



Welcher Speicher löst mein Problem? Ein Ansatz zur Technologieauswahl und Dimensionierung

Astrid Bensmann, Richard Hanke-Rauschenbach

Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme

Unternehmergespräch Energie, 15. Dezember 2016, Goslar

Gliederung



1. Vorbetrachtungen: Speicherauswahl als komplexe Entscheidungsaufgabe
2. Ansatz zur Technologieauswahl und Dimensionierung

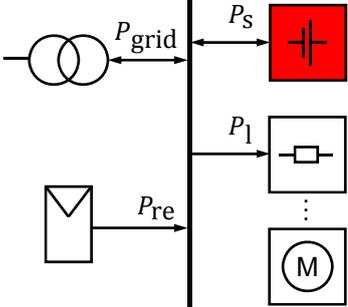
Speichereinsatz in Mikronetzen



Mögliche Ziele für einen Speichereinsatz:

- Begrenzung der Netzbezugsleistung
- Atypische Netznutzung
- Begrenzung der Einspeiseleistung*
- Steigerung der Eigenverbrauchsquote*
- USV-Funktionalität
- ...

(*nur für Systeme mit $P_{re} > 0$)



$$0 \stackrel{!}{=} P_{grid}(t) + P_{re}(t) - P_l(t) - P_s(t) \quad \forall t$$

$P_{grid} > 0$	Netzbezug	$P_s > 0$	Laden
$P_{grid} < 0$	Netzeinspeis.	$P_s < 0$	Entladen

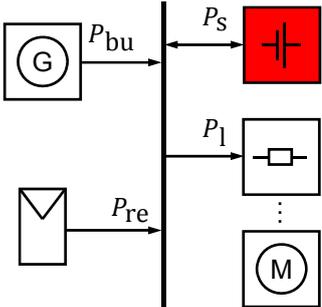
R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 3

Speichereinsatz in netzfernen Anwendungen



Mögliche Ziele für einen Speichereinsatz:

- Vermitteln zwischen Energiedargebot und Bedarf
- Minimierung des Anteils der Arbeit, die durch das Backup-Erzeugersystem erzeugt wird
- Begrenzung der Dimensionierung des Backup-Erzeugersystems
- Einhalten von maximalen Laständerungsgeschwindigkeiten des Backup-Systems
- ...



$$0 \stackrel{!}{=} P_{bu}(t) + P_{re}(t) - P_l(t) - P_s(t) \quad \forall t$$

$P_{bu} > 0$	Erzeugung mittels Backup- System	$P_s > 0$	Laden
		$P_s < 0$	Entladen

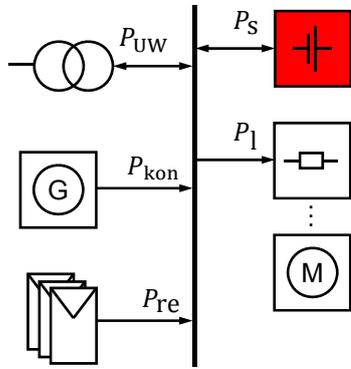
R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 4

Speichereinsatz im öffentlichen Netz



Mögliche Ziele für einen Speichereinsatz:

- Minimierung des Anteils der Arbeit, die durch konventionelle Erzeuger bereitgestellt wird
- Begrenzung der Dimensionierung des konventionellen Erzeugerparcs
- Vermeidung von ungünstigem Teillast-Betrieb der konventionellen Erzeuger
- Einhalten von maximalen Laständerungsgeschwindigkeiten der Erzeuger-Systeme
- Begrenzung der Dimensionierung von Umspannstationen
- ...



R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar

Seite 5

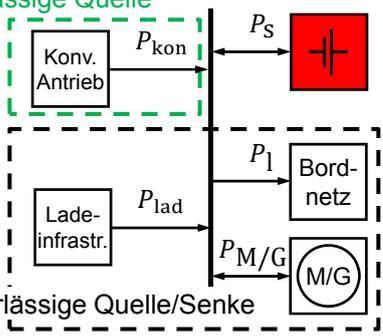
Speichereinsatz in der Elektrotraktion



Mögliche Ziele für einen Speichereinsatz:

- Vermitteln zwischen Energiedargebot (Lademöglichkeiten) und Bedarf
- Rekuperation von Bremsenergie
- Einhalten von Lastfenstern des konv. Antriebs $P_{kon}^{min} \leq P_{kon} \leq P_{kon}^{max}(\tau)$
- Einhaltung von Leistungsgradienten $-\left(\frac{dP_{kon}}{dt}\right)^{down, max} \leq \left(\frac{dP_{kon}}{dt}\right) \leq \left(\frac{dP_{kon}}{dt}\right)^{un.}$
- ...

Zuverlässige Quelle



Unzuverlässige Quelle/Senke

$$0 \stackrel{!}{=} P_{kon}(t) - P_{M/G}(t) - P_l(t) - P_s(t) \quad \forall t$$

$P_{M/G} > 0$ Antreiben	$P_S > 0$ Laden
$P_{M/G} < 0$ Bremsen	$P_S < 0$ Entladen

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar

Seite 6

Verallgemeinerung

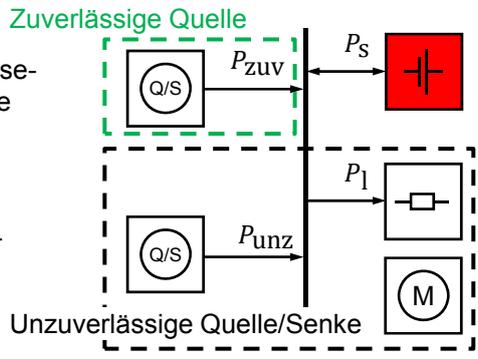


Anreize/Forderungen:

- Begrenzung der Bezugs/Einspeisleistung der zuverlässigen Quelle
- Minimierung des Anteils der bezogenen/eingespeisten Arbeit der zuverlässigen Quelle
- Einhalten von Laständerungsgeschwindigkeiten
- ...

Übergeordnetes Ziel:

- Auswahl einer konkreten Speichertechnologie, Dimensionierung = Treffen einer Investitionsentscheidung



Zuverlässige Quelle

Unzuverlässige Quelle/Senke

$$0 \stackrel{!}{=} P_{\text{zuv}}(t) + P_{\text{unz}}(t) - P_1(t) - P_s(t) \quad \forall t$$

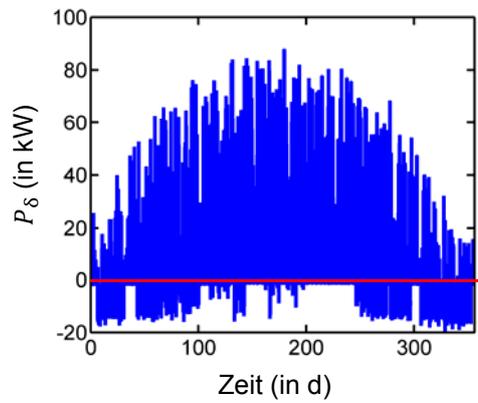
$P_{\text{zuv}} > 0$	Bezug	$P_s > 0$	Laden
$P_{\text{zuv}} < 0$	Einspeisung	$P_s < 0$	Entladen

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 7

Einflussgrößen für die Entscheidungsaufgabe

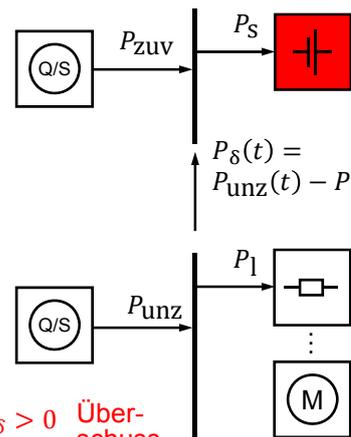


• Lastgang $P_\delta(t) \quad 0 \leq t \leq T$



$P_\delta > 0$ Überschuss

$P_\delta < 0$ Bedarf



$P_\delta(t) = P_{\text{unz}}(t) - P_1(t)$

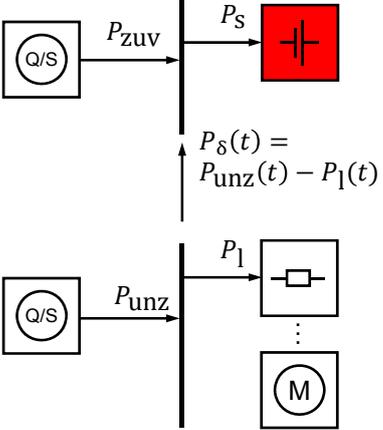
R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 8

Einflussgrößen für die Entscheidungsaufgabe



- Lastgang $P_\delta(t)$ $0 \leq t \leq T$
- Zielsetzung, Betriebsführung, Reglerparameter

$$P_s(t) = C(P_\delta(t), \pi_{\text{contr}})$$



$P_\delta > 0$ Überschuss
 $P_\delta < 0$ Bedarf

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 9

Einflussgrößen für die Entscheidungsaufgabe



- Lastgang $P_\delta(t)$ $0 \leq t \leq T$
- Zielsetzung, Betriebsführung, Reglerparameter
- Technologieparameter π_{tech} →

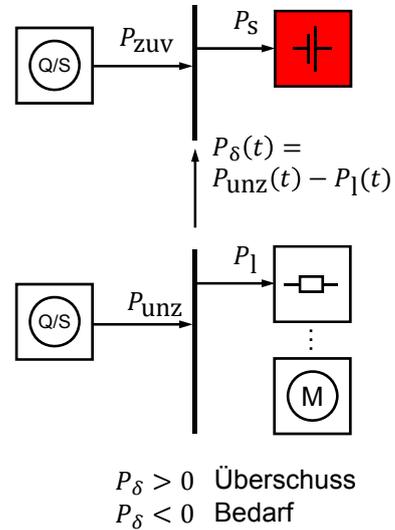
$$P_s(t) = C(P_\delta(t), \pi_{\text{contr}})$$

spez. Investitionskosten
Zykluslebensdauer, kalendarischen Lebensdauer
spez. Betriebskosten
Zusatzkosten
Betriebscharakteristik
zulässiger Betriebsbereich (Spannungslage, Strom, Drehzahl, Drehmoment, Temperatur...)
Energiedichte (volumetrisch, gravimetrisch), ...
gesetzliche Vorschriften, Sicherheitsaspekte

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 10

Einflussgrößen für die Entscheidungsaufgabe

- Lastgang $P_\delta(t)$ $0 \leq t \leq T$
- Zielsetzung, Betriebsführung, Reglerparameter
 $P_s(t) = C(P_\delta(t), \pi_{\text{contr}})$
- Technologieparameter π_{tech}
- anwendungsspezifische Größen (max. Bauvolumen, max. Gewicht, Umgebungsbedingungen, etc.)
- Zinskosten, i (in %/a)
- Anreiz-/Vergütungssystem



Gliederung

1. Vorbetrachtungen: Speicherauswahl als komplexe Entscheidungsaufgabe
2. Ansatz zur Technologieauswahl und Dimensionierung

Übersicht zum Ansatz *dieses* Beitrages

Schrittweises Vorgehen

- **Level 1:** Charakteristisches Diagramm, Maximalspeicher und Vorauswahl
- **Level 2:** Dimensionierung mittels unifiziertem Speichermodell
- **Level 3:** Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Beispielsystem

- Fa. Profiroll Technologies GmbH, Bad Dübren
- Jahresenergieverbrauch $E_l = 4,4 \text{ GWh}$
- Spitzenleistung $P_{\text{grid}}^{\text{max}} = 1,24 \text{ MW}$

20 kV 400 V

P_{grid}

P_s

P_l

Zeit (in d)

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 13

Level 1: Charakteristisches Diagramm

Eingangsgrößen:

- Lastgang $P_\delta(t) \quad 0 \leq t \leq T$
- Betriebsführung (Minimalstrategie) $P_s(t) = C(P_\delta(t))$

$$\longrightarrow P_s(t) = P_{\text{grid}}^{\text{max}} + P_\delta(t) \quad \leftrightarrow$$

$$P_s(t) = P_{\text{grid}}^{\text{max}} - P_l(t)$$

Zeit (in d)

$P_{\text{grid}}^{\text{max}}$

$P_s < 0$
 (Speicher wird entladen)

$P_s > 0$
 (Speicher kann geladen werden)

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 14

Level 1: Charakteristisches Diagramm



Eingangsgrößen:

- Lastgang $P_\delta(t)$ $0 \leq t \leq T$
- Betriebsführung (Minimalstrategie) $P_s(t) = C(P_\delta(t))$

Ansatz: Betrachtungen mittels eines idealisierten Energiemodells (verlustfrei und technologieunabhängig)

- Parameter:
 - Kapazität Q (in kWh)
 - max. Ladeleistung $P_{s,ch}^{\max}$ (in kW)
 - max. Entladeleistung $P_{s,dis}^{\max}$ (in kW)
- Energiebilanz $Q \frac{dF}{dt} = P_s \quad F(t=0) \stackrel{!}{=} F(t=T)$
- Speicher-
management
$$P_s(t) = \begin{cases} P_s^{\text{des}}(t) & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge -P_{s,dis}^{\max} \leq P_s^{\text{des}} \leq P_{s,ch}^{\max} \\ P_{s,ch}^{\max} & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge P_s^{\text{des}} > P_{s,ch}^{\max} \\ -P_{s,dis}^{\max} & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge P_s^{\text{des}} < -P_{s,dis}^{\max} \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases}$$
- Betriebsführung $P_s^{\text{des}}(t) = C(P_\delta(t))$ (Minimalstrategie z. Spitzenlastreduktion)

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 15

Level 1: Charakteristisches Diagramm

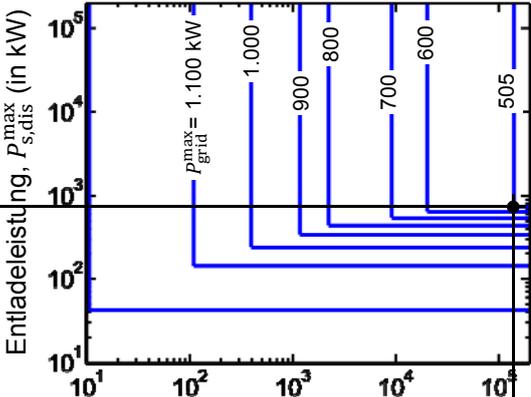


Level 1-Ergebnis für unser Beispiel:

„Fingerabdruck“ des Problems

Maximalspeicher

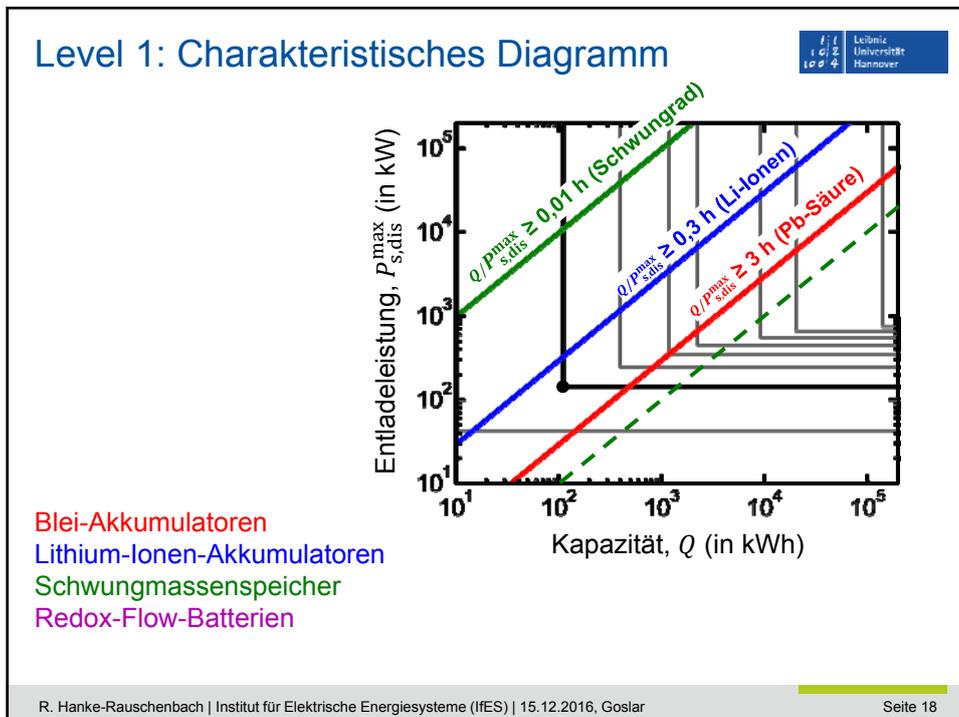
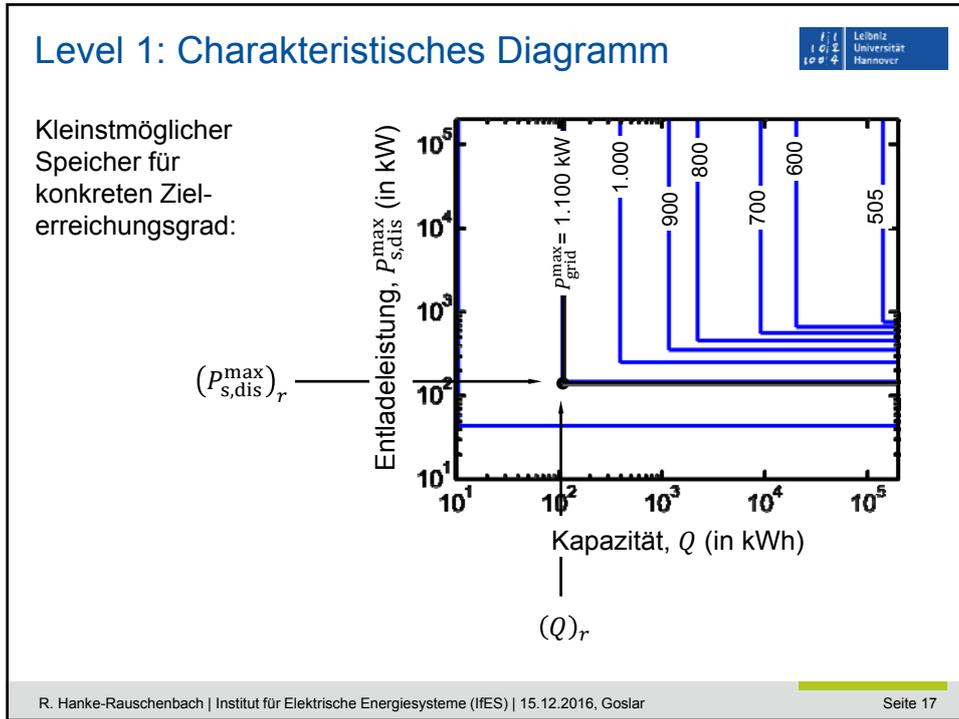
$P_{s,dis}^{\max,*} = 502,5 \text{ kW}$

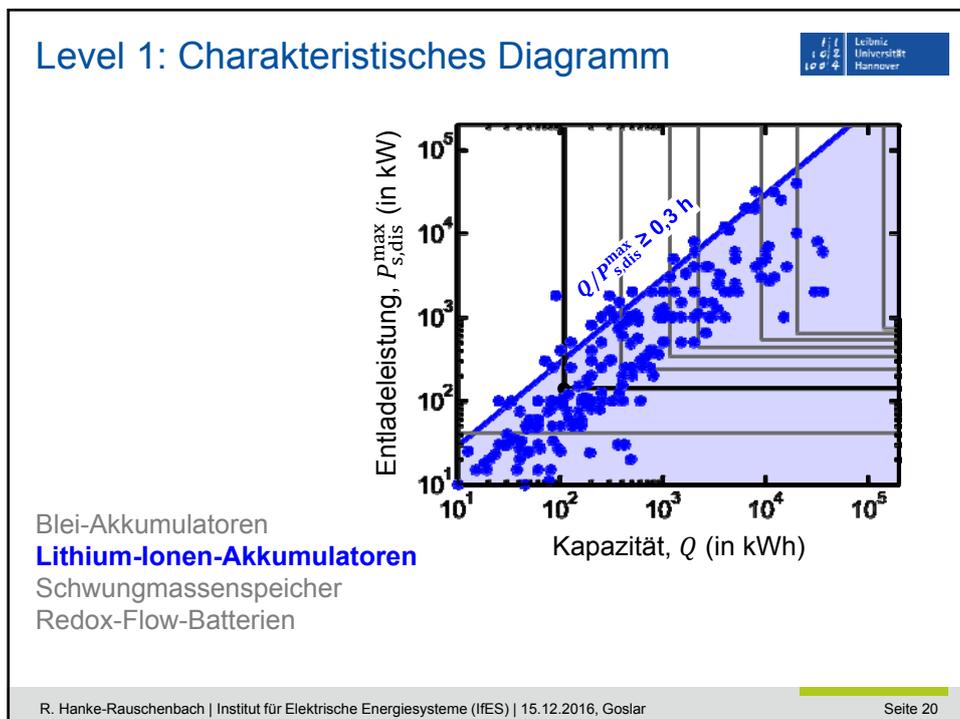
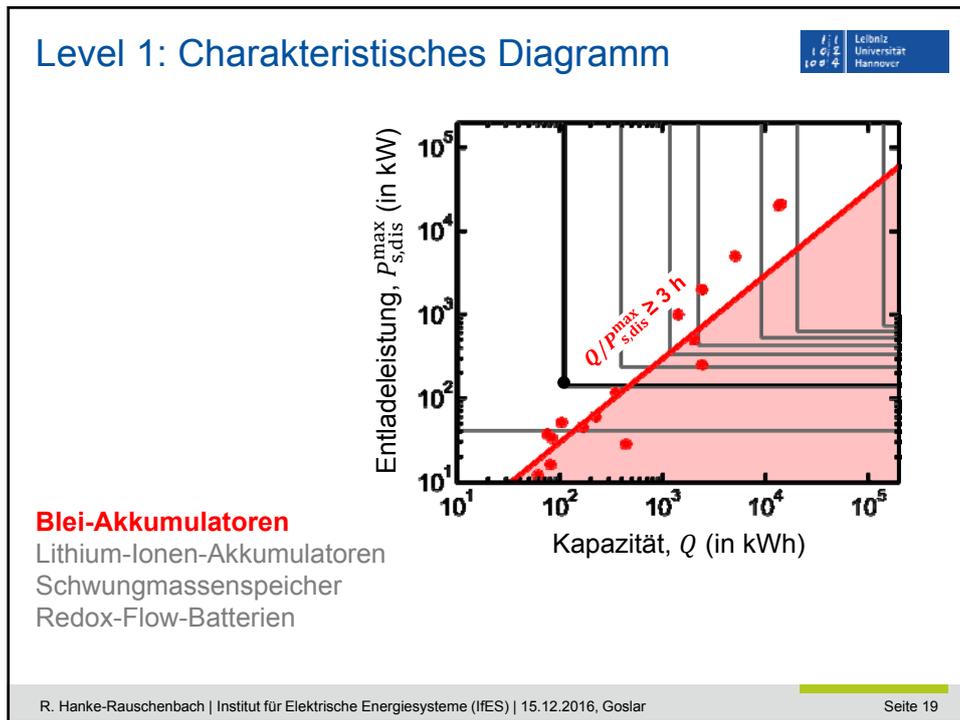


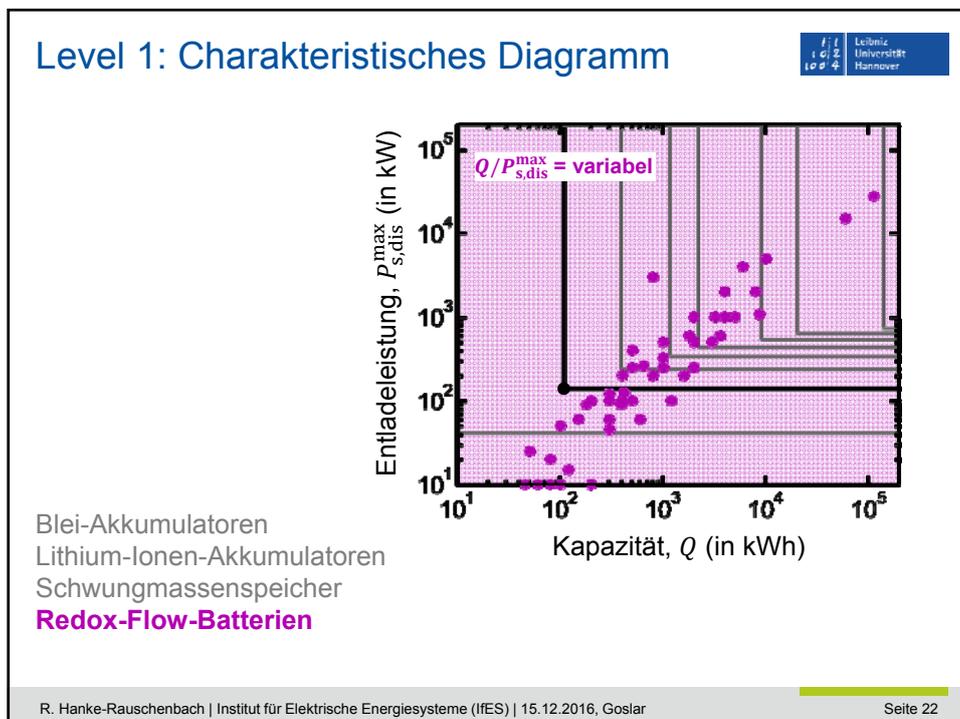
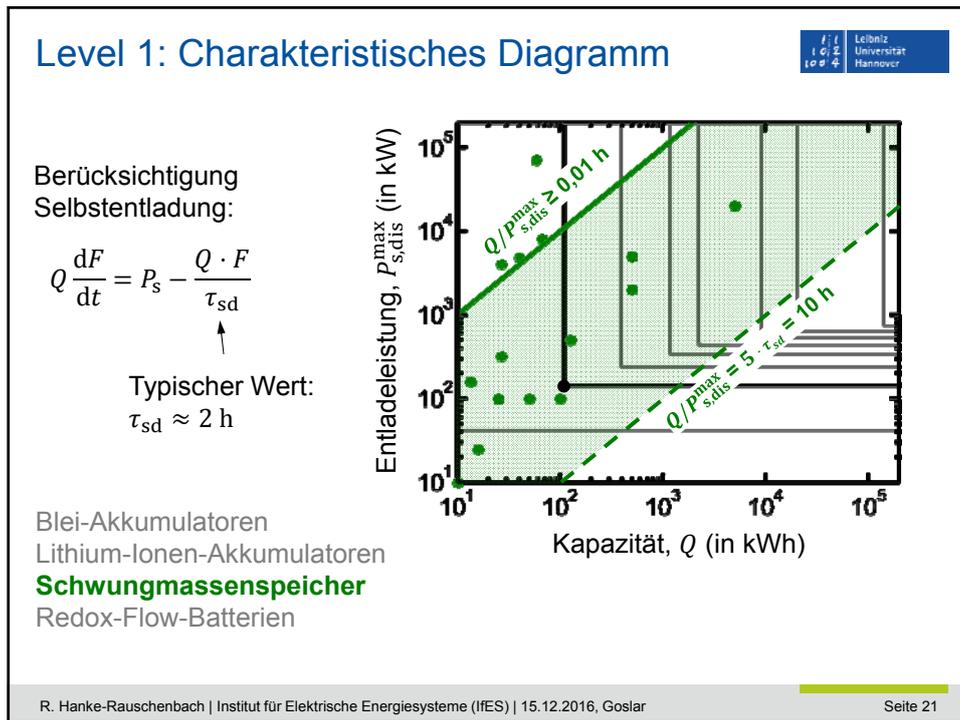
- Minimal mögliche Bezugsleistung $P_{grid}^{\max,*} = 502,5 \text{ kW}$
- Maximal möglicher Erlös $E_a @ P_{grid}^{\max,*} = 73.593 \text{ EUR/a}$ (Leistungspreis 99,50 EUR/kW)

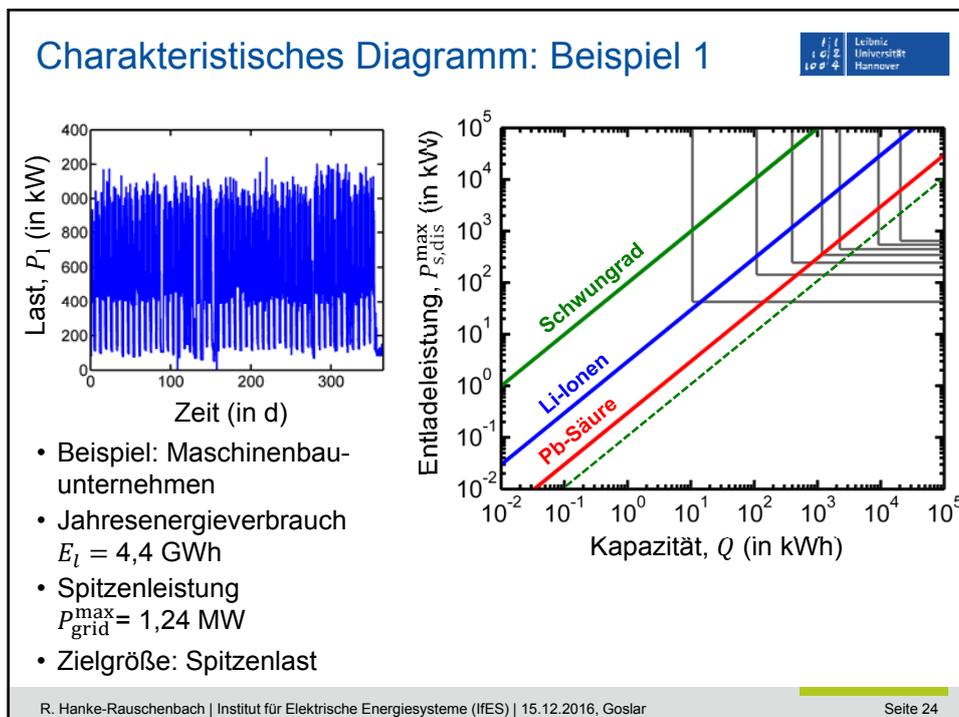
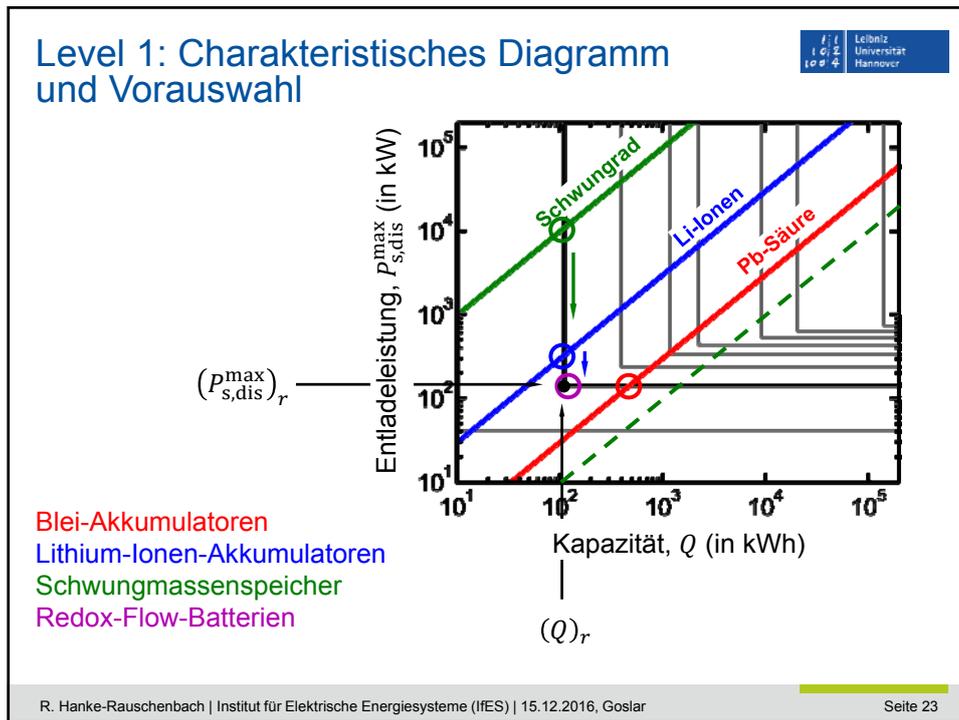
$Q^* = 151.425 \text{ kWh}$

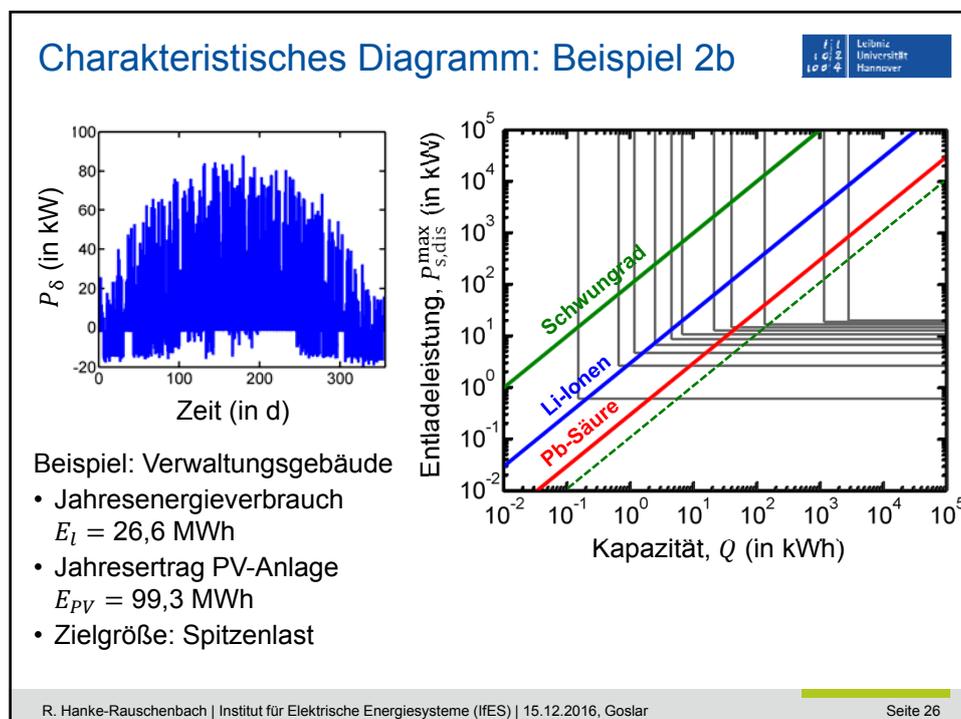
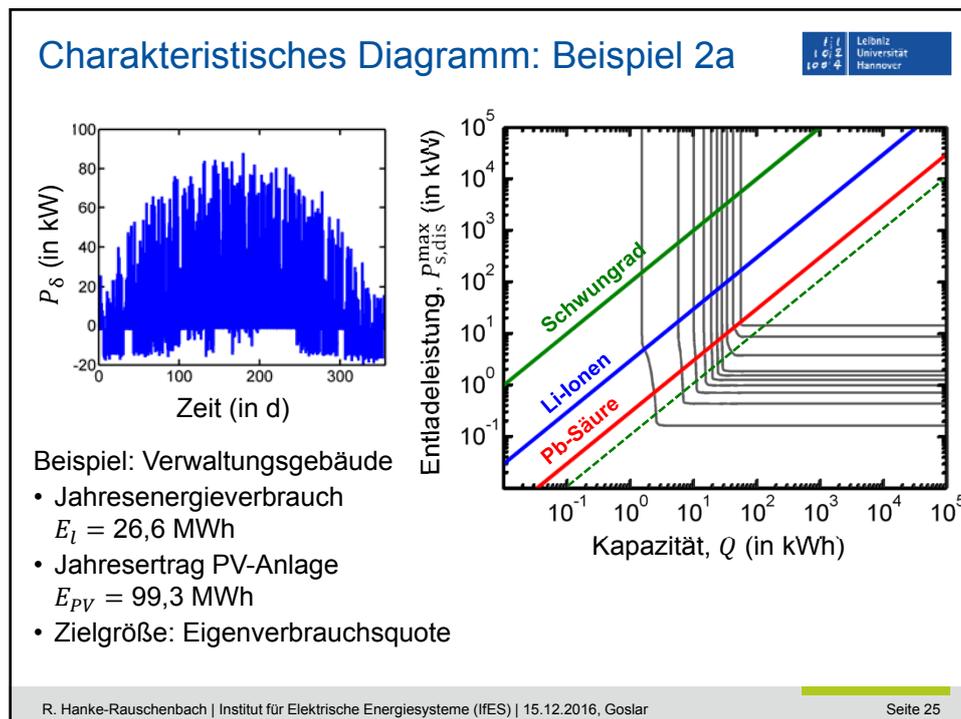
R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 16

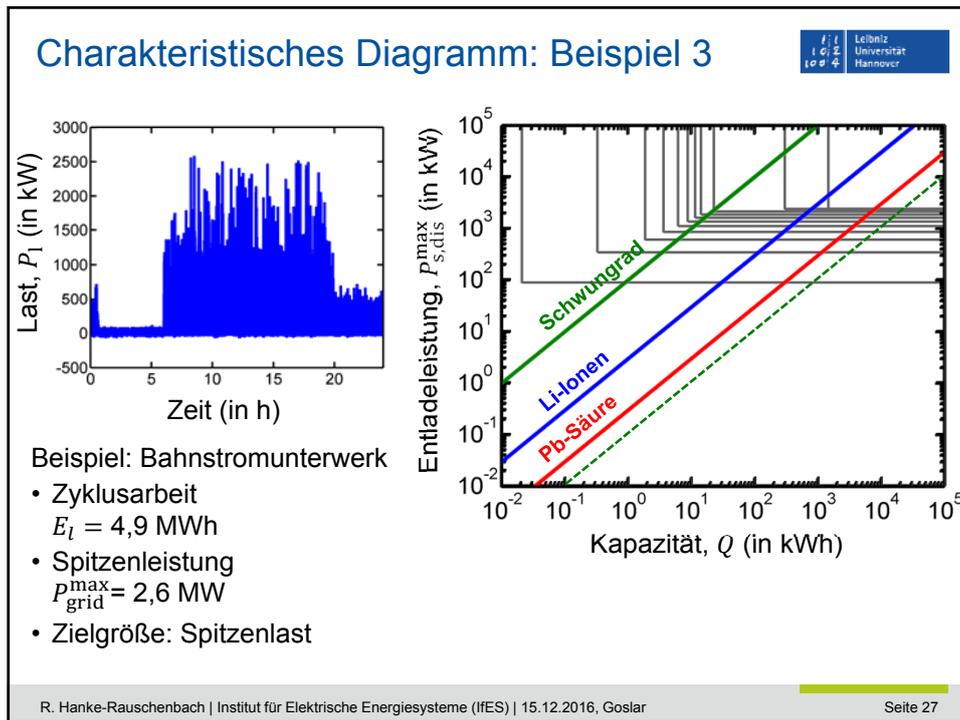












Level 2: Dimensionierung mittels unfiziertem Speichermodell

Ansatz: Verwendung eines unfizierten Speichermodells

- Energiebilanz

$$Q \frac{dF}{dt} = -\frac{Q \cdot F}{\tau_{sd}} + \begin{cases} P_s \cdot \eta_{s,ch} & \text{falls } P_s \geq 0 \\ P_s / \eta_{d,dis} & \text{falls } P_s < 0 \end{cases} \quad F(t=0) \stackrel{!}{=} F(t=T)$$
- Speichermanagement

$$P_s(t) = \begin{cases} P_s^{\text{des}}(t) & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge -P_{s,dis}^{\text{max}} \leq P_s^{\text{des}} \leq P_{s,ch}^{\text{max}} \\ P_{s,ch}^{\text{max}} & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge P_s^{\text{des}} > P_{s,ch}^{\text{max}} \\ -P_{s,dis}^{\text{max}} & \text{falls } 0 \leq F \leq 1 \wedge P_s^{\text{des}} < -P_{s,dis}^{\text{max}} \\ 0 & \text{andernfalls} \end{cases}$$
- Betriebsführung

$$P_s^{\text{des}}(t) = C(P_\delta(t)) \text{ (Minimalstrategie zur Spitzenlastreduktion)}$$

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar
Seite 28

Level 2: Dimensionierung mittels unifiziertem Speichermodell

		Pb-Säure	Li-Ion	Redox-Flow	Schwungrad
$Q/P_{s,ch}^{max}$	h	3	0,3	-	0,01
$Q/P_{s,dis}^{max}$	h	10	1	-	0,01
$\eta_{s,ch}$	%	92,2	94,9	89,4	95,9
$\eta_{s,dis}$	%	92,2	94,9	89,4	95,9
τ_{sd}	h	14.000	60.000	-	2
t_1^{cal}	a	10	15	15	15
$N^{max,eq}$		1.000	1.500	8.000	10^6

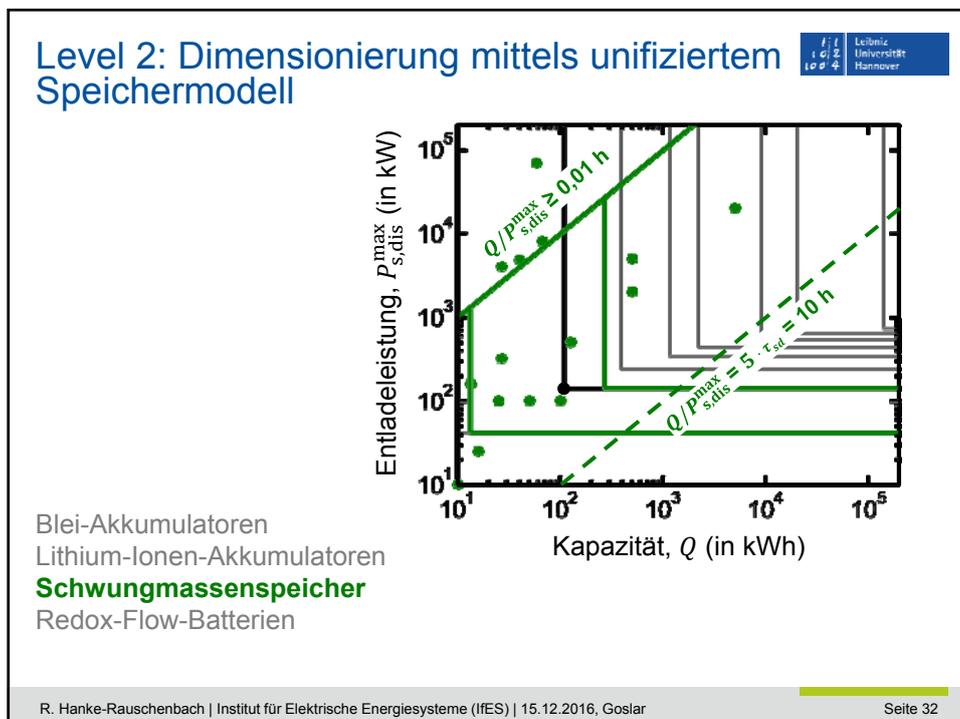
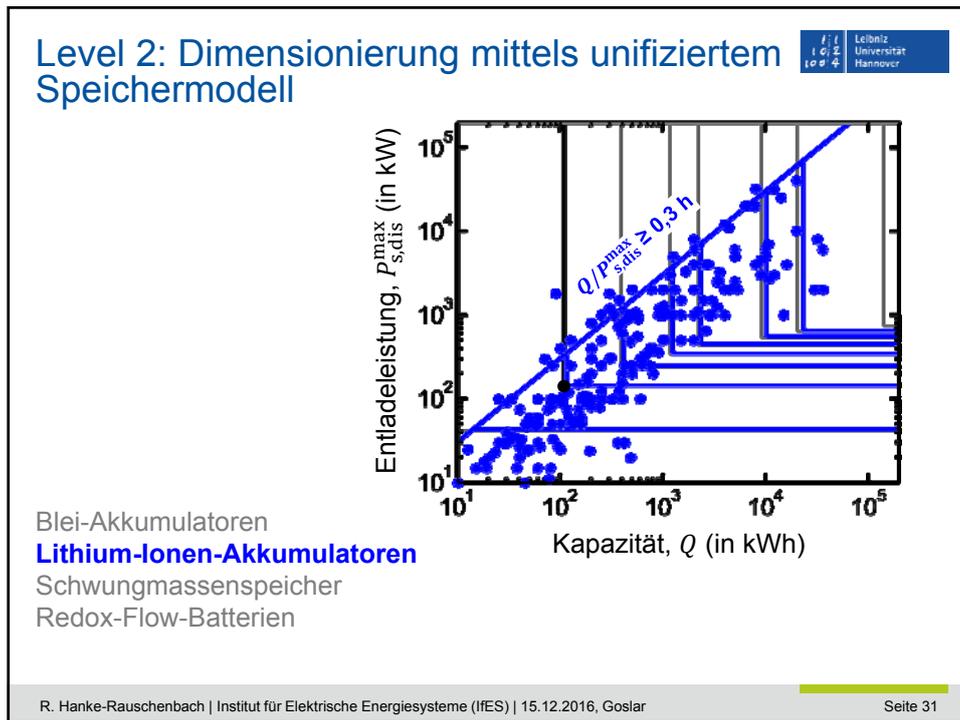
[1] Mahnke, Mühlenhoff, Lieblang: Strom Speichern in: Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.) RENEWS SPEZIAL, Nr. 75, 2014
 [2] Sterner, Stadler: Energiespeicher, Springer Verlag, 2014
 [3] Metastudie „Energiespeicher“, Fraunhofer UMSICHT, Fraunhofer IWES, 2014

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 29

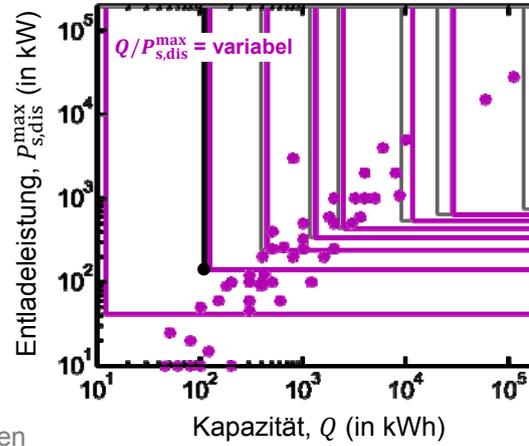
Level 2: Dimensionierung mittels unifiziertem Speichermodell

Blei-Akkumulatoren
 Lithium-Ionen-Akkumulatoren
 Schwunghmassenspeicher
 Redox-Flow-Batterien

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 30



Level 2: Dimensionierung mittels unifiziertem Speichermodell



- Blei-Akkumulatoren
- Lithium-Ionen-Akkumulatoren
- Schwungmassenspeicher
- Redox-Flow-Batterien**

Level 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

- Kosten-Teilmodell (dynamische Investitionsrechnung)

$$K = c_Q \cdot Q + c_P \cdot P \quad \dots \text{Investitionskosten}$$

$$K_a = K \cdot a + c_E \cdot \Delta E \quad \dots \text{jährliche Kosten}$$

$$\text{mit } a = \frac{(1+i)^{t_1} \cdot i}{(1+i)^{t_1} - 1} \quad \dots \text{Annuitätenfaktor}$$

- Lebensdauer-Teilmodell (Abschätzung)

$$t_1 = \min(t_1^{\text{cal}}, t_1^{\text{cyc}}, t_1^{\text{cyc,eq}}) \quad t_1^{\text{cal}} \quad \dots \text{kalendarische Lebensdauer}$$

$$\text{mit } t_1^{\text{cyc}} = N^{\text{max}} / N_a \quad t_1^{\text{cyc}} \quad \dots \text{Zyklenlebensdauer}$$

$$t_1^{\text{cyc,eq}} = N^{\text{max,eq}} / N_a^{\text{eq}} \quad t_1^{\text{cyc,eq}} \quad \dots \text{äqu. Zyklenlebensdauer}$$

		Pb-Säure	Li-Ion	Redox-Flow	Schwungrad	Leist.-elektr.
$Q/P_{s,ch}^{\max}$	h	3	0,3	-	0,01	-
$Q/P_{s,dis}^{\max}$	h	10	1	-	0,01	-
$\eta_{s,ch}$	%	92,2	94,9	89,4	95,9	-
$\eta_{s,dis}$	%	92,2	94,9	89,4	95,9	-
τ_{sd}	h	14.000	60.000	-	2	-
t_1^{cal}	a	10	15	15	15	-
$N^{\max,eq}$		1.000	1.500	8.000	10^6	-
c_Q	EUR/kWh	400	1.100	500	2.000	-
c_P	EUR/kW	-	-	1.500	200	80
c_0	EUR	-	-	-	-	1.500

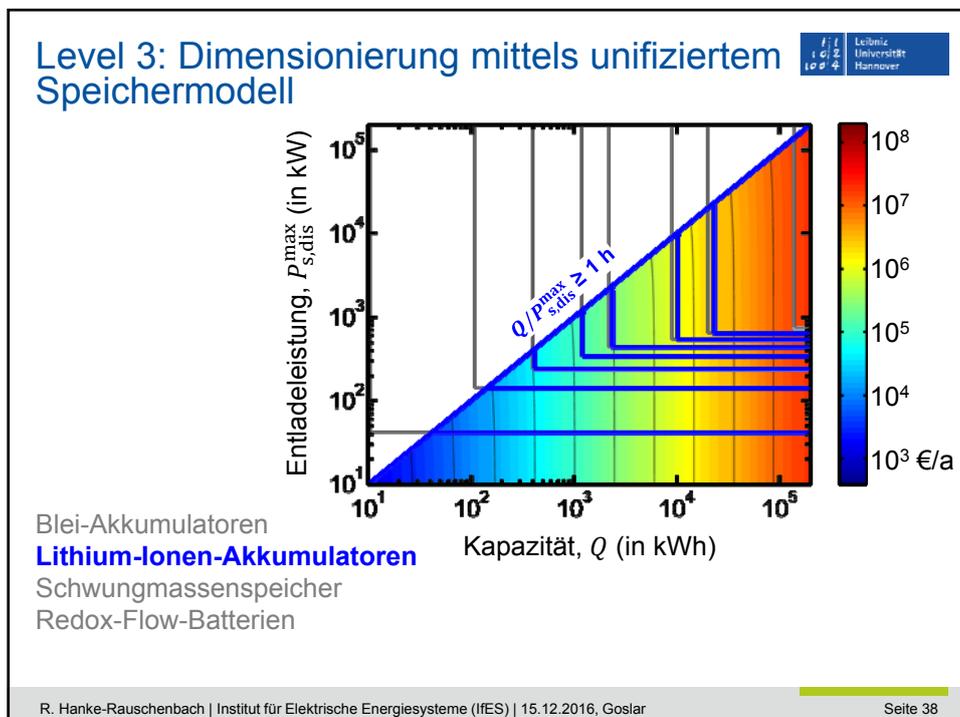
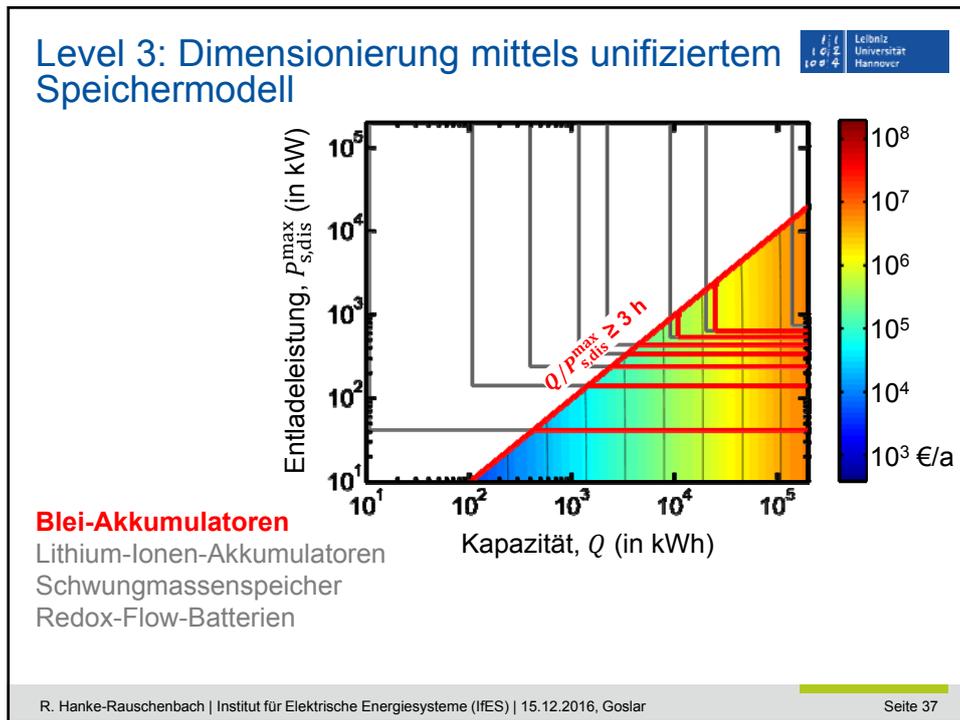
[1] Mahnke, Mühlhoff, Lieblang: Strom Speichern in: Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.) RENEWS SPEZIAL, Nr. 75, 2014
 [2] Sterner, Stadler: Energiespeicher, Springer Verlag, 2014
 [3] Metastudie „Energiespeicher“, Fraunhofer UMSICHT, Fraunhofer IWES, 2014

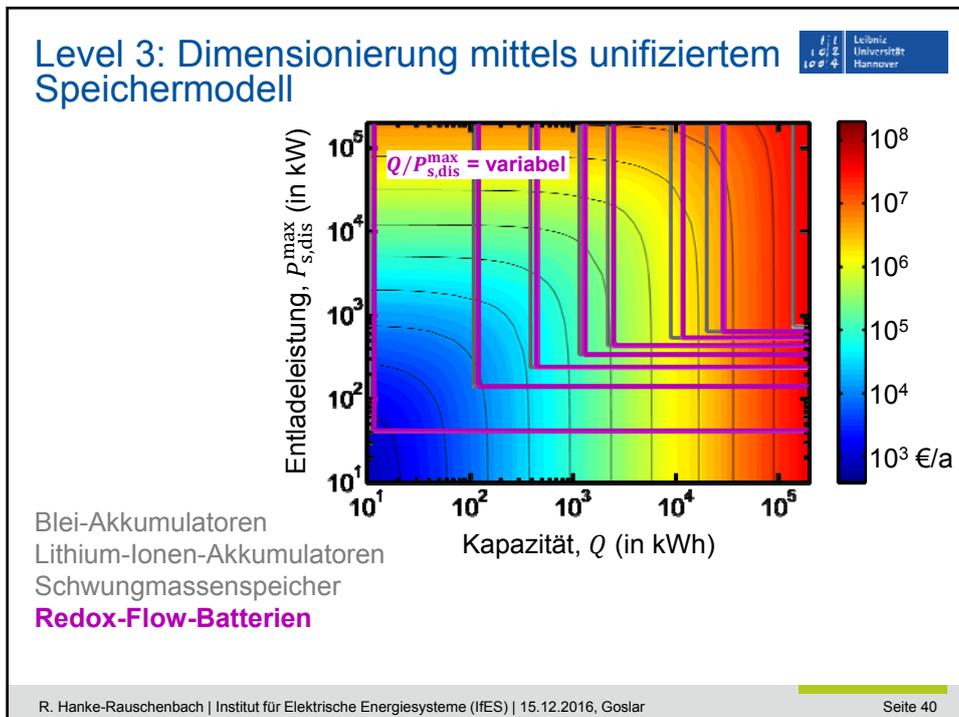
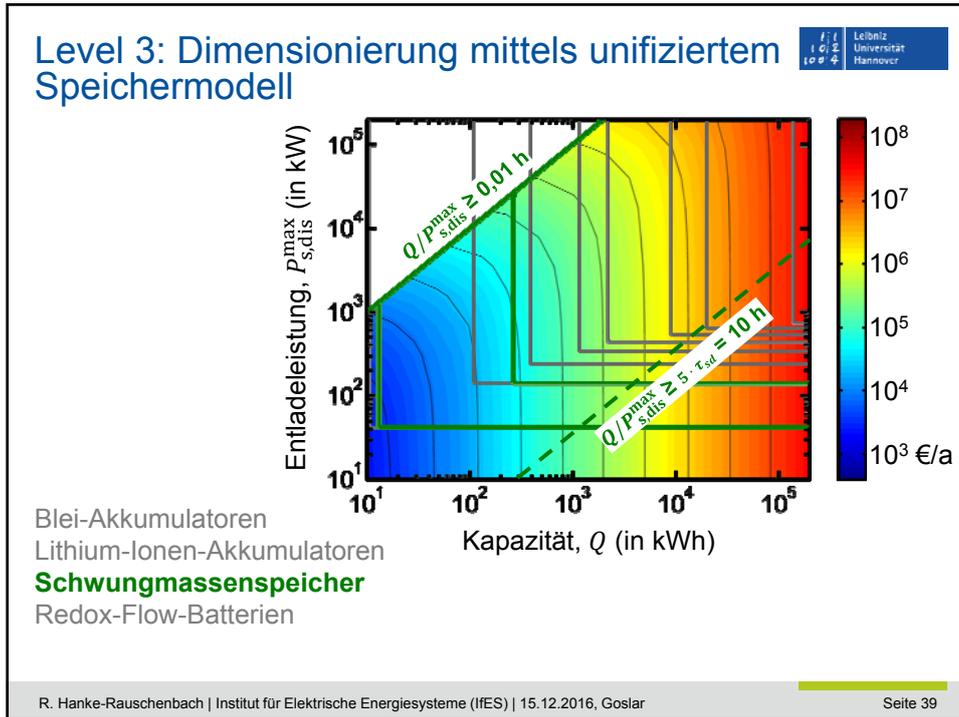
R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 35

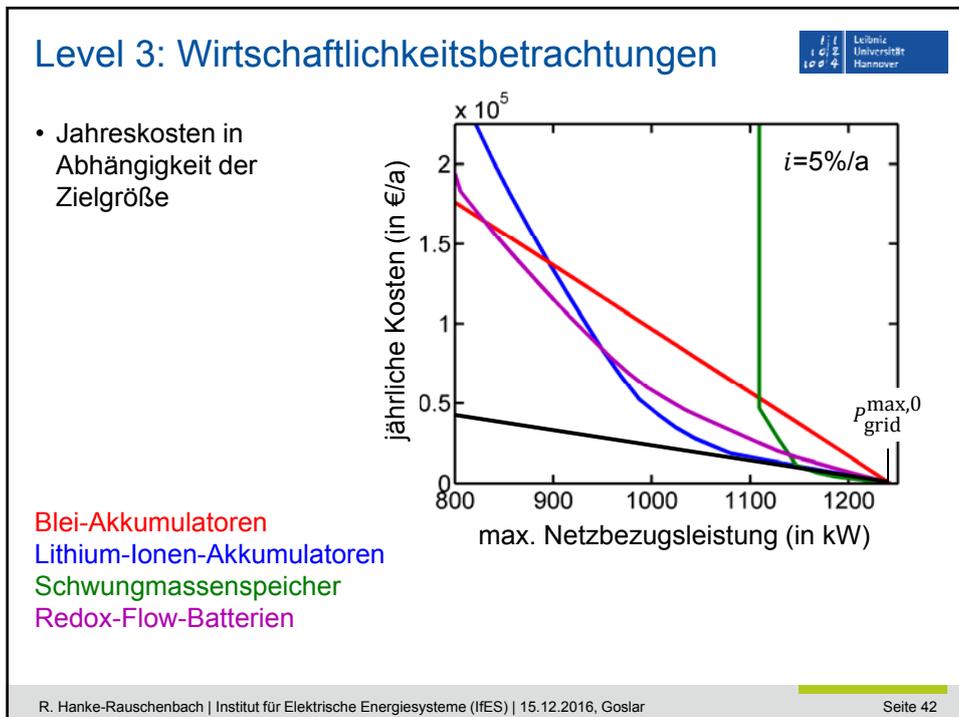
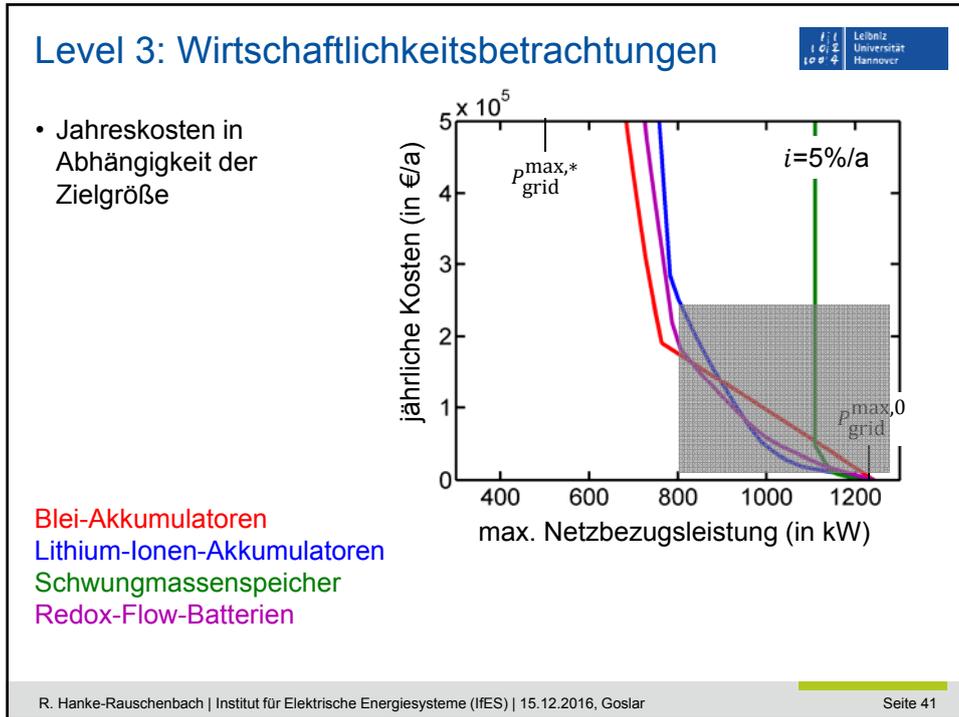
Hinweis:

Die Grundidee des vorgestellten Ansatzes stellt das Treffen einer Auswahlentscheidung für ein konkretes Problem (welches durch die Funktion $P_\delta(t)$, siehe Folie 8 und die entsprechende Zielsetzung, siehe Folie 9 definiert ist) dar.

Insofern, sind die folgenden Aussagen zur Bevorzugung der einen oder anderen Technologie nicht genereller Natur, sondern gelten ausschließlich für das hier betrachtete Fallbeispiel (Folie 13) unter Berücksichtigung des auf Folie 35 dargestellten Parametersatz.







Level 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Leibniz Universität Hannover

- Zielgröße in Abhängigkeit der Speicherkapazität

Kapazität, Q (in kWh)

max. Netzbezugsleistung (in kW)

$p_{grid}^{max,*}$

$p_{grid}^{max,0}$

- Blei-Akkumulatoren
- Lithium-Ionen-Akkumulatoren
- Schwungmassenspeicher
- Redox-Flow-Batterien

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 43

Zusammenfassung

Leibniz Universität Hannover

- Gestaltung von Speichersystem ist eine komplexe Aufgabe
 - Vielzahl von Einflussgrößen
 - ungünstige Datenlage bzw. hoher Aufwand zur Daten-Beschaffung
- vorliegender Ansatz: schrittweises Vorgehen – Level 1-3
- Ergebnis:
 - abschätzende Aussage zu Technologiewahl und Dimensionierung
 - Einordnung in Gesamtkontext
 - Vorbereitung Einsatz Detailmodell
- Methodik nutzbar ...
 - sowohl für Speicheranwender
 - als auch für Speicherhersteller zur Kundenberatung

Entladeleistung (in kW)

Kapazität (in kWh)

Schwungrad

Li-Ionen

Redox-Flow

Pb-Säure

R. Hanke-Rauschenbach | Institut für Elektrische Energiesysteme (IFES) | 15.12.2016, Goslar Seite 44



Gestaltung von Energiespeichersystemen: Ein Ansatz zur Technologieauswahl und Dimensionierung

Astrid Bensmann, Richard Hanke-Rauschenbach

Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme

Unternehmensgespräch Energie, 15. Dezember 2016, Goslar

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Kontakt/Rückfragen



Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektrische Energiesysteme (IfES)
Fachgebiet Elektrische Energiespeichersysteme

– **Richard Hanke-Rauschenbach**
Institutsleiter
Tel. 0511/762-14401
hanke-rauschenbach@ifes.uni-hannover.de

– **Astrid Bensmann**
Gruppenleiterin Speichersystemtechnik
Tel. 0511/762-14410
astrid.bensmann@ifes.uni-hannover.de