15. November 2016

1. Herbstworkshop

„Dezentrale Sektorkopplung und hybride Energiespeichersysteme“

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch
Professur für Energiespeichersysteme

E-Mail: thilo.bocklisch@tu-dresden.de Tel.: +49 351 463-40270

DRESDEN concept
Exzellenz aus Wissenschaft und Kultur

Überblick

1. **Motivation**
2. Dezentrale Sektorkopplung
3. Hybride Energiespeichersysteme
4. Organisatorisches zum Ablauf des Workshops

Potentiale von fossilen Energieträgern und Erneuerbaren Energiequellen

Erdgas
1800 PWh
(gesamt)

Erdöl
2100 PWh
(gesamt)

Uran
260-2600 PWh
(gesamt)

Kohle
7800 PWh
Gesamtreserve

Energiewende

Weltenergiebedarf
140 PWh/a (2010)

Sonne
200000 PWh/a

Wind
220-610 PWh/a

Meereswärme
26-96 PWh/a

Biomasse
18-53 PWh/a

Wasserkraft
26-35 PWh/a

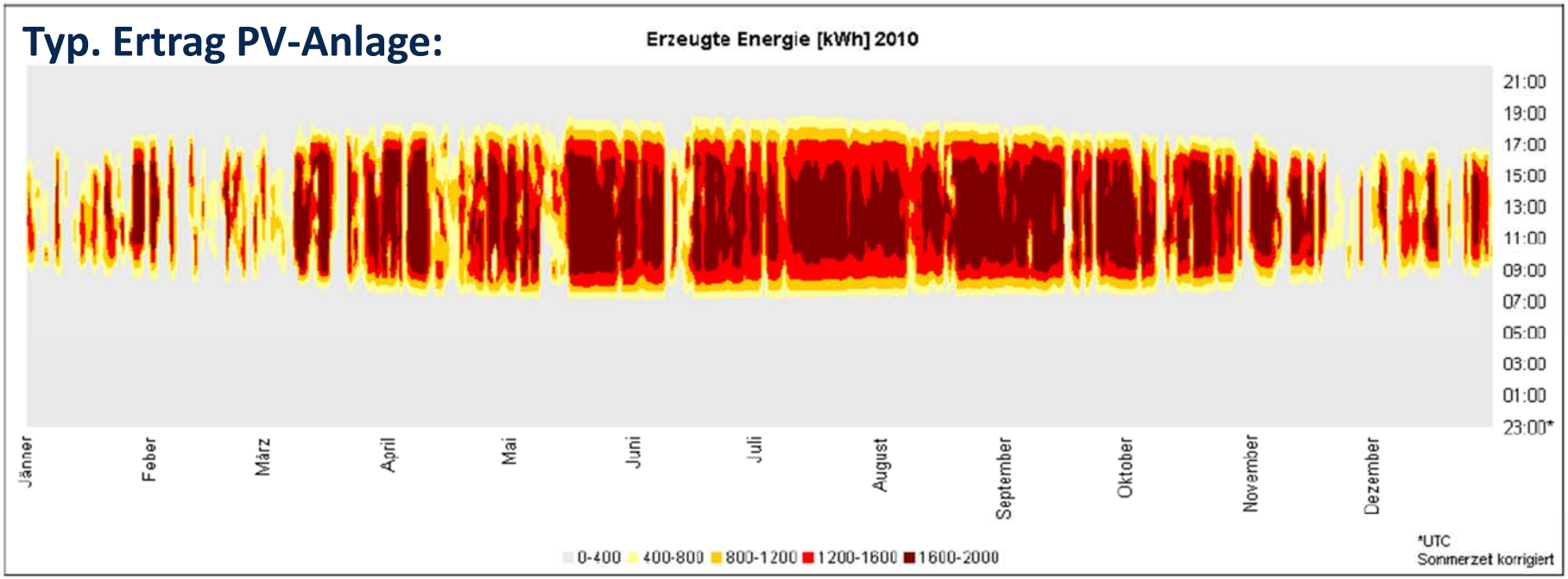
Geothermie
3-18 PWh/a

Gezeitenkraft
3 PWh/a

Quelle: nach Perez „A fundamental look at energy reserves for the planet“, 2009

Schwankungseigenschaften der Solar- und Windenergie

Typ. Ertrag PV-Anlage:

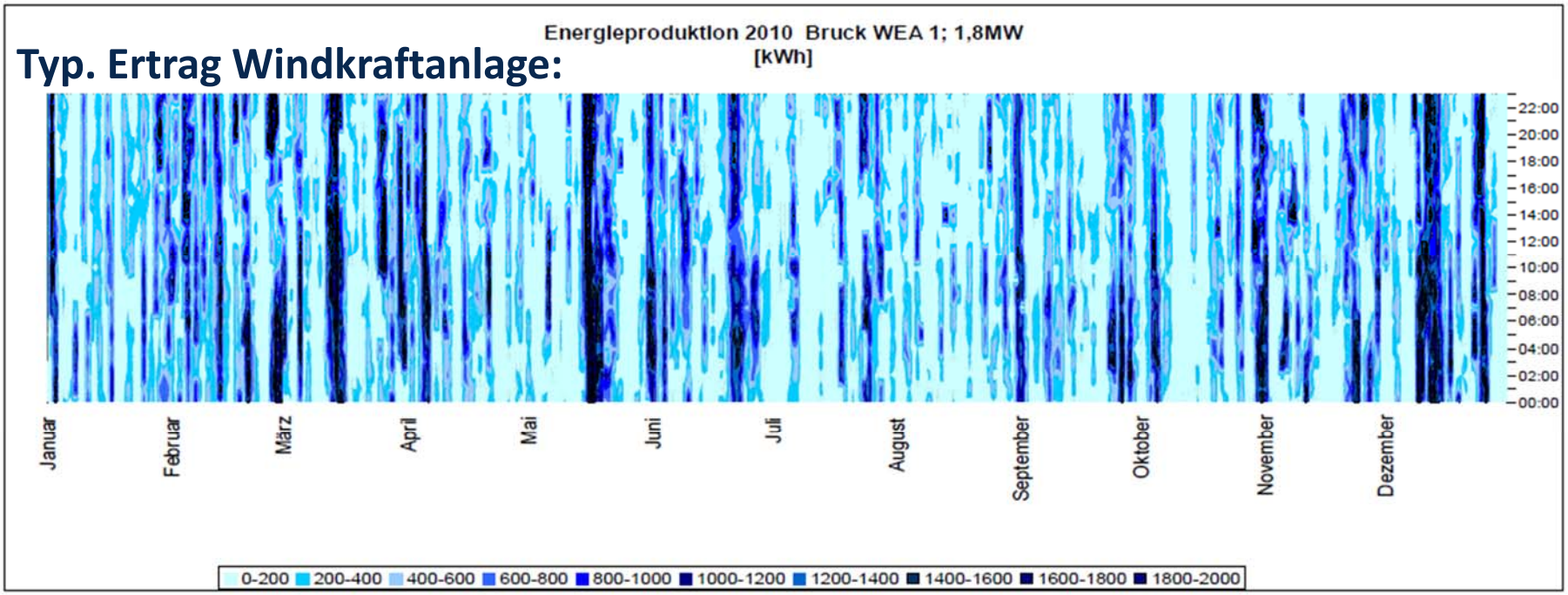


2013 (D)
36 GW
30 TWh

2015 (D)
39 GW
37 TWh

Quellen: SMA, BSW

Typ. Ertrag Windkraftanlage:

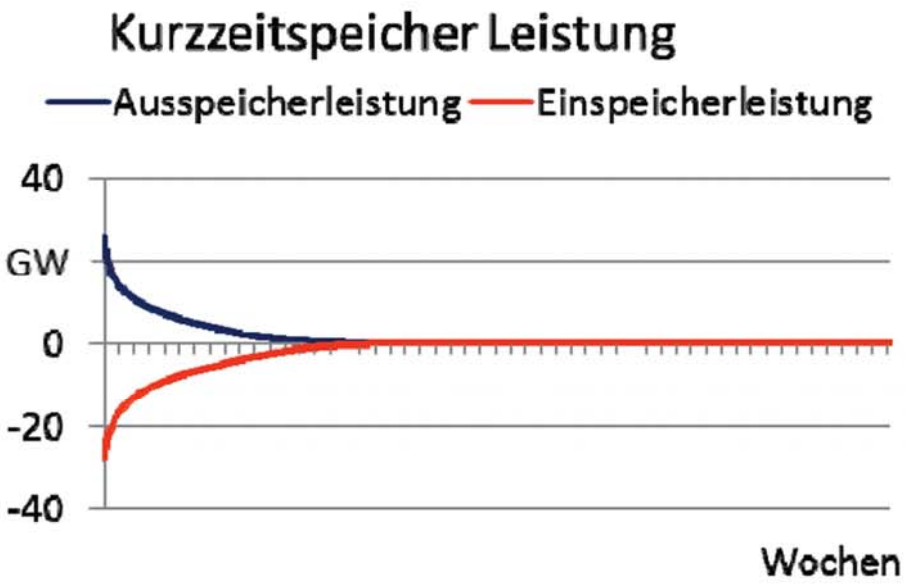


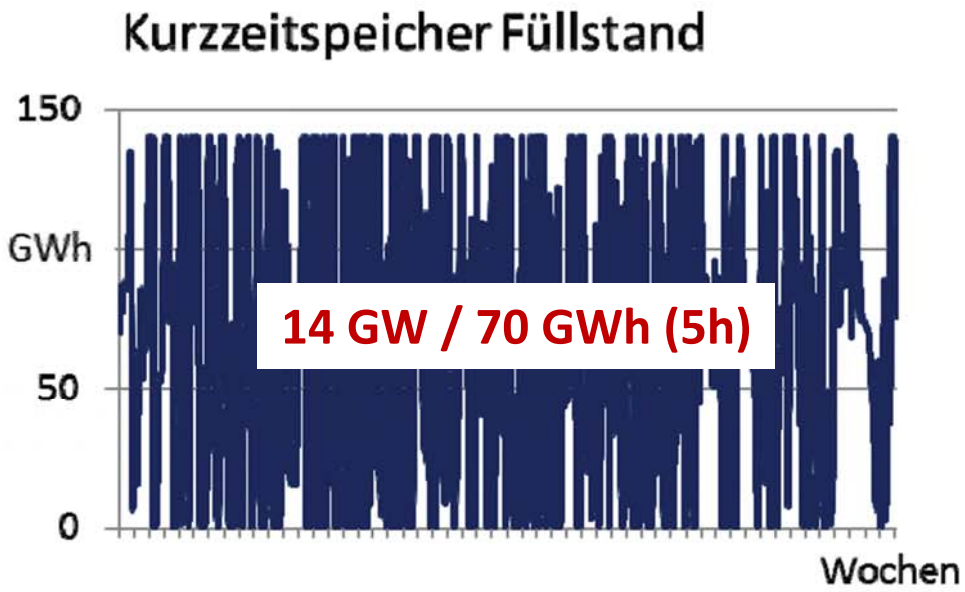
2013 (D)
33 GW
44 TWh

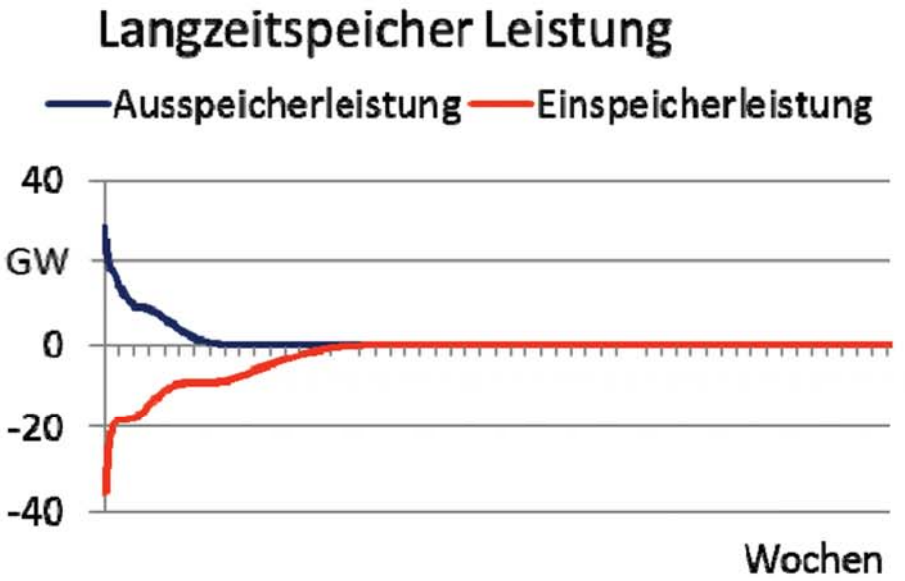
2015 (D)
42 GW
86 TWh

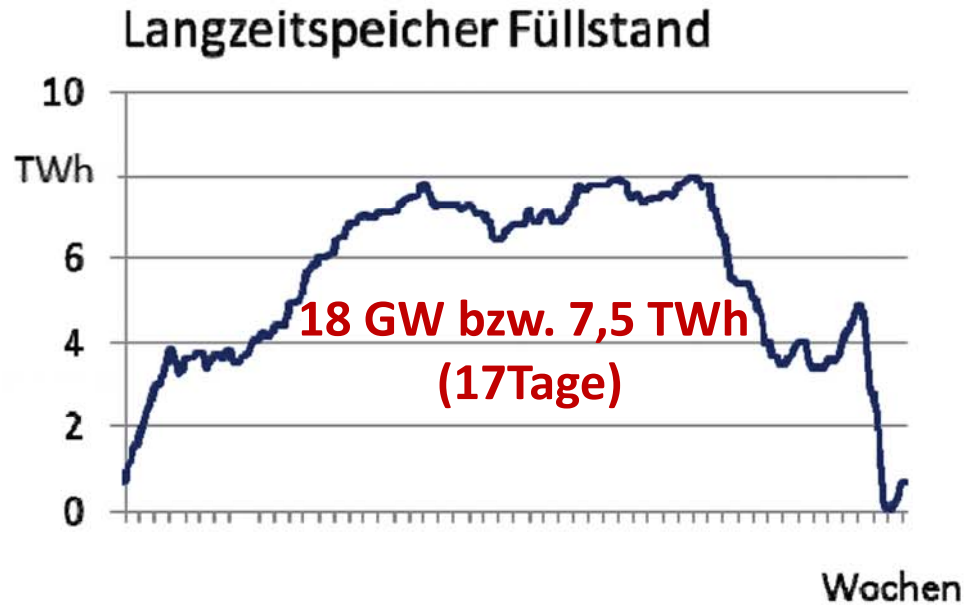
Quelle: BWE

Energiespeicherbedarf für Kurzzeit- und Langzeit-Bereich für 80%-EE-Szenario









Quelle: VDE12-Speicherstudie

Energiespeicher für eine effiziente und regenerative Energieversorgung

Konventionelles Energieversorgungssystem

(basierend auf fossilen, begrenzt verfügbaren Energieträgern: Gas, Öl, Kohle, Kernbrennstoffe)

Energie-wende

Modernes / Nachhaltiges Energieversorgungssystem

(basierend auf Erneuerbaren Energien: Sonne, Wind, Wasser, Biomasse)

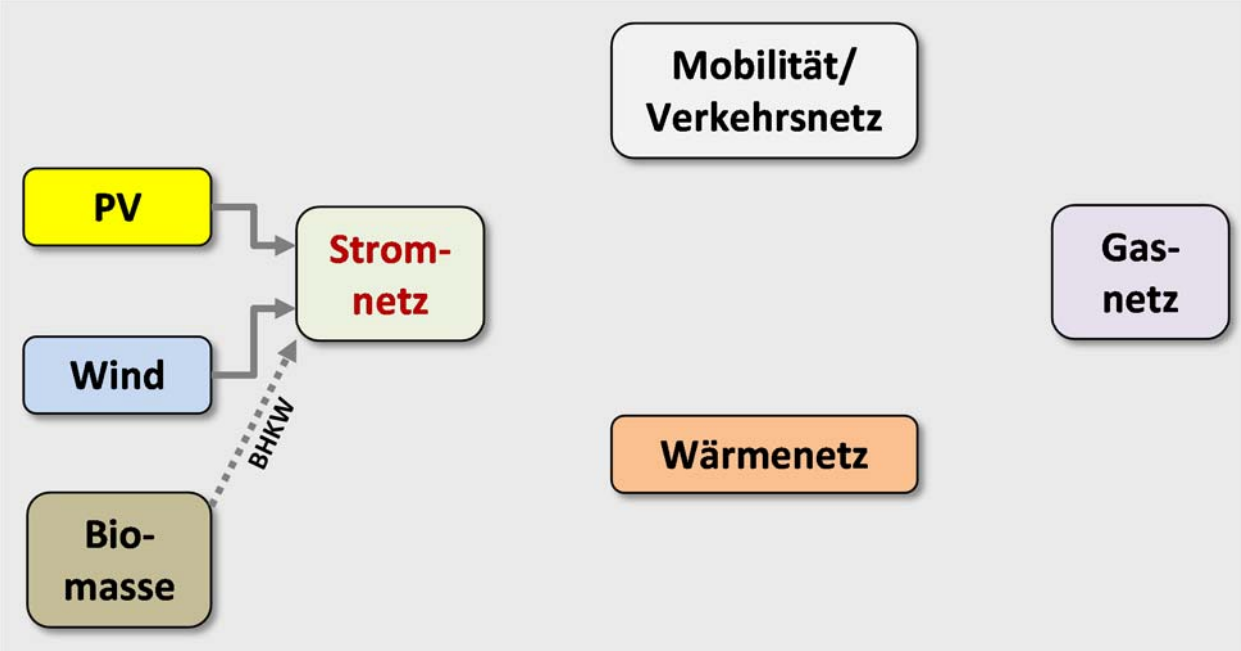
Motivation: Beitrag zu einem nachhaltigen Energieversorgungssystem:

- schneller Ausbau der erneuerbaren Energien (Sonne, Wind)
- Steigerung der Effizienz aller Energiewandlungsprozesse
- Steigerung der Lebensdauer der eingesetzten Komponenten

- **Energiespeicher** bilden hierfür eine **entscheidende Grundlage** in Kopplung mit anderen Flexibilisierungstechnologien (z.B. Netzen)
- innovative **„hybride" Energiespeichersysteme** bestehend aus **Strom-/Wärme-/Gas-** sowie **Kurzzeit-/Mittelzeit-/Langzeit-Speichertechnologien** bieten **zusätzliche Potenziale** für einen technisch, wirtschaftlich und ökologisch optimierten Betrieb
- **innovative Komponenten und Systemtechnik** sowie **intelligente, vorausschauende Betriebsführungs- und Dimensionierungs-Verfahren** sind von entscheidender Bedeutung

Überblick

1. Motivation
2. **Dezentrale Sektorkopplung**
3. Hybride Energiespeichersysteme
4. Organisatorisches zum Ablauf des Workshops

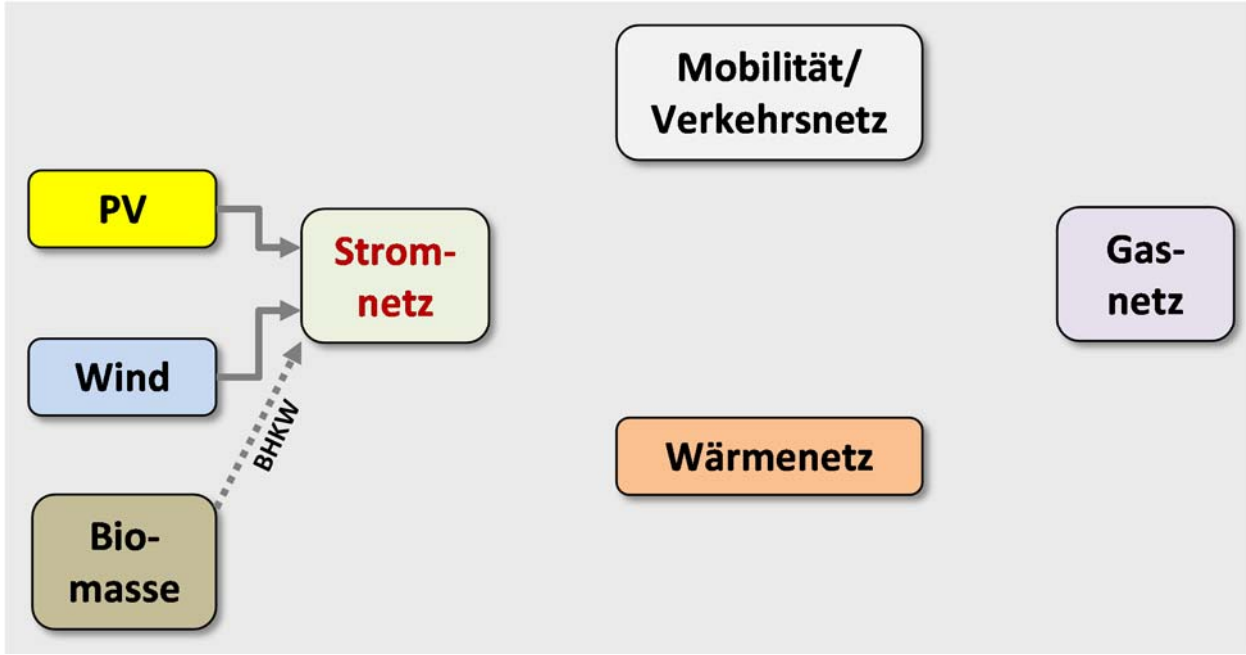

Mobilität/
Verkehrsnetz
PV
Strom-
netz
Gas-
netz
Wind
BHKW
Wärmenetz
Bio-
masse

Speicher im Stromnetz:

➔ **Systemdienstleistungen (Sekunden bis wenige Stunden)**

#1: Schwungradspeicher-Anlage

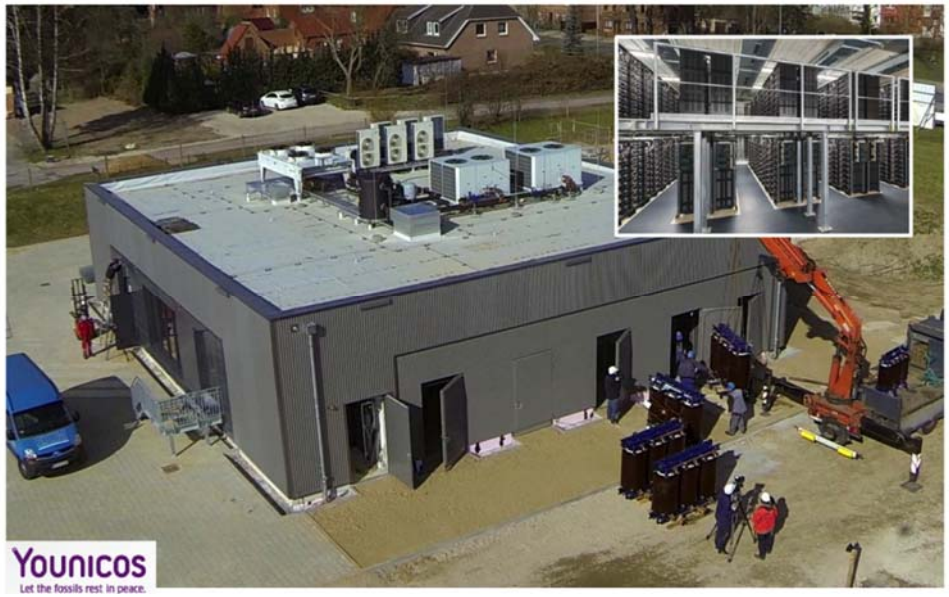
#2: Lithium-Ionen-Batterie



+/- 20MW Frequency Regulation System
by Beacon Power

Quelle: Beacon power

#1: Regeleistung +/- 20MW für 15 Minuten



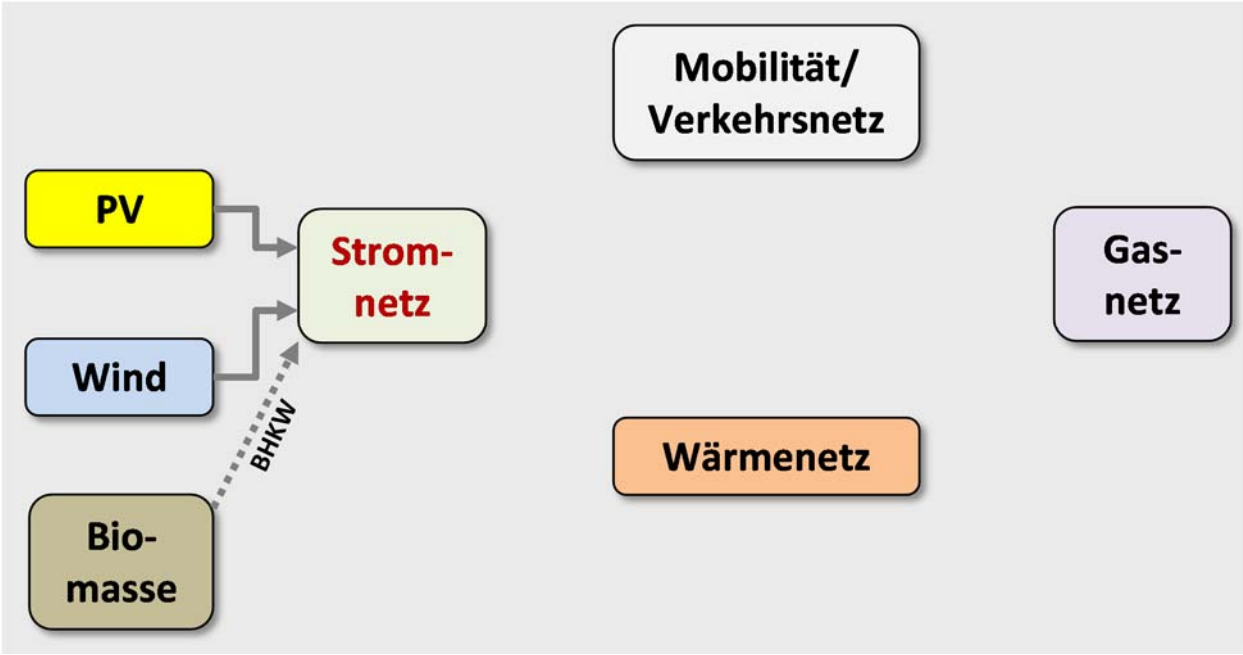
Quelle: Younicos

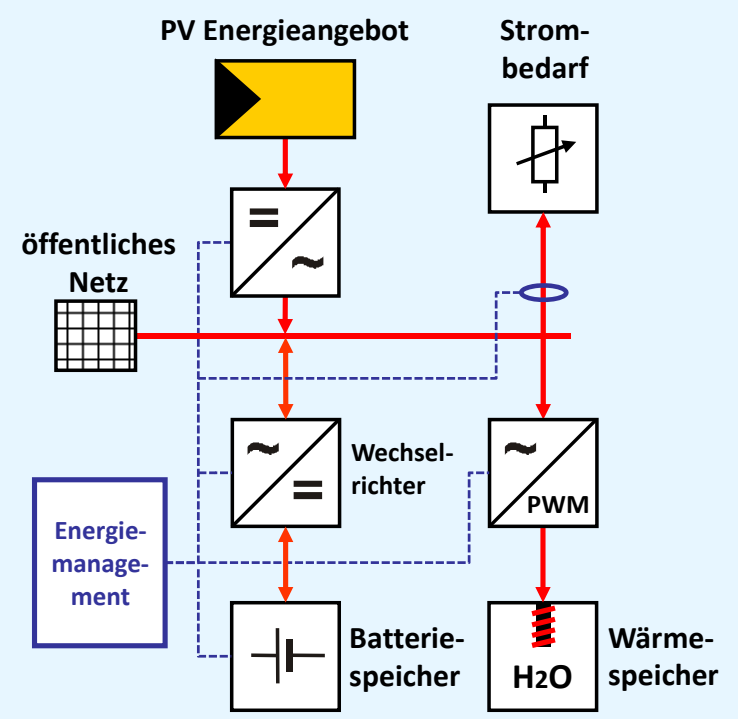
#2: Regeleistung +/- 5MW für 60 Minuten

Speicher im Stromnetz:

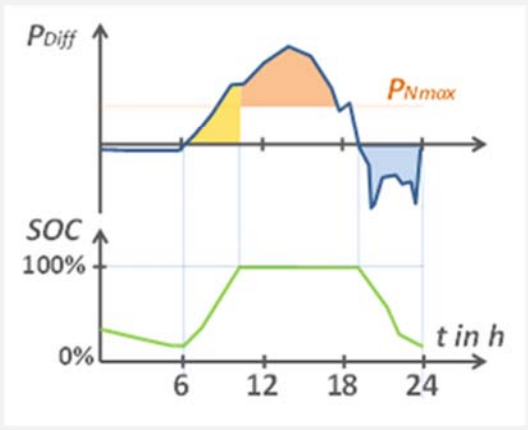
➔ **Ausgleichsspeicher (Minuten bis Stunden)**

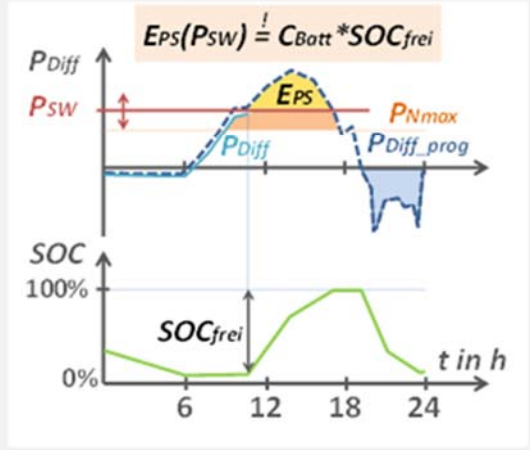
#3: PV-Batterie-Wärmespeicher-system zur erweiterten Eigenver-brauchsoptimierung in der Haus-energieversorgung





Regelbasiert	Optimierungsbasiert
BF1: Prioritätsbasiert (klassisch)	BF2: Peak-Shaving-Optimierung

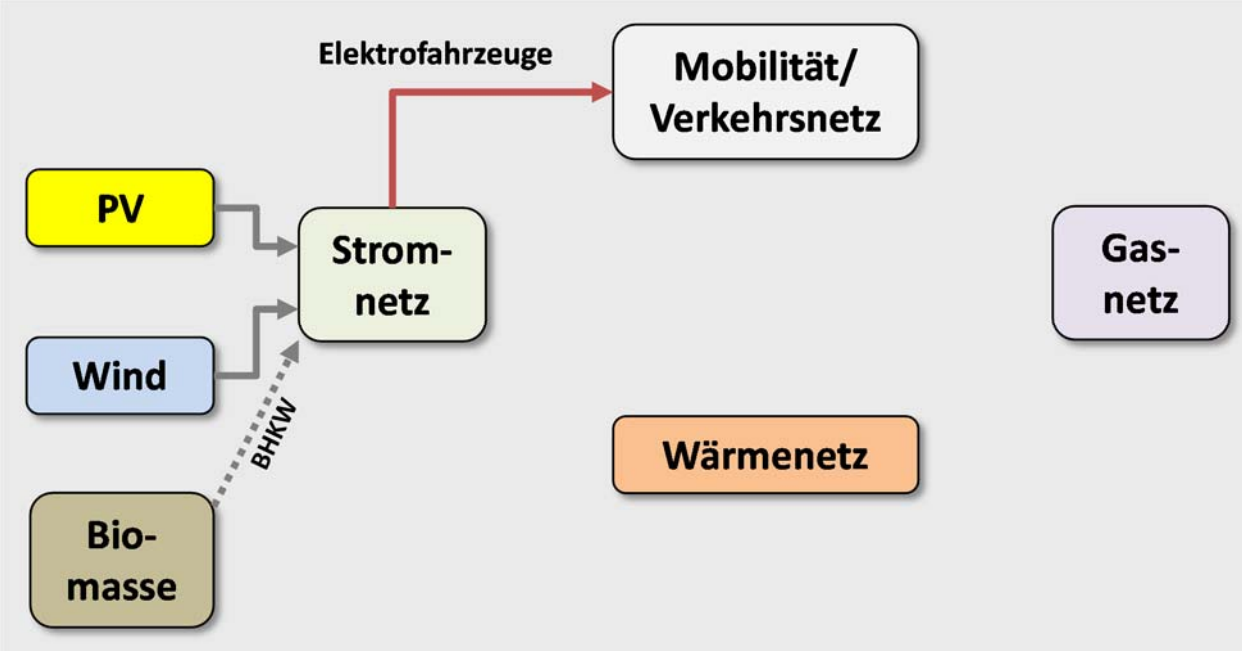




Speicher im Verkehrsbereich:

➔ **Fahrzeugbatterien (Sekunden bis Stunden)**

#4: Elektrofahrzeug- und Plug-in-Hybridfahrzeug-Flotten



Quelle: juwi, Sauer

Mobilität in Deutschland

- ca. 46 Millionen PKW
- ca. 63% aller Strecken unter 50km
- mittlere Fahrstrecke: 37km/Tag bzw. 13500km/Jahr
- ca. 600 TWh/a Energiebedarf im Verkehr

⇒ bei 100% Elektrofahrzeugen Reduzierung auf 100-120TWh/Jahr möglich

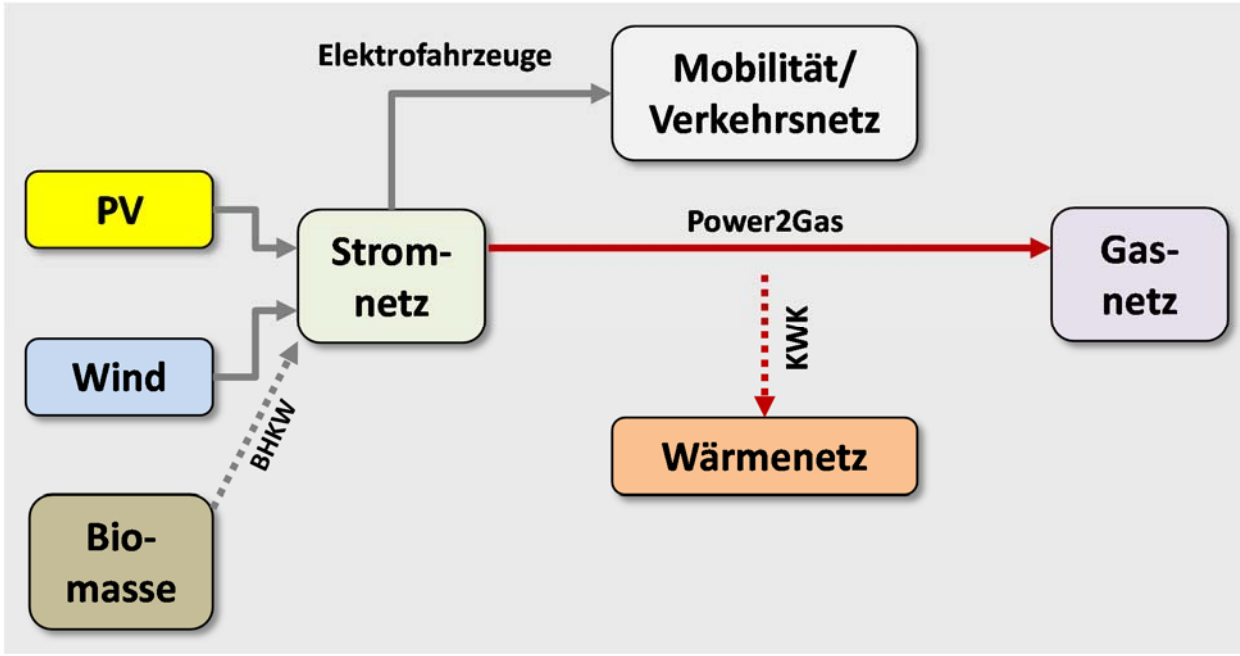
Power-to-Gas:

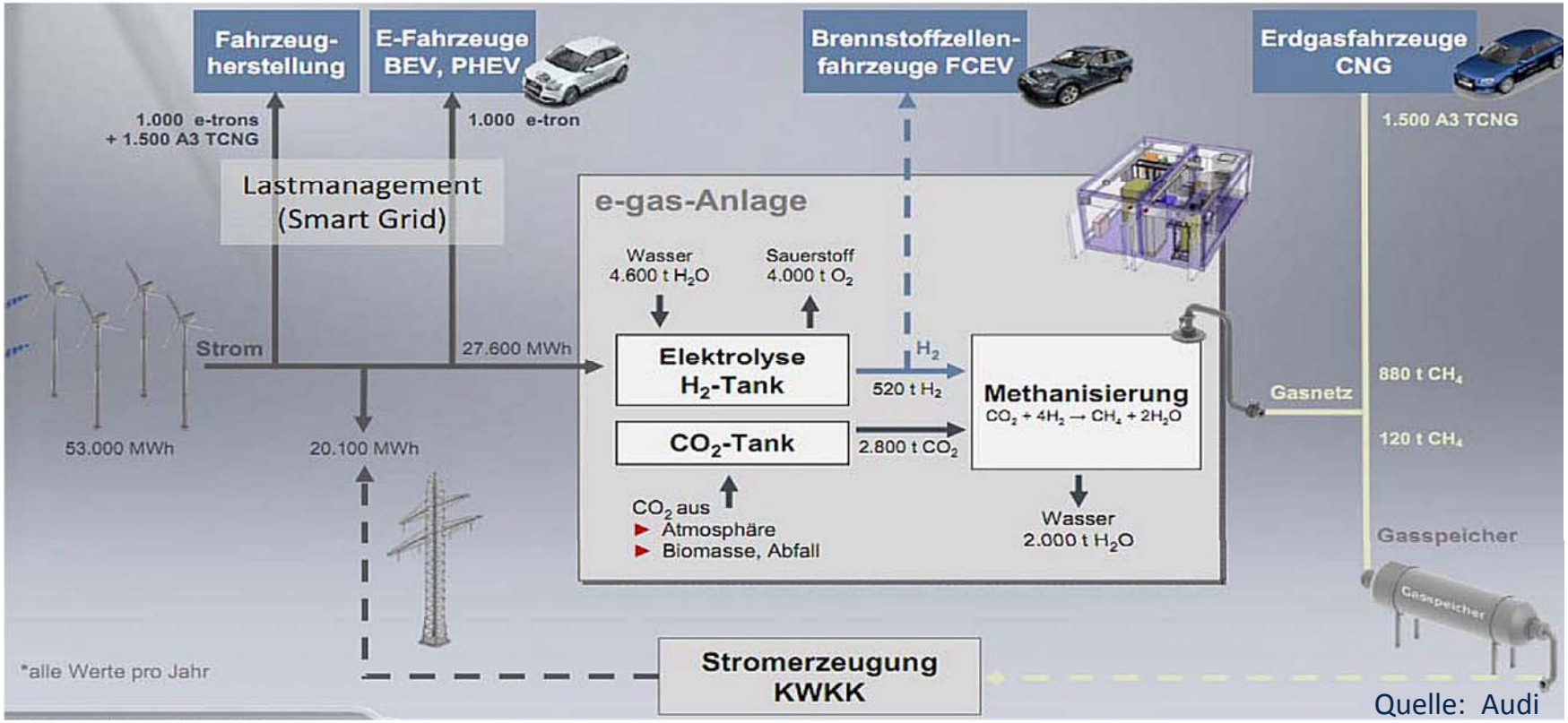
➔ Elektrolyse/Methanisierung

➔ Erdgasnetz als Langzeitspeicher (217TWh)

➔ Abwärmenutzung

#5: Audi e-gas-Projekt in Werlte





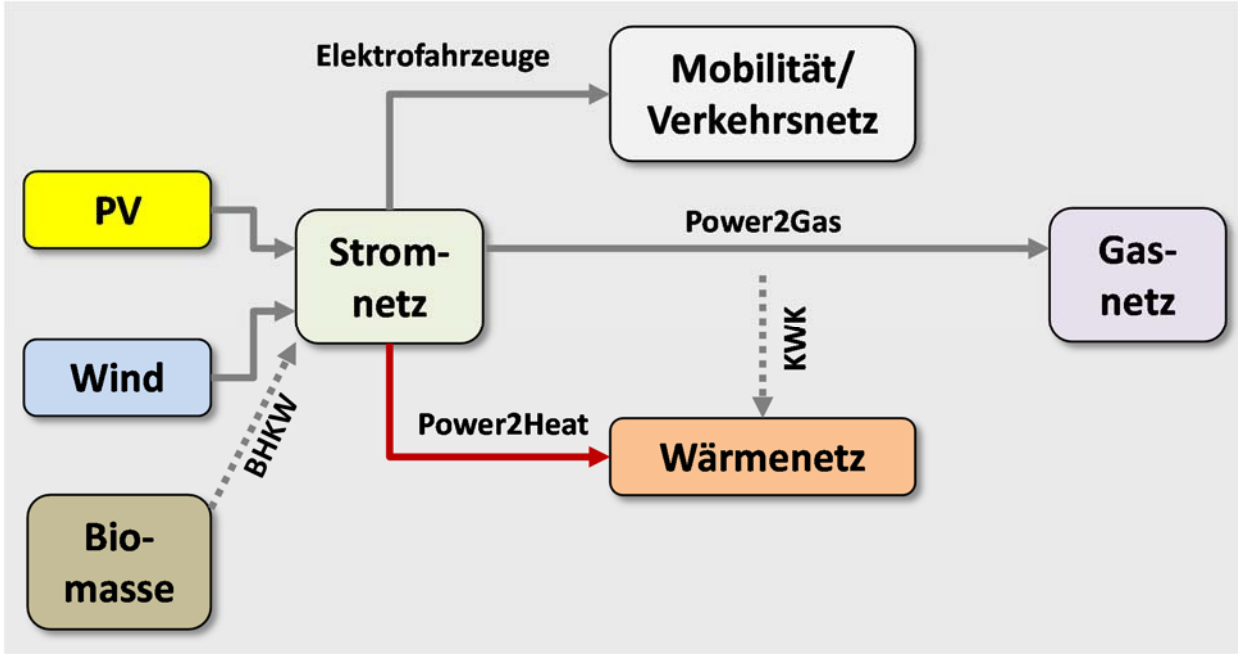
Quelle: Audi

Power-to-Heat:

➔ Wärmepumpe und Langzeitwärmespeicher

#7: „Marstal SUNSTORE 4“

(Volumen: 75000m³, ca. 6,7GWh, Temp.: 10-90°C, Kosten: 2,65 M€, spez. Energiekosten: 0,373€/kWh

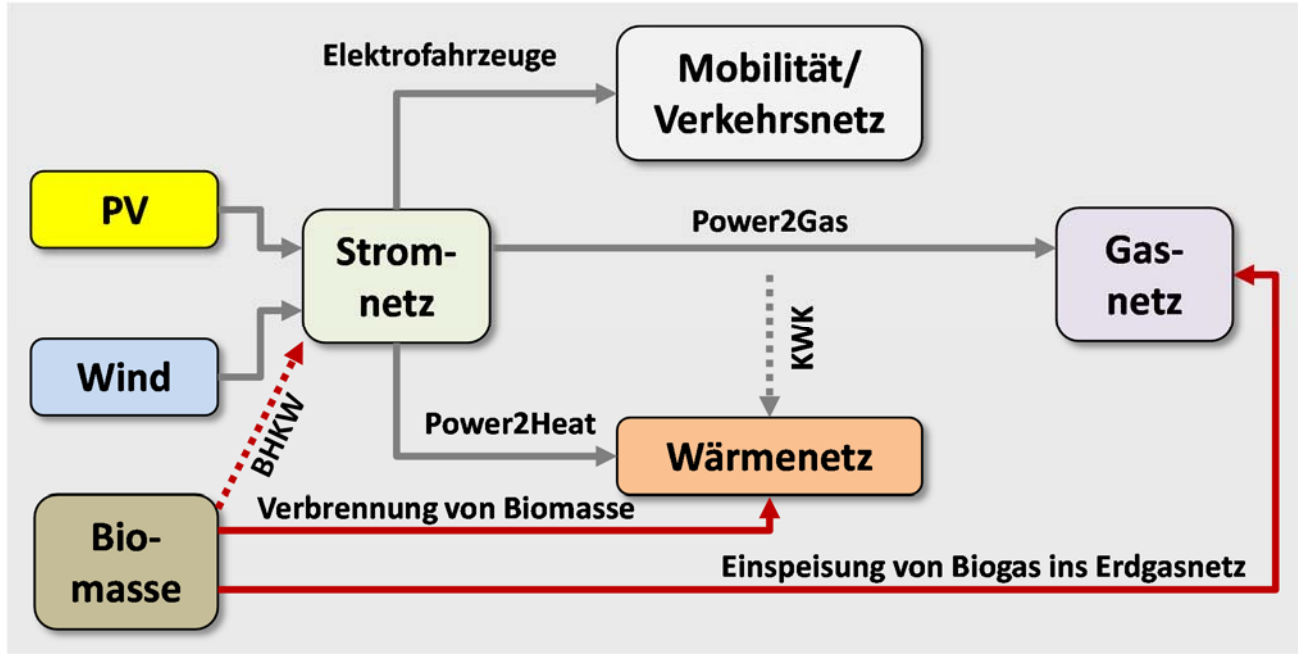


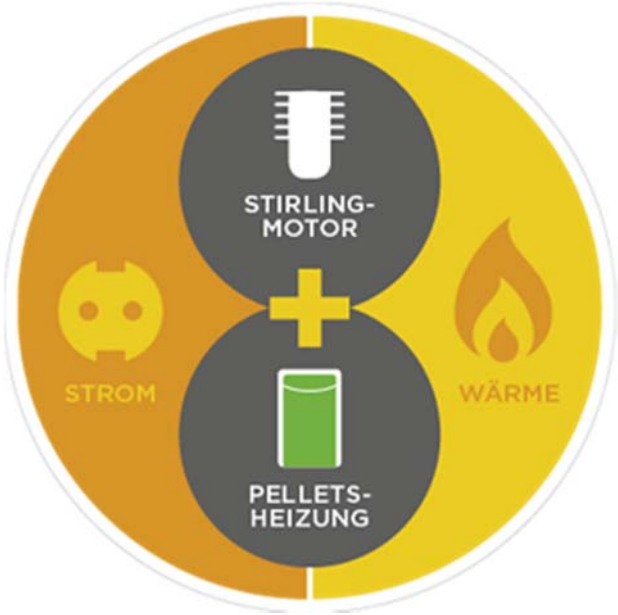
Quelle: nach Sørensen, IRES2013

Biomasse:

➔ strom- und wärmegeführte Blockheizkraftwerke auf Basis von Biomasse

#8: Ökofen Pelletsheizung (Stirlingmotor, Pel=1kW, Pth=14kW, 600l Schichtspeicher)



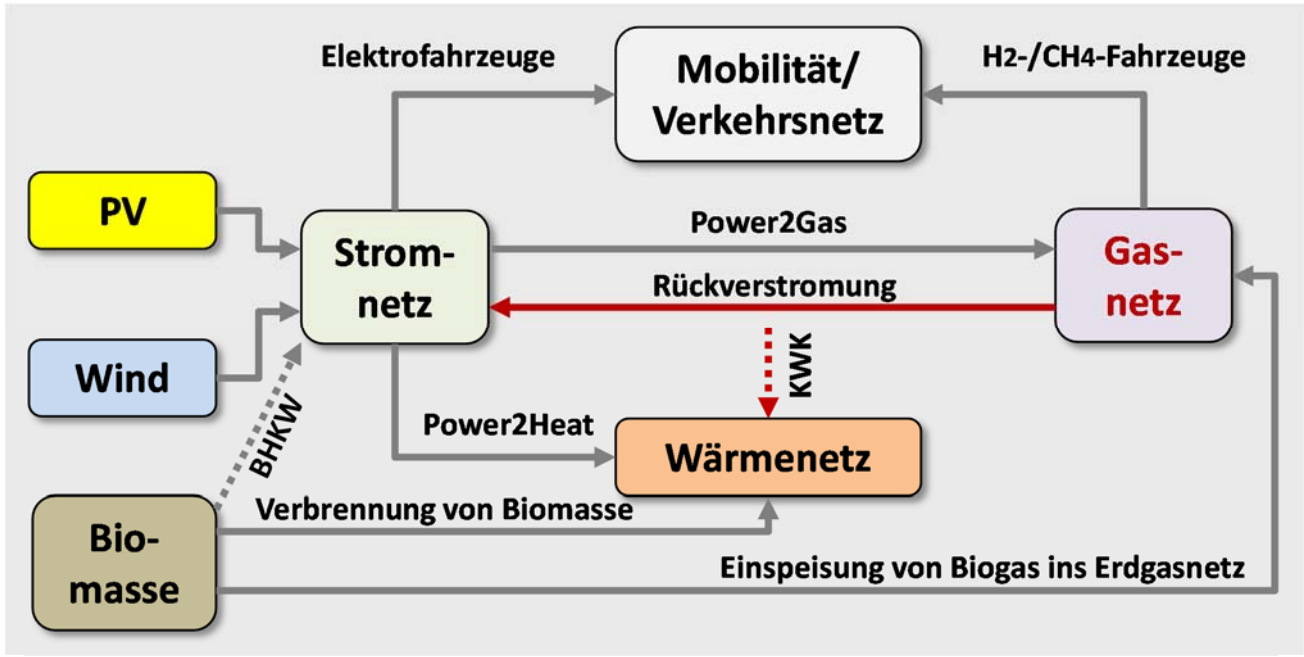


Quelle: Ökofen

Gas-to-Power:

➔ Rückverstromung von langzeitgespeichertem Wasserstoff und Methan + Abwärmenutzung

#9: Brennstoffzellenheizgeräte (Callux-Projekt)



Hersteller	Buderus	Elcore	HEXIS	Junkers	SenerTec	SOLIDpower	SOLIDpower	Vaillant	Viessmann
Typ	SOFC	HAT-PEM	SOFC	SOFC	NT-PEM	SOFC	SOFC	SOFC	NT-PEM
Modell	Logapower FC10	Elcore 2400	Galileo 1000N	Cerapower FC10	Dachs Innogen	EnGen-2500	BlueGEN	G6	Vitovalor 300-P
Leistung (el./th.)	0,7/0,62kW	0,3/0,7kW	1,0/1,8kW	0,7/0,62kW	0,7/0,96kW (modulierend)	2,5/2kW	1,5/0,61kW	0,8/1,5kW	0,75/1kW
Wirkungs-grad (el.)	45%	32%	35%	45%	37% (Vollast)	50%	bis zu 60%	33%	37%
Wirkungs-grad (ges.)	85%	104%	95%	85%	90%	90%	bis zu 85%	92%	90%

Quelle: NOW

Überblick

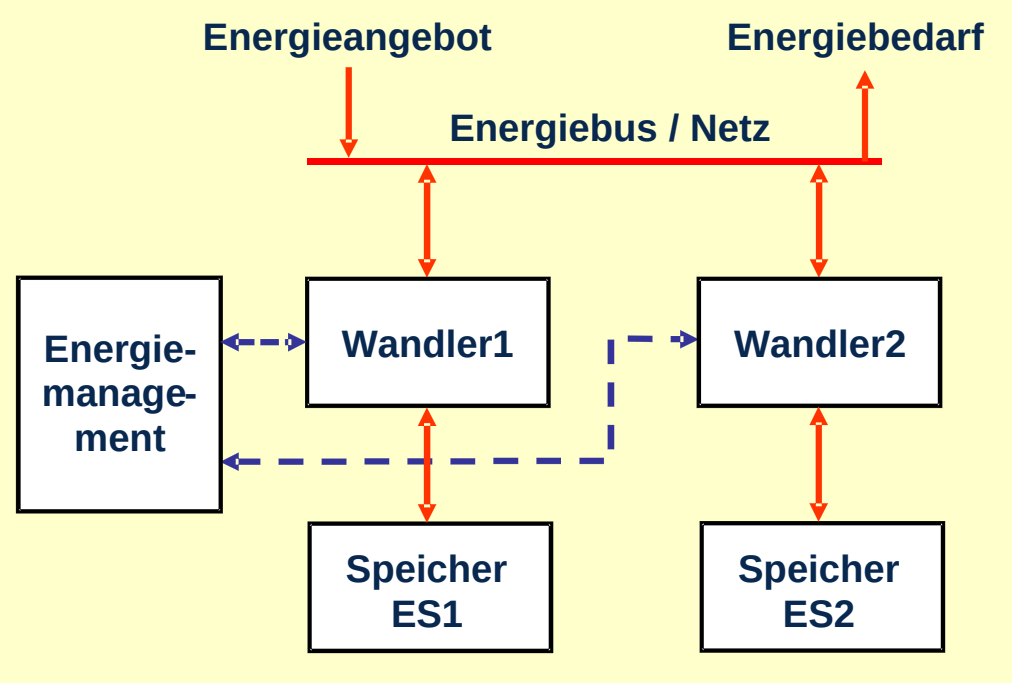
1. Motivation
2. Dezentrale Sektorkopplung
3. **Hybride Energiespeichersysteme**
4. Organisatorisches zum Ablauf des Workshops

Vergleich der Kennwerte von Energiespeichertechnologien (Anlagenebene)

	DSK	SMES	SRS	Pump-speicher	Druckluft-speicher	Blei-Batterie	Li-Ionen-Batterie	NaS-Batterie	Flow-Batterie	Wasser-stoff	Power-to-Gas
Speicherdauer	Sekunden bis Minuten			Stunden bis Wochen						Wochen bis Monate	
typ. Kapazität	Wh bis kWh			MWh bis GWh		kWh bis GWh				MWh bis TWh	
Energiedichte (Wh/l)	2-20	0,5-10	20-200	0,27-1,5	3-6	50-100	200-350	150-250	20-70	500-2500	1500-4000
Leistungsdichte (W/l)	15000-50000	1000-5000	5000-15000	0,5-1,5	0,5-2	10-500	10-350	140-180	<2	-	-
Zyklenwirkungs-grad (%)	77-83	80-90	80-95	75-82	60-70	70-75	80-85	68-75	70-80	34-40	30-35
Selbstentladungs-rate (%/Tag)	≈10-20	10-15	70-100	0,005-0,02	0,5-1	0,1-0,4	0,1-0,3	≈10	0,1-0,4	0,003-0,03	0,003-0,03
Zugriffszeit (ms)	<10	1-10	>10	>180000 (3min)	180000-300000	3-5	3-5	3-5	>1000	≈300000 (10min)	≈300000 (10min)

Kosten pro kWh	sehr hoch	niedrig	mittel	sehr niedrig
Kosten pro kW	niedrig	hoch	niedrig bis mittel	sehr hoch

Grundstruktur eines hybriden Energiespeichersystems



➔ **“Hochleistungsspeicher” ES1**

- hohe Leistungsdichte (pro Kosten)
- hohe Zyklenlebensdauer
- niedrige Zugriffszeit
- hoher Wirkungsgrad

➔ **“Hochenergiespeicher” ES2**

- hohe Energiedichte (pro Kosten)
- hoher Wirkungsgrad
- niedrige Selbstentladung
- hohe kalendarische Lebensdauer

Vorteile eines hybriden Energiespeichersystems (HESS):

- **Reduzierung der Gesamtinvestitionskosten** (im Vergleich zu Einzelspeicherlösung) infolge der Entkopplung von Energie und Leistung (ES2 muss nur noch in etwa auf den Mittelwert der Leistung und nicht auf die Spitzenleistung ausgelegt werden)
- **Steigerung der Gesamteffizienz** (durch Betrieb von ES2 in optimierten Arbeitsbereichen mit hoher Effizienz sowie durch Vermeidung dynamischer Verluste)
- **Steigerung der Lebensdauer von Speicher ES2** (optimierter Betrieb von ES2 unter Reduzierung der dynamischen und statischen Beanspruchungen)

Klassen von Betriebsführungsverfahren für (hybride) Energiespeichersysteme:

regelbasiert

optimierungsbasiert

deterministisch

Fuzzy

global

Echtzeit

Zwei-/Mehrpunkt

Lastfolge

Zustands-maschine

konventionell

adaptiv

prädiktiv

Lineare Programmierung

Dynamische Programmierung

Stochastische Dynamische Programmierung

Evolutionäre Algorithmen

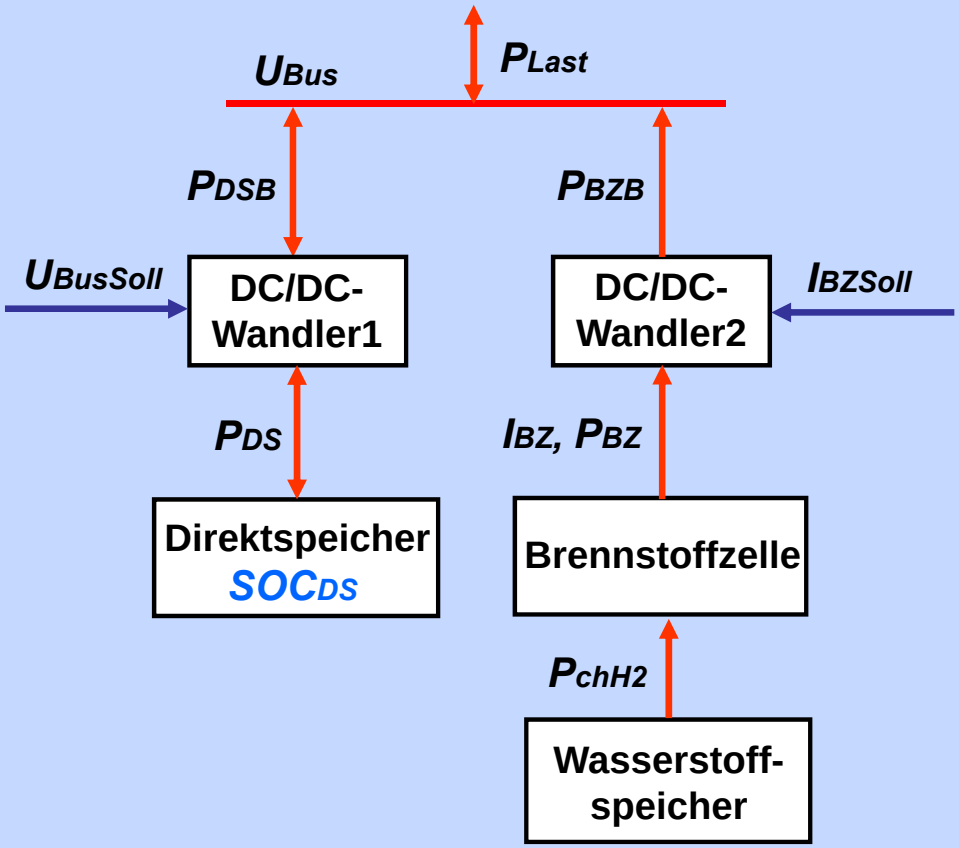
Frequenz Entkopplung

Robuste Regelung

Modell-prädiktive Regelung

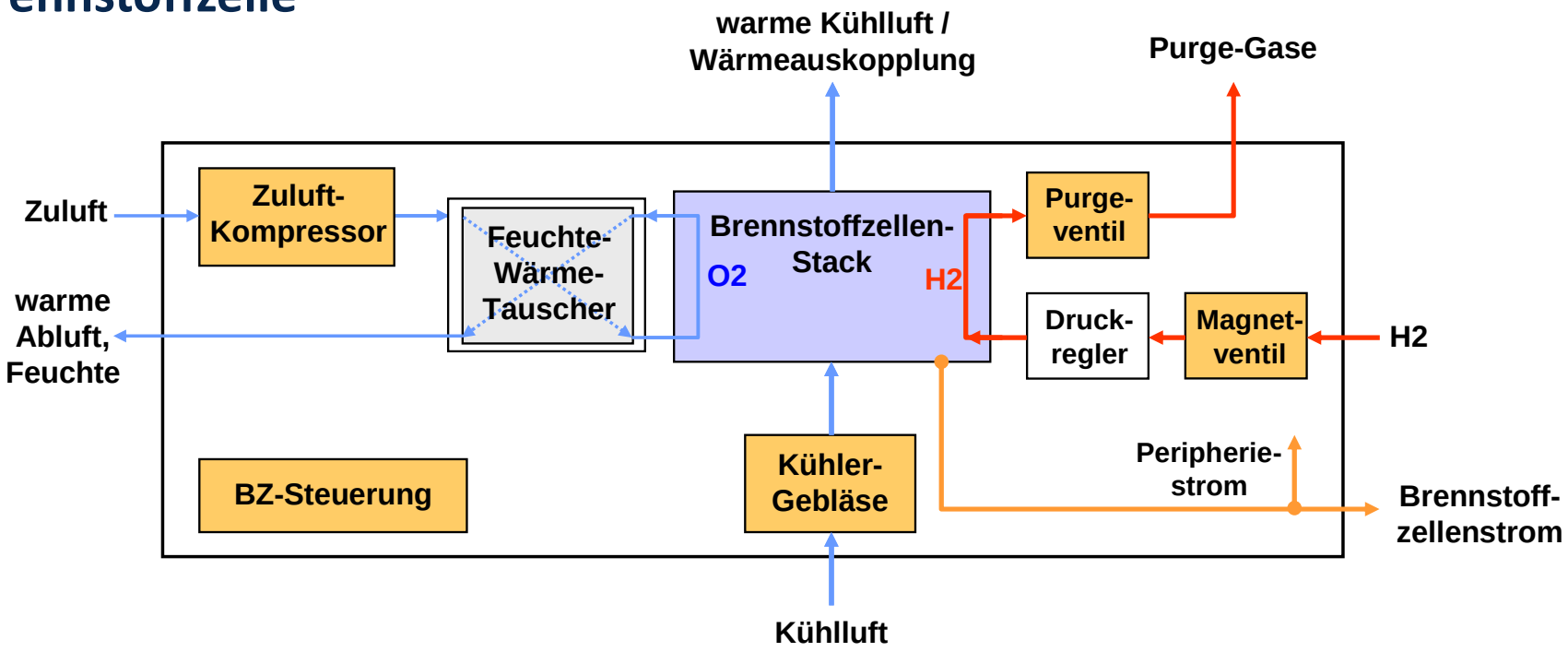
EFC-Minimierung

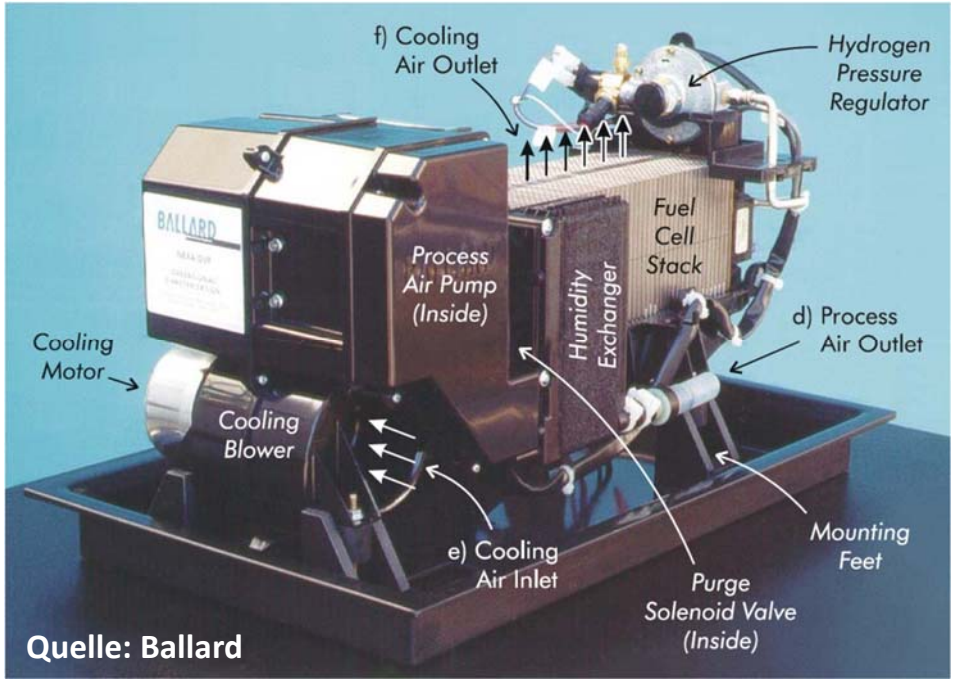
Sekundärregelung



Primärregelung

PEM-Brennstoffzelle





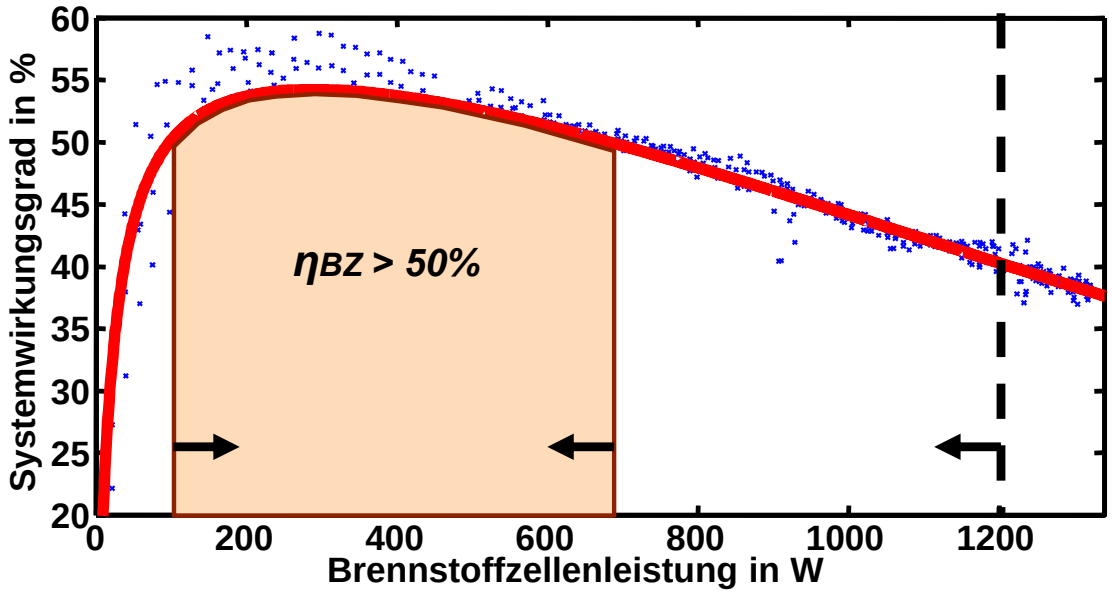
Quelle: Ballard

Problem:

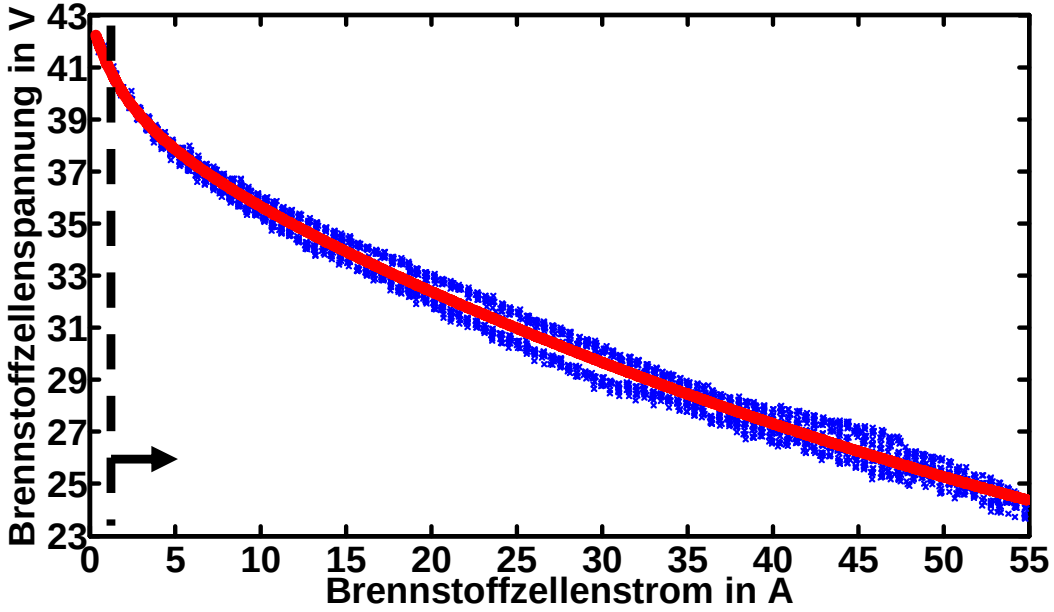
➔ schnelle Änderungen des Brennstoffzellen-stroms führen zur Störung der optimalen Reaktionsbedingungen und zur Reduzierung der Lebensdauer!

➔ Vermeidung durch aktive Beschränkung des Leistungsgradienten im Hybridsystem

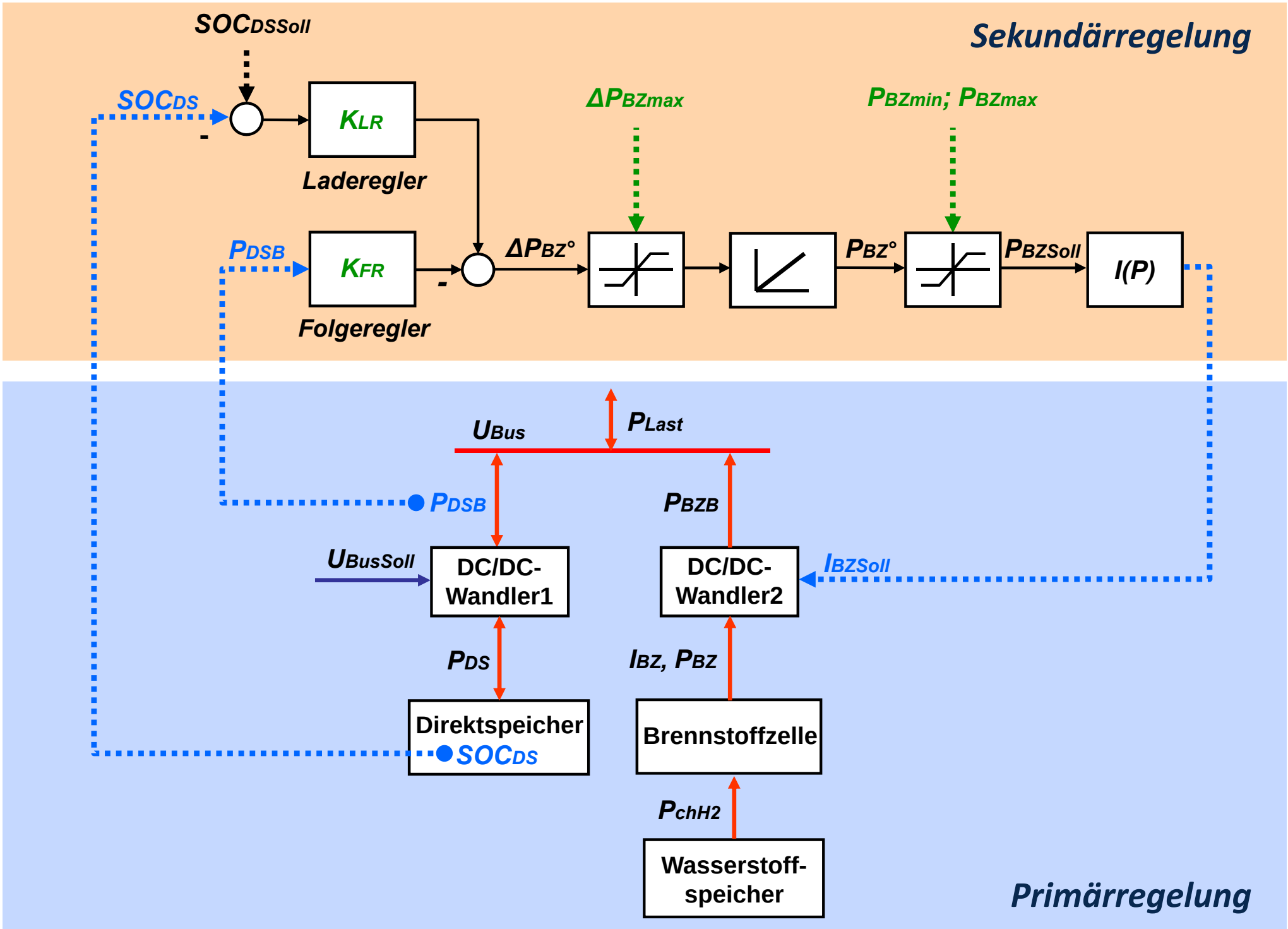
PEM-Brennstoffzelle

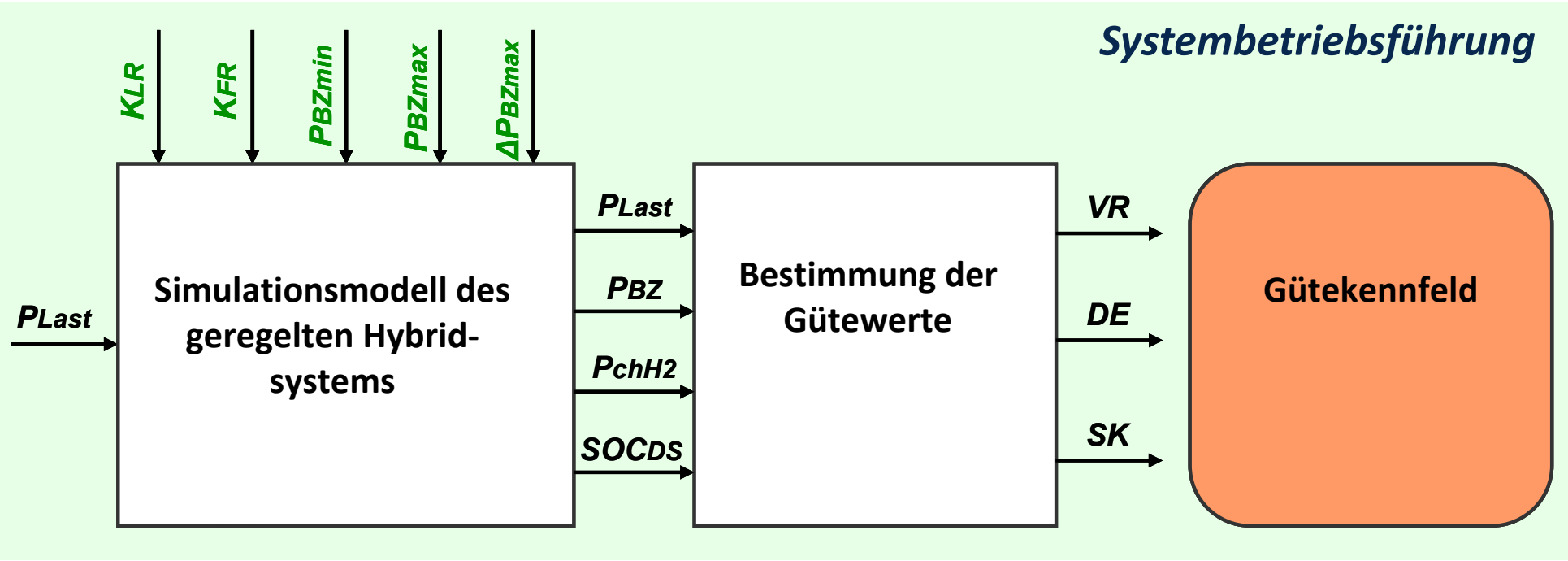


- Wirkungsgrade größer $\eta_{BZ}>50\%$ für $P_{BZ}=100W$ bis $P_{BZ}=700W$
- Spitzenleistung führt zu Alterung
- Beschränkung des Leistungsbereichs im Hybridsystem



- hohe Zellspannungen führen zu Korrosion
- Vermeidung von Extremteillast und häufigen Ein-/Ausschaltens
- spezielle Anforderungen an den DC/DC-Wandler


Sekundärregelung
SOCDSSoll
SOCDS
-
KLR
Laderegler
ΔPBZmax
PBZmin; PBZmax
PDSB
KFR
-
Folgeregler
ΔPBZ°
PBZ°
PBZSoll
I(P)
UBus
PLast
PDSB
PBZB
UBusSoll
DC/DC-Wandler1
DC/DC-Wandler2
IBZSoll
PDS
IBZ, PBZ
Direktspeicher
SOCDS
Brennstoffzelle
PchH2
Wasserstoff-speicher
Primärregelung



Wasserstoff-Verbrauchsreduzierung *VR*:

$$VR = 100\% \cdot \frac{VO - V}{V}$$

$$VO = \int_0^T P_{chH2^*}(P_{Last}(t))dt$$

$$V = \int_0^T P_{chH2}(P_{BZ}(t))dt - SOC_{DS}(T) + SOC_{DS}(0)$$

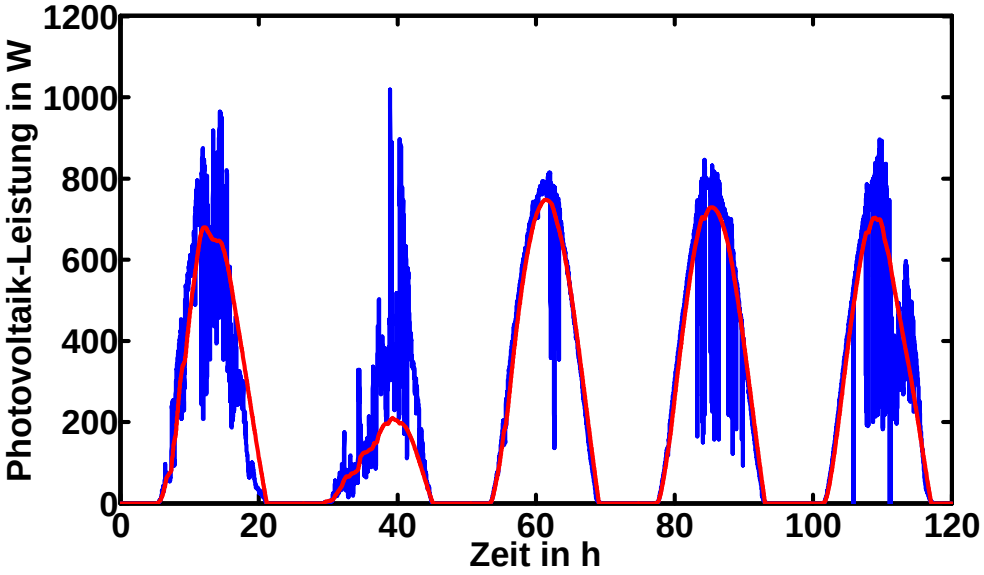
Dynamische Brennstoffzellen-Entlastung *DE*:

$$DE = 100\% \cdot \left(1 - \frac{\int_0^T \left(\frac{dP_{BZ}}{dt}\right)^2 dt}{\int_0^T \left(\frac{dP_{Last}}{dt}\right)^2 dt}\right)$$

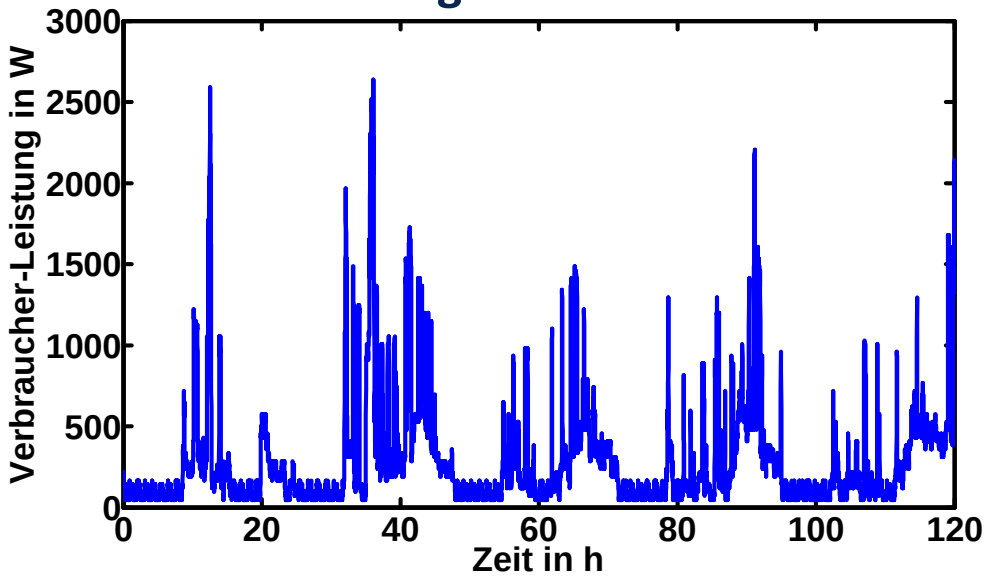
max. benötigte Direktspeicherkapazität *SK*:

$$SK = \max_T(SOC_{DS}(t)) - \min_T(SOC_{DS}(t))$$

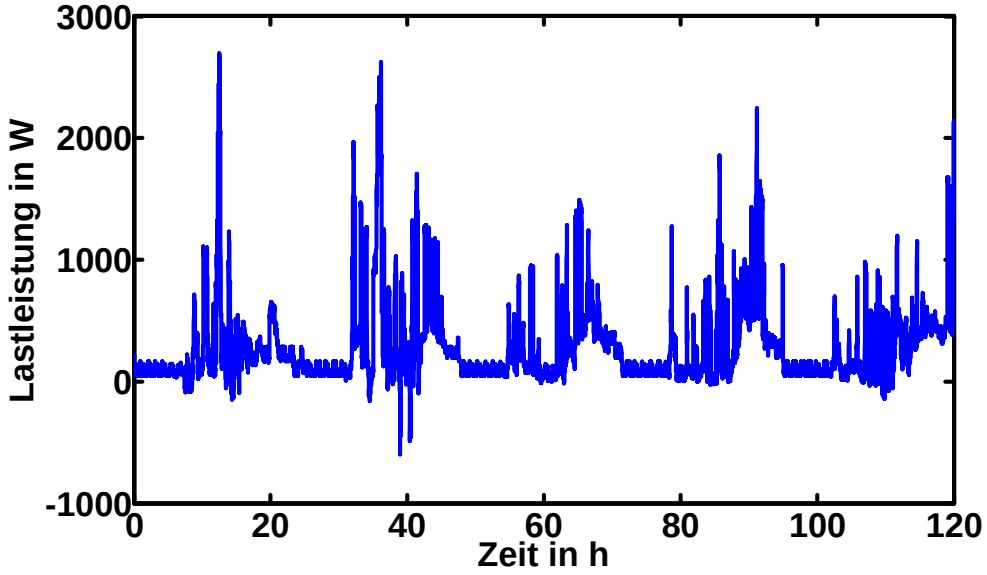
Energieangebot P_{EA}

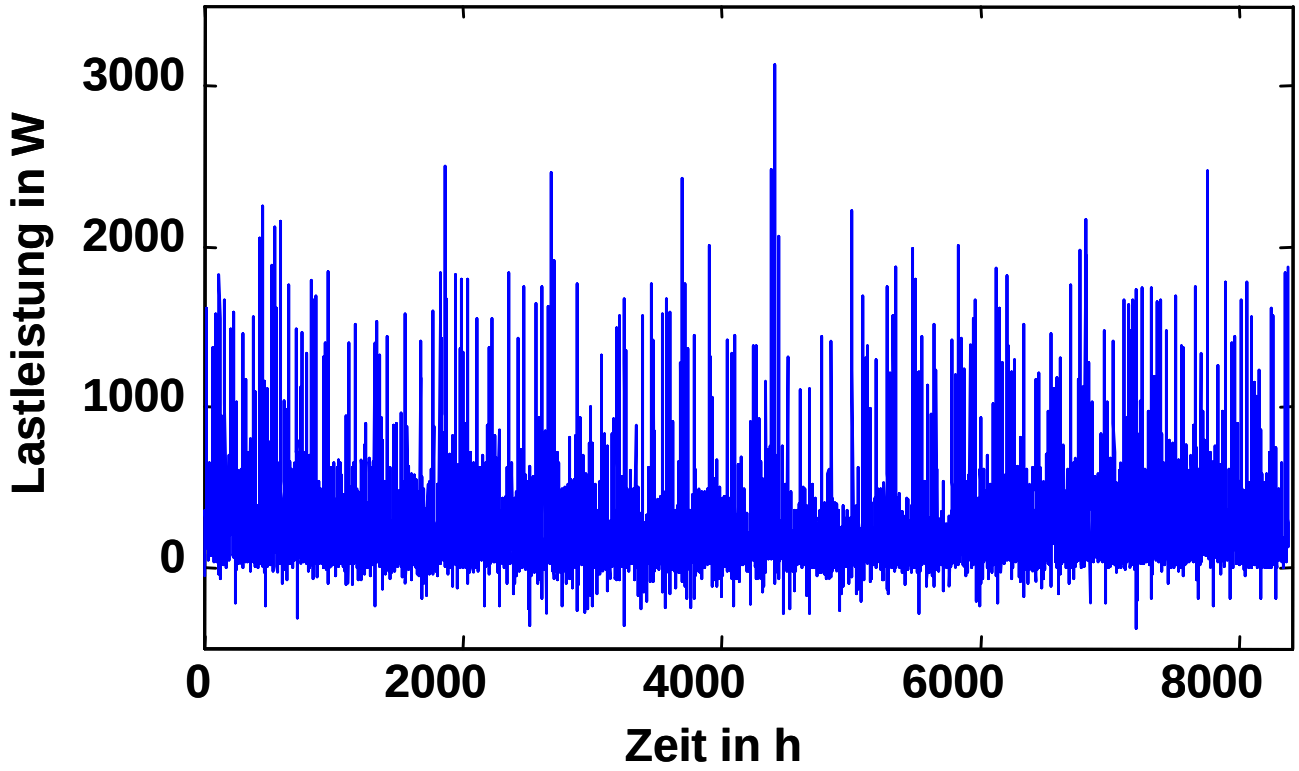


Energiebedarf P_{EB}



resultierende Lastleistung $P_{Last} = P_{EB} - (P_{EA} - Trend(P_{EA}))$

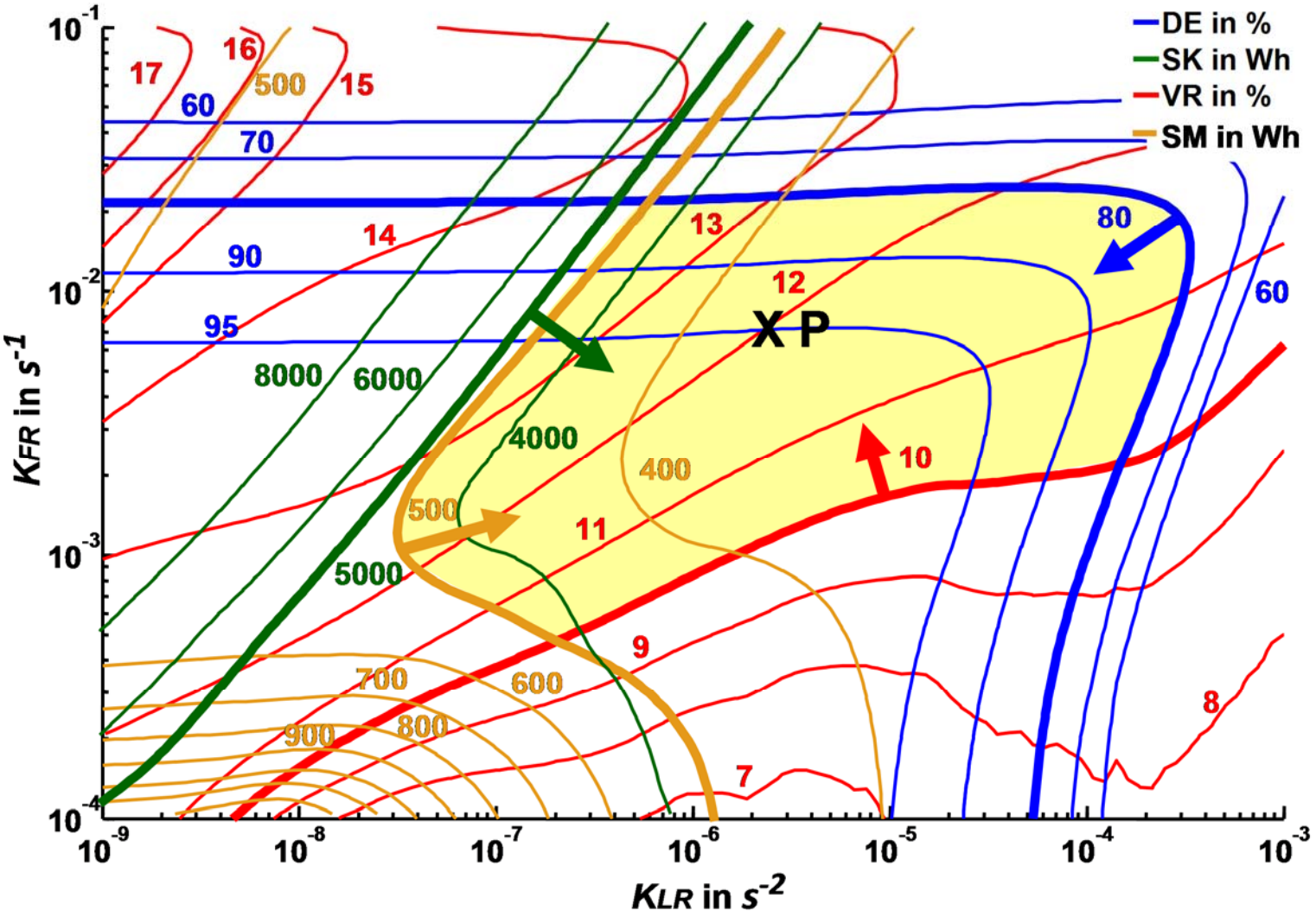




Beispiel:

- ➔ Vorgabe: z.B. $P_{BZmin}=50W$, $P_{BZmax}=700W$ und $\Delta P_{BZmax}=5W/s$
- ➔ Variation von K_{LR} und K_{FR} (z.B. für 100 Stufen, 10000 Variationen)
- ➔ Simulation der Leistungsflussaufteilung
- ➔ Bestimmung des Gütekennfelds

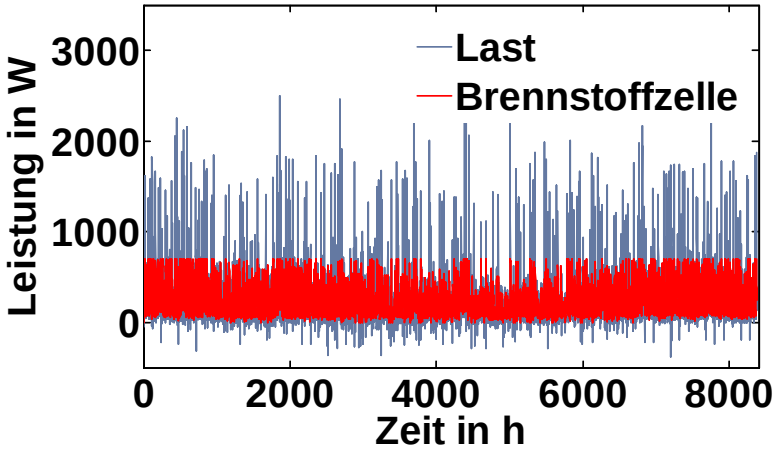
➔ Gesamtgütekennfeld für: VR>10%, DE>80%, SK<5000Wh, SM<500Wh

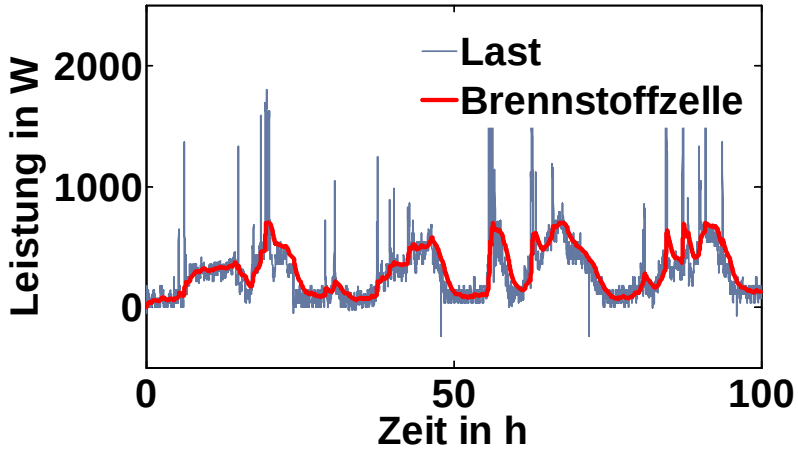


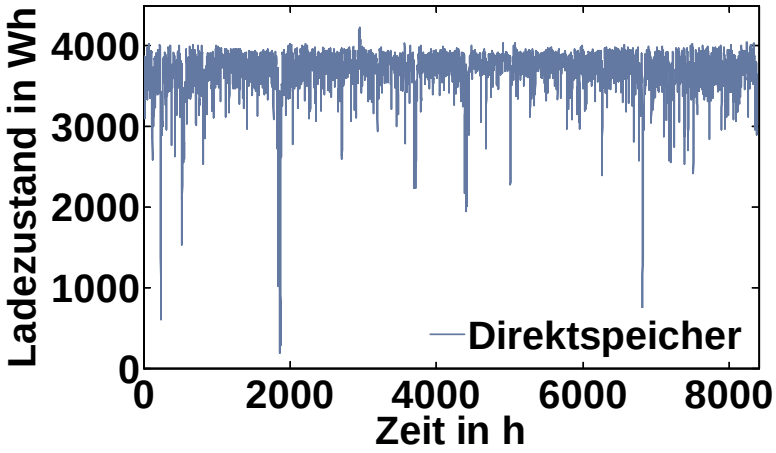
➔ optimale Sekundärregelungs-Parameter im Arbeitspunkt P:

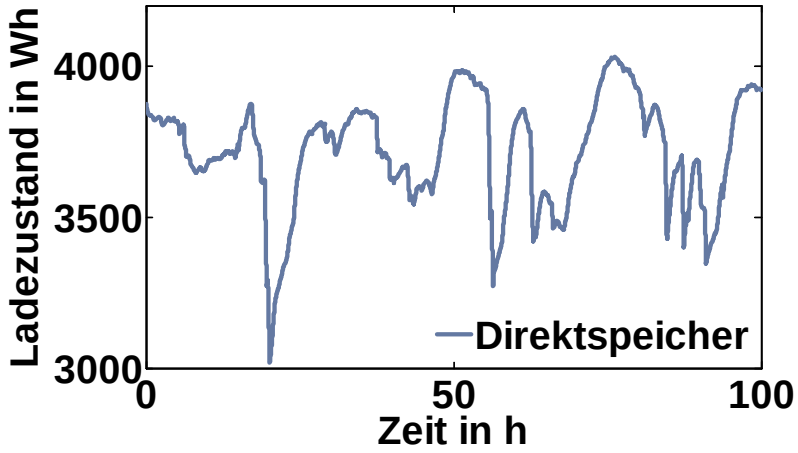
K_{LR}	K_{FR}	P_{BZmin}	P_{BZmax}	ΔP_{BZmax}
$2.24*10^{-6}s^{-2}$	$6.52*10^{-3}s^{-1}$	50W	700W	5W/s

➔ optimierte Leistungsflussaufteilung zwischen Brennstoffzelle und Direktspeicher:









➔ erzielte Verbesserungen durch neues optimierendes Energiemanagement:

H_2-Verbrauchsreduzierung	dyn. Brennstoffzellen-Entlastung	max. Speicherkapazität
12%	95%	3885Wh

Überblick

1. Motivation
2. Dezentrale Sektorkopplung
3. Hybride Energiespeichersysteme
4. **Organisatorisches zum Ablauf des Workshops**

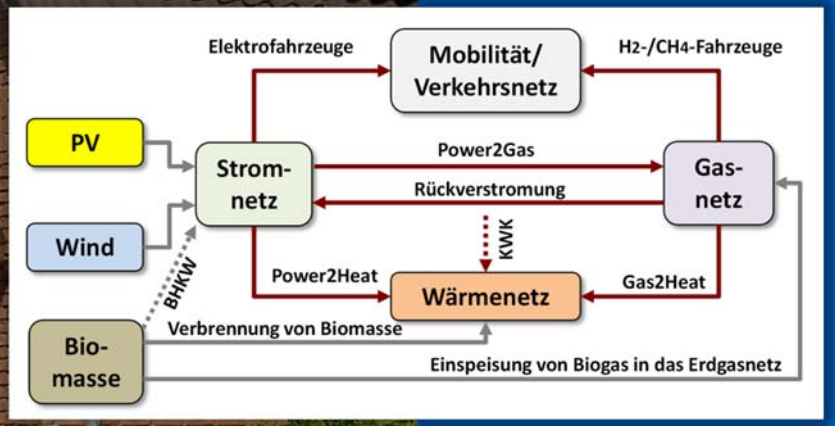
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

1. Herbstworkshop der Professur für Energiespeichersysteme

Dezentrale Sektorkopplung und hybride Energiespeichersysteme

15.11.2016

9:15 – 17:30 Uhr



CSSI combined storage systems INTEGRATION

DRESDEN concept

9:15 Uhr – 11:00 Uhr: Block1 – Einführung

- Begrüßung und Überblicksvortrag, Prof. Thilo Bocklisch, TU Dresden
- Modellierung und Simulation moderner Batteriespeichersysteme und hybrider Energiespeicher-Topologien, Prof. Andreas Jossen, TU München
- Regelung und Betriebsführung von PV-Wind-Diesel-Hybridsystemen mit leistungsoptimierten Energiespeichern, Prof. Antonio Notholt, HS Reutlingen
- M5BAT – Hybridbatteriespeicher in der Praxis, Tjark Thien, RWTH Aachen

11:15 Uhr – 13:00 Uhr: Block2 – Hybride Energiespeichersysteme

- Hierarchische Betriebsführung für hybride Energiespeicher-Systeme, Steffen Nicolai, Fraunhofer IOSB/AST, Ilmenau
- Fuzzy-Regelung für das Energiemanagement eines hybriden Energiespeichersystems, Lisa Franziska Gerlach, TU Dresden / TU Chemnitz
- Auslegungsverfahren für autarke PV-Batterie-Wasserstoff-Hybridsysteme mittels Partikel-Schwarm-Optimierung, Martin Paulitschke, TU Dresden
- Wirtschaftlich-technische Systemanalyse für Batteriespeicher in stationären Anwendungsfällen, Dr. Holger Hesse, TU München

13:45 Uhr – 15:15 Uhr: Block3 - Energiespeicherkomponenten

- Modellierung und Ladezustandschätzung für Lithium-Ionen-Batterien, Dr. Ralf Bartholomäus, Fraunhofer IVI, Dresden
- Wasserstoffgeneration mittels PEM-Elektrolyse zur Energiespeicherung, Dr. Arne Fallisch, Fraunhofer ISE, Freiburg
- Potenzialanalyse zu Erzeugung und Bedarf von Grünem Wasserstoff aus Power-to-Gas für die Sektorkopplung in der mitteldeutschen Chemieregion, Prof. Hartmut Krause, TU Bergakademie Freiberg

15:30 Uhr – 17:00 Uhr: Block4 – PV-Batteriespeichersysteme

- Wärmewende – Wärmepumpen und der Einfluss von PV-Batteriespeichern auf einen netzdienlichen Betrieb, Tjarko Tjaden, HTW Berlin
- Das Projekt SmartPowerFlow - Netzdienlicher und wirtschaftlicher Betrieb von Batterien in Verteilnetzen, Matthias Resch, RLI, Berlin
- Verfahren zur erweiterten, mehrkriteriell-optimierenden Betriebsführung von PV-Batteriespeichersystemen, Michael Böttiger, TU Dresden

15. November 2016

1. Herbstworkshop

„Dezentrale Sektorkopplung und hybride Energiespeichersysteme“

Prof. Dr.-Ing. Thilo Bocklisch
Professur für Energiespeichersysteme

E-Mail: thilo.bocklisch@tu-dresden.de Tel.: +49 351 463-40270

DRESDEN concept
Exzellenz aus Wissenschaft und Kultur