



**Hochschule
Flensburg**
University of
Applied Sciences

**Wind Energy Technology
Institute**



Netzträgheit, Regelreserve und Notstromversorgung durch synchrones, hydraulisches Schwungrad

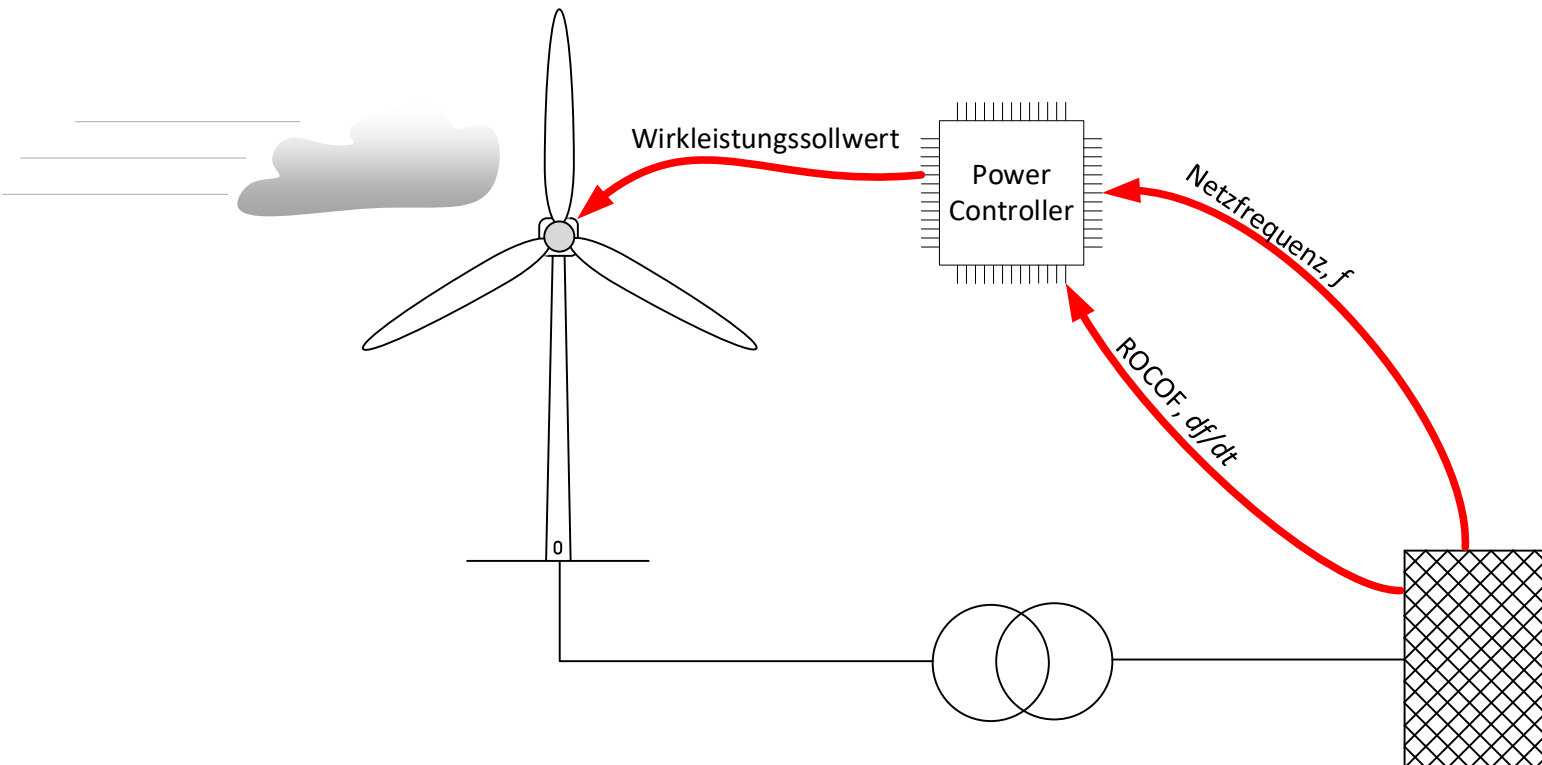
Prof. Dr. Clemens Jauch

09.11.2023



Motivation

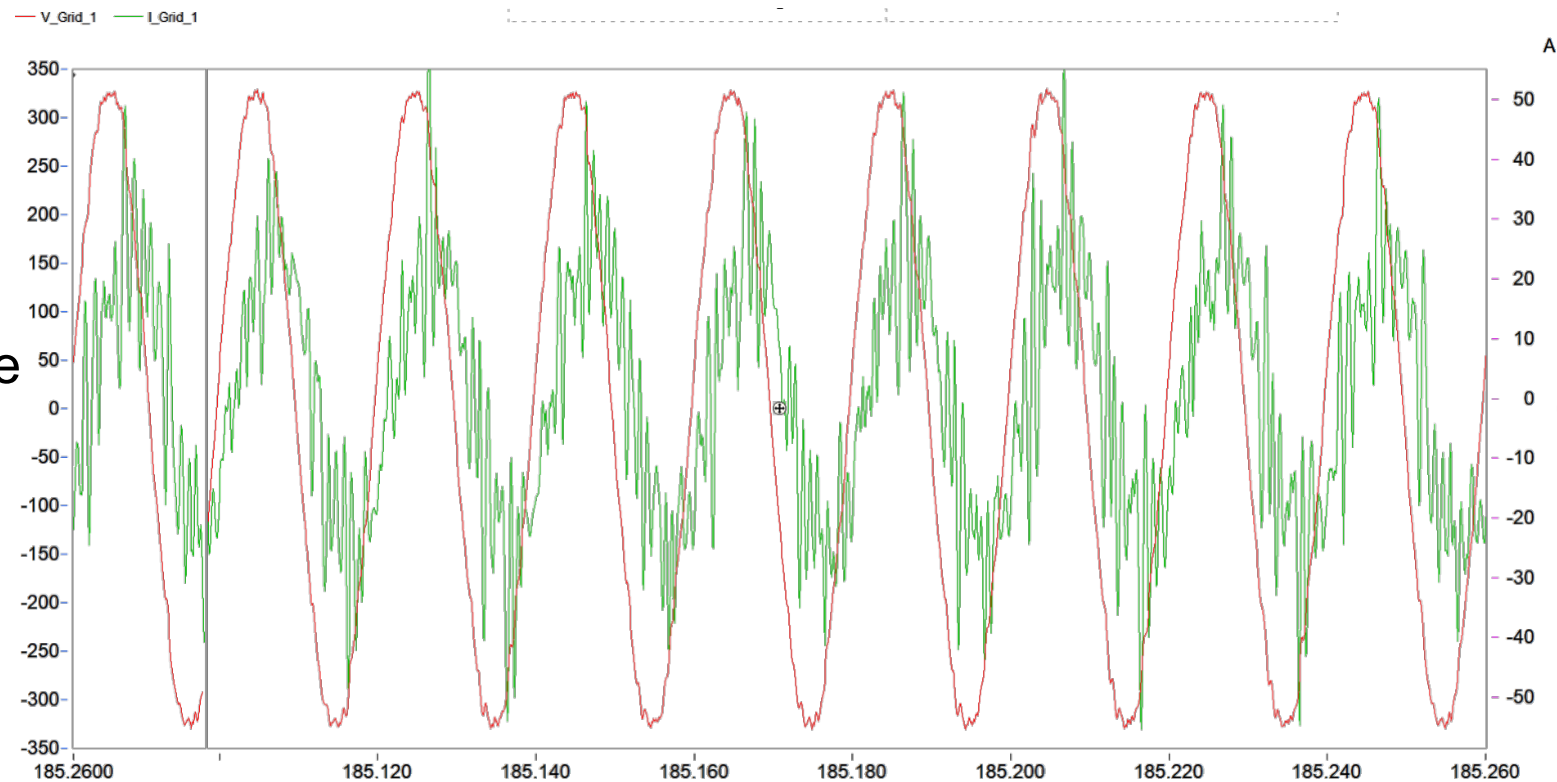
- > Synthetische Trägheit (Momentanreserve) und schnelle Regelleistungsbereitstellung mit Windenergieanlagen



- > ➔ aktuell angemessene Methode zur Netzstützung

Motivation

- > Fortschreitende Energiewende → Batteriespeicher erforderlich → zwangsläufig über **Frequenzumrichter** mit Netz verbunden
- > → Momentanreserve und Primärregelleistung mit Batteriespeichern realisieren
- > Nachteil: weder inhärente Momentanreserve noch inhärente Regelleistung
- > → nur über geeignete Regelung
→ Voraussetzung: präzise Frequenzmessung



Motivation

- > Nachteil Frequenzumrichter: sie brauchen
 - > Regelung
 - > Software
 - > üblicherweise auch Kommunikation
- > → potenzielle Sicherheitslücke bei Cyberangriffen



Motivation

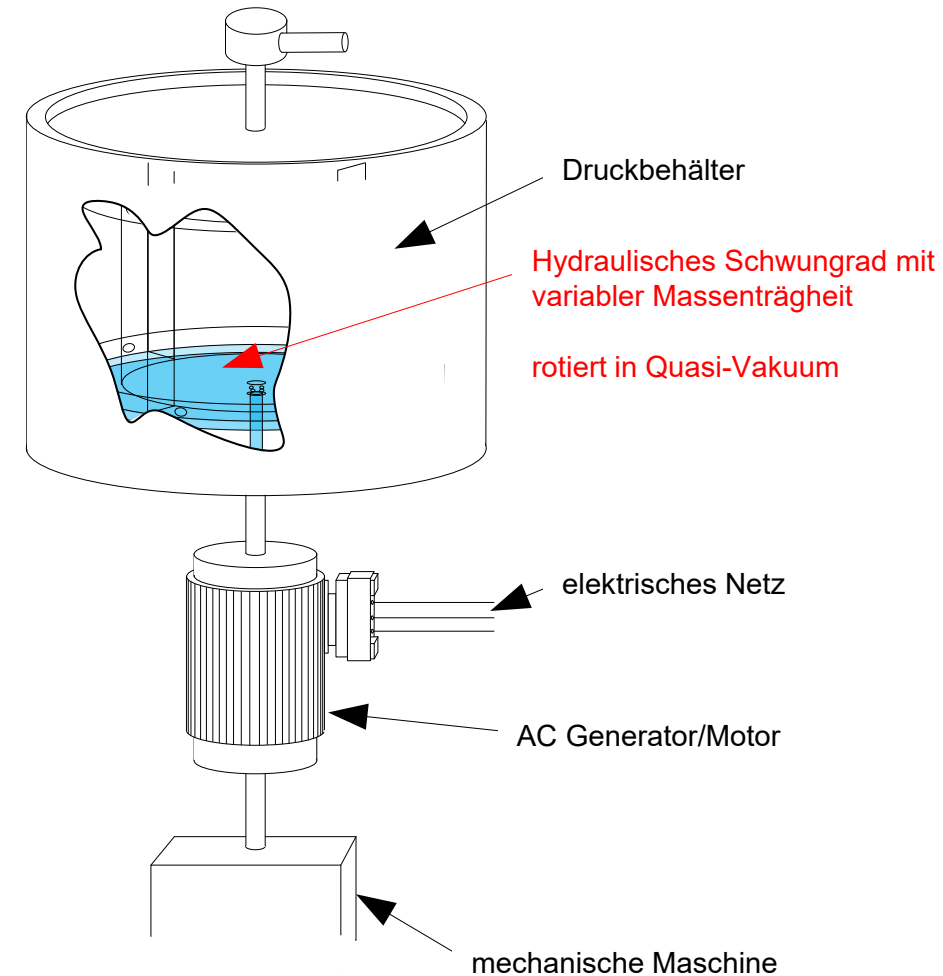
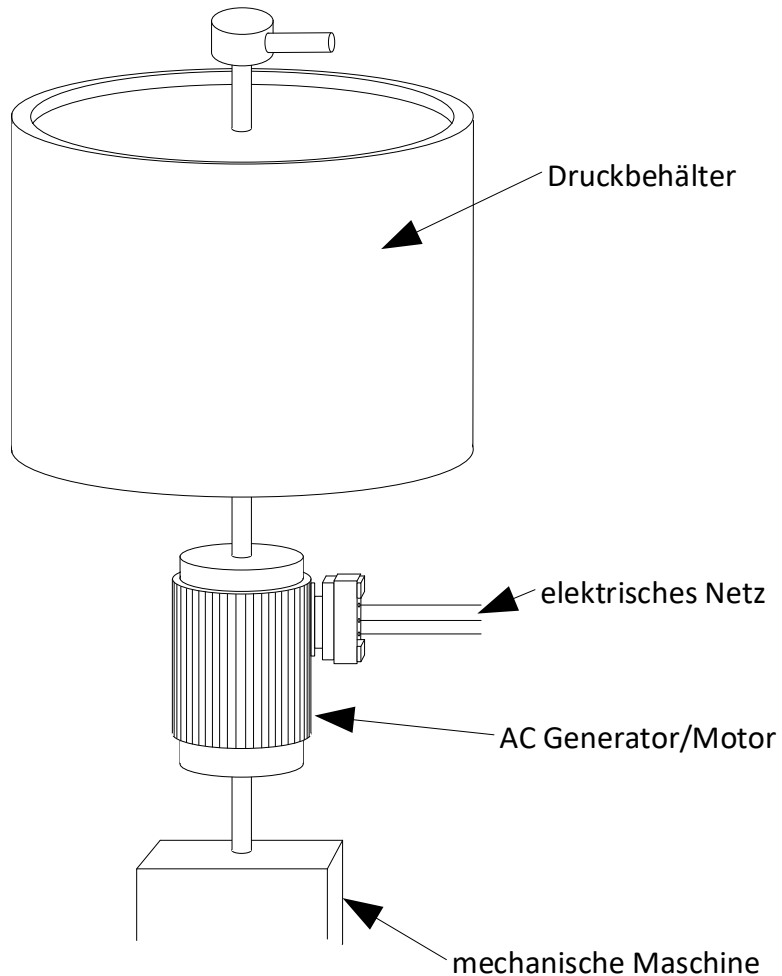
- > Abhilfe: **Teil** der Momentanreserve und Primärregelleistung inhärent bereitstellen → durch synchron mit dem Netz verbundene rotierende Technik
- > Z.B. Synchronmaschine mit hydraulischem Schwungrad mit variablem Massenträgheitsmoment → Energiespeicher aber mit konventionellem Generator
- > Zusatznutzen: Notstromversorgung



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

prinzipielle Anordnung

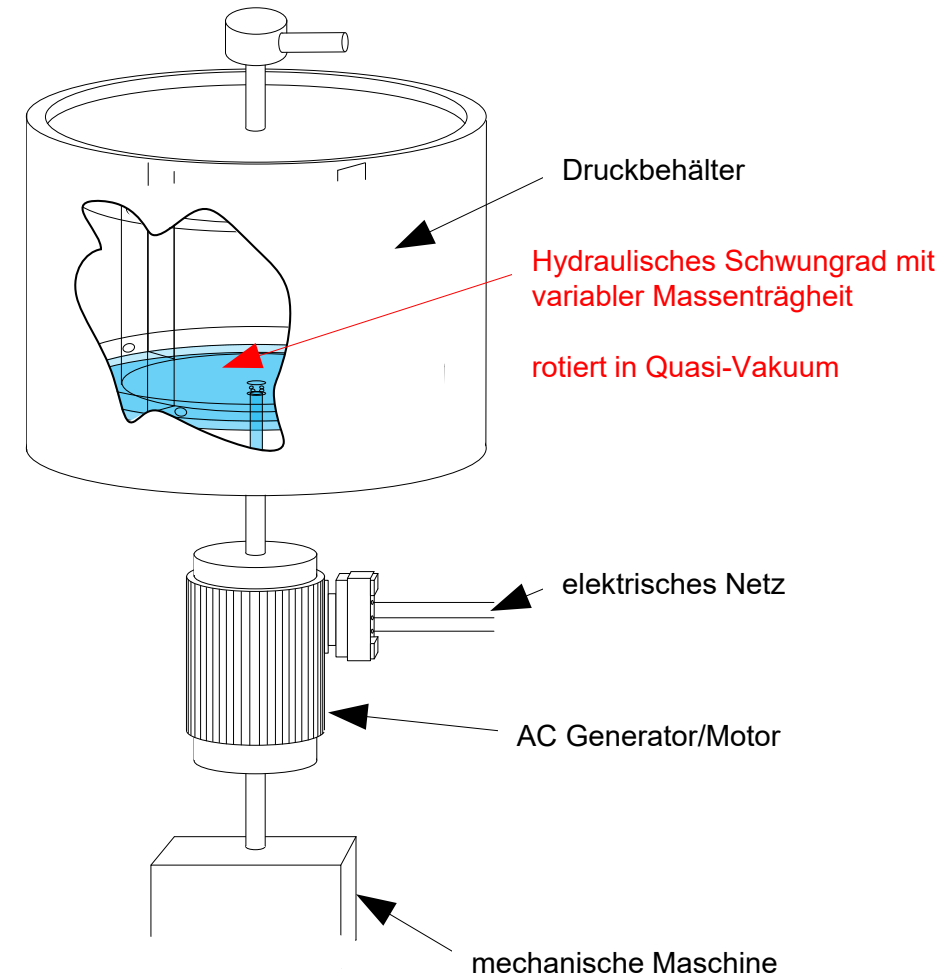
- > Hydraulisches Schwungrad an Generator einer Erzeugungseinheit oder an Motor eines Verbrauchers



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

prinzipielle Funktionsweise

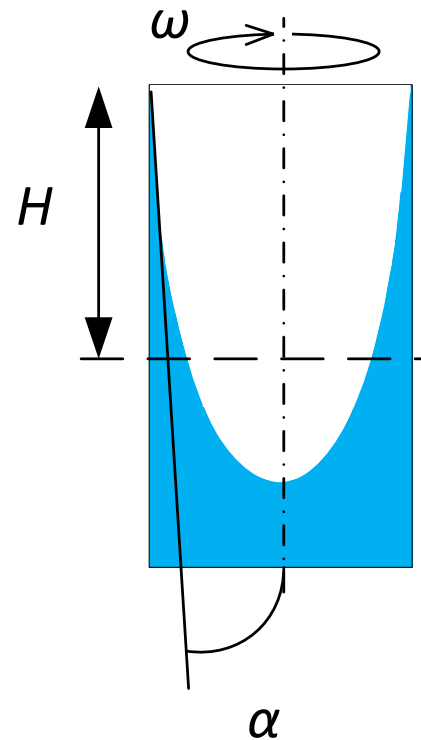
- > Variables Massenträgheitsmoment
- > Drehzahl durch Netzfrequenz festgelegt → Energieaustausch auch bei **konstanter** Drehzahl



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

prinzipielle Funktionsweise

- > Variables Massenträgheitsmoment → Flüssigkeit ist die verschiebbare Masse
- > Zentrifugalbeschleunigung treibt Fluid (= Masse) auf größeren Radius

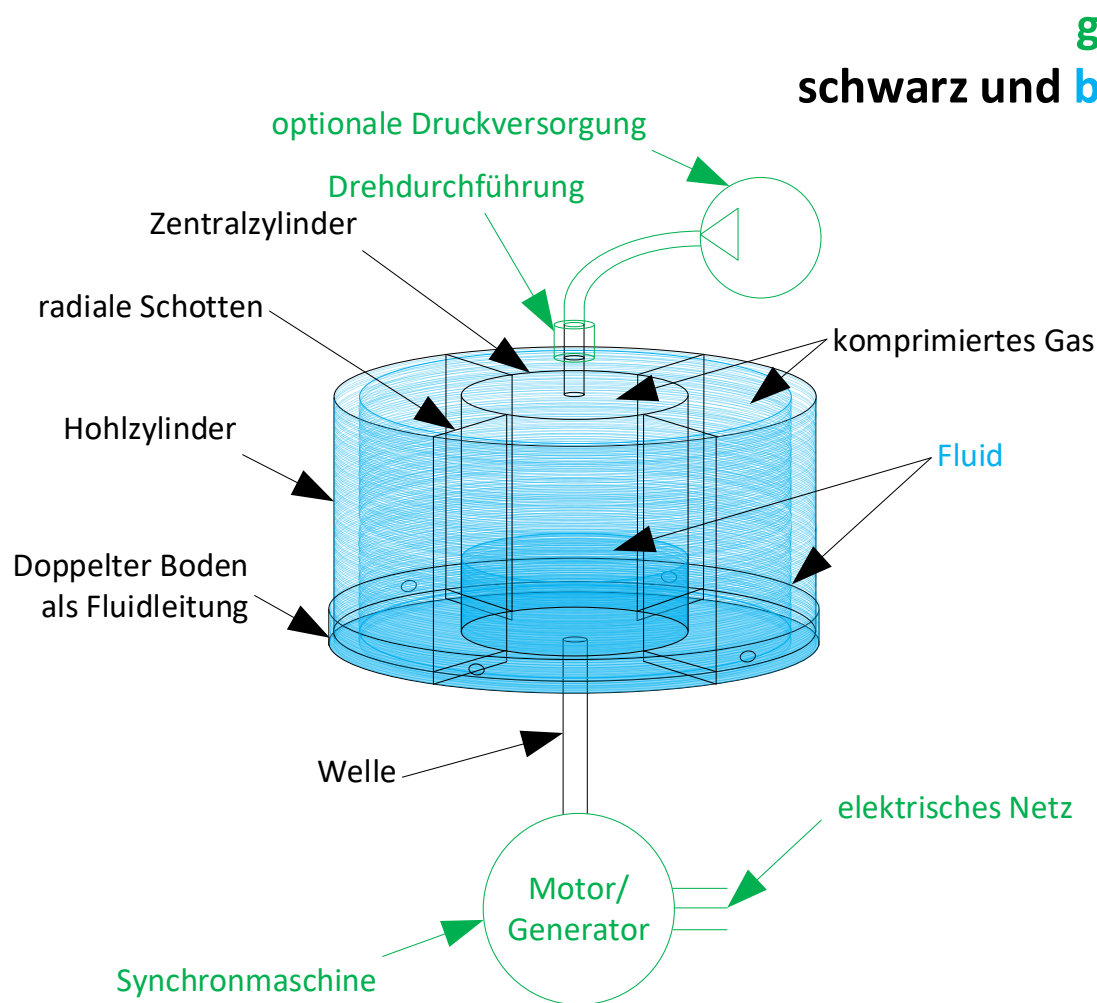


- > Diverse Fluide sind möglich
- > z.B. Wasser mit Glykol:
 - > vorteilhafte Dichte
 - > günstige chemische Eigenschaften
 - > billig, verfügbar und umweltfreundlich

Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

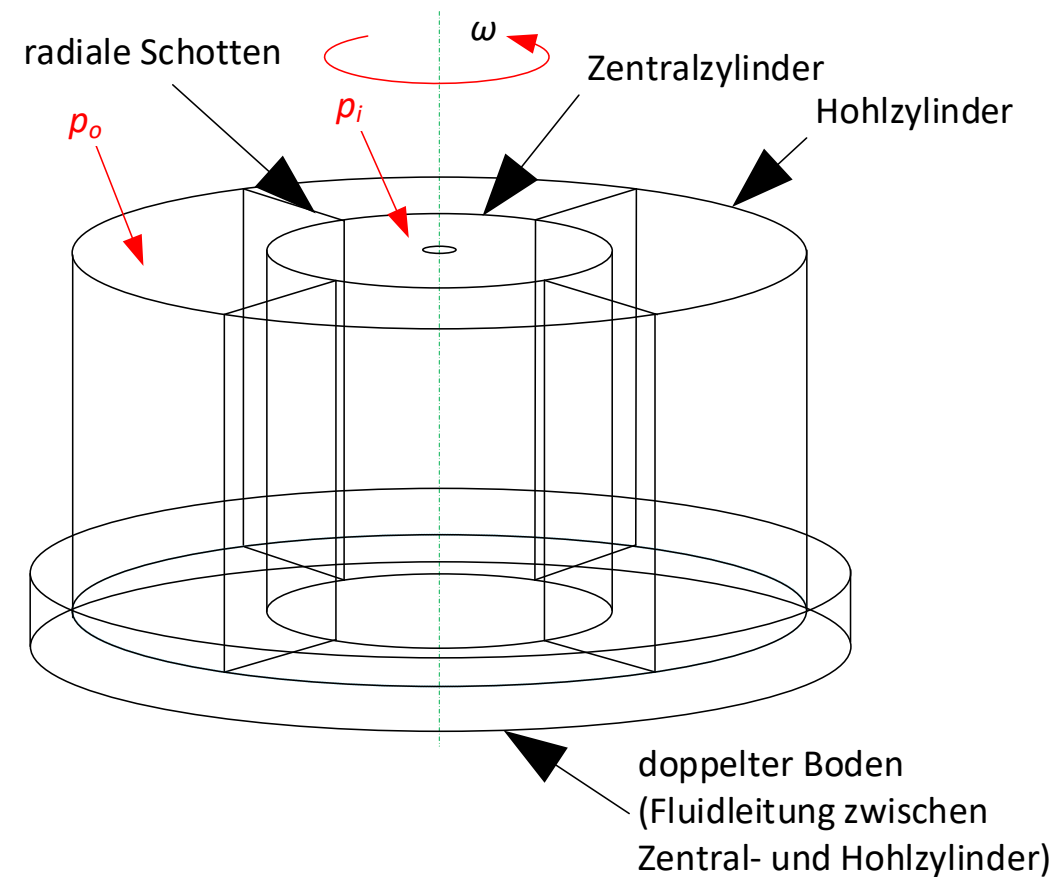
prinzipieller Aufbau

Alle Hauptkomponenten



grün = steht
schwarz und blau = dreht

hydraulisch relevante Hauptkomponenten



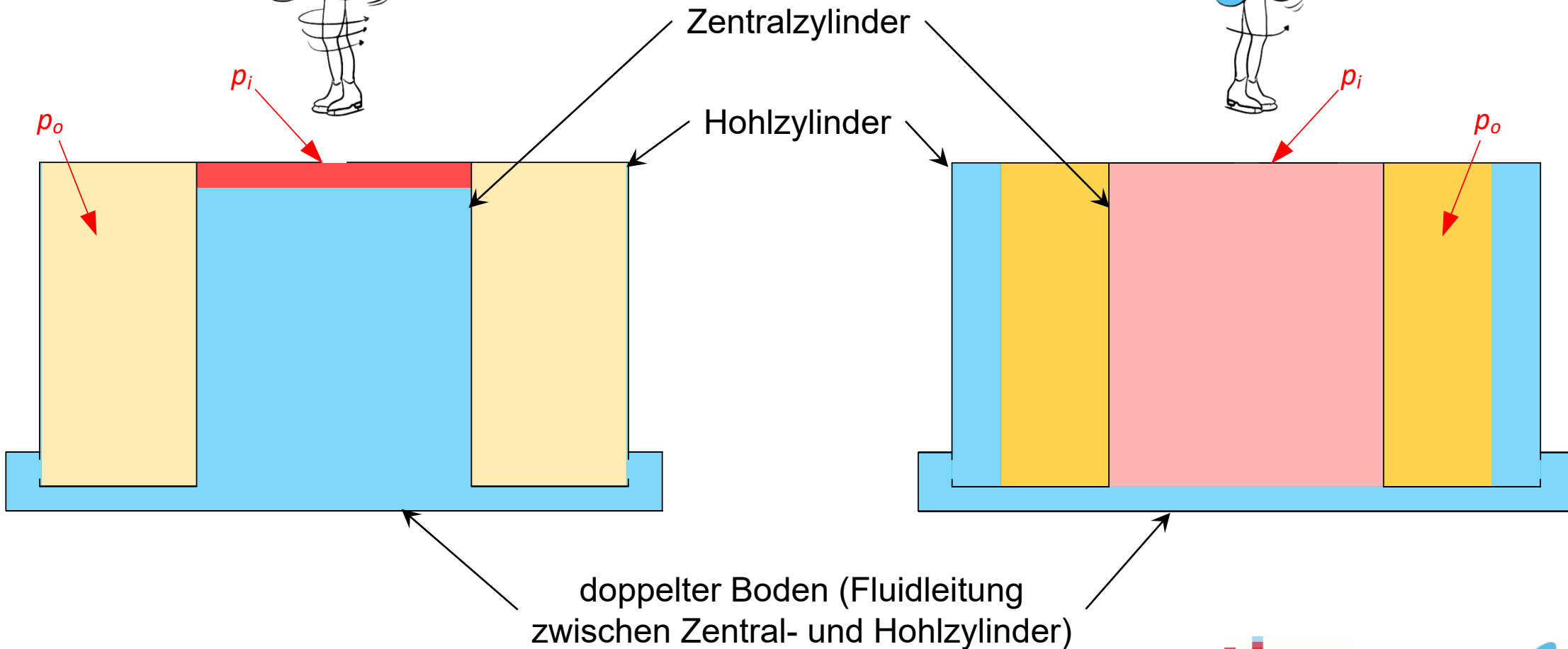
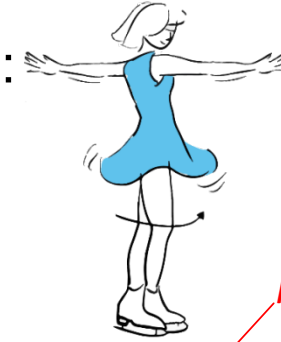
Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Fluid (=Masse) und Gas (=Feder) im entladenen und im geladenen Zustand

entladen:



geladen:



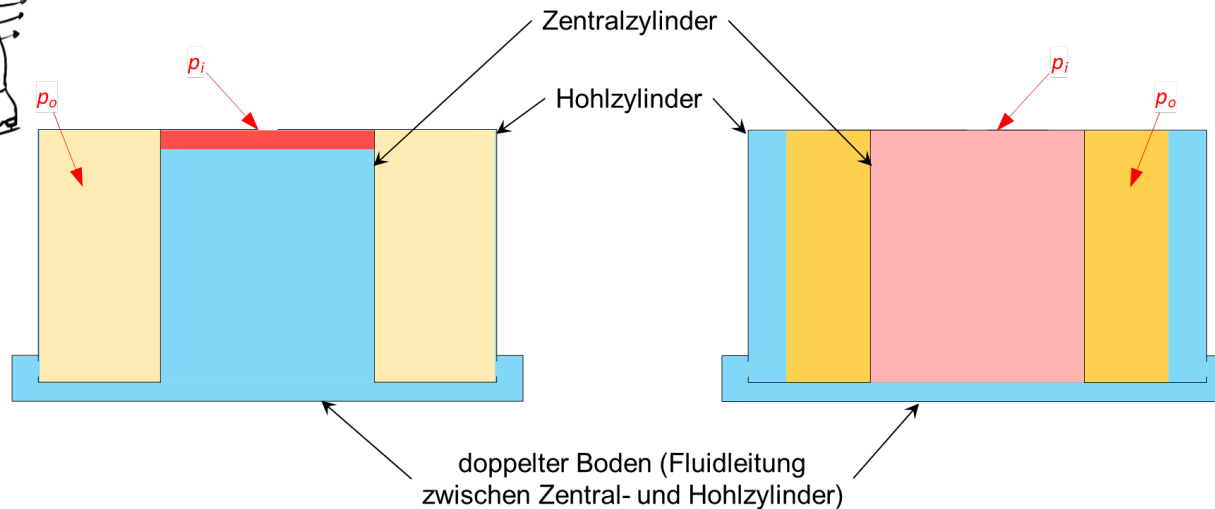
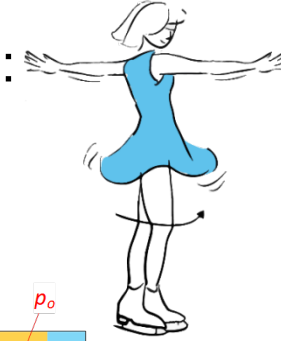
Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Fluid (=Masse) und Gas (=Feder) im entladenen und im geladenen Zustand

entladen:



geladen:

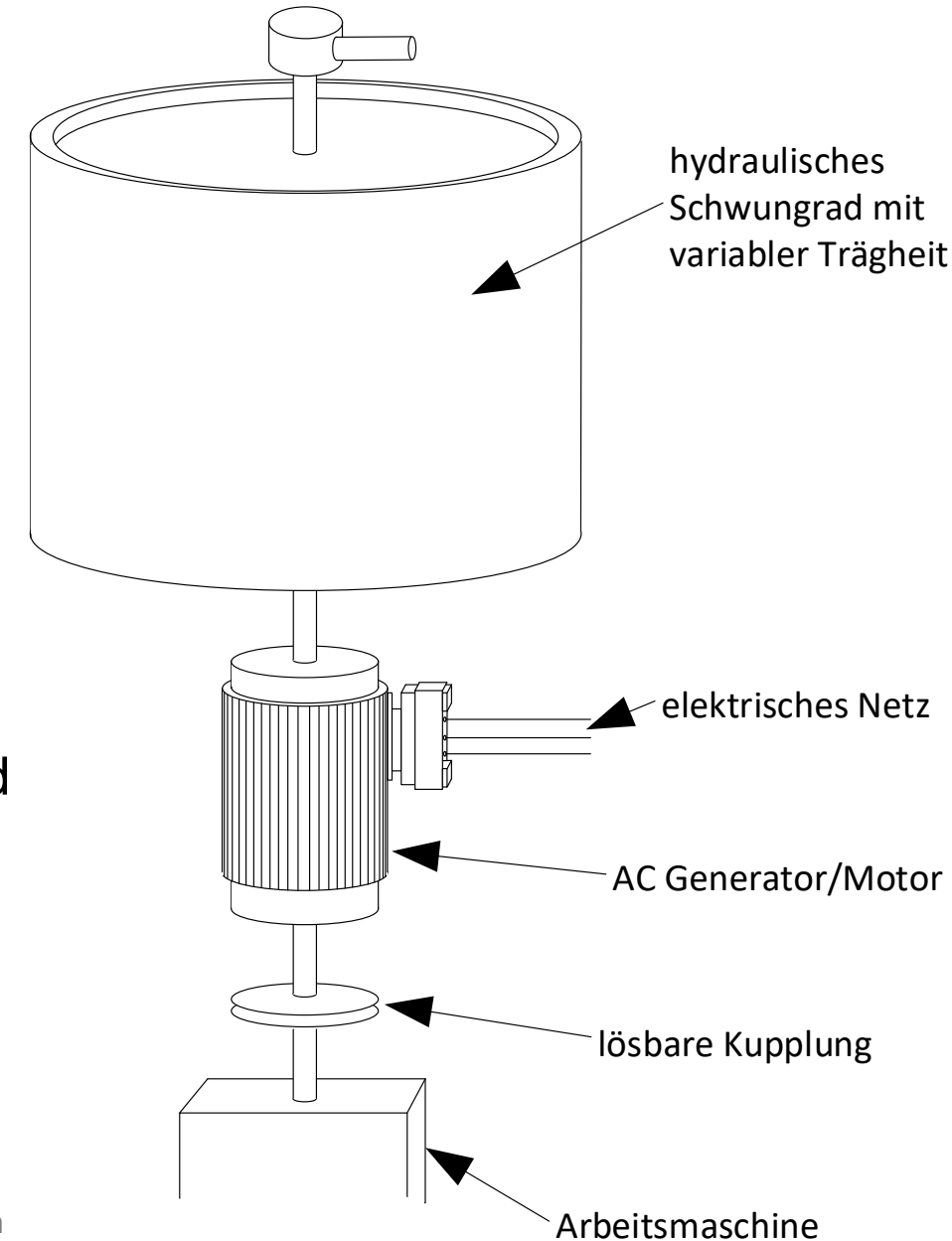


- > **Laden:** Ausreichende Drehzahl → Zentrifugalbeschleunigung → Fluid wird in Hohlzylinder geschleudert
- > **Entladen:** Drehzahl unterschreitet Grenzwert → Gasdruck in Hohlzylinder übersteigt Zentrifugalbeschleunigung → Fluid wird in Zentralzylinder zurückgedrückt
- > → kleine Drehzahlveränderungen steuern das Schwungrad

Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Weiteres Anwendungsgebiet: Notstromversorgung

- > Motor an Arbeitsmaschine wird bei Stromausfall zu Generator
- > Erregung muss über initiale Transienten hinaus sichergestellt sein
- > → Synchronmotor (oder Asynchronmotor mit Kondensatoren) → produziert AC-Spannung
- > Antriebsmoment an Welle von hydraulischem Schwungrad
- > Mit oder ohne lösbarer Kupplung zwischen Motor und Arbeitsmaschine



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Vorteile des hydraulischen Systems

- > Extrem einfacher Aufbau
- > Keine beweglichen mechanischen Bauteile im rotierenden Teil des Schwungrads → wenig Verschleiß → hohe Zyklenzahl
- > Nachhaltig!
 - > Keine umweltschädlichen Materialien
 - > Keine seltenen Materialien → keine Konkurrenz mit boomenden Branchen, z.B. Elektromobilität

Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

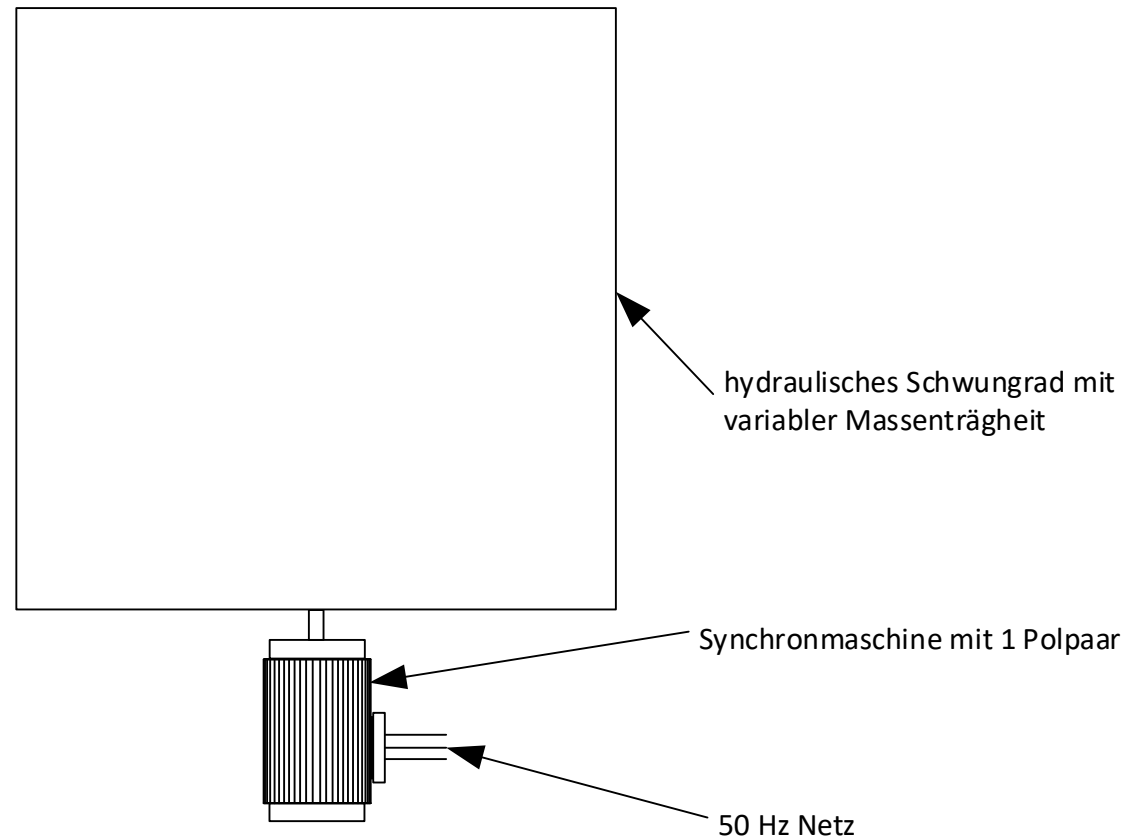
Auslegungsbeispiele

> Anwendungsfall:

- > Netzträgheit, Regelreserve und Notstromversorgung durch hydraulisches Schwungrad

> Komponenten:

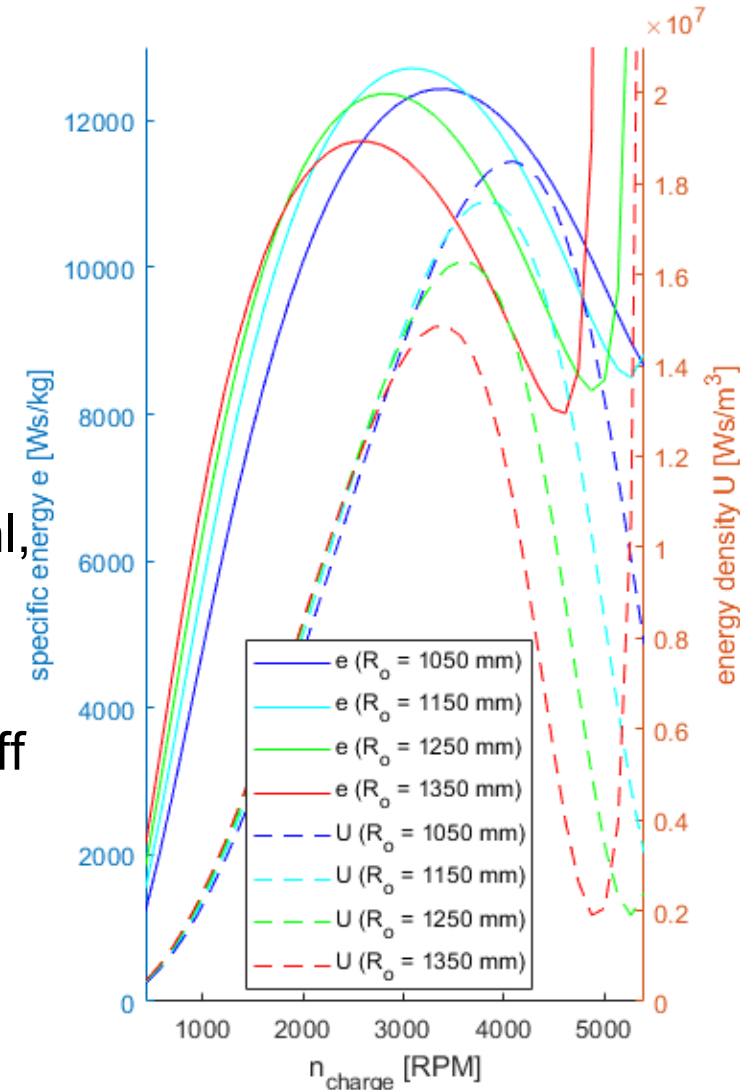
- > Schwungrad
- > Synchronmaschine
- > 50 Hz Netz



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Auslegungsbeispiele

- > Auslegungsgrenze: Materialspannung an größtem Radius von Hohlzylinder und doppeltem Boden
- > Verursacht durch Zentrifugalbeschleunigung in Fluid und Zylindermaterial sowie Gasdruck
- > Multidimensionales Optimierungsproblem (Radien, Höhen, Drehzahl, Fluide, Materialien) → viele mögliche Parameterkombinationen
- > Zwei Materialien untersucht: Stahl & kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK)
- > Auslegungskriterien:
 - > Spezifische Energie e = Energie pro Masseneinheit
 - > Energiedichte U = Energie pro Volumeneinheit



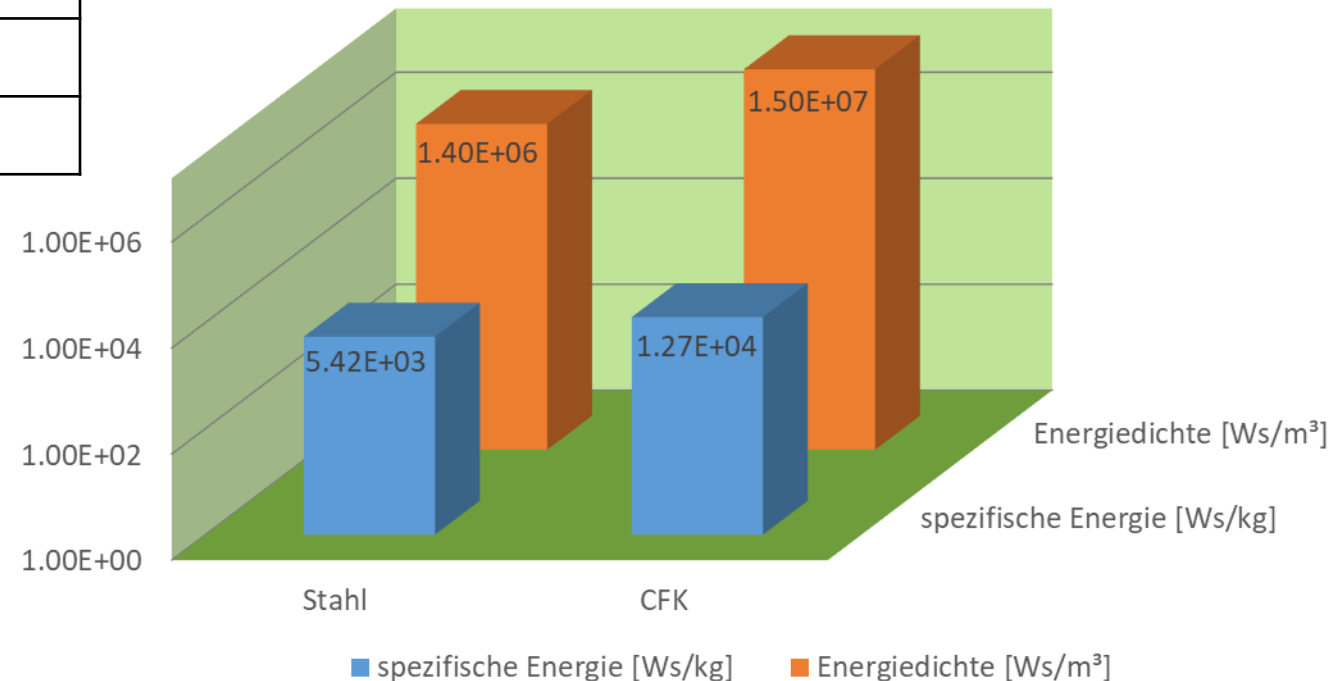
Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

Auslegungsbeispiele

- > Ergebnisse für Schwungrad (mit Synchronmaschine) allen Komponenten aus Stahl bzw. CFK

	Stahl	CFK
Nennfrequenz	50 Hz	50 Hz
Entladefrequenz	49,5 Hz	49,5 Hz
Lade-/Entladedauer	300 s	300 s
Leistung	1,9 kW	293 kW

Spezifische Energie & Energiedichte
wenn Drehzahl zwischen 3000 U/Min und 2970 U/Min variiert



Hydraulisches Schwungrad mit variabler Massenträgheit

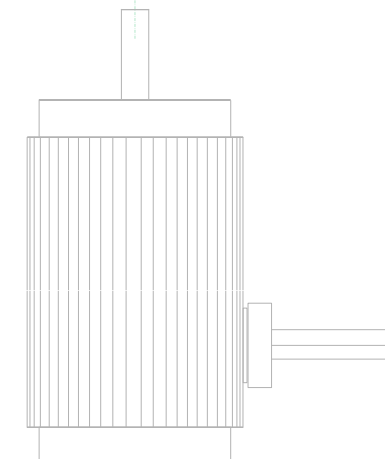
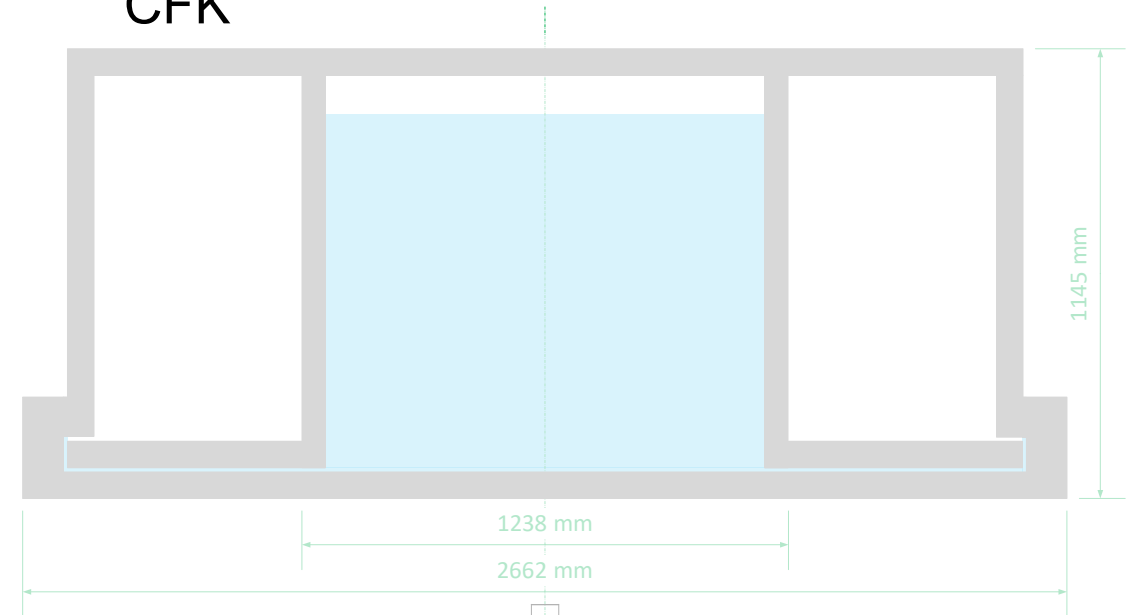
Auslegungsbeispiele

> Ergebnisse für Schwungrad mit allen Komponenten aus

Stahl

CFK

	Stahl	CFK
Nennfrequenz	50 Hz	50 Hz
Entladefrequenz	49,5 Hz	49,5 Hz
Lade-/Entladedauer	300 s	300 s
Leistung	1,9 kW	293 kW
verschiebbare Fluidmasse	63,6 kg	886,6 kg
auf konstantem Radius rotierende Masse	45 kg	6586 kg
Umfangsgeschwindigkeit	107 m/s	382 m/s

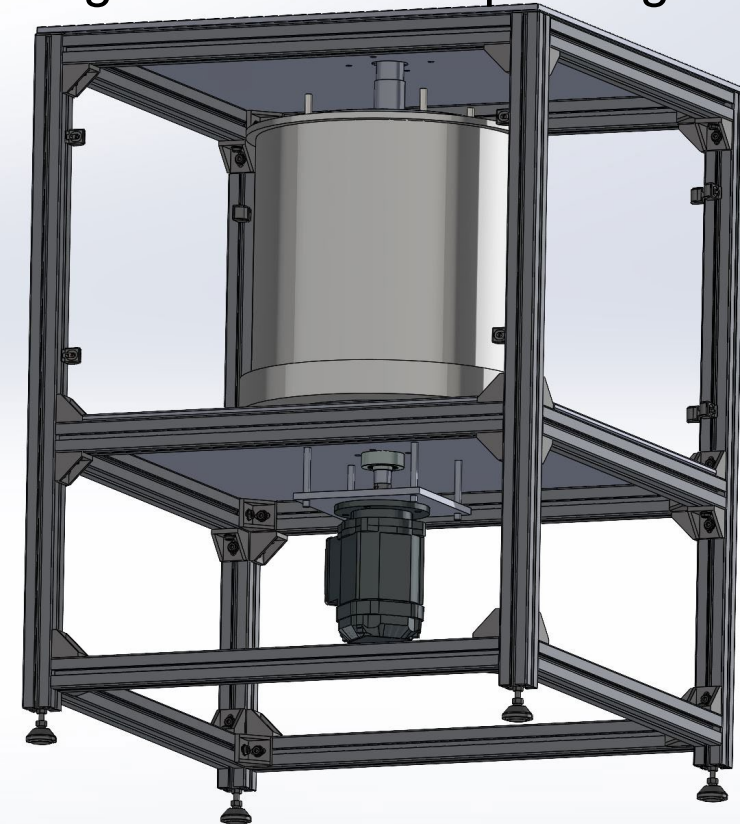
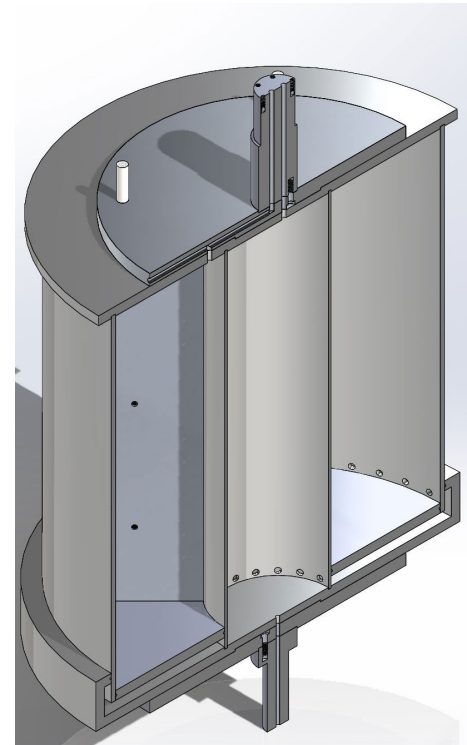


> Maßstabsgetreue Darstellungen

Fazit und Ausblick

- > Netzstützung sollte auf diversen Technologien basieren, auch passive rotierende Maschinen
 - > Hydraulisches Schwungrad kann Momentanreserve, Primärregelung und Notstromversorgung über einfache Synchronmaschine realisieren
 - > Kleine Schwunräder aus Stahl für einfache und billige Anwendungen
 - > CFK Schwunräder für große Leistungen mit anspruchsvoller Lagerung und Vakuumkapselung
 - > Derzeit wird Demonstrator gebaut
-
- > Weitere Details unter https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4582859

 - > Fortlaufende Infos zum Projekt: <http://www.inno-nord-projekt.de/>





**Hochschule
Flensburg**
University of
Applied Sciences

**Wind Energy Technology
Institute**



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

Fragen?

