



# Die Auswirkungen der Elektromobilität auf die Energienetze der Zukunft – Chance oder Risiko?

Gunnar Kaestle

Institut für Elektrische Energietechnik

Leipzig, 2013-04-24

## Gliederung

- System- und Netzstabilität
- Systemdienstleistungen als Stabilisierungshebel
- Flexibilisierungsoption der Nachfrageseite
- Ausblick: The Big Picture

## Unterschied zwischen System- und Netzstabilität

- DSO = Distribution System Operator
  - Systemdienstleistungen = Dienste zur Wahrung der Systemstabilität (Produktqualität wie z. B. Spannung, Frequenz)
  - Netzbetreiber als verantwortende Stelle
  - Regelung & Abrechnung („Hirn“)
  
- DNO = Distribution Network Operator
  - Netzdienstleistungen = technische Dienstleistungen an leitungsgebundenen Versorgungsinfrastrukturen
  - Netzservice als ausführende Stelle
  - Umsetzung baulicher Maßnahmen („Muskeln“)
  
- Im Folgenden: Konzentration auf Systemstabilität

## Systemdienstleistungen

- „Alles, was man für die Lieferung des Produktes benötigt, aber was nicht auf der Rechnung steht.“ (Georg Kerber)
  - Beispiel Kaffeehaus mit Hauptprodukt: Tasse Kaffee
  - Systemdienstleistungen: Bedienung, Tisch, Stuhl, Musik, Zeitung, Heizung, Immobilie, Putzfrau, etc.
  
- Wichtige Systemdienstleistungen in elektrischen Netzen:
  - Frequenzhaltung
  - Spannungshaltung
  - Systemwiederaufbau
  - Betriebsführung

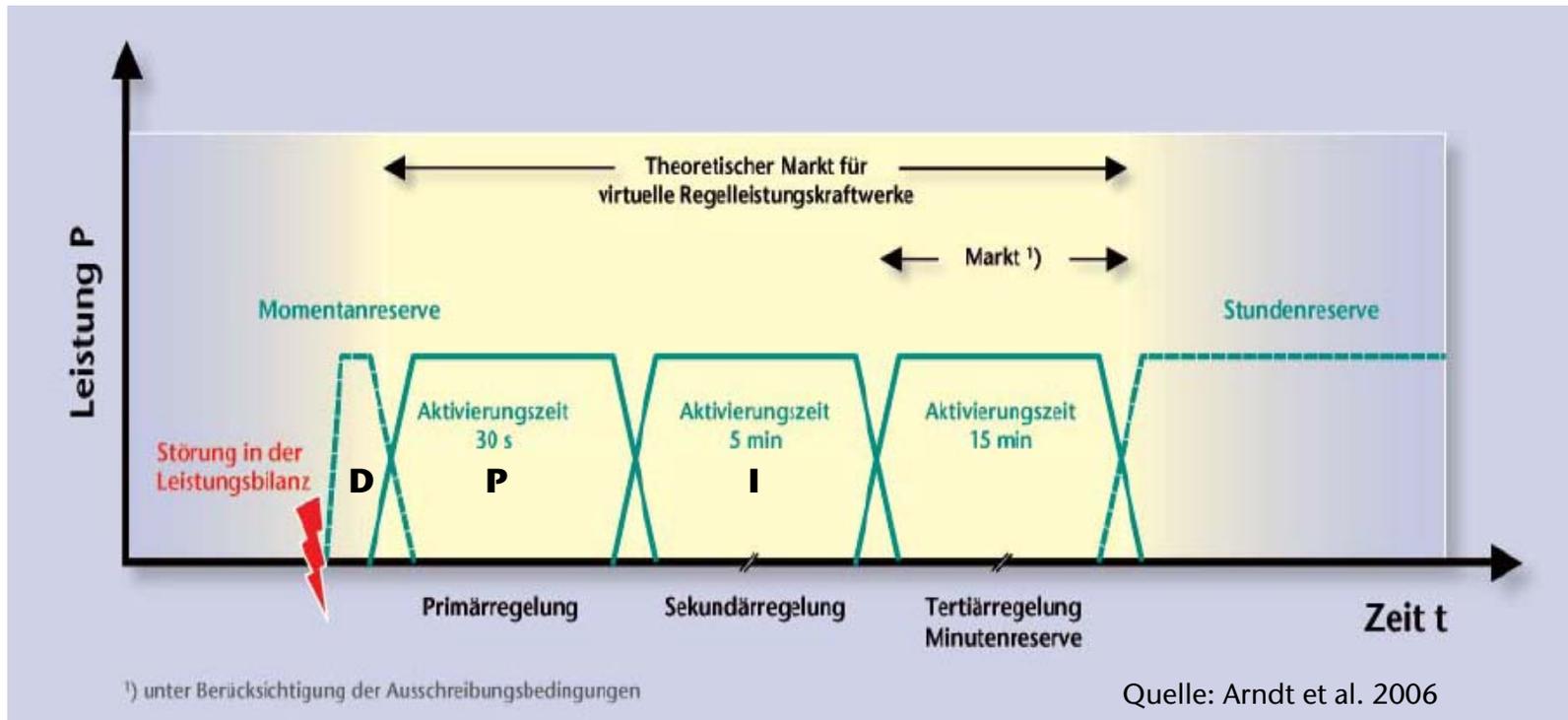


Quelle: Wikimedia

## Netzgebundene elektrische Energieversorgung

- Systemdienstleistungen sind „Software“
  - Regelleistung zur Frequenzhaltung
    - 50 Hertz als Sollwert
  - Blindleistung zur Spannungshaltung
    - 230 V beim Endverbraucher
  - Know-How zum Versorgungswiederaufbau
    - Stromausfall in München am 2012-11-15
  - Organisatorisches Können beim Netzbetrieb
  
- Betriebsmittel sind „Hardware“
  - Kabel und Freileitungen
  - Transformatoren
  - Schaltanlagen
  - Netzleitzentralen

## Regelleistung stabilisiert den Netzbetrieb



- Der Abruf von Wirkleistungsimpulsen kennzeichnet sich durch:
- a) unterschiedliche Zeitbereiche, b) unterschiedliche Zielrichtungen und c) unterschiedliche Wirkmechanismen.

## Quellen von Systemdienstleistungen

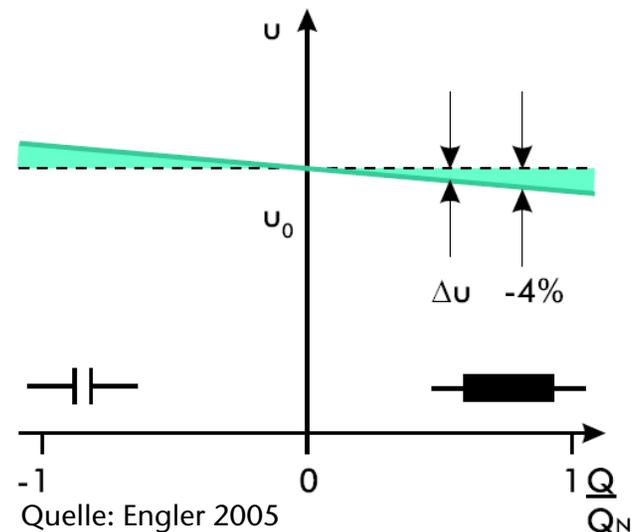
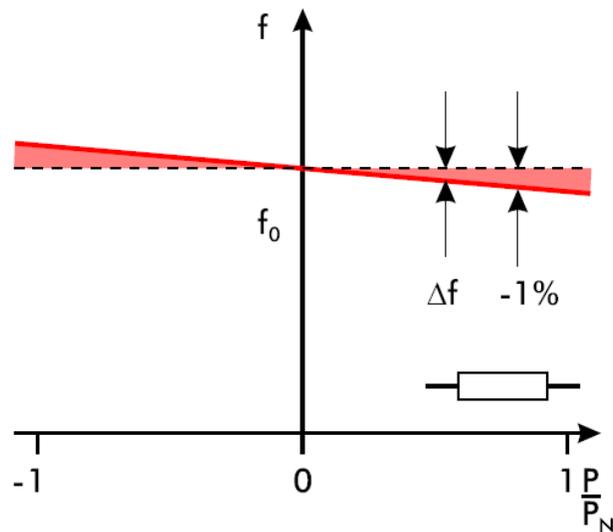
- Großkraftwerke liefern bisher Regelleistung und Blindleistung
- Einspeisung von Wind- und Sonnenenergie:  
Anteil zentraler Stromeinspeisung nimmt ab
- Beitrag zu Systemdienstleistungen durch dezentrale Erzeugungsanlagen (DEA) wird immer wichtiger
- Verschiedene Methoden der Erbringung
  - Vorgeschrieben nach Grid Code (z.B. Blindleistung)
  - Organisiert im Markt (z.B. Regelleistung in DE)
- Elektroautos können nicht nur Blind-, sondern auch Wirkleistung stellen

## Gliederung

- System- und Netzstabilität
- Systemdienstleistungen als Stabilisierungshebel
- Flexibilisierungsoption der Nachfrageseite
- Ausblick: The Big Picture

## Technische Umsetzung

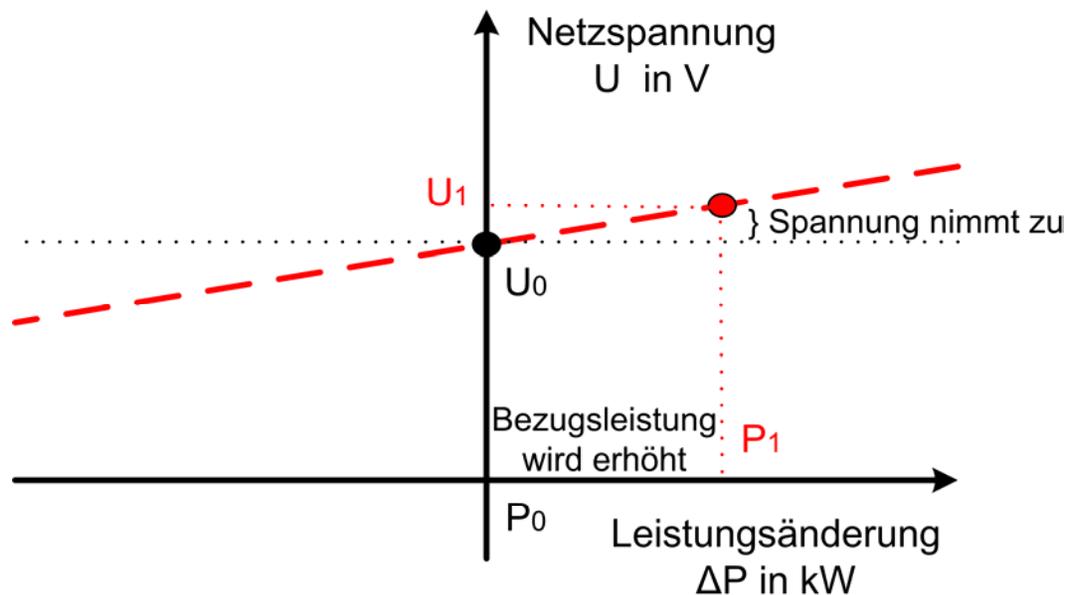
- Lineare Kennlinien (Statiken) für lokale Regelkreise
  - Leistungs-Frequenz-Regelung
  - Blindleistungs-Spannungs-Regelung
- Bewährt in Hoch- und Höchstspannung



Quelle: Engler 2005

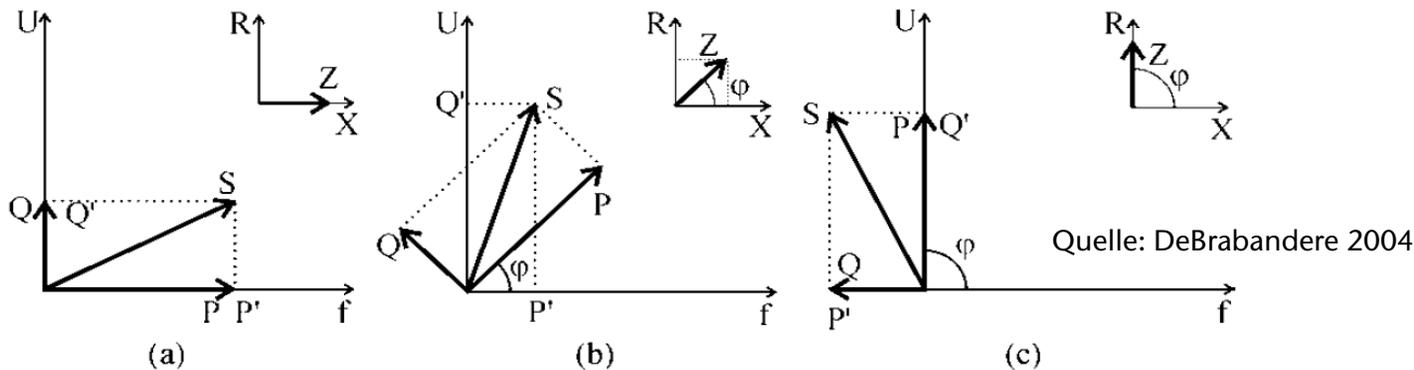
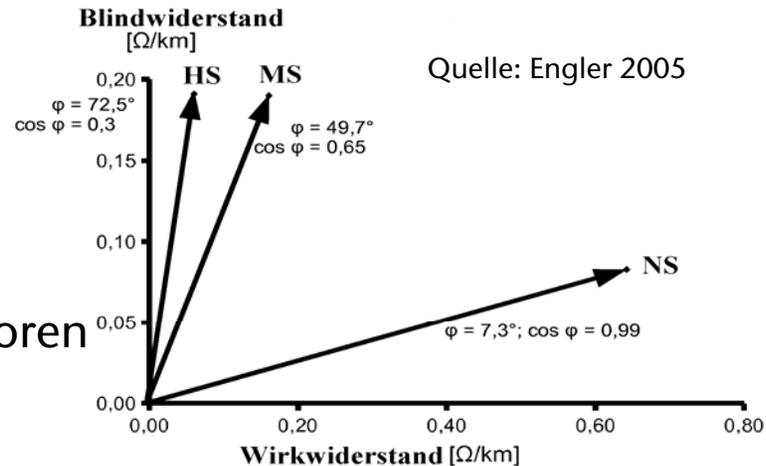
## Vorgabe von atypischen Statiken

- Wirkleistungs-Spannungs-Regelung (im NS-Netz bei großem R/X)
- Zur Spannungshaltung in Niederspannungsnetzen
- In Italien normativ geregelt per CEI 0-21
- Besonders geeignet für steuerbare Anlagen und Lasten mit Pufferspeicher



## Exkurs: Impedanzwinkel unterschiedlicher Leitungstypen

- MS- und HS-Leitungen haben induktiven Charakter
- Bei NS-Kabeln nimmt das R/X-Verhältnis zu
- Die Wirkung zwischen den Vektoren (P,Q) und (f,U) verschiebt sich



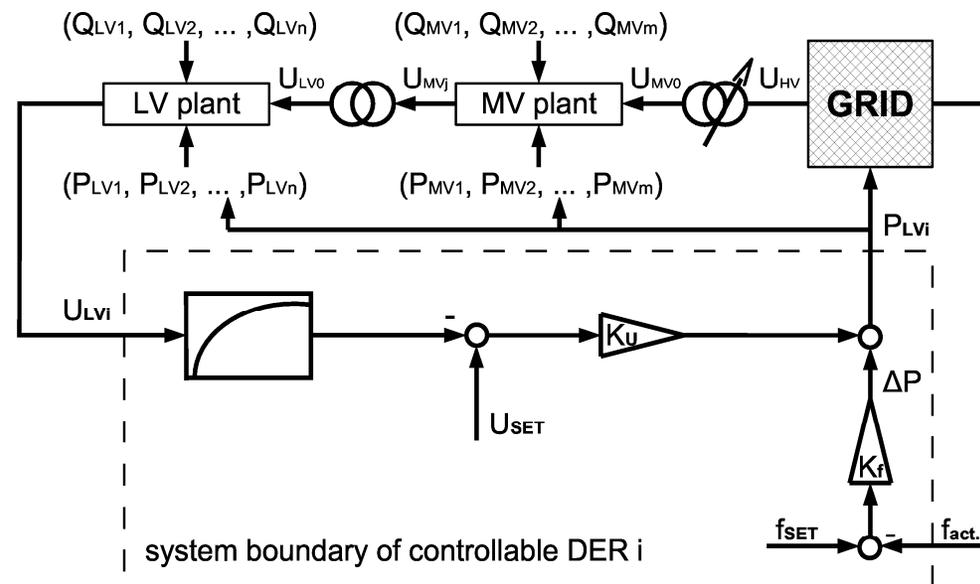
Influence of active and reactive power on voltage and frequency for different line impedance ratios: (a)  $R/X=0$ , (b)  $R/X=1$ , (c)  $R/X=\infty$ .

## E-Autos als Schlüsselement im Smart Grid

- Smart Grid ist ein Konzept, kein detaillierter Bauplan
- Verschiedene Ausprägungen von „Smartness“
- Intelligentes Verhalten von Netznutzern
- Umfasst das Gesamtsystem von Erzeugern und Verbrauchern

### ■ Ziele

- Stabil
- Effizient
- Nachhaltig
- Wirtschaftlich

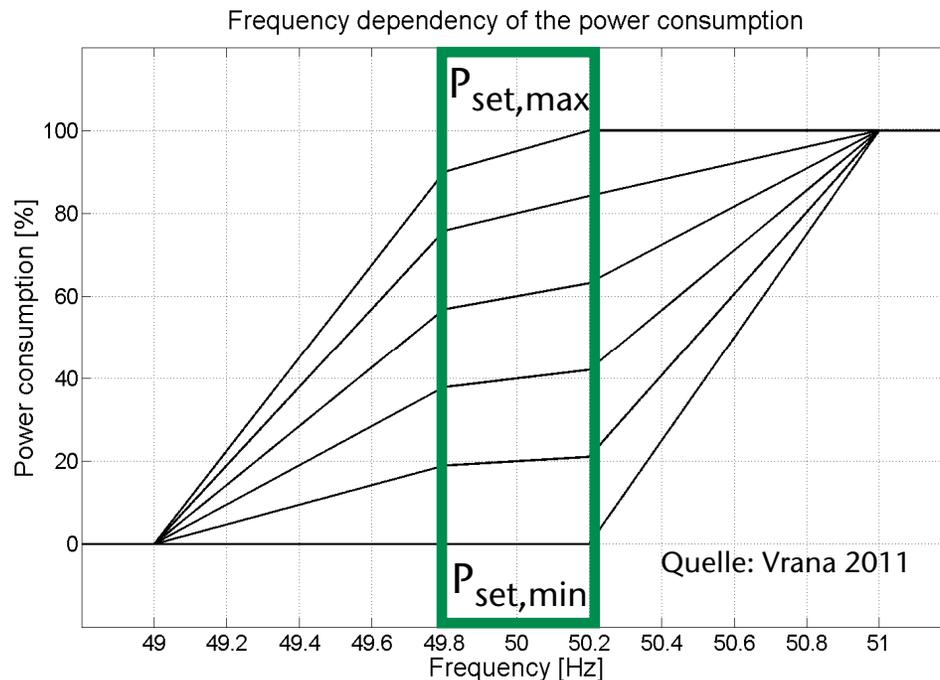


## Weite Verbreitung von Leistungselektronik

- Selbstregel-Effekt der Verbraucher nimmt ab
  - Frequenzabhängige Leistungsaufnahme  $P(f)$
  - „Selbstheilungskraft“ des Verbundsystems
- PiV könnten den Selbstregелеffekt stützen
  - Leichte Modulation der Ladeleistung stört Fhgz-Nutzer nicht
  - Degradation der Batterie gering beim Smart Charging
- Konstanter Leistungsbezug  $P(t)=\text{const}$ 
  - Bei Spannungseinbruch nimmt der Netzstrom zu
  - Höherer Flickerlevel aufgrund negativen differentiellen Widerstand

## Frequenzabhängiges Laden I

- Wirkleistungsbalance in der Synchronzone
- Kurzzeitige Leistungsbereitstellung



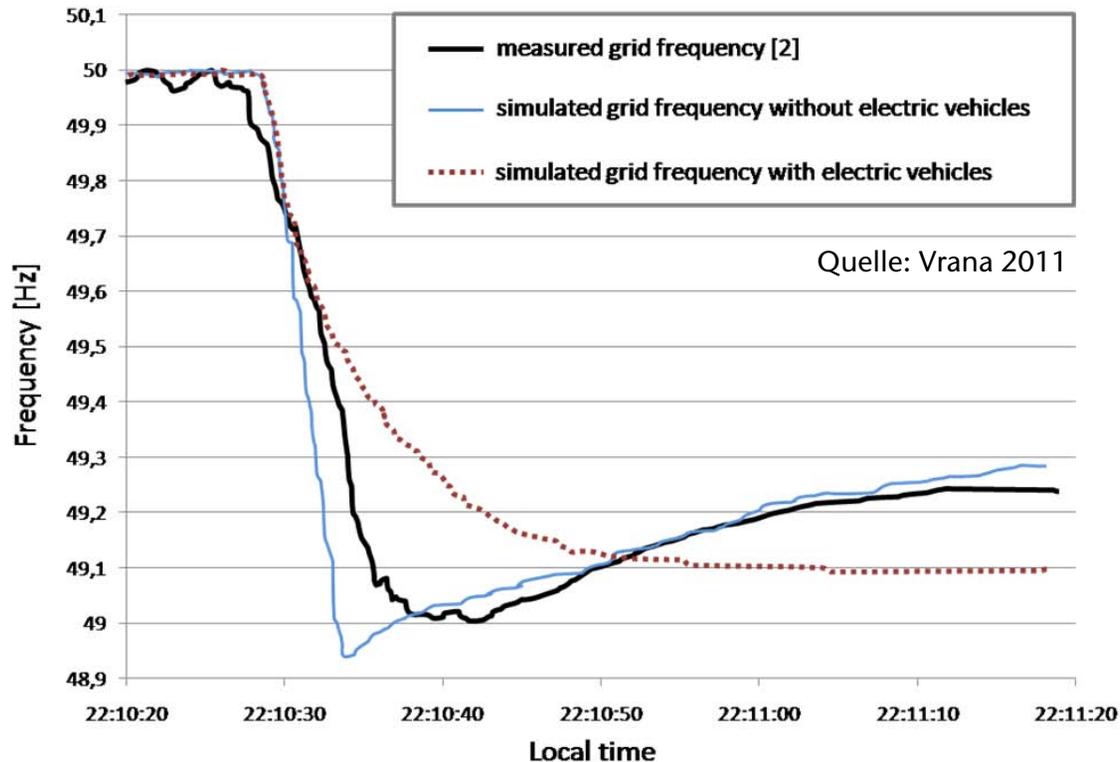
Normaler Betriebsbereich PRL:  
49,8 Hz – 50,2 Hz

Vorschlag für Smart Charging

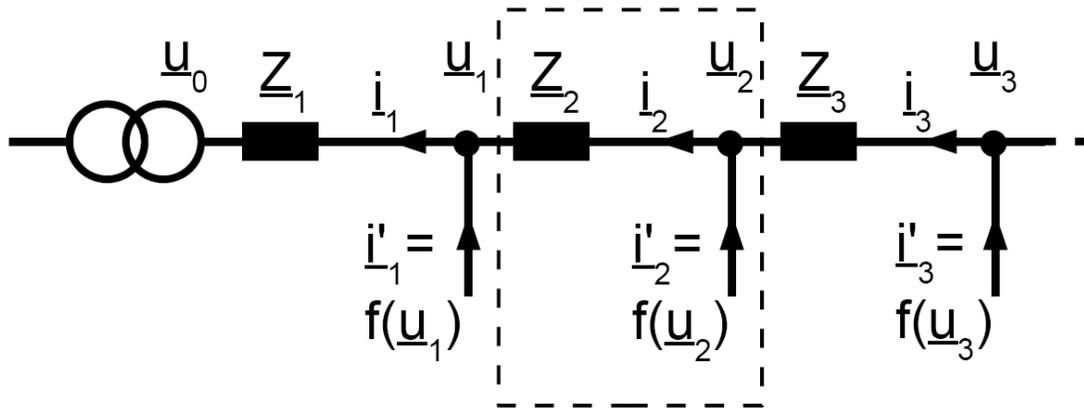
Kurvenschar in Abhängigkeit  
der gewünschten Ladeleistung  
 $P_{\text{set}}$  und der Netzfrequenz  $f$

## Frequenzabhängiges Laden II

- Auswirkung während einer europäischen Großstörung
- PT1-Verhalten bei Simulation Netztrennung vom 2006-11-04



## Spannungsabhängiges Laden



$$\underline{u}_S = \sum_{m=1}^S (\underline{Z}_m \cdot \underline{i}_m) + \underline{u}_0, \quad \underline{i}_m = \sum_{n=m}^L \underline{i}'_n(\underline{u}_n), \quad \text{Knoten } S \in \{1, \dots, L\}$$

- Lineare Gleichung mit Knotenströmen  $\underline{i}'$
- $\underline{i}'(\underline{u}) = k \cdot \underline{u}$  entspricht Ohmschen Gesetz
  - Reduktion auf bekanntes Problem:
  - Wann werden E-Autos so intelligent wie Glühbirnen?
- Kombination von PV & PiV verringert Problem mit Überspannung

## Optionale Zusatzfunktionen

- Sensornetz für Netzparameter zur Zustandsschätzung
- Empfang von Preissignalen / Anreize über NNE
  
- Blindstrommanagement
- Integrierte Oberschwingungsfilter
- Ausgleich von Schiefasten / Unsymmetrien
  
- Dämpfung von Netzpendelungen / Power System Stabilizer
- Künstliche Trägheit / Virtuelle Synchronmaschinen

## Systemdienstleistungsbonus: Erfahrungen & Ideen

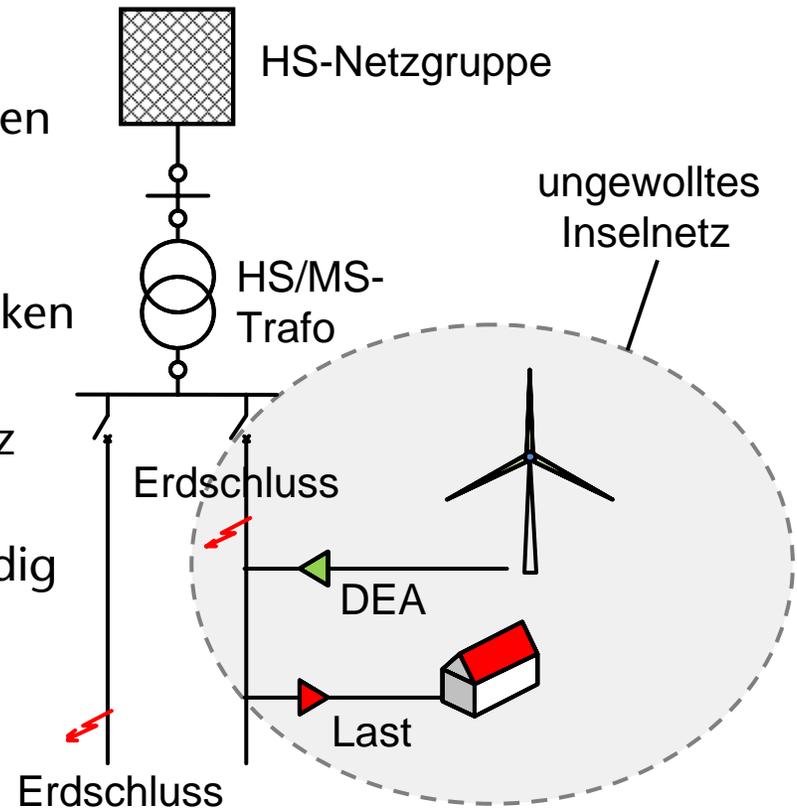
- Zur Nachrüstung von Windkraftanlagen im EEG/SDLWindV:  
verweisen auf bestehende technische Regeln
- E-Autos disponible Lasten: Verschiebung von Wirkleistung
- Definition technischer Regeln (z.B. DIN-VDE-Normen),  
auf die gesetzliche Normen zugreifen können
- Wenn man sich netzfreundlich verhält, dann
  - erhält man als Kleinanlagenbetreiber einen Bonus
  - I.D.E.E. als Förderkonzept (DGS u.a.)
- Einmalige Typprüfung vs. Einzelabnahme bei Präqualifizierung
- Zertifikat als Nachweis für die Netzdienlichkeit

## Caveat: Ungewollte Inselnetze

- Intelligente Plug-In Vehicles machen das Verteilnetz robuster
- Wahrung der Blind- und Wirkleistungsbalance
- stabilisierende Maßnahmen wirken nicht nur im Großen, sondern auch im Kleinen
  
- Wahrscheinlichkeit von MS-Netzinseln steigt
  - nach Freischaltungen bei Wartungsarbeiten
  - nach Schutzauslösungen bei Netzfehlern
  
- Personensicherheit gefährdet bei Wartungsarbeiten
- Risiko einer asynchronen Wiederzuschaltung

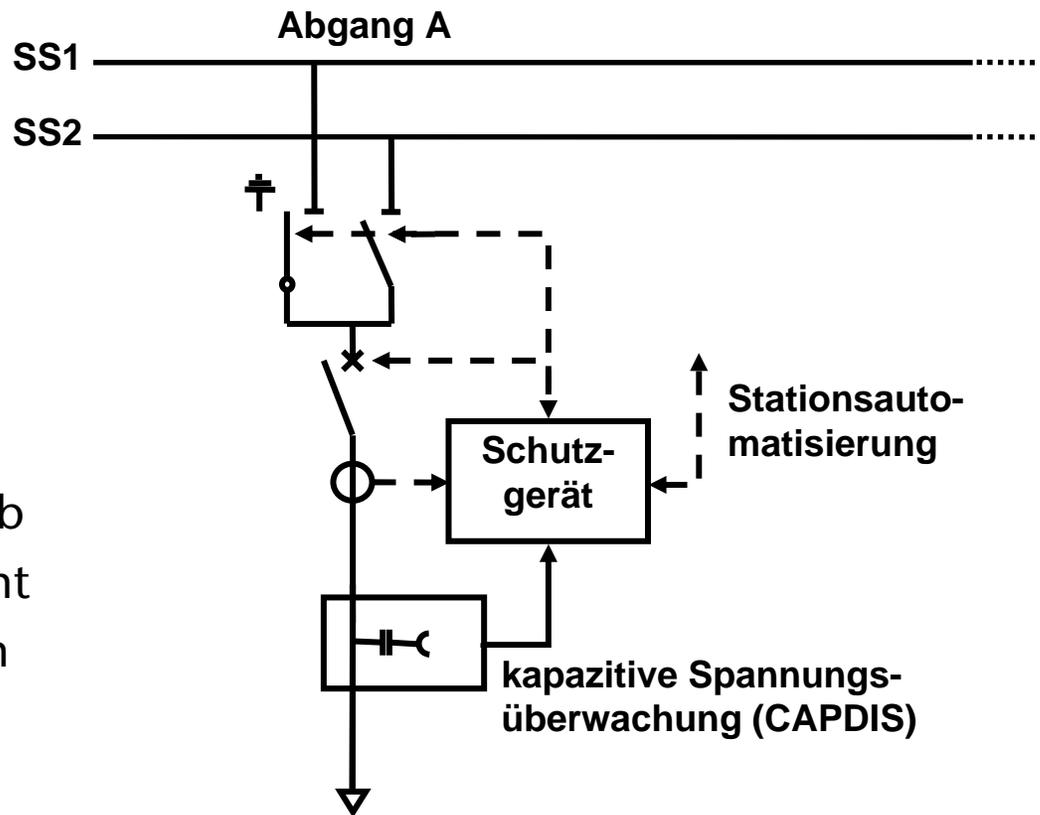
## Behandlung ungewollter Inselnetze I

- Strikte Einhaltung der 5 Sicherheitsregeln:
  - Freischalten
  - Gegen Wiedereinschalten sichern
  - Spannungsfreiheit allpolig feststellen
  - Erden und kurzschließen
  - Benachbarte, unter Spannung stehende Teile abdecken/abschranken
- Sichere Unterscheidung zwischen gewolltem und ungewolltem Inselnetz dezentral nicht möglich
- Kenntnis des Schaltzustandes notwendig



## Behandlung ungewollter Inselnetze II

- Inselnetzwarnung bei Spannungsdetektion am offenen Schalter
- Vorerst nichts tun
  - Wiederzuschaltung verhindern
  - Mitarbeiter warnen
  - Instabilität abwarten
- Beendigung Inselnetzbetrieb
  - Erzeugungsmanagement
  - DEA manuell abschalten
  - Inselnetz kontrolliert erden

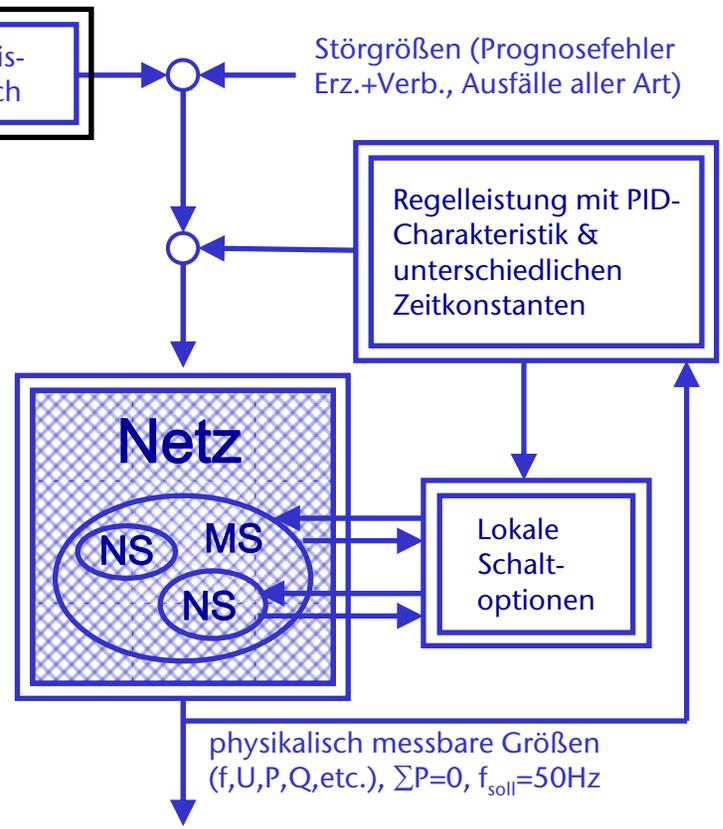
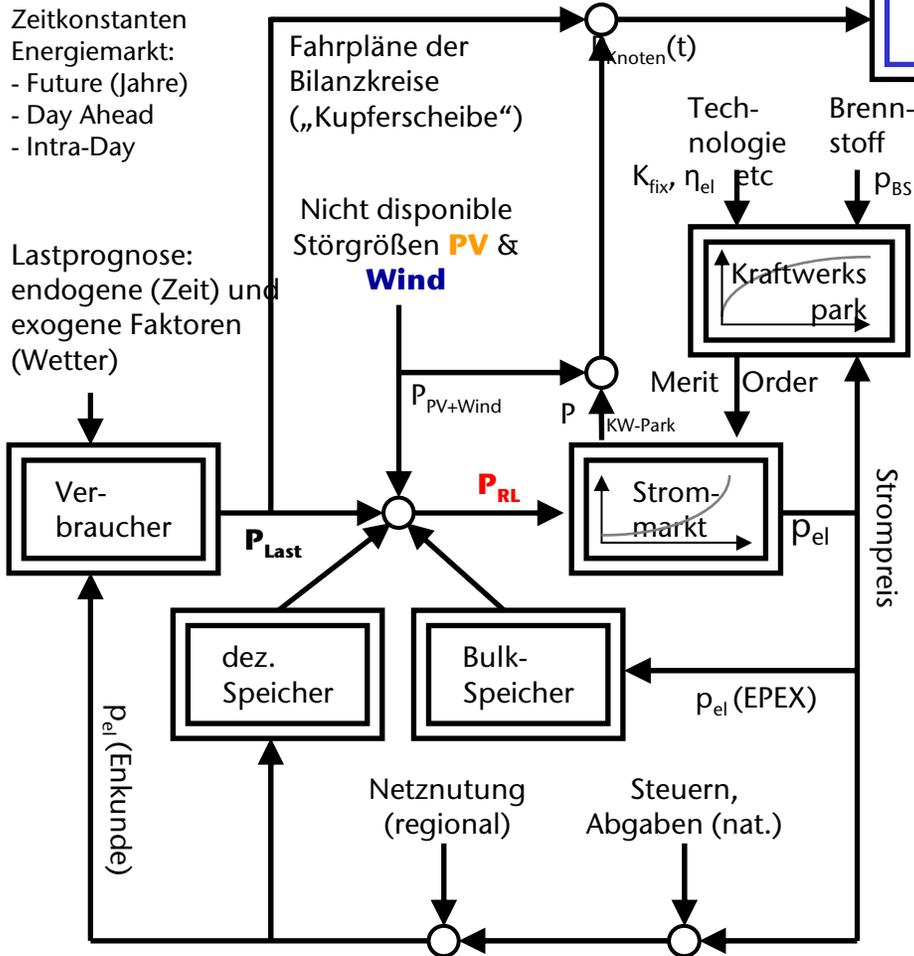


## Gliederung

- System- und Netzstabilität
- Systemdienstleistungen als Stabilisierungshebel
- Flexibilisierungsoption der Nachfrageseite
- Ausblick: The Big Picture

# Elektrizitätsmarkt als nicht-linearer Regelkreis (Quelle: DKE)

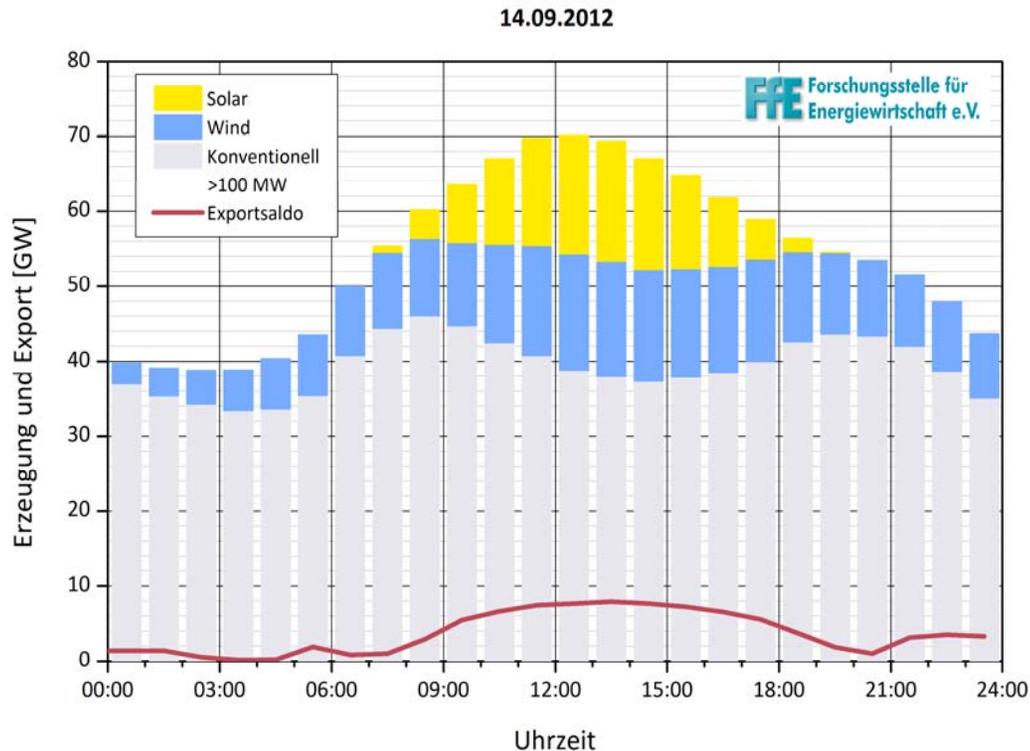
## Welt des Geldes: Strommarkt



## Welt der Physik: Netzbetrieb

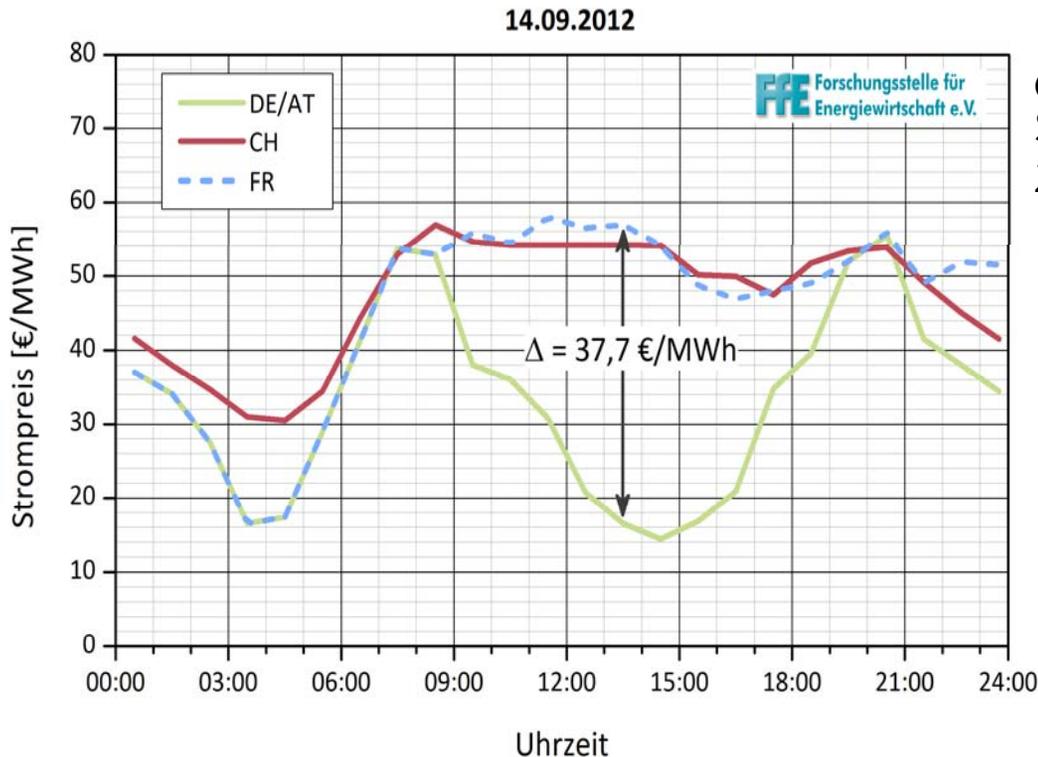
Zeitkonstanten des Kapazitätsabrufs: Momentanreserve 0-30s, PRL 30s-5min, SRL 5min-¼h, MRL ¼h-1h

## Reale Messdaten September 2012 - Leistungsverlauf



- Windenergie: 15,6 GW, Solarenergie: 16,2 GW
- Summe nicht disponibler Leistung: 31,8 GW, Export: ca. 8 GW

## Reale Messdaten September 2012 - Börsenpreise



### Cross Border Commercial Schedules (Physical Flows)

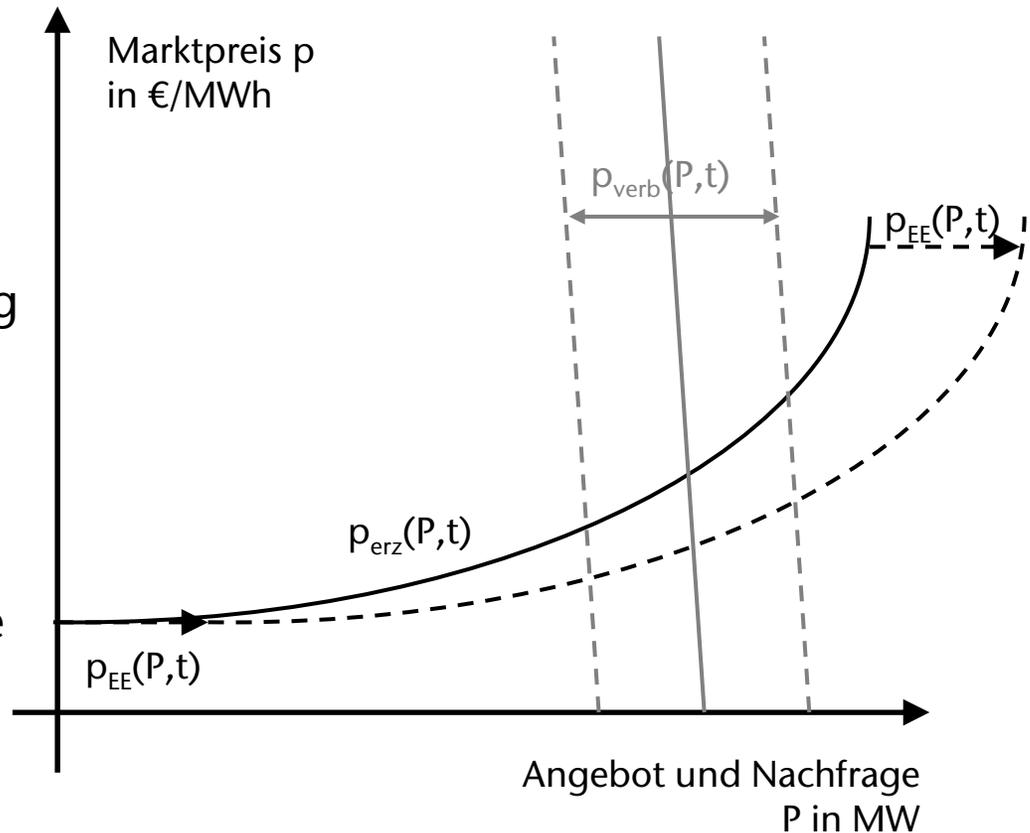
2012-09-14, 13-14 Uhr

DE>FR 1500 MW (-1399 MW),  
 DE>CH 934 MW (1725 MW),  
 DE>PL 0 MW (1478 MW)  
 DE>DK 750 MW (66),  
 DE>AT 4212 MW (2656 MW),  
 DE>CZ 150 MW (353 MW),  
 DE>NL 1600 MW (3104 MW)  
 Quelle: entsoe.net

- Aufspreizung des Preisunterschiedes von 9-18 Uhr
- Keine Arbitrage möglich aufgrund begrenzter Netzkuppelkapazitäten

## Kraftwerkseinsatz entlang der Merit Order

- Bisher: preisunelastischer Verbrauch & preiselastische Erzeugung
- Wind- und Solarenergie: geringen Grenzkosten & preisunelastische Erzeugung
- Wetterbestimmte, nicht marktorientierte Erzeugung
- Speicher erhöhen Preiselastizität der Nachfrage



## Spektrale Zerlegung der Lastgänge

- Fourier-Transformation

- **Last**

- **PV**

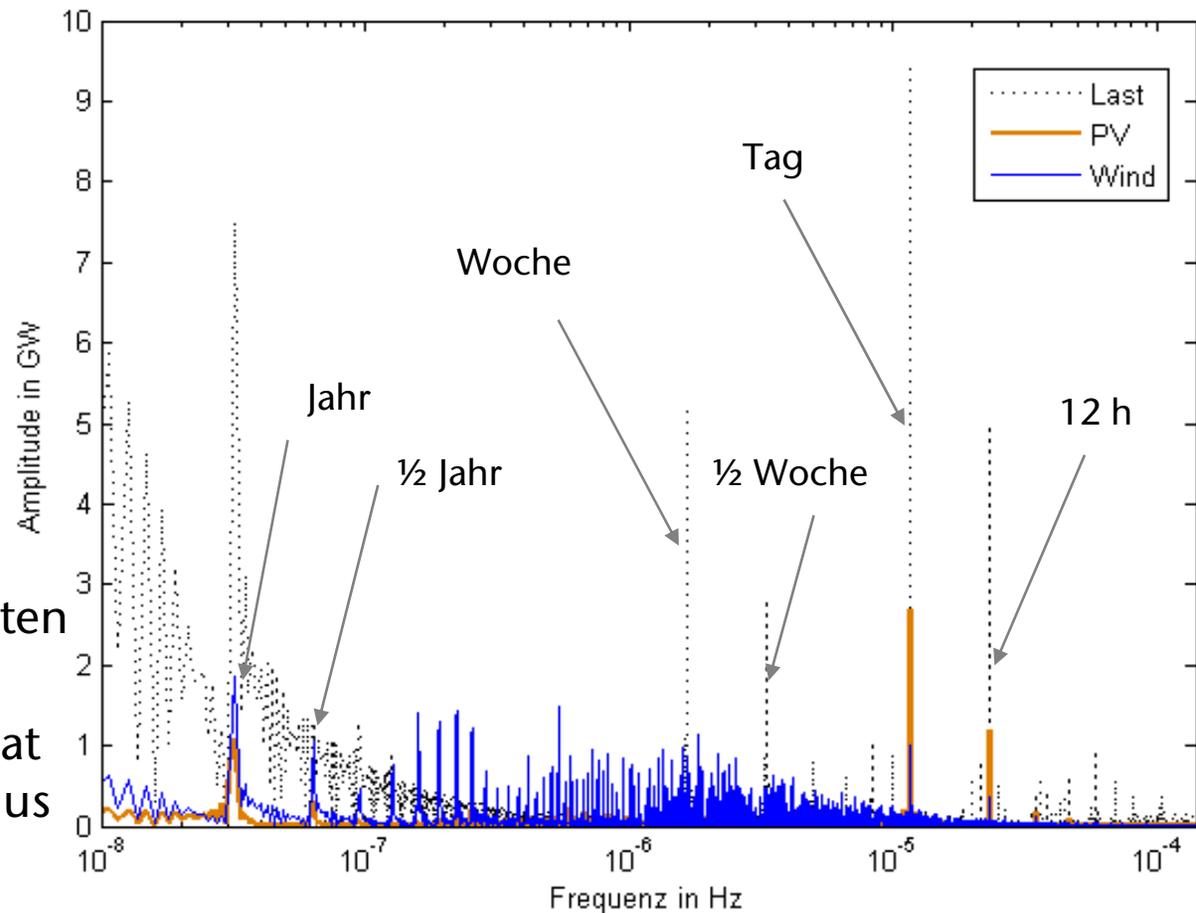
- **Wind**

(Beispieldaten aus Quaschnig 2000)

- Wind hat starken Rauschanteil

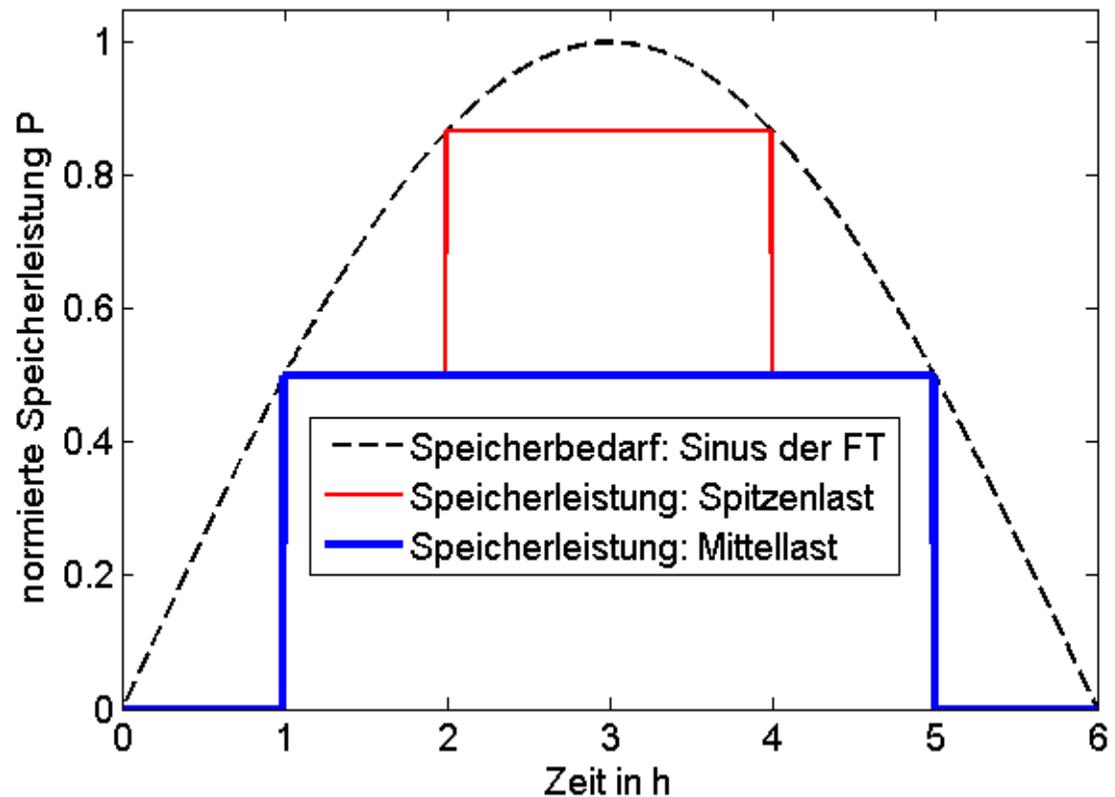
- PV hat ausgeprägten Tageszyklus

- Verbraucherlast hat auch Wochenzyklus



## Näherung des Speicherlastganges als Sinusschwingung

- Kompensation der fluktuierenden Restlast durch gegenphasige Speicherschwingung
- Unterschiedliche Frequenzbereiche
- Spitzenlast: niedrige Fixkosten
- Mittellast: niedrige variable Kosten
- Verschiedene Anlagentypen mit unterschiedlicher Auslastung



Beispiel für den diskreten Speichereinsatz bei einer Periodendauer von  $T=12$  und zwei Anlagen

## Mathematische Formulierung des Kostenminimums

- Minimiere  $K_{Ges} = K_{fix,P} + K_{fix,E} + K_{var,P} + K_{var,E}$

- $$K_{Ges}/P_{max} = k_{fix,P} + k_{var,P} * T_p/2 * a_L$$

(Leistungsanteil)

$$+ T_C/2 * a_L (k_{fix,E} + T_p/2 * k_{var,E})$$

(Energieanteil)

- $T_p$  ist die zu untersuchende Periode (z.B. 1 Jahr)

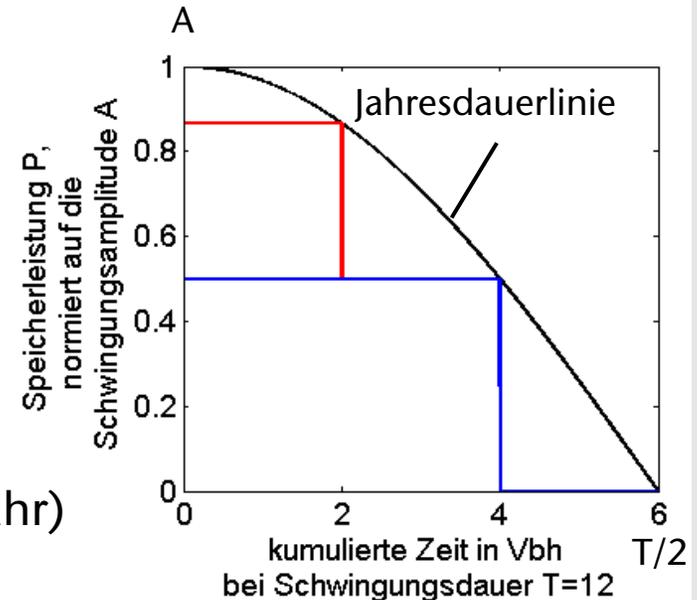
- $T_C$  ist die Zyklusdauer (z.B. 12 Stunden)

- $$K_{Ges}/P_{max} = k_{fix,P} + a_L (k_{var,P} * T_p/2 + k_{Ges,E} * T_C/2)$$

- mit  $k_{Ges,E} = k_{fix,E} + T_p/2 * k_{var,E}$

- Entladeverluste  $k_{var,E}$  vernachlässigbar bzw. haben fixen Charakter

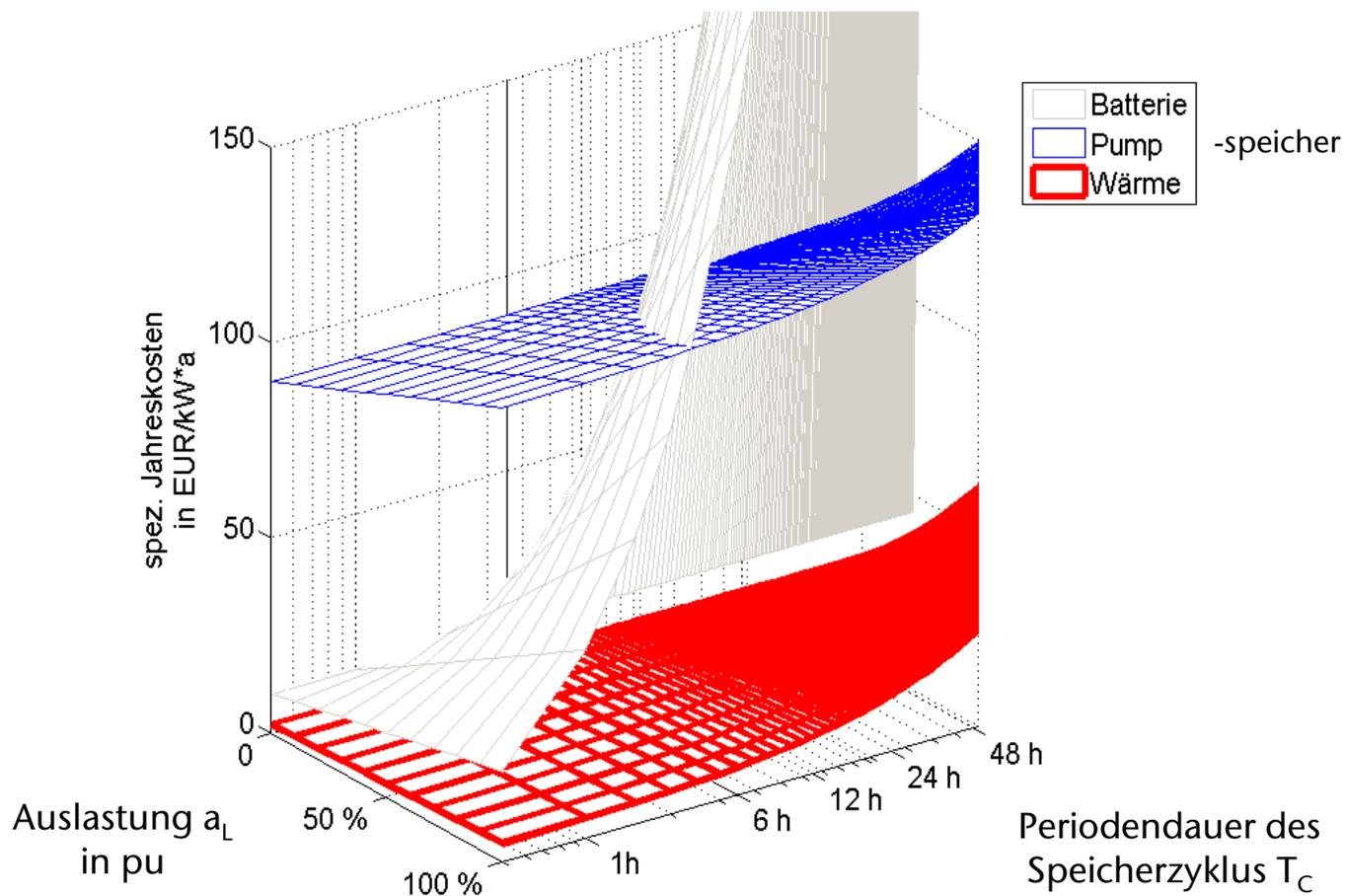
- Linearer Zusammenhang aus Auslastung  $a$  und Zyklusdauer  $T_C$



## Exemplarische Vorstellung stationärer Speicher

- Zentrale Pumpspeicher
  - Invest Wandler 900 € / kW (Pumpen & Turbinen)
  - Invest Energie 6 € / kWh (Speicherbecken)
  - 80% Speichernutzungsgrad (Vollzyklus)
- Stationäre Batteriespeicher
  - Invest Wandler 100 € / kW (Leistungselektronik)
  - Invest Energie 500 € / kWh (Li-Ion Batteriesystem)
  - 90% Speichernutzungsgrad (Vollzyklus)
- Wärmespeicher als funktionaler Stromspeicher ( $2 \text{ kW}_{\text{th}} \sim 1 \text{ kW}_{\text{el}}$ )
  - Invest Wandler 10 € /  $\text{kW}_{\text{th}}$  (Pumpengruppe für drucklosen Speicher)
  - Invest Energie 200 € /  $\text{m}^3$  (pro  $\text{m}^3$  Wasseräquivalent  $\sim 50 \text{ kWh}_{\text{th}}$ )
  - Wandelverluste ca. 1-2 % Pumpenstrom, Wärmeverluste sind bei großen Tagesspeichern vernachlässigbar

## Jahreskosten der Merit-Order-Matrix



## Fazit zu Batteriespeichern

- Technisch sehr gut geeignet für schnelle Reaktionen bei geringen Energiemengen
- Stationäre Batteriespeicher sind teuer im Vergleich, aber
- Mobile Batteriespeicher sind im E-Auto-Zeitalter sowieso schon da
  
- Zusätzliche Degradation gering, wenn SOC-Hübe klein sind
  - Beispiel: Berliner-Blei-Batterie, Inbetriebnahme 1986, 17 MW:
  - Kumulierter Energiedurchsatz 7000 x Nennkapazität
  - Einsatz zur Frequenzstützung
  
- Abwägung zwischen kalendarischer Alterung und zyklische Alterung zu Energiespeicherzwecken als Kurzfristspeicher (wenige Stunden) incl. Rückspeisung

## Gliederung

- System- und Netzstabilität
- Systemdienstleistungen als Stabilisierungshebel
- Flexibilisierungsoption der Nachfrageseite
- Ausblick: The Big Picture

## Systemstabilität als primäres Ziel

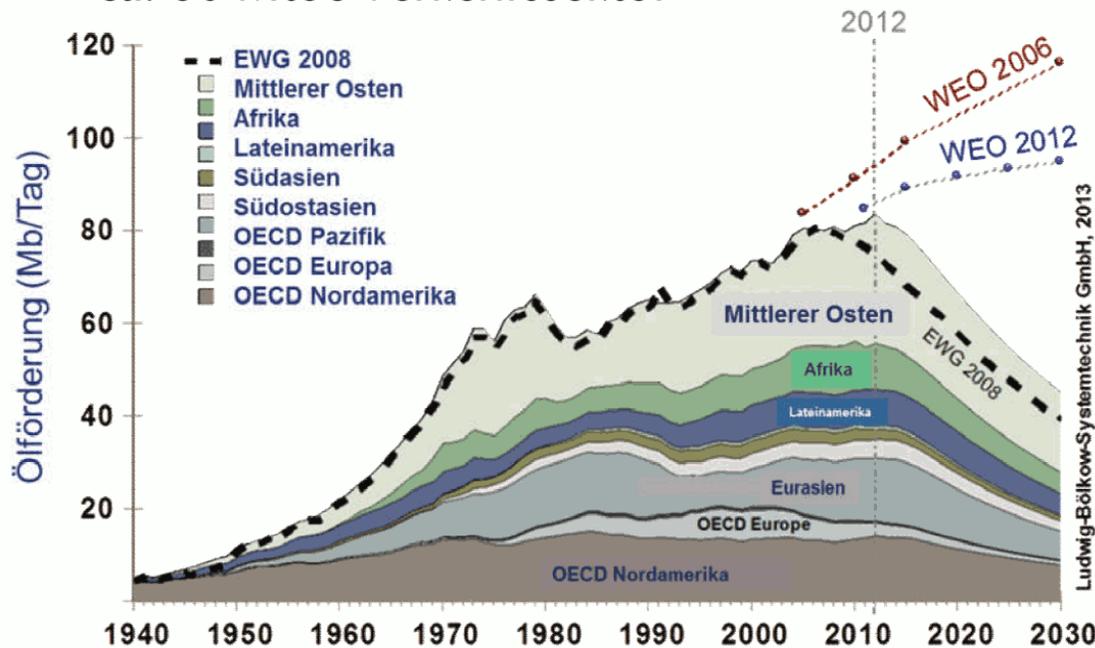
- Ein elektrotechnisch stabiles Netz ist die Basis jeder übergeordneten Optimierung und notwendig für den Austausch von elektrischer Energie
  
- Massiver Zubau von Windenergieanlagen (vor 10-15 Jahren)
  - WEA werden systemrelevant
  - Mängel werden identifiziert (z. B. Low Voltage Ride Through)
  - Änderung der MS-Richtlinie, Nachrüstungen im Bestand (SDLWindV)
  
- Massiver Zubau von PV-Anlagen (vor 5 Jahren)
  - PV-Anlagen werden systemrelevant
  - Mängel werden identifiziert (z. B. 50,2 Hz Problem)
  - Änderung der NS-Richtlinie, Nachrüstungen im Bestand (SysStabV)
  
- Massiver Zubau von Batterieladegeräten (in 5-10 Jahren?)
  - Plugged-in Vehicles (PiV) werden systemrelevant
  - Mängel werden identifiziert (z. B.  $P = \text{const}$ )
  - Änderung von Produktnormen & Anschlussbedingungen, Rückrufaktionen ?

## Wie schnell kommt das E-Auto?

- Vergleich: Einführung von elektrischen Herden und Warmwasserboilern in den 1930er Jahren
  - Energiewirtschaft hat Netze und Erzeugung ausgebaut
  
- Laissez-Faire bei Batterieladegeräten?
  - Automobilindustrie denkt bis zu Systemgrenze (Steckdose)
  - Netzbetreiber sehen wenig Handlungsbedarf bei geringer Durchdringung
  - Aktuelle Probleme sind wichtiger
  
- Trägheit des Systems
  - Anforderungen 5 Jahre vor Serienstart festlegen
  - Nachfrageschub durch Änderungen der Rahmenbedingungen

## Peak-Oil als Antrieb für die Elektromobilität

- Rund ein Drittel des deutschen Primärenergiebedarfs wird durch Mineralöl gedeckt (~100 Mio Tonnen Ölequivalent)
  - ca. 20 Mtoe nicht energetischer Verbrauch
  - ca. 20 Mtoe Wärmesektor
  - ca. 60 Mtoe Verkehrssektor



Quelle:  
EnergyWatchGroup 2013

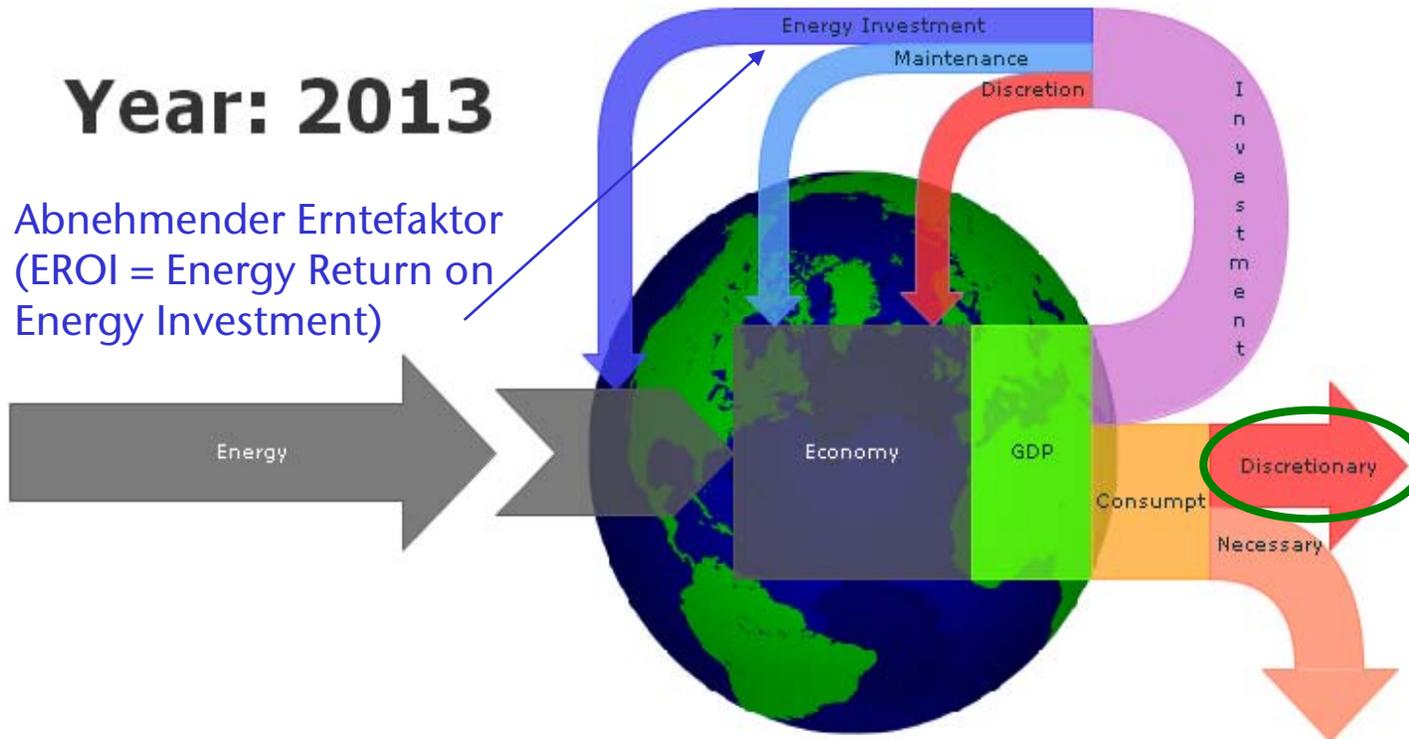
## Energie als Produktionsfaktor

- Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital, Energie
- Anteil der Faktorkosten von Energie ist klein (ca. 5%)
- Produktionselastizität von Energie ist groß (ca. 0,5)
- Ölpreisschocks in den 70er Jahren: BIP-Wachstum eingebrochen
- Weltwirtschaftskrise 2008 ausgelöst durch Inflations- und Zinsanstieg
  
- Mineralöl als Energieträger im Transportsektor
  - Hohe Energiedichte (ca. 10 kWh/l)
  - Gut transportierbar (pumpbar)
  - Schwer zu substituieren
  
- Reduzierung der Abhängigkeit vom Erdöl als Selbstschutz vor ökonomischen Krisen

## Reinvestitionen in die Energieinfrastruktur I

**Year: 2013**

Abnehmender Erntefaktor  
(EROI = Energy Return on  
Energy Investment)

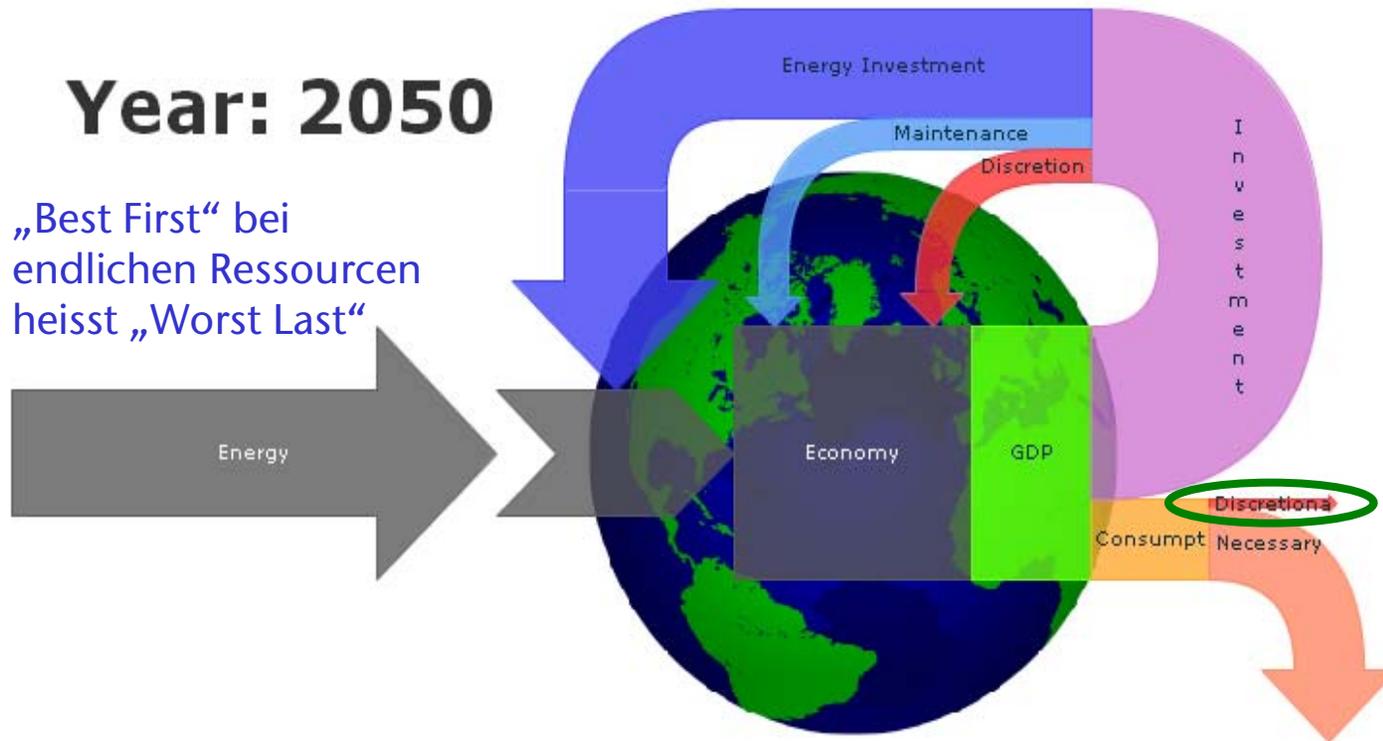


Quelle: Charlie Hall

## Reinvestitionen in die Energieinfrastruktur II

### Year: 2050

„Best First“ bei  
endlichen Ressourcen  
heißt „Worst Last“



Quelle: Charlie Hall

## Wann kommt das „EEG für Elektrofahrzeuge“?

- EEG fördert die Nutzung, nicht die Anschaffung
- Fester Fördersatz zur besseren Kalkulierbarkeit
- Haushaltneutrales Umlagesystem
  
- Fahrzeughersteller können nur in Produkte investieren, die nachgefragt werden
- Umstellung der Fahrzeugflotte und Technologieentwicklung dauert 10-20 Jahre
- Anpassungsmängel durch regulatorische Maßnahmen korrigierbar
  
- deutsche Premiumhersteller haben (in Kürze) elektrisch angetriebene Fahrzeuge im Portfolio

## Elektromobilität: Chance oder Risiko?

### Risiko:

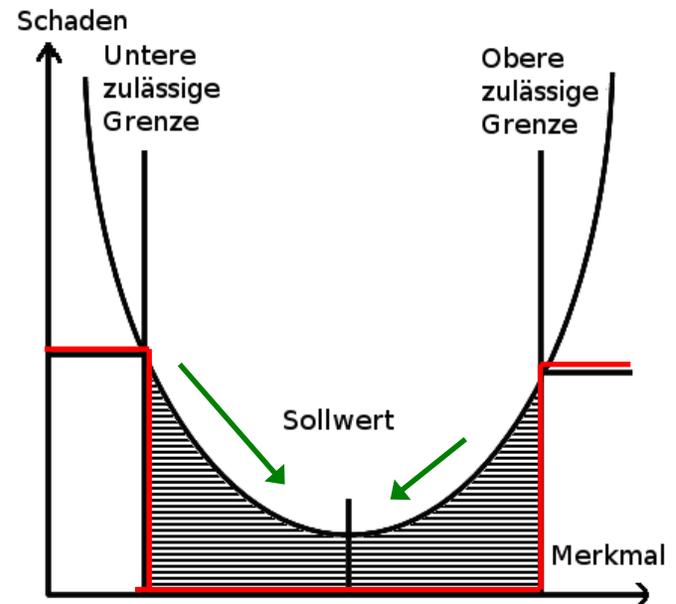
- Schnelle Marktentwicklung überrascht alle Beteiligten
- Unausgereifte Netzanschlussbedingungen ohne Beachtung der Systemrelevanz einer hohen Dichte von E-Autos
- Nachrüstaktionen notwendig wie bei Wind- und Solarenergie
- ESOI (energy stored on energy invested) von Batterien gering = energieintensiv

### Chance:

- Elektromobilität senkt die Abhängigkeit vom Öl
- Elektromobilität bietet Kurzfristspeicheroption (einige Stunden)
- Elektromobilität ist ergiebige Quelle von Systemdienstleistungen
- Elektromobilität erleichtert die Integration von fluktuierenden EE

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kaestle@IEE.TU-Clausthal.de  
Tel. +49 5323 72-2572



Qualitätsfunktion nach Taguchi