

# Long-Term Storage Flywheel

Neue Ansätze zur Erhöhung der wirtschaftlich nutzbaren Speicherzeit und Sicherheit

Alexander Schulz

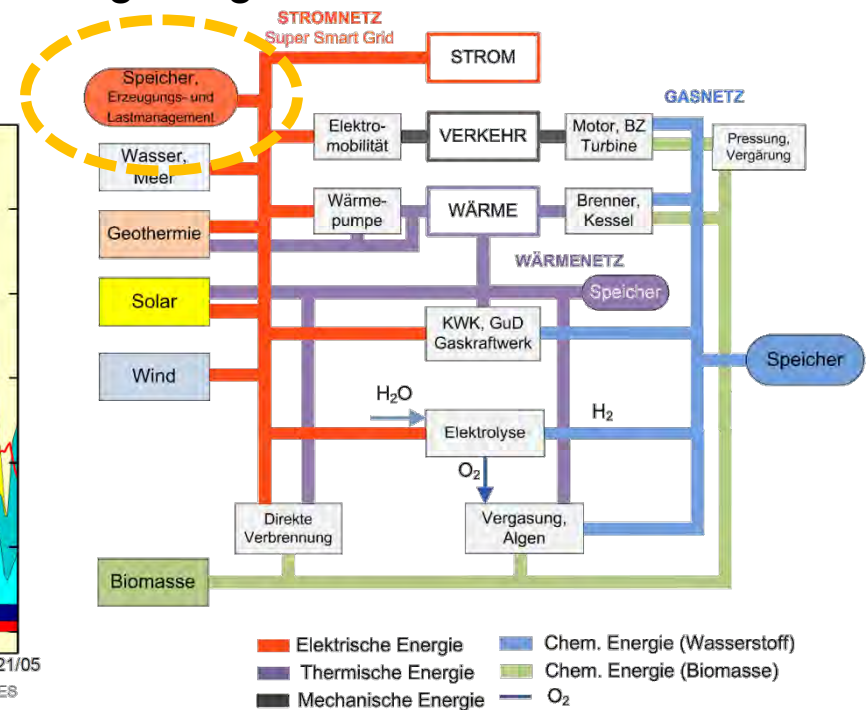
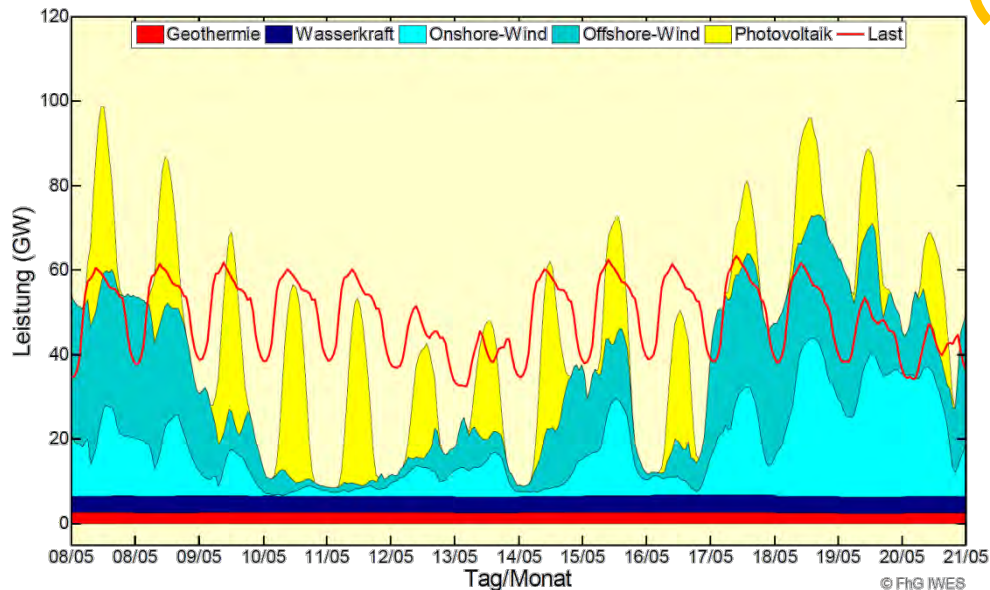
Vienna University of Technology  
Institute of Mechanics and Mechatronics  
Measurement and actuator division  
[www.mec.tuwien.ac.at](http://www.mec.tuwien.ac.at)

- Ausgangssituation
  - Modellrechnung 2050
  - Plus-Energie-Haus
  - Speichertechnologien
  - Schwungradspeicher
- LTS-Flywheel
  - Ziele und Innovationen
  - Forschungsschwerpunkte
  - Redundanzkonzept
  - Flywheel Auslegungs-/Simulations-/Optimierungs-Tool
  - Überblick – Ergebnisse aus den Forschungsschwerpunkten
- Nächste Schritte

# Bedarf an Speichern für elektrische Energie

## Modellrechnung 2050

- 85% erneuerbare Energie, vernetzte Strom-, Wärme- und Gasnetze
- Pufferung von elektrischer Energie aus zeitlich inflexiblen, unkontrolliert schwankenden, regenerativen Primärenergieträgern
- Regelenergie (Netzstabilisierung)

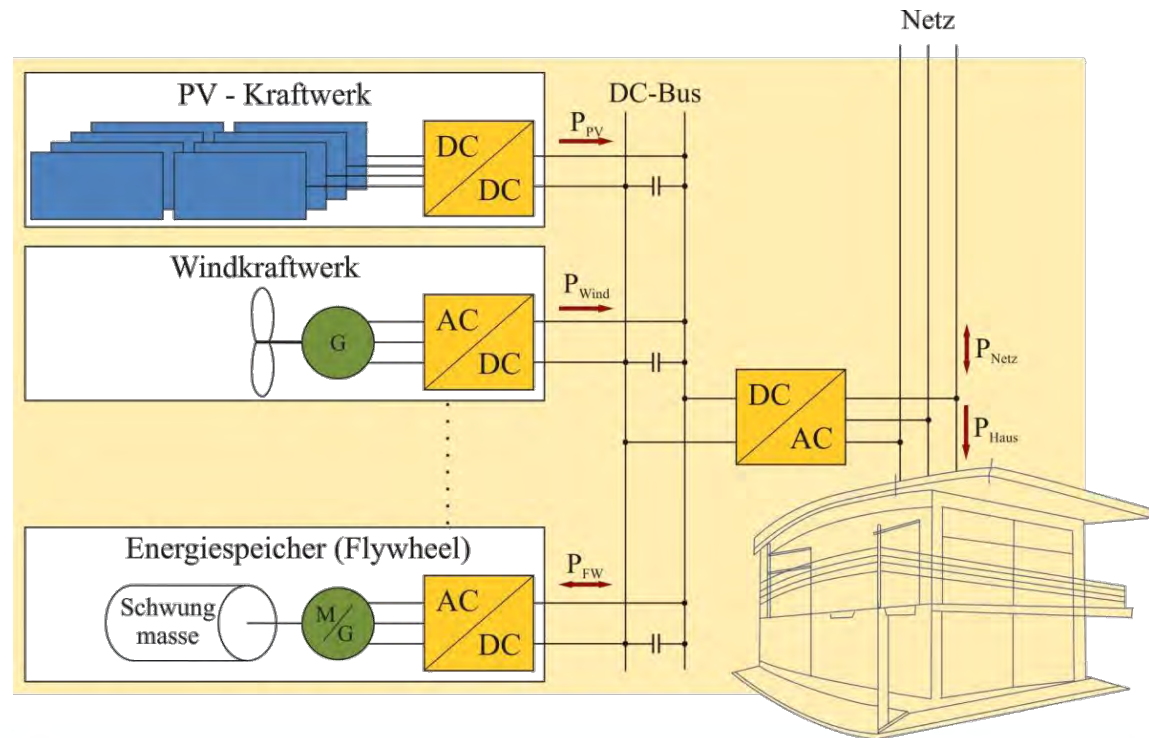
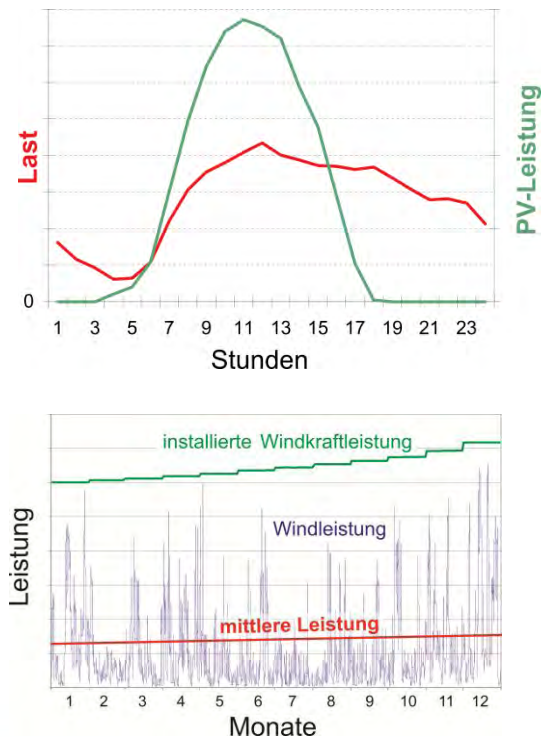


Quelle: „Leitstudie 2010 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf)

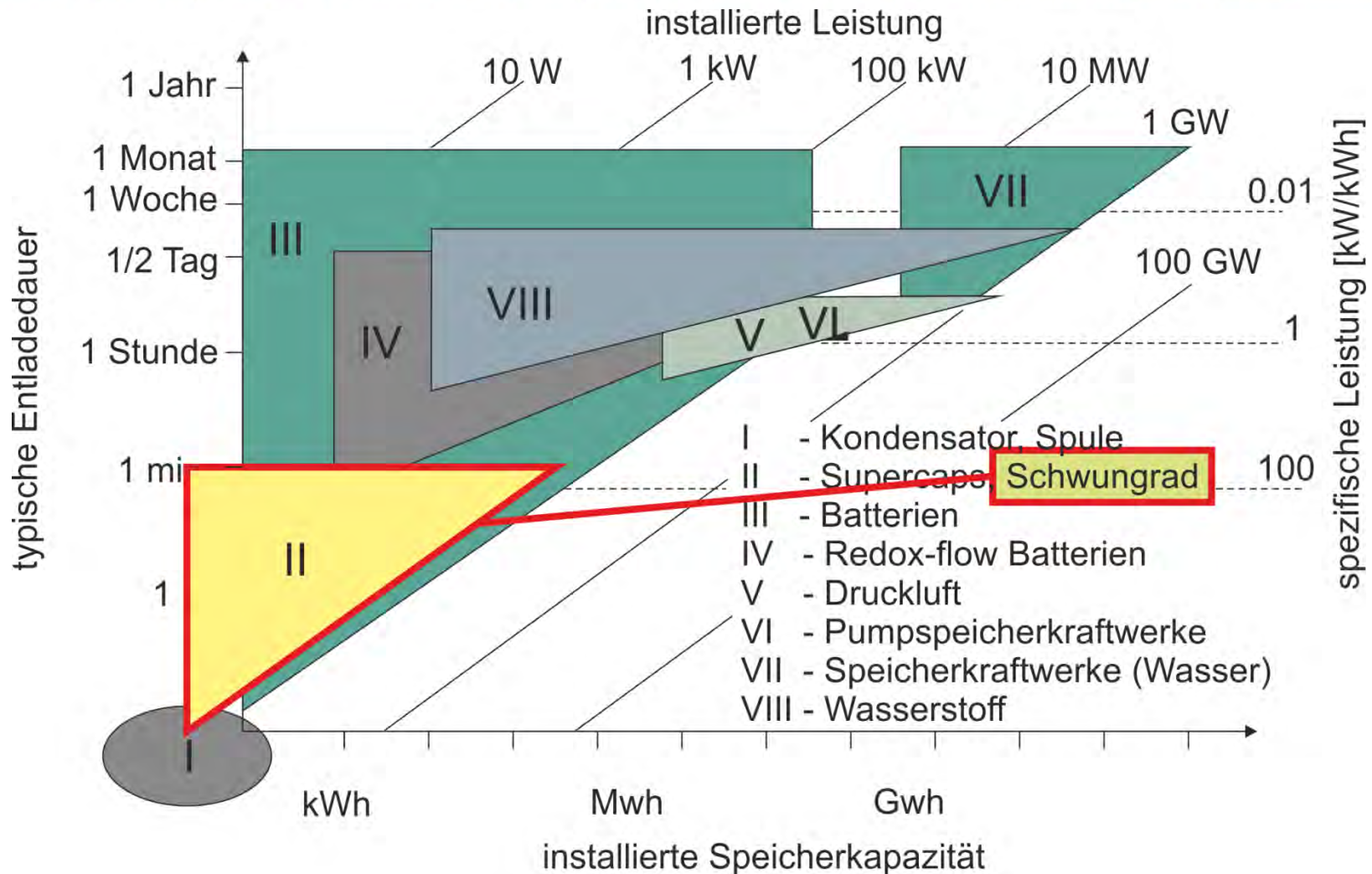
# Bedarf an Speichern für elektrische Energie

## Plus-Energie-Haus/Energieautarkes Haus

- Pufferung von elektrischer Energie aus zeitlich inflexiblen, unkontrolliert schwankenden, regenerativen Primärenergieträgern
- Pufferung von Spitzenlasten zur Optimierung der Netzauslastung



# Speichertechnologien für elektrische Energie



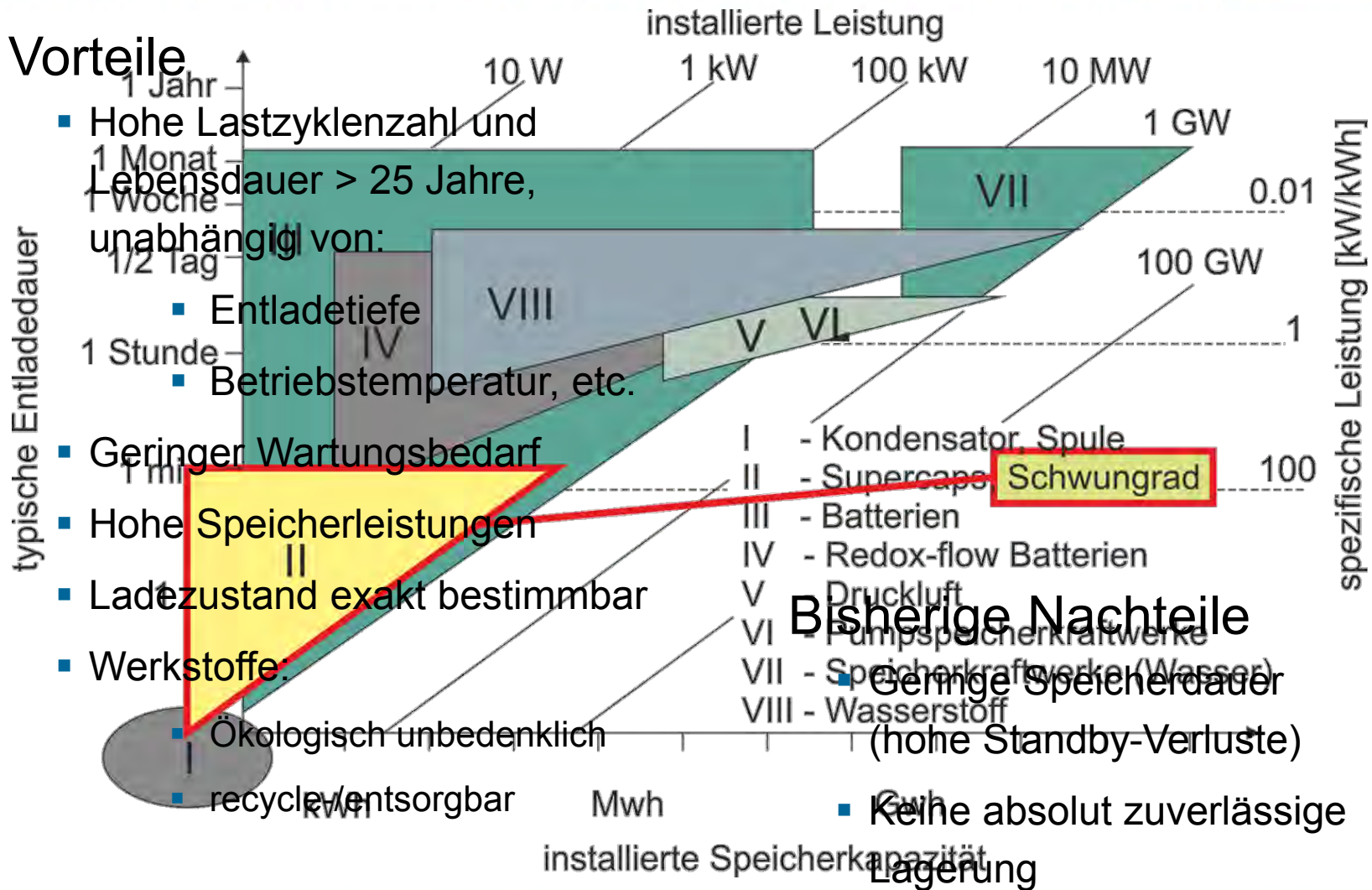
- I - Kondensator, Spule
- II - Supercaps **Schwungrad**
- III - Batterien
- IV - Redox-flow Batterien
- V - Druckluft
- VI - Pumpspeicherkraftwerke
- VII - Speicherkraftwerke (Wasser)
- VIII - Wasserstoff

Quelle: [http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA-4\\_06\\_Sauer\\_Optionen\\_Speicher\\_layout.pdf](http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA-4_06_Sauer_Optionen_Speicher_layout.pdf)

# Schwungradspeicher

## Vorteile

- Hohe Lastzyklenzahl und Lebensdauer > 25 Jahre, unabhängig von:
  - Entladetiefe
  - Betriebstemperatur, etc.
- Geringer Wartungsbedarf
- Hohe Speicherleistungen
- Ladezustand exakt bestimmbar
- Werkstoffe:
  - Ökologisch unbedenklich
  - recycle/entsorgbar



## Bisherige Nachteile

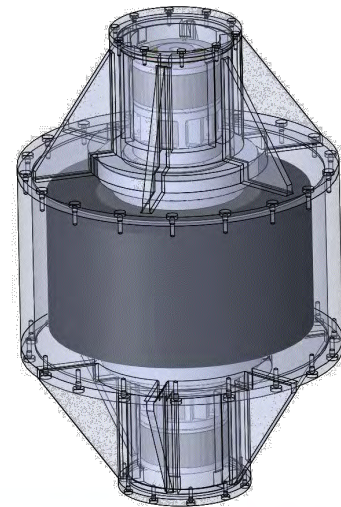
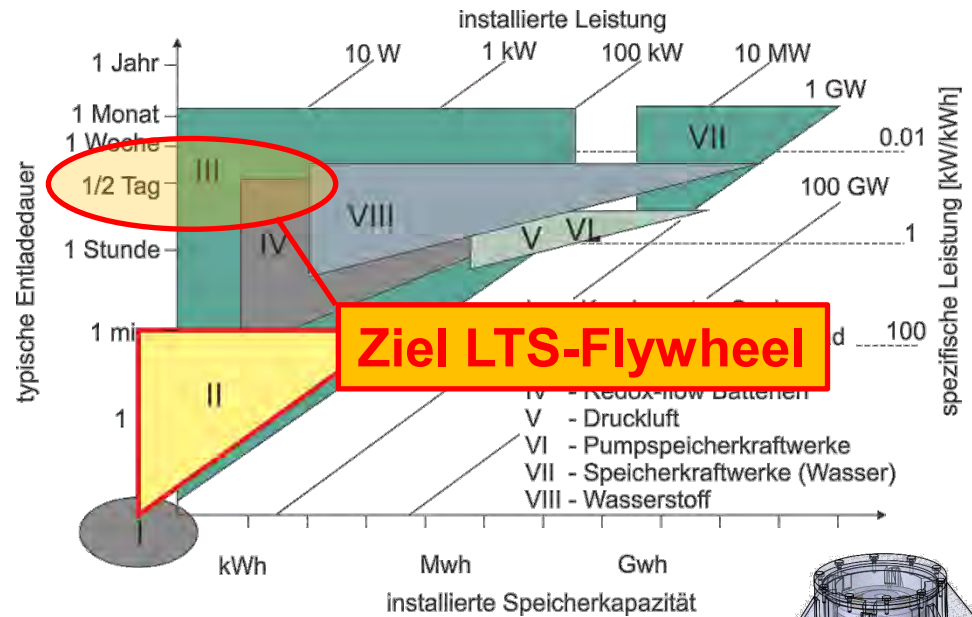
- Geringe Speicherdauer (hohe Standby-Verluste)
- Keine absolut zuverlässige Lagerung

# "LTS-Flywheel als 12h-Energiespeicher"

## Innovationssprung bei Flywheels:

- wesentliche Erhöhung der Speicherzeit
  - von 15 min auf 12 h ( $\eta_{\text{Load}} = 80\%$ )
- Hohe Zuverlässigkeit
- Geringe Systemkosten

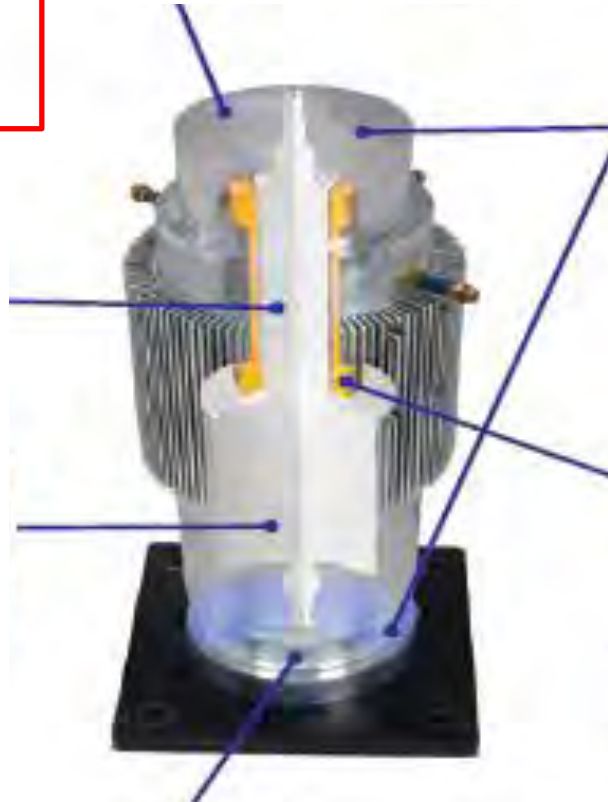
- Dezentrale Zwischenspeicherung von elektrischer Energie (z.B. Photovoltaikanlagen)
- Technologische Basis für das Gebäude der Zukunft, insbesondere dem Plus-Energie-Haus



Vycon VDC-XE

**Energieinhalt**

$$TSE = \frac{1}{2} I_z [\Omega_{\max}^2 - \Omega_{\min}^2]$$





## Schwungrad/Rotor

- Speicherbare Energie
- Festigkeit
- Eigenfrequenzen und –schwingungsformen
- Lagerkräfte
- Material- und Herstellungskosten

## Kaskadiertes Hybridmagnetlagersystem mit hoher Betriebssicherheit zur radialen und axialen Stabilisierung

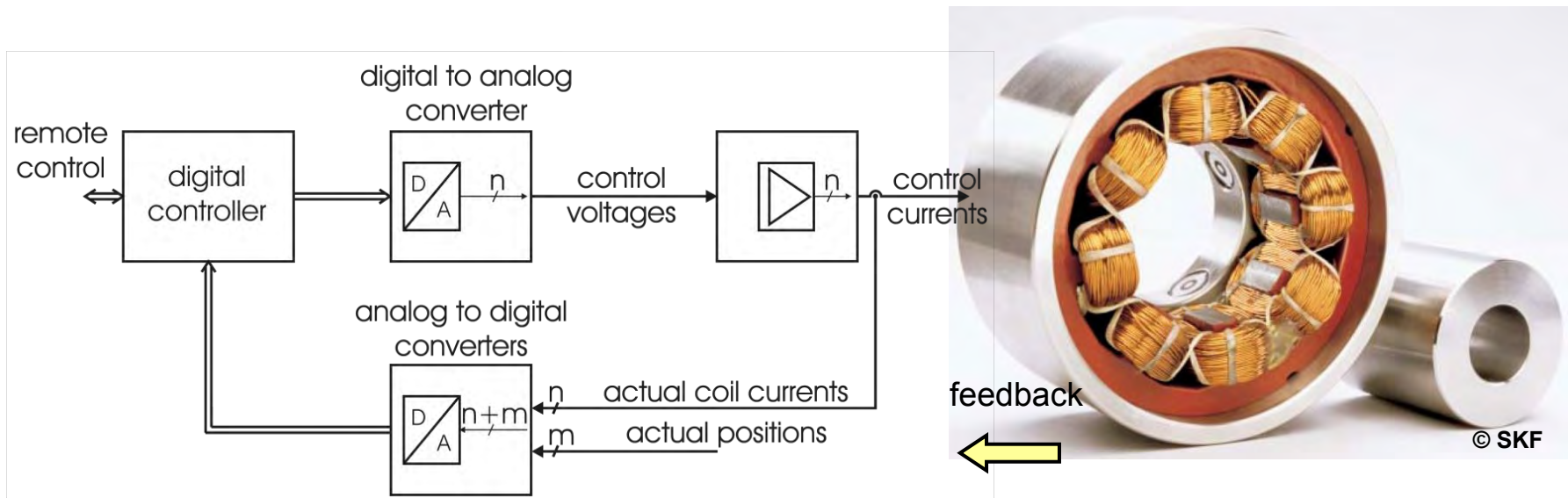
- Permanentmagnetlager zur Aufbringung statischer Lagerkräfte
- Hocheffizienz-AMB für minimalen Energieverbrauch im Regelbetrieb
- Im Bedarfsfall zuschaltendes Hochleistungs-AMB (zum Abfangen externer Störkräfte)
- Redundantes Hochleistungs-AMB-System mit Backup-Stromversorgung

## Vakuumtechnik/Gasreibung

## Energieeffiziente Betriebsführung

## Volladaptive digitale Regelung und Ansteuerung der Magnetlagerelektronik

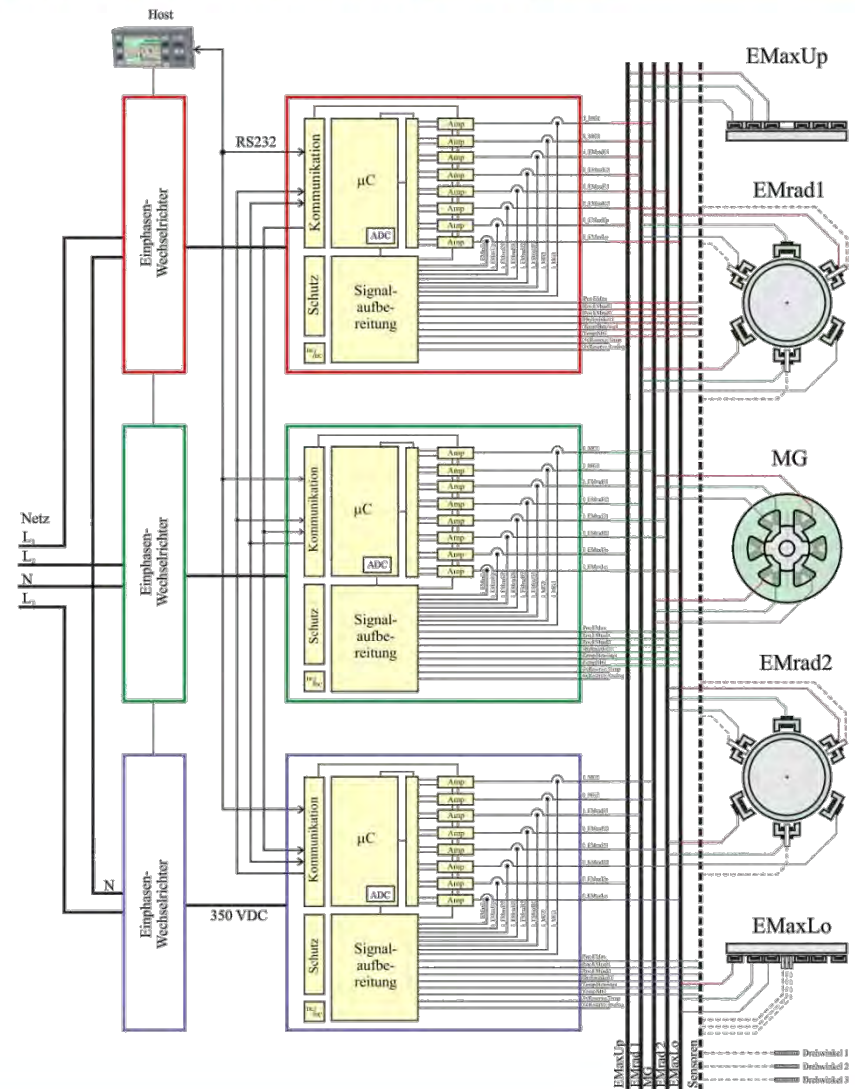
- „Active Vibration Control“ für aktive Magnetlager
- Adaptive Reglerabtastrate zur Minimierung des Reglerenergiebedarfs
- Adaptive Pulsweitenmodulationsfrequenz und adaptive Zwischenkreisspannungsregelung für geringste Verluste in den Leistungskonvertern



# Blockschaltbild – Zuverlässiges Regelsystem

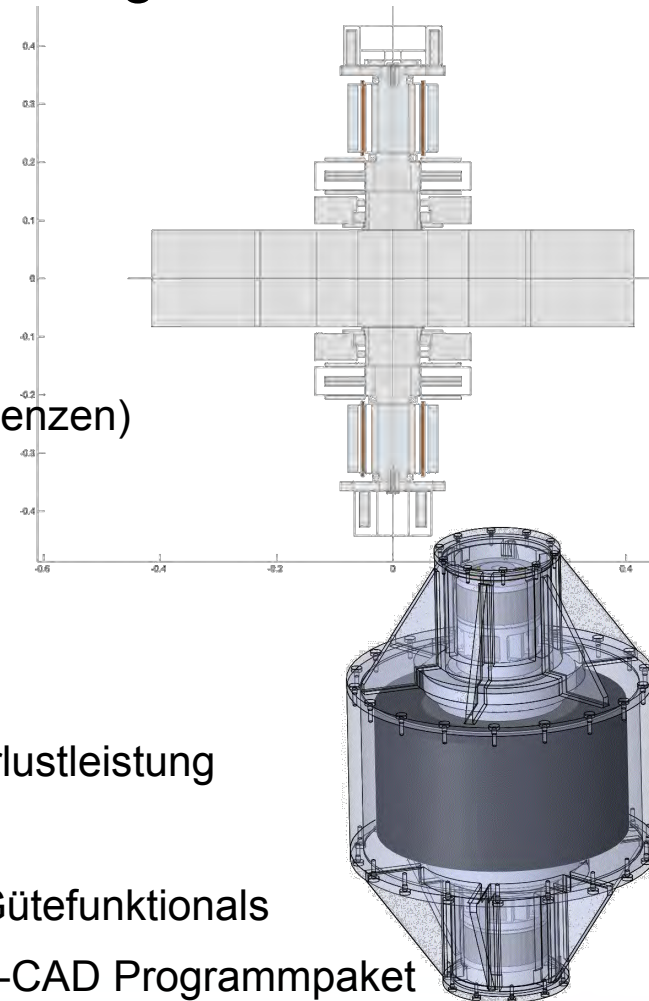
## Redundanzkonzept

- 2 aus 3 Redundanz:
- 3 identische Regel-/Ansteuer-Baugruppen
- Auslegung:
  - Alle Baugruppen funktionsfähig: max. M/G Leistung und Lagerkapazität (z.B. Erdbeben)
  - Ausfall einer Baugruppe: Kontrolliertes Herunterfahren inkl. Backupversorgung der Lagerung gewährleistet



## Flywheel Auslegungs-/Simulations-/Optimierungs-Tool

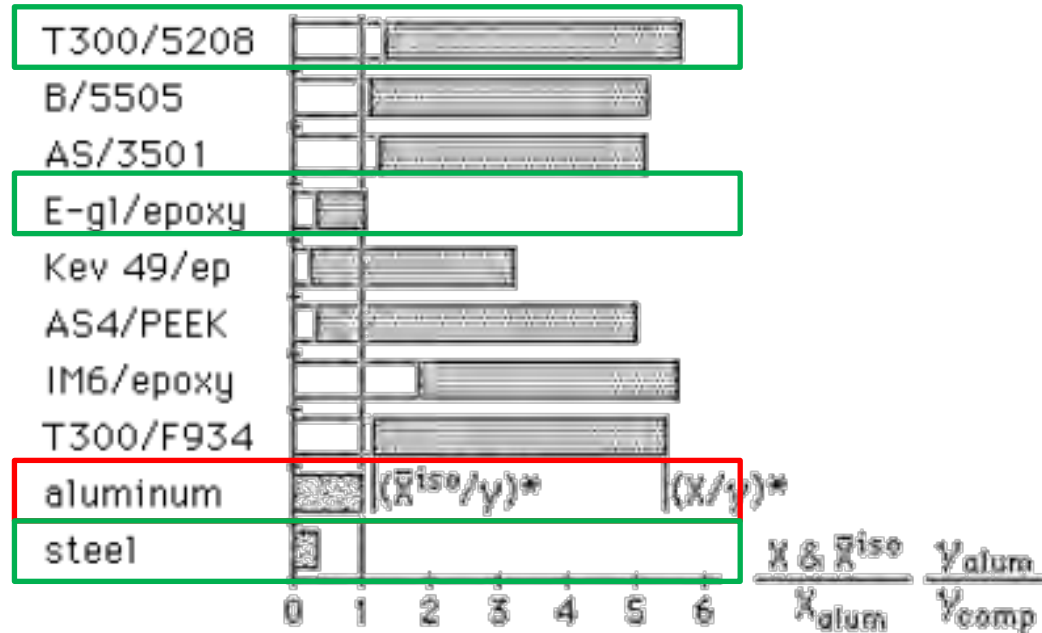
- Eingabe: Energieinhalt, max. Leistung
- Initialisierung
- Iterationsschleife
  - Hybrid-Axiallager, Radiallager
  - Motor/Generator
  - Schwungradoptimierung (Festigkeit, Eigenfrequenzen)
  - Geometrie-Berechnung
  - Datenausgabe / graphische Ausgabe
- Elektrische- und regelungstechnische Auslegung
- Simulation des Flywheels für diverse Betriebspunkte (Drehzahlen, Lasten) → betriebspunktabhängige Verlustleistung
- Lastverlauf ⇒ Gesamtverlustleistung  
⇒ Optimierung hinsichtlich eines frei definierbaren Gütefunktional
- Postprocessing zur parametrischen Zeichnung in 3D-CAD Programmpaket



## Rotor – Schwungmassenwerkstoffwahl

Maximale speicherbare kinetische Energie

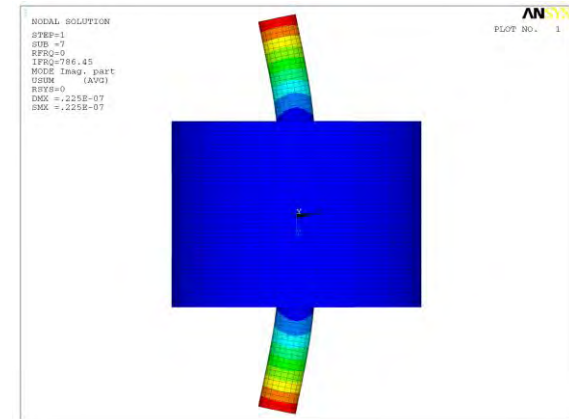
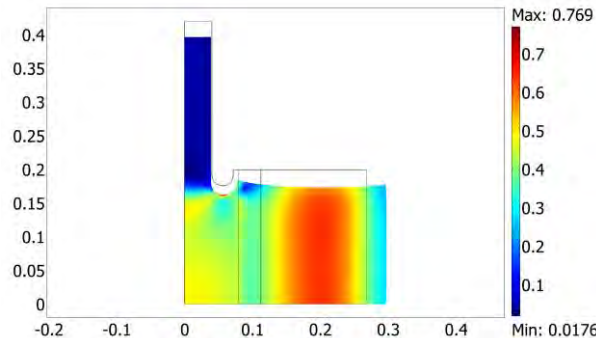
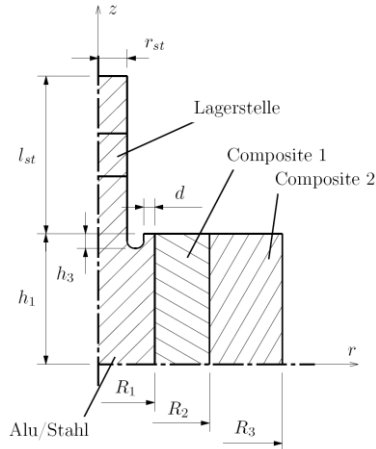
$$E_{\text{kin}}^{\text{max}} = K \frac{\sigma_u}{\rho}$$



Quelle: Tsai S.W.: „Theory of Composites Design“

## Rotor - Konzeptauswahl

## Innenläufer

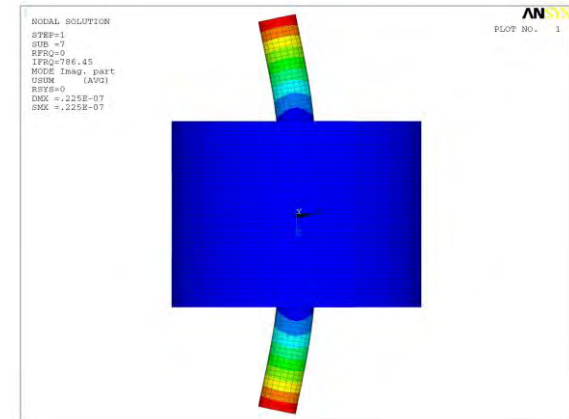
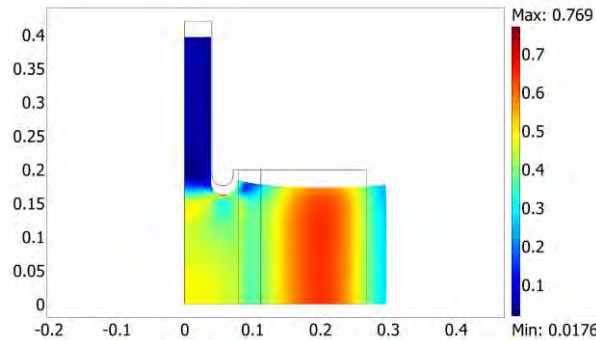
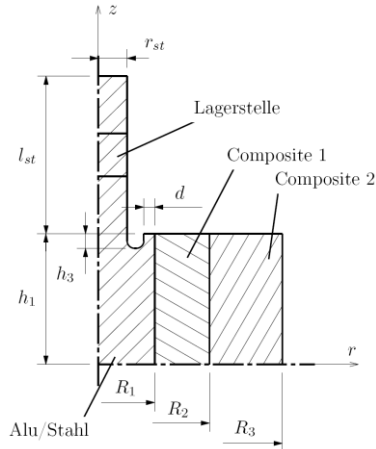


## Vorteile

- Geringe Spannungen in der Welle (Vollzylinder)
- Geringe drehzahlabhängige Aufweitung der Luftspalte
- Luftspalt nimmt mit der Drehzahl ab
- Räumliche Distanz zw. M/G und temperaturempfindlichem CFK
- Lager- und M/G-Komponenten im geringer belasteten Bereich

## Rotor - Konzeptauswahl

## Innenläufer

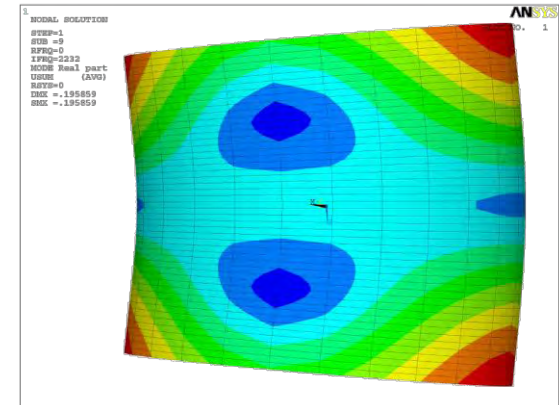
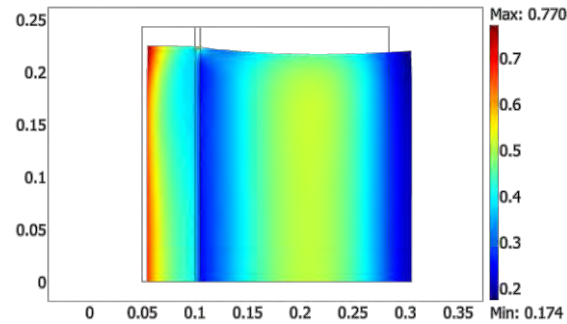
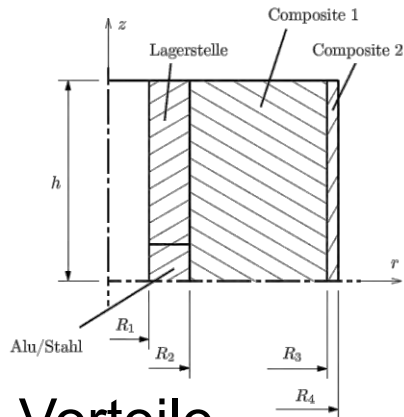


## Nachteile

- Suboptimal verteilte Rotormasse  
(Die metallene Welle trägt kaum zum nötigen Trägheitsmoment bei)
- Anbindung der CFK-Schwungmasse an die Welle problematisch

## Rotor - Konzeptauswahl

## Außenläufer



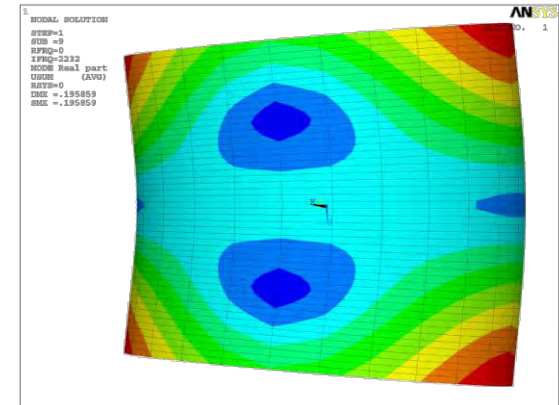
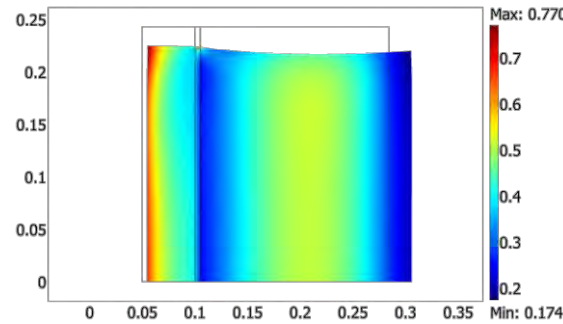
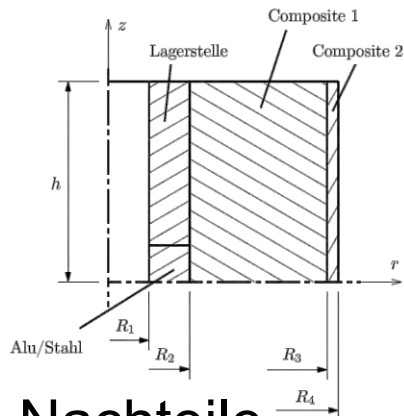
## Vorteile

- Masse weit außen angeordnet  $\Rightarrow$  hohes Trägheitsmoment
- Sehr steifer Rotor  $\Rightarrow$  elastische Eigenfrequenzen liegen sehr hoch



## Rotor - Konzeptauswahl

## Außenläufer



## Nachteile

- Luftspalt vergrößert sich bei hohen Drehzahlen  
⇒ Energieeffizienz des M/G und der magnetischen Lagerung sinkt
- Weichmagnetisches Material mit vergleichsweise geringer Festigkeit liegt im hochbelasteten Bereich ⇒ muss vom CFK gestützt werden
- Wärmequellen liegen direkt am temperaturempfindlichem CFK

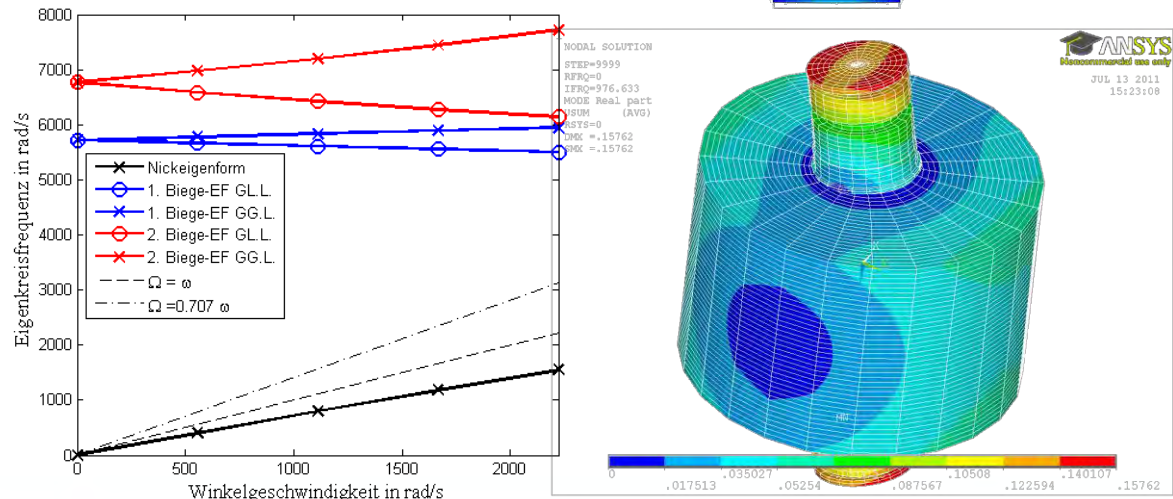
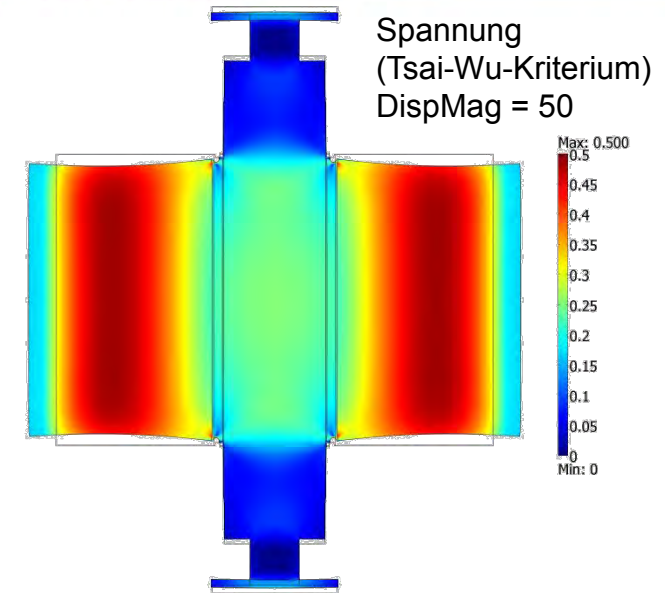
## Vorgaben

- TSE = 5 kWh
- $S = 2$
- Unterkritischer Betrieb
- Materialien: Al + CFK

→ Nichtlineares  
Optimierungsproblem  
mit nichtlinearen  
Restriktionen

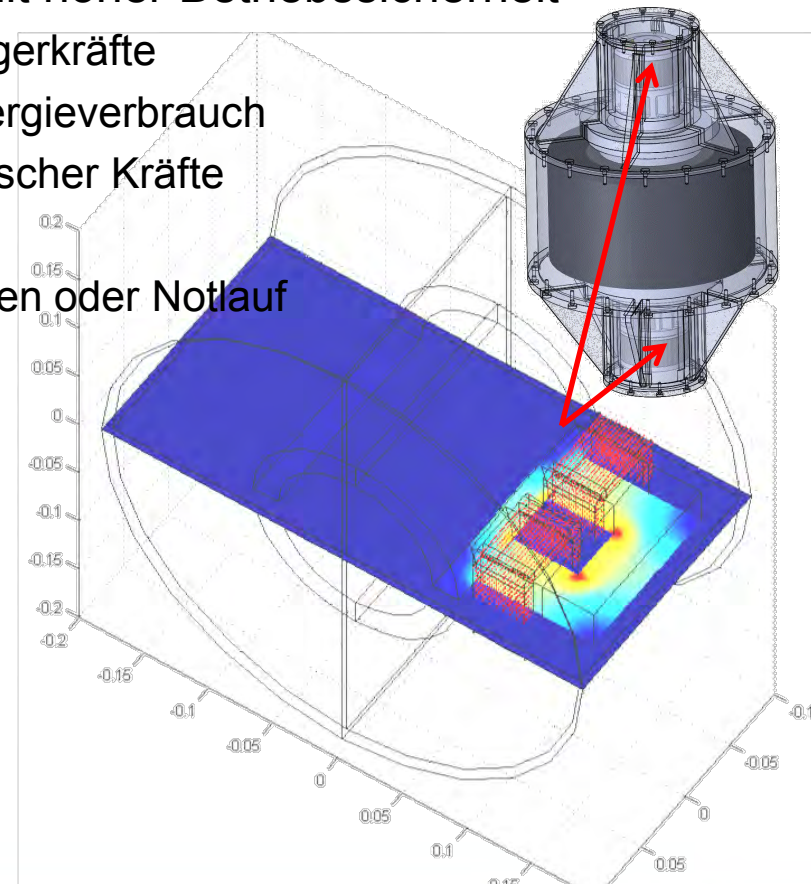
## Ergebnis

- $n = 21.200$  U/min
- $m = 200$  kg



## Magnetische Lagerung mit wesentlich höherer Energieeffizienz als bisherige Magnetlagersysteme:

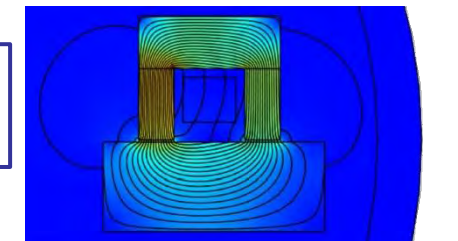
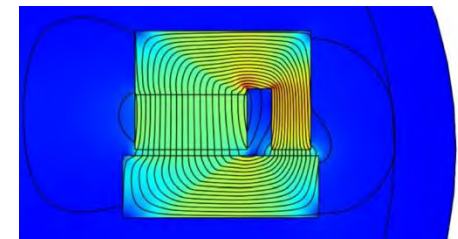
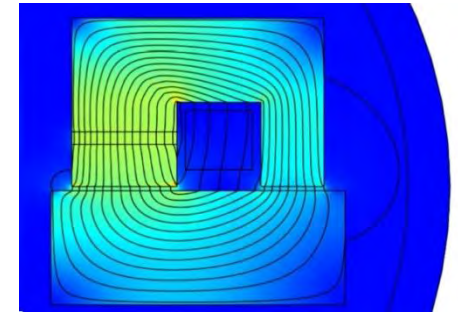
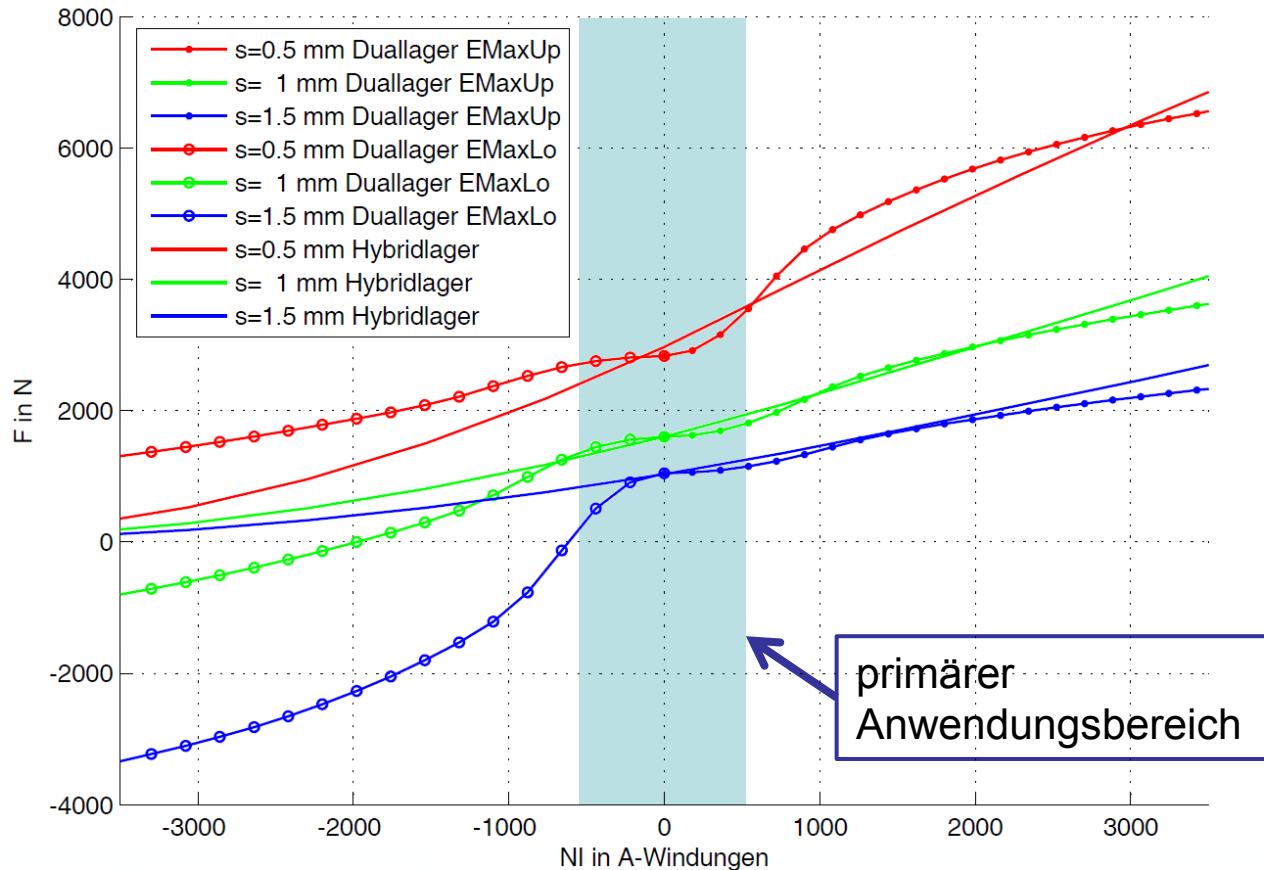
- Kaskadiertes Hybridmagnetlagersystem mit hoher Betriebssicherheit
  - Permanentmagnetlager → statische Lagerkräfte
  - Hocheffizienz-AMBs mit minimalem Energieverbrauch → betriebsmäßige Ausregelung dynamischer Kräfte
  - Hochleistungs-AMBs → Anlauf, Abfangen großer Auslenkungen oder Notlauf
- Vermeidung von Flusskopplungen innerhalb der Redundanzgruppen
  - Funktionalität jeder Redundanzeinheit unbeeinflusst



# Axiallager - Konzeptauswahl

## Untersuchung unterschiedlicher Axiallagerkonzepte

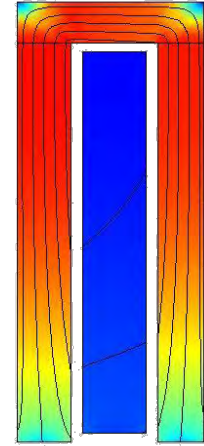
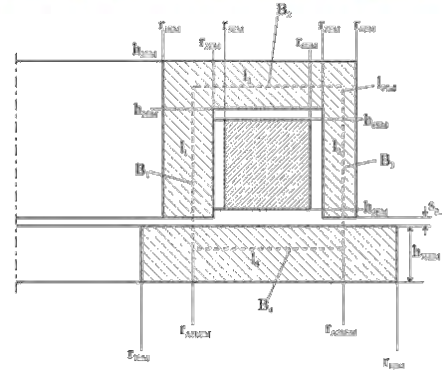
- Kraft-Strom-Kennlinien in Abhängigkeit vom Luftspalt



# Axiallager-Elektromagnet - Auslegung

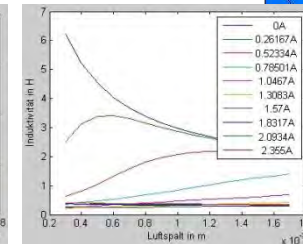
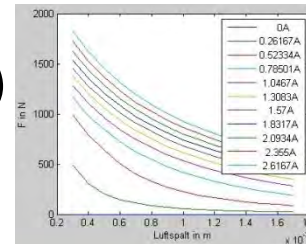
## Magnetische Auslegung

- Optimierung
  - Eingangsparameter:
    - Zulässige max. Flussdichte
    - Erforderliche max. Lagerkraft (Störkräfte)



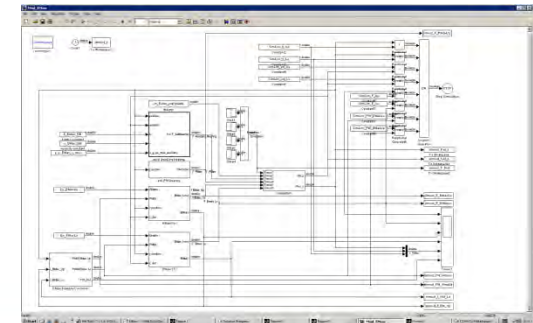
## Kennlinienberechnung

- $FE \rightarrow F_{EMaxUp}(I, s), L_{EMaxUp}(I, s)$



## Regler/Elektronik-Auslegung

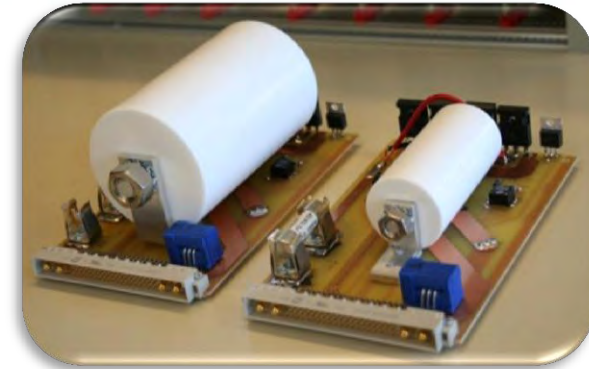
- Ermittlung der optimalen Ansteuerleistung
- Kraft/Stromreglerauslegung (unterlagert)
- Positionsreglerauslegung



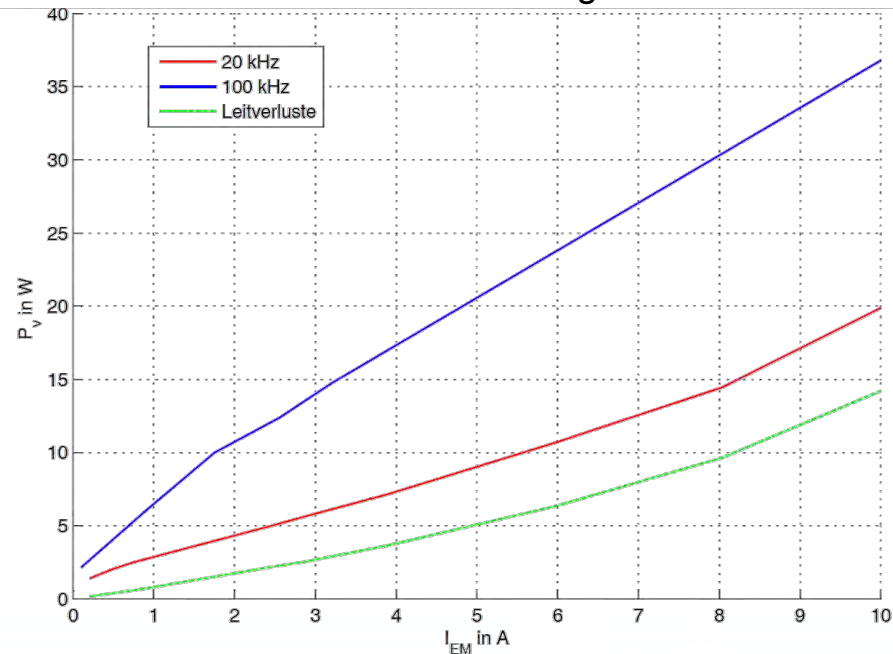
# Hocheffizienter Konverter

## 2Q-Konverter

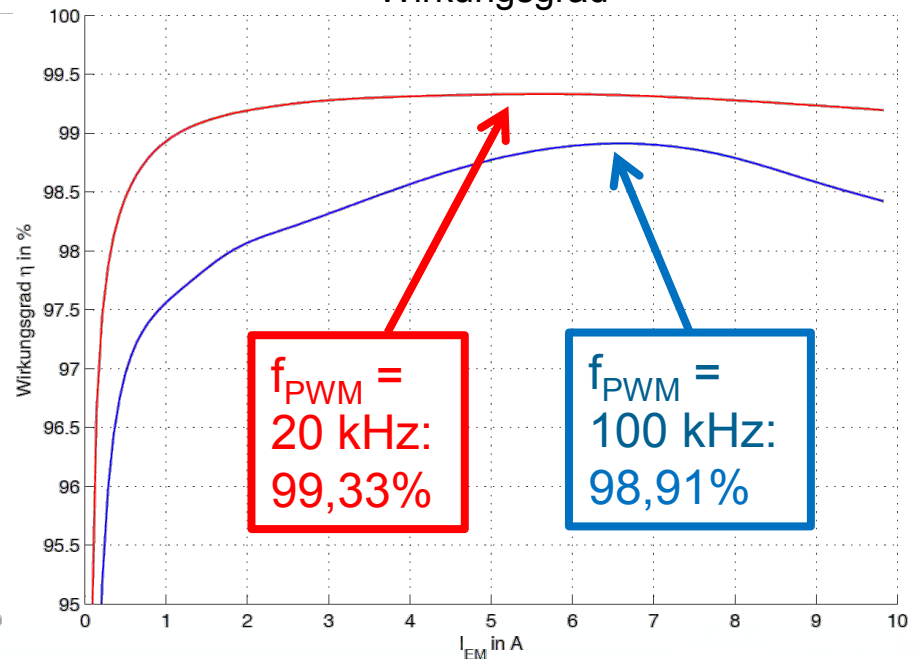
- SiC-Dioden
- MOSFET
- Je nach Bauteilwahl bis zu 20 kVA (20A/1kV)



Verlustleistung

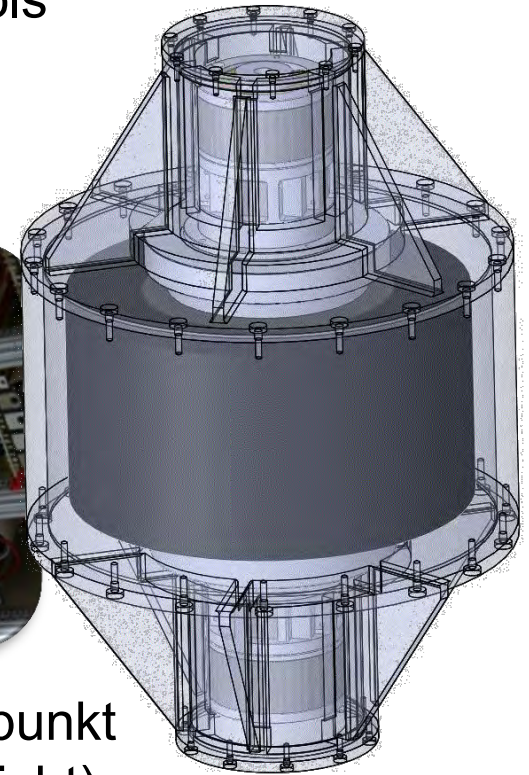
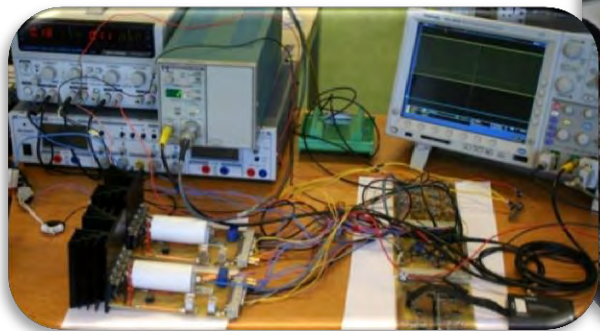


Wirkungsgrad



## Messaufbau zur Validierung des Flywheel Auslegungs-/Simulations-/Optimierungs-Tools

- Exemplarische Optimierung:
  - Plus-Energie-Haus: 12h-Speicher für Photovoltaikanlagen
  - 5 kWh / 10 kW



## Weiteres Forschungsprojekt zum Forschungsschwerpunkt „Hocheffiziente und zuverlässige Flywheels“ (eingereicht):

- Neue Energien 2020, 5. Call: „Optimum Shape Flywheel - Kostenreduktion durch neue Konstruktionsansätze, Rotorbauformen und Fertigungsverfahren“

Das Forschungsprojekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert und im Rahmen des Programms „Haus der Zukunft Plus“ durchgeführt

[www.hausderzukunft.at](http://www.hausderzukunft.at)

[alexander.schulz@tuwien.ac.at](mailto:alexander.schulz@tuwien.ac.at)

Vienna University of Technology, Institute of Mechanics and Mechatronics

[www.mec.tuwien.ac.at](http://www.mec.tuwien.ac.at)