



Technische
Universität
Braunschweig

Grundlagen der elektrischen Energietechnik Teil 1: Grundlagen der Energieversorgung - Energiewirtschaft und Netzbetrieb -

Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel | elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme | 24.04.2024

Inhalte

1. Energiewirtschaft

- Einführung und Energiewende
- EEG – Erneuerbare-Energien-Gesetz
- Strombörse

2. Netzbetrieb

- Systemdienstleistungen
- Frequenzhaltung
- Spannungshaltung

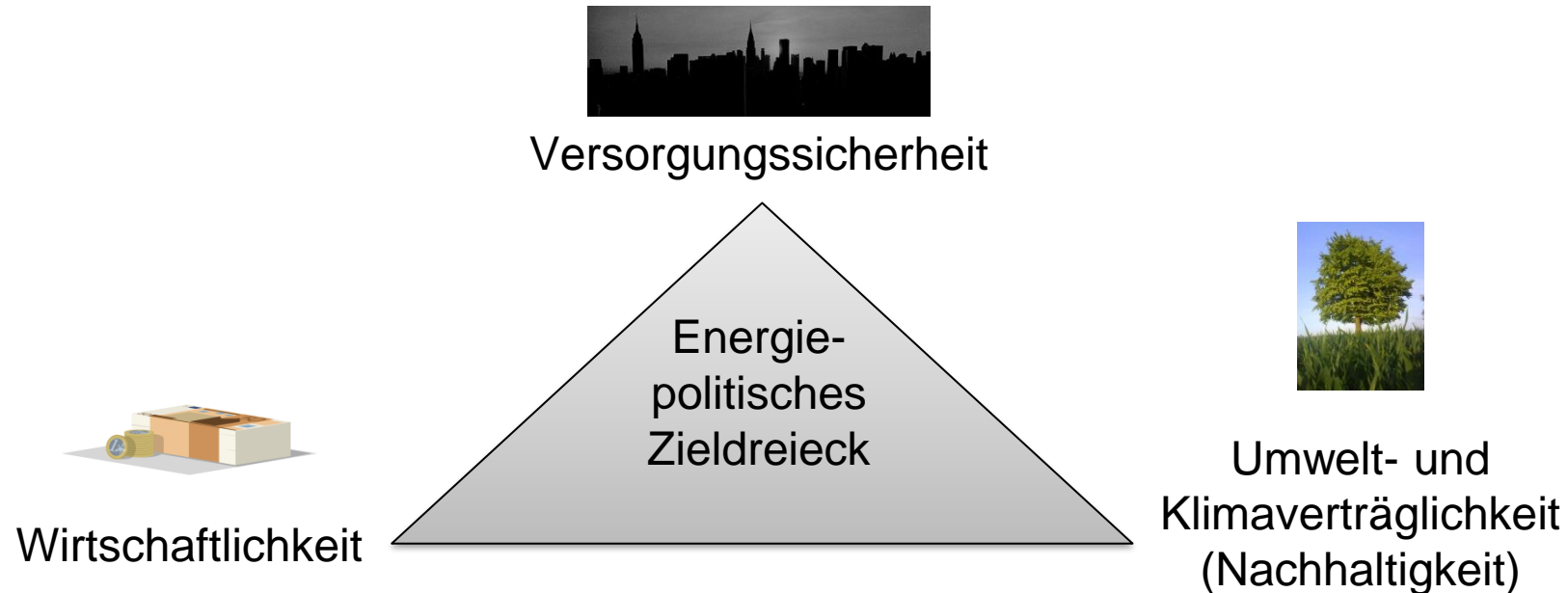


(Quelle: BMU, 2011)

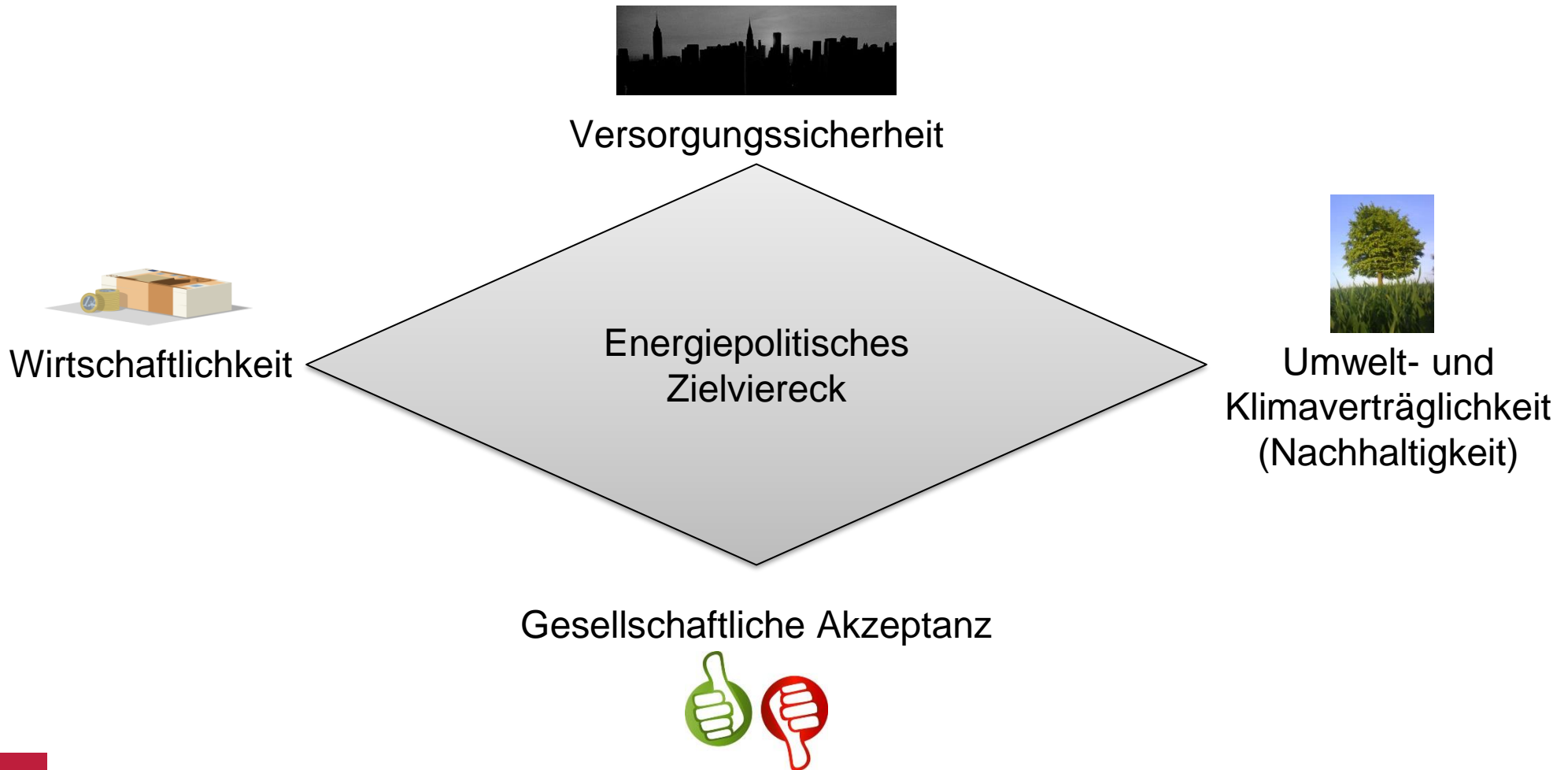
1.1 | Energiewirtschaft

Das energiepolitische Zieldreieck...

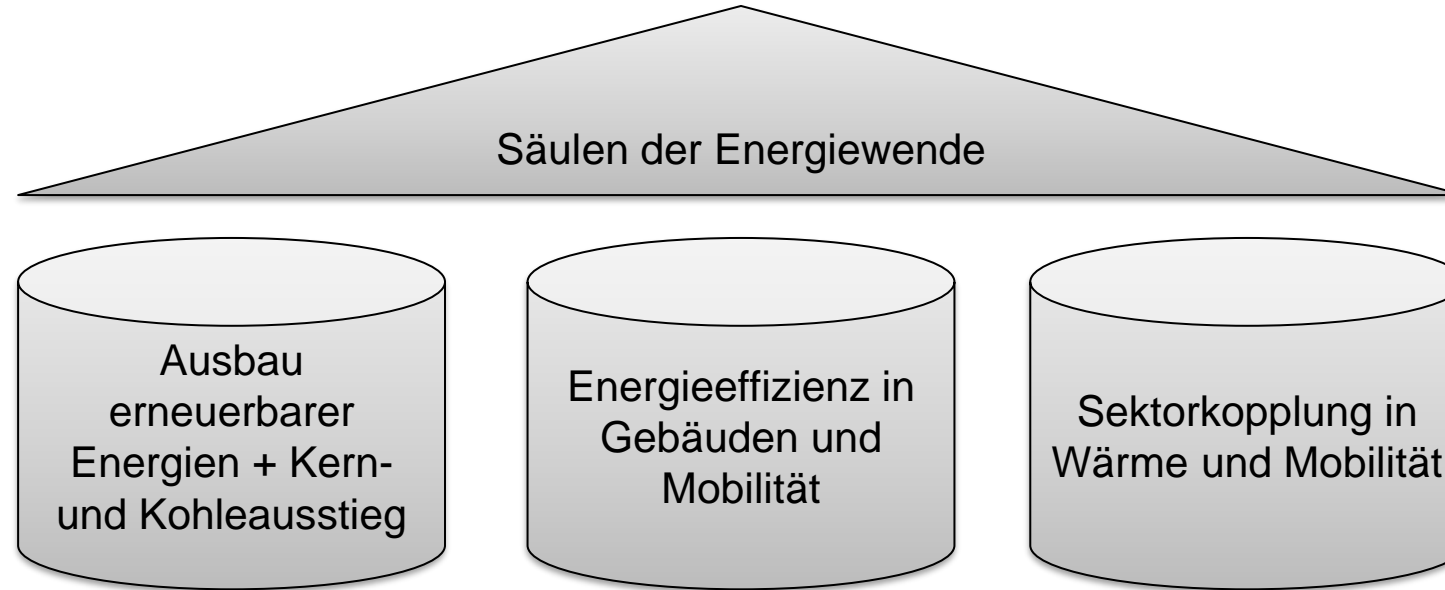
- §1 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Ziele stehen in Wechselwirkung zueinander
- Fokussierung einzelner Ziele kann dazu führen, dass gesamtwirtschaftliche Perspektive aus den Augen verloren wird



... wird zu einem Viereck!



Die deutsche Energiewende



Die Erzeugung...

- wird dezentraler und fluktuierender,
- ist z.T. abhängig von der Wetterlage (Wind / Sonneneinstrahlung),
- aus erneuerbaren Energien wird finanziell gefördert,
- erfolgt nicht mehr ausschließlich last-, sondern dargebotsabhängig.

Herausforderungen und Lösungsansätze der Energiewende

Herausforderungen

- Dezentrale Erzeugung
- Transport vom Erzeuger zum Verbraucher (Prosumer)
- Dargebotsabhängige Erzeugung
- Integration erneuerbarer Energien

Lösungsansätze

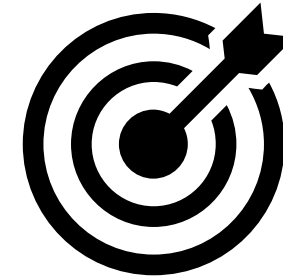
- Ausbau der Übertragungs- und Verteilungsnetze
- Verteilung und Speicherung des Stroms in Spitzenzeiten
- Fördermechanismen
- Neuorganisation des Strommarktes

1.2 | Erneuerbare-Energien-Gesetz

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Zweck und Ziel:

- Nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung
- Reduzierung der volkswirtschaftlichen Kosten der Versorgung
- Schonung fossiler Energieressourcen
- Weiterentwicklung von Technologien für erneuerbare Energien
- Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch erhöhen



■Regelt die Abnahme für Strom aus...

...Windkraft

...Solarstrahlung

...Biomasse

...Geothermie

...Grubengas

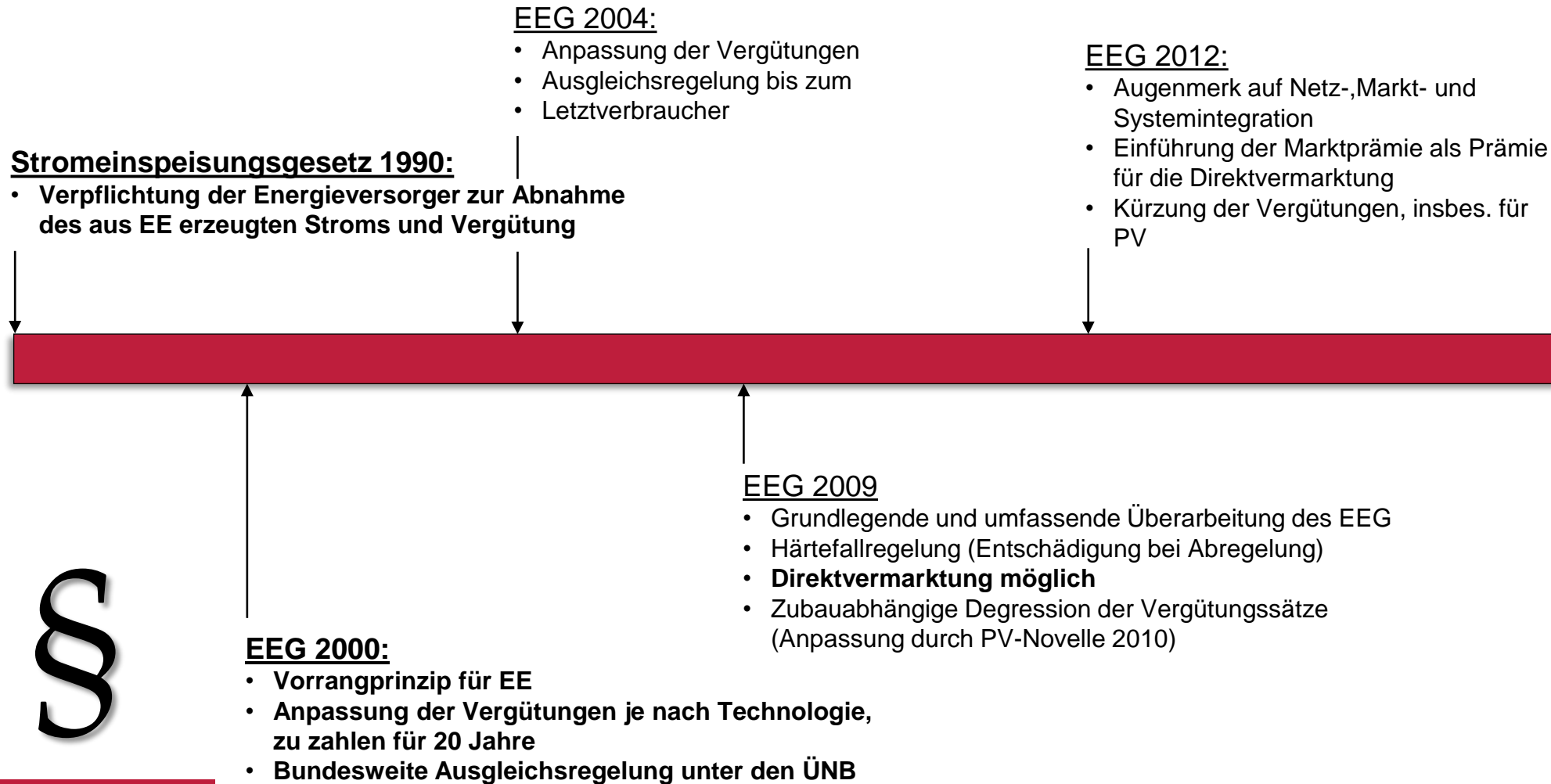
...Wasserkraft

...Deponie- und Klärgas

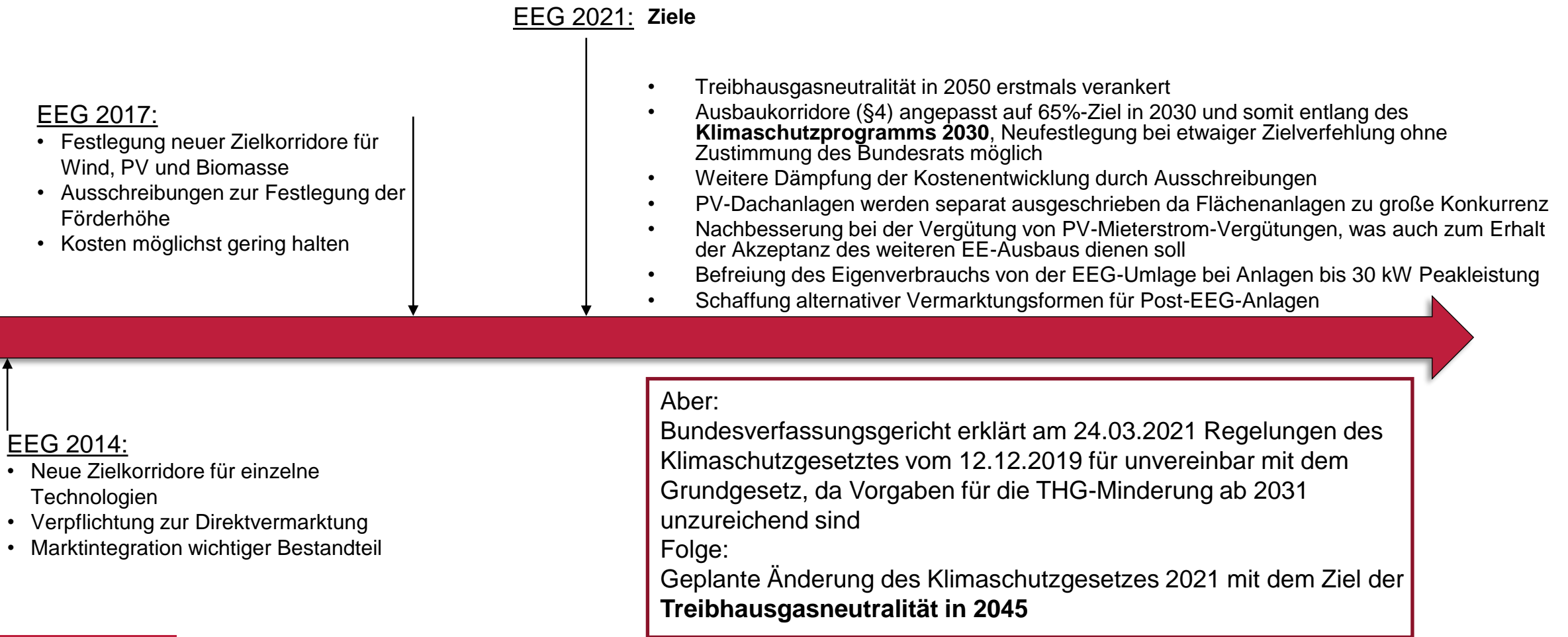


(Quelle: BMU, 2011)

EEG – Wesentliche Entwicklungen

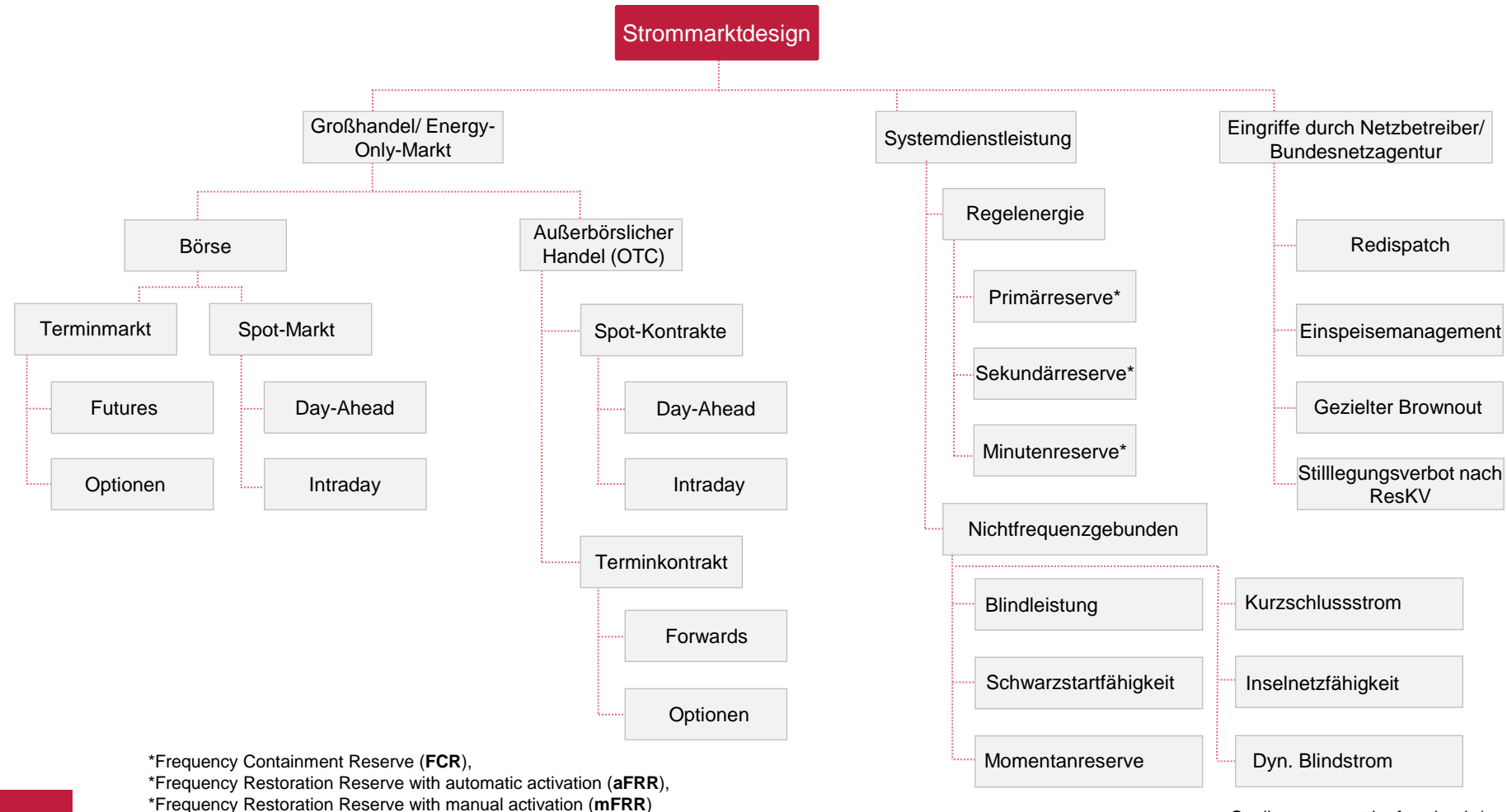


EEG – Wesentliche Entwicklung



1.3 | Strombörse

Strommarktdesign



Quelle: www.next-kraftwerke.de/

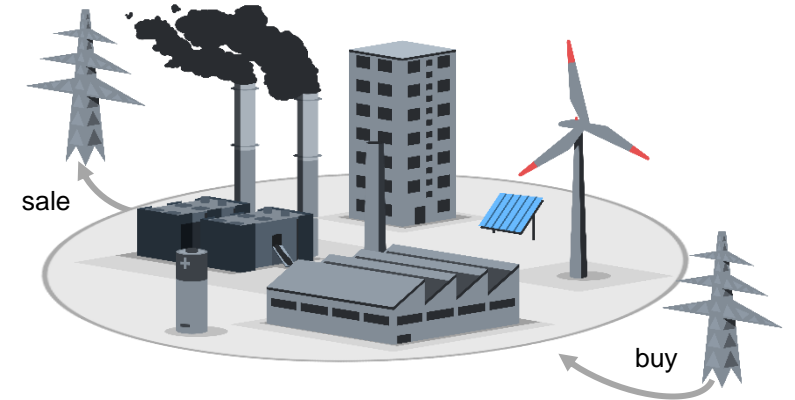
EEX – Europäischer Marktplatz für Energie

- EEX = European Energy Exchange (Sitz: Leipzig)
- Gründung im Jahr 2000 als lokale Strombörse
- Handelt nicht nur Strom, sondern auch Erdgas, Kohle, Öl, Emissions-berechtigungen etc.
- Insbesondere langfristiger Terminhandel
- Zur Vermarktung von Strom an der EEX muss ein Zulassungsprozess durchlaufen werden → Nur anerkannte Händler dürfen handeln
- Kurzfristhandel von Strom findet am sog. Spotmarkt der *epex-spot* (Sitz: Paris) einer Tochtergesellschaft der eex statt



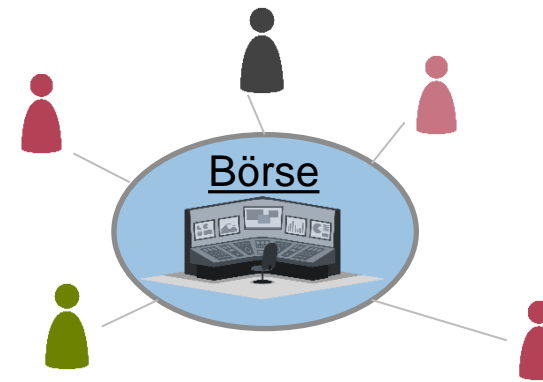
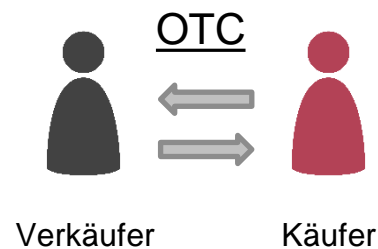
Bilanzkreise

- Die vier Regelzonen der ÜNB sind in Bilanzkreise unterteilt, welche aus mindestens einer Einspeise- oder einer Entnahmestelle bestehen
- Innerhalb eines Bilanzkreises müssen alle wettbewerblichen Akteure ihre physischen **Energiegeschäfte**, **Einspeisungen** aus Erzeugungsanlagen und **Belieferung von Letztverbrauchern** deklarieren
- Für jeden Bilanzkreis wird ein Bilanzkreisverantwortlicher (BKV) benannt, welcher dazu Verpflichtet ist den Bilanzkreis für jedes Abrechnungsintervall (¼-Stunden) ausgeglichen zu halten
$$\text{Einspeisung} = \text{Entnahme}$$
- Bereits am Vortag (Anmeldeschluss 14:30) muss der BKV **einen ausgeglichenen Fahrplan** mit sämtlichen **prognostizierten Einspeisungen** und **Entnahmen** sowie **Handelsgeschäften** dem ÜNB für deren Lastflussberechnungen übermitteln
- Für auftretende Abweichungen vom Fahrplan ist der BKV verantwortlich

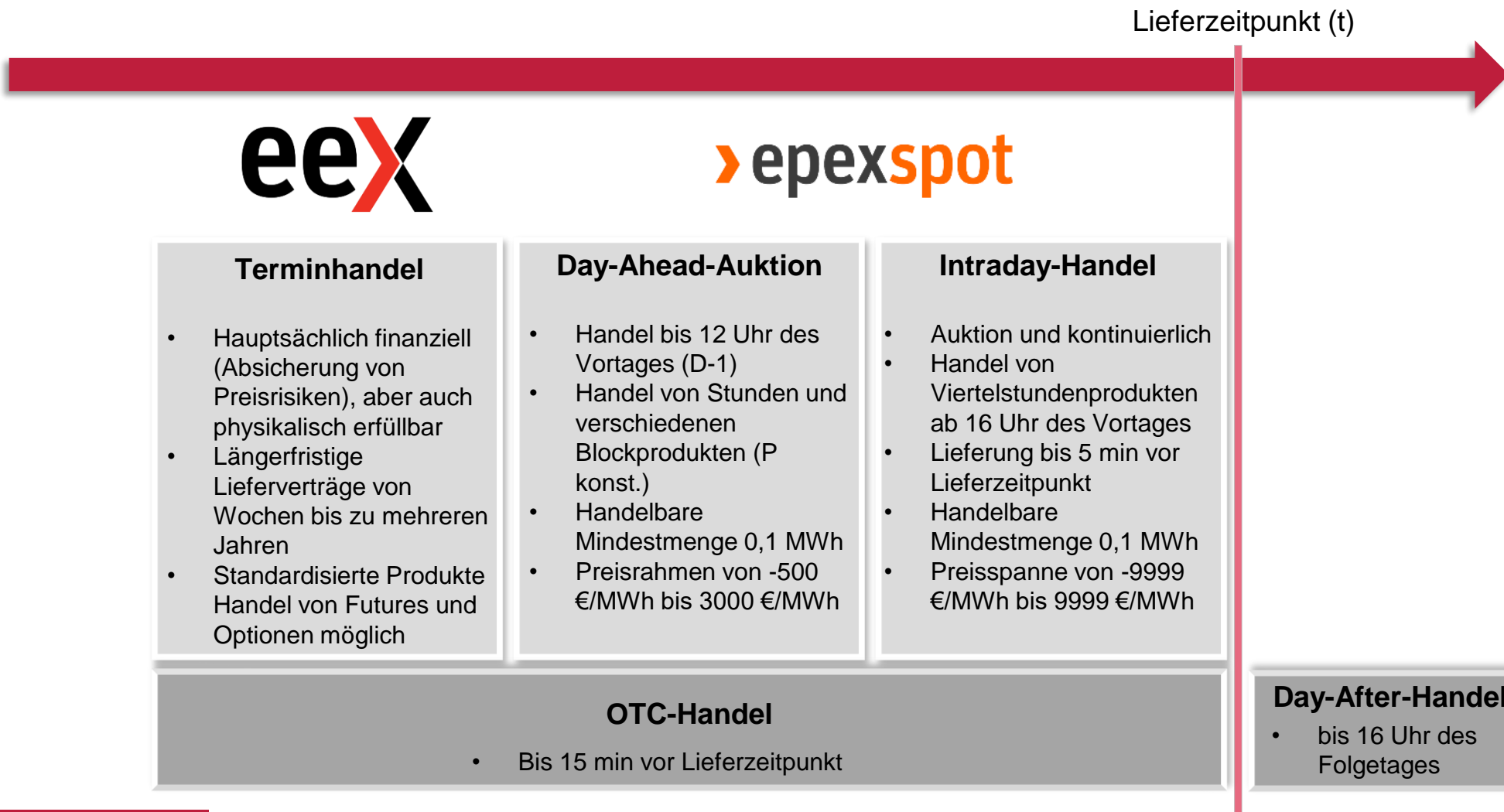


OTC-Stromhandel vs. Börsenhandel

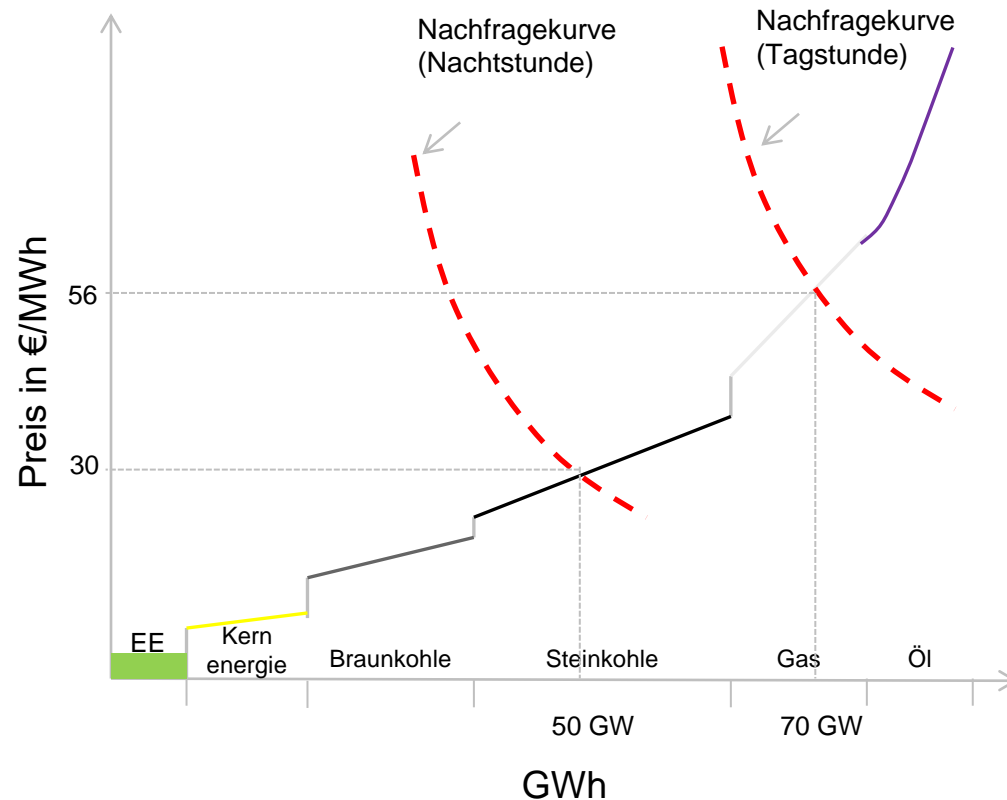
- Die meisten Strommengen in Deutschland werden im **OTC**-Handel ("Over-the-Counter") verkauft, also in außerbörslichen, meist langfristigen Direktverträgen zwischen Produzenten und Abnehmern (bilateral)
- Im Börsenhandel sind die **Preise** und **Volumina** im Gegensatz zum OTC **öffentlich**.
→ OTC-Preise orientieren sich an Börsenpreisen (sonst Arbitrage)
- Beim OTC-Handel fallen u.U. **keine Börsengebühren** und **Transaktionsentgelte** an
- OTC-Handel hat **keine festen Standards**
→ flexibler aber auch riskanter



Chronologie des Strommarktes



Preisbildung am Spotmarkt – Merit Order



Preisbildung

- Für jede Stunde des folgenden Tages wird am Spotmarkt eine Merit Order der verfügbaren Kraftwerksleistung erstellt
- Das letzte noch benötigte Grenzkraftwerk bestimmt mit seinen Grenzkosten den „Markträumungspreis“ der Stunde, den **ALLE** Verkäufer erhalten und **ALLE** Käufer zu zahlen haben.

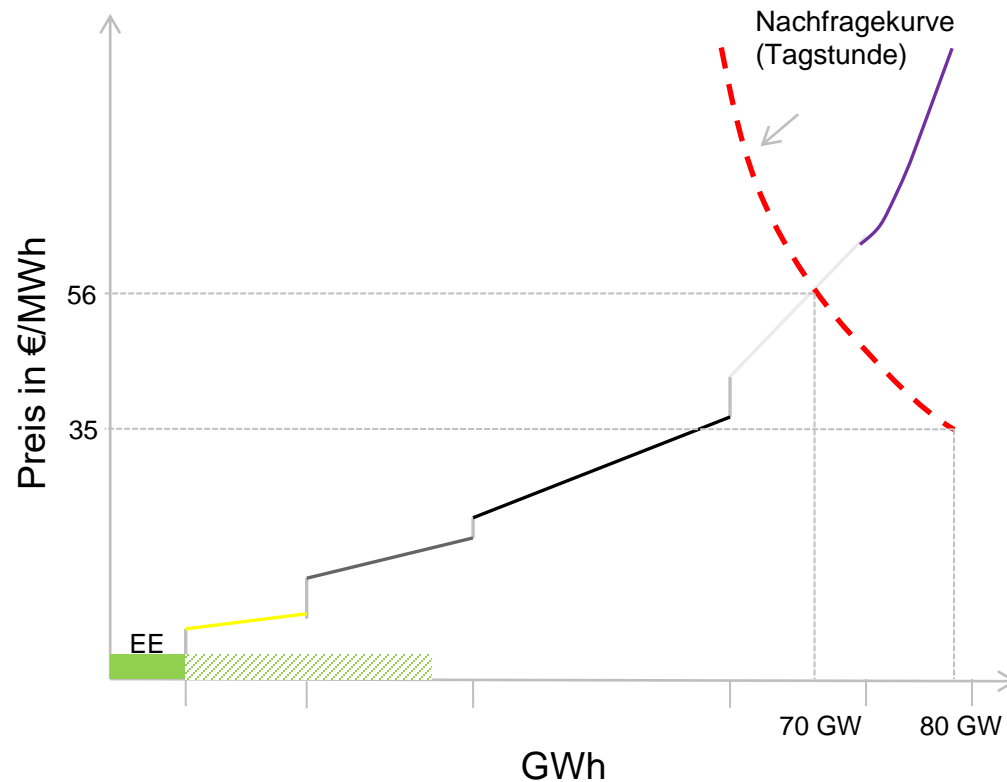
➤ Kraftwerke die Grenzkosten unter dem Markträumungspreis besitzen können Profite einstreichen

Bsp.: Kernkraftwerk mit 1.000 MW:
ca. 200 Mio. €/a

Die am Spotmarkt teilnehmenden Kraftwerke werden Kostenoptimal der Reihe nach aufgereiht (Merit Order Kurve). Die Kraftwerke bieten als Verkaufspreis ihre „Grenzkosten“ (Stromgestehungskosten) an.

Einfluss der Erneuerbaren Energien auf den Markt

Merit Order Effekt



Merit Order Effekt

- Aufgrund der Abnahmeversicherung der eingespeisten erneuerbaren Energiemengen besitzen diese Grenzkosten von 0€/MWh
 - EE stehen Links in der Merit Order Kurve
 - Verschiebung der Merit Order Kurve nach rechts
- Niedriger Strompreis führt zu leicht erhöhter Nachfrage
- Benötigte Konventionelle Kraftwerksleistung sinkt
 - letztes Grenzkraftwerk ist nicht mehr ein Gas, sondern ein Kohlekraftwerk
 - Markträumungspreis sinkt

Erneuerbare Energiemengen reduzieren den Strompreis an der Börse.

2.1 | Systemdienstleistungen

Systemdienstleistungen

Als Systemdienstleistungen werden in der Elektrizitätsversorgung diejenigen für die **Funktionstüchtigkeit des Systems** unbedingt erforderlichen Leistungen bezeichnet, die Netzbetreiber für die Anschlussnehmer/Anschlussnutzer zusätzlich zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie erbringen und damit die **Qualität der Stromversorgung** bestimmen:



Quelle: www.next-kraftwerke.de/

Systemdienstleistungen

- **Frequenzhaltung:** Der Nennwert der Frequenz beträgt im europäischen Verbundnetz 50 Hz (\pm Toleranz) und wird durch das Gleichgewicht von erzeugter und verbrauchter Leistung bestimmt.
 - **Spannungshaltung:** Die Spannung im Netz muss an jedem Punkt im Bereich bei $\pm 10\%$ der Nennspannung liegen. Dies ist abhängig von Erzeugungseinheiten und den Spannungsfällen über den Leitungen und anderen Betriebsmitteln.
 - **Versorgungswiederaufbau:** Nach einem Ausfall der Stromversorgung (ganz oder teilweise) ist die Versorgung wieder aufzubauen.
 - **System-/Betriebsführung:** Hierzu zählen Netzüberwachung, Instandhaltung, Einsatzplanung, Schalthandlungen, etc. Störungen sollen „*mit den augenblicklich verfügbaren betrieblichen Möglichkeiten und Betriebsmitteln in ihren Auswirkungen beherrscht bzw. begrenzt werden.*“
- Die übergeordnete Verantwortung für die Systemstabilität liegt bei den ÜNB.

eduVote

Wie hat sich das Verhältnis aus Kosten für die Regelleistungserbringung zur installierten Leistung fluktuierender erneuerbaren Energieanlagen seit 2009 entwickelt?

- a) Es stieg an
- b) Es blieb auf einem annähernd konstanten Niveau
- c) Es ist gesunken

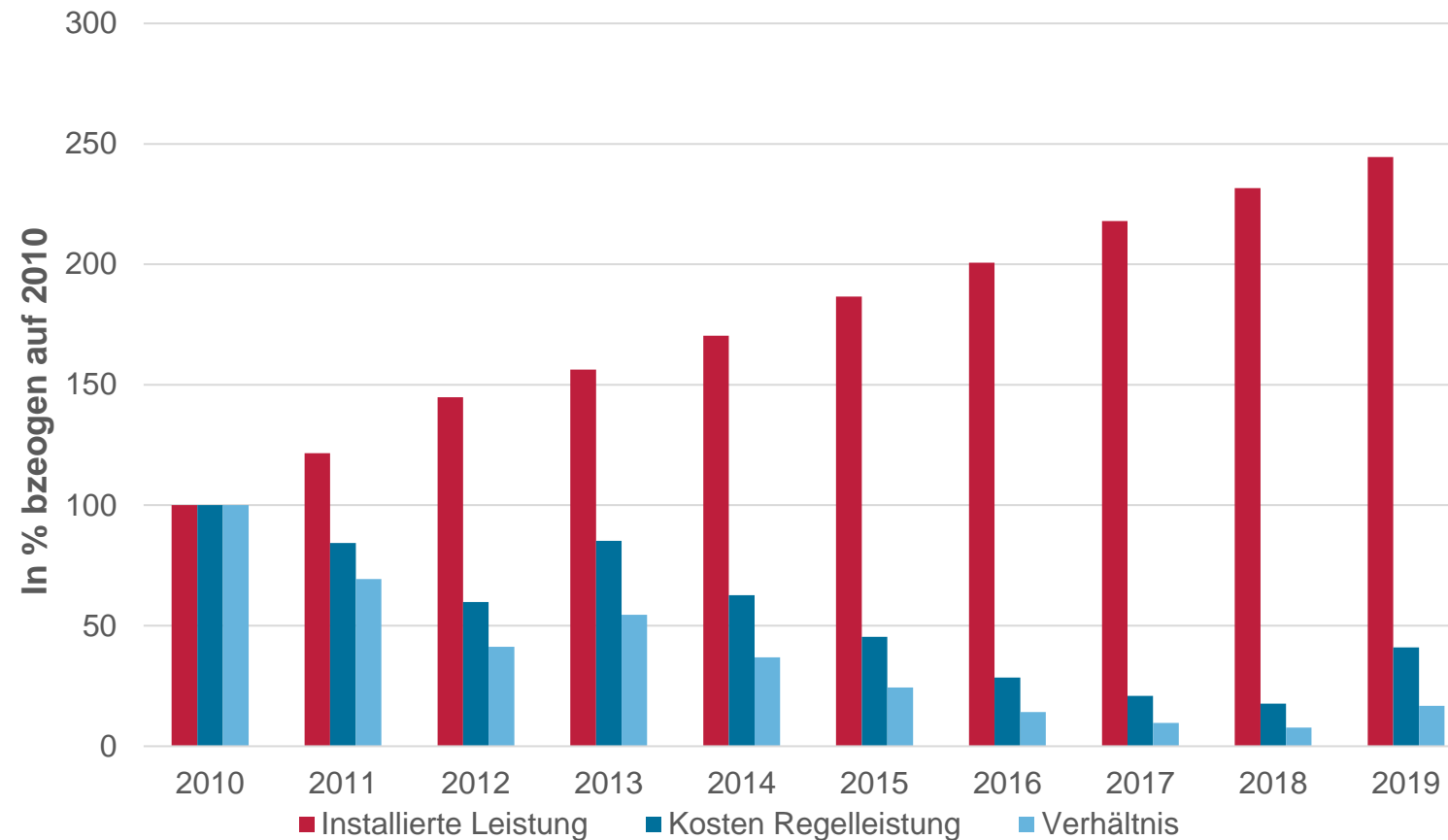


ID = j.grobler@tu-braunschweig.de
Umfrage noch nicht gestartet

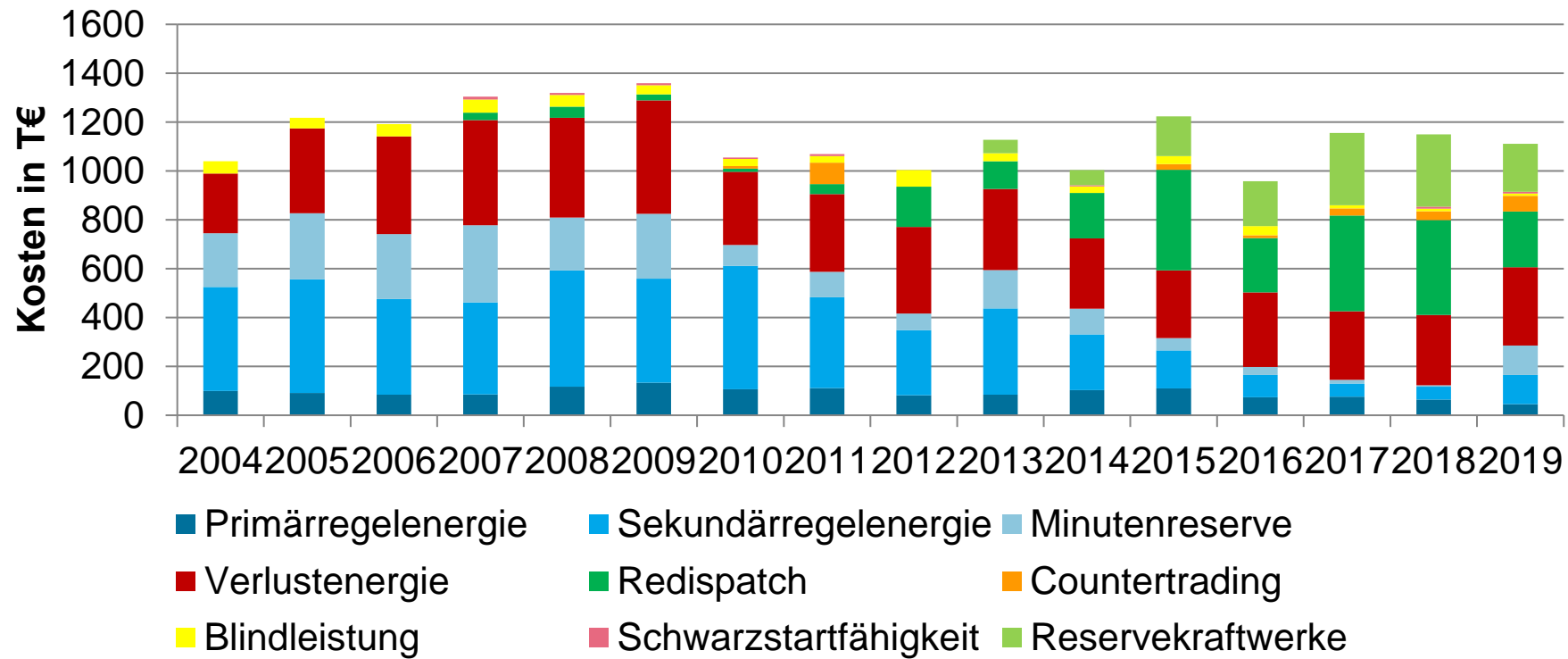


Umfrage starten

Entwicklung Regelleistungskosten und installierter fluktuierender EE-Leistung sowie dem Verhältnis dieser beiden bezogen auf 2010



Kosten für Systemdienstleistungen



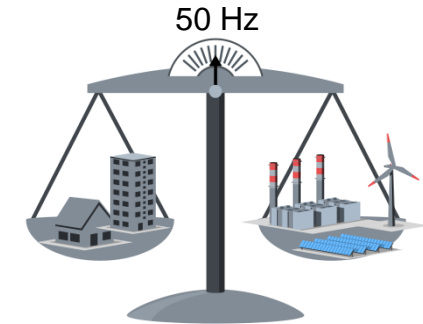
- Die Kosten für SRL und MRL sinken
 - Öffnung der Regelleistungsmärkte für weitere Marktteilnehmer
 - Verschiebung des Handels auf den Intraday-Markt
- Kosten für Redispatch steigen
 - Höhere Kosten für Reservekraftwerke

2.2 | Frequenzhaltung

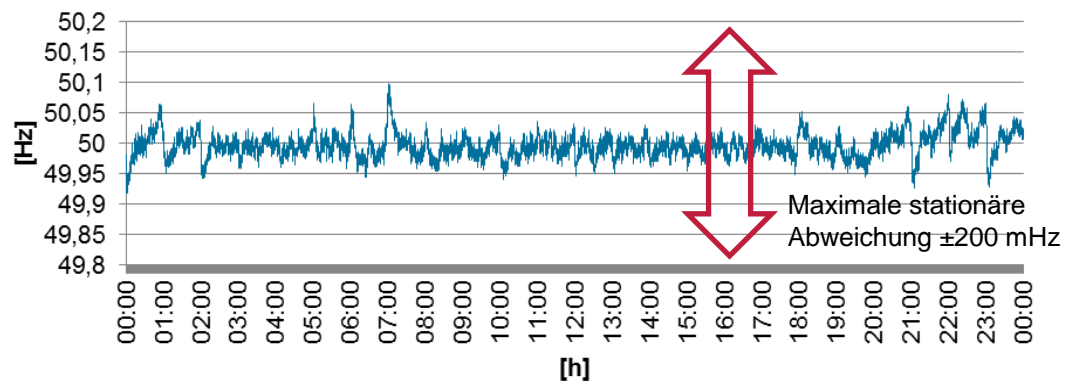
Frequenzhaltung

Die Frequenz im Verbundnetz ist maßgeblich abhängig vom Gleichgewicht zwischen **Erzeugung** und **Verbrauch**. Sie ist im gesamten Verbundnetz nahezu identisch.

- Mehr erzeugte Wirkleistung als Verbrauch → Frequenz steigt
- Weniger erzeugte Wirkleistung als Verbrauch → Frequenz sinkt
- *Die Blindleistung hat keinen Einfluss auf die Frequenz!*



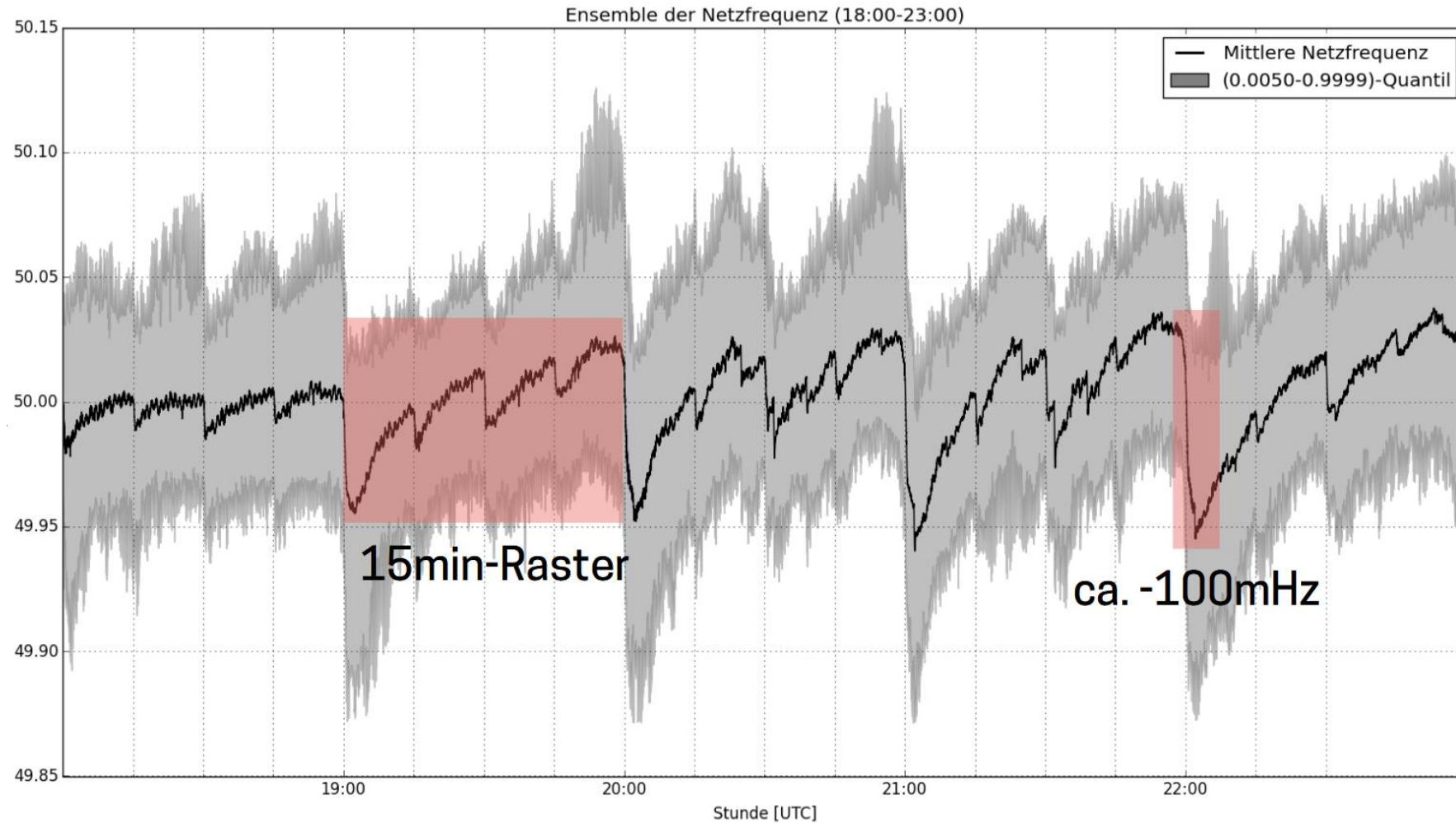
Frequenzverlauf im ENTSO-E Verbundnetz



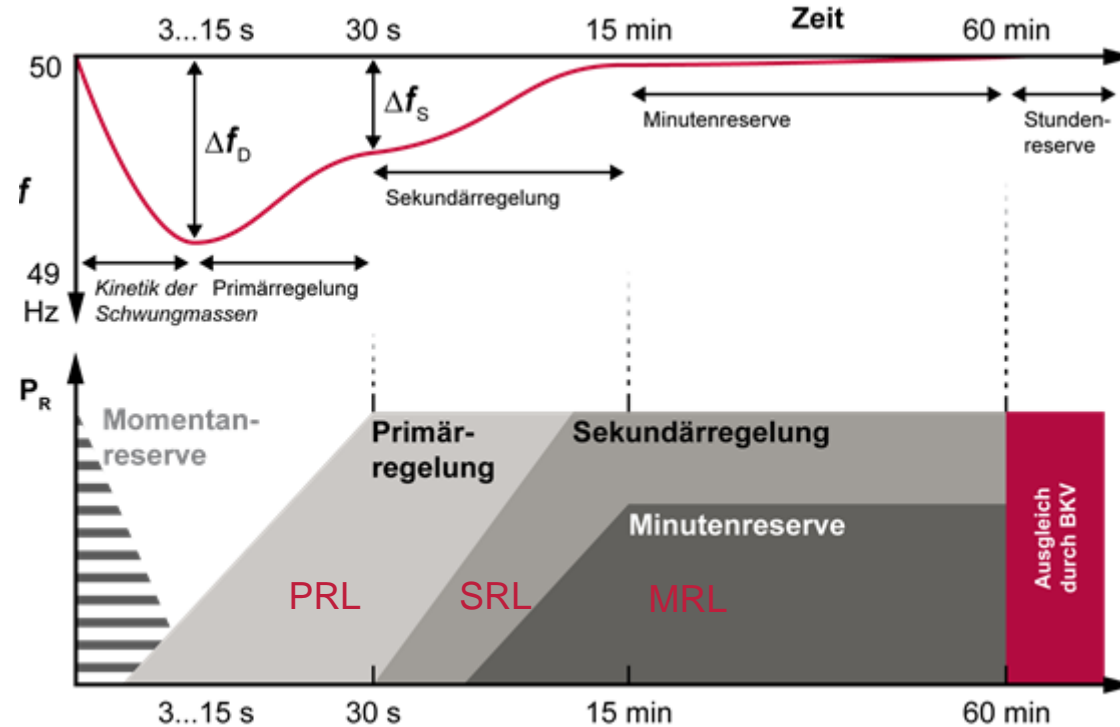
Ursachen für Ungleichgewicht:

- **Stochastische** Abweichungen (Ausfall von Kraftwerken, Prognosefehler (Last und EE))
- **Deterministische** Abweichungen (Grund liegt im Marktdesign: Kraftwerke/Verbraucher ändern Leistung gleichzeitig zur Viertelstunde)

Frequenzhaltung

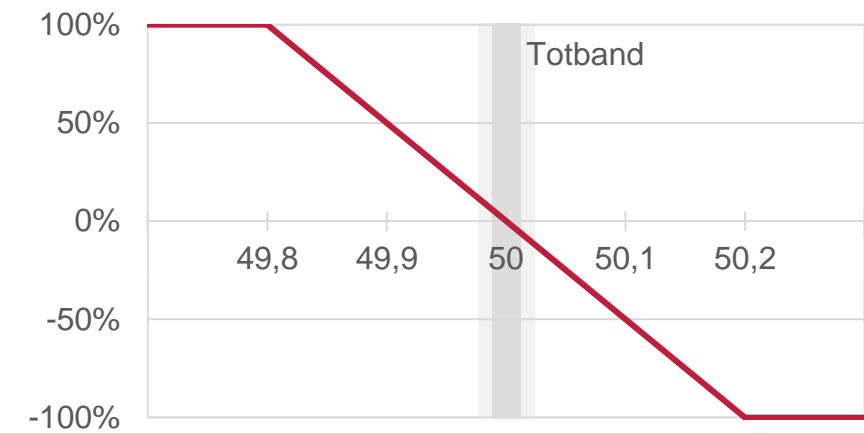


Regelleistung



- Sind Stromerzeugung und -verbrauch in einer Regelzone nicht ausgeglichen, wird **Regelleistung** benötigt
- Es gibt drei Regelleistungsarten: **Primärregelleistung**, **Sekundärregelleistung** und **Minutenreserveleistung**
- Bei Überdeckung einer Regelzone (mehr Erzeugung als Last) wird **negative Regelleistung** benötigt, bei Unterdeckung (weniger Erzeugung als Last) wird **positive Regelleistung** gebraucht

- Die Feststellung des Primärleistungsbedarfs erfolgt jährlich im Verbund der zentraleuropäischen Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E
→ Derzeit liegt der vorzuhaltende Bedarf der deutschen Netzbetreiber bei 573 MW
- Primärregelleistung wird von Stromproduzenten wie regelfähige Kraftwerken sowie Batteriespeichersystemen für mindestens 15 Minuten vorgehalten
→ **PRL muss symmetrisch** (positiv und negativ) vorgehalten werden
- Der gesamte Regelbereich der Primärregelleistung befindet sich in einem **Regelband** von 49,8 und 50,2 Hz.
- Die Aktivierung der PRL erfolgt...
 - ...**dezentral** über Frequenzmessungen
 - ...gleichmäßig in 15 – 30 Sekunden



Quelle: www.next-kraftwerke.de/

Regelleistungsarten – Sekundärregelleistung (SRL)

- Im Gegensatz zur PRL wird der Bedarf an Sekundärregelleistung wöchentlich von den ÜNB's bestimmt
 - Derzeit liegt der vorzuhaltende Bedarf der deutschen ÜNB's an positiver SRL bei knapp 2.100 MW und an negativer SRL bei rund 2.000 MW
- Sekundärregelleistung wird von regelfähigen Kraftwerken, schnellstartfähigen Gasturbinen und Wasserkraftwerken sowie flexiblen industriellen Verbrauchern angeboten
 - Bereitstellung von **positiver oder negativer Regelleistung**
- Die Aktivierung der SRL erfolgt...
 - ...**automatisch** über ein Signal der zentralen Leistungs-Frequenz-Regelung **zur Ablösung der PRL**
 - ...innerhalb von 30 Sekunden. Die gesamte Angebotsleistung des SRL-Anbieters muss innerhalb von 5 Minuten vollständig aktiviert werden
 - ...**koordiniert unter den ÜNB's**, um ein „Gegeneinanderregeln“ zu vermeiden

Regelleistungsarten – Minutenreserve (MRL, mFRR)

- Der Bedarf in Deutschland an Minutenreserve wird analog zur SRL im Rahmen eines **Dimensionierungsverfahren** wöchentlich durch die ÜNB's bestimmt
 - Derzeit liegt der vorzuhaltende Bedarf der deutschen Übertragungsnetzbetreiber an positiver MRL bei ca. 1.300 MW und an negativer MRL bei ungefähr 700 MW
- Zur Erbringung von MRL kommen neben flexibler Gaskraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke BHKWs, Notstromaggregate sowie flexible Stromverbraucher, die beispielsweise über ein virtuelles Kraftwerke gepoolt sind, zum Einsatz
 - Bereitstellung von **positiver oder negativer** Regelleistung
- Die Aktivierung der MRL erfolgt...
 - ...**manuell** durch den ÜNB zur Ablösung der SRL
 - ...mit einer Vorlaufzeit von bis zu 7,5 Minuten und muss innerhalb von 15 Minuten vollständig aktiviert sein

- Die vier ÜNB schreiben ihre Regelleistungsmengen auf einer zentralen Plattform (regelleistung.net) aus und auktionieren diese
- Damit Kraftwerksbetreiber und Stromkunden als mögliche Lieferanten an den Ausschreibungen der drei Reservequalitäten **teilnehmen** können, müssen diese **durch die ÜNB präqualifiziert** werden

	PRL	SRL	MRL
Produktzeitscheibe	6x4 Std.	6x4 Std.	6x4 Std
Mindestangebotsgröße	+/- 1 MW	5 MW (1-4 MW möglich)	5 MW (1-4 MW möglich)
Ausschreibungszeitraum	Kalendertäglich	Kalendertäglich	Kalendertäglich
Vergütung	Leistungspreis	Leistungspreis, Arbeitspreis	Leistungspreis, Arbeitspreis
Preisermittlung	Einheitspreisverfahren (Pay-as-cleared)	Gebotspreisverfahren (Pay-as-bid)	Gebotspreisverfahren (Pay-as-bid)

- Eine Angebotsgröße von 1 MW, 2 MW, 3 MW oder 4 MW ist zulässig, wenn ein Anbieter nur ein einziges Angebot je Produktzeitscheibe der positiven bzw. negativen SRL in der jeweiligen Regelzone abgibt

2.3 | Spannungshaltung

Spannungshaltung

Die Spannung im Netz ist lokal zu regeln. Je weiter ein Erzeuger/Verbraucher von der betrachteten Spannung (örtlich) entfernt ist, desto geringer wird sein Einfluss auf diese Spannung.

Die Netzspannung ist größtenteils abhängig von der lokalen:

- Erzeugungsleistung (Wirk- und Blindanteil)
- Verbraucherleistung (Wirk- und Blindanteil)
- Den Netzimpedanzen (Leitungen, Transformatoren)

Wirk- und Blindleistungsflüsse bestimmen die Netzspannungen.

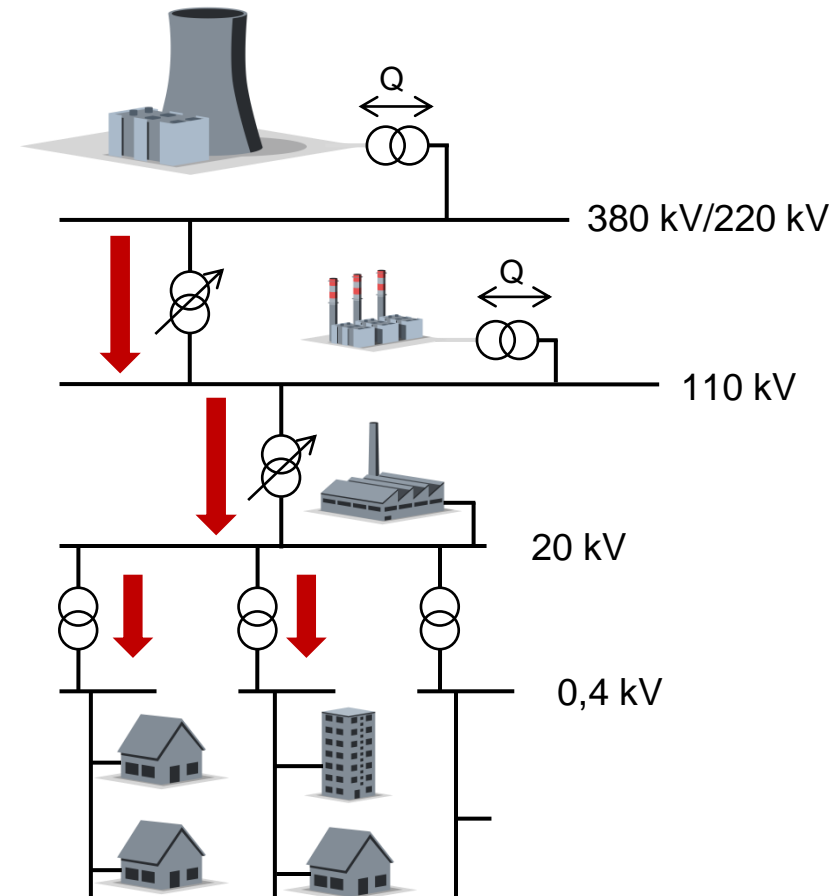
Spannungshaltung

Die klassische Betrachtung der Netzspannungen geht von der Top-Down-Struktur aus. Die Erzeuger speisen im Hoch- und Höchstspannungsnetz ein.

In der Mittel- und Niederspannungsebene sind die Verbraucher und kleinere, zu vernachlässigende Erzeugungseinheiten.

Im HS- und HöS-Netz wird die Spannung durch Blindleistungseinspeisung geregelt.

Im Mittelspannungsnetz durch Stelltransformatoren in den Umspannwerken.



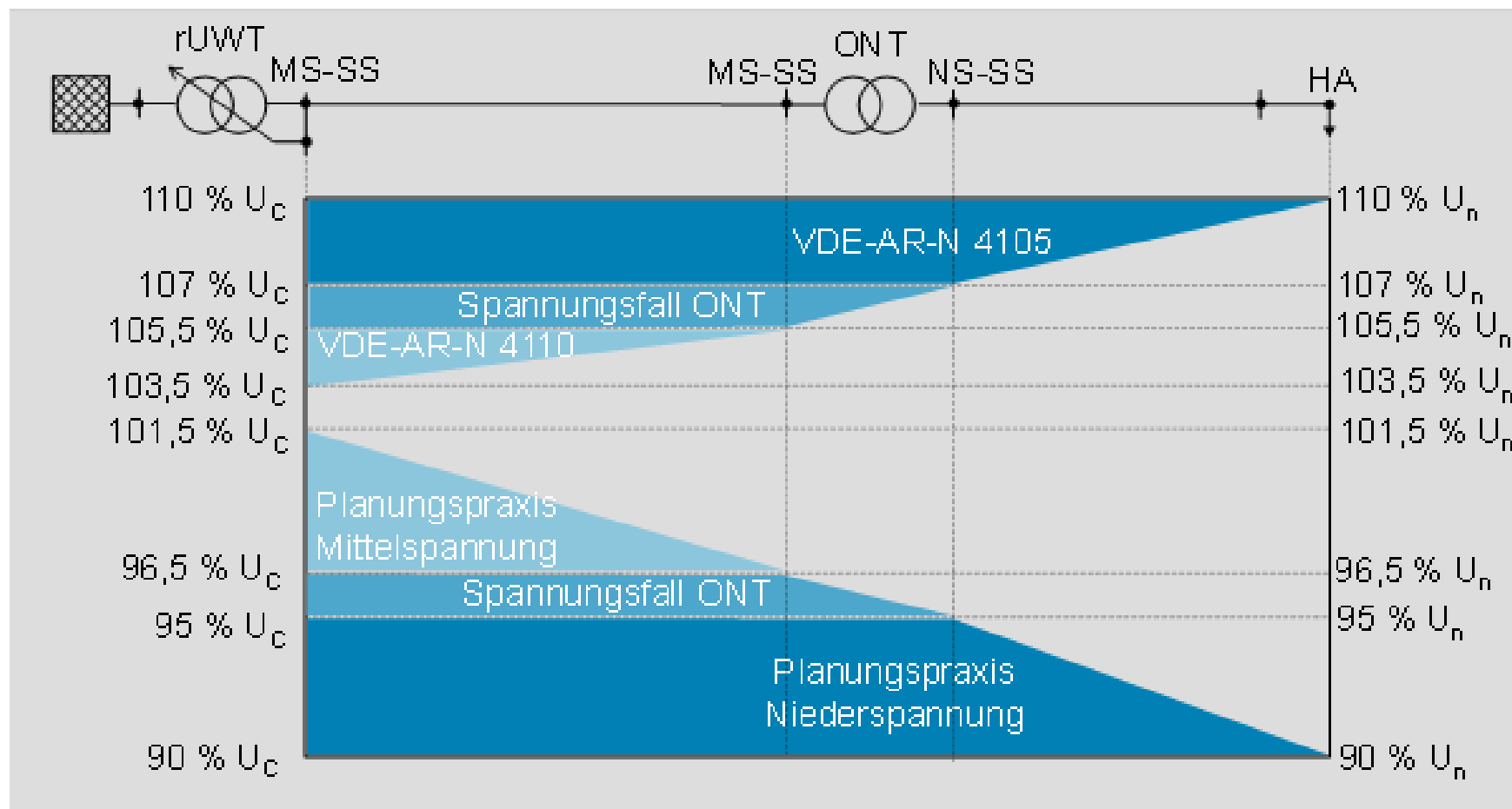
Regelung der Blindleistung in den höheren Netzebenen

- Blindleistungsbedarf entsteht durch kapazitive (z.B. Kabel) oder induktive (z.B. Transformator, Freileitung, Verbraucher) Elemente im Stromnetz
- Netzelemente müssen für zusätzlichen Blindleistungstransport ausgelegt werden und dieser Transport verursacht Wirkleistungsverluste
- Blindleistung sollte bedarfsnah bereitgestellt werden
- Spannung kann durch Blindleistung beeinflusst werden:
 - kapazitiv/übererregt → Spannungsanhebung
 - induktiv/untererregt → Spannungssenkung
- Der ÜNB nutzt Blindleistung um Spannung aktiv zu beeinflussen (Kompensationsanlagen, Phasenschieber)



Phasenschieber im ehemaligen KKW Biblis A

Spannungsgrenzen in der Mittel- und Niederspannung

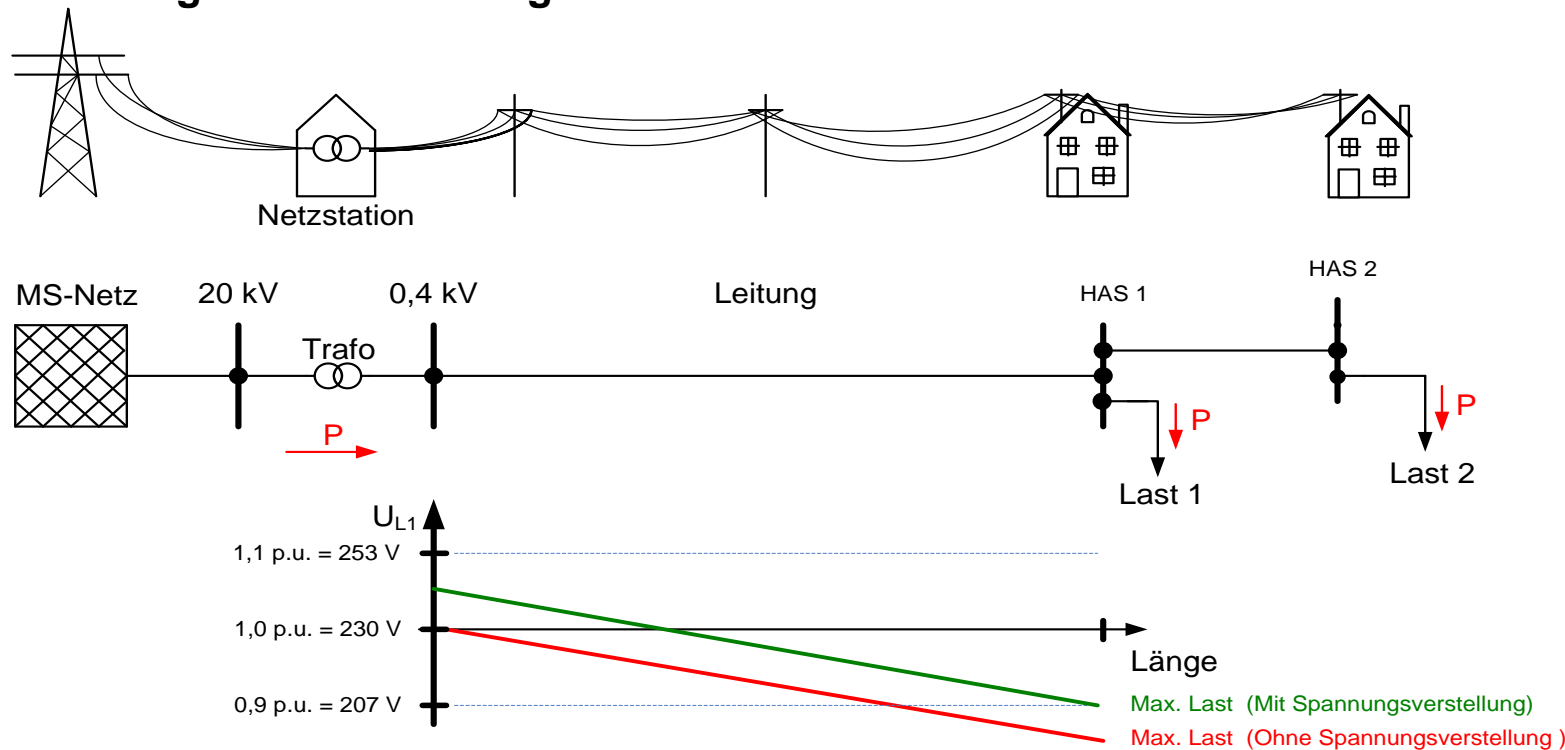


Quelle: O. Marggraf. Dissertation, TU Braunschweig

Spannungshaltung in der Niederspannungsebene

Ziel: Einhaltung des Spannungskriteriums nach EN 50160 ($U_N \pm 10\%$)

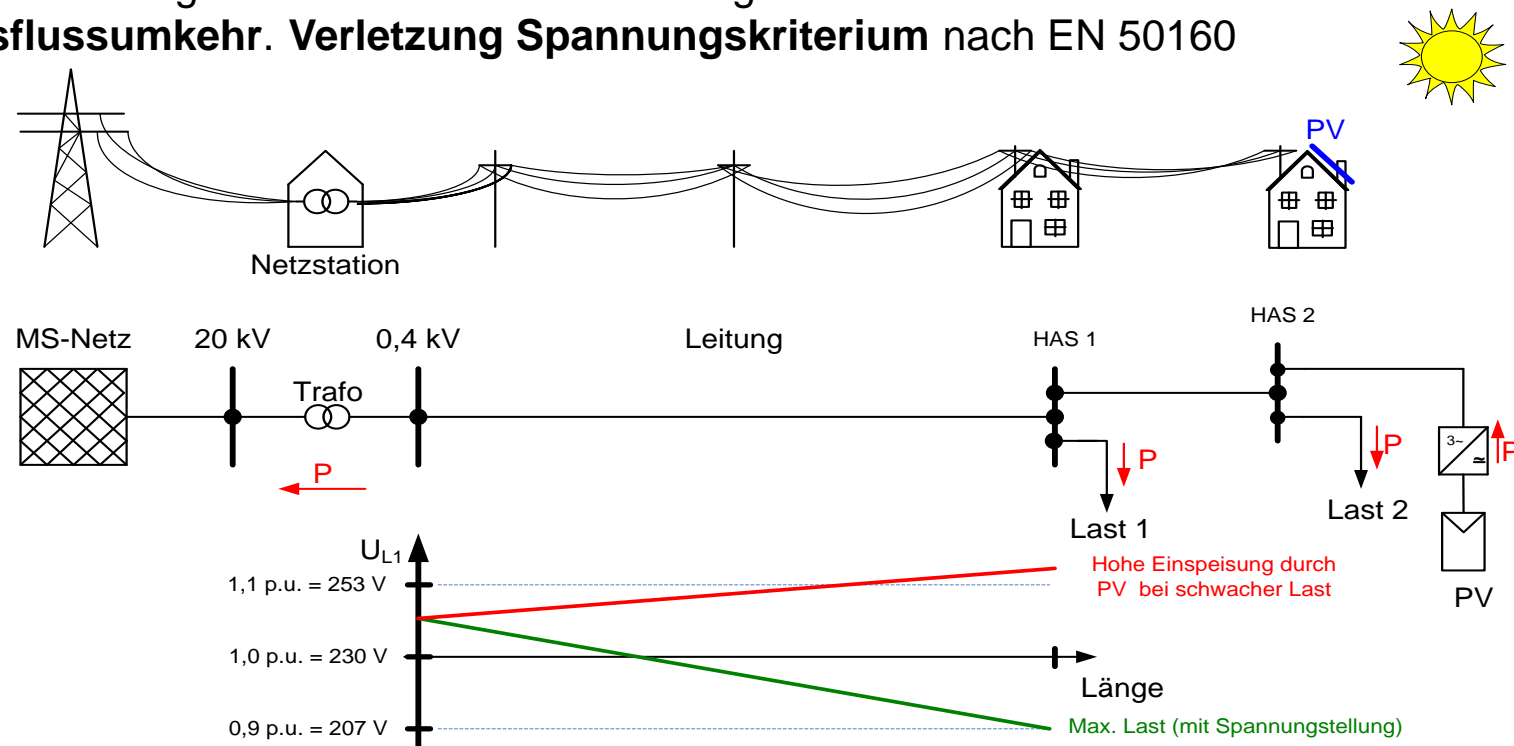
Beispiel: Zur Kompensation des Spannungsfalls entlang der Leitung:
stationäre Verstellung des Übersetzungsverhältnisses am Transformator der Netzstation



Spannungshaltung in der Niederspannungsebene

Ziel: Einhaltung des Spannungskriteriums nach EN 50160 ($U_N \pm 10\%$)

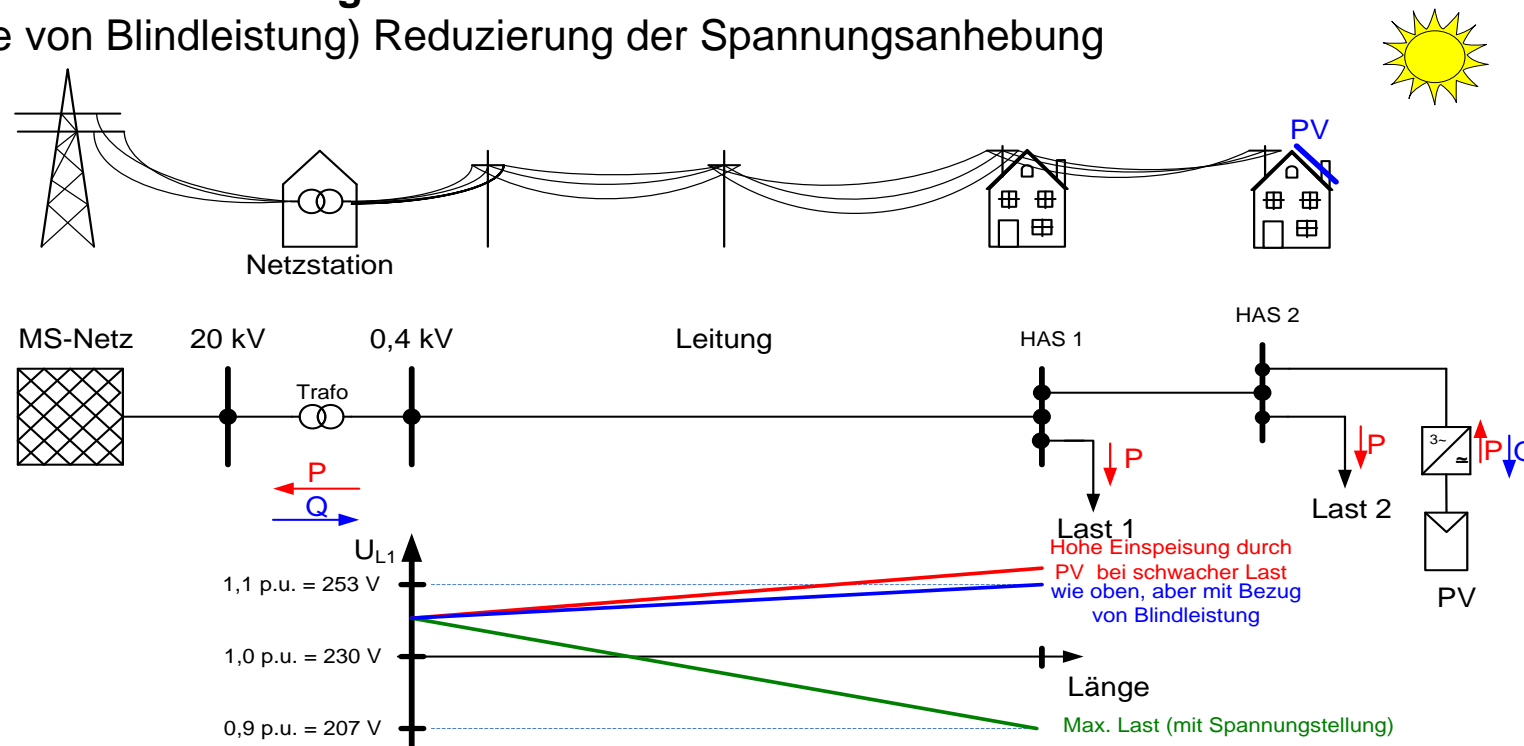
Beispiel: Installation PV-Anlage: In den lastarmen Vormittagsstunden kommt es zur **Leistungsflussumkehr**. **Verletzung Spannungskriterium** nach EN 50160



Spannungshaltung durch Blindleistungseinspeisung

Ziel: Einhaltung des Spannungskriteriums nach EN 50160 ($U_N \pm 10\%$)

Beispiel: Durch **induktiven/untererregten Betrieb des PV-Wechselrichters**
(Aufnahme von Blindleistung) Reduzierung der Spannungsanhebung



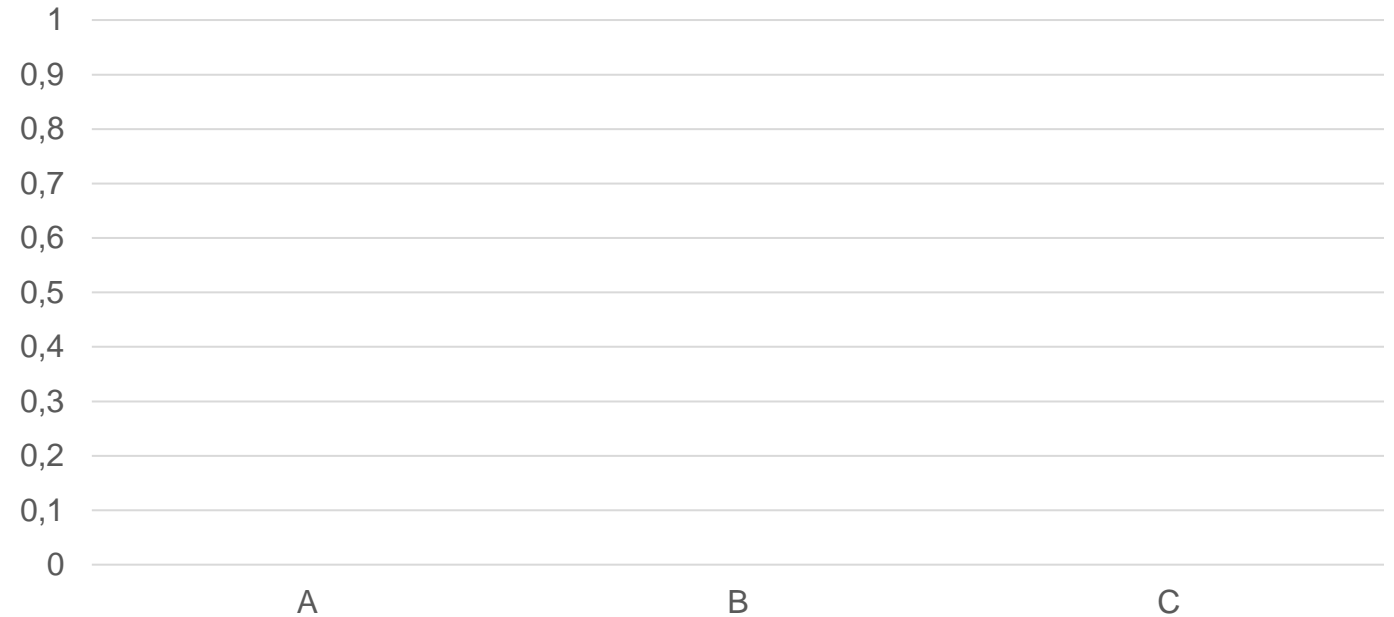
eduVote

Wie sollte sich eine DC-Ladestation mit 50 kW gegenüber dem Netz verhalten?

- a) Induktiv
- b) Kapazitiv
- c) Macht keinen Unterschied



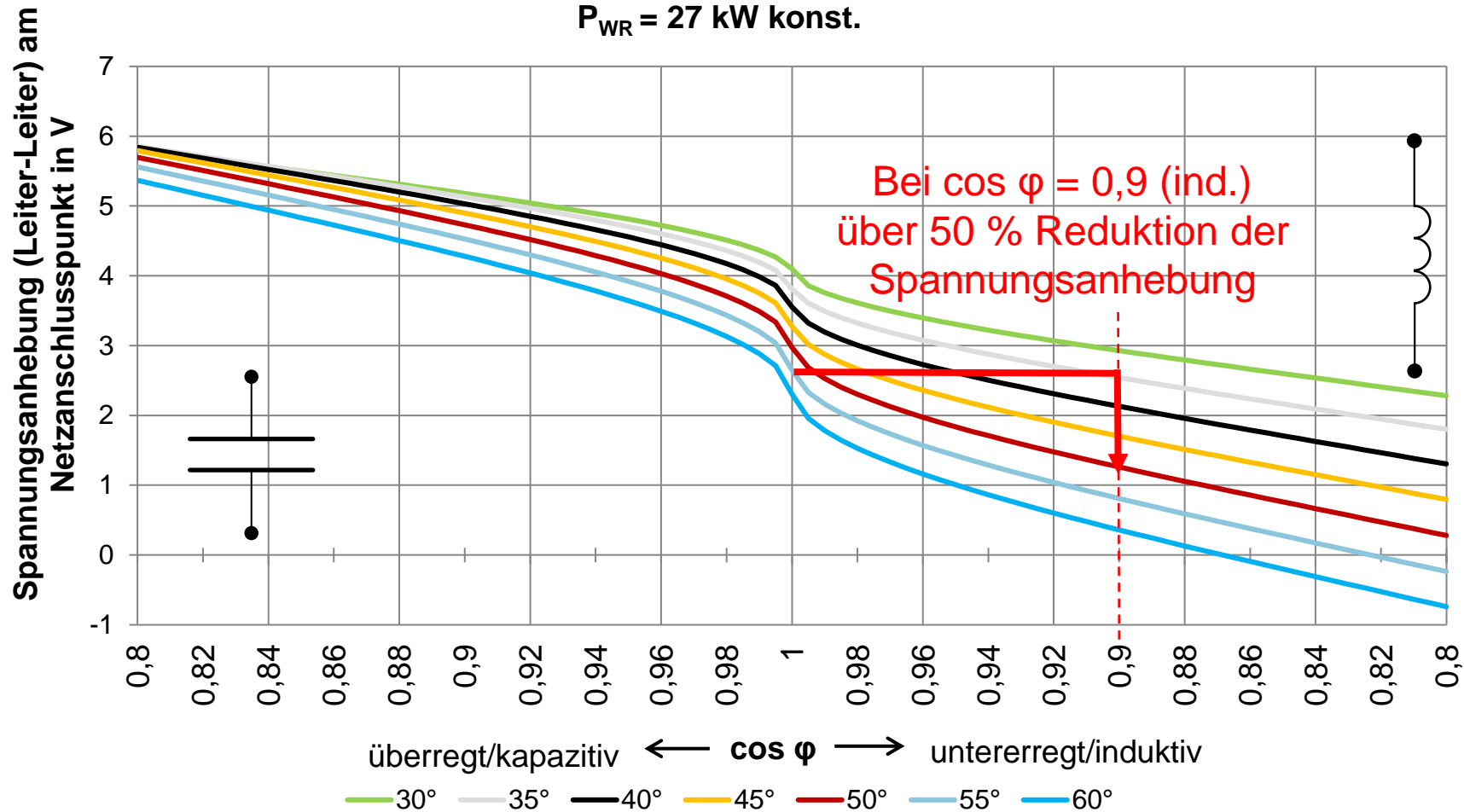
ID = j.grobler@tu-braunschweig.de
Umfrage noch nicht gestartet



Umfrage starten

Durch Blindleistungseinspeisung lässt sich die Spannung am Verknüpfungspunkt regeln

Spannungsanhebung am Netzanschlusspunkt bei unterschiedlichen Netzimpedanzwinkeln ψ mit $S_k'' = 2,5 \text{ MVA}$ und einer Einspeiseleistung von $P_{WR} = 27 \text{ kW}$ konst.



Regelungsverfahren nach VDE-AR-N 4105

$\cos\varphi(P)$ -Regelung

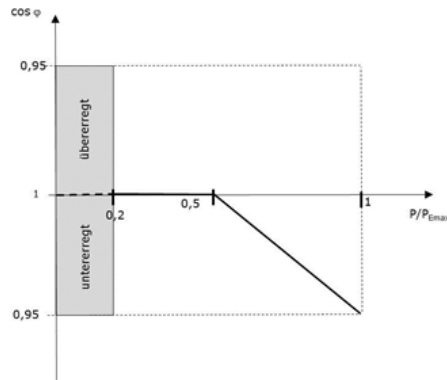


Bild 4.1– Standard-Kennlinie für $\Sigma S_{E\max} \leq 3,7 \text{ kVA}$

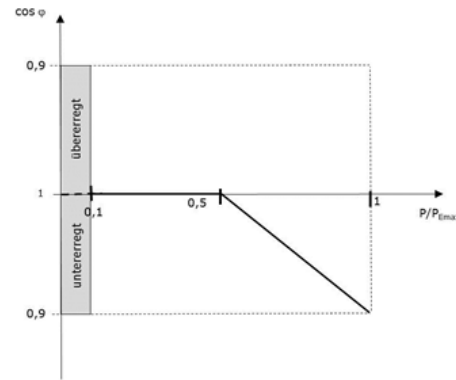


Bild 4.2 – Standard-Kennlinie für $\Sigma S_{E\max} > 3,7 \text{ kVA}$

- Vorgeschriebenes Blindleistungsverhalten von PV-Wechselrichter, Batterie-wechselrichter und Ladestationen, wenn sie im NS-Netz angeschlossen werden

$Q(U)$ -Regelung

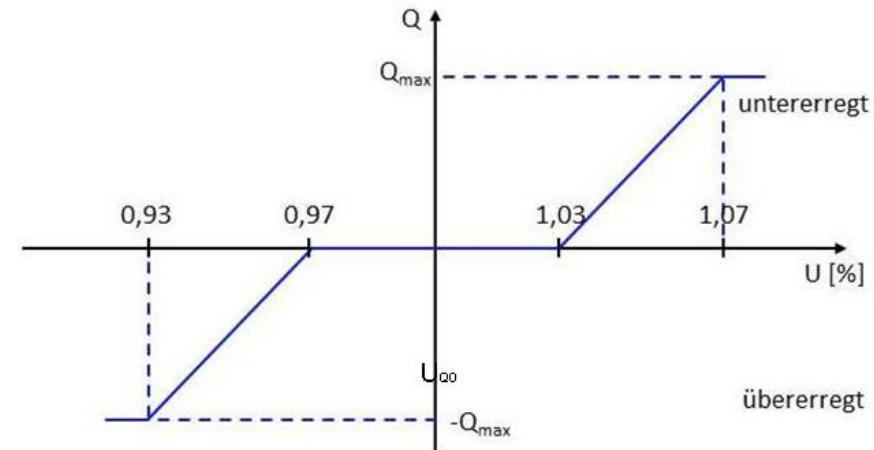


Bild 5– Standard- $Q(U)$ -Kennlinie

Energiewirtschaft und Marktintegration erneuerbarer Energien

Dozent: *Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel*

Betreuer: *Eike Niehs, M.Sc.*

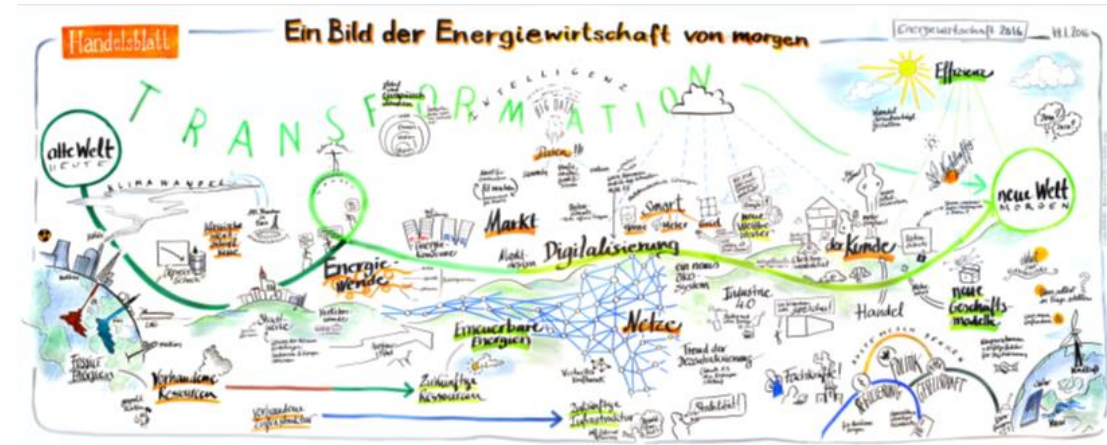
Umfang: 2V 1Ü – 5 CP
Zeitraum: WiSe

Semester: BA 6 / MA
Prüfung: schriftlich

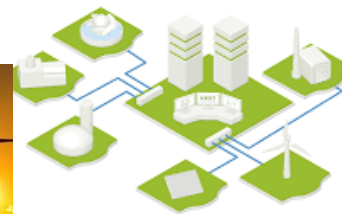
Erwartete Teilnehmeranzahl: 150

Inhalte:

- *Energiewirtschaft*
- *Energiepolitik*
- *Gesetze und Fördersysteme*
- *Märkte (Strommarkt 2.0, Regelleistungsmarkt)*
- *Direktvermarktung / Bilanzkreismanagement*
- *Virtuelles Kraftwerk*
- *Großspeicher*



regelleistung.net
INTERNETPLATTFORM ZUR
VERGABE VON REGELLEISTUNG



Technologien der Verteilungsnetze

Dozent: Dr.-Ing. Johannes Schmiesing
Avacon Netz GmbH

Betreuer: Till Garn, M.Sc.
Merle Ferk, M.Sc.

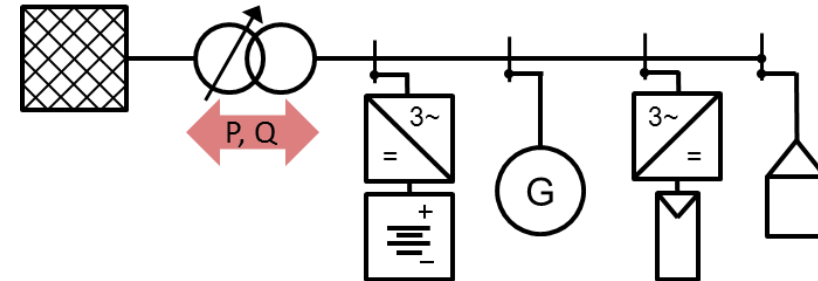
Umfang: 3V 1Ü – 5 CP
Zeitraum: SoSe

Semester: BA 6
Prüfung: schriftlich

Erwartete Teilnehmeranzahl: 50

Inhalte:

- Rolle der Verteilungsnetze in der Energieversorgung
- Aufbau / Betriebsmittel Verteilungsnetze
- Schutzkonzepte
- Systemdienstleistungen
- Dezentrales Lastmanagement
- Zukünftige Entwicklungen



Mittelspannungsschaltanlage



Quelle: eaton.eu

Wechselrichter



Quelle: sma.de

rONT



Quelle: reinhausen.com

Schutzkonzepte



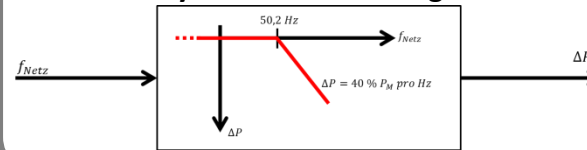
Quelle: eaton.eu

Smart-Meter



Quelle: emh-meter.de

Systemdienstleistungen



Quelle: DIN VDE AR-N 4105

Systemtechnik der Photovoltaik

Systemtechnische Betrachtung von photovoltaischen Erzeugungsanlagen im Kontext elektrischer Netze

Dozent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Betreuer: Frederik Tiedt, M.Sc.

Umfang: 1 V 1 Ü (jeweils 90 min.)

Zeitraum: WiSe

Semester: BA 6 / MA

Prüfung: Mündlich (30 min.) bei hoher
Teilnehmendenzahl schriftlich (90-120 Min.)

Erwartete Teilnehmeranzahl: 35

Inhalte:

- Typische PV-Anlagenkonfigurationen
- Wechselrichtertopologien
- Technische Funktionsweise selbstgeführter PV-Wechselrichter
- Netzintegration von PV-Anlagen
- Inselnetzsysteme mit PV-Anlagen
- Netzgekoppelte PV-Anlagen mit Speichersystem



Quelle: SMA

