussetzungen für einen <b>internationalen Effizienzvergleich</b> der <i>LNB</i>	100%
4. Der <i>SNB</i> repräsentiert <b>genau einen nat. Stromnetzbetreiber</b> und ist zentraler Regulierungsgegenstand	100%		