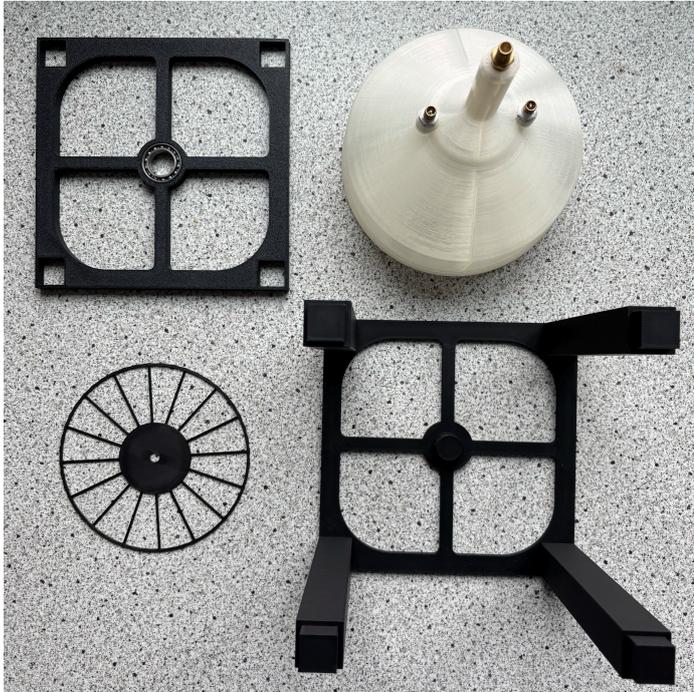


# Hydraulischer Schwungradspeicher

01.02.2025 - 04.07.2025



**Mika Christiansen**

**Friedrich-Paulsen-Schule**

# Abstrakt

Die Speicherung von Energie wird in einer zunehmend elektrifizierten Welt immer wichtiger. Schwungradspeicher stellen eine bewährte Möglichkeit dar, kinetische Energie zu speichern. In dieser Facharbeit wird ein bestimmter Typ untersucht: der hydraulische Schwungradspeicher mit variablem Trägheitsmoment. Dieser nutzt die rotierende Masse einer Flüssigkeit zur Energiespeicherung, wodurch sich das Trägheitsmoment dynamisch anpassen lässt. Neben einer theoretischen Einführung und Beschreibung des physikalischen Prinzips wurden eigene Messungen an einem Demonstrator ausgewertet. Diese bestätigen das Grundprinzip und zeigen die Einsatzmöglichkeiten dieses Speichertyps z. B. zur Netzstabilisierung oder als Kurzzeitspeicher. Zum Schluss wird zudem noch geklärt, wie sinnvoll ein solcher in den Schulalltag eingebaut werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

I. Abstrakt	2
II. Physikalischer Hintergrund	4-9
III. Ziele und Umsetzung	10-12
IV. Ergebnisse	13-17
V. Ausblick	18-20

# Physikalischer Hintergrund

## Rotationsmechanik: Energie, Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit

Die Grundlage des Schwungradspeichers ist die Rotationsenergie eines Körpers. Ein rotierender starrer Körper besitzt kinetische Energie, die sich mit der Formel

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad \text{mit } \omega = 2\pi f$$

berechnen lässt. Hierbei ist  $J$  das Massenträgheitsmoment des Körpers bezüglich der Drehachse und  $\omega$  seine Winkelgeschwindigkeit (in Rad/s). Das Trägheitsmoment  $J$  spielt eine kontinuierliche Rolle zur Masse in der geradlinigen Bewegung: Es gibt an, wie stark der Körper einer Änderung seiner Rotationsgeschwindigkeit widersetzt ist. Mathematisch ergibt sich  $J$  aus der Massenverteilung:

$$J = \int r^2 dm,$$

das heißt, Massen, die weiter von der Drehachse entfernt sind, tragen quadratisch stärker zum Trägheitsmoment bei. Zum Beispiel hat ein homogener dünner Ring vom Radius  $R$  und Masse  $m$  das Trägheitsmoment  $J = mR^2$ , ein Vollzylinder mit Masse  $m$  und Radius  $R$  hingegen  $J = \frac{1}{2}mR^2$ . Wird nun ein Drehmoment  $M$  an den Körper angelegt, so ist das Drehmoment-Gegenstück zum zweiten Newtonschen Gesetz:  $M = J\alpha$ , wobei  $\alpha$  die Winkelbeschleunigung ist. Die Rotationsenergie lässt sich auch über den Drehimpuls  $L = J\omega$  ausdrücken:

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} L \omega .$$

Typische Einheiten sind  $J$  in  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $\omega$  in  $1/\text{s}$  und  $E_{\text{rot}}$  in Joule.

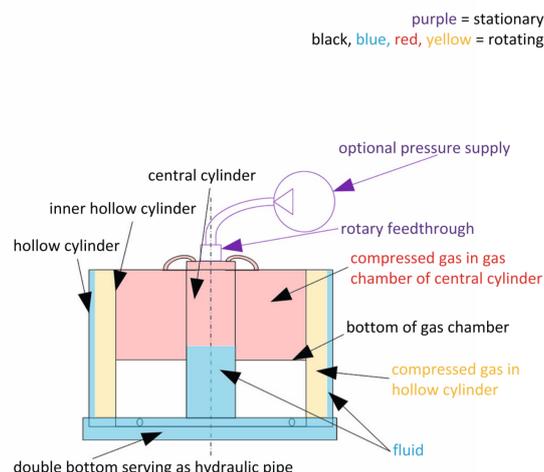
Zusammengefasst hängt die Rotationsenergie stark von  $J$  und  $\omega$  ab: Für gleichbleibende Winkelgeschwindigkeit erhöht sich die Energie linear mit dem Trägheitsmoment. Umgekehrt muss bei konstantem  $J$  die Drehgeschwindigkeit gesteigert werden, um mehr Energie zu speichern. Ein zentrales physikalisches

Prinzip ist daher, dass eine Erhöhung des Trägheitsmoments  $J$  bei gleicher Drehzahl zu einer Speicherung zusätzlicher Energie führt. Dieses Prinzip wird beim hydraulischen Schwungradspeicher gezielt genutzt.

## Variable Trägheitsmoment durch Flüssigkeitsverlagerung

Eine Eiskunstläuferin mit ausgestreckten Armen veranschaulicht anschaulich die Änderung des Massenträgheitsmoments: Werden die Arme angezogen, verringert sich  $J$  und die Drehzahl nimmt zu (bei konstantem Drehimpuls). Beim hydraulischen Schwungrad hingegen kann das Trägheitsmoment dynamisch verändert werden.

Ein zentrales Merkmal des hydraulischen Schwungrads ist, dass das Massenträgheitsmoment  $J$  aktiv variiert werden kann. Dabei wird der Schwungrad-Rotor so konzipiert, dass innerhalb seines Hohlraums ein umfließbares Fluid enthalten ist. Wird der Rotor beschleunigt, erzeugt die Fliehkraft einen zunehmenden Druck auf die Flüssigkeit. Durch entsprechende Öffnungen strömt das Fluid infolge dieses Zentrifugaldrucks nach außen in den Hohlzylinder. Damit verlagert sich Gewicht in größere Radien, das Trägheitsmoment  $J$  des Gesamtsystems nimmt zu und – bei annähernd konstanter Drehzahl – steigt die Rotationsenergie über  $E = \frac{1}{2}J\omega^2$  an. Im umgekehrten Betrieb, wenn die Drehzahl leicht abgesenkt wird, strömt die Flüssigkeit zentripetal zurück in den inneren Zylinder. In diesem Fall wird das verkleinerte  $J$  wirksam: Wo vorher ein treibendes Drehmoment nötig war, treibt nun die Reduzierung von  $J$  den Rotor an. So können die Energiezyklen in einzelnen Schritten erzeugt werden, indem man das Trägheitsmoment verändert, während sich die Drehzahl dabei kaum ändert.



Dieses Konzept lässt sich mit der Eiskunstläufer-Analogie verdeutlichen . Eine Läuferin führt bei einer Pirouette schnell rotierend ihre Arme aus – ihr Trägheitsmoment wächst, und sie verlangsamt sich, da ihr Gesamtdrehimpuls nahezu konstant ist. Zieht sie die Arme ein, verkleinert sich ihr  $J$  und die Drehzahl nimmt zu. Beim Hydraulischen Schwungradspeicher unterscheidet sich das Prinzip jedoch: Der Rotor ist über ein Antriebs- und Abgabemechanismus mit externen Kräften gekoppelt und fungiert nicht als abgeschlossenes System. Man speist also aktiv Drehmoment zu oder entnimmt es, während gleichzeitig das Fluid verschoben wird. Dadurch kann die Maschine ihre Drehzahl und damit auch die Frequenz weitgehend konstant halten. Diese Erhöhung des Trägheitsmoments bei gleichbleibender Drehzahl steht im Gegensatz zu einem starren Schwungrad und ermöglicht neue Betriebsweisen.

## Zentrifugalkraft und radialer Druckverlauf

Die Verschiebung des Fluids beruht auf der Zentrifugalkraft in einem rotierenden System. In einem sich drehenden Bezugssystem tritt an einem Massenpunkt der scheinbaren Fliehkraft  $F_Z = m\omega^2 r$  nach außen gerichtete Kraft auf . Diese Kraft drückt die Flüssigkeit gegen die Zylinderwand. In der Fluidstatik entsteht ein Druckunterschied in radialer Richtung: Der Druck in der Flüssigkeit nimmt mit dem Abstand vom Mittelpunkt quadratisch zu. Aus der Impulsbilanz der Flüssigkeit lässt sich daraus eine Differentialgleichung ableiten.

$$\frac{dp}{dr} = \rho \omega^2 r,$$

mit  $\rho$  der Dichte des Fluids. Durch Integration folgt der Druckverlauf in radialer Richtung:

$$p(r) = p_0 + \frac{1}{2} \rho \omega^2 r^2.$$

Somit ist am Außendurchmesser des Rotors der Druck deutlich höher als in der Mitte. Dieses Prinzip kennt man vom Beispiel einer Salatschleuder oder eines sich drehenden Eimers: Durch die Rotation sammelt sich die Flüssigkeit an den Wänden, da die Fliehkraft sie nach außen drängt.

Im Hydraulischen Schwungradspeicher führt dieser Zentrifugaldruck dazu, dass das Fluid vom inneren in den äußeren Zylinder gepresst wird. Je schneller rotiert wird, desto stärker steigt  $p$  an den Außenwänden, und desto mehr Fluid wird gegen die Zylinderwand verdrängt. Praktisch betrachtet wird durch dieses Druckgefälle die Arbeitsleistung in Form von Pumpenarbeit verrichtet: Beim Umverteilen des Fluids nach außen muss Arbeit gegen den Druckunterschied geleistet werden. Diese Arbeit erscheint letztlich als zusätzliche kinetische Energie im Trägheitsmoment des Rotors.

## Hydraulikflüssigkeit im hydraulischen Schwungradspeicher

In einem hydraulischen Schwungradspeicher mit variablem Trägheitsmoment wird eine Flüssigkeit als bewegliche Masse eingesetzt. Diese Flüssigkeit lässt sich innerhalb des rotierenden Systems gezielt verlagern, um das Trägheitsmoment des Rotors zu verändern – also wie schwer sich der Rotor „anfühlt“, wenn man ihn beschleunigen oder abbremsen will. Die Masse der verwendeten Flüssigkeit ergibt sich dabei aus ihrem Volumen und ihrer Dichte:

$$m = V \cdot \rho$$

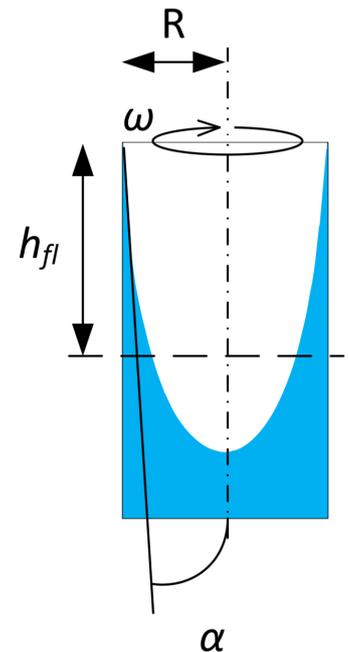
Um möglichst wenig Volumen bewegen zu müssen, sollte die Dichte der Flüssigkeit möglichst hoch sein. So kann bei gleichem Masseneffekt mit weniger Flüssigkeit gearbeitet werden, was Platz und Energie spart.

Neben der Dichte spielen aber noch weitere Eigenschaften eine wichtige Rolle bei der Auswahl der richtigen Flüssigkeit: Sie sollte eine geringe Viskosität aufweisen, also auch bei unterschiedlichen Temperaturen leicht fließen. Außerdem darf sie die Bauteile nicht angreifen und muss chemisch und thermisch stabil sein, damit sie unter den Betriebsbedingungen nicht zerfällt oder sich verändert. Eine bewährte Flüssigkeit, die all diese Anforderungen erfüllt, ist eine Mischung aus Wasser und Glykol – bekannt auch aus Kühl- und Bremssystemen. Diese Flüssigkeit ist zudem schwer entflammbar, was in vielen Anwendungen wichtig ist. Auch wenn der Brandschutz im Schwungradspeicher keine zentrale Rolle spielt, ist die langjährige Praxiserfahrung mit dieser Flüssigkeit ein großer Vorteil.

Ein weiterer interessanter physikalischer Aspekt ergibt sich durch die Rotation der Flüssigkeit im Speicher. Wenn sich eine Flüssigkeit in einem rotierenden Zylinder dreht, wird sie durch die Zentrifugalkraft nach außen gedrückt. Die Oberfläche der Flüssigkeit nimmt dabei – besonders bei Rotation um eine vertikale Achse – die Form eines sogenannten rotationssymmetrischen Paraboloids an, also eine Art runde Schüssel. Die Neigung der Flüssigkeitsoberfläche hängt vom Radius und von der Drehgeschwindigkeit ab, und folgt dem Zusammenhang:

$$\tan(\alpha) = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}$$

Dabei ist  $\alpha$  der Neigungswinkel,  $r$  der Radius,  $\omega$  die Winkelgeschwindigkeit und  $g$  die Erdbeschleunigung. Diese Form beeinflusst, wie sich die Flüssigkeit im System verteilt und wie effizient Energie gespeichert und abgegeben werden kann.



## Verlustmechanismen

In der Realität gehen nicht alle zugeführten Energie in sinnvolle Rotationsenergie über. Verschiedene Verlustquellen schmälern die Effizienz:

- **Reibung und Lagerverluste:** Mechanische Reibung in Lagern oder Dichtungen wandelt Rotationsenergie irreversibel in Wärme um. Eine Möglichkeit dagegen zu wirken wäre es Magnetlager zu benutzen oder im Vakuum zu drehen.
- **Hydraulische Reibung:** Während das Fluid in enge Spalten strömt, wirkt die Viskosität des Fluids verlustbringend. Besonders an Ventilen und Düsen treten Scherspannungen auf, die als Wärme abgeführt werden.
- **Turbulenz und Wirbelverluste:** Beim schnellen Umlagern der Flüssigkeit können instationäre Strömungen und Wirbel entstehen. Diese Strömungsstrukturen zerstreuen Energie.

- Bauungenauigkeiten: Durch schlechte Verarbeitung der Materialien in der Produktion kann es zu undichten Stellen oder sogar Lecks kommen. Dies führt zu Fluid oder Druckverlust.

## **Relevanz für Energietechnik und Praxis**

Hydraulische Schwungradspeicher sind vielversprechende Energiespeicher für moderne Energie- und Versorgungssysteme. Ihr physikalischer Aufbau und Betrieb bringt einige technische Vorteile mit sich:

- Netzstabilisierung: In Stromnetzen sorgen rotierende Massen herkömmlicher Generatoren für eine Momentanreserve: Sie puffern kurzfristige Leistungsschwankungen, da sie kinetische Energie umwandeln können. Mit dem Rückgang konventioneller Kraftwerke durch erneuerbare Quellen nimmt die natürliche Trägheit im Netz ab. Schwungradspeicher können diese fehlende Trägheit kompensieren. Insbesondere das Hydraulischen Schwungradspeicher-Konzept liefert Primärregelleistung, indem es bei Frequenzabweichungen rotatorische Energie aufnimmt oder abgibt.
- Konstante Drehzahl, kein Umrichter nötig: Ein besonderer Vorteil des variablen Trägheitssystems ist, dass der Rotor auf nahezu konstanter Drehzahl gehalten werden kann. Das erlaubt den direkten Betrieb mit vorhandenen Synchronmaschinen oder Generatoren ohne zusätzliche Frequenzumrichter. In der Praxis erspart dies Kosten und Komplexität: Der Speicher kann direkt an Netzmaschinen gekoppelt werden.
- Vergleich mit anderen Speichern: Im Vergleich zu Batteriespeichern zeichnen sich Schwungräder durch hohe Leistungsfähigkeit (Leistungsdichte), kurze Lade-/Entladezyklen und sehr hohe Lebensdauer aus. Ein Vorteil des hydraulischen Prinzips ist, dass es zwei unabhängige Energiespeicher gibt (Flüssigkeit und Gas im Rotor) und keine seltenen Materialien verwendet werden müssen.

# Ziele und Umsetzung

## Projektidee und Zielsetzung

Im Zentrum des Projekts stand die Konstruktion eines funktionierenden Modells eines hydraulischen Schwungradspeichers mit veränderbarem Trägheitsmoment. Ziel war es, das physikalische Prinzip, also die Beeinflussung der gespeicherten Rotationsenergie durch das Umlagern einer Flüssigkeit, nicht nur theoretisch zu durchdringen, sondern auch durch direkte Beobachtung und Messung greifbar zu machen. Die Bewegung der Flüssigkeit vom inneren zum äußeren Bereich des Systems sollte dabei sichtbar die Änderung des Trägheitsmoments demonstrieren.

## Konstruktion

Ursprünglich war vorgesehen, das gesamte Gehäuse mithilfe eines schuleigenen 3D-Druckers selbst zu fertigen. Diese Idee war sowohl die kostengünstigste als auch die am umsetzbarste Lösung. Allerdings stellte sich heraus, dass das Bauvolumen des Druckers nicht ausreichte. Deshalb wurde das Gehäuse schließlich extern gedruckt. Dabei traten jedoch neue Herausforderungen auf: Die digitalen Druckvorlagen enthielten keine vorbereiteten Gewinde für die Ventile. Daher musste das Nachschneiden manuell erfolgen. Dadurch dass man sich keine Fehlgriffe erlauben durfte, wurde zunächst an Teststücken geübt.



## Undichtigkeiten und Druckprobleme

Nach dem Zusammenbau des Systems zeigte sich, dass das Gehäuse an mehreren Stellen nicht vollständig luftdicht war. Eingepumpte Luft entwich durch kleine Löcher im Material sowie an den handgeschnittenen Gewinden. Dichtband konnte das Problem nur begrenzt entschärfen. Besonders kritisch war, dass sich im Betrieb kein stabiler Innendruck aufrechterhalten ließ. Das war ein zentrales



Problem, da der Speicher unter Druck arbeiten muss, um realistische Bedingungen zu erzeugen. Die Konsequenz war, dass die Messungen in einem engen Zeitfenster direkt nach dem Befüllen erfolgen mussten. In geringem Maß trat auch Wasser aus, was die Funktion aber kaum beeinflusste.

## **Sichtbarmachung der Fluidbewegung**

Ein weiteres Hindernis war die Beobachtbarkeit des Fluidverhaltens im Inneren des Speichers. Da das ursprüngliche Gehäusematerial nicht durchsichtig war, konnte die Bewegung nicht direkt beobachtet werden. Ein anfangs eingesetzter Schwimmer zur Höhenanzeige funktionierte nicht zuverlässig, da der Schwimmer oft blockierte. Letztlich wurde ein neues Gehäuse aus transparentem Kunststoff verwendet und das Wasser eingefärbt – diese Lösung erlaubte eine direkte visuelle Auswertung der Fluidverlagerung und erwies sich als praktikabel.

## **Erfassung und Auswertung von Messdaten**

Auch die Messdatenerfassung stellte sich als schwierig heraus. Die erste Version nutzte lediglich ein einziges Ereignis pro Umdrehung, aber bei höheren Drehzahlen ist dies zu wenig, um dynamische Veränderungen präzise abzubilden. Ein Versuch, ein eigenes Messrad mit vier Speichen zu bauen, scheiterte an der Präzision der Anordnung der Speichen. Erst ein präzise gefertigtes, 3D-gedrucktes Rad mit 16 gleichmäßig verteilten Speichen brachte die gewünschte Auflösung. Auch dieses Bauteil war nicht vollkommen symmetrisch, wodurch periodische Abweichungen in den Daten entstanden. Diese wurden später durch eine programmierte Software ausgeglichen, die systematische Fehler erkannte und die Messwerte korrigierte.

## **Reflexion und alternative Ansätze**

Viele der gewählten Lösungen ergaben sich aus den verfügbaren Mitteln. Der Einsatz von 3D-Druck war effizient, brachte aber konstruktionsbedingte Schwächen mit sich. Eine Herstellung aus Metall oder gegossenem Kunststoff hätte die

Dichtungsprobleme vermutlich vermieden, war jedoch aus Kosten- und Zeitgründen nicht realistisch. Auch der ursprünglich geplante Schwimmer war technisch nicht ausgereift. Rückblickend erwies sich die transparente Hülle mit gefärbtem Wasser als die einfachste und zuverlässigste Methode zur Beobachtung des Systemverhaltens. Insgesamt wurde zu viel Zeit mit letztendlich unnötigen und nicht zielbringenden Sachen verbracht.

## **Fazit**

Trotz zahlreicher technischer Hürden, also von der Fertigung über die Abdichtung bis zur Datenerfassung, gelang es, ein funktionstüchtiges und aussagekräftiges Demonstrationssystem zu erschaffen. Das Projekt machte das komplexe physikalische Prinzip eines hydraulischen Speichers mit variabler Trägheit anschaulich und überprüfbar. Durch kreative Herangehensweisen und Optimierung konnte ein Modell entwickelt werden, das sowohl für einige Unterrichtszwecke als auch für weiterführende Experimente benutzt werden kann.

# Ergebnisse

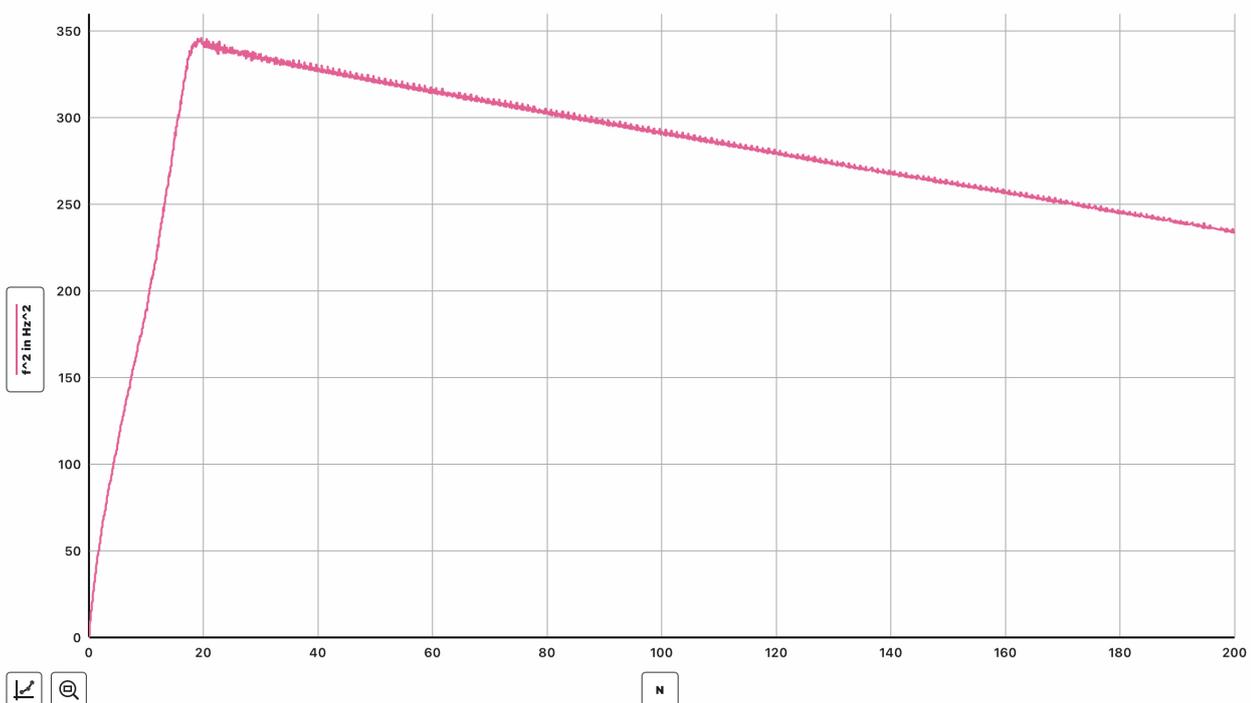
## Ziel und Vorgehensweise

Im Mittelpunkt der experimentellen Untersuchung stand die Frage, ob sich das Verhalten des hydraulischen Schwungradspeichers auch quantitativ erfassen lässt. Dazu wurde die zeitliche Entwicklung der Drehbewegung, also die Veränderung der Frequenz, systematisch aufgezeichnet und analysiert. Ein speziell dafür gefertigtes 16-Speichen-Rad lieferte zusammen mit einem optischen Sensor hochaufgelöste Signale, aus denen sich die wichtigsten physikalischen Größen berechnen ließen.

Im Fokus standen dabei insbesondere:

- die gemessene Frequenz  $f$  in Hertz,
- das Quadrat der Frequenz  $f^2$ , das im direkten Zusammenhang mit der kinetischen Energie steht,
- und die Entwicklung dieser Werte im zeitlichen Verlauf bzw. über die Anzahl der Umdrehungen.

Ein zentrales Ziel war zu prüfen, ob sich die theoretisch erwartete Veränderung des Trägheitsmoments, die durch die Bewegung der Flüssigkeit im Inneren ausgelöst wurde, auch in den aufgezeichneten Daten widerspiegelt.

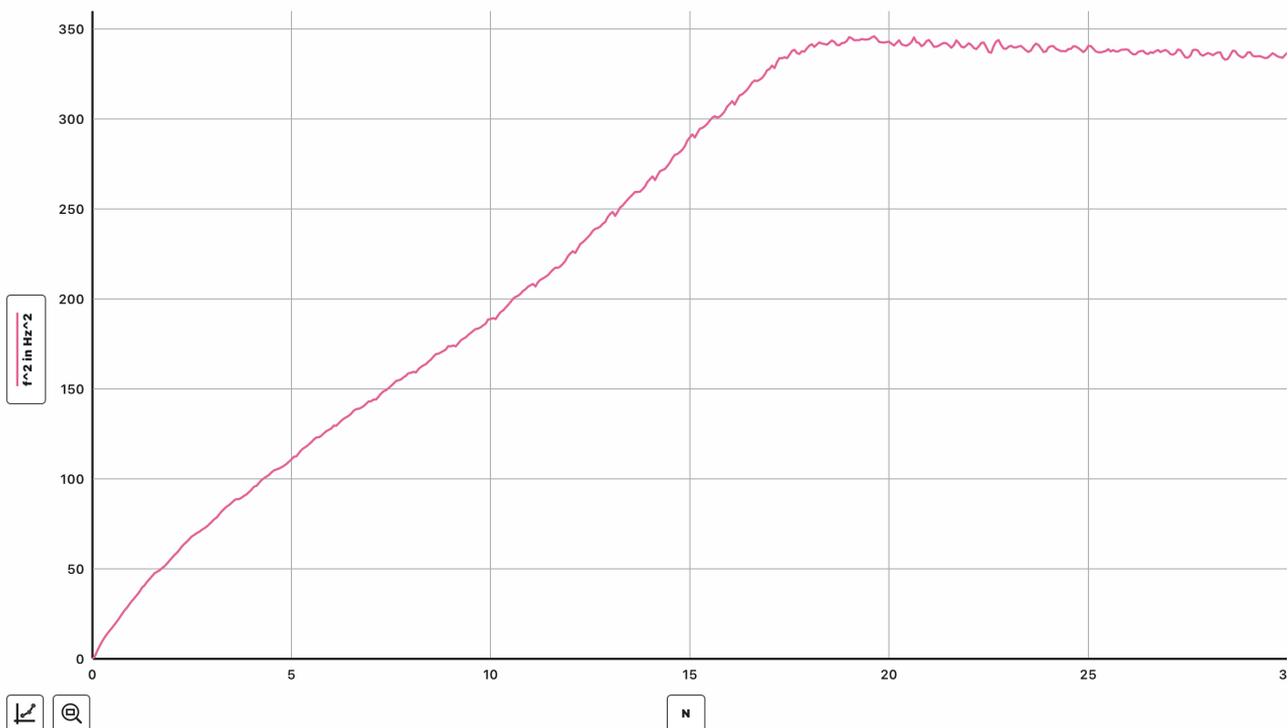


# Analyse der Messkurven

Ein besonders auffälliges Merkmal der Messkurven ist der nicht lineare Verlauf von  $f^2$  während der Beschleunigung. Anstelle eines gleichmäßigen, stetigen Anstiegs zeigt die Kurve eine Abflachung – ein deutlicher Hinweis darauf, dass nicht die gesamte zugeführte Energie direkt zur Erhöhung der Drehzahl genutzt wird.

Während der Speicher beschleunigt wird, wird ein Teil der Energie für die Verlagerung der Flüssigkeit nach außen aufgewendet. Durch diese Verschiebung nimmt das Trägheitsmoment  $J$  zu, was zur Folge hat, dass für dieselbe Erhöhung der Frequenz mehr Energie nötig ist. Dies verlangsamt das Anwachsen von  $f^2$ , also ein klarer Beleg dafür, dass das System dynamisch auf Masseveränderung reagiert.

Wäre das Trägheitsmoment konstant geblieben, wie bei einem Schwungrad aus einem durchgehenden Festkörper, hätte man einen linearen Anstieg von  $f^2$  erwartet. Die beobachtete Abweichung bestätigt also, dass die Flüssigkeit tatsächlich wie geplant verlagert wurde.



## Maximalwert der Frequenz

Ein weiterer entscheidender Punkt ist das deutlich erkennbare Maximum der Frequenzkurve. Dieses markiert den Übergang von der aktiv beschleunigten Phase in den passiven Auslauf: Ab hier erfolgt kein weiterer Energieeintrag, das Schwungrad dreht nur noch durch gespeicherte Bewegungsenergie weiter.

Im Verlauf dieser Phase beginnt die Flüssigkeit, sich wieder nach innen zu bewegen – da die abnehmende Zentrifugalkraft nicht mehr ausreicht, sie außen zu halten. Dadurch sinkt das Trägheitsmoment erneut, was wiederum Auswirkungen auf den Energieabbau hat: Der Verlauf von  $f^2$  in der Auslaufphase ist deshalb ebenfalls nichtlinear und unterscheidet sich deutlich vom Verhalten eines Systems mit konstantem  $J$ .

## Theoretischer Vergleich mit konventionellen Schwungradsystemen

Im Vergleich zu einem Schwungrad mit festem Trägheitsmoment zeigt sich ein grundlegend anderes Verhalten:

- Statt eines symmetrischen, glockenförmigen Verlaufs von  $f^2$  beobachtet man eine verzögerte Beschleunigung und einen asymmetrischen Abfall.
- Während der Aufladephase wird das Trägheitsmoment durch die Fluidverlagerung größer, wodurch die Frequenz langsamer wächst.
- In der Entladephase hingegen verringert sich das Trägheitsmoment wieder, was die Frequenzabnahme verlangsamt.

Die Messkurven stimmen damit sehr gut mit der Theorie für Systeme mit dynamischem Trägheitsverhalten überein. Sie machen die zugrunde liegenden physikalischen Effekte direkt sichtbar.

# Kernaussagen der Messreihe

Die wichtigsten Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der verzögerte Anstieg von  $f^2$  ist ein klarer Hinweis auf die zunehmende Trägheit des Systems, das durch die radiale Bewegung der Flüssigkeit verursacht wurde.
- Das Frequenzmaximum kennzeichnet den Übergang zur Auslaufphase und zeigt an, wann keine Energie mehr eingeleitet wurde.
- Die nicht-symmetrische Form der Kurven beweist, dass das Trägheitsmoment während des Betriebs nicht konstant ist.
- Verbesserungen im Aufbau und der Messmethodik führten zu einer signifikanten Steigerung der Aussagekraft der Daten.

## Schlussfolgerung

Die durchgeführten Messungen zeigen deutlich, dass das Prinzip des hydraulischen Schwungradspeichers mit variabler Trägheit nicht nur theoretisch, sondern auch experimentell nachvollzogen werden kann. Der beobachtete Verlauf der Frequenzentwicklung, die Wirkung der Fluidverlagerung sowie der charakteristische Übergang in die Freilaufphase bestätigen das zugrunde liegende Konzept.

Trotz technischer Grenzen, insbesondere durch begrenzte Dichtheit und kleine Fertigungstoleranzen, liefert das System verlässliche und aussagekräftige Ergebnisse. Es ist gelungen, die komplexe Physik eines variablen Trägheitsmoments sichtbar und messbar zu machen.

# Einschätzung zum Einsatz des hydraulischen Schwungradspeichers in der Schule

Auch wenn der entwickelte Demonstrator das physikalische Prinzip eines Schwungrads mit variabler Trägheit sehr anschaulich vermittelt, erscheint sein Einsatz im Schulunterricht, insbesondere an Grundschulen und in der Sekundarstufe I, nicht empfehlenswert.

Der Hauptgrund liegt in der technischen Komplexität des Systems: Sowohl Aufbau als auch Betrieb erfordern ein gewisses Maß an mechanischem Verständnis, handwerklichem Geschick und präziser Handhabung. Schon kleinere Undichtigkeiten oder Asymmetrien im System führen zu Funktionsstörungen, was den Nutzen im Unterricht stark einschränkt. Ein sicherer und robuster Betrieb ist unter typischen schulischen Bedingungen kaum zuverlässig möglich, da mit der Zeit das Plastik porös wird und damit kleine Löcher und Risse entstehen.

Zudem ist die zugrundeliegende Physik, besonders die Veränderung des Trägheitsmoments durch Fluidverlagerung, relativ abstrakt und setzt ein gutes Vorwissen in Mechanik und Energieerhaltung voraus. In der Grundschule ist dieses Niveau inhaltlich viel zu hoch. Auch in den unteren Klassen weiterführender Schulen wären die meisten Schülerinnen und Schüler mit der Interpretation der Messdaten überfordert, sodass der Lerneffekt begrenzt bleiben würde.

Selbst für den Physikunterricht in der Oberstufe ist der Demonstrator zwar prinzipiell einsetzbar, aber lohnen tut es eigentlich nur im Rahmen eines Profilseminars oder ähnlichem. Für regulären Unterricht ist der Aufwand in Bau, Wartung und Erklärung nicht verhältnismäßig zu dem, was man in der Zeit lernt.

Fazit:

Der entwickelte Schwungradspeicher ist ein spannendes Demonstrationsobjekt für individuelle Projekte und zur Vertiefung physikalischer Konzepte, aber kein geeigneter Lehrmittel-Bausatz für den allgemeinen Schulunterricht, insbesondere nicht in der Grundschule oder Sekundarstufe I. Für den breitflächigen Einsatz wären robuste, vereinfachte und wartungsarme Alternativen erforderlich.

# Ausblick

## Technische Weiterentwicklungen

### Verbesserung der Dichtigkeit und Stabilität

Ein großes Problem des aktuellen Modells liegt in der eingeschränkten Dichtigkeit des Gehäuses. Selbst geringe Luftverluste führen zu Druckabfällen, was die Dauer und Reproduzierbarkeit der Experimente einschränkt.

Mögliche Ansätze:

- Verwendung von industriell gefertigten Dichtungen und standardisierten Schraubverbindungen
- Herstellung des Gehäuses aus massiverem, gegossenem oder gefrästem Kunststoff oder Metall anstelle von 3D-Druck, um Mikrolecks zu vermeiden.
- Umsetzung eines konstanten Drucksystems, z. B. mit Kompressor und Druckregler, um kontinuierliche Messreihen zu ermöglichen.

### Optimierung des Messsystems

Das verwendete 16-Speichen-Rad mit optischem Sensor lieferte bereits brauchbare Daten, war aber nicht frei von Störungen. Der Einsatz eines Hallsensors mit Magnetmarkern oder ähnlichem könnte exaktere Ergebnisse liefern.

### Alternative Antriebsmechanismen

Im aktuellen Modell wurde das Schwungrad manuell angetrieben. Das ist in der Praxis schwer exakt zu steuern.

Alternativen:

- Elektromotor mit geregelter Drehzahl
- Rückgewinnungssysteme, um auch die Entladung energetisch zu erfassen.

## Visuelle Verbesserungen

Die Verlagerung der Flüssigkeit ist derzeit nur über eingefärbtes Wasser durch ein transparentes Gehäuse sichtbar. Künftige Modelle könnten mit:

- LED-Markierungen für noch bessere Sichtbarkeit arbeiten.
- Höhenmessern oder Drucksensoren im Inneren kombiniert werden, um die Verlagerung der Flüssigkeit direkt zu erfassen.

Für einen realistischen Einsatz im Unterricht wäre die Entwicklung eines vereinfachten Modells denkbar, bei dem z. B.:

- Eine rotierende durchsichtige Schüssel mit Kugeln oder Perlen als Flüssigkeitsersatz dient.
- Die Massenverlagerung optisch über Markierungen verfolgt werden kann, ohne auf echte Flüssigkeiten, Druckluftsysteme oder komplizierte Messungen zurückgreifen zu müssen.  
Dies würde zwar den physikalischen Realitätsgrad einschränken, könnte aber das Prinzip anschaulicher vermitteln.

## Offene physikalische und konzeptionelle Fragen

Trotz erfolgreicher Umsetzung bleiben zwei Fragen offen:

- Wie stark beeinflusst die Viskosität die Dynamik des Schwungradspeichers? Im aktuellen Modell wurde Wasser verwendet. Aber wie würde sich das Verhalten bei Öl verändern? Dies könnte in Folgeexperimenten rausgefunden werden.
- Wie verhält sich das System bei Dauerbelastung oder periodischem Auf- und Entladen?  
In realen Anwendungen wie Schwungradspeichern für Energieversorgungssysteme muss das System regelmäßig Energie speichern und abgeben. Die aktuelle Versuchsanordnung erlaubt nur einzelne Lade- und

Entladezyklen. Ein Testaufbau mit wiederholten Zyklen könnte neue Erkenntnisse über Lebensdauer, Dämpfung und Effizienz liefern.

## **Fazit**

Das Projekt hat gezeigt, dass ein hydraulischer Schwungradspeicher mit variabler Trägheit realisierbar ist und das Prinzip nicht nur theoretisch, sondern auch experimentell nachweisbar ist. Gleichzeitig wurde deutlich, dass noch großes Optimierungspotenzial im technischen Rahmen besteht.

Damit man mit dem Projekt gut weiterarbeiten kann, wäre es sinnvoll, verschiedene Fachrichtungen zusammenzubringen, zum Beispiel Physik, Technik und Informatik. Gemeinsam könnte man eine stabilere und besser verständliche Version des Modells entwickeln, die auch digital unterstützt wird. So könnte der Demonstrator später besser im Unterricht eingesetzt werden und dabei helfen, schwierige physikalische Konzepte wie das veränderliche Trägheitsmoment einfacher und anschaulicher zu erklären.