

Long-Term Storage Flywheel

Neue Ansätze zur Erhöhung der wirtschaftlich nutzbaren Speicherzeit und Sicherheit

Alexander Schulz

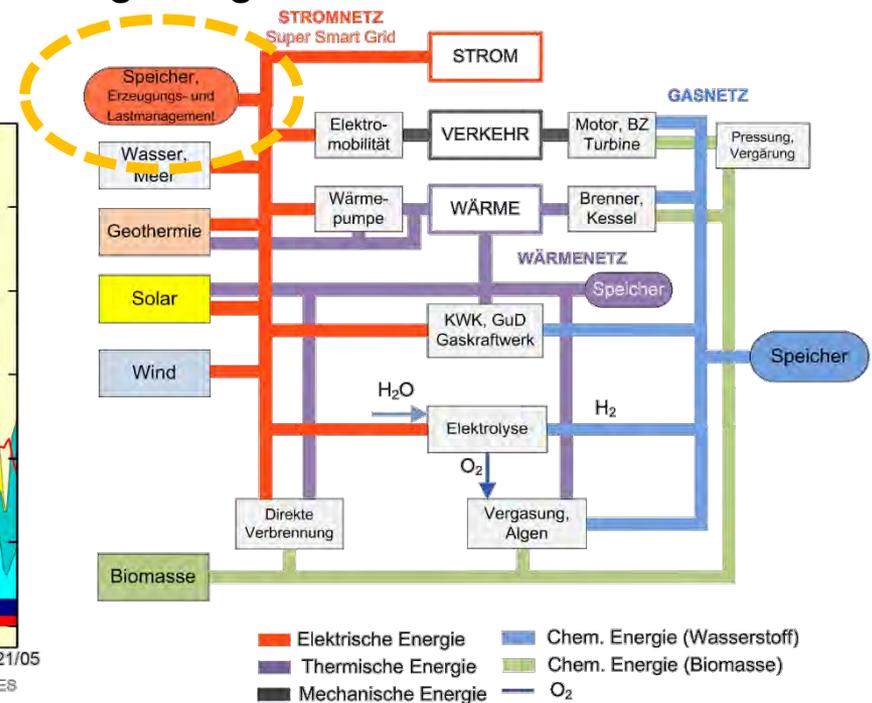
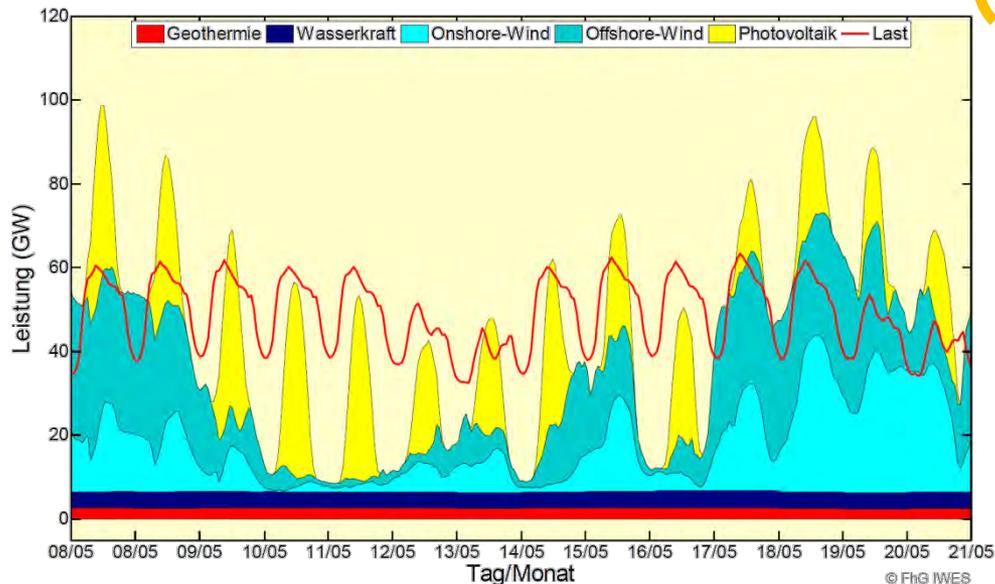
Vienna University of Technology
Institute of Mechanics and Mechatronics
Measurement and actuator division
www.mec.tuwien.ac.at

- 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 elektrische Energie aus zeitlich inflexiblen, unkontrolliert schwankenden, regenerativen Primärenergieträgern
- Regelenergie (Netzstabilisierung)

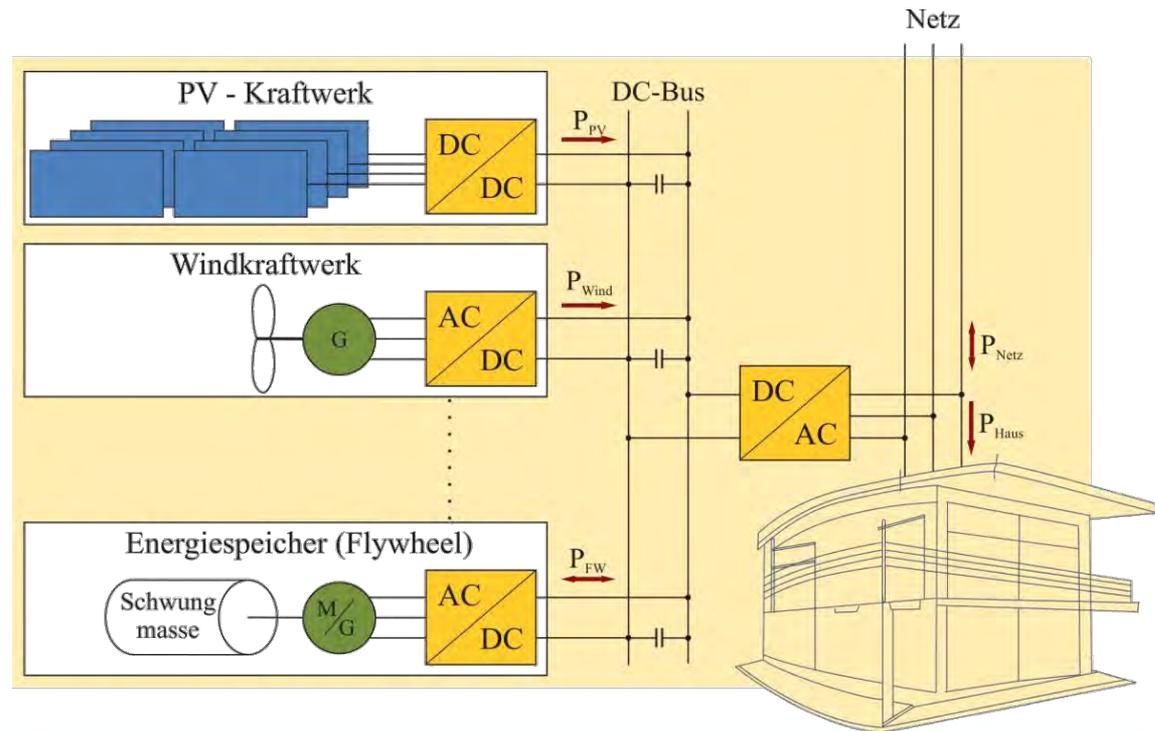
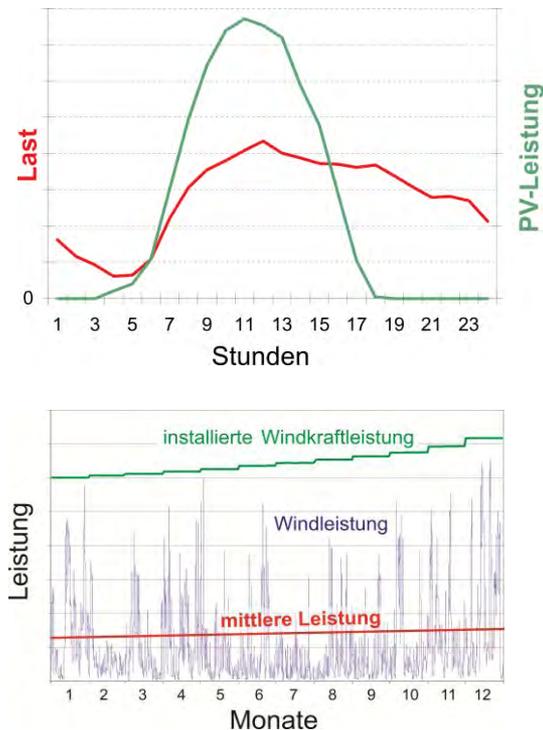


Quelle: „Leitstudie 2010 - Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“, http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf

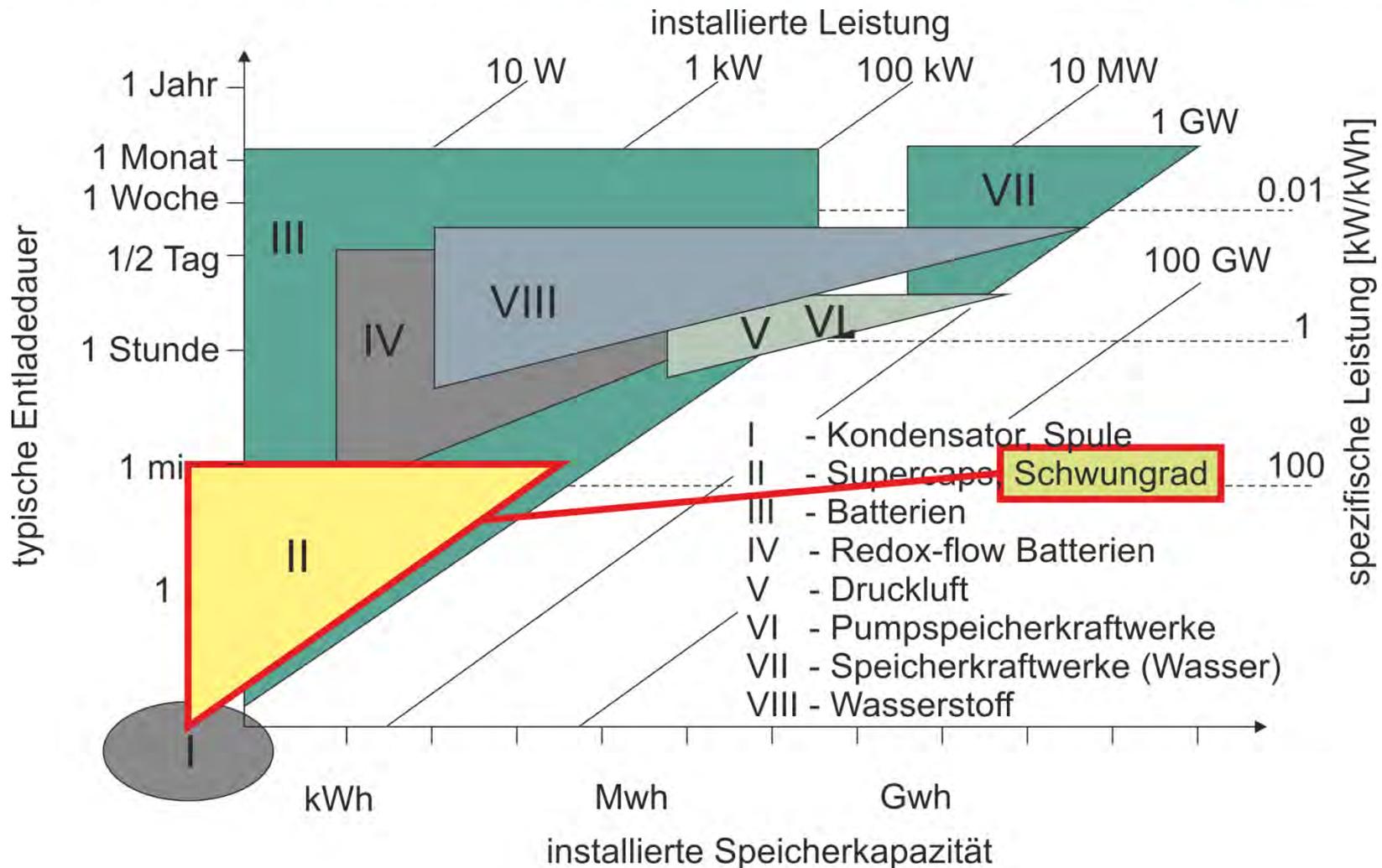
Bedarf an Speichern für elektrische Energie

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

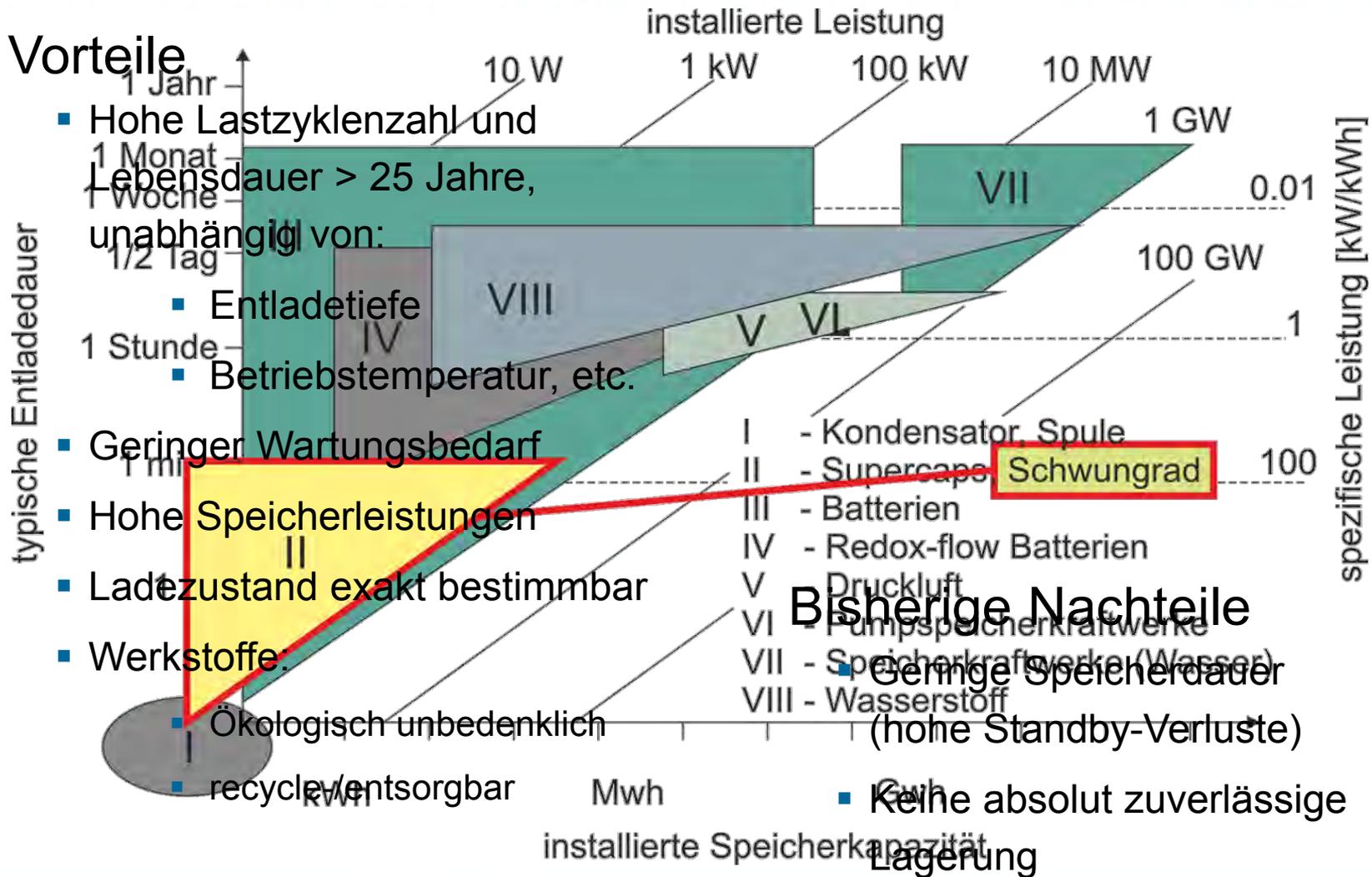


Quelle: http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/SZA-4_06_Sauer_Optionen_Speicher_layout.pdf

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

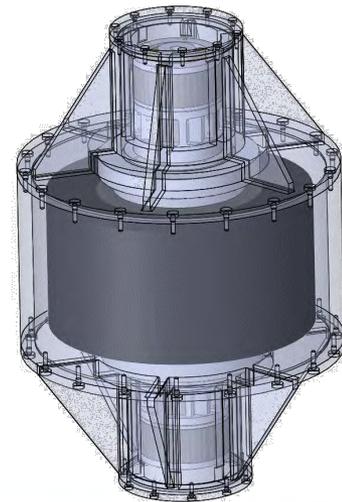
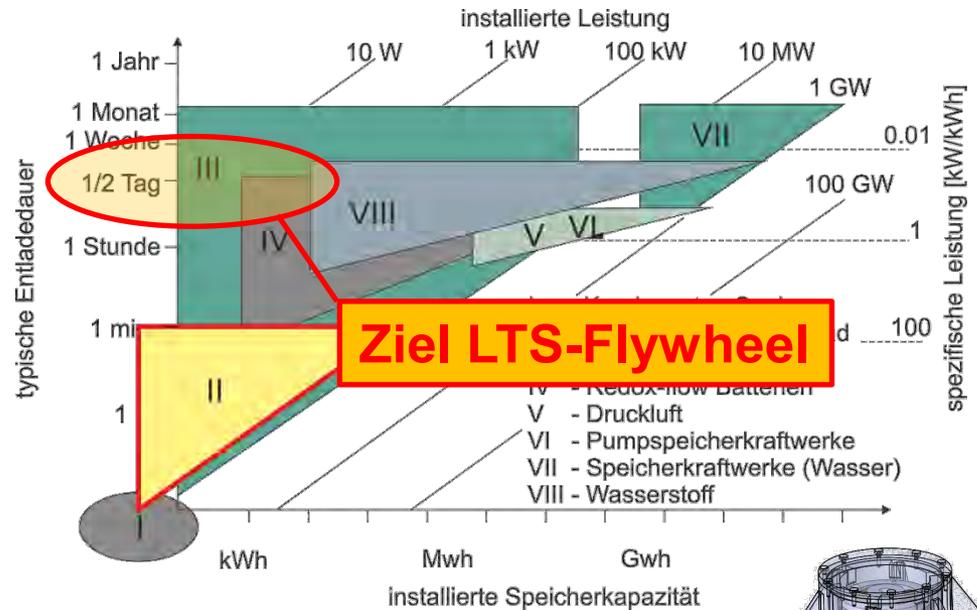
- Geringe Speicherdauer (hohe Standby-Verluste)
- Keine absolut zuverlässige Lagerung

"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

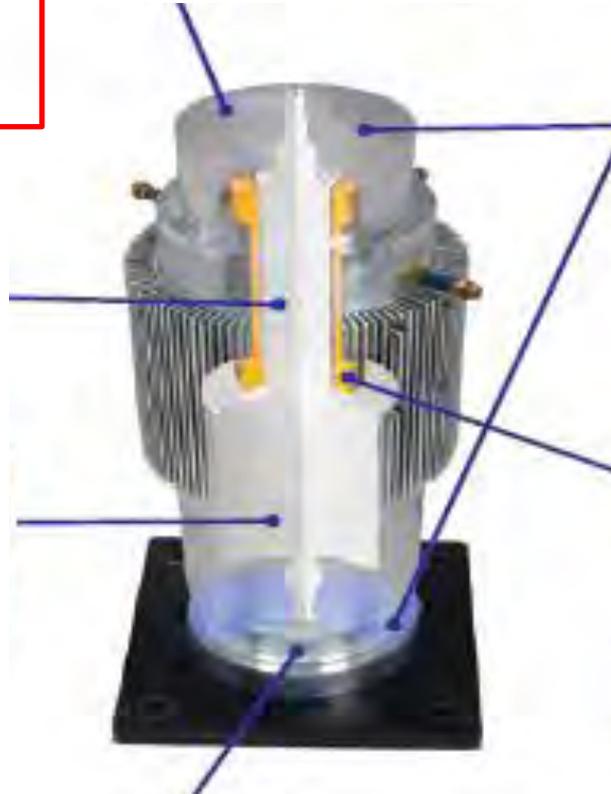
- Dezentrale Zwischenspeicherung von elektrischer Energie (z.B. Photovoltaikanlagen)
- Technologische Basis für das Gebäude der Zukunft, insbesondere dem Plus-Energie-Haus



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

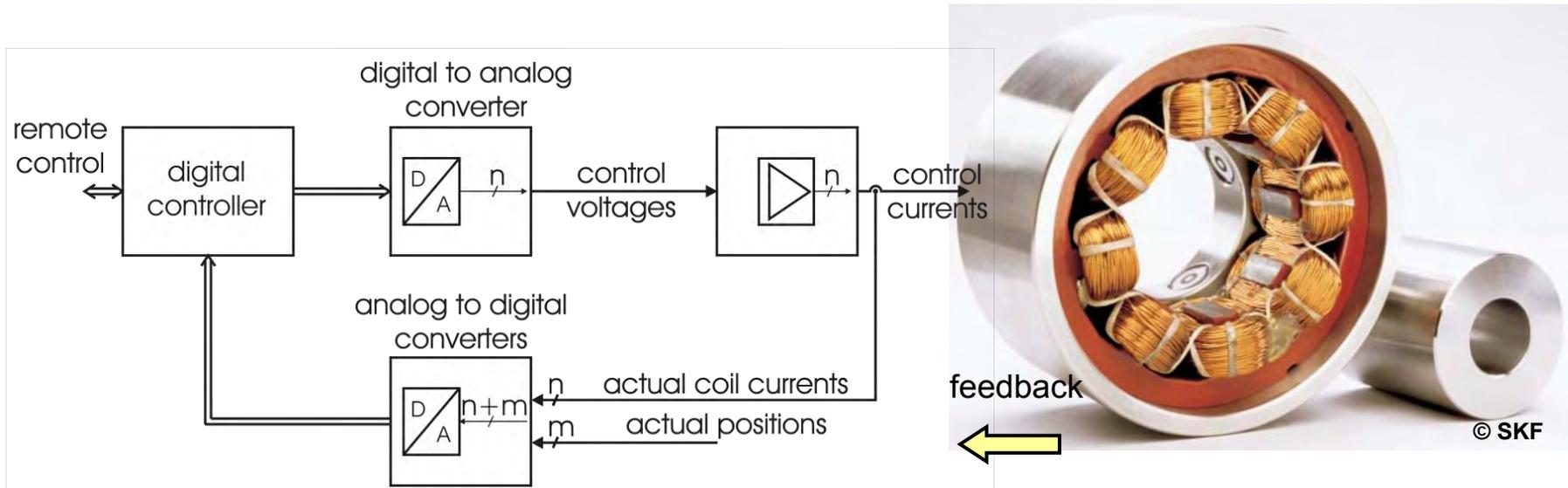
- Permanentmagnetlager zur Aufbringung statischer Lagerkräfte
- Hocheffizienz-AMB für minimalen Energieverbrauch im Regelbetrieb
- Im Bedarfsfall zuschaltendes Hochleistungs-AMB (zum Abfangen externer Störkräfte)
- Redundantes Hochleistungs-AMB-System mit Backup-Stromversorgung

Vakuumtechnik/Gasreibung

Energieeffiziente Betriebsführung

Volladaptive digitale Regelung und Ansteuerung der Magnetlagerelektronik

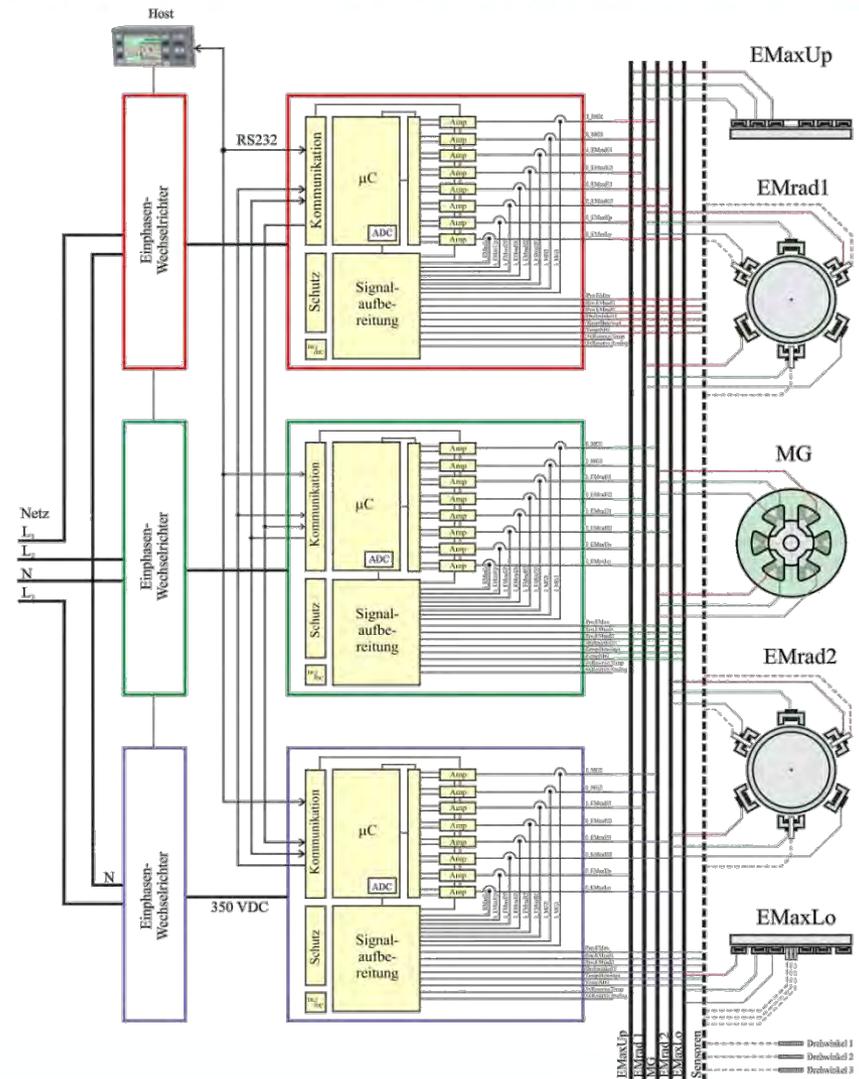
- „Active Vibration Control“ für aktive Magnetlager
- Adaptive Reglerabtastrate zur Minimierung des Reglerenergiebedarfs
- Adaptive Pulsweitenmodulationsfrequenz und adaptive Zwischenkreisspannungsregelung für geringste Verluste in den Leistungskonvertern



Blockschaltbild – Zuverlässiges Regelsystem

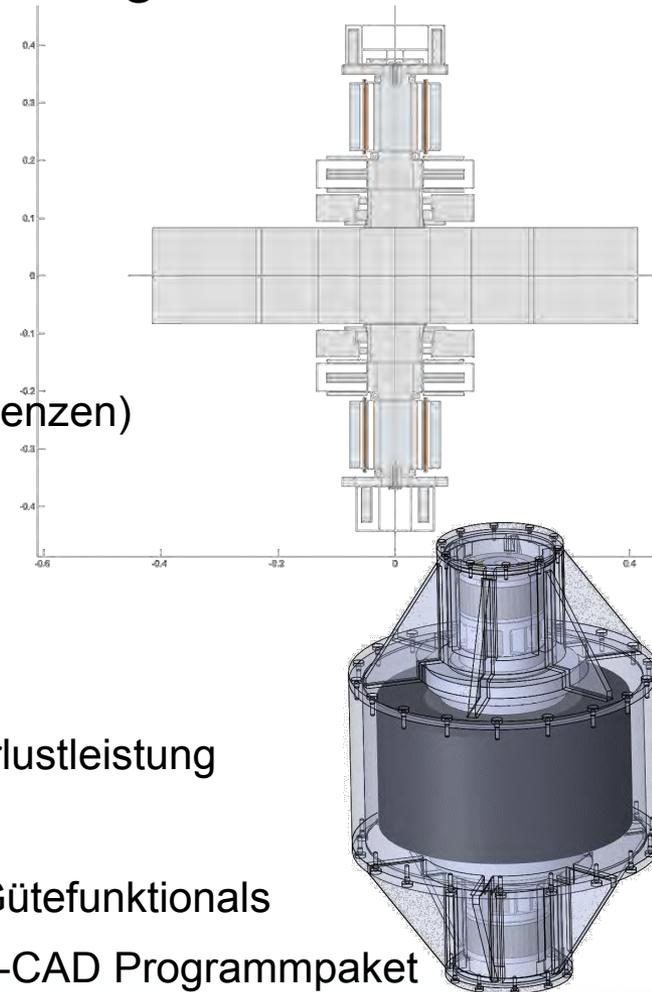
Redundanzkonzept

- 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

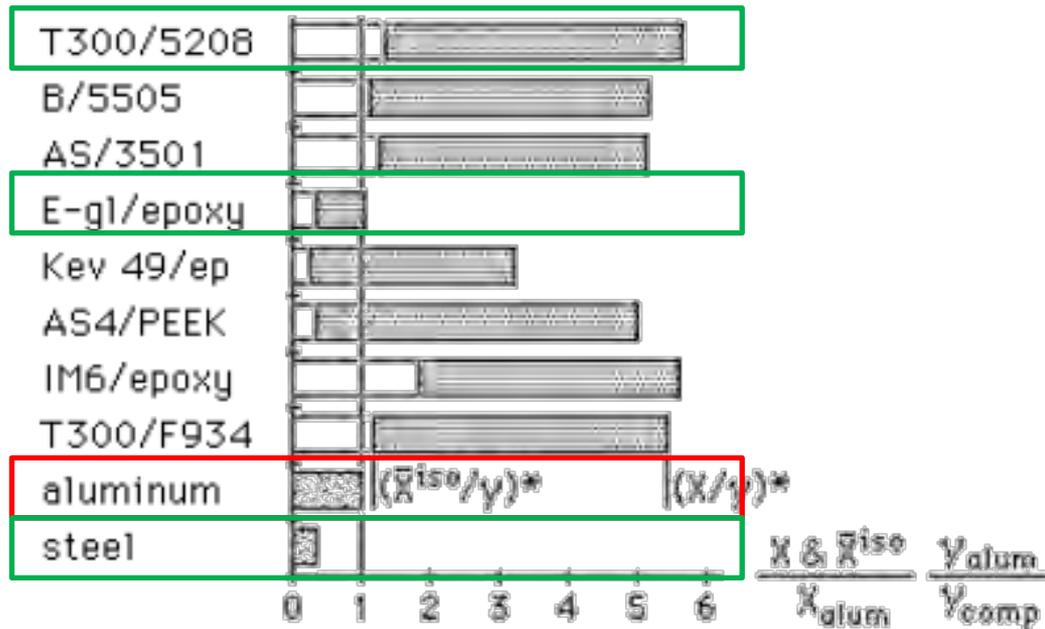
- Eingabe: Energieinhalt, max. Leistung
- Initialisierung
- Iterationsschleife
 - Hybrid-Axiallager, Radiallager
 - Motor/Generator
 - Schwungradoptimierung (Festigkeit, Eigenfrequenzen)
 - Geometrie-Berechnung
 - Datenausgabe / graphische Ausgabe
- Elektrische- und regelungstechnische Auslegung
- Simulation 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

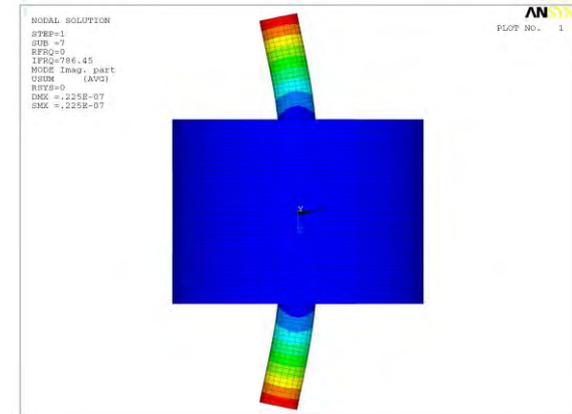
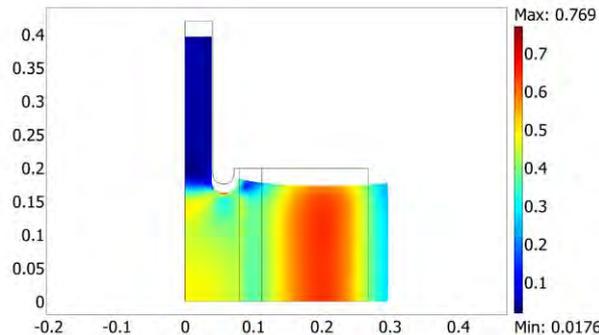
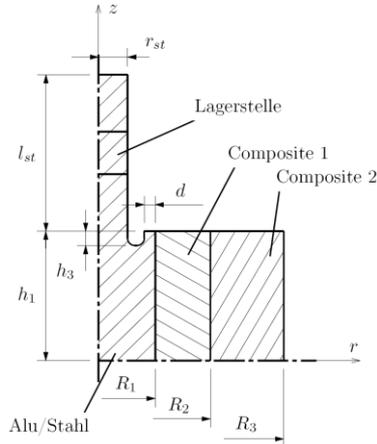
$$E_{\text{kin}}^{\text{max}} = K \frac{\sigma_u}{\rho}$$



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

Rotor - Konzeptauswahl

Innenläufer

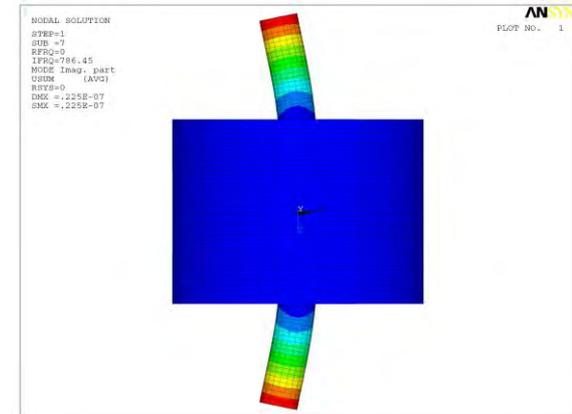
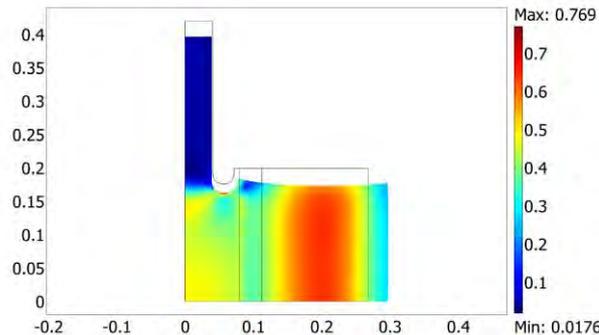
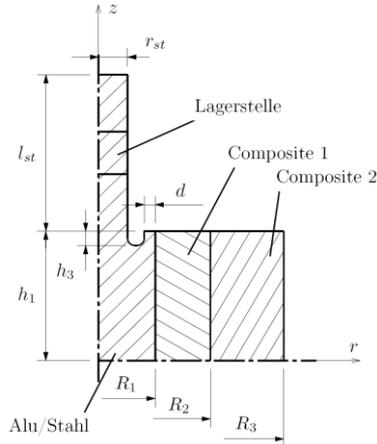


Vorteile

- 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

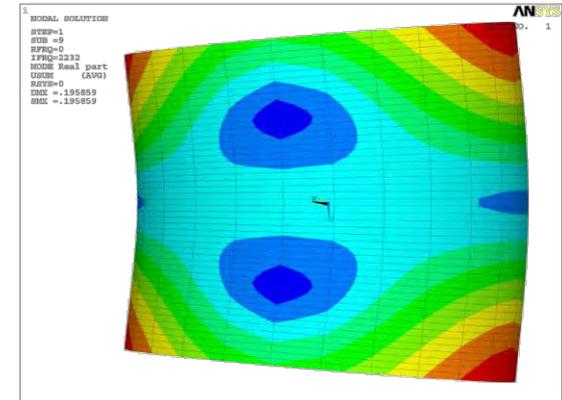
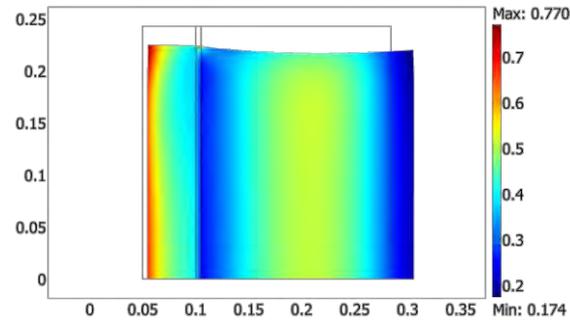
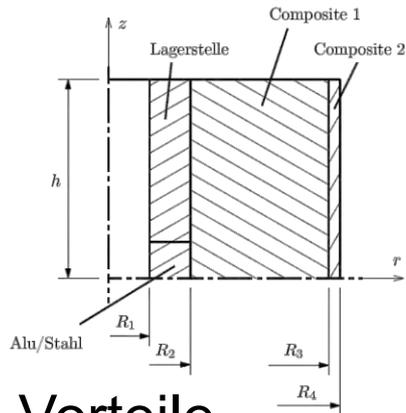


Nachteile

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

Rotor - Konzeptauswahl

Außenläufer

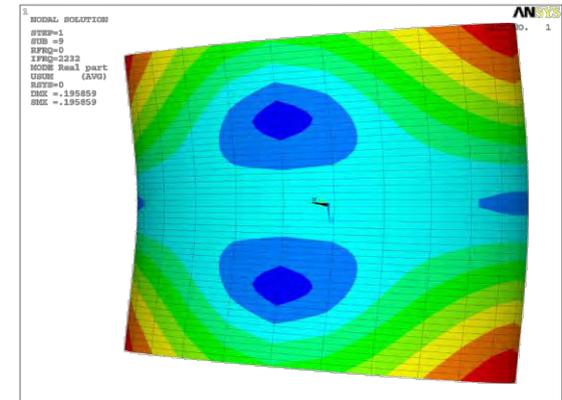
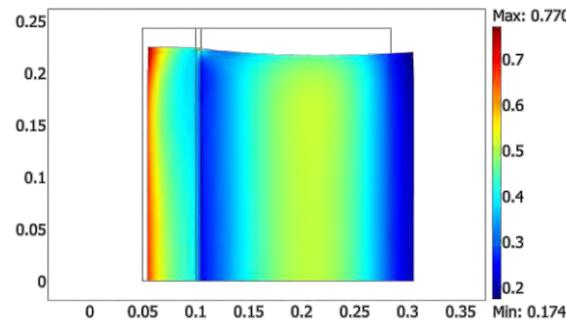
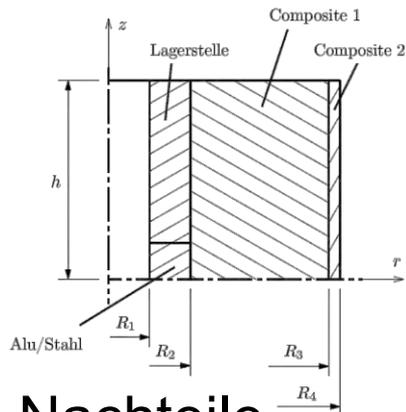


Vorteile

- 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

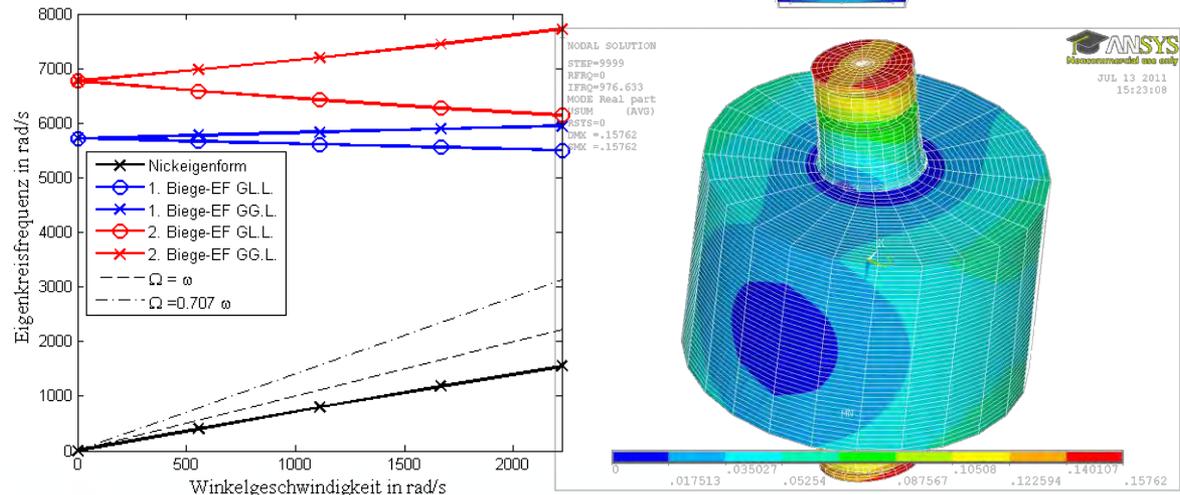
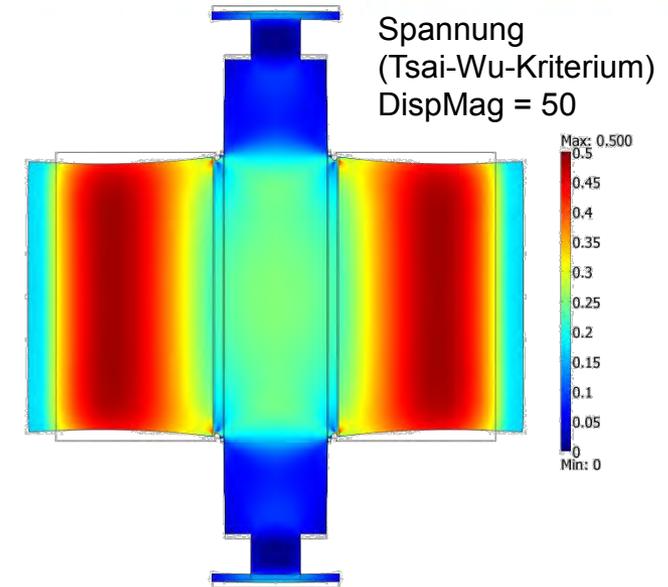
Vorgaben

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

→ Nichtlineares
Optimierungsproblem
mit nichtlinearen
Restriktionen

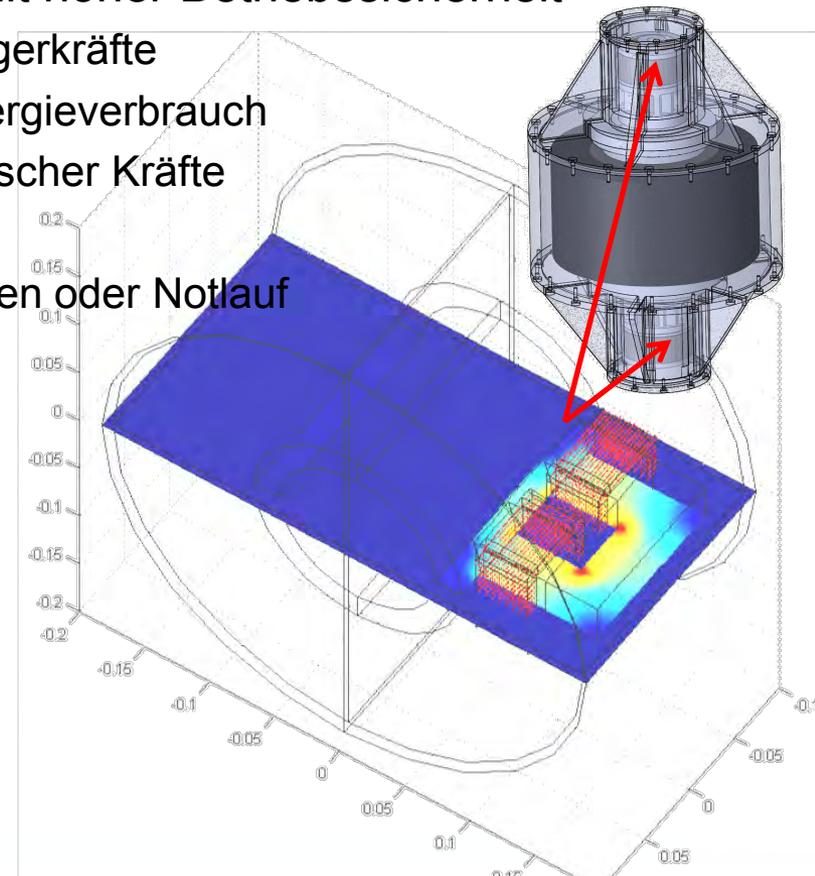
Ergebnis

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



Magnetische Lagerung mit wesentlich höherer Energieeffizienz als bisherige Magnetlagersysteme:

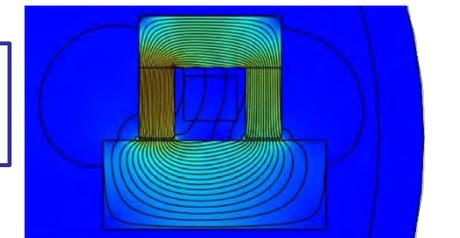
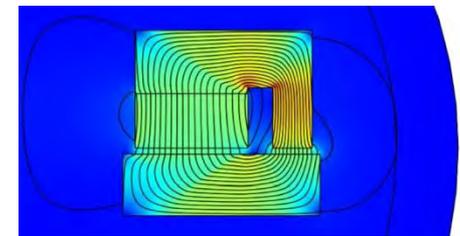
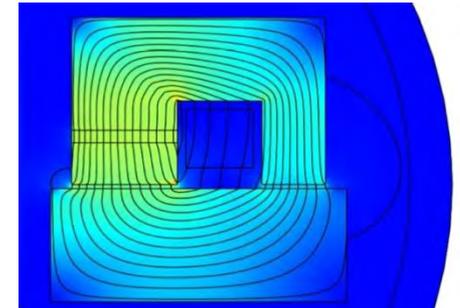
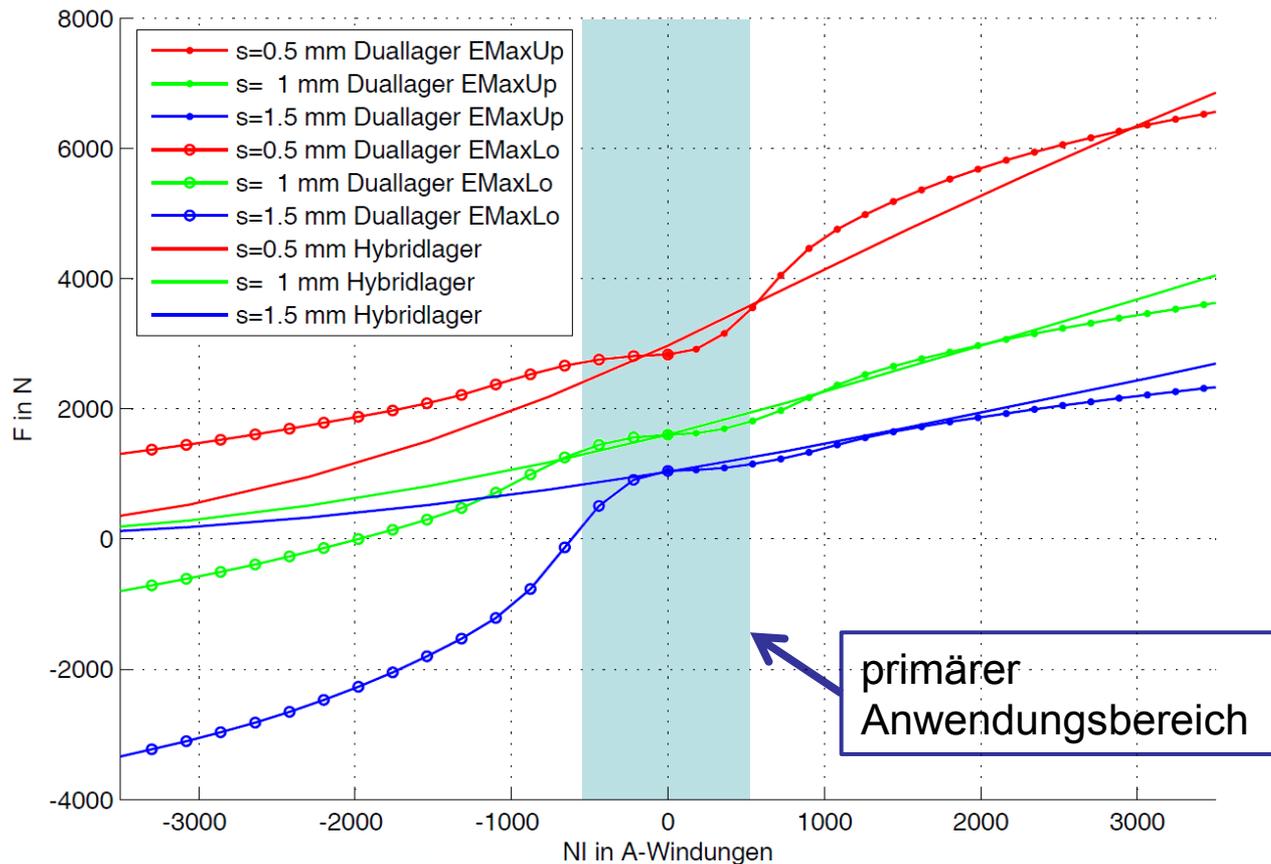
- Kaskadiertes Hybridmagnetlagersystem mit hoher Betriebssicherheit
 - Permanentmagnetlager → statische Lagerkräfte
 - Hocheffizienz-AMBs mit minimalem Energieverbrauch → betriebsmäßige Ausregelung dynamischer Kräfte
 - Hochleistungs-AMBs → Anlauf, Abfangen großer Auslenkungen oder Notlauf
- Vermeidung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



Axiallager - Konzeptauswahl

Untersuchung unterschiedlicher Axiallagerkonzepte

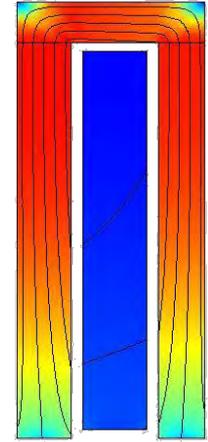
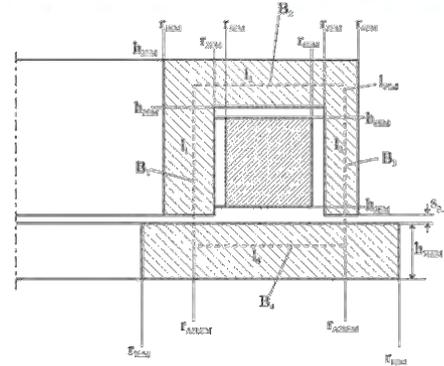
- Kraft-Strom-Kennlinien in Abhängigkeit vom Luftspalt



Axiallager-Elektromagnet - Auslegung

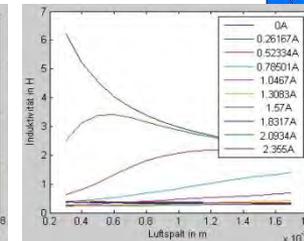
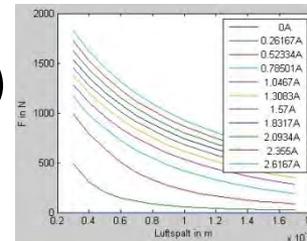
Magnetische Auslegung

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



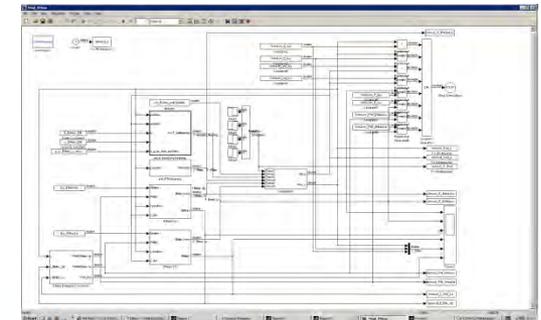
Kennlinienberechnung

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



Regler/Elektronik-Auslegung

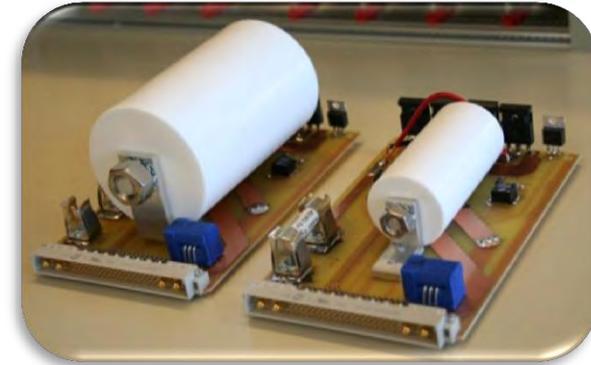
- Ermittlung der optimalen Ansteuerleistung
- Kraft/Stromreglerauslegung (unterlagert)
- Positionsreglerauslegung



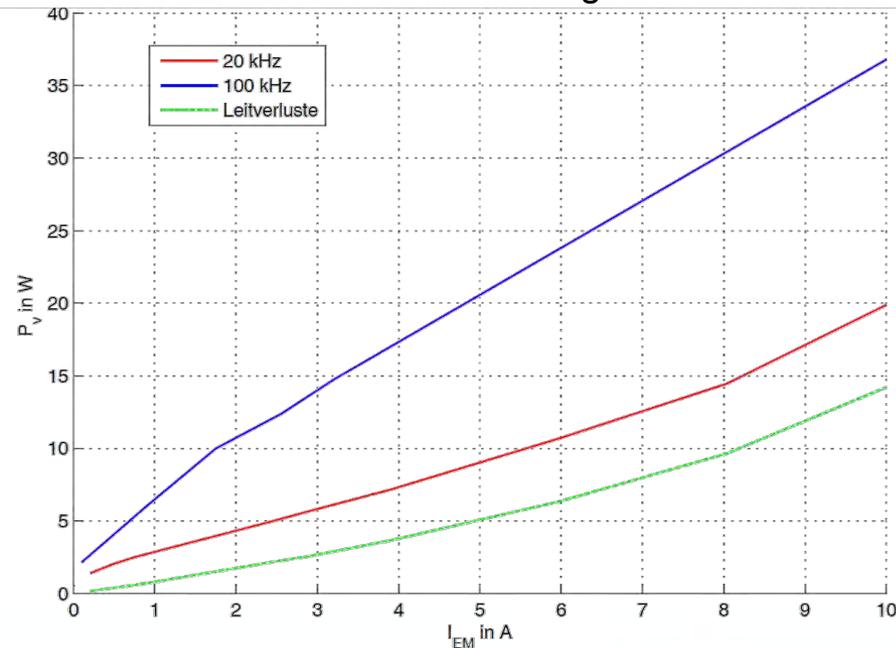
Hocheffizienter Konverter

2Q-Konverter

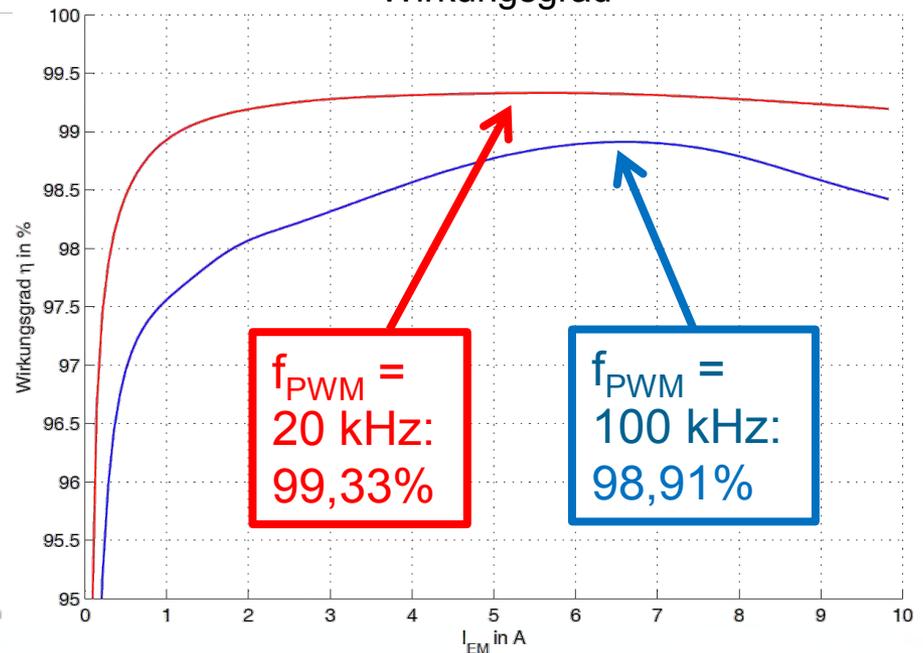
- SiC-Dioden
- MOSFET
- Je nach Bauteilwahl bis zu 20 kVA (20A/1kV)



Verlustleistung

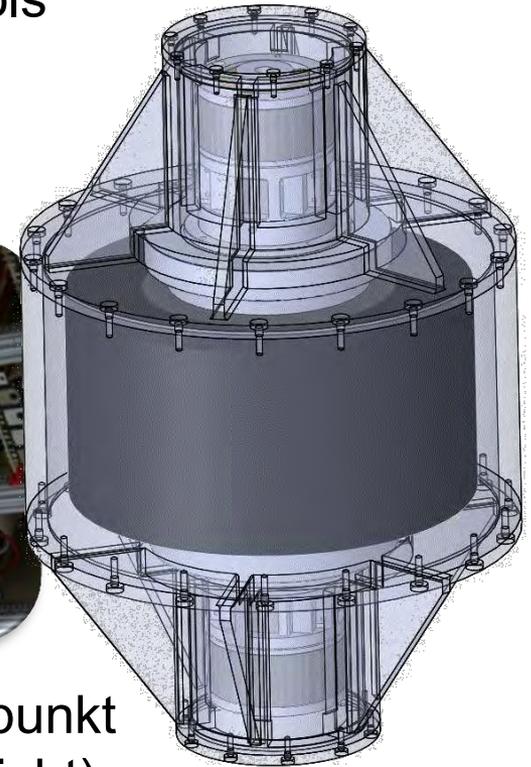
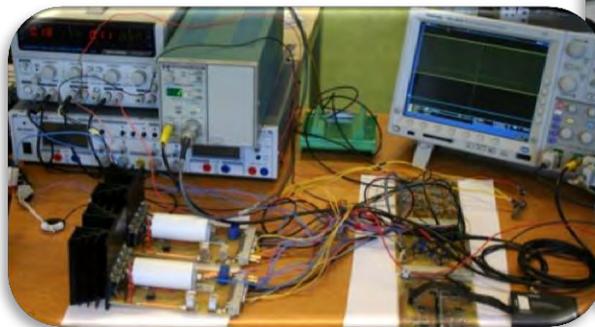


Wirkungsgrad



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

alexander.schulz@tuwien.ac.at

Vienna University of Technology, Institute of Mechanics and Mechatronics

www.mec.tuwien.ac.at