



Hochschule
Zittau/Görlitz
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Institut für Prozeßtechnik,
Prozeßautomatisierung
und Meßtechnik



**Konzeption einer umkehrbaren Fluidenergiemaschine für
den Einsatz in einem flexiblen indirekten Stromspeicher**
Torsten Klette

1.

Motivation

2.

Der indirekte Stromspeicher

3.

Kolbenverdichter

4.

Technologiebewertung

5.

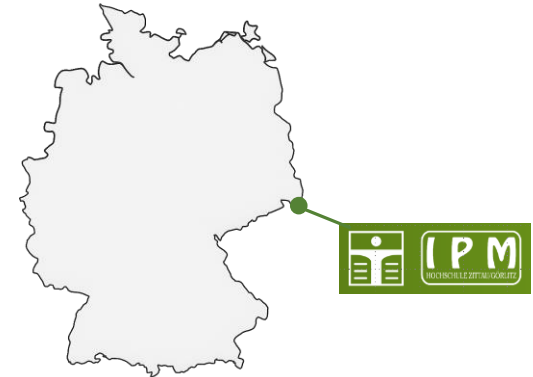
Ausblick



Motivation



- Zittau & Görlitz – Zwei Standorte
- 3.000 Studierende
- ca. 500 Mitarbeitende in Lehre, Forschung und Verwaltung
- ca. 90 Professorinnen und Professoren



Ziele der Energiewende



Klimaziele

- Treibhausgasneutralität bis 2045
- -65 % Treibhausgasreduktion bis 2030



Effizienz & Elektrifizierung

- -26 % Primärenergieverbrauch bis 2030
- Sektorkopplung
- Verkehr: 15 Mio. E-Autos bis 2030



Versorgungssicherheit & Wirtschaftlichkeit

trotz EE-Dominanz soll das System stabil und bezahlbar bleiben



Ausbau Erneuerbarer Energien

Stromsektor

- 80 % EE-Anteil am Bruttostromverbrauch bis 2030
- ca. 600 GW Photovoltaik bis 2030
- 115 GW Wind Onshore bis 2030
- 30 GW Wind Offshore bis 2030

Wärmesektor

- 50 % erneuerbare Wärme bis 2030
- Wärmepumpenhochlauf: 500k-600k Geräte/Jahr



Infrastruktur

- Netzausbau Strom & Wasserstoff
- Flexibilitätssteigerung
- Digitalisierung der Energieinfrastruktur

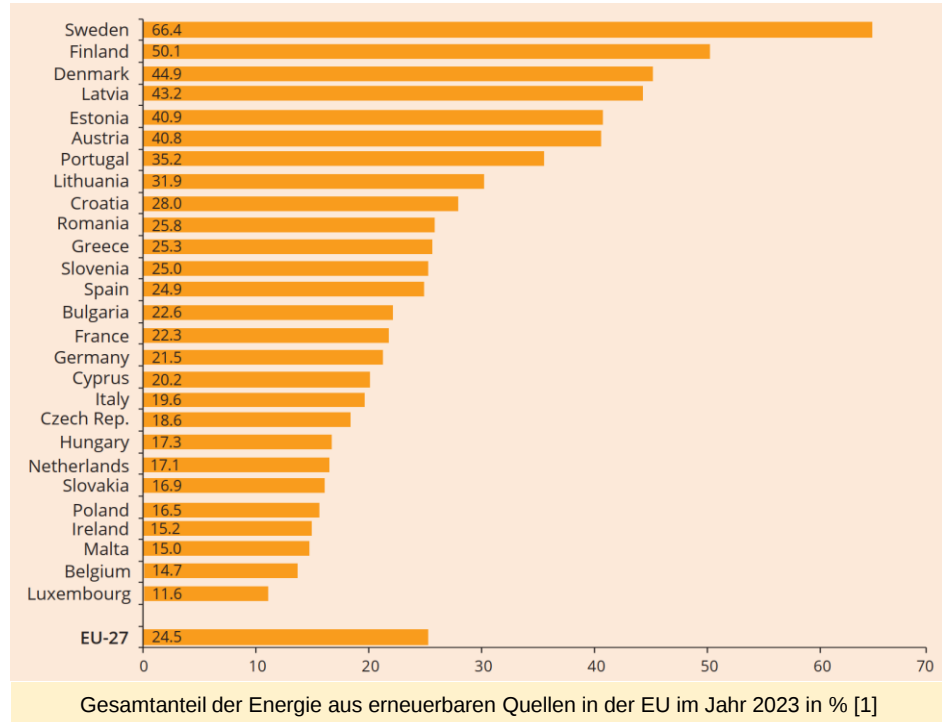


Kreislaufwirtschaft & Nachhaltigkeit

- Recyclingquoten steigern
- Rohstoffabhängigkeit reduzieren

Herausforderungen:

- **Volatilität** erneuerbarer Energien
- **Fluktuationen** beim Energiebedarf
- steigender Bedarf an **Speicherkapazitäten**



[1] vgbe energy e.V., vgbe Facts and Figures: Electricity Generation 2025|2026. Essen, Germany: vgbe energy, Sep. 2025. Accessed: Feb. 2025.

→ Bedarf an Speichertechnologien

Energiespeichertechnologien:

- unverzichtbar für die Energiewende
- verbessern Netzstabilität, Ausfallsicherheit und Effizienz

wichtige Leistungsfaktoren:

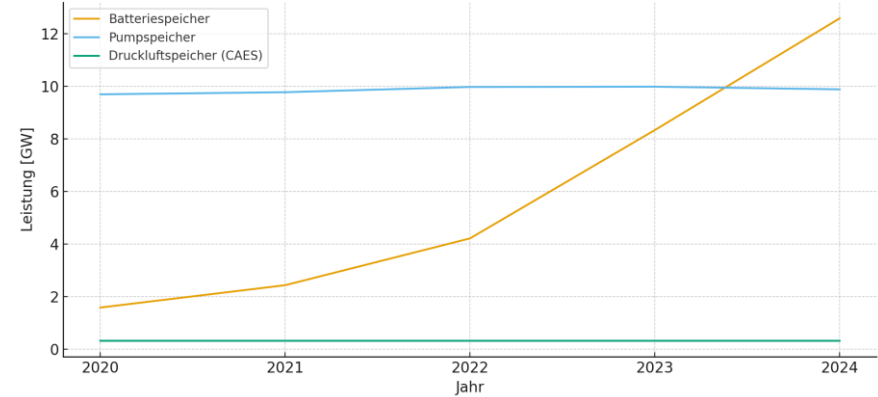
- die Energiedichte
- die Speicherdauer
- die Lade-/Entladeeigenschaften

aktueller Stand / Prognose:

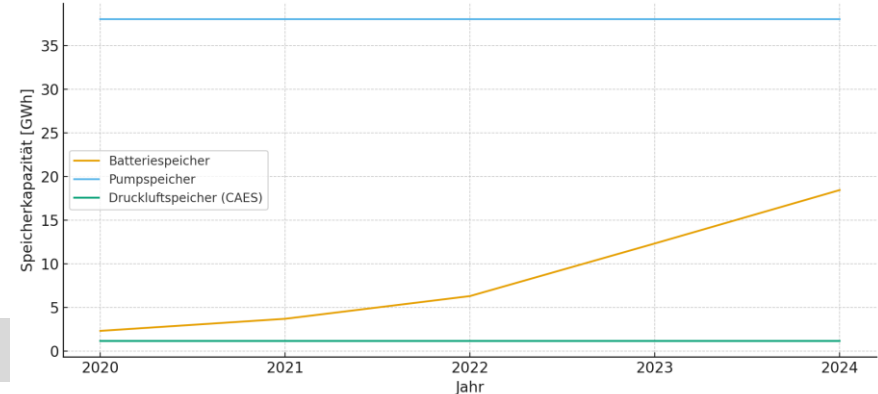
- Weltweit 360 GWh bis Ende 2024 installiert (hauptsächlich Pumpspeicher- und Druckluftsysteme)
- 90 % der Neuinstallationen 2015 - 2024 sind Batterien
- erwartet wird das 6-fache bis 2030 (> 2000 GWh)
- Lithium-Ionen-Batterien sind derzeit marktführend
- große Batterieinstallationen (Speicherdauer bis 8h)
- Langzeitspeicherlösungen wie Power-to-Gas, Druckluft- u. Wärmespeichersysteme gewinnen zunehmend an Bedeutung

→ sektorenkoppelnder Energiespeicher

Entwicklung der installierten Leistung – Deutschland (2020–2024)



Entwicklung der Speicherkapazität – Deutschland (2020–2024)

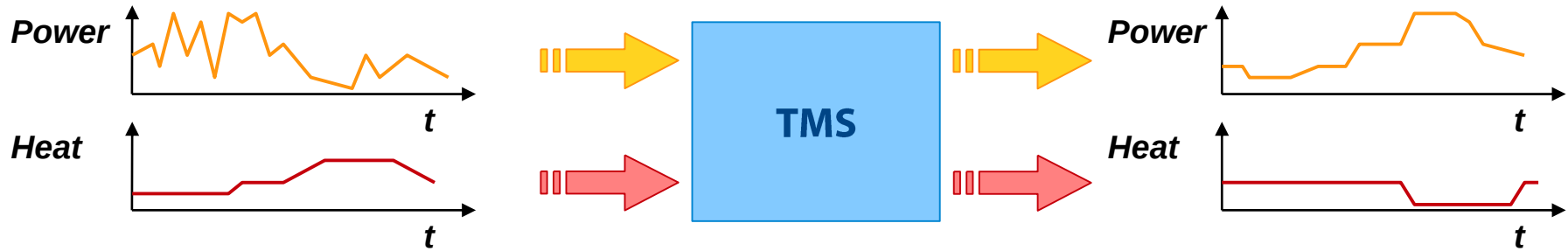




Der indirekte Stromspeicher

Idee: Thermo-Mechanischer Stromspeicher

- flexibles indirektes Stromspeichersystem zur Sektorenkopplung von Strom und Wärme

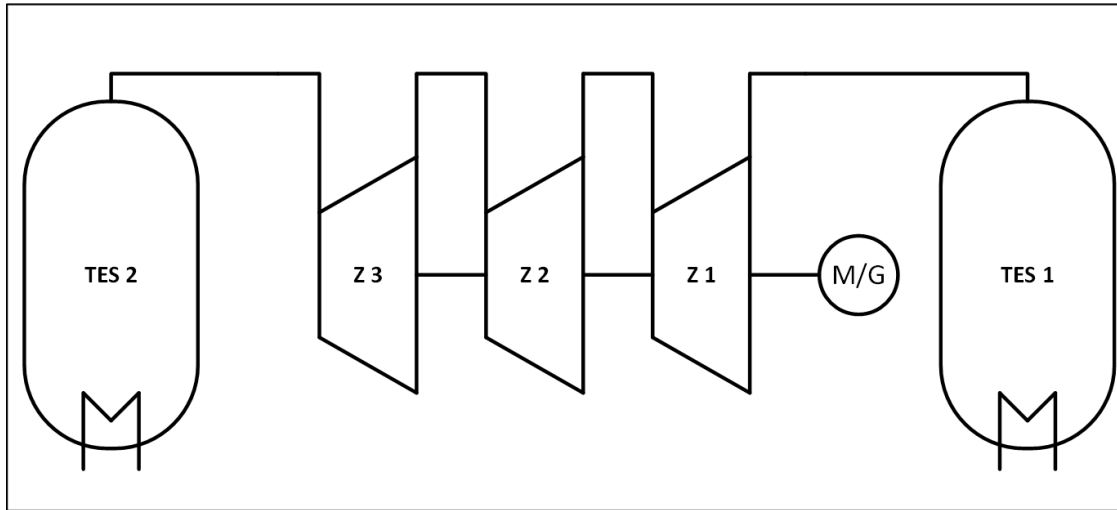


Vorteile:

- Nutzung überschüssiger Energien (Strom, Prozesswärme) und spätere Rückverstromung
- Ein- und Ausspeicherung → Strom und/oder Wärme
- thermische Energiespeicherung → Nutzung Dampfspeicher (Druckwasserspeicher)
- Stromspeichersystem zur Sektorenkopplung von Strom und Wärme

Aufbau und Prinzip der TMS-Batterie:

- Hochdruck- / Niederdruck- Dampfspeicher (Druckwasserspeicher)
- Kopplung über eine umkehrbare Fluidenergiemaschine
- Stromeinspeicherung / Rückverstromung
- direkte Kondensation im Dampfspeicher → keine Wärmeübertrager notwendig
- Wärme Ein-/Auskopplung über optionale Wärmeübertrager am HD/ND-Speicher möglich



Schaltbild indirekter Stromspeicher

STUDIERN_OHNE_GRENZEN

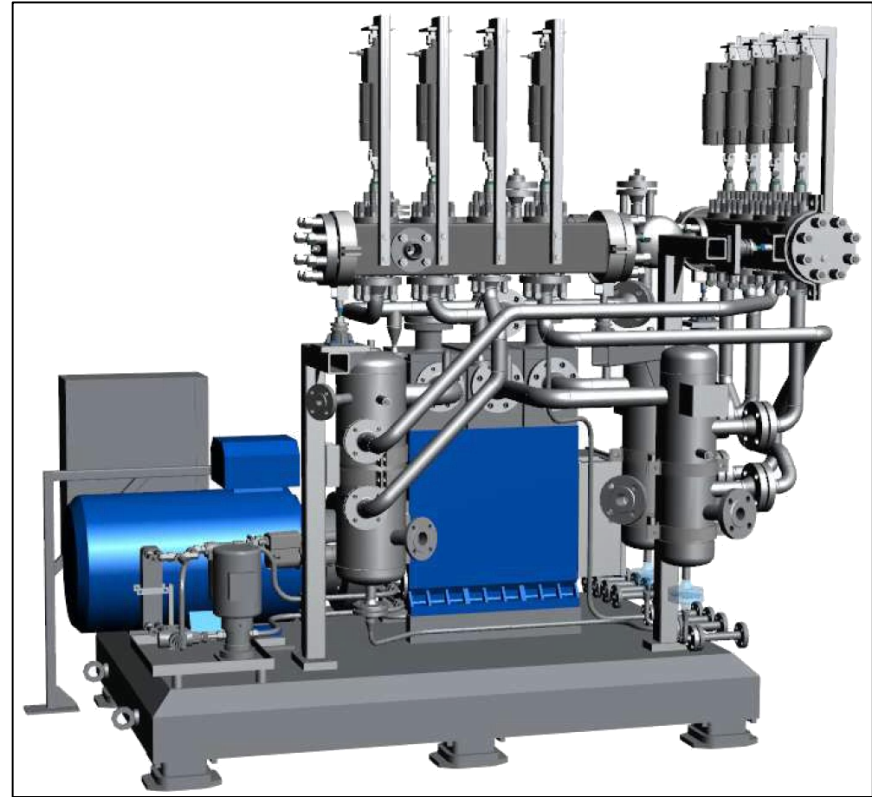
Komponenten:

Kolbenmaschine (Kompressor/Expander)	1-stufig, mehrstufig
Hochdruckspeicher	max. 60 bar max. 350 °C
Niederdruckspeicher	max. 10 bar max. 184 °C
Armaturen	Stufenumschaltung
Einspritzung	je Stufe
Armaturen	je Speicher
Kondensatableiter	je Stufe

umkehrbare Fluidenergiemaschine

Freiheitsgrade:

- Drehrichtung (Expander / Kompressor)
- Drehzahl (300 U/min - 1500 U/min)
- Stufenzahl (Linearmotoren)
- Versatzwinkel Steuerwelle zur Kurbelwelle
- Füllung (variable Füllungen im Expanderbetrieb)
- Thermodynamik (p_{in} / T_{in} / T_{Einspr} / p_{out})

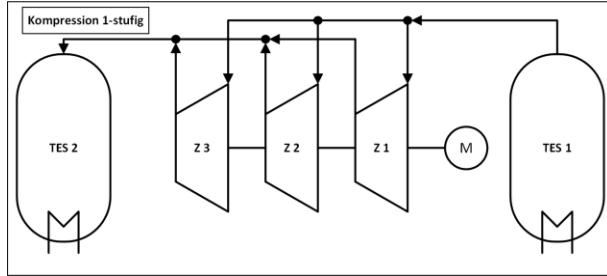


Prototyp der TMS-Kombimaschine

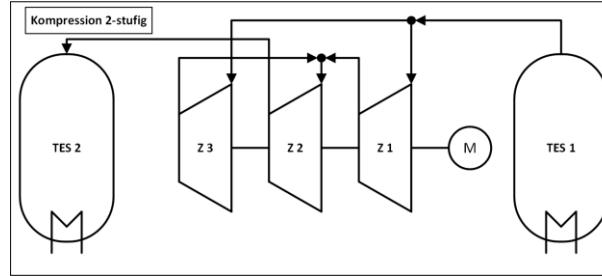
TMS-Batterie: Stufenumschaltung

Funktionsprinzip der TMS-Batterie: Kompression

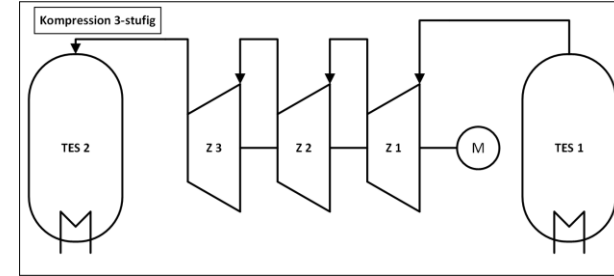
1. Schritt



2. Schritt

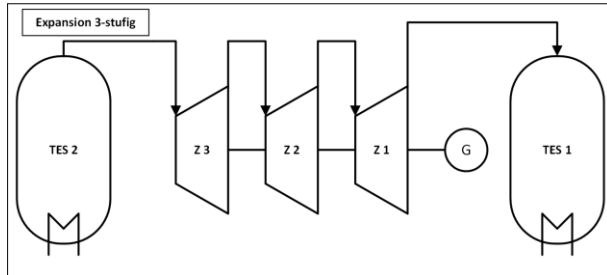


3. Schritt

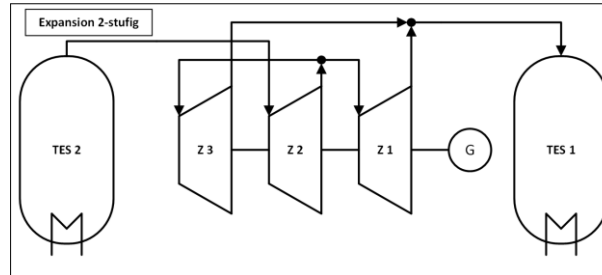


Funktionsprinzip der TMS-Batterie: Expansion

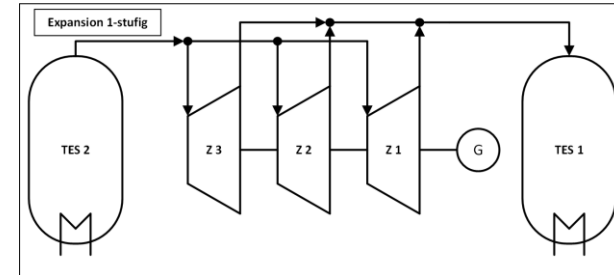
4. Schritt



5. Schritt

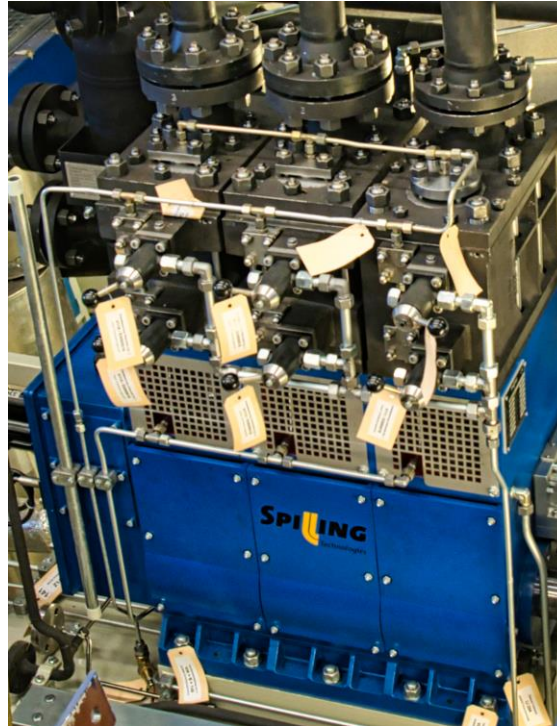


6. Schritt



Wesentliche Eigenschaften:

- umkehrbare Fluidenergiemaschine (Kompressor- / Expanderbetrieb)
- Dampfkompessor, Dampfexpander, Elektromotor und Generator erstmals vereint in einer kompakten Maschine
- 3-stufige Kolbenmaschine
- doppelwirkende Reihenmaschine
- schiebergesteuert
- Umschaltung zwischen Kompressor- und Expanderbetrieb ohne Umbauten

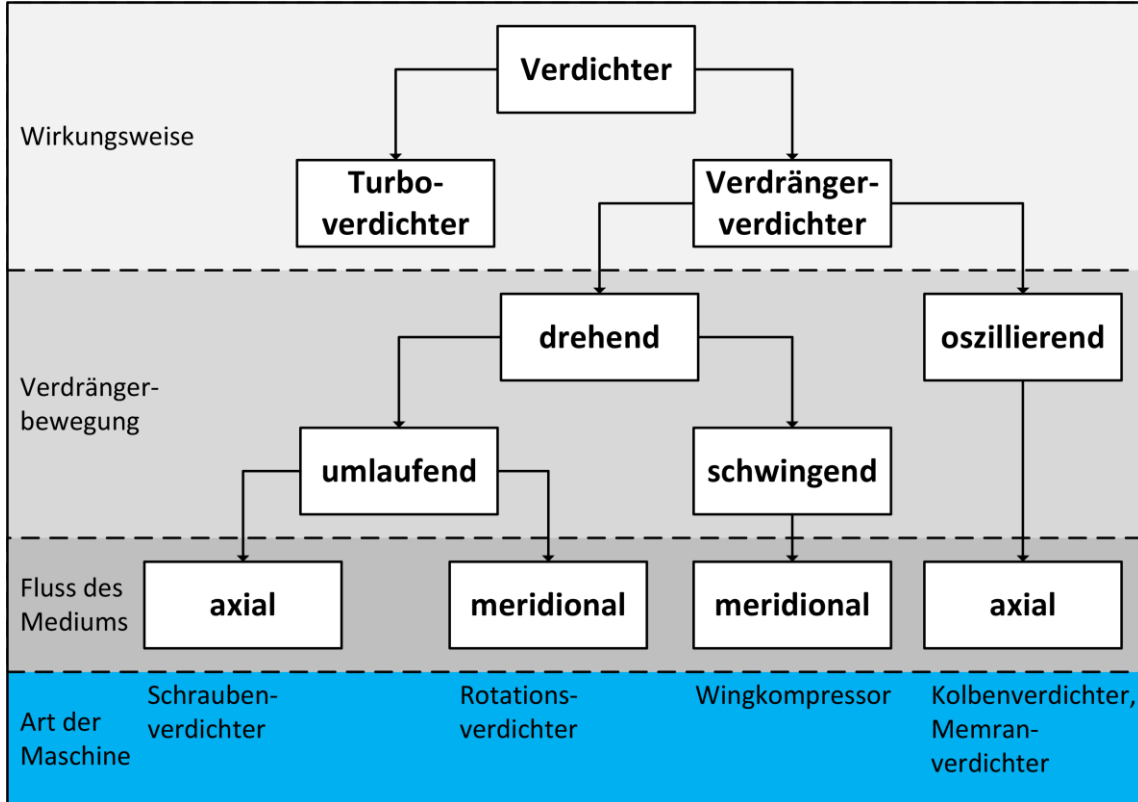


Prototyp der TMS-Kombimaschine im Zittauer Kraftwerkslabor



Kolbenverdichter

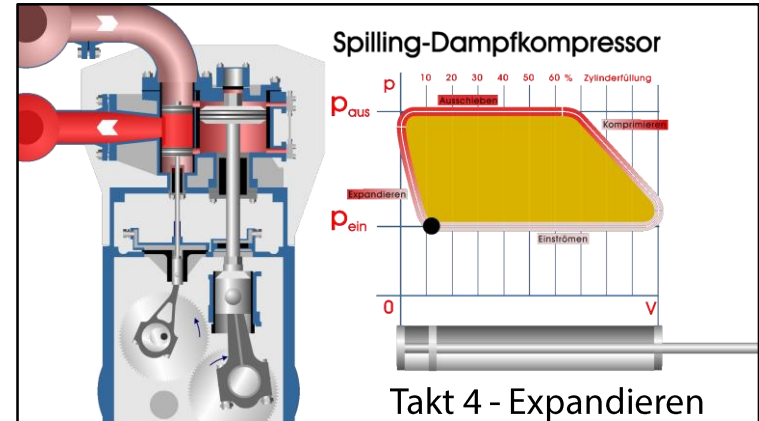
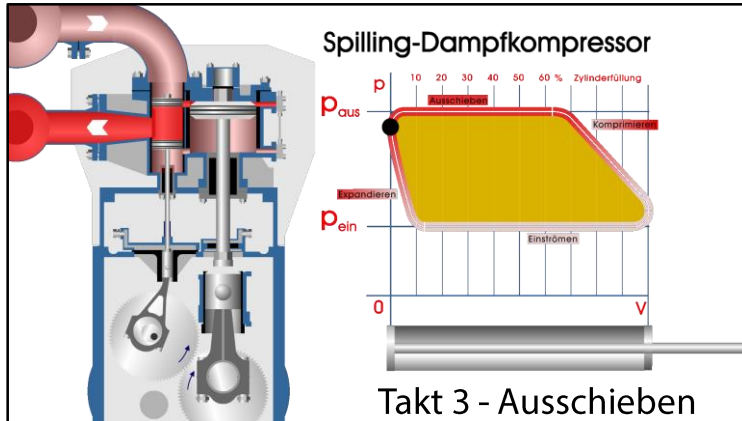
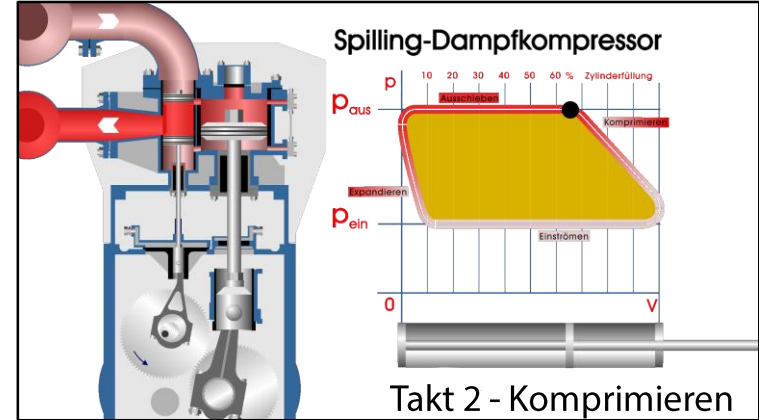
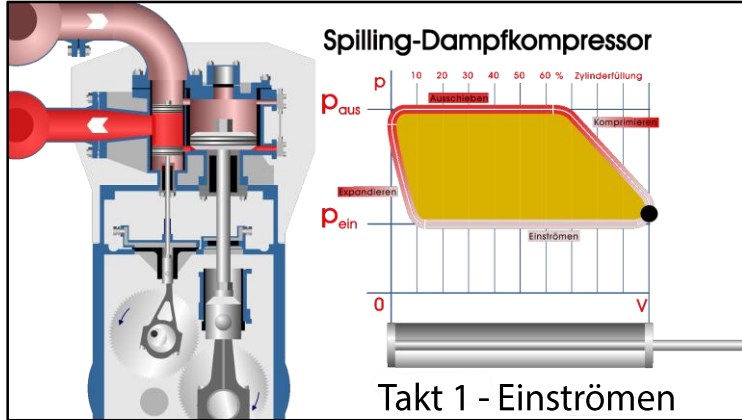
Einteilung der Verdrängerverdichter:



Vorteile Kolbenverdichter:

- a. hoher Druck- und Temperaturbereich
- b. mehrstufige Bauweise (max. 6 Stufen)
- c. unempfindlich gegenüber Nassdampf

Funktionsprinzip Kolbenverdichter



Technische Spezifikation:

Nenndrehzahl Kompressor	1500 1/min
Drehzahlregelbereich	300 – 1500 1/min
Eintrittsdruck Verdichter variabel	2 - 11 bara
Austrittsdruck Verdichter variabel	4 – 21 bara
Max. Druckdifferenz ($p_{\text{Aus}} - p_{\text{Ein}}$)	10 bar
Regelbereich Dampfdurchsatz	25 % - 100%
Max. elektrische Leistungsaufnahme	75 kW

Druckverhältnisse 1-Zylinder:

p_{Ein} in bara	P_{Aus} in bara	π	max. m^* in kg/h
2	6	3	160
2	4	2	180
4	12	3	300
7	16	2,3	550
11	21	1,9	850

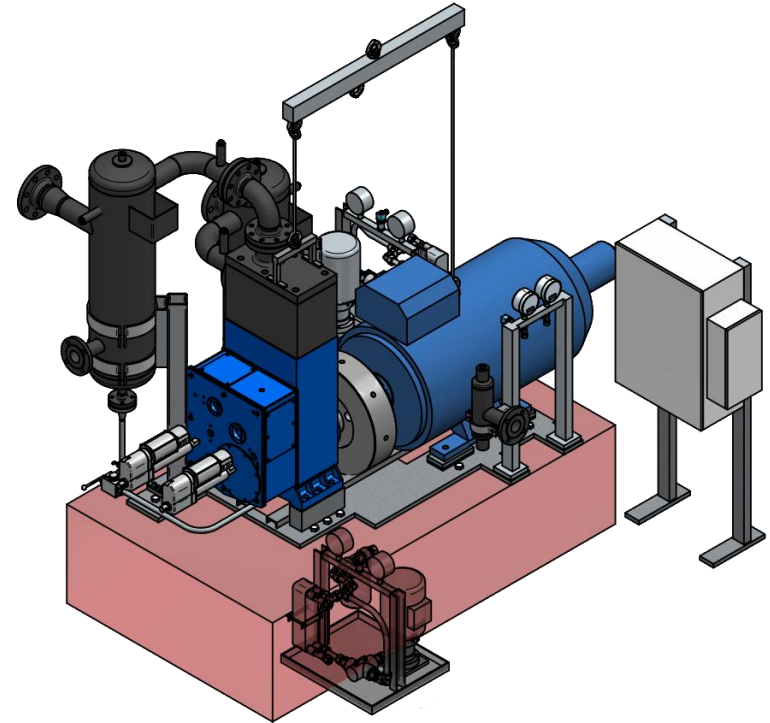
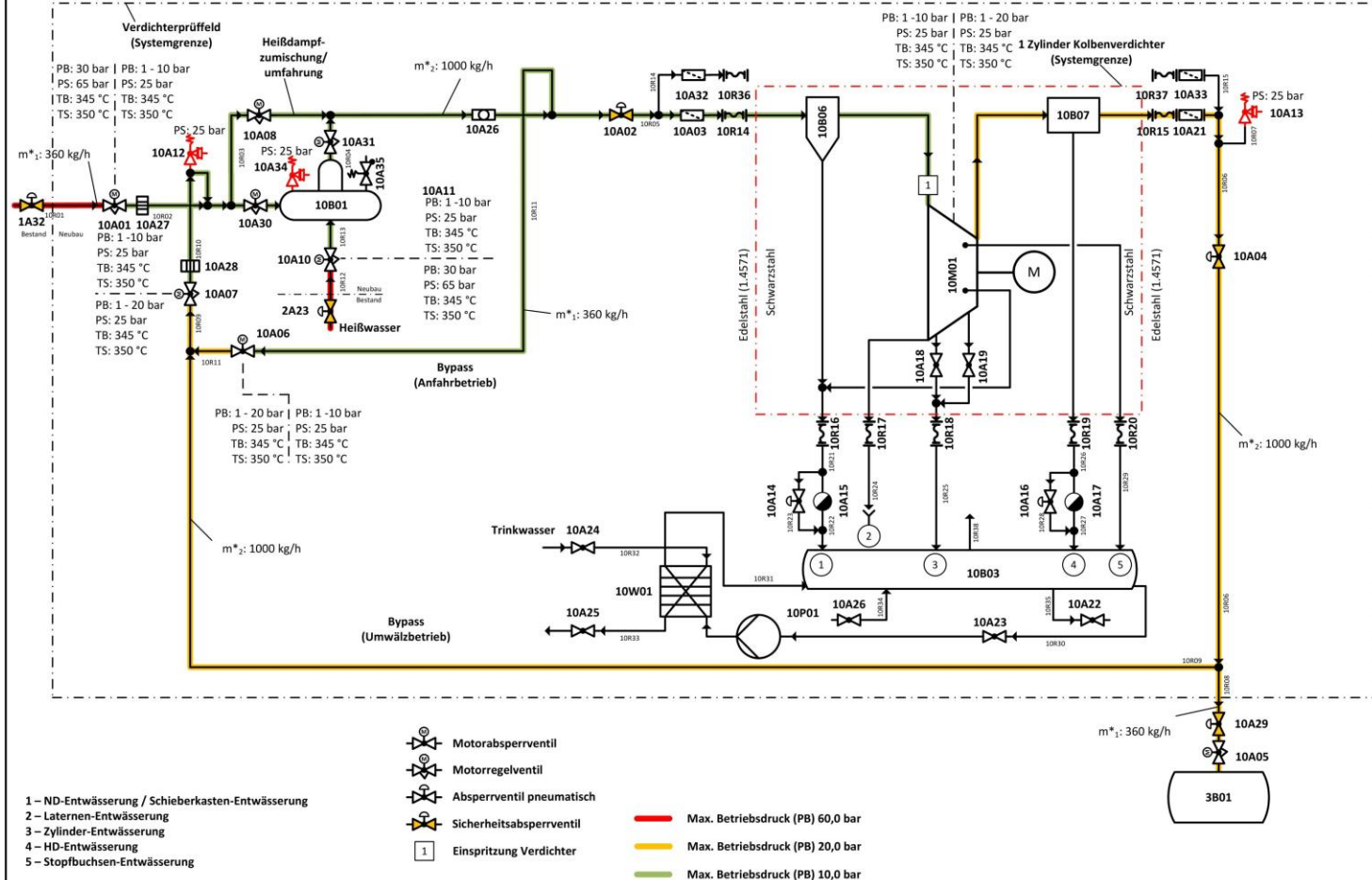


Abb.: Kolbenverdichter

Maximaler Druck, Temperatur, Massenstrom (Betrieb – Verdichter)



Dampfverdichter-Prüffeld

Eintrittsseite

Kolben

Dampfsättiger

Maschinentisch

Kondensat-
behälter

Austrittsseite

Sensorbox

Zylinder-
entwässerung

Motor

Federelement

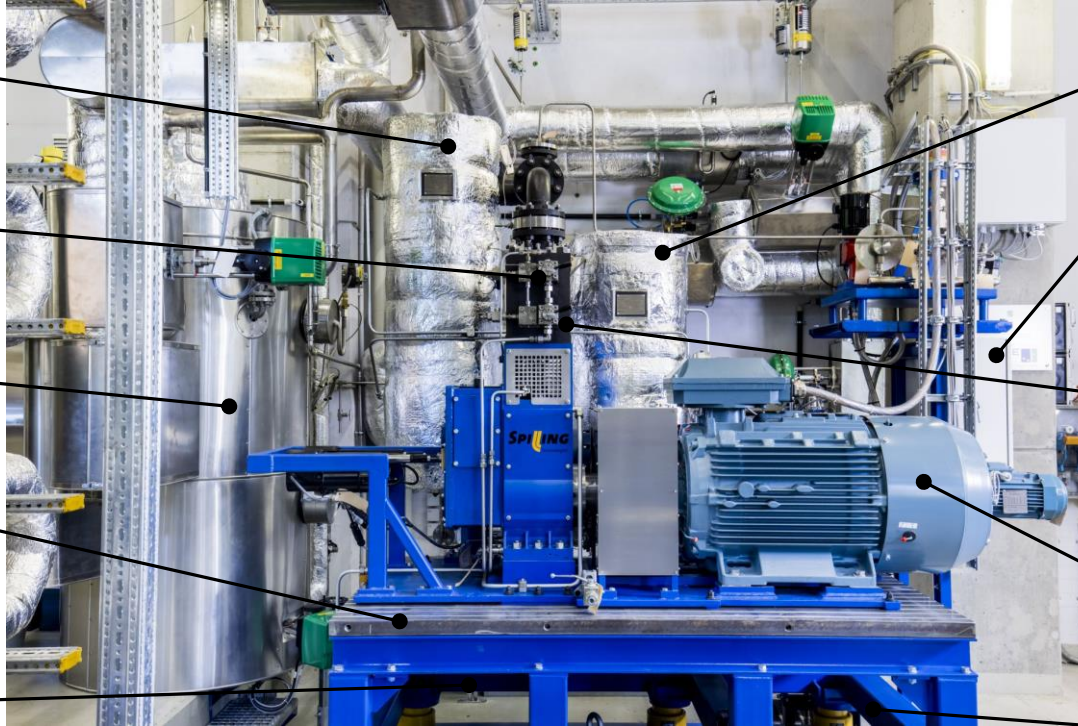


Abb.: 1-Zylinder Kolbenverdichter



Technologiebewertung

Batteriespeicher (LiFePo_4)

Vorteile:

- hohe Effizienz: 90 – 96 % Round-Trip Efficiency (RTE)
- hohe Leistungsdichte (W/kg)
- kompakte Bauweise, leicht skalierbar
- lange Zyklenlebensdauer: 3000 – 9000 Zyklen
- Brandsicherheit
- geringerer Anteil kritischer Metalle (kein Kobalt/Nickel)

Nachteile:

- Lithiumbedarf → geopolitisch kritischer Rohstoff
- metallintensive Produktion (Cu, Graphit, Aluminium,...)
- Alterung über Zeit
- Recycling technisch möglich, aber derzeit unwirtschaftlich
- begrenzte Kapazität bei großen Energiemengen (>100 MWh)

TMS- Batterie

Vorteile:

- kein Einsatz von Lithium oder seltenen Metallen
- sehr hohe Materialverfügbarkeit & geringe Kosten (Wasser/Stahl/Isolierung)
- extrem lange Lebensdauer: > 30 Jahre
- keinen relevanten Kapazitätsverlust
- sehr gute Recyclingfähigkeit, nicht brennbar
- Wärmeauskopplung auf hohen Temperaturniveau möglich

Nachteile:

- niedrigere Effizienz: 40–70 %
- großer Platzbedarf (geringe Energiedichte)
- komplexere Thermodynamik & Anlagenbau (Druckbehälter, umkehrbare Fluidenergiemaschine (Kolbenmaschine))
- nicht so schnell regelbar wie Batterien (Minuten statt Millisekunden)

Technologischer Vergleich

Lebensdauer

Faktor	LiFePO ₄	TMS-Batterie
Zyklen	3000 – 9000	praktisch unbegrenzt (thermisch)
Jahre	10 -15	30 - 40
Kapazitätsverlust	2 – 3 % pro Jahr	< 0,3 % pro Jahr
Temperatur-einfluss	stark	vorteilhaft (hohe Temp. erwünscht)

Anwendungsszenarien

LiFePO ₄	TMS-Batterie
PV-Hausspeicher	Stadtwerke (bis 2,5 MW)
Frequenzregelung	Industrie (z. B. Papierfabrik)
Peak-Shaving	industrielle Abwärmenutzung
Mobile Anwendungen (Gabelstapler, EVs)	Netzstabilisierung
Kurzzeitspeicherung	flexible Kraftwerke (Carnot-Batterie)



Zusammenfassung

Ergebnisse:

- Entwicklung und Bau einer mehrstufigen umkehrbaren Fluidenergiemaschine (TMS)
- Prüffeld für die Untersuchung von Verdichtern (für Drücke bis 20 bar und Temperaturen bis 345 °C)
- 1 Zylinder-Kolbenverdichter (für Nassdampf und hohe Temperaturen geeignet)

Ausblick:

- Optimierung der Wärme- und Kondensatverluste
- Entwicklung einer Druck- und Temperatur abhängigen Einspritzung
- Erstellung einer Datenbasis / Modellentwicklung



TMS-Batterie und 1 Zyl.-Verdichter



Projektförderung durch die Sächsische Aufbaubank

Vorhabensbezeichnung: **Energiespeicher**

Teilprojekt: **Thermomechanische Speicher**

Gesamtprojektleitung: Prof. Dr.-Ing. Matthias Kunick

Projektleitung: V-Prof. Daniel Fiß

Laufzeit: 01.11.2025 – 31.10.2028



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert
durch Steuermittel auf der Grundlage des
vom Sächsischen Landtag beschlossenen
Haushaltes.



Vielen Dank für Ihr Interesse!

Kontakt:

M. Eng. Torsten Klette

Hochschule Zittau/Görlitz
Institut für Prozesstechnik, Prozessautomatisierung und Messtechnik
Fachgebiet Messtechnik/Prozessautomatisierung
Laborleiter Zittauer Kraftwerkslabor

Mail: T.Klette@hszg.de
Web: <https://theresa.hszg.de/>



Adresse:

Hochschule Zittau/Görlitz
IPM
Theodor-Körner-Allee 16
02763 Zittau