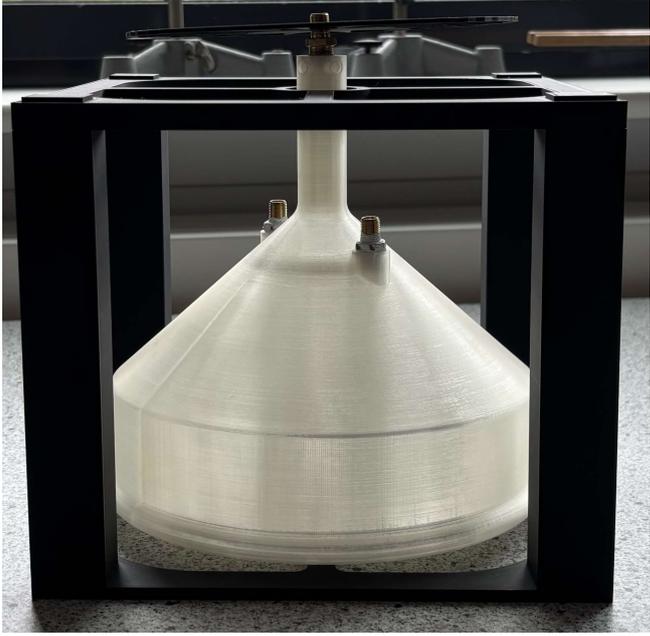


Jes Heinrich Carstensen  
Friedrich Paulsen Schule  
vom 01.02.25  
bis 4.07.25

4.07.2025

# Schwungradspeicher



# Einleitung

Die Energiespeicherung ist eine der zentralen Herausforderungen moderner Energiesysteme, insbesondere im Kontext volatiler erneuerbarer Energiequellen wie Wind- und Sonnenenergie. Konventionelle Speichersysteme wie Batterien basieren auf chemischen Reaktionen, die Energie in Molekülbindungen speichern und bei Bedarf wieder freisetzen. Ein alternativer Ansatz zur Energiespeicherung ist das Prinzip der Schwungradspeicherung, bei dem kinetische Energie in einer rotierenden Masse gespeichert wird. Dies erfolgt rein mechanisch, ohne chemische Umwandlung, was diese Technik potenziell langlebiger, umweltfreundlicher und einfacher im Aufbau macht.

Schwungräder werden seit Jahrhunderten verwendet, z. B. in mechanischen Werkzeugen oder als Bestandteil von Verbrennungsmotoren. Im einfachsten Fall handelt es sich um einen massiven Rotor, der um eine Achse rotiert. Durch das Einbringen von Energie erhöht sich seine Drehzahl, wodurch Energie in Form von kinetischer Rotationsenergie gespeichert wird. Beim Abgeben der Energie sinkt die Drehzahl wieder. Das Besondere am hier behandelten Schwungradspeicher ist, dass es nicht mit fester Masse arbeitet, sondern mit einer beweglichen Flüssigkeit, deren Abstand zur Rotationsachse durch Fliehkräfte bestimmt wird. Diese dynamisch veränderbare Massenverteilung ermöglicht ein veränderbares Trägheitsmoment – und damit eine Energieabgabe oder -aufnahme auch bei nahezu konstanter Drehzahl. Diese Fähigkeit ist insbesondere für Anwendungen interessant, bei denen eine konstante Rotationsgeschwindigkeit oder Netzfrequenz erhalten bleiben muss – z. B. zur Netzstabilisierung oder als Energiespeicher für Schnellladesysteme.

## Physikalischer Hintergrund

### Kinetische Energie und Trägheitsmoment

In der klassischen Mechanik beschreibt die kinetische Energie die Energie, die ein Körper aufgrund seiner Bewegung besitzt. Für Translationsbewegungen gilt:

$$E(\text{kin}) = m/2 \cdot v^2$$

Für Rotationsbewegungen wird diese Formel analog auf das Trägheitsmoment  $J$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  angewendet:

$$E(\text{kin}) = J/2 \cdot \omega^2$$

Hierbei ist:

- $J$  das Trägheitsmoment [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ],
- $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit in  $\text{rad/s}$ .

Die Rotationsenergie wächst mit dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit. Verdoppelt man z. B. die Drehzahl, vervierfacht sich die Energie. Diese quadratische Abhängigkeit hat große praktische Bedeutung für die Auslegung von Energiespeichern, da hohe Drehzahlen eine sehr effektive Energiespeicherung ermöglichen – allerdings auch höhere Belastungen durch Zentrifugalkräfte hervorrufen.

Das Trägheitsmoment  $J$  ist eine Größe, die beschreibt, wie stark ein rotierender Körper einer Drehbeschleunigung widersteht. Es ist das Dreh-Pendant zur Masse in der linearen Bewegung.

Für einfache Körper mit homogener Dichte existieren geschlossene Formeln. Beispiele:

Vollzylinder (um Symmetrieachse):

$$J = m/2 * r^2$$

Hohlzylinder:

$$J = m/2 * (r_{\text{außen}}^2 + r_{\text{innen}}^2)$$

r: Abstand eines Volumenelements dV von der Rotationsachse.

m: Masse des Objekts.

Im Fall des Schwungradspeichers ist das Trägheitsmoment variabel, da sich der Massenverteilungsschwerpunkt der Flüssigkeit durch Fliehkräfte verschiebt. Damit wird J dynamisch steuerbar, was

den wesentlichen Vorteil dieses Speicherkonzepts ausmacht.

Das Besondere am Schwungradspeicher ist die Möglichkeit, das Trägheitsmoment bei konstanter Masse zu verändern. Dies geschieht durch Verschieben der Flüssigkeit von einem kleineren Radius  $R_i$  nach außen auf einen größeren Radius  $R_o$ . Da das Trägheitsmoment mit dem Quadrat des Radius wächst, führt dies zu einer signifikanten Erhöhung der gespeicherten Energie:

$$J_{\text{(fluid)}} = m_{\text{(fluid)}} * R^2$$

Wenn sich beispielsweise 1 kg Flüssigkeit von 0,1 m auf 0,3 m bewegt, steigt das Trägheitsmoment von  $0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  auf  $0,09 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$  – also um den Faktor 9! Die gespeicherte Energie nimmt dementsprechend stark zu, ohne dass die Drehzahl verändert werden muss.

Diese Eigenschaft erlaubt einen Energieaustausch allein durch radiale Umverteilung – eine Besonderheit unter den Schwungradspeichern.

Ein herkömmliches Schwungrad mit konstantem Trägheitsmoment kann nur Energie aufnehmen oder abgeben, wenn die Drehzahl variiert wird. Dies ist problematisch in Anwendungen, bei denen eine konstante Drehzahl benötigt wird, wie etwa bei direkt ans Stromnetz gekoppelten Generatoren.

Beim Schwungradspeicher dagegen kann Energie übertragen werden, ohne die Drehzahl wesentlich zu ändern, da sich das Trägheitsmoment durch Massenverschiebung anpassen lässt:

Das Trägheitsmoment ist die Schlüsselgröße für jedes Schwungrad – doch erst die Möglichkeit, es gezielt zu verändern, macht das Schwungradspeicher zu einem vielseitigen Werkzeug für moderne Energiesysteme. Durch die quadratische Abhängigkeit von der Radialposition der Masse ermöglicht die gezielte Flüssigkeitsverlagerung eine überproportionale Beeinflussung der gespeicherten Energie – bei hoher Effizienz und mechanischer Einfachheit.

## Winkelimpuls und Drehmoment

Der Winkelimpuls (auch Drehimpuls genannt) ist das rotatorische Gegenstück zum Impuls in der linearen Mechanik. Er beschreibt die Bewegungsmenge eines rotierenden Körpers und ist definiert durch:

$$L = J * \omega$$

- L: Winkelimpuls [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ ]
- J: Trägheitsmoment des Körpers [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]
- $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit [ $\text{rad}/\text{s}$ ]

Der Winkelimpuls ist eine erhaltende Größe, d. h. er bleibt in einem abgeschlossenen System ohne äußere Drehmomente konstant. Das physikalische Prinzip dahinter ist der

Drehimpulserhaltungssatz.

Ein alltägliches Beispiel dafür ist ein Eiskunstläufer, der durch das Heranziehen seiner Arme beim Pirouettendrehen schneller wird: Durch die Verringerung seines Trägheitsmoments  $J$  bleibt der Winkelimpuls  $L$  erhalten, also muss  $\omega$  steigen.

Ein Drehmoment  $T$  beschreibt die Ursache für eine Änderung des Winkelimpulses. Es ist definiert als zeitliche Ableitung des Drehimpulses:

$$T = dL/dt$$

Wenn sowohl das Trägheitsmoment  $J$  als auch die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  konstant sind, bleibt der Winkelimpuls unverändert und es wirkt kein äußeres Moment. Verändert sich aber  $J$  oder  $\omega$ , dann muss – je nach Situation – ein Moment auftreten oder kompensiert werden.

Man unterscheidet zwei Fälle:

1. Änderung von  $\omega$  bei konstantem  $J$  (klassisches Schwungrad):

Ein externes Moment wirkt, beschleunigt oder bremst das Rad  $\rightarrow$  Änderung der Drehzahl.

2. Änderung von  $J$  bei  $\omega$  (z. B. Schwungradspeicher):

Das System reagiert intern mit einem Reaktionsmoment, weil Masse nach außen oder innen verlagert wird.

Im Schwungradspeicher ändert sich das Trägheitsmoment  $J$  aktiv durch Bewegung der Flüssigkeit innerhalb des rotierenden Systems. Diese Bewegung erzeugt ein internes Reaktionsmoment:

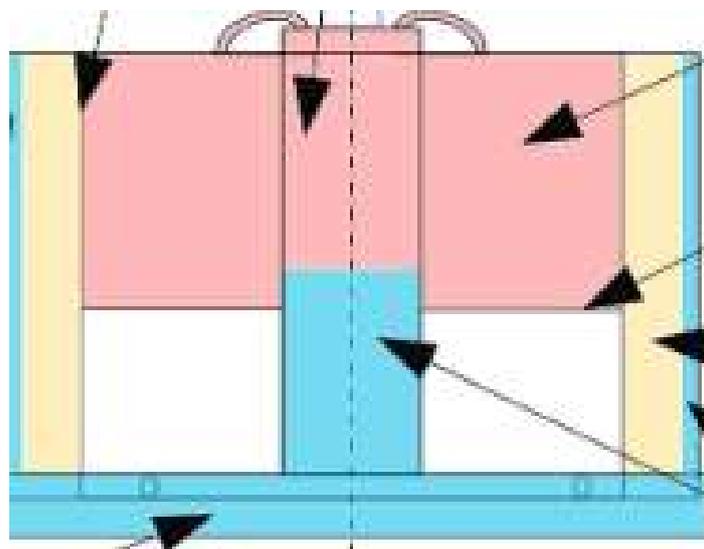
- Ladevorgang (Zentrifugalkraft drückt Flüssigkeit nach außen):

Das Trägheitsmoment steigt, während die Winkelgeschwindigkeit zunächst konstant bleibt. Nach dem Impulserhaltungssatz muss nun ein Gegendrehmoment entstehen, das von außen kompensiert werden muss, wenn die Drehzahl konstant bleiben soll. Alternativ wird Energie aufgenommen und die Drehzahl sinkt leicht.

- Entladevorgang (Gasdruck drückt Flüssigkeit nach innen):

Das Trägheitsmoment sinkt. Das System gibt dabei Energie ab, ein Beschleunigungsmoment entsteht, das entweder eine Last antreibt oder in ein Generatorsystem eingespeist wird.

Diese Effekte geschehen ohne äußere mechanische Bewegung – die Energieübertragung erfolgt rein durch Verlagerung der rotierenden Masse.



Die mechanische Leistung  $P$ , die durch ein Drehmoment  $T$  bei einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  umgesetzt wird, ergibt sich zu:

$$P = T \cdot \omega$$

Das Schwungradspeicher nutzt diesen Zusammenhang auf einzigartige Weise: Da das Drehmoment durch Änderung von  $J$  entsteht, kann bei konstanter  $\omega$  eine Leistung erzeugt oder aufgenommen werden, dies ist insbesondere für synchron drehende Maschinen im Stromnetz von Bedeutung, da deren Frequenz nicht schwanken darf.

Dieses Prinzip bietet mehrere Vorteile:

Energieübertragung ohne Drehzahländerung → ideal für netzgekoppelte Generatoren

Mechanisch einfache Umsetzung → kaum bewegliche Teile, geringerer Verschleiß

Im Unterschied zu batteriebasierten Systemen, die immer einen elektrochemischen Umwandlungsprozess benötigen, stellt der Schwungradspeicher die Energie rein mechanisch über das Moment zur Verfügung.

Die Grundstruktur des Schwungradspeichers basiert auf einer genial einfachen und gleichzeitig effektiven mechanisch-hydraulischen Konstruktion. Das System besteht im

Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- einem inneren Zylinder (auch als zentraler Zylinder bezeichnet), in dem sich die Flüssigkeit im entladenen Zustand befindet,
- einem äußeren, hohlen Zylinder, der konzentrisch um den inneren Zylinder angeordnet ist,
- einem doppelten Boden, der beide Zylinder am unteren Ende verbindet und als Verbindungsstück für den Flüssigkeitsaustausch dient,
- einer Gaskammer, die durch Kompression oder Expansion auf die Flüssigkeit einwirken.

Alle rotierenden Bauteile sind um eine gemeinsame vertikale Achse symmetrisch angeordnet und rotieren gemeinsam in einer Vorrichtung auf Kugellagern. Die

Flüssigkeit wirkt als bewegliche Masse, deren radialer Ort durch Drehzahl und Druckverhältnisse bestimmt wird. Das Gas dient als elastisches Medium, das beim Verdrängen durch die Flüssigkeit potenzielle Energie speichert.

Kommunizierende Gefäße – Mechanismus des Druckausgleichs

Ein zentrales Prinzip ist das der kommunizierenden Gefäße: Die beiden Zylinder sind hydraulisch verbunden, sodass sich die Flüssigkeit entsprechend der wirkenden Drücke

(hydrostatisch, zentrifugal, gasdruckinduziert) umverteilt. Der doppelte Boden enthält Öffnungen, durch die die Flüssigkeit bei ausreichend hohem Druckgefälle in beide Richtungen

fließen kann. In Ruhe stellt sich ein Niveaugleichgewicht ein; unter Rotation verformt sich die Oberfläche der Flüssigkeit zu einem Paraboloid.

Das Gas hat im Schwungradspeicher zwei zentrale Funktionen:

1. Hydraulische Rückstellkraft:

Es wirkt wie eine elastische Feder, die die Flüssigkeit im geladenen Zustand zurück-drückt, dies Voraussetzung für die Rückführung ins Zentrum beim Entladen.

2. Potenzielle Energiespeicherung:

Bei der Kompression des Gases wird Energie gespeichert, die beim Entladen wieder freigesetzt wird. Diese Energie ergänzt die kinetische Energie der Rotation. Die Flüssigkeit bewegt sich immer

dorthin, wo der Gesamtdruck niedriger ist – bei steigender Drehzahl also nach außen, bei sinkender Drehzahl zurück ins Zentrum.

Ein herausragendes Merkmal des Schwungradspeichers ist seine Fähigkeit zur komplett passiven Funktionsweise. Alle Prozesse – das Umlagern der Flüssigkeit, das Komprimieren des Gases, die Druckregulierung – erfolgen durch die physikalischen Kräfte selbst.

Diese Eigenschaft bedeutet:

- hohe Zuverlässigkeit (geringe Fehleranfälligkeit),
- lange Lebensdauer (geringer mechanischer Verschleiß),
- geringer Wartungsaufwand,
- Unabhängigkeit von externer Steuerung oder Energieversorgung.

Das hydraulische Prinzip des Schwungradspeichers verbindet klassische Konzepte der Fluidmechanik (kommunizierende Gefäße, Zentrifugalkraft, Druckgleichgewicht) mit moderner Systemintegration. Die gezielte Verlagerung einer rotierenden Flüssigkeit unter Ausnutzung passiver Kräfte erlaubt eine hochgradig effiziente, verschleißarme und umweltfreundliche Energiespeicherung.

Die Verwendung einfacher und langlebiger Medien (Wasser, Gas, Kunststoff oder Metall) macht das System auch wirtschaftlich interessant

Der Gesamtdruck an einem beliebigen Punkt im rotierenden Fluid ergibt sich durch Überlagerung mehrerer Komponenten:  $p(r,h) = p_{\text{(ext)}} + \rho_{\text{(fl)}} * g * h + 1/2 * \rho_{\text{(fl)}} * \omega^2 * r^2$

Erklärung der Terme:

- $p_{\text{(ext)}}$ : externer Vordruck (z. B. Gasdruck),
- $\rho_{\text{(fl)}}$ : Dichte der Flüssigkeit (z. B. 1000 kg/m<sup>3</sup>),
- $g$ : Erdbeschleunigung (9,81 m/s<sup>2</sup>),
- $h$ : vertikale Höhe über Bezugsniveau,
- $\omega$ : Winkelgeschwindigkeit der Rotation,
- $r$ : radialer Abstand zur Rotationsachse.

Beispielhafte Interpretation:

- Im Zentrum des Schwungradspeichers (kleines  $r$ , kleines  $h$ ) ist der Druck minimal.
- Am Außenrand (großes  $r$ , großes  $h$ ) ist der Druck maximal.
- Der Zentrifugalterm dominiert bei hohen Drehzahlen, weshalb der Flüssigkeitsspiegel ansteigt – die typische „Schüsselform“ rotierender Flüssigkeiten.

Die Rotation des Fluids führt zu einem Druckgefälle, das die Flüssigkeit von innen nach außen drängt. Die freie Oberfläche der Flüssigkeit bildet bei konstanter

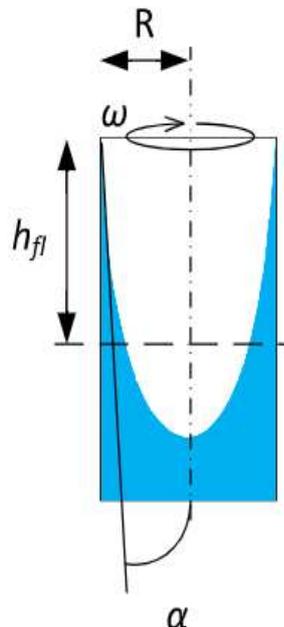
Winkelgeschwindigkeit eine sogenannte Paraboloidform – also eine nach außen ansteigende Oberfläche.

Die Steigung dieser Oberfläche kann über den Tangens des Neigungswinkels  $\alpha$  beschrieben werden:

$$\tan(\alpha) = (\omega^2 * r) / g$$

Bei typischen Rotationsgeschwindigkeiten im Schwungradspeicher wird  $\omega^2 * r \gg g$ , sodass der Winkel sehr steil wird. Die Flüssigkeit sammelt sich dann nahezu vollständig in einem ringförmigen

Bereich an der Wand des äußeren Zylinders. Dieser geometrische Effekt ist gewollt, da er ein hohes Trägheitsmoment erzeugt.



Ein zentrales Element im Schwungradspeicher ist das eingeschlossene Gas, das bei Flüssigkeitsverlagerung komprimiert oder expandiert wird. Dies geschieht bei idealisierter Betrachtung adiabatisch, also ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung (gute Näherung bei schneller Kompression):

$$p \cdot V^\gamma = \text{konstant}$$

- p: Druck
- V: Volumen
- $\gamma$  : Adiabatenexponent ( $\approx 1,4$ )

Wenn das Gas durch Flüssigkeit verdrängt wird, sinkt sein Volumen V und der Druck p steigt. Dies entspricht der Energiespeicherung als potenzielle Energie im komprimierten Gas – vergleichbar mit einer Feder.

Gleichzeitig steigt die Temperatur des Gases:

$$T_2 = T_1 \cdot (V_1/V_2)^{\gamma-1}$$

Diese Temperaturerhöhung kann zu Wärmeverlusten führen, falls ein Wärmeaustausch mit der Umgebung erfolgt. Die thermischen Belastungen auf Gehäuse, Dichtungen und Werkstoffe müssen deshalb bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Die Druckverteilung im Schwungradspeicher ist das Ergebnis eines fein abgestimmten Zusammenspiels aus Hydromechanik, Thermodynamik und Rotation. Die durch die Fliehkraft erzeugten radialen Druckdifferenzen ermöglichen die Bewegung der Flüssigkeit ohne Pumpen – die Energieübertragung erfolgt allein durch physikalische Naturgesetze. Die durch die Kompression des Gases gespeicherte potenzielle Energie ergänzt die kinetische Energie des rotierenden Systems auf elegante Weise.

# Zielsetzung, Umsetzung und Herausforderungen beim Bau des Schwungradspeichers

## 1) Zielsetzung des Projekts

Das übergeordnete Ziel unseres Projekts war die Entwicklung und der Bau eines funktionsfähigen Demonstrators für einen hydraulischen Schwungradspeicher mit variabler Trägheit. Ziel war es, das grundlegende physikalische Funktionsprinzip – also die Veränderung des Trägheitsmoments durch Verlagerung einer Flüssigkeit unter Zentrifugalkraft – nicht nur theoretisch zu verstehen, sondern auch praktisch sichtbar und messtechnisch erfassbar zu machen.

Der Speicher sollte so konstruiert sein, dass sich durch Rotation eine Verlagerung der Flüssigkeit vom Zentrum in den äußeren Bereich ergibt, wodurch sich das Trägheitsmoment und somit die gespeicherte kinetische Energie verändern.

## 2) Umsetzungsschritte und erste Probleme

### 3D-Druck des Gehäuses

Zu Beginn planten wir, das komplette Gehäuse des Schwungradspeichers mithilfe unseres schuleigenen 3D-Druckers selbst herzustellen. Diese Idee war naheliegend, da sie kostengünstig war und eine hohe gestalterische Freiheit bot. Allerdings stellte sich schnell heraus, dass der verfügbare Drucker zu klein war, um die Bauteile im geplanten Maßstab zu fertigen.

Daher entschieden wir uns, den Speicher extern über einen größeren 3D-Drucker anfertigen zu lassen. Diese Lösung ermöglichte uns den Bau des kompletten Gehäuses,

Dann entstand das nächste Problem, die Druckdateien enthielten keine integrierten Gewinde für Ventile. Das bedeutete, dass wir nach dem Druck per Hand Gewinde schneiden mussten – ein aufwändiger Schritt, bei dem hohe Präzision erforderlich war, um Dichtheit zu gewährleisten.

Deswegen haben wir vorher noch ein paar Probe Bohrungen gemacht um uns mit dem Werkzeug vertraut zu machen.

### 3) Dichtungsprobleme und ihre Folgen

Nach dem Zusammenbau traten schnell Undichtigkeiten auf. Sobald wir Luft in das System einleiteten, entwich diese wieder durch kleine Löcher, die im 3D-Druck entstanden waren.

Besonders problematisch war, dass sich die Gewinde nicht sauber abdichten ließen. Um dem entgegenzuwirken, versuchten wir es mit Dichtband, das wir um die Gewinde wickelten.

Diese Methode brachte kurzfristig eine Besserung, war aber keine dauerhafte Lösung. Da immer noch zusätzlich an mehreren Stellen kleine Löcher waren, vermutlich Mikrofehler aus dem Druckprozess. Die Folge war, dass sich ein stabiler Druck im System nicht lange aufrechterhalten ließ – ein entscheidender Nachteil, da das System unter Druck stehen muss, um realitätsnahe Bedingungen zu simulieren. Weil der Druck nur kurz gehalten werden konnte, mussten alle Messungen sehr schnell nach dem Befüllen mit Luft durchgeführt werden. Außerdem trat in geringem Umfang Wasser aus, was jedoch bei den durchgeführten Versuchen keine entscheidende Rolle spielte.

### 4) Sichtbarkeit der Flüssigkeit

Ein weiteres Problem war die Sichtbarkeit der Flüssigkeit im Gehäuse. Um die Verlagerung des Fluids beim Laden und Entladen beobachten zu können, musste diese im Betrieb

sichtbar gemacht werden. Da das ursprünglich verwendete Gehäusematerial nicht transparent war, war eine direkte Sicht nicht möglich.

Als erste Lösung entwickelten wir einen Schwimmer, der sich in einem zentralen Schacht befand und die Flüssigkeitshöhe anzeigen sollte. Dieser Schwimmer funktionierte jedoch nur eingeschränkt: Er verhakte sich häufig, blieb an den Wänden hängen. Das machte eine zuverlässige Beobachtung unmöglich.

Deshalb entschieden wir uns für einen Schwungradspeicher mit durchsichtigem Kunststoff und färbten das Wasser mit Farbstoff ein.

Diese Methode war deutlich effektiver. So konnten wir die Flüssigkeitsverlagerung direkt beobachten und visuell auswerten – eine große Verbesserung gegenüber der vorherigen Lösung.



##### 5) Messdatenerfassung: Probleme, Lösungswege und Optimierungen

Die Messdatenerfassung stellte sich ebenfalls als Herausforderung heraus. In der ersten Version nutzten wir einen Sensor und lediglich eine einzelne Speiche pro Umdrehung. Das bedeutete, dass pro Umdrehung nur ein einziger Messwert generiert wurde – bei schnellen Rotationen reichte das nicht aus, um etwa die Beschleunigungsphasen oder den Moment der Fluidverlagerung präzise zu erfassen.

Zunächst versuchten wir, ein eigenes Messrad mit vier Speichen zu basteln aus Plastik und Kleber. Dieses selbstgefertigte Bauteil war allerdings zu unsymmetrisch. Schon bei geringen Drehzahlen entstanden starke Schwankungen in den Zeitabständen der Messwerte, da kleine Massenunterschiede bei hoher Geschwindigkeit große Auswirkungen haben. Diese Methode war daher unbrauchbar.

Die nächste Lösung bestand darin, ein präzise gefertigtes Rad mit 16 Speichen zu entwerfen und im 3D-Druck herzustellen. Damit konnten wir die Auflösung der Messdaten

sechzehnfach erhöhen. Die größere Anzahl an Signalen pro Umdrehung erlaubte uns eine deutlich bessere Analyse des Drehverhaltens und der dynamischen Veränderungen im System.

Trotzdem kam es auch bei diesem Rad zu Abweichungen: Der Druckprozess verursachte kleine Asymmetrien in der Speichenverteilung. Dies führte zu periodisch auftretenden Unregelmäßigkeiten in den Zeitabständen der Messwerte. Um diese Störungen zu korrigieren, entwickelten wir ein eigenes Skript zur Nachbearbeitung der Daten. Die Software analysierte die periodischen Fehler und glich sie rechnerisch aus. Damit konnten wir die Messkurven glätten und die Daten objektiv auswerten.

#### 6) Bewertung von Alternativen

Viele der eingesetzten Methoden waren pragmatische Lösungen unter Berücksichtigung der verfügbaren Mittel. Der 3D-Druck war schnell und einfach, führte aber auch zu Dichtigkeitsproblemen. Eine alternative Fertigung aus Aluminium oder gegossenem Kunststoff hätte diese Probleme vermutlich gelöst, wäre aber wesentlich aufwändiger und kostenintensiver gewesen.

Auch die Idee mit dem Schwimmer war interessant, ließ sich aber praktisch nicht umsetzen. Die Entscheidung für ein durchsichtiges Gehäuse mit eingefärbtem Wasser war im Rückblick deutlich besser, da sie einfach und zuverlässig funktionierte.

#### Fazit

Das Projekt war von zahlreichen Herausforderungen geprägt, von technischen Hürden beim 3D-Druck über Dichtigkeitsprobleme bis hin zur Sichtbarkeit und Messdatenerfassung.

Dennoch gelang es uns, durch kreative Problemlösungen und iterative Optimierungen ein funktionierendes und aussagekräftiges System zu entwickeln. Der Demonstrator machte das physikalische Prinzip des Schwungradspeichers mit variabler Trägheit sichtbar, nachvollziehbar und messbar.

## Ergebnisse

### Zielsetzung der Messung

Ziel der experimentellen Messreihe war es, die physikalische Funktion des hydraulischen Schwungradspeichers nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu erfassen.

Dazu wurde die Drehzahlentwicklung (bzw. die Frequenz) des Systems über die Zeit bzw. über die Anzahl der Umdrehungen dokumentiert. Mithilfe eines präzise gedruckten 16-Speichen-Rads und eines Sensorsystems konnte eine detaillierte zeitabhängige Analyse der Schwungradbewegung erstellt werden.

Wesentliche Messgrößen waren:

- die korrigierte Frequenz  $f$  (in Hz),
- deren Quadrat  $f^2$  (proportional zur kinetischen Energie),
- sowie die zeitlich und umdrehungsbasierte Entwicklung dieser Größen.

Besonders wichtig war dabei, herauszufinden, ob sich die Verlagerung der Flüssigkeit im Inneren – also die Änderung des Trägheitsmoments – auch in den Messdaten bemerkbar macht. Und genau das konnte beobachtet werden.

Interpretation der Kurvenverläufe

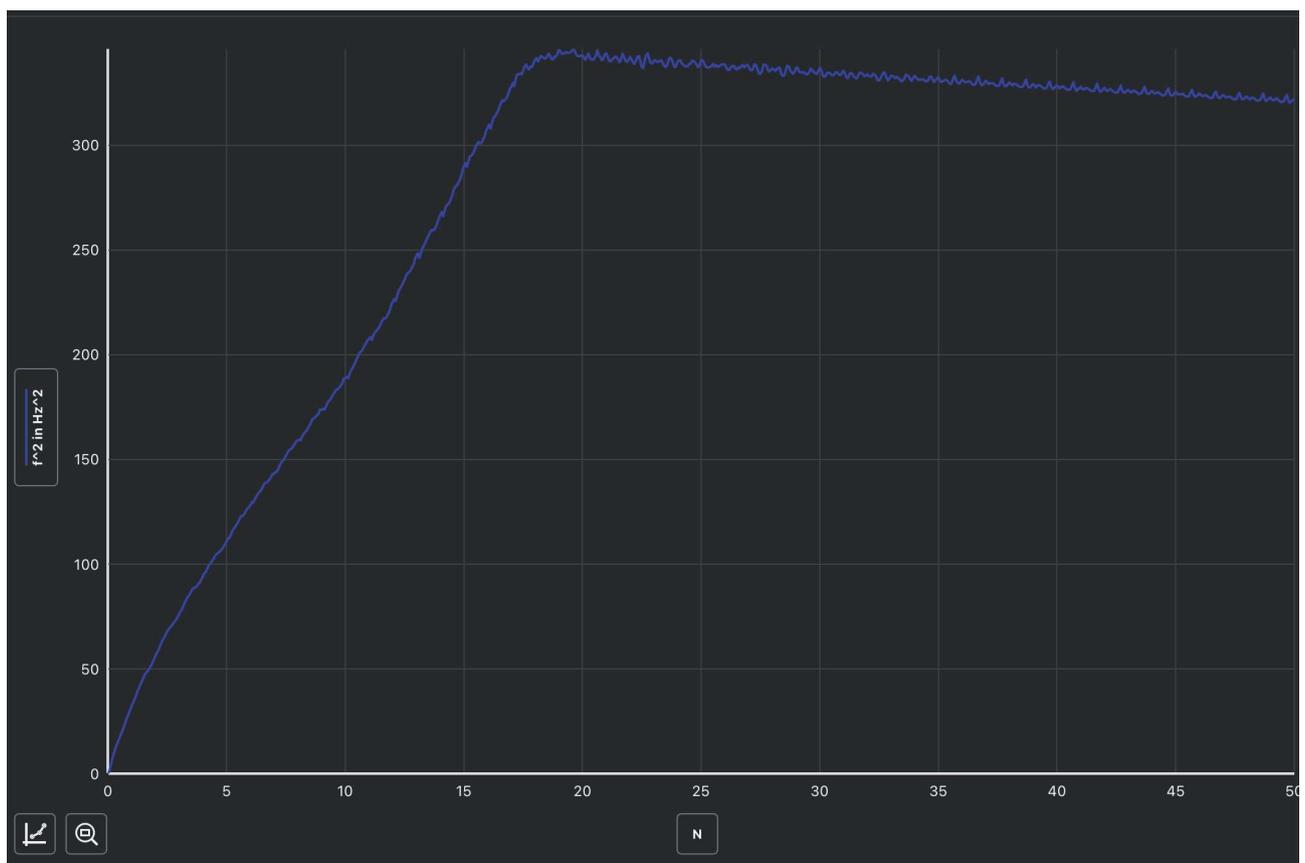
Nichtlinearer Anstieg bei der Beschleunigung – Nachweis der Fluidverlagerung

Eines der auffälligsten Merkmale in den erfassten Frequenzverläufen ist, dass der Anstieg von  $f^2$  – also der kinetischen Energie – während der Beschleunigungsphase nicht linear erfolgt. Dies ist ein zentrales Ergebnis, da es genau das Verhalten zeigt, das bei einem Schwungrad mit variabler Trägheit zu erwarten ist.

Physikalisch bedeutet dies Folgendes:

Während das System beschleunigt wird, wird ein Teil der eingebrachten Energie nicht direkt zur Erhöhung der Drehzahl genutzt, sondern stattdessen zur radialen Verlagerung der Flüssigkeit im Speicher. Diese Verlagerung erhöht das Trägheitsmoment  $J$ , sodass mehr Energie notwendig ist, um dieselbe zusätzliche Drehzahl zu erreichen. Der Anstieg von  $f^2$  flacht sichtbar ab – ein deutliches Zeichen dafür, dass das Schwungrad nicht mehr wie ein konventionelles System mit konstantem  $J$  reagiert.

Ein linearer Anstieg von  $f^2$  in den ersten Umdrehungen wäre zu erwarten gewesen, wenn keine Masseverlagerung stattgefunden hätte – etwa bei einem reinen Festkörper-Schwungrad. Dass diese Linearität nicht vorliegt, ist also ein klarer Hinweis auf die in Gang gesetzte Fluidverschiebung nach außen.



Peak in der Frequenz – Übergang von Beschleunigung zu Auslaufphase

Ein weiteres zentrales Merkmal ist das deutlich erkennbare Maximum der Frequenz im Verlauf der Messung. Bis zu diesem Punkt wurde das Schwungrad aktiv beschleunigt – durch mechanische Energiezufuhr und durch den eingebrachten Luftdruck. Ab dem Maximum beginnt die sogenannte Auslaufphase: Das System wird nicht mehr angetrieben, sondern „rollt aus“.

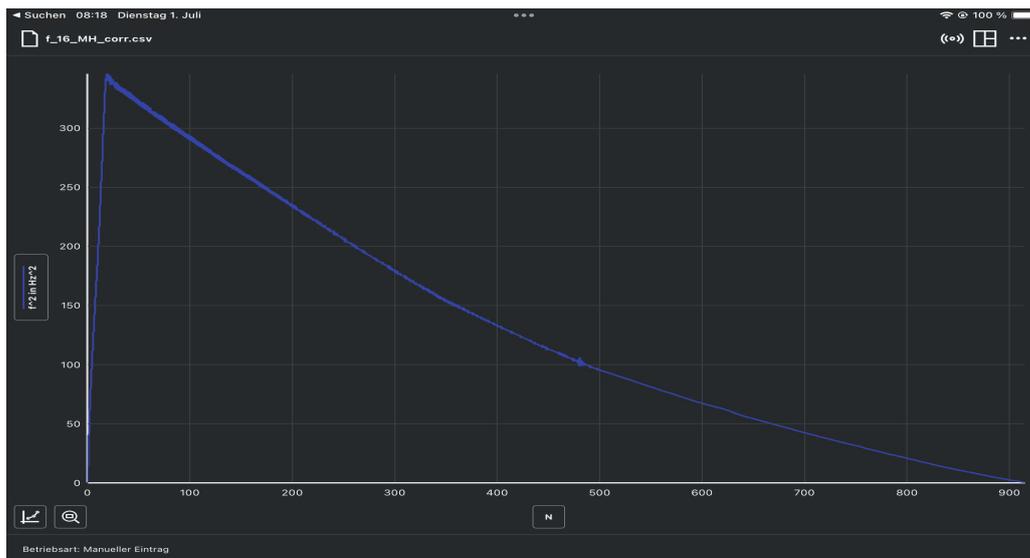
In dieser Phase verlagert sich die Flüssigkeit wieder schrittweise zurück in Richtung Zentrum, weil die Zentrifugalkraft mit sinkender Drehzahl nicht mehr ausreicht, um sie im äußeren Bereich zu halten. Das Trägheitsmoment verringert sich also wieder – und mit ihm verändert sich auch die Art des Energieabbaus.

Im Vergleich zu einem Schwungrad mit konstantem Trägheitsmoment lässt sich folgendes sagen: Dort würde man einen symmetrischen, glockenförmigen Verlauf von  $f^2$  erwarten

– in der Beschleunigungs- wie auch in der Bremsphase. In deinen Messdaten hingegen ist klar erkennbar, dass der Anstieg abflacht und der Abfall nichtlinear verläuft.

Dieses Verhalten deckt sich exakt mit der theoretischen Erwartung für ein Schwungradspeichers.

- Während der Beschleunigung steigt das Trägheitsmoment an, sodass die Frequenz nicht so schnell zunimmt wie bei konstantem  $J$ .
- Während der Entladung nimmt das Trägheitsmoment ab, was eine längere Aufrechterhaltung der Frequenz ermöglicht.



Die wichtigsten experimentellen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der nichtlineare Anstieg der kinetischen Energie während der Beschleunigung belegt die aktive Verlagerung der Flüssigkeit im Speicher – ein zentrales Merkmal des variablen Trägheitsmoments.
- Das sichtbare Frequenzmaximum markiert den Übergang von der aktiv angetriebenen Phase in die Freilaufphase – und damit die Rückbewegung des Fluids.
- Die Form der Kurven stimmt nicht mit einem konstanten Trägheitsmoment überein, sondern weist explizit auf eine Veränderung des Trägheitsmoments  $J(t)$  hin.
- Die Qualität der Messdaten wurde durch technische Verbesserungen (mehr Speicher, Skriptkorrektur) entscheidend erhöht.

## Fazit

Die Messergebnisse zeigen sehr deutlich, dass es gelungen ist, das physikalische Prinzip des Schwungradspeichers auch experimentell nachzuweisen. Die nichtlineare Entwicklung der Frequenz, der gezielte Übergang in die Auslaufphase und die beobachtete Wirkung der Fluidverlagerung bestätigen das Konzept. Trotz der unvermeidlichen Messunsicherheiten – insbesondere durch den Luftverlust und Materialtoleranzen – ist die Aussagekraft der Daten sehr hoch.

Die experimentelle Arbeit bestätigt also nicht nur die Theorie, sondern macht das Prinzip der variablen Trägheit in einem rotierenden Energiespeicher praktisch sichtbar und greifbar.

## Reflexion zur Umsetzbarkeit an Schulen

Ein weiteres Ziel unseres Projekts bestand darin, zu evaluieren, ob es grundsätzlich möglich und sinnvoll wäre, den Schwungradspeicher als Lernprojekt an Schulen zu etablieren. Die Idee war, das in unserer Schule mit Hilfe eines 3D-Druckers ein Schwungradspeicher hergestellt und anschließend anderen Schulen zur Verfügung gestellt werden könnte – mit dem Ziel, physikalische Zusammenhänge wie Trägheit, Zentrifugalkraft, Druck, Energiespeicherung und Messwerterfassung den Schülern beizubringen.

In der Realität zeigte sich schnell, dass bereits die grundsätzliche Umsetzung an unserer eigenen Schule an ihre technischen Grenzen stieß. Der 3D-Drucker, der uns zur Verfügung stand, war schlicht nicht groß genug, um das geplante Gehäuse des Schwungradspeichers in einem Stück oder in geeigneter Form zu drucken. Dadurch waren wir gezwungen, auf einen externen Drucker zurückzugreifen, was zwar funktionierte, aber natürlich mit Aufwand verbunden war und nicht unserer Idee entsprach.

Eine mögliche Lösung wäre gewesen, einen größeren Drucker zu beschaffen – was jedoch aus schulorganisatorischer und finanzieller Sicht nicht realistisch ist. Derartige Geräte sind sehr teuer. Und selbst wenn ein solcher Drucker vorhanden wäre, stellt sich die Frage, ob sich der Aufwand im Verhältnis zum Nutzen lohnt.

Selbst bei vorhandener technischer Ausstattung wäre die Frage zu klären, ob ein solches Projekt tatsächlich einen breiten Mehrwert für den Unterricht bietet. In unserem Fall zeigte sich deutlich, dass die Herstellung, Montage und Inbetriebnahme des Schwungradspeichers sehr zeitintensiv ist. Einzelteile mussten exakt zusammengefügt, Dichtungen überprüft, Gewinde nachbearbeitet und Flüssigkeiten kontrolliert werden.

Zusätzlich kommt hinzu, dass das System nur über eine begrenzte Betriebszeit verfügt: Der Luftdruck entweicht mit kürzester Zeit, wodurch alle Versuche unter hohem Zeitdruck durchgeführt werden müssen. Dies erschwert nicht nur die Durchführung für Schüler sondern wäre auch für Lehrkräfte nervig.

Ein weiteres Problem ist die Sichtbarkeit der physikalischen Prozesse. Erst durch die Verwendung von durchsichtigem Material und farbiger Flüssigkeit wurde es überhaupt möglich, die Bewegung des Fluids zu beobachten. Das erfordert wiederum spezielles Druckmaterial und eine sorgfältige Vorbereitung.

Alle genannten Punkte führen zu einer kritischen Bewertung:

Obwohl das Projekt für uns technisch und inhaltlich sehr wertvoll war, erscheint der praktische Nutzen für den allgemeinen Schulbetrieb begrenzt.

- Der Aufwand für Aufbau, Abdichtung, Wartung und Befüllung ist hoch.
- Die Flüssigkeiten im System entweicht.
- Die Messungen sind zwar möglich, erfordern aber vorbereitete Technik (Sensorik, Software, Nachbearbeitung).
- Was Schülerinnen und Schüler aus einem kurzen Versuch tatsächlich mitnehmen ist im Verhältnis zum Aufwand eher gering.

Die ursprüngliche Idee, ein didaktisches Modell zu schaffen, das leicht herstellbar, reproduzierbar und für andere Schulen nutzbar ist, ließ sich in der Praxis nicht realisieren. Selbst mit besseren technischen Voraussetzungen wäre der Aufwand für Wartung, Vorbereitung und Durchführung zu hoch, um den Einsatz im Regelunterricht zu rechtfertigen. Zwar bietet der Schwungradspeicher viele interessante physikalische Aspekte, aber diese lassen sich – zumindest für den Einsatz im Unterricht – vermutlich besser und einfacher mit Alternativen darstellen: etwa mit digitalen Simulationen, anderen Modellen oder durch Versuche zur konstanten Trägheit mit Festkörpern.

## Ausblick

### Verbesserungsvorschläge für den Schwungradspeicher

#### Magnetlager zur Reduktion von Reibungsverlusten

Eine sehr wirkungsvolle, wenn auch technisch aufwändige Verbesserung wäre der Einsatz eines Magnetlagers. Statt das rotierende System mechanisch zu lagern mit Kugellager, würde es dabei durch magnetische Kräfte „schwebend“ gehalten. Das hat gleich mehrere Vorteile:

- Es entstehen nahezu keine mechanischen Reibungsverluste, was zu deutlich längeren Auslaufzeiten des Schwungrads führt.
- Es wird weniger Energie in Wärme umgewandelt, wodurch die gespeicherte kinetische Energie effizienter nutzbar bleibt.

Allerdings ist die Konstruktion eines stabilen Magnetlagers komplex, da eine exakt zentrierte passive Lagerung mit Magneten sehr schwer ist. Für den Schulkontext wäre dies derzeit schwer realisierbar, langfristig aber ein spannender Weiterentwicklungsschritt.

#### Verbesserung der Dichtheit – Luft und Wasserverlust minimieren

Ein zentrales Problem beim Betrieb des Demonstrators war der Austritt von Luft und Wasser. Um die Funktion des Speichers zuverlässiger und langlebiger zu gestalten, bieten sich mehrere Maßnahmen an:

- Beschichtung der Wände mit einer dünnen Schicht, um Mikroporen aus dem Druckmaterial zu versiegeln. Das verhindert vor allem Wasseraustritt, der bereits fast ohne weitere Maßnahmen im Schwungradspeicher bleibt.
- Verwendung von hochwertigeren, dichter druckbaren Materialien wie PETG, ASA oder sogar Polyamid mit Glasfaserverstärkung. Diese sind weniger porös als PLA.

Während Luftdichtigkeit immer eine Herausforderung bleibt (da Gase leichter durchdringen als Flüssigkeiten), kann der Wasseraustritt bei sorgfältiger Planung vollständig verhindert werden. Und auch der Gas austritt wird minimiert.

Ein kleines, aber wirkungsvolles Upgrade wäre der Einbau eines Miniatur-Drucksensors oder einer analogen Druckanzeige. Vorteile:

- Die Lehrkraft und die Lernenden könnten direkt ablesen, wie viel Druck aktuell im System herrscht.
- Man könnte sofort erkennen, ob und wie schnell Luft entweicht und ob am Ende überhaupt noch welches vorhanden ist.
- Dies würde die Interpretation der Messergebnisse vereinfachen, da man erkennen könnte, wie stark sich der Druck im Laufe des Experiments verändert hat.

Optimierte Beschleunigungsvorrichtung

Der aktuelle Antrieb mittels Band und Gewicht war praktikabel, aber umständlich: Das Band musste händisch aufgezogen werden, und der Mechanismus war schwer reproduzierbar.

Durch eine einfachere Antriebslösung ließen sich auch mehrere Versuche nacheinander effizient durchführen, ohne den gesamten Aufbau erneut vorbereiten zu müssen.

Neben den technischen Verbesserungen sind auch einige physikalische Fragen aufgekommen, die sich aus der praktischen Arbeit ergeben haben. Zwei davon werden im Folgenden behandelt.

Wie würde sich Öl als Fluid auf die Funktion des Schwungradspeichers auswirken?

Derzeit wurde Wasser verwendet. Eine Alternative wäre ein hydraulisches Öl, wie es auch in anderen Systemen verwendet wird. Die

Unterschiede:

Dichte

- Viele Öle haben eine höhere Dichte als Wasser, was das Trägheitsmoment erhöhen würde → mehr Energie pro Umdrehung.
- Das bedeutet: Bei gleicher Geometrie wäre der Energieinhalt etwas größer.

Viskosität

- Öl ist deutlich zäher als Wasser → bei Bewegung wirkt mehr Reibung innerhalb des Fluids.
- Das bedeutet: Die Verlagerung nach außen würde langsamer erfolgen, weil das Öl träger reagiert.
- Besonders bei niedrigen Drehzahlen würde sich das Öl später nach außen bewegen als Wasser.

c)

Dichtheit und Verdunstung

- Öl verdunstet kaum und durchdringt Materialien schlechter → weniger Verlust durch Leckagen.
- Allerdings ist es schwerer zu reinigen und könnte langfristig den Schwungradspeicher nur für Öl verwendbar machen.

Fazit:

Die Verwendung von Öl würde die Energieeffizienz erhöhen, aber die Dynamik der Fluidverlagerung verlangsamen. Für Lernzwecke (wo schnelle sichtbare Effekte gewünscht sind) wäre Wasser vermutlich besser.

Bisher ist die Geometrie des Schwungradspeichers zylindrisch, also mit geraden Wänden. Eine spannende Idee wäre es, die Außenwand als Halbkugel oder Kegelstumpf zu gestalten. Mögliche Auswirkungen:

- Die Zentrifugalkraft wirkt weiterhin radial, aber der Flüssigkeitsspiegel würde sich an die Wölbung anpassen.
- In einer Kugelwand könnte die Flüssigkeit leichter „hochsteigen“, da die Form die Bewegung begünstigt.
- Bei sehr hoher Drehzahl würde das Fluid ggf. eine stabilere Rotationsschale bilden, was das Trägheitsmoment stabilisieren könnte.

Fazit:

Eine gewölbte Außenwand könnte die Effizienz und Stabilität der Fluidverlagerung verbessern, ist aber nur mit deutlich größerem Aufwand realisierbar. Es wäre auf jeden Fall interessant Unterschiede in den Messwerten zu sehen.