

Vorlesung : Energiespeichertechnologien- & Anwendungen
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: Energy Storage Technologies and Applications

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

1. Einführung Energiespeicher Teil a – „Allgemein“

1. Introduction Energy Storage part a – „Generally“

Vorlesung #1a

| Lecture #1a



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Energy Storage in General

Content ⇒ Learning objectives

- Definition of terms energy storage: primary, secondary, tertiary; Energy storage structure and components; Sectoral and cross-sectoral storage
⇒ Introduction to the different types of storage
- Classification of energy storage: physical, energy-related, storage duration, storage use
⇒ Basic understanding of different categories and their meaning
- Parameter storage capacity, withdrawal time, withdrawal rate
⇒ Understanding of these parameters and which basic applications result from them
- Typical energy storage systems in comparison with regard to storage capacity, withdrawal time and withdrawal rate
⇒ Sorting of the technologies with regard to the criteria and in relation to one another

Energiespeicher allgemein

Inhalt ⇒ Lernziele

- Begriffsdefinition Energiespeicher: Primär, Sekundär, Tertiär; Speicheraufbau und -komponenten; sektorale und cross-sektorale Speicher
⇒ Heranführung an die verschiedenen Typologien von Speichern
- Klassifizierung Energiespeicher: Physikalisch, energietechnisch, Speicherdauer, Speichernutzen
⇒ Grundverständnis für verschiedene Kategorien und deren Sinn
- Kenngröße Speicherkapazität, Ausspeicherzeit, Ausspeicherleistung
⇒ Verständnis für diese Kenngrößen und welche prinzipiellen Anwendungen daraus resultieren

1. Energy Storage in General

1.1 Definition of primary, secondary and tertiary energy storage

- Primary energy storages are energy storages that can only be discharged, e.g.
 - Fossil energy sources
 - Primary batteries
- Secondary energy storages are energy storages that can be charged and discharged multiple times, e.g.
 - Accumulators
 - Flywheels
- Tertiary* energy storages are energy storages that can be charged and discharged multiple times, but energy storage takes place outside the actual store, e.g.
 - Fuel cell – electrolyzer
 - Flow battery

* Definition less standardized, more in German-speaking countries

1. Energiespeicher allgemein

1.1 Definition von primären, sekundären und tertiären Energiespeichern

- **Primäre** Energiespeicher sind Energiespeicher, die nur entladen werden können, z.B.
 - Fossile Energieträger
 - Primär-Batterien
- **Sekundäre** Energiespeicher sind Energiespeicher, die mehrfach geladen und entladen werden können, z.B.
 - Akkumulatoren
 - Flywheels
- **Tertiäre*** Energiespeicher sind Energiespeicher, die mehrfach geladen und entladen werden können, aber die Energiespeicherung findet außerhalb des eigentlichen Speichers statt z.B.
 - Brennstoffzelle - Elektrolyseur
 - Redox-Flow-Batterie

* Definition weniger standardisiert, eher im deutschsprachigen Raum

1. Energy Storage in General

1.2 Conceptual definition storage

- A storage is a facility for retention and storing goods
- An energy storage is an energy-technical plant that contains the following three processes: storage (loading), storage, storage (unloading)
- An energy carrier is a substance that has stored energy. It is located in the storage unit of an energy store.
- Charging Unit, Storage Unit, Discharging Unit
 - can be realized in an aggregate Example: lead acid battery
 - can be realized in several units in one place Example: pumped hydro storage
 - can be realized in several units in several places Example: Power-to-Gas / Pipeline / GuD

1. Energiespeicher allgemein

1.2 Begriffsdefinition Speicher

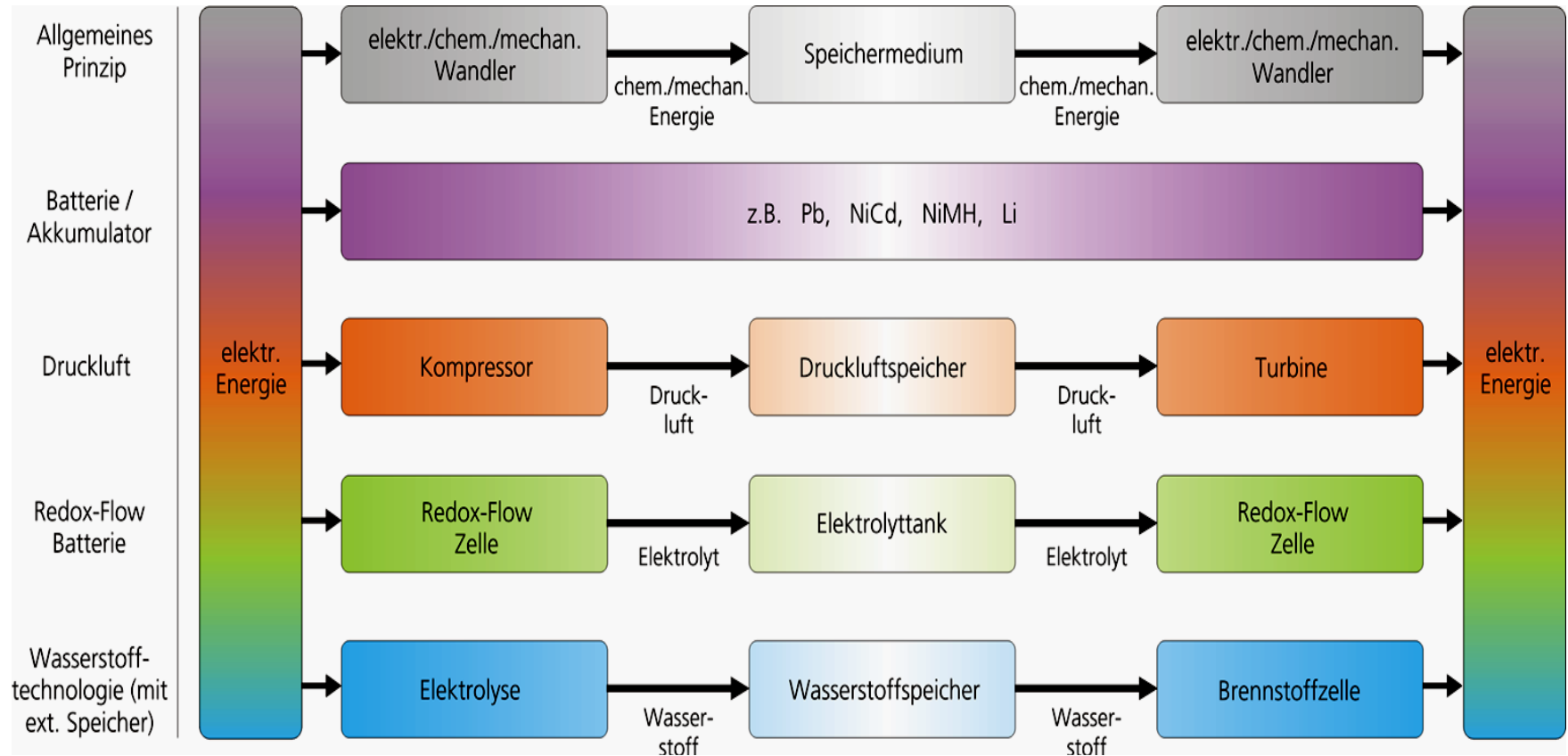
- **Ein Speicher** ist eine Anlage zur Bevorratung, Lagerung und Aufbewahrung von Gütern
- **Ein Energiespeicher** ist eine energietechnische Anlage, welche die drei folgenden Prozesse beinhaltet: **Einspeichern (Laden), Speichern, Ausspeichern (Entladen)**
- **Ein Energieträger** ist ein Stoff, der Energie gespeichert hat. Er befindet sich in der Speichereinheit eines Energiespeichers.
- **Einspeicher-Einheit, Speicher-Einheit, Ausspeicher-Einheit**
 - können in einem Aggregat realisiert sein
Beispiel: Bleibatterie
 - können in mehreren Aggregaten an einem Ort realisiert sein
Beispiel: Pumpspeicherwerk
 - können in mehreren Aggregaten an mehreren Orten realisiert sein
Beispiel: Power-to-Gas / Pipeline / GuD
- **Ein- / Ausspeichern vs. Laden/Entladen**

Fachsprachlich und allgemein richtig ist: Einspeichern / Speichern / Ausspeichern

Umgangssprachlich (v.a. bei Akkumulatoren): Laden / Speichern / Entladen

1. Energiespeicher allgemein

1.3 Systemstruktur von Speichern



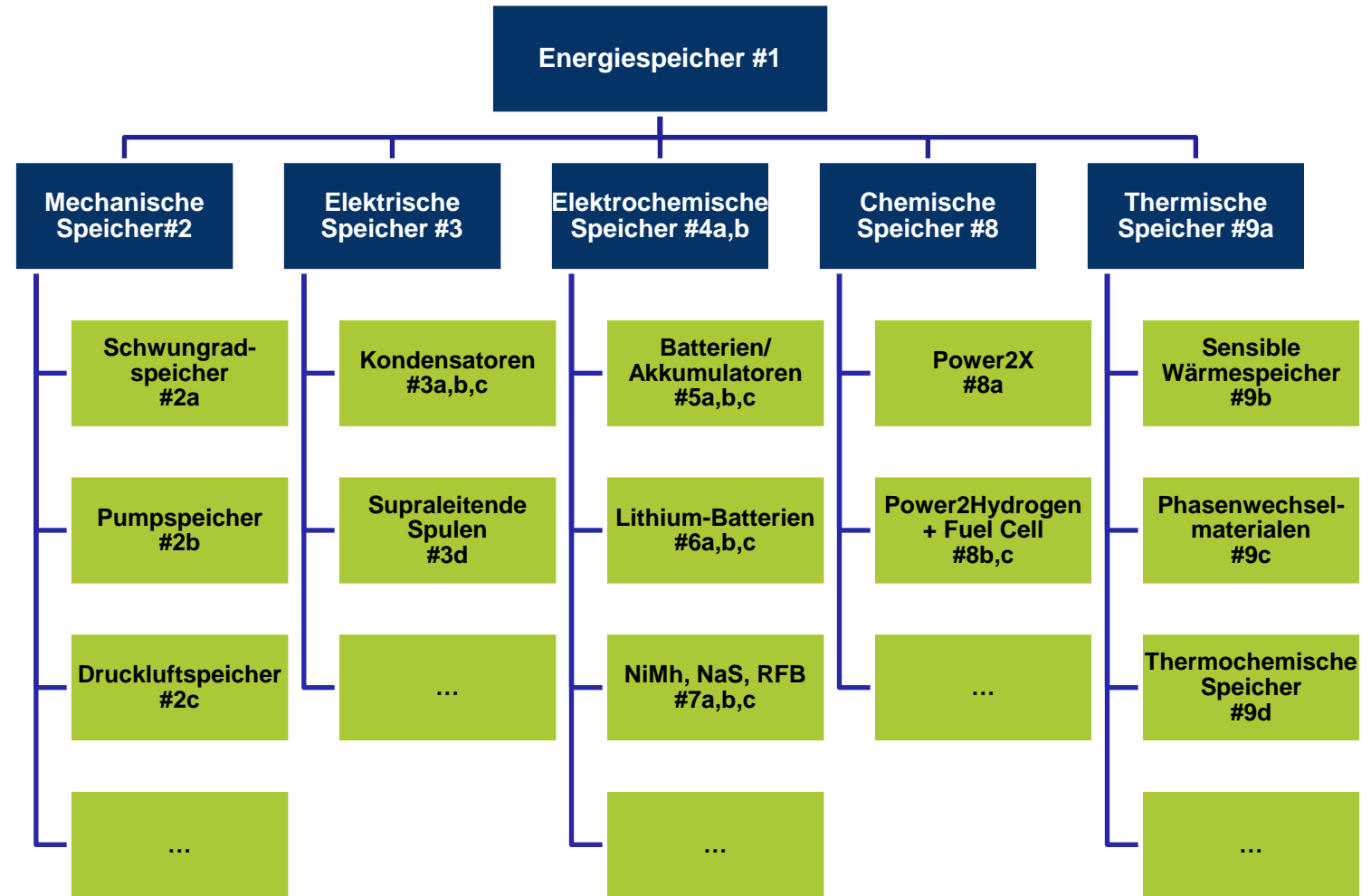
1. Energy Storage in General

1.4 Classification of storage: Physically

- Energy storage # 1
- Mechanical storage # 2
- Flywheel memory # 2a
- Pumped storage #2 B
- Compressed air storage # 2c
- ...
- Electrical storage # 3
- Capacitors # 3a, b, c
- Superconducting coils # 3d
- ...
- Electrochemical storage # 4a, b
- Batteries / accumulators # 5a, b, c
- Lithium batteries # 6a, b, c
- NiMh, NaS, RFB # 7a, b, c
- ...
- Chemical storage # 8
- Power2X # 8a
- Power2Hydrogen + Fuel cell # 8b, c
- ...
- Thermal storage # 9a
- Sensitive heat storage # 9b
- Phase change materials # 9c Thermochemical storage # 9d
- ...

1. Energiespeicher allgemein

1.4 Klassifizierung von Speichern: Physikalisch



1. Energy Storage in General

1.5 Classification of storage by KPI

- Power (kW), energy (kWh)
- "Energy" or "power density" - gravimetric – volumetric
- Power gradient
Change in power over time
- Discharge duration
(capacity / power)
- Efficiency
 - charging
 - storage (self-discharge)
 - discharging

1. Energiespeicher allgemein

1.5 Klassifizierung von Speichern anhand von Speicherkenngrößen

- Leistung (kW), Energie (kWh)
- „Energie-“ bzw. „Leistungsdichte“
 - gravimetrisch
 - volumetrisch
- Leistungsgradient
Änderung der Leistung pro Zeit
- Ausspeicherdauer
(Kapazität/Leistung)
- Wirkungsgrad
 - Einspeicher
 - Speicherung (Selbstentladung)
 - Ausspeicherung

Kenngröße	Einheit	Bedeutung
Leistung	W	Ein-/Ausspeicherleistung
Leistungsdichte	W/kg, W/m ³	Leistung pro Masse bzw. Volumen
Leistungsgradient	W/s	Leistungsänderungsgeschwindigkeit
Energie	Wh	Energieinhalt des Speichers
Energiedichte	Wh/kg, Wh/m ³	Energiemenge pro Masse bzw. Volumen
Wirkungsgrad	%	Effizienz des Speicherprozesses
Ausspeicherzeit	h	Verhältnis Energie zu Ausspeicherleistung
C-Faktor	[-]	C-Faktor 1 bedeutet Speicher wird in 1 h geladen, C=2 bedeutet, dass der Speicher in 30 min geladen wird, bei C=0,5 in 2 Stunden
...

1. Energy Storage in General

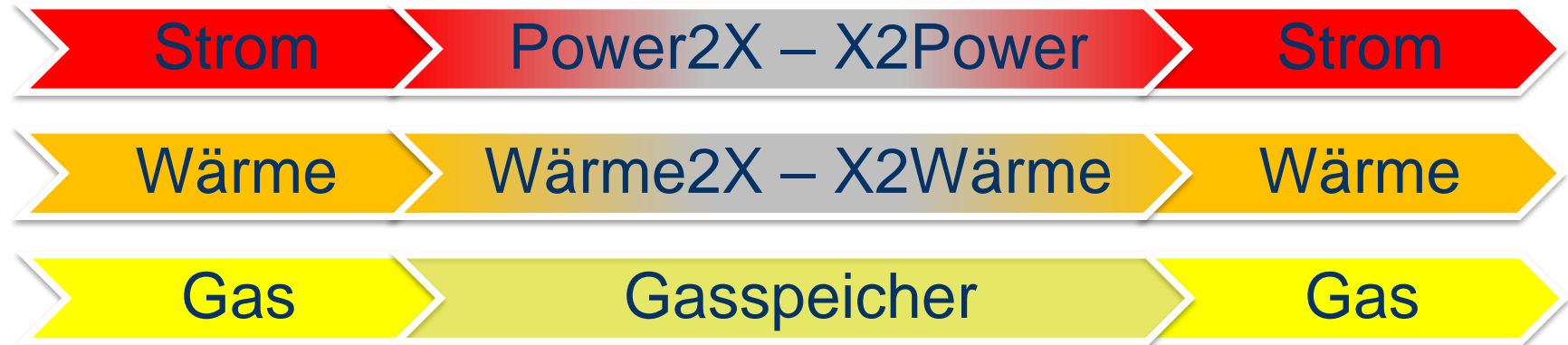
1.6 Definition of sectoral and cross-sectoral storage

- Sectoral energy storage systems are energy storage systems that store and withdraw energy in the same energy sector
- Cross-sectoral energy storage systems are energy storage systems that store and withdraw energy in various energy sectors, e.g.

1. Energiespeicher allgemein

1.6 Definition sektoraler und cross-sektoraler Speicher

Sektorale Energiespeicher sind Energiespeicher, die im selben Energiesektor Ein- und Ausspeichern



Cross-sektorale Energiespeicher sind Energiespeicher, die in verschiedenen Energiesektoren Ein- und Ausspeichern, bspw.



1. Energy Storage in General

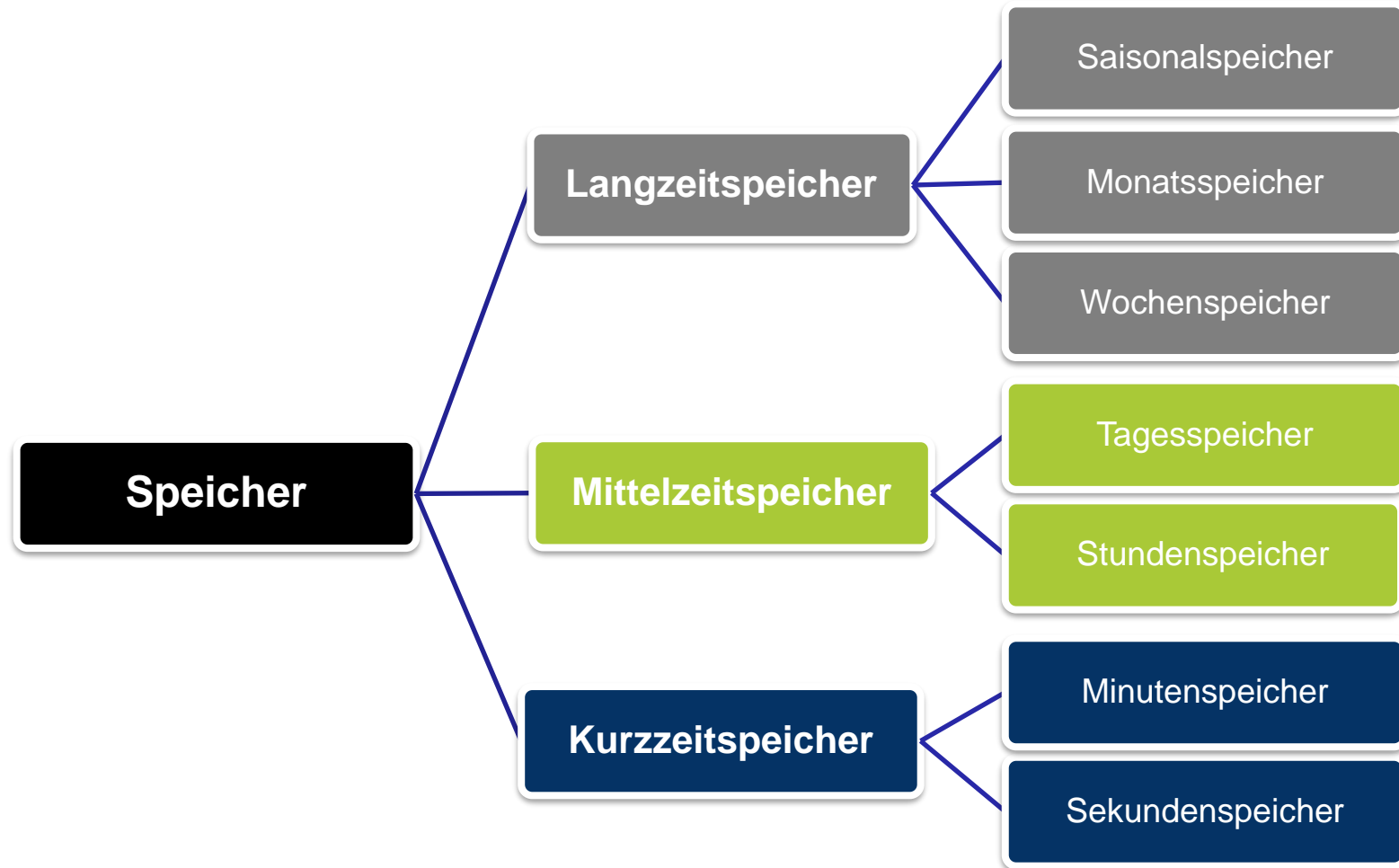
1.7 Classification of storage by storage time

Energy Storage

- Long-term storage
 - seasonal storage
 - monthly storage
 - weekly storage
- Medium-term storage
 - daily storage
 - hourly storage
- Short-term storage
 - minute storage
 - seconds storage

1. Energiespeicher allgemein

1.7 Klassifizierung von Speichern anhand der Speicherdauer



1. Energy Storage in General

1.8 Classification of storage by application / benefit

- Temporal compensation
 - Excess electricity
 - "Dark doldrums"
- Spatial balance
 - Spatially distributed storage (power-to-gas / gas network / CCGT)
- Cross-sectoral compensation
 - Cross-sector storage (power-to-fuel)
- Additional benefit
 - Uninterruptible power supply
 - Black start capability / control energy / grid stabilization
 - Mobile applications
 - Remote areas / island applications

1. Energiespeicher allgemein

1.8 Klassifizierung von Speichern anhand des Nutzens / Einsatzzwecks

■ Zeitlicher Ausgleich

- Überschussstrom
- „Dunkelflaute“

■ Räumlicher Ausgleich

- Räumlich verteilte Speicher (Power-to-Gas/Gasnetz/GuD)

■ Sektorübergreifender Ausgleich

- Sektorübergreifende Speicher (Power-to-Fuel)

■ Zusatznutzen

- Unterbrechungsfreie Stromversorgung
- Schwarzstartfähigkeit / Regelenergie / Netzstabilisierung
- Mobile Anwendungen
- Remote Areas / Inselanwendungen

1. Energy Storage in General








1.9 Summary / Take aways

1. Energy storage can be both "rechargeable" (secondary / tertiary) and only used once (primary)
2. Energy storage devices can be built in a unit (e.g. battery) in several connected units (pump storage) or also spatially separated units (Power2Gas - gas line - fuel cell).
3. Various physical, chemical, electrical, etc. processes are available for energy conversion and storage
4. Energy storage can be characterized with performance indicators (such as power, power density, etc.).
5. Energy storage systems can "work" on a sectoral or cross-sectoral basis.
6. The storage duration (taking self-discharge into account) is an important criterion for the storage application or technology
7. Storage applications are very complex and go beyond the simplest case of a purely temporal energy "shift" (spatial compensation, sector coupling, additional benefits)

1. Energiespeicher allgemein

1.9 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Energiespeicher können sowohl „wiederaufladbar“ sein (Sekundäre/Tertiäre) als auch nur einmal genutzt werden (Primäre)
2. Energiespeicher können in einem Aggregat (bspw. Batterie) in mehreren zusammenhängenden Aggregaten (Pumpspeicher) oder auch räumlich getrennten Aggregaten (Power2Gas – Gasleitung - Brennstoffzelle) aufgebaut sein.
3. Es stehen verschiedenen physikalische, chemische, elektrische etc. Prozesse zur Energiewandlung und Speicherung zur Verfügung
4. Energiespeicher können mit Performance Indikatoren (wie Leistung, Leistungsdichte etc.) charakterisiert werden.
5. Energiespeicher können sektoral oder cross-sektoral „arbeiten“.
6. Die Speicherdauer (unter Berücksichtigung von Selbstentladung) ist ein wichtiges Kriterium für die Speichieranwendung bzw. –Technologie
7. Speichieranwendungen sind sehr vielschichtig und gehen über den einfachsten Fall der rein zeitlichen Energie-“Verschiebung“ hinaus (räumlicher Ausgleich, Sektorkopplung, Zusatznutzen)

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0

Vorlesung : Energiespeichertechnologien- & Anwendungen
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: Energy Storage Technologies and Applications

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

**1. Einführung Energiespeicher Teil b –
 „Technologien“**

**1. Introduction Energy Storage part b –
 „Techologies“**

Vorlesung #1b

| Lecture #1b



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Energy storage technologies

Content ⇒ Learning objectives

- Definition of terms energy storage: primary, secondary, tertiary; Energy storage structure and components; Sectoral and cross-sectoral storage
⇒ Introduction to the different types of storage
- Classification of energy storage: physical, energy-related, storage duration, storage use
⇒ Basic understanding of different categories and their meaning
- Parameter storage capacity, withdrawal time, withdrawal rate
⇒ Understanding of these parameters and which basic applications result from them
- Typical energy storage systems in comparison with regard to storage capacity, withdrawal time and withdrawal rate
⇒ Sorting of the technologies with regard to the criteria and in relation to one another

Energiespeicher-Technologien

Inhalt ⇒ Lernziele

- **Kenngroße Speicherkapazität, Ausspeicherzeit, Ausspeicherleistung**
⇒ **Verständnis für diese Kenngroßen und welche prinzipiellen Anwendungen daraus resultieren**
- **Typische Energiespeicher im Vergleich bzgl. Speicherkapazität, Ausspeicherzeit und Ausspeicherleistung**
⇒ **Einsortierung der Technologien bzgl. der Kriterien und in Relation zueinander**

2. Energy storage technologies

2.1 Typical discharge times

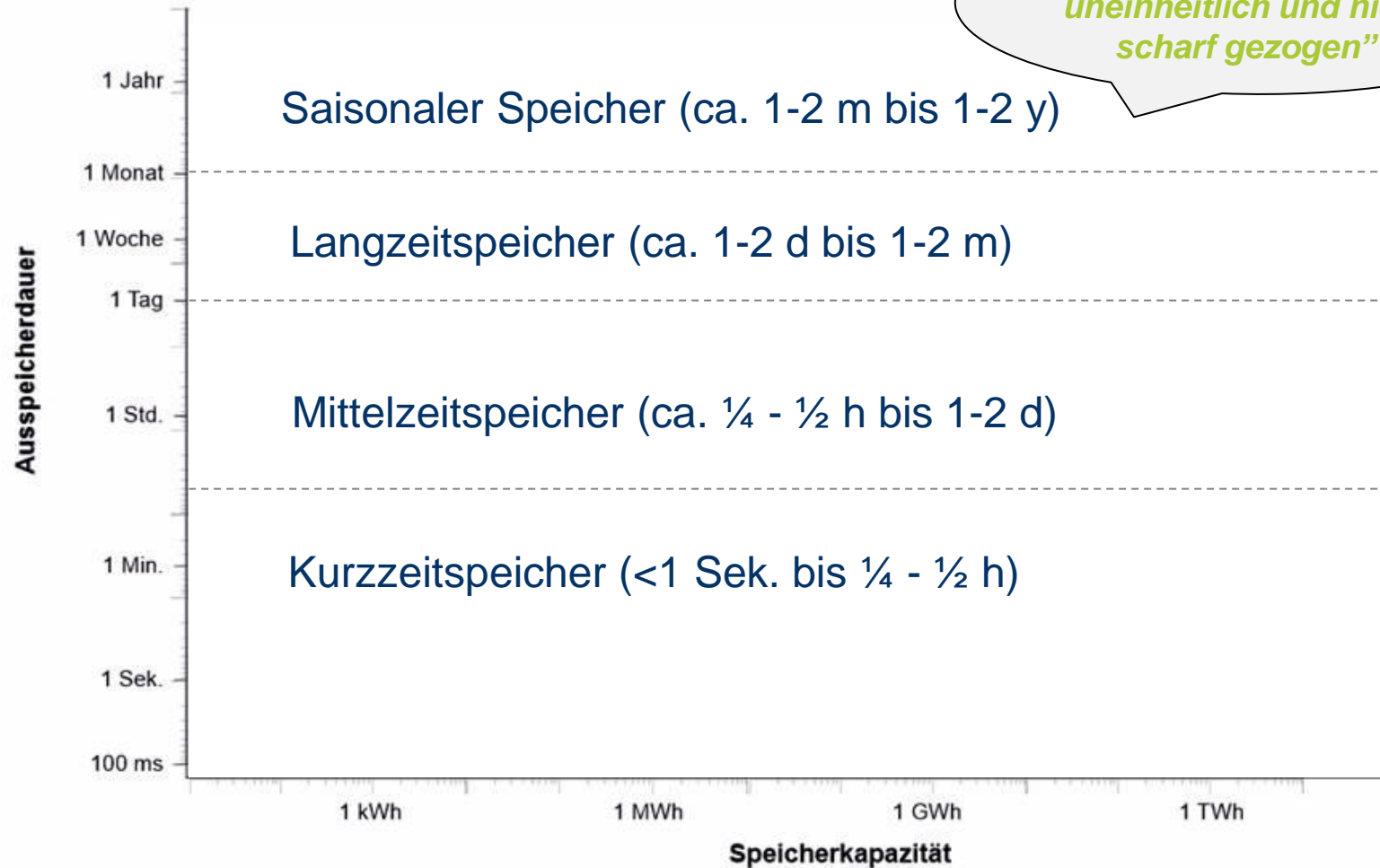
- seasonal storage (ca. 1-2 months to 1-2 years)
- Long-term storage (ca. 1-2 days to 1-2 months)
- Medium-term storage (ca. ¼-½ hour to 1-2 days)
- Short-term storage (<1 second to ¼-½ hour)

Limits in literature are inconsistent and not clearly drawn

2. Energiespeicher-Technologien

2.1 Typische Entladezeitbereiche

“Grenzen in der Literatur uneinheitlich und nicht scharf gezogen”



2. Energy storage technologies

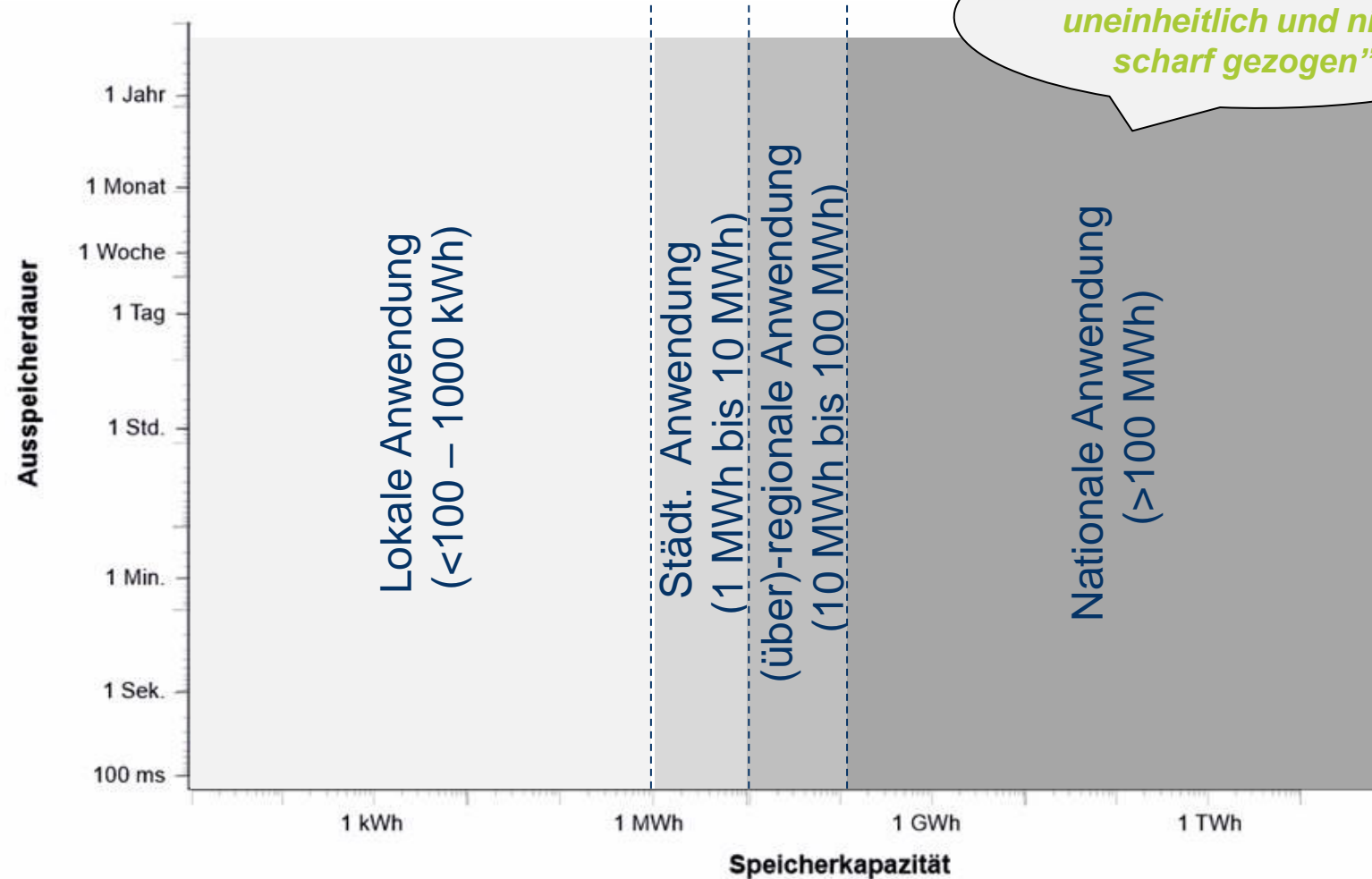
2.2 Typical capacities

- Local application (<100 - 1000 kWh)
- Urban application (0.1-1 MWh to 10 MWh)
- (over)-regional application (10 MWh to 100 MWh)
- National application (> 100 MWh)

Limits in literature are inconsistent and not clearly drawn

2. Energiespeicher-Technologien

2.2 Typische Kapazitätsbereiche



2. Energy storage technologies

2.3 Typical capacity and discharge time of electrical energy storage

Electric storage

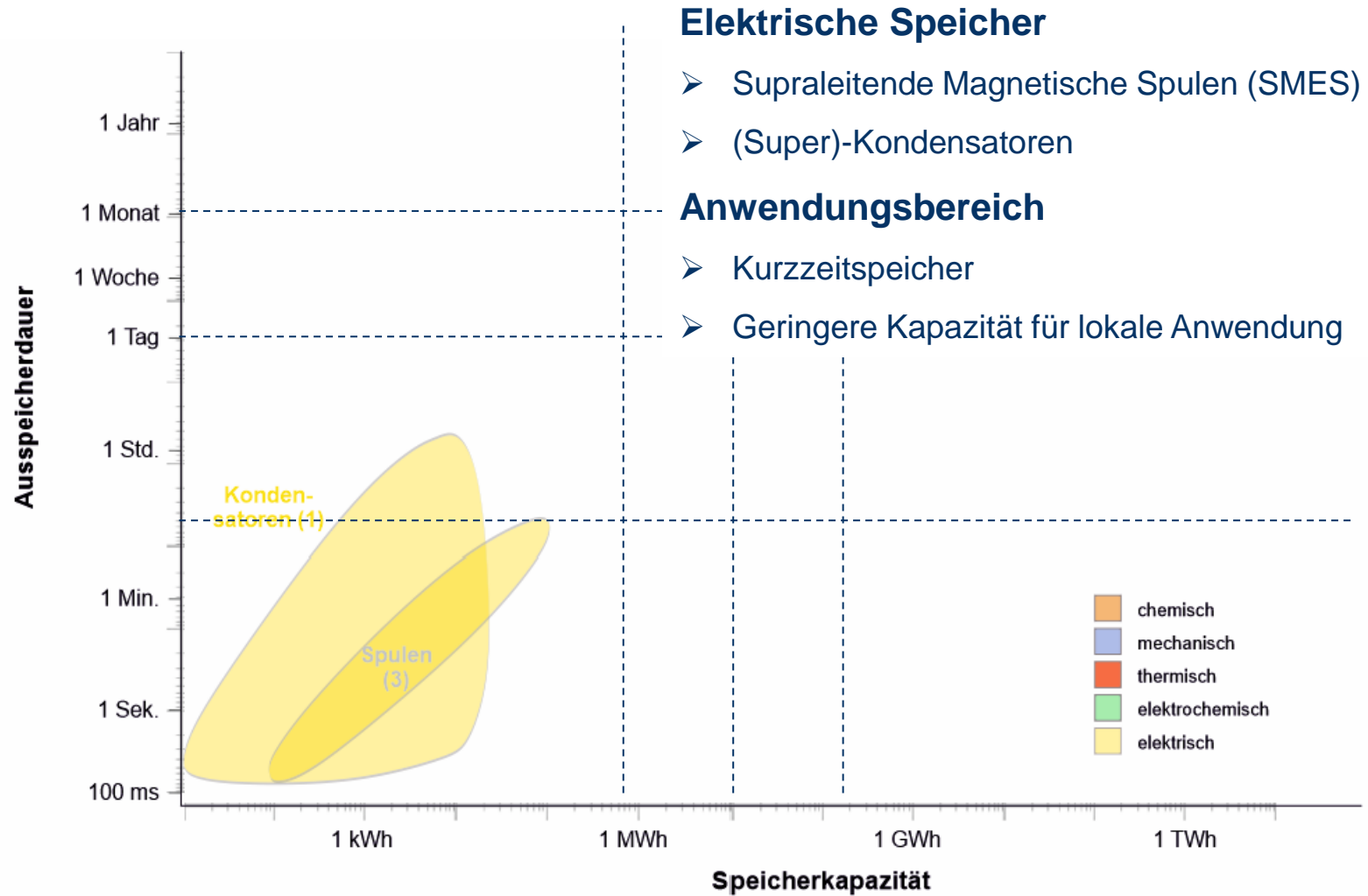
- Superconducting Magnetic Coils (SMES)
- (Super) capacitors

Scope of application

- Short-term storage
- Less capacity for local use

2. Energiespeicher-Technologien

2.3 Typische Kapazitäten und Entladezeiten für elektrische Energiespeicher



2. Energy storage technologies

2.4 Typical capacity and discharge time of electrochemical energy storage

Electrochemical storage / batteries

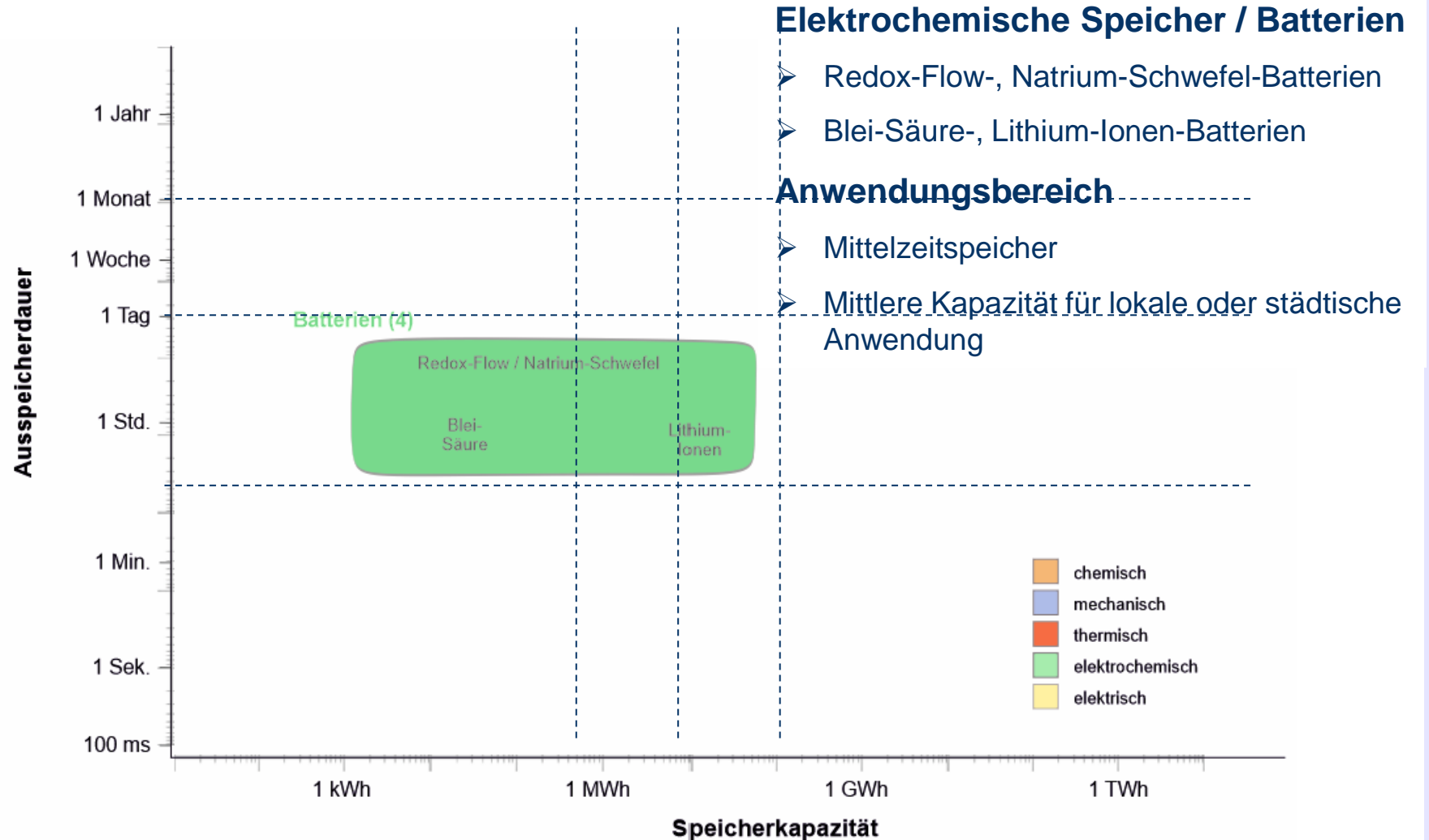
- Redox flow, sodium-sulfur batteries
- Lead-acid, lithium-ion batteries

Scope of application

- Medium-term storage
- Medium capacity for local or urban use

2. Energiespeicher-Technologien

2.4 Typische Kapazitäten und Entladezeiten für elektrochem. Energiespeicher



2. Energy storage technologies

2.5 Typical capacity and discharge time of thermal energy storage

Thermal storage

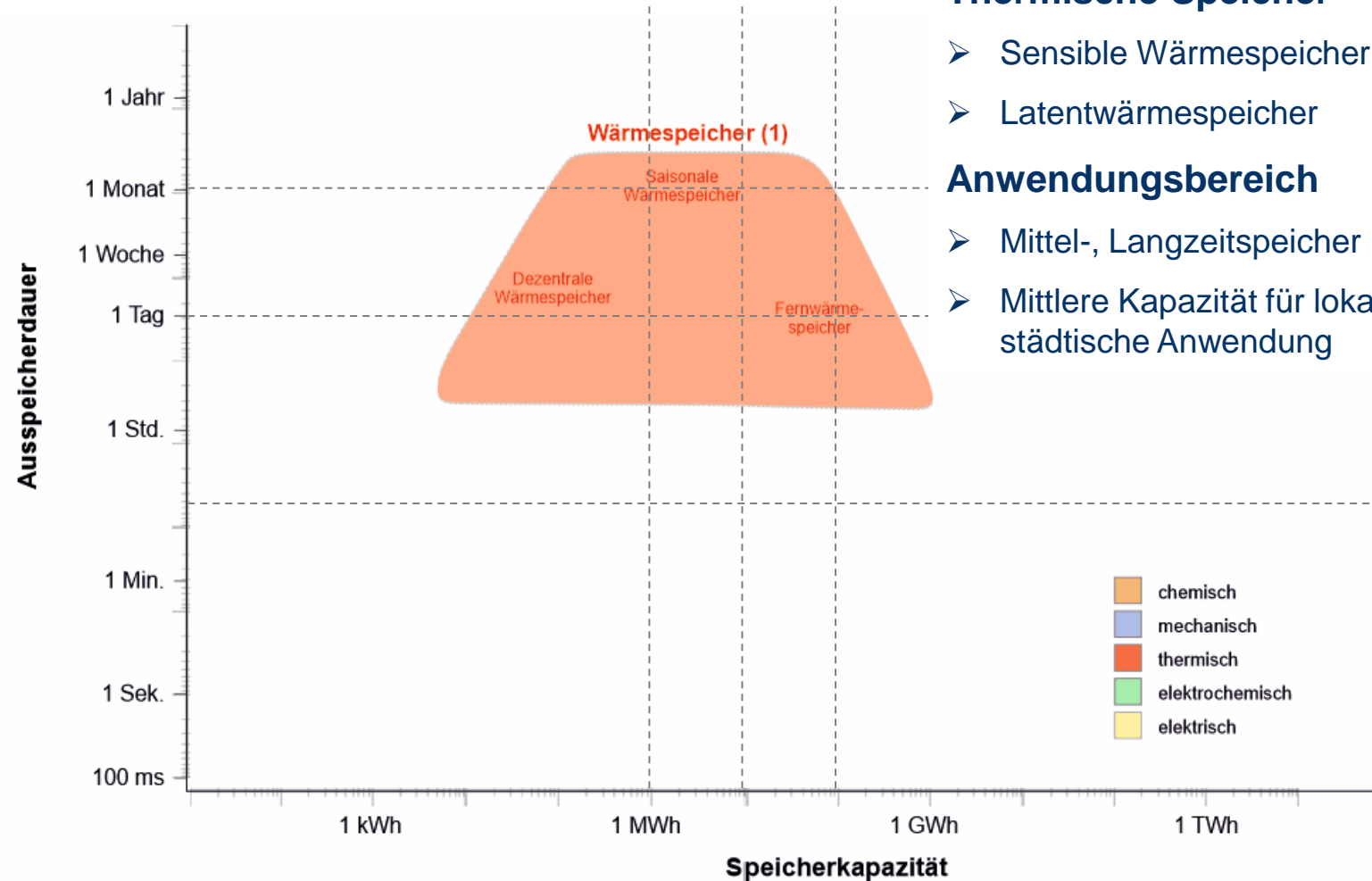
- Sensitive heat storage
- Latent heat storage

Scope of application

- Medium, long-term storage
- Medium capacity for local or urban use

2. Energiespeicher-Technologien

2.5 Typische Kapazitäten und Entladezeiten für thermische Energiespeicher



Thermische Speicher

- Sensible Wärmespeicher
- Latentwärmespeicher

Anwendungsbereich

- Mittel-, Langzeitspeicher
- Mittlere Kapazität für lokale oder städtische Anwendung

2. Energy storage technologies

2.6 Typical capacity and discharge time of mechanical energy storage

Mechanical storage

- Flywheel storage

Scope of application

- Short-term storage
- Medium capacity for local use

Mechanical storage

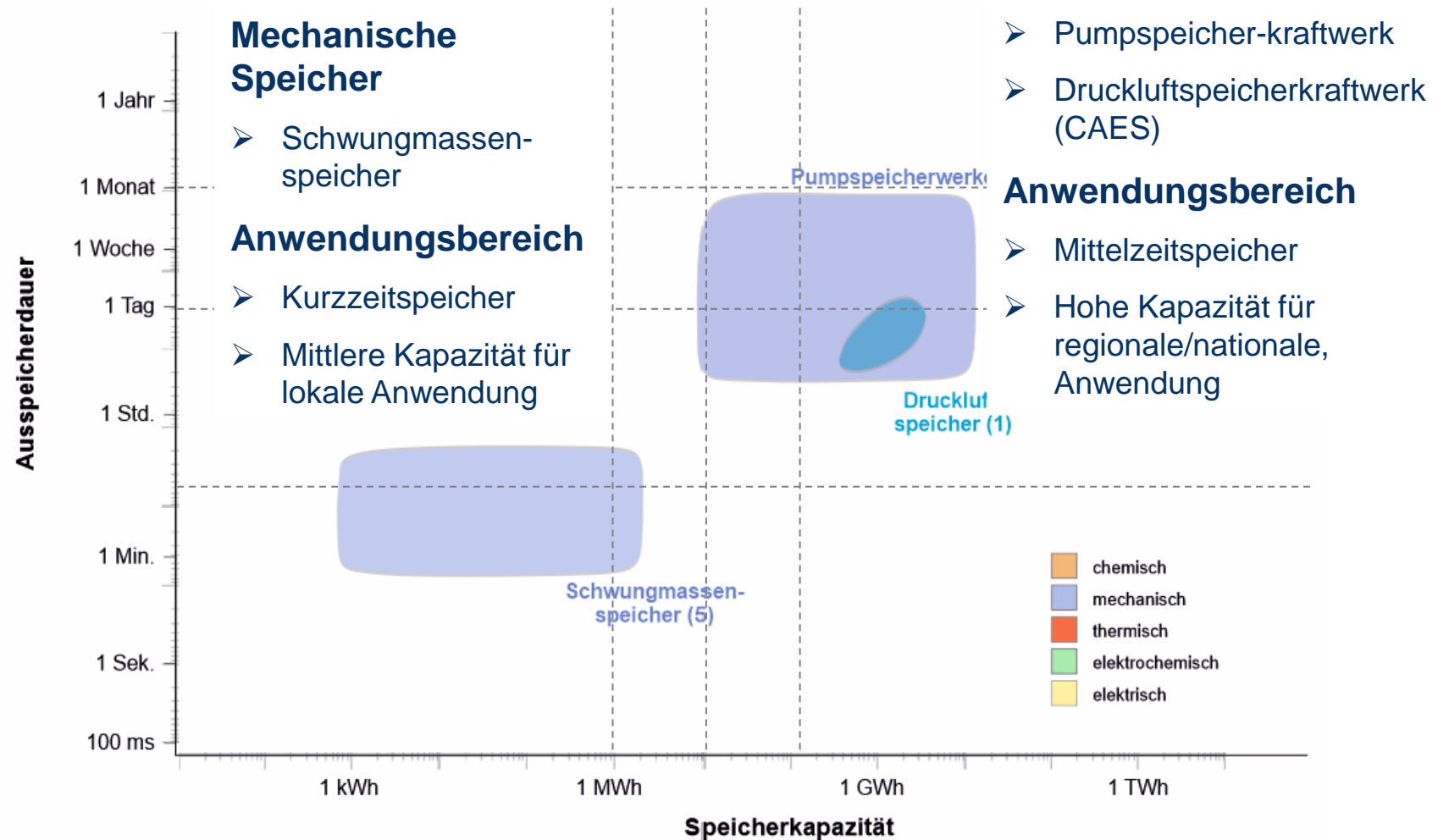
- Pumped storage power plant
- Compressed air storage power plant (CAES)

Scope of application

- Medium-term storage
- High capacity for regional / national, application

2. Energiespeicher-Technologien

2.6 Typische Kapazitäten und Entladezeiten für mechanische Energiespeicher



2. Energy storage technologies

2.7 Typical capacity and discharge time of chemical energy storage

Chemical storage

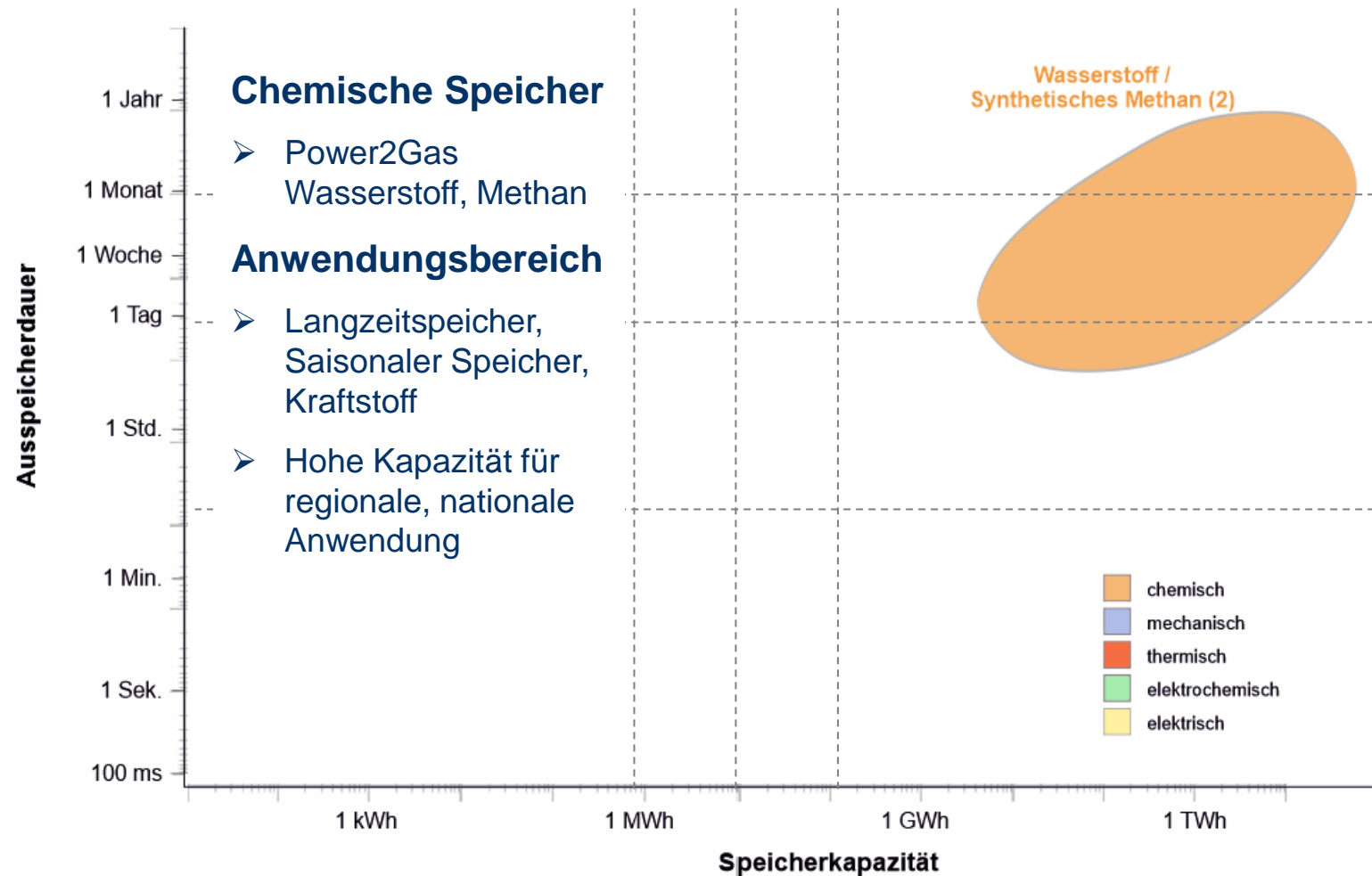
- Power2Gas hydrogen, methane

Scope of application

- Long-term storage, seasonal storage, fuel
- High capacity for regional, national use

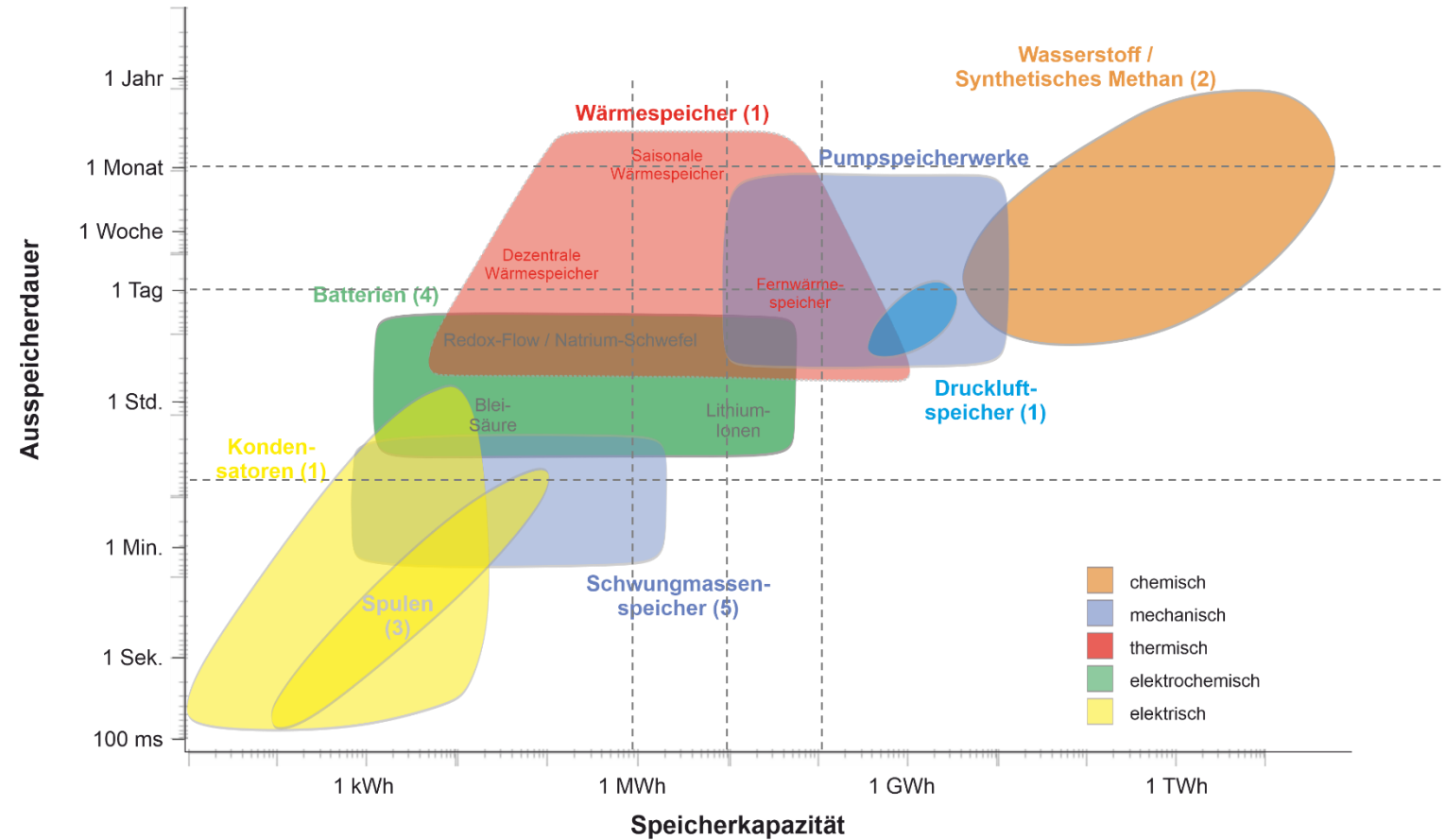
2. Energiespeicher-Technologien

2.7 Typische Kapazitäten und Entladezeiten chemische Energiespeicher



2. Energiespeicher-Technologien

2.8 Typische Kapazitäten und Entladezeiten - Übersicht

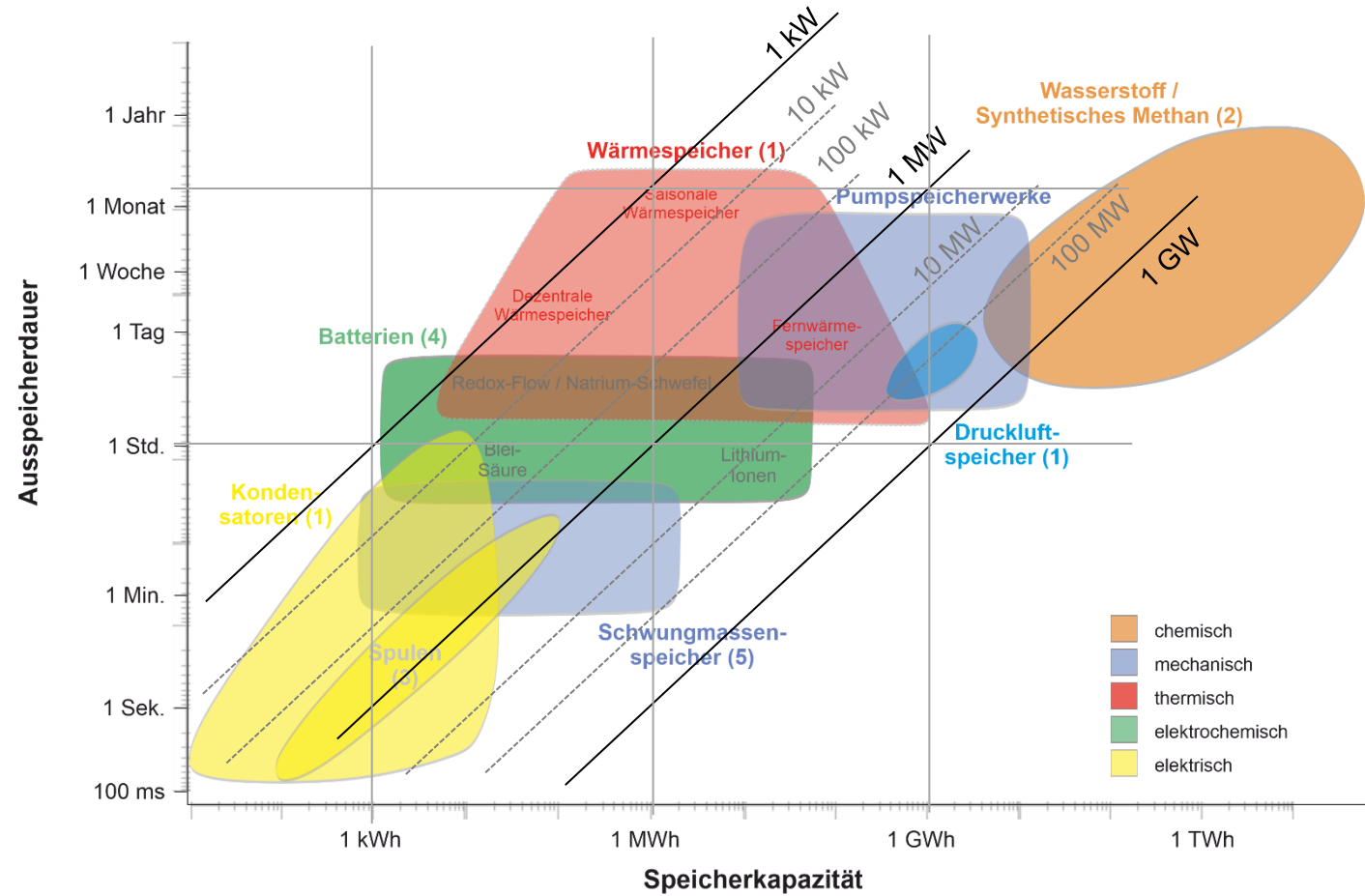


Quellen der Daten:

- (1) Eigene Daten, Fraunhofer UMSICHT
- (2) Moore, Jason; Shabani, Bahman: A Critical Study of Stationary Energy Storage Policies in Australia in an International Context The Role of Hydrogen and Battery Technologies; School of Engineering, RMIT University, 2015
- (3) Sterner, M.; Stadler, I.: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration; Springer, 2017
- (4) Eigene Daten, Fraunhofer UMSICHT + Wang, Zhiwen et al.: A review of marine renewable energy storage; International Journal of Energy Research, Volume 43, Issue:12; DOI: (10.1002/er.4444)
- (5) Bos, Martin: Storage of renewable electricity in methanol; ISBN: 978-90-365-4791-8; DOI: 10.3990/1.9789036547918

2. Energiespeicher-Technologien

2.9 Typische Kapazitäten und Entladezeiten - Leistungsverlauf



2. Energy Storage Technologies








2.10 Summary / Take aways

1. Electrical storage devices (supercaps, capacitors, superconducting magnetic coils) have short storage times (<1/4 h) and are mostly used locally.
2. Electrochemical storage (batteries) mostly work in the medium-term range (1/4 h - 2d) and their use can take place locally or on an urban / industrial level
3. Thermal storage also works mostly in the medium-term range, but can also be used for longer storage periods (district heating). It is used both locally and in urban areas.
4. Mechanical storage (flywheels) also mostly work in the short-term range, but can also be used for longer applications. The power class ranges from a few kWh to 10 MWh
5. Mechanical storage (compressed air storage and pumped storage power plants) store the energy in the medium term (1/4 h - 2d) and, due to their size, they are mostly used regionally to nationally.
6. Chemical storage (hydrogen, methane, etc.) are primarily intended for long-term to seasonal storage and are mostly operated as large, regional to national systems.

2. Energiespeicher Technologien

2.10 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

1. Elektrische Speicher (Supercaps, Kondensatoren, Supraleitende magnetische Spulen) haben kurze Speicherzeiten (<1/4 h) und werden zumeist lokal eingesetzt.
2. Elektrochemische Speicher (Batterien) arbeiten zumeist im Mittelzeitbereich (1/4 h – 2d) und ihr Einsatz kann lokal oder auch auf städtischer/industrieller Ebene erfolgen
3. Thermische Speicher arbeiten ebenfalls zumeist im Mittelzeitbereich, können aber auch für längere Speicherdauern genutzt werden (Fernwärme). Der Einsatz erfolgt sowohl lokal als auch städtisch.
4. Mechanische Speicher (Flywheels) arbeiten ebenfalls zumeist im Kurzzeitbereich, können aber auch für längere Anwendungen genutzt werden. Die Leistungsklasse erstreckt sich von wenigen kWh bis 10 MWh
5. Mechanische Speicher (Druckluftspeicher- und Pumpspeicherkraftwerke) speichern die Energie im Mittelzeitbereich (1/4 h – 2d) und ihr Einsatz erfolgt aufgrund der Größe zumeist regional bis national.
6. Chemische Speicher (Wasserstoff, Methan etc.) sind vor allem für längerfristige bis saisonale Speicherung vorgesehen und werden zumeist als große, regionale bis nationale Anlagen betrieben.

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0

Vorlesung : **Energiespeichertechnologien- & Anwendungen**
MB-Master | Kursnr.: 139030

Lecture: **Energy Storage Technologies and Applications**

Vortragender

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
 +49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

1. Einführung Energiespeicher Teil c –
 „Technologie-Einordnung“

1. Introduction Energy Storage part c –
 „Technology classification“

Vorlesung #1c | Lecture #1c



Ministerium für
 Kultur und Wissenschaft
 des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0



Energy storage technology classification**Content ⇒ Learning objectives**

- Parameters volumetric and gravimetric energy density, efficiency
⇒ classification of the technologies with regard to the criteria and in relation to one another
- Energy storage expansion: temporal development, technological development
⇒ understanding the development

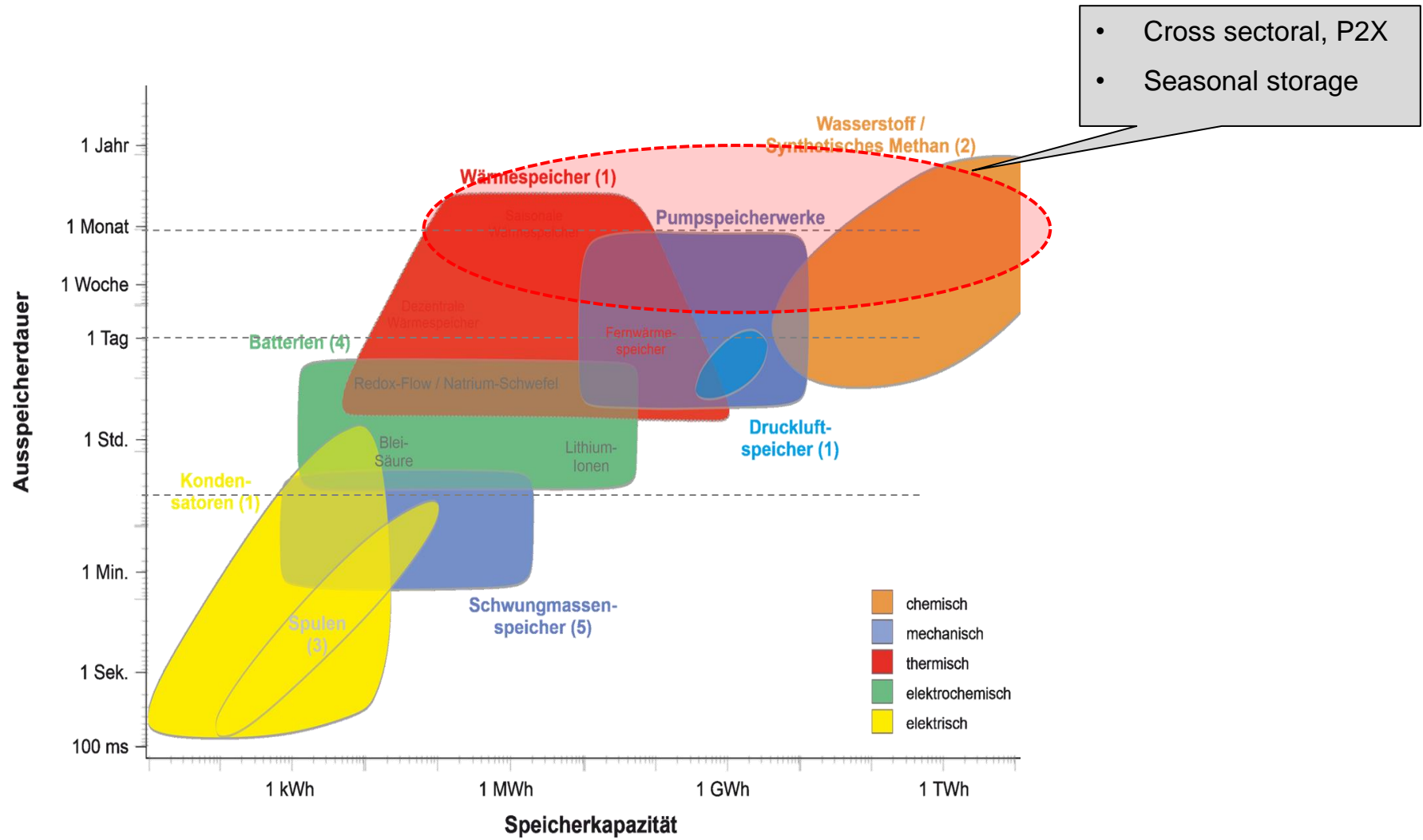
Energiespeicher-Technologien**Inhalt ⇒ Lernziele**

- Kenngrößen volumetrische und gravimetrische Energiedichte, Wirkungsgrad
⇒ **Einsortierung der Technologien bzgl. der Kriterien und in Relation zueinander**
- **Energiespeicherausbau: zeitliche Entwicklung, Technologische Entwicklung**
⇒ **Verständnis die Entwicklung**

3. Energy storage technology classification
3.1 Typical capacity and discharge time

3. Energiespeicher-Technologie Einordnung

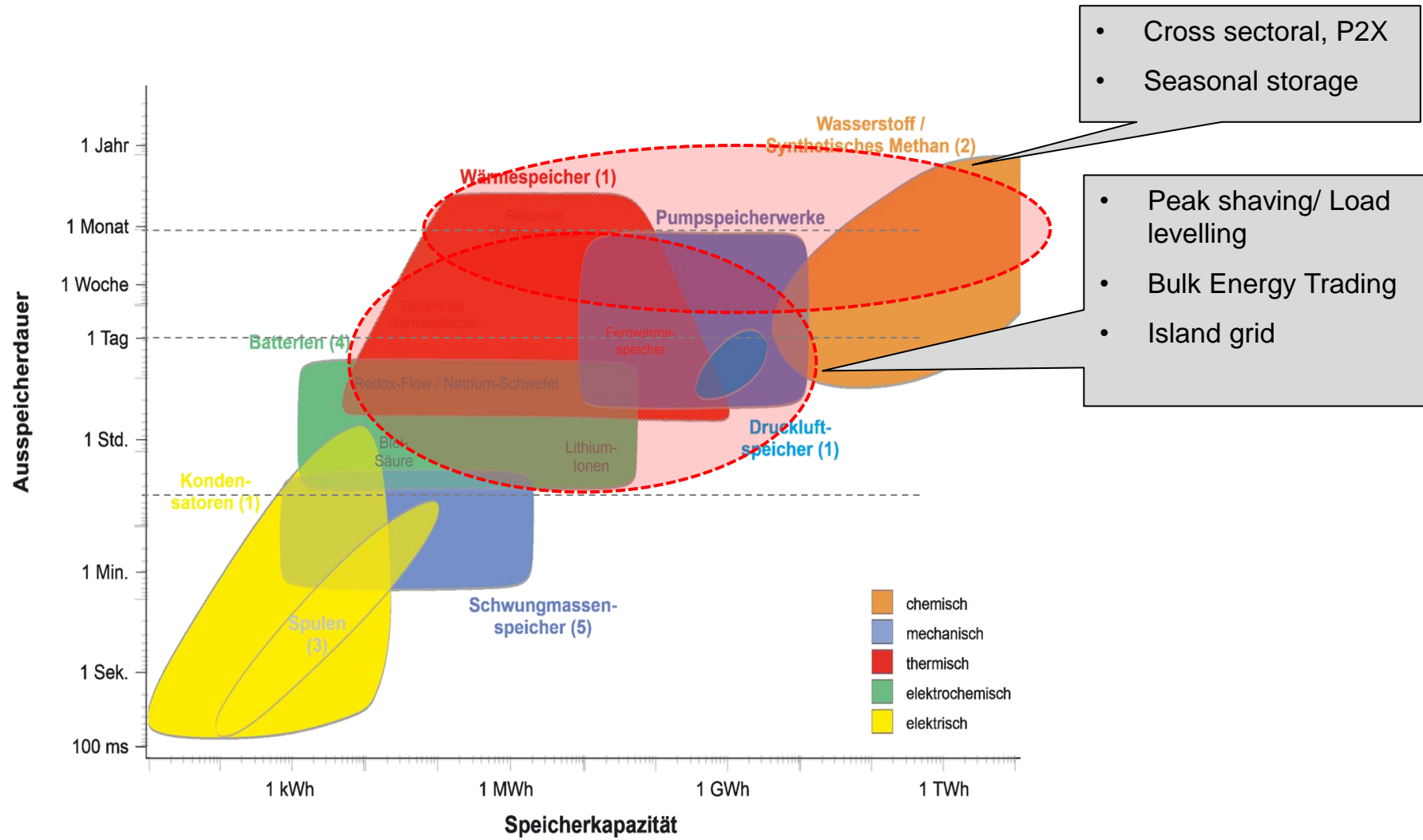
3.1 Typische Anwendungen und deren Entladezeiten



3. Energy storage technology classification
3.1 Typical capacity and discharge time

3. Energiespeicher-Technologie Einordnung

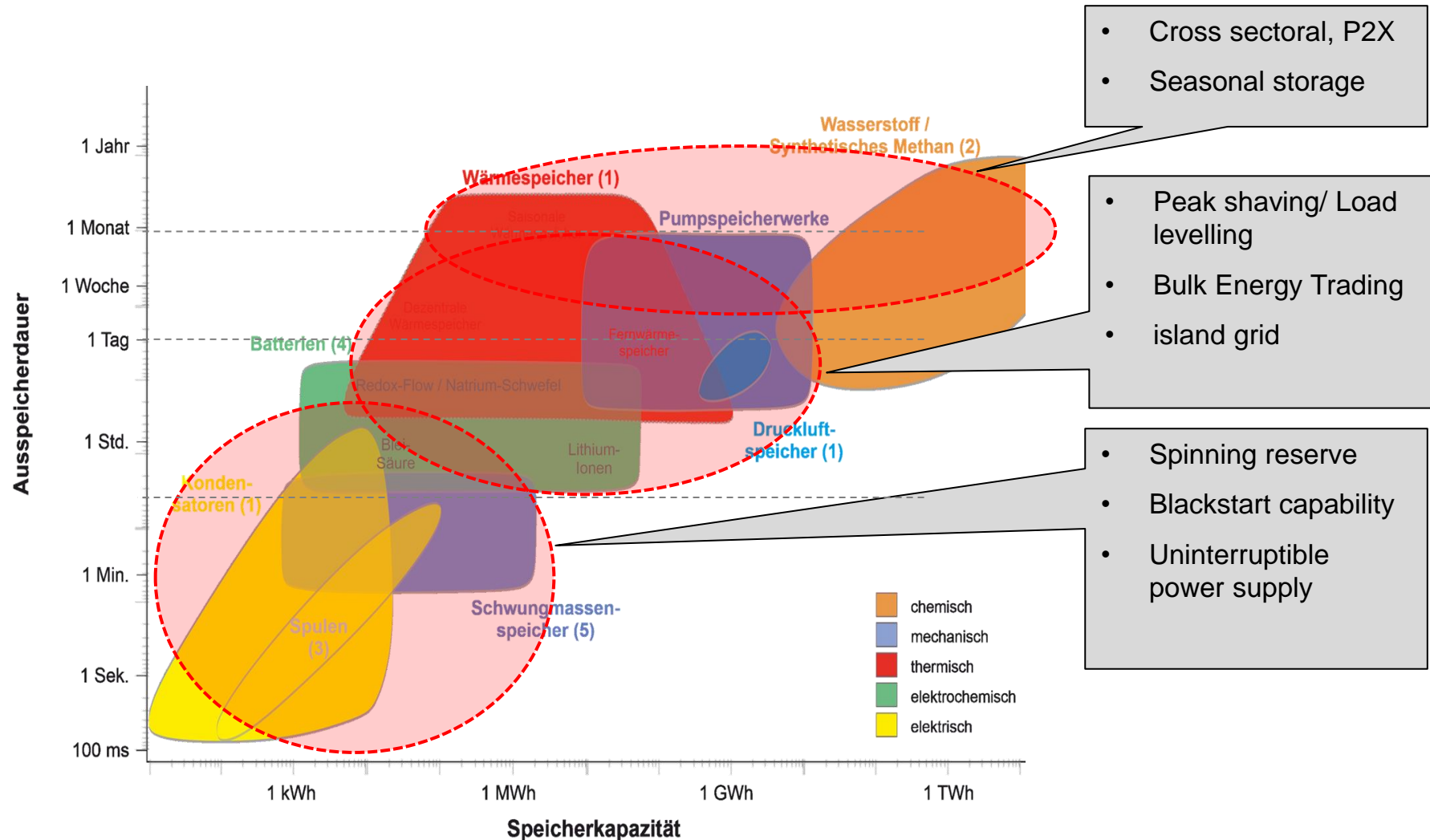
3.1 Typische Anwendungen und deren Entladezeiten



3. Energy storage technology classification
3.1 Typical capacity and discharge time

3. Energiespeicher-Technologie Einordnung

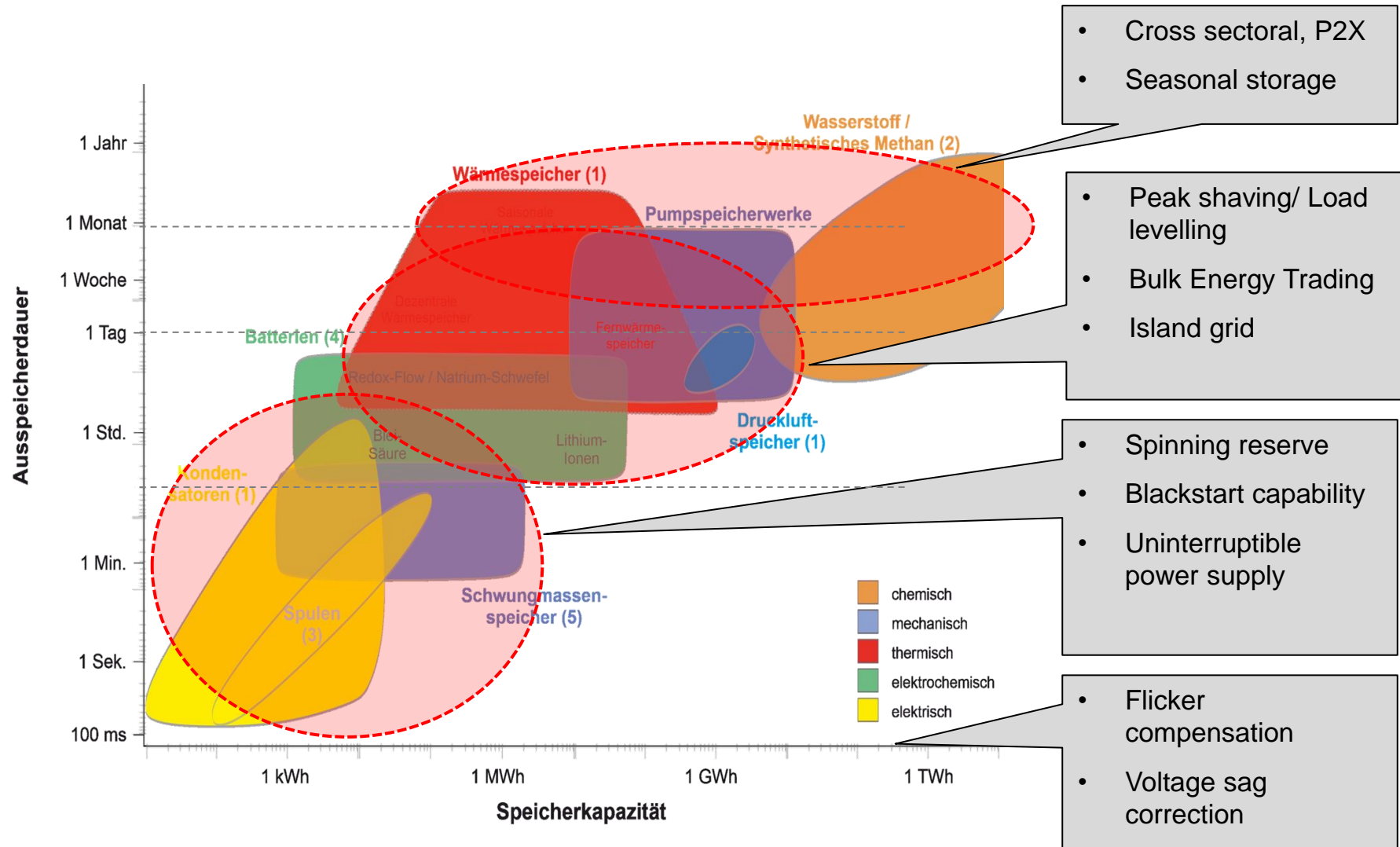
3.1 Typische Anwendungen und deren Entladezeiten



3. Energy storage technology classification
3.1 Typical capacity and discharge time

3. Energiespeicher-Technologie Einordnung

3.1 Typische Anwendungen und deren Entladezeiten



Energy Storage | #1 Introduction

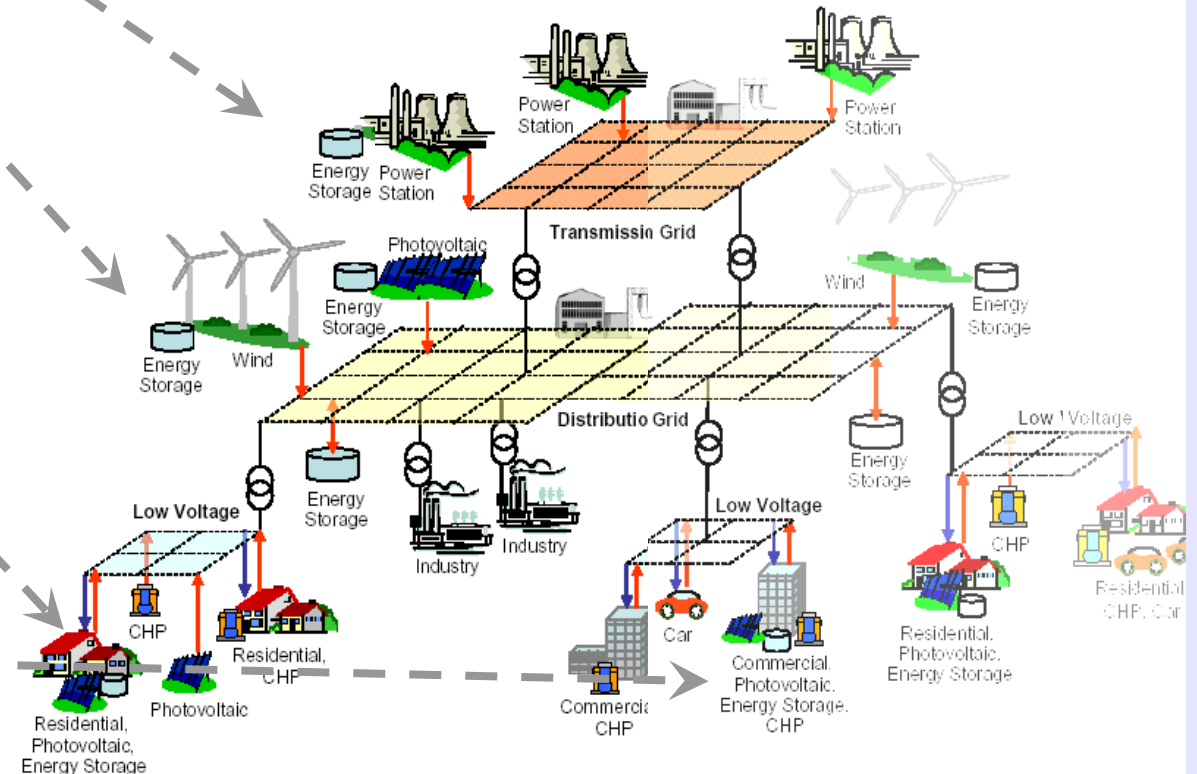
3. Energy storage technology classification
3.2 Typical storage locations for different storage technologies

- Central electrical storage
 - Pumped storage
 - Compressed air storage
- Decentralized electrical storage
 - Lead batteries
 - Lithium batteries
 - NaS batteries
 - Redox flow batteries
- "House" batteries
 - Lead batteries
 - Lithium batteries
- "Virtual" or cross sectoral storage
 - Thermal storage tank plus heat pump
 - Thermal storage plus μ -CHP

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.2 Typische Speicherorte für verschiedene Speicher-Technologien

- **Zentrale elektrische Speicher**
 - Pumpspeicher
 - Druckluftspeicher
- **Dezentrale elektrische Speicher**
 - Blei-Batterien
 - Lithium-Batterien
 - NaS-Batterien
 - Redox-Flow-Batterien
- **„Haus“-Batterien**
 - Blei-Batterien
 - Lithium-Batterien
- **„Virtuelle“ bzw. cross sektorale-Speicher**
 - Therm. Speicher plus Wärmepumpe
 - Therm. Speicher plus μ Kraft-Wärme-Kopplung

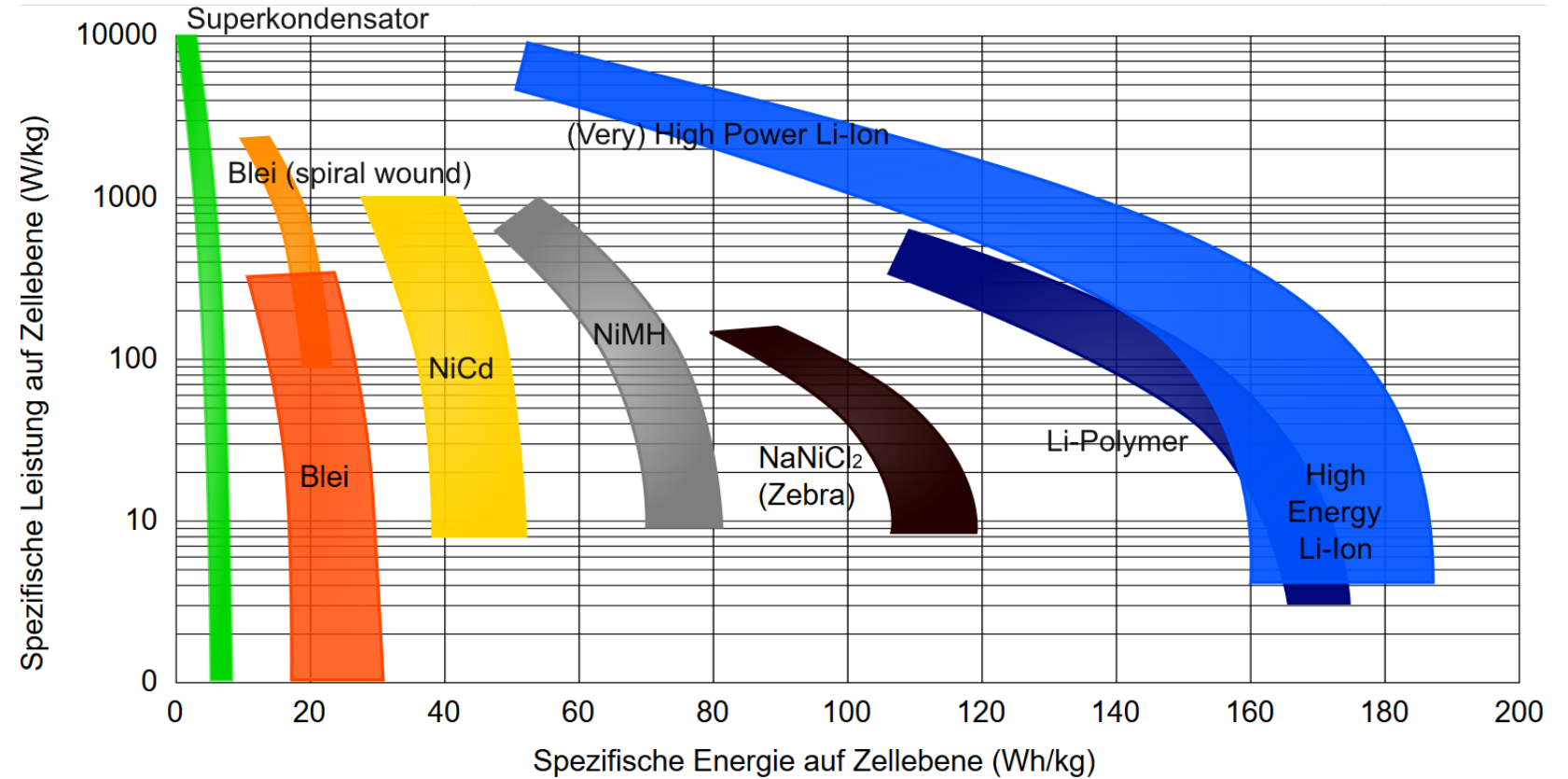


3. Energy storage technology classification
 3.3 Power densities vs. energy densities
 (Ragone plot)

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.3 Leistungsdichte vs. Energiedichte (Ragone Plot) - Batteriespeicher

Speicherdiagramm: Leistungs- vs. Energiedichten



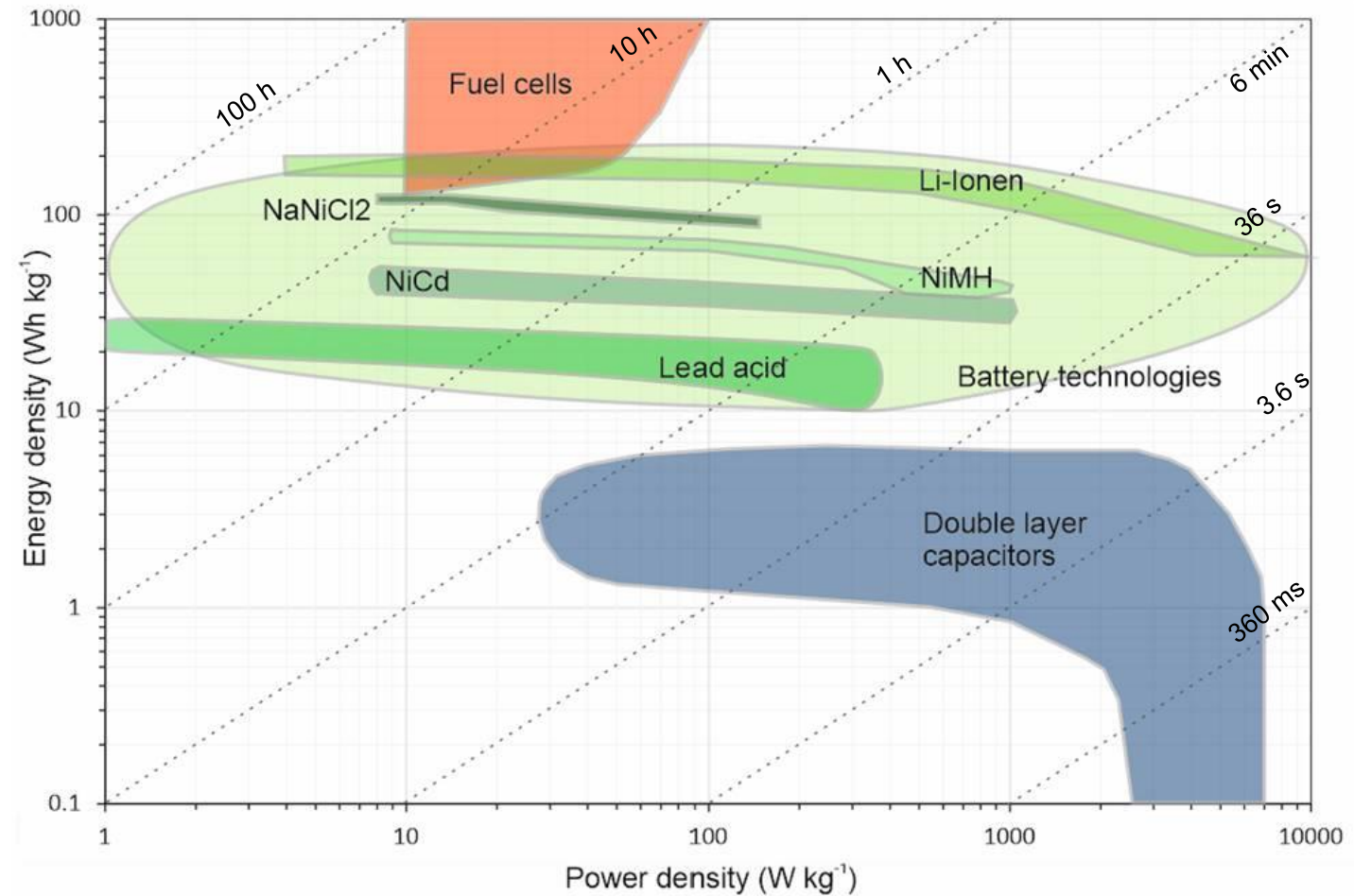
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/21/Ragone-Diagramm.svg>

3. Energy storage technology classification
 3.3 Power densities vs. energy densities
 (Ragone plot)

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.3 Leistungsdichte vs. Energiedichte (Ragone Plot) – Elektrische Speicher

Speicherdiagramm: Leistungs- vs. Energiedichten

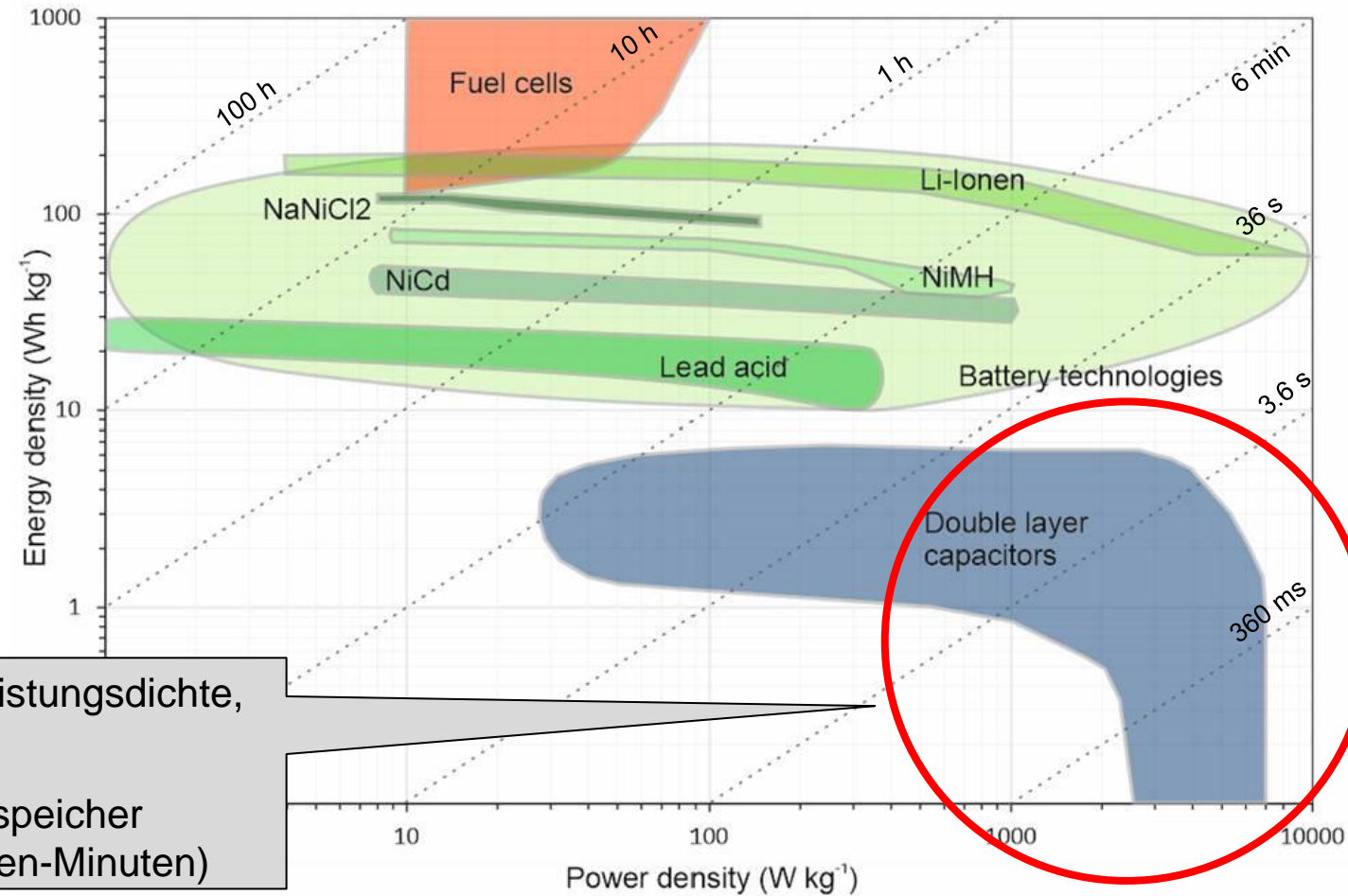


3. Energy storage technology classification
 3.3 Power densities vs. energy densities
 (Ragone plot)

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.3 Leistungsdichte vs. Energiedichte (Ragone Plot) – Elektrische Speicher

Speicherdiagramm: Leistungs- vs. Energiedichten



Hohe Leistungsdichte,
 Zumeist
 Kurzzeitspeicher
 (Sekunden-Minuten)

3. Energy storage technology classification
 3.3 Power densities vs. energy densities
 (Ragone plot)

High power density

- Mostly short-term storage (seconds-minutes)

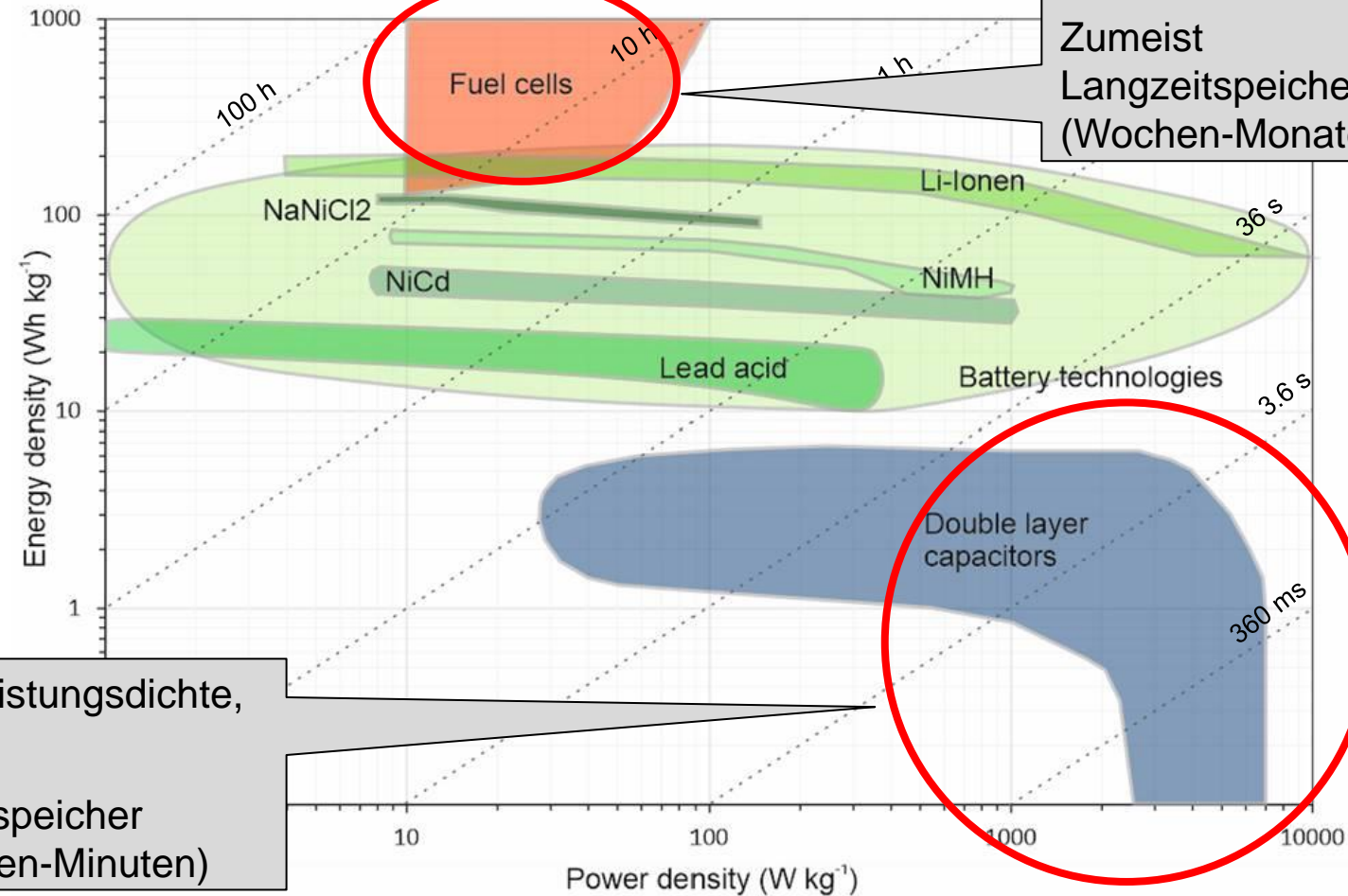
High energy density

- Mostly long-term storage (weeks-months)

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.3 Leistungsdichte vs. Energiedichte (Ragone Plot) – Elektrische Speicher

Speicherdiagramm: Leistungs- vs. Energiedichten



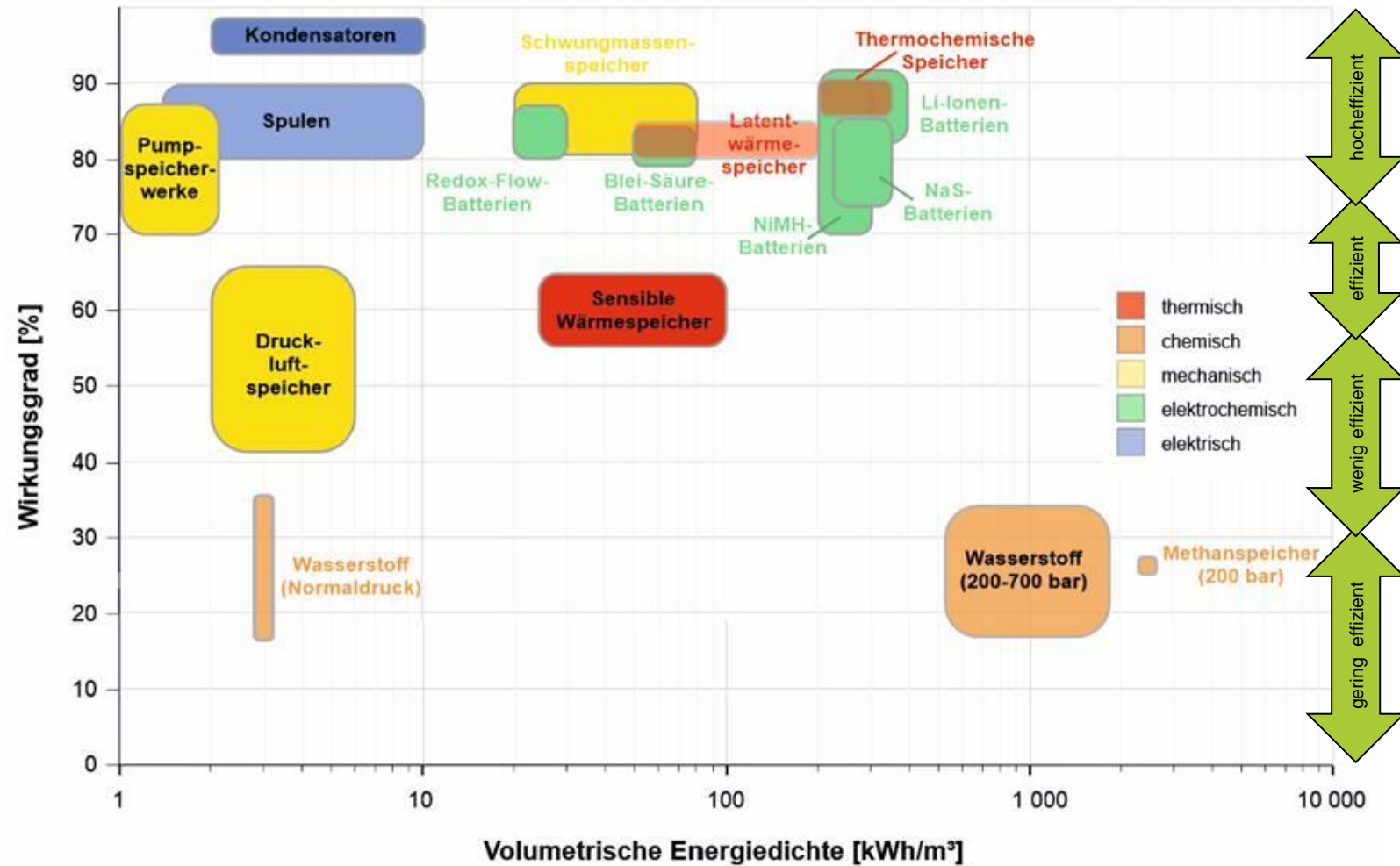
Hohe Energiedichte,
 Zumeist
 Langzeitspeicher
 (Wochen-Monate)

Hohe Leistungsdichte,
 Zumeist
 Kurzzeitspeicher
 (Sekunden-Minuten)

3. Energy storage technology classification
 3.4 Efficiency and volumetric energy density

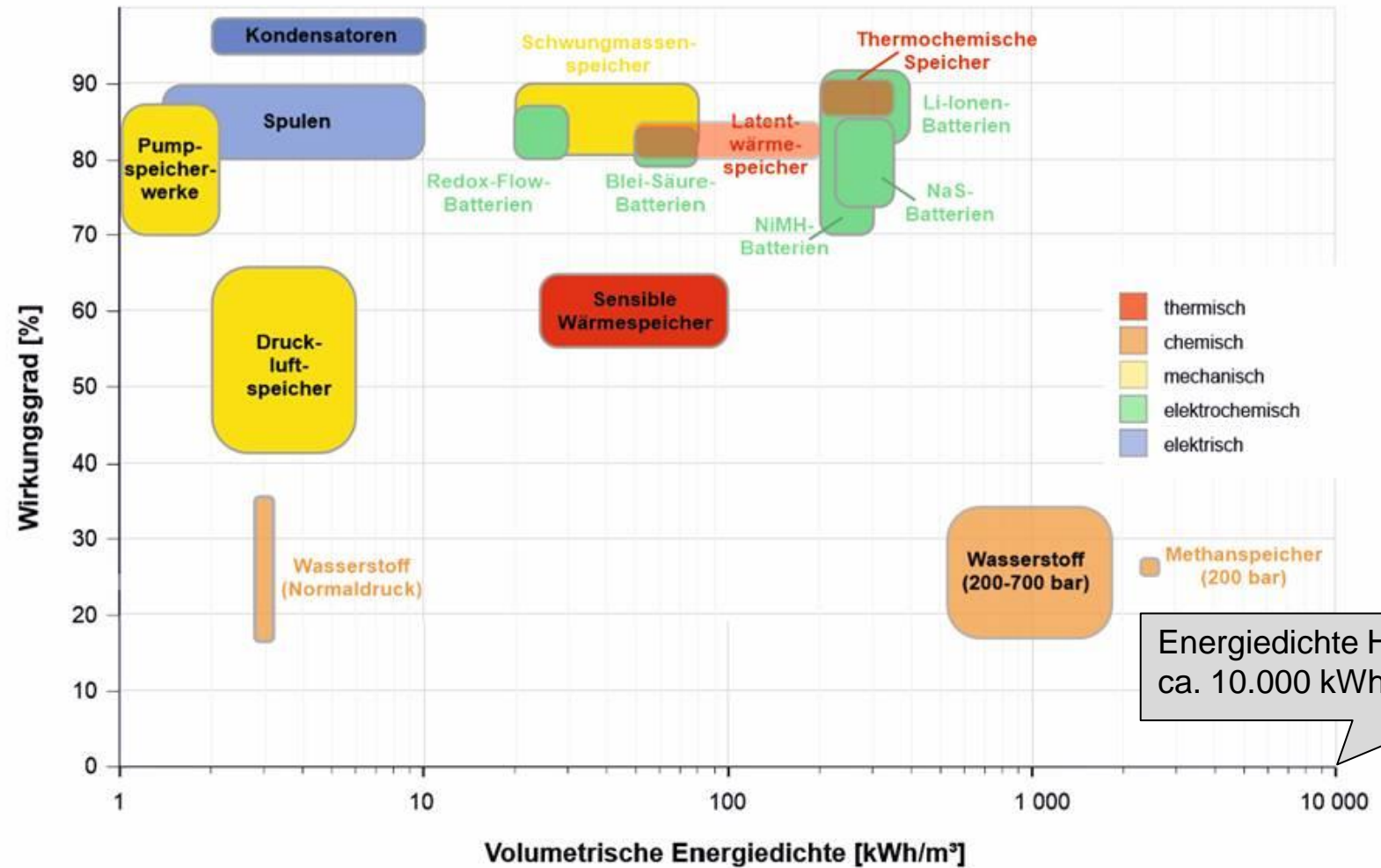
3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.4 Wirkungsgrad und volumetrische Energiedichte



3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.4 Wirkungsgrad und volumetrische Energiedichte



3. Energy storage technology classification

3.4 Efficiency and volumetric energy density

Technology

- Flywheel
- Pumped storage
- Compressed air storage
- Capacitors
- SMES
- Lithium batteries
- NaS
- NiMH
- Lead batteries
- Redox flow batteries
- Hydrogen storage
- Methane storage
- Sensitive heat storage
- Latent heat storage
- Thermochemical heat storage

for comparison oil

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.4 Wirkungsgrad und volumetrische Energiedichte

Technologie	Round-Trip-Efficiency ¹⁾	Energiedichte volumetrisch kWh/m ³ ²⁾
Schwungradmassenspeicher	81-90%	20-80
Pumpspeicher	70-87%	0,2-2
Druckluftspeicher	42-67%	2-6
Kondensatoren	94-98%	1-10
SMES	80-90%	0,5-10
Lithium-Batterien	83-92%	200-400
NaS	75-85%	230-370
NiMH	70-90%	200-300
Blei-Batterien	79%-84%	50-80
Redox-Flow-Batterien	70-78%	20-30
Wasserstoffspeicher	17-35%	3 (Normaldruck) 530-1855 (200-700 bar)
Methanspeicher	24%	2580 (200 bar)
Sensible Wärmespeicher	55-65%	25-100
Latentwärmespeicher	80-85%	50-200
Thermochemische Wärmespeicher	85-90%	200-350
z. Vgl. Heizöl	-	10.000

Quelle: 1) https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/07/f65/Storage%20Cost%20and%20Performance%20Characterization%20Report_Final.pdf

2) <https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>

3. Energy storage technology classification

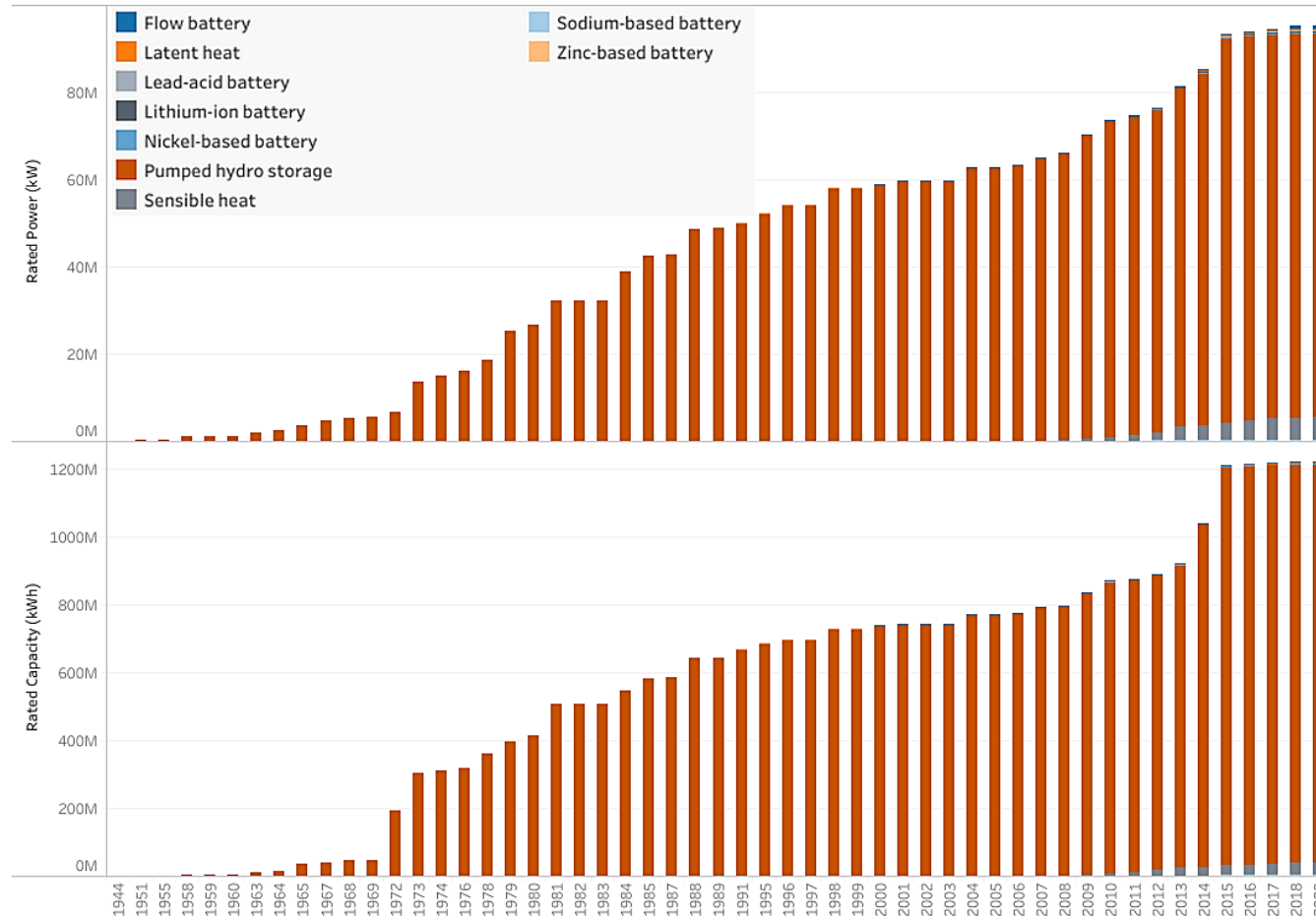
3.5 Development of energy storage expansion worldwide

- just under 100 GW of energy storage is installed
- with approx. 1200 GWh capacity
- i.e. on average approx. 12 full load hours (e.g. 1 MW with 12 MWh)
- of which over 90% are pumped storage power plants
- less than 5% thermal storage
- less than 2% battery storage

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.5 Entwicklung des Energiespeicherausbaus weltweit

Running Sum of Energy Storage Installations by Year



- knapp unter 100 GW Energiespeicher sind installiert
- mit ca. 1200 GWh Kapazität
- d.h. im Mittel ca. 12 Volllaststunden (Bspw.: 1 MW mit 12 MWh)
- davon über 90% Pumpspeicher-Kraftwerke
- weniger als 5% thermische Speicher
- weniger als 2% Batteriespeicher

Source: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>

3. Energy storage technology classification

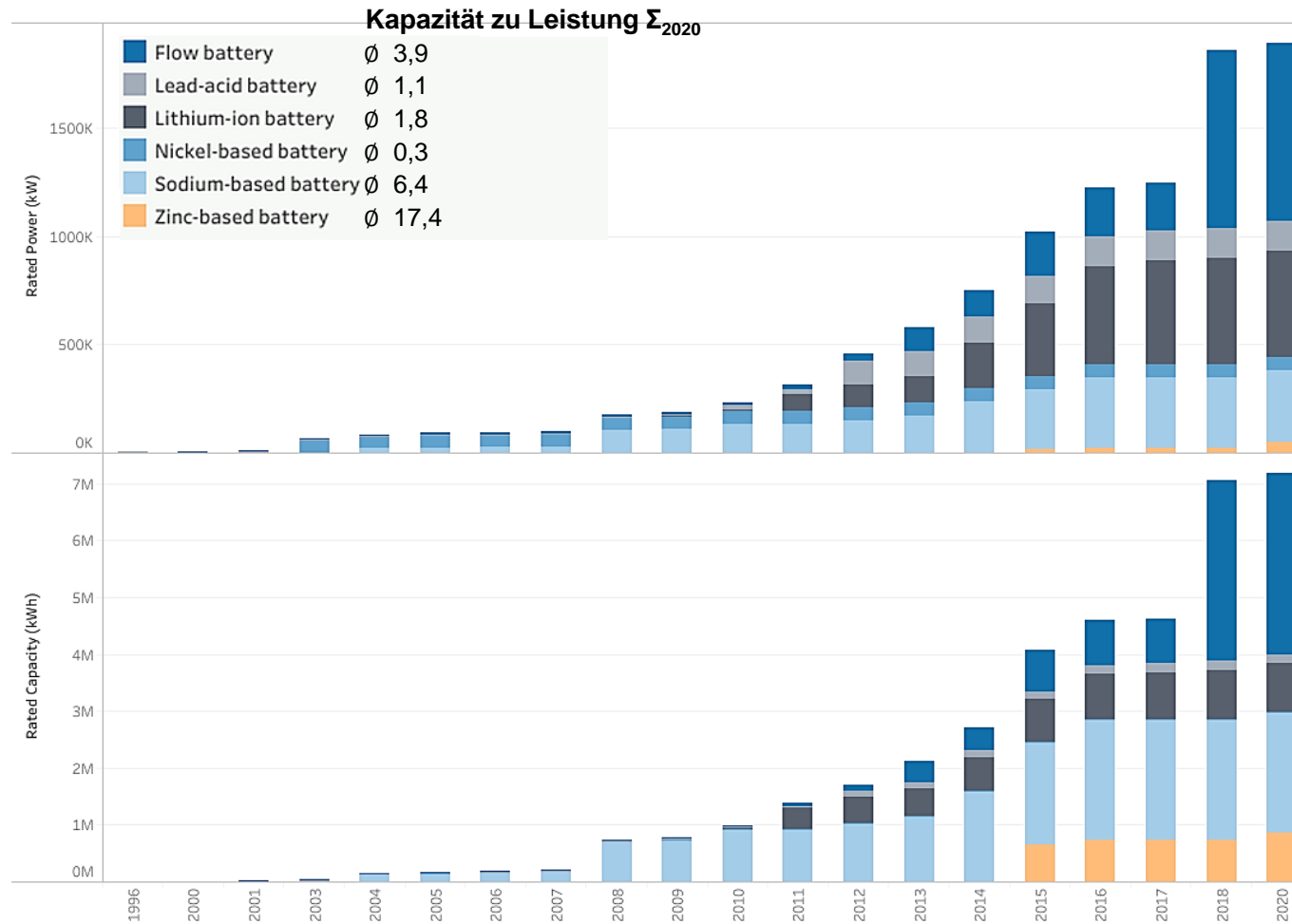
3.6 Development of battery storage expansion worldwide

- Although Li-ion batteries are the world leaders in terms of production volume, they are not necessarily the leaders in large-scale storage.
- Redox flow batteries are just as important here
- The capacity-to-performance ratio is characteristically for every type of battery or application

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.6 Entwicklung der Batteriespeicherausbaus weltweit

Running Sum of Energy Storage Installations by Year



- Obwohl Li-Ionen Batterien bezüglich der Produktionsmengen weltweit führend sind, sind sie bei Großspeichern nicht unbedingt führend.
- Redox-Flow-Batterien sind hier ebenso wichtig
- Das Kapazitäts-zu-Leistungs-Verhältnis ist für jeden Batterietyp bzw. Anwendung charakteristisch

Source: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public/statistics.html>

3. Energy storage technology classification

3.7 Summary / Take aways

1. Different applications usually have clear boundary conditions with regard to capacity and discharge time, so that only certain technologies come into question for certain applications.
2. Electric storage facilities can be integrated on different network levels, the technology also depends on the necessary capacity and discharge time.
3. High power density and high energy density are usually opposite, i.e. the technology that offers one is usually significantly worse in the other category.
4. The efficiency of the energy store can be highly efficient (close to 100%) or very low (approx. 30%). However, as a rule, less efficient storage technologies offer other, relevant advantages (e.g. high energy density).
5. The expansion of energy storage has been increasing worldwide for years and is dominated by pumped storage power plants.
6. Other storage systems are primarily thermal storage systems and currently also electrochemical storage systems.

3. Energiespeicher Technologie Einordnung

3.7 Kurzzusammenfassung / „Take aways“

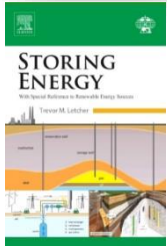
1. Verschiedene Anwendungen haben zumeist klare Randbedingungen bezüglich Kapazität und Ausspeicherzeit, so dass für bestimmte Anwendungen auch nur bestimmte Technologien in Frage kommen.
2. Elektrische Speicher können auf verschiedenen Netzebenen eingebunden werden, die Technologie ergibt sich hier auch nach notwendiger Kapazität und Ausspeicherzeit.
3. Hohe Leistungsdichte und hohe Energiedichte sind zumeist gegensätzlich, d.h. die Technologie die das eine bietet ist in der anderen Kategorie zumeist deutlich schlechter.
4. Der Wirkungsgrad des Energiespeichers kann hocheffizient (nahe 100%) sein oder aber sehr gering (ca. 30%). Jedoch bieten im Regelfall wenig effiziente Speichertechnologien andere, relevante Vorteile (bspw. hohe Energiedichte).
5. Der Zubau von Energiespeichern ist seit Jahren weltweit steigend und wird vom Pumpspeicherkraftwerk dominiert.
6. Andere Speicher sind vor allem thermische Speicher und aktuell vor allem auch elektrochemische Speicher.

Weiterführende Literatur

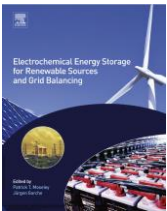
Further Reading



- Michael Sterner, Ingo Stadler (Hrsg.);
„Energiespeicher – Bedarf – Technologien – Integration“
- Kapitel 1 „Energiespeicher im Wandel der Zeit“
 - Kapitel 2 „Definition und Klassifizierung von Energiespeichern“










- Trevor M. Letcher (ed.); „STORING ENERGY:
with Special Reference to Renewable Energy Sources“
- Chapter 1 „The Role of Energy Storage in Low-Carbon Energy Systems “



- Moseley, P.T.; Garch J. [Hrsg./Ed.]: „Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing“
- Chapter 1. The Exploitation of Renewable Sources of Energy for Power Generation
 - Chapter 2. Classification of Storage Systems
 - Chapter 3. Challenges of Power Systems



- Ausfelder et al. „Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung“
S. 17-35 / Kapitel 1-3 „Einleitung“, „Gesamtkontext Energiesystem“, „Bewertungskriterien und Szenarien für den integrierten Einsatz von Energiespeichertechnologien “

†CC-Lizenzen	Bezeichnung	Version	Link zum Lizenz-/Vertragstext
	CC0 Bedingungslose Lizenz	Vers. 1.0	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/legalcode
	CC-BY Attribution (Namensnennung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by/1.0/legalcode
	CC-BY-SA Attribution ShareAlike (Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-ND Attribution NoDerivatives (Namensnennung-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nd/1.0/legalcode
	CC-BY-NC Attribution NonCommercial (Namensnennung-Nicht kommerziell)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-SA Attribution NonCommercial ShareAlike (Namensnennung-Nicht kommerziell-Weitergabe unter gleichen Bedingungen)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/1.0/legalcode
	CC-BY-NC-ND Attribution NonCommercial NoDerivatives (Namensnennung-Nicht kommerziell-Keine Bearbeitung)	Vers. 4.0 Vers. 3.0 Vers. 2.0 Vers. 1.0	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/legalcode http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/1.0/legalcode

Prof. Dr. Christian Doetsch

Lehrstuhl »Cross Energy Systems«

c/o Fraunhofer UMSICHT
+49 208 8598-1195

christian.doetsch@rub.de

QR-Code: Business Card



ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB

Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministry of Culture and Science
of the State of
North Rhine-Westphalia



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
All logos and explicitly marked elements used are excluded from this license. www.creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0