

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

### Endbericht

erstellt am

31/01/2016

## Projekttitlel:

# Solar Flywheel

# Machbarkeitsstudie über dezentrale Low-Cost Schwungradspeicher

Projektnummer: 848906

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	01. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/08/2015
Projektende	31/10/2016
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	15 Monate

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

ProjektnehmerIn (Institution)	4ward Energy Research GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Dr. Hermann Edtmayer
Postadresse	Reininghausstrasse 13a/EG/17, 8020 Graz
Telefon	+43 664 889 29 638
Fax	
E-mail	<a href="mailto:hermann.edtmayer@4wardenergy.at">hermann.edtmayer@4wardenergy.at</a>
Website	<a href="http://www.4wardenergy.at">www.4wardenergy.at</a>

## Solar Flywheel

### Machbarkeitsstudie über dezentrale Low-Cost Schwungradspeicher

**AutorInnen:**

A. Buchroithner, P. Haidl, A. Haan, R. Preßmair und M. Bader  
Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, Österreich

B. Schweighofer und H. Wegleiter  
Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung, Österreich

H. Edtmayer, M. Habring und M. Schloffer  
4ward Energy Research GmbH, Graz, Österreich

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstract.....	7
2	Einleitung.....	7
2.1	Energiewende: Ablösung atomarer und fossiler Energieträger .....	7
2.2	Energiespeicherung für erneuerbare Energien .....	8
3	Speichersysteme für PV-Anlagen.....	9
3.1	Erhebung der Anforderungen .....	10
3.1.1	Analyse ausgewählter Anwendungsfälle .....	14
3.2	Dimensionierung des Energiespeichers .....	20
3.3	Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen - Kostenschätzung .....	21
4	FESS Grundlagen.....	22
4.1	Herausforderungen bei der Entwicklung von FESS .....	23
5	FESS für PV-Dachanlagen.....	24
6	Technische Lösungen.....	25
6.1	Anforderungen an die relevanten Komponenten .....	25
6.2	Analytische Vorauslegung.....	26
6.3	Low-Cost Rotordesign.....	27
6.4	Verwendung von Standardkomponenten.....	31
6.4.1	Eigenschaften wichtiger Standardkomponenten.....	32
6.4.2	Kostenanalyse.....	33
6.5	Minimierung der Selbstentladung .....	33
6.6	Erhöhte Lebensdauer und reduzierter Lagerdurchmesser.....	36
7	Performancevergleich unterschiedlicher Konzepte.....	38
7.1	Option 1 – Frässpindel außerhalb der Vakuumkammer.....	38
7.2	Option 2 – Integrierte Bauweise: .....	39
7.3	Performance Vergleich.....	40
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
9	Danksagung.....	44
10	Literaturverzeichnis.....	44

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

11	Kontaktdaten.....	46
----	-------------------	----

## 1 Abstract

Im Rahmen dieser Publikation wird gezeigt, dass Schwungrad-Energiespeicher (oder „flywheel energy storage systems“, kurz FESS) eine Alternative zu chemischen Batterien für die Energiespeicherung von Solarstrom darstellen. Infolge der signifikanten Zunahme von PV-Anlagen (Photovoltaik Anlagen) bei privaten Haushalten steigt der Bedarf an dezentraler Energiespeicherkapazität zur Netzentlastung. Trotz des rasanten Wachstums des Sektors chemischer Energiespeicher sind diese noch zu teuer um sich binnen eines realistischen Zeitraums zu amortisieren, und weisen weitere Nachteile, wie zum Beispiel schwieriges Recycling oder alterungsbedingte Kapazitätseinbußen auf. Im Zuge eines Forschungsprojektes an der *TU Graz* wurde eine Machbarkeitsstudie für einen verlustarmen, low-cost Schwungradspeicher (LCSS) durchgeführt. Ausgangsbasis für die Dimensionierung des Speichers stellten Messungen von Stromverbrauch und PV-Leistungen eines österreichischen Wohnblocks mit 6 Apartments dar. Der Speicher weist einen Energieinhalt von 5 kWh und 2,2 kW Spitzenleistung auf. Umgesetzt mit einem Stahlrotor und handelsüblichen Einzelkomponenten wird ein konsequenter low-cost Ansatz verfolgt. Durch eine Silikonauflagerung der Wälzlagerung wurde eine überkritische Betriebsstrategie ermöglicht, wodurch die Selbstentladung signifikant reduziert werden konnte. Axiale Lagerlasten wurden durch eine magnetische Gewichtskompensation minimiert, wodurch ein Downsizing der Lagerung ermöglicht und somit eine weitere Reduktion der Verluste erzielt wurde. Validiert wurde das Konzept mittels skalierten Komponententests, welche vielversprechende Ergebnisse lieferten. Abschließend wurde ein verbessertes Konzept bezüglich Kosten und Selbstentladung mit der Ausgangsvariante verglichen.

Keywords: Schwungrad Energiespeicher; Photovoltaik; Erneuerbare Energien; Solarenergie;

## 2 Einleitung

### 2.1 Energiewende: Ablösung atomarer und fossiler Energieträger

Die Netzintegration erneuerbarer Energiequellen in das bestehende System erfordert große Speicherkapazitäten um dessen Stabilität zu gewährleisten und den Schutz vor Überlastung sicherzustellen. Pumpspeicherkraftwerke stellen eine der effizientesten Lösungen für größte Energiemengen dar, allerdings ist diese Technologie nur in wenigen Regionen umsetzbar, welche entsprechende geomorphologische Voraussetzungen bieten. Viele Regionen, welche für die Nutzung von Solarenergie geeignet sind weisen nicht die richtigen Rahmenbedingungen auf, weshalb alternative Energiespeichersysteme benötigt werden.

Abbildung 1 zeigt den Anteil an erneuerbaren Energien in Europa im Jahr 2015. Es sei erwähnt, dass jene Länder mit einem Anteil zwischen 27,2 und 65,5 % einen bedeutenden Anteil an Wasserkraft aufweisen (EUROSTAT, 2015). In den südlichen Ländern wird in den kommenden Jahren ein starker Anstieg solarer Energiegewinnung prognostiziert, weshalb ein Bedarf an zusätzlicher Speicherkapazität entstehen wird. Dieser Trend wird auch durch neueste politische Entwicklungen unterstützt (Patrick T. Moseley, 2014).

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

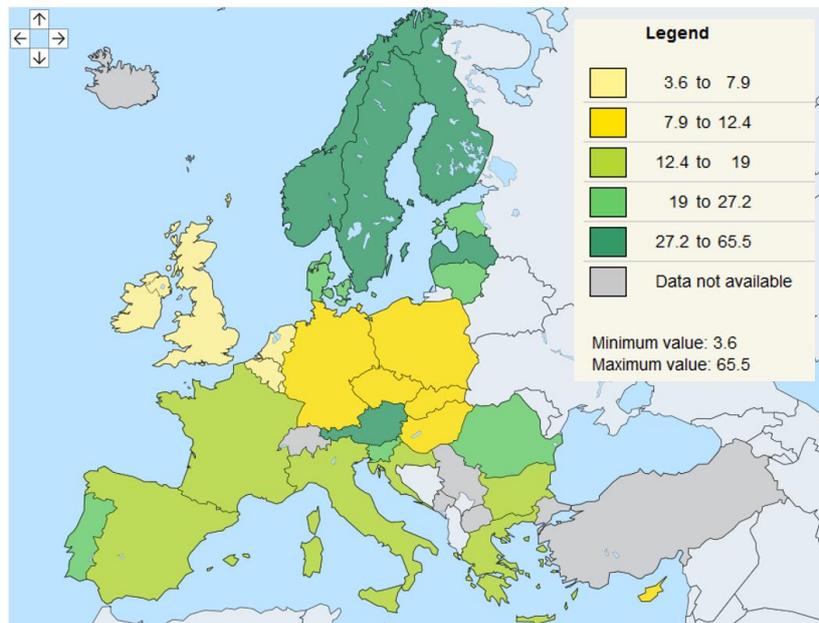


Abbildung 1 – Anteil an erneuerbaren Energien in Europa in % (EUROSTAT, 2015).

## 2.2 Energiespeicherung für erneuerbare Energien

Aktuell scheinen chemische Batterien die erste Wahl für Kleinanlagen bis 10 kWh für dezentrale Speichereinheiten zu sein. Große Stückzahlen und die technologische Weiterentwicklung der letzten Jahre führten zu einer Reduktion der Herstellungskosten auf rund 200 €/kWh (Patrick T. Moseley, 2014), wodurch es für alternative Technologien schwer ist konkurrenzfähig zu sein. Trotzdem ist die Suche nach Alternativen aufgrund folgender Nachteile aktueller Batteriesysteme voll im Gange:

- Temperaturabhängigkeit
- Schwieriges Recycling
- Langsame Ladevorgänge
- Begrenzten Zyklenfestigkeit

Diese Suche zeichnet sich speziell in der Automobilbranche ab, wo Superkapazitorer, Schwungräder und sogar Druckluftspeicher im Einsatz sind. Zeitgleich sind die Verkaufspreise dezentraler, stationärer Energiespeicher für den Hausbedarf unverhältnismäßig hoch. Systeme von Unternehmen wie *Tesla*, *LG Chem* oder *Akasol* sind für rund 800 – 1400 €/kWh netto erhältlich (MG Solar Shop, 2016), (SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016). Wie in weiterer Folge gezeigt wird, sind die Amortisationszeiten zu hoch unter Berücksichtigung des aktuellen Preises. Diese Arbeit behandelt die Möglichkeit dieses Problem durch den Einsatz von Schwungradspeichern zu lösen.

Einen Überblick aktueller, etablierter Speichertechnologien für die dezentrale Energiespeicherung bis mittlerer Energieinhalte gibt Tabelle 1 wieder. Die Bewertung durch Sterne gibt einen groben qualitativen Überblick und zeigt, wo die Stärken und Schwächen der einzelnen Konzepte liegen.

Tabelle 1 – Eigenschaften relevanter dezentraler Energiespeichertechnologien (A. Buchroithner and M.Bader, 2014)

	Li-Ion Battery	PB-Battery	Ni-Cd Battery	Super-/ UltraCap	Compressed Air storage	Hydraulic Storage	Flywheel Storage
Energy Density	***	**	***	*	*	*	*
Power Density	**	**	***	***	***	***	***
Life time	**	**	*	**	***	***	***
Cost	**	**	**	*	***	**	*
Efficiency	***	***	***	***	*	*	**
Fast Charging	*	*	**	***	**	**	***
Recycling	*	**	*	*	***	***	***
Manufacturing Effort	*	**	*	*	***	**	**

Legende: \*...mäßig, \*\*...gut, \*\*\*...sehr gut.

## 3 Speichersysteme für PV-Anlagen

Das Potenzial von Speicheranlagen wird in diesem Fall am Beispiel eines Gebäudekomplexes mit 6 Wohnungen in Ostösterreich gezeigt. Zu diesem Zweck wurden Verbrauchs- und Bedarfsmessungen dieser Wohnungen herangezogen und gemittelt, wodurch auf den Durchschnittsbedarf eines einzelnen Haushalts geschlossen wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 2 dargestellt und wie zu erwarten zeigt sich, dass der Energiebedarf im Winter signifikant höher ist als im Sommer. Ursache liegt am Heizbedarf, welcher in diesem konkreten Fall über eine Wärmepumpe gedeckt wird. Im Durchschnitt liegt der Jahresenergiebedarf des gemittelten Haushaltes bei 3922 kWh/a. Dabei werden 1785 kWh/a von der Photovoltaikanlage bereitgestellt, wovon wiederum nur 934 kWh/a direkt verbraucht werden können – der Rest wird ins öffentliche Versorgungsnetz rückgespeist.

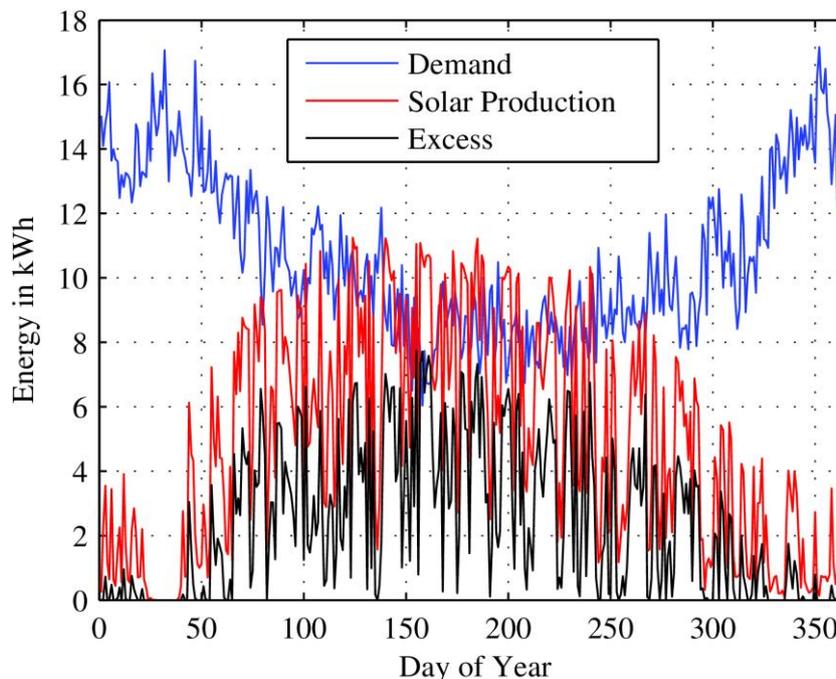


Abbildung 2 - Jahresenergiebilanz eines österreichischen Haushaltes.

Bei detaillierter Betrachtung eines Sommertages (siehe Abbildung 3) wird ersichtlich, dass zur Mittagszeit die Energieproduktion durch die Photovoltaikanlage den Bedarf weit übersteigt. Die überschüssige

Energie müsste wieder in das öffentliche Netz eingespeist werden. Durch den Einsatz eines Energiespeichers könnte diese Energie für später gespeichert werden und am Abend dadurch Verbraucher weiter mit Solarstrom betrieben werden, welcher noch von den Mittagsstunden übrig ist. Andernfalls müsste diese Energie vom Versorgungsnetz bezogen und dadurch auch bezahlt werden. Im dargestellten Fall wurden 9,83 kWh Solarstrom an diesem Tag produziert, davon jedoch nur 4,55 kWh verbraucht. Folglich könnten 5,28 kWh für den späteren Bedarf gespeichert werden. Die Energiekosten für den Bezug vom Versorgungsnetz sind höher als der Erlös für die Wiedereinspeisung, weshalb durch den Einsatz von Energiespeichern Geld gespart werden kann. Ob sich der Energiespeicher jedoch binnen eines zulässigen Zeitraums amortisiert hängt von den Anschaffungskosten ab.

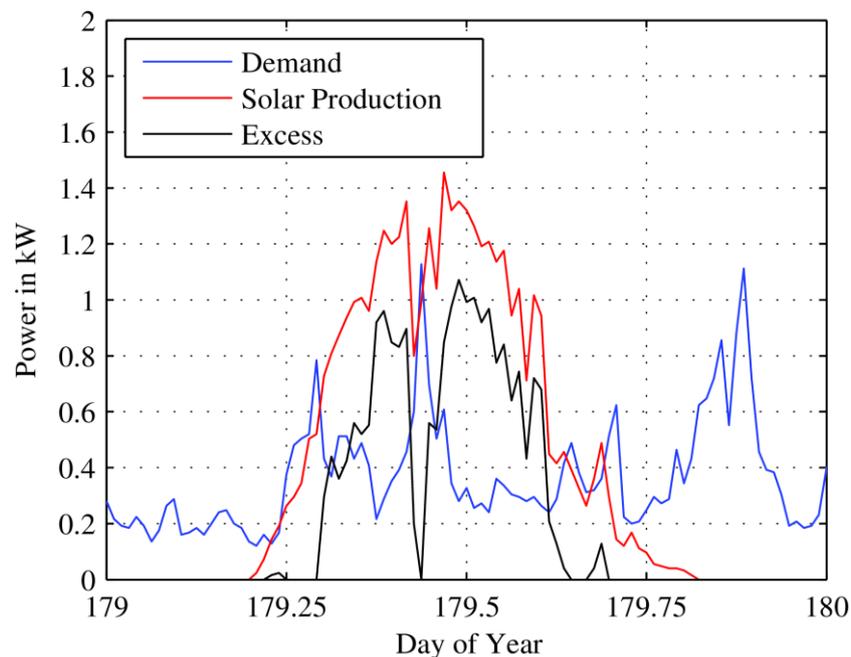


Abbildung 3 – Gemessene Energiebilanz eines Sommertages.

## 3.1 Erhebung der Anforderungen

Als eine wichtige Voraussetzung für eine erste Dimensionierung des Speichersystems wurden zu Beginn des Projektes mögliche Anwendungsfelder bzw. Einsatzszenarien erarbeitet. Dies beinhaltet auch die Abschätzung der Rahmenbedingungen für das jeweilige Einsatzszenario. Ganz allgemein werden folgende Anforderungen an den Einsatz stationäre Speichersysteme im Leistungsbereich von 5 kWh bis 50 kWh, gesetzt:

- Verbesserte Effizienz und Betriebsoptimierung dezentraler Erzeugungsanlagen
- Hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit
- Spitzenlastmanagement
- Erhöhung der Flexibilität und Steigerung der PV-Eigennutzung
- Notstromfähigkeit

Auf Basis dieser generellen Anforderungen wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Szenarien für die weiteren Untersuchungen der Einsatzmöglichkeit eines LCSS-Systems definiert. Die aufgelisteten

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Angaben zu Energie- oder Gebäudedaten beruhen einerseits auf statistischen Werten oder wurden andererseits auch wissenschaftlichen Veröffentlichungen entnommen und als gerundete Mittelwerte für die Definition der Randbedingungen übernommen.

Tabelle 2: Beschreibung der Anwendungsfälle

Szenario	Beschreibung der Rahmenbedingungen	Ziel Speichereinsatz
Wohngebäude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• freistehendes Einfamilienhaus</li> <li>• Wohnfläche: 130 m<sup>2</sup></li> <li>• NutzerInnen: 2 erwachsene Personen und 2 Kinder</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 5.000 kWh/a</li> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben, zusätzlich ist eine 5 kW<sub>p</sub> PV-Anlage am Dach des Gebäudes installiert.</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> <li>• Technikraum im Gebäude ist für eine Ölheizung inkl. Brennstofflager dimensioniert</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms;</p> <p>Tag-Nacht Speicher;</p> <p>Kombination der Eigenstromerzeugung mit der Wärmeversorgung und Warmwasserbereitung mittels einer Wärmepumpe;</p> <p>Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>
Wohnsiedlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 Doppelhaushälften</li> <li>• Wohnfläche je Wohneinheit: 120 m<sup>2</sup></li> <li>• NutzerInnen: 20 Erwachsene und 10 Kinder</li> <li>• Häuser werden über ein Mikronetz durch einen zentralen Stromspeicher sowie eine zentrale niedertemperatur-Wärmepumpe mit thermischer und elektrischer Energie versorgt; Dezentrale Wärmepumpen je Doppelhaushälfte heben das Temperaturniveau auf die benötigte Höhe</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 50.000 kWh/a</li> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben, zusätzlich ist eine 50 kW<sub>p</sub> PV-Anlage installiert (5 kW<sub>p</sub> je Wohneinheit).</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> <li>• Das Energieversorgungssystem ist in einem separaten Gebäude untergebracht.</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms;</p> <p>Tag-Nacht Speicher;</p> <p>Kombination der Eigenstromerzeugung mit der Wärmeversorgung und Warmwasserbereitung mittels dezentrale Wärmepumpen je Doppelhaushälfte;</p> <p>Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Privatwohnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wohnung in einem Mehrparteien-wohnhaus</li> <li>• Wohnfläche: 80 m<sup>2</sup></li> <li>• NutzerInnen: 2 erwachsene Personen</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 3.500 kWh/a</li> <li>• Heizung und Warmwasserbereitung über Fernwärme</li> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben, Stromerzeugung durch eine PV-Anlage am Dach des Gebäudes, Nutzung des Ertrags aus 3,5 kW<sub>p</sub> für die Wohneinheit möglich</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> <li>• Technikraum ist im Gebäude vorhanden</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms;</p> <p>Tag-Nacht Speicher;</p> <p>Kombination der Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>
Mehrfamilien- wohngebäude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 15 Wohneinheiten</li> <li>• 5 Wohnungen mit einer Wohnfläche von je 110 m<sup>2</sup>; NutzerInnen: 2 erwachsene Personen und 2 Kinder</li> <li>• 5 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von je 80 m<sup>2</sup>; NutzerInnen: 2 erwachsene Personen</li> <li>• 5 Wohneinheiten mit einer Wohnfläche von je 55 m<sup>2</sup>; NutzerInnen: 1 erwachsene Person</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 60.000 kWh/a</li> <li>• Heizung und Warmwasserbereitung über Fernwärme</li> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben, Stromerzeugung durch eine PV-Anlage am Dach des Gebäudes, Nutzung des Ertrags aus 4 kW<sub>p</sub> je Wohneinheit möglich;</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> <li>• Technikraum ist im Keller des Gebäudes untergebracht.</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms;</p> <p>Tag-Nacht Speicher;</p> <p>Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>
Gewerbeobjekt (erzeugender Betrieb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebszeiten: Wochentags 07:00 bis 18:00 Uhr Geschäftsbetrieb;</li> <li>• durchgehender Betrieb der Reife- und Kühlanlagen für Obst und Gemüse</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 291.500 kWh/a</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms;</p>

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben; 300 kWp PV-Anlage am Dach der Gewerbegebäude installiert.</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> </ul>	<p>Tag-Nacht Speicher; Kombination der Eigenstromerzeugung mit der Wärmeversorgung der Reifeanlagen mittels Wärmepumpe; Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>
Gewerbeobjekt (Bürogebäude)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzfläche: 10.000 m<sup>2</sup></li> <li>• Betriebszeiten: Wochentags 07:00 bis 18:00 Uhr</li> <li>• Jahresstromverbrauch (ohne Heizung und Warmwasserbereitung): 60 MWh/a</li> <li>• Anschluss an das öffentliche Stromnetz ist gegeben; 60 kW<sub>p</sub> PV-Anlage am Dach des Gebäudes installiert.</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> </ul>	<p>Optimierung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrades durch Lastverschiebung des PV-Stroms; Tag-Nacht Speicher; Kombination der Eigenstromerzeugung mit der Wärmeversorgung des Gebäudes mittels Wärmepumpe; Verbesserung der Energieeffizienz von Verbraucheranlagen durch wirkungsgradoptimale Leistungsbereitstellung;</p>
Netzspeicheranwendung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erneuerbare Energie-Erzeugungsanlagen <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Windkraftanlage mit durchschnittlich 1,9 MW Einspeiseleistung</li> <li>○ Photovoltaikanlage mit 500 kWp Einspeiseleistung</li> </ul> </li> <li>• Einspeisung in das Stromnetz auf Mittel- und Niederspannungsebene</li> <li>• Entladezeit: mehrere Stunden</li> </ul>	<p>Pufferspeicher der Spitzenenerzeugung gegen Abregelung der Erzeugungsanlagen bei Netzschieflagen (zu hohe Erzeugungsleistung und zu geringer Verbrauch im Stromnetz); Zwischenspeicherung von elektrischer Energie bei geringen bzw. negativen Marktstrompreisen</p>
Notstromversorgung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterbrechungsfreie Stromversorgung</li> <li>• Unterschiedliche kritische Systeme, für</li> </ul>	<p>Gewährleistung der Versorgungssicherheit bei</p>

	<p>welche Strom-Ausfallssicherheit garantiert werden muss</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Größenordnungen der Anlagen von einigen kW bis einige MW</li> <li>• Entladezeit: einige Sekunden bis einige Minuten</li> </ul>	<p>kritischen Verbrauchern z.B. Krankenhäuser, Datenzentren, etc.</p>
Inselanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alpine Schutzhütte</li> <li>• Jahresstromverbrauch: 15.000 kWh/a</li> <li>• Kein Anschluss an das öffentliche Stromnetz</li> <li>• Photovoltaikanlage mit 15 kW<sub>p</sub> Einspeiseleistung</li> <li>• Dieselgenerator als Backup System</li> </ul>	Tag-Nacht Speicher

### 3.1.1 Analyse ausgewählter Anwendungsfälle

Um einen Überblick über die Anforderungen an das Speichersystem zu erhalten, wurde eine Vorstudie mit Hilfe von bereits veröffentlichte Daten und Untersuchungen sowie Berechnungen und Simulationen durchgeführt. Aus der Literatur wurde ermittelt, dass bei einer PV-Anlagengröße von 1 kW<sub>p</sub><sup>1</sup>/MWh<sup>2</sup> und einer Speicherdimensionierung von 1 kWh<sub>sp</sub><sup>3</sup>/MWh Autarkiegrade und Eigenverbrauchsanteile von 60% - 70% erreicht werden können.

In weiterer Folge wurde anhand von im Projekt zur Verfügung stehenden gemessenen elektrischen Lastgängen von Gebäuden, Erzeugungsdaten von PV-Anlagen sowie Globalstrahlungsdaten eine Vorauslegung zur Dimensionierung und Integration eines dezentralen LCSS-Systems in drei charakteristischen Referenzanwendungsfällen durchgeführt.

Folgende Anwendungsfälle wurden dabei betrachtet:

- Wohngebäude: 2 erwachsene Personen und 2 Kinder, Verbrauch 5,79 MWh/a
- Gewerbebetrieb: Obst- und Gemüsehandel, Lager- und Reiferäume für Obst und Gemüse, Büro- und Vertriebsflächen, Verbrauch 2915 MWh/a
- Mehrfamilienwohngebäude: 6 Wohneinheiten, Verbrauch 23,7 MWh/a

Für die Vorauslegung wurde ein Simulationsmodell in der Simulationsumgebung *Matlab-Simulink*<sup>4</sup> erstellt. Das Modell ermöglichte es, Aussagen über das Verhalten eines Speichers im System Erzeuger-Verbraucher je nach Anwendungsfall zu treffen. Ausgangsbasis (und damit auch Eingangsdaten) waren dabei die jeweiligen Werte für Erzeugung und Verbrauch. Die Simulation des Speichereinsatzes basierte auf der Residualleistung, welche sich aus der Differenz zwischen der im Gebäude verbrauchten und erzeugten Leistung errechnet. In Abhängigkeit von Speicherstand, verfolgter Strategie und

<sup>1</sup> kW<sub>p</sub> = Spitzenleistung der PV-Anlage bei Standard-Testbedingungen (STC)

<sup>2</sup> MWh = Jahresverbrauch in MWh/a

<sup>3</sup> kWh<sub>sp</sub> = Kapazität des Speichers

<sup>4</sup> The MathWorks, Inc., <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Maschinenparameter wurde eine geeignete Maschinenleistung durch die Regelung des Speichers vorgegeben. Dadurch wurde der Speicher beladen oder entladen. Die dem Netz zugeführte oder aus dem Netz bezogene elektrische Leistung wurde um diese Speicherleistung verringert. Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieses Speichermodells.

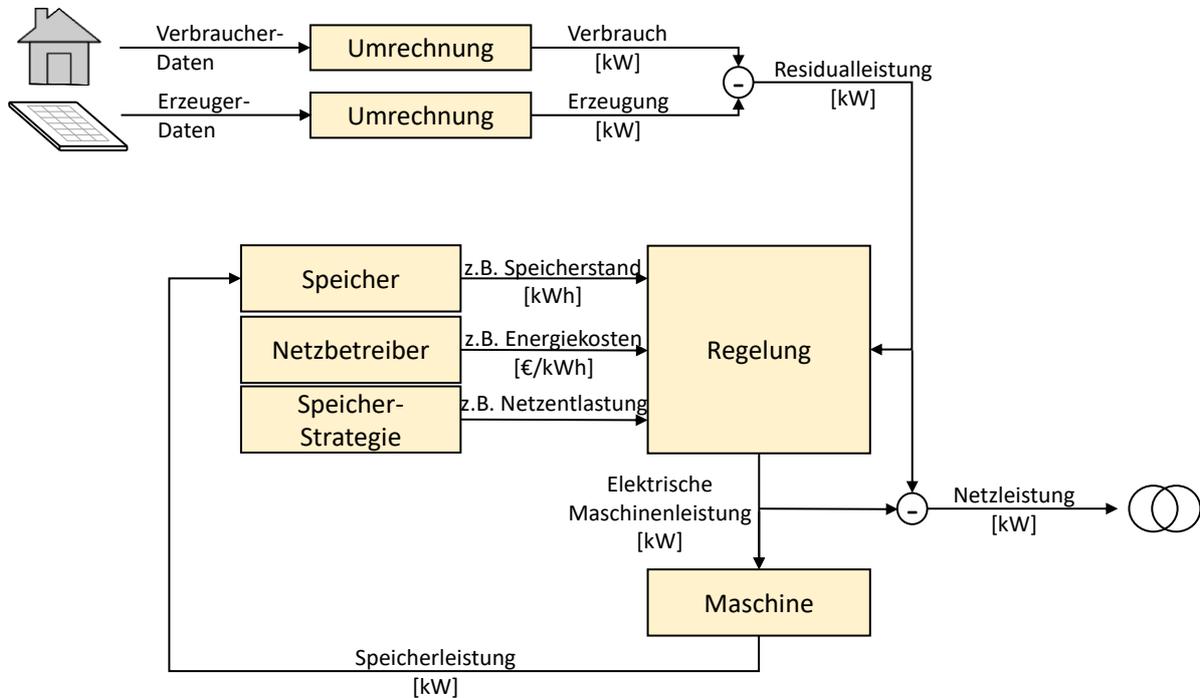


Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau des Speichermodells

Die Globalstrahlungsdaten am Standort Wiener Neustadt aus dem Jahr 2013 wurden in einer simulierten PV-Anlage von unterschiedlicher Größe zu Erzeugungslastkurven umgerechnet. Die Skalierung der PV-Anlage wurde dabei für einen möglichst hohen Autarkiegrad bei hohem Eigenverbrauchsanteil ausgelegt, dadurch entspricht die erzeugte Energie etwa dem Jahresverbrauch des Gebäudes. Bei der Simulation des Speicherbetriebs wurden für die erste Vorauslegung Anlagen-Wirkungsgrade von 100% angenommen. Der Speicher wurde auf die Optimierung des Eigenverbrauchs und Autarkiegrads ausgelegt und wurde somit unabhängig von der Höhe der ein- oder auszuspeichernden Leistung durchgehend betrieben.

In Abbildung 5 ist eine Gegenüberstellung von Verbrauch und PV-Erzeugung im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“ in einer Juliwoche dargestellt. Dieses Gebäude besteht aus einem Wohnungsverbund von sind 6 Wohneinheiten und besitzt einem auf dem Gebäudedach montierte PV-Anlage. Die Lastgänge der 6 Wohneinheiten wurden zu einem Gesamtlastgang, welcher in Rot abgebildet ist, zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass sich das Verbraucherverhalten der Bewohner sowie die Grundlast der Wohnungen zu einem Lastgang mit Grundlast und einzelnen, über den Tag verteilten Verbrauchsspitzen zusammenfügt. Nur in den Nachtstunden reduziert sich der Verbrauch auf die Grundlast und an manchen Tagen bildet sich eine Morgen- bzw. Abendspitze.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

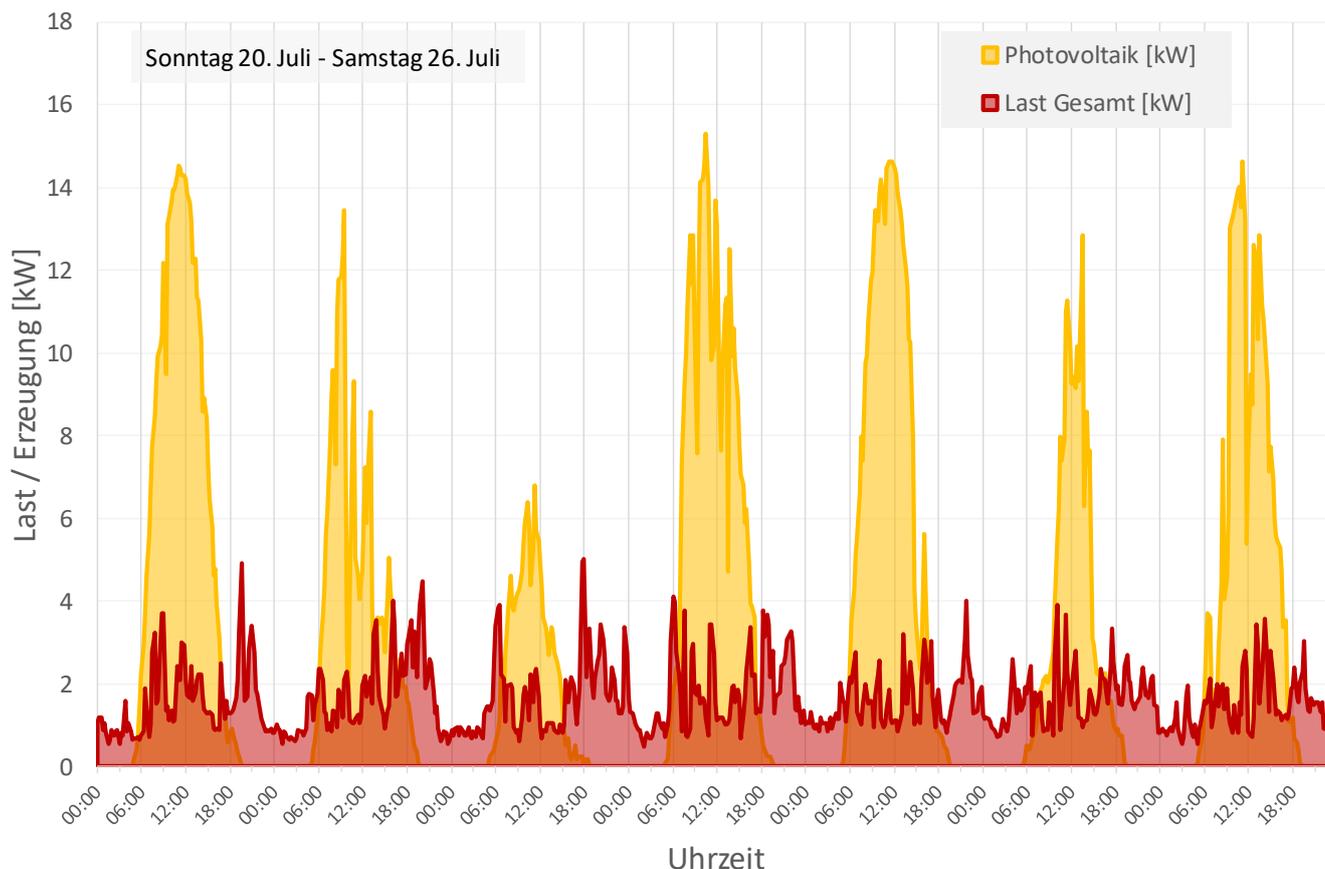


Abbildung 5: Messdaten PV-Leistung und Verbrauch im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“

Die Lastspitzen reichen dabei bis rund 5 kW und die Erzeugungsspitzen bis rund 15 kW. Auch ist teilweise eine deutliche Fluktuation der PV-Erzeugung zu sehen, welche durch z.B. Bewölkung verursacht wird.

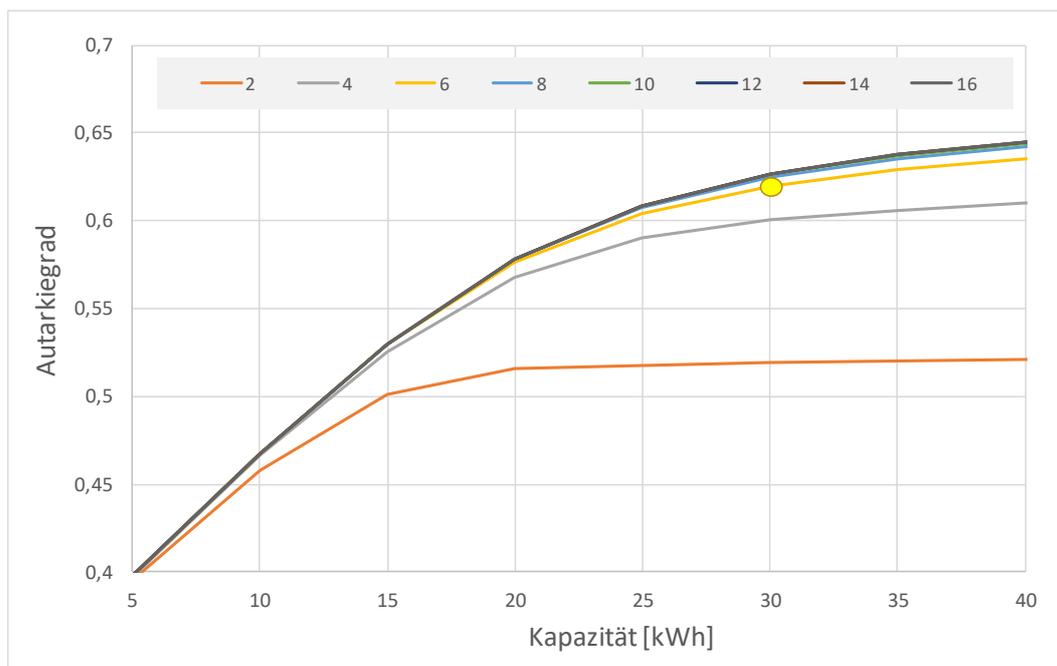


Abbildung 6: Autarkiegrad bei Variation der Speicherleistung über die Kapazität im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

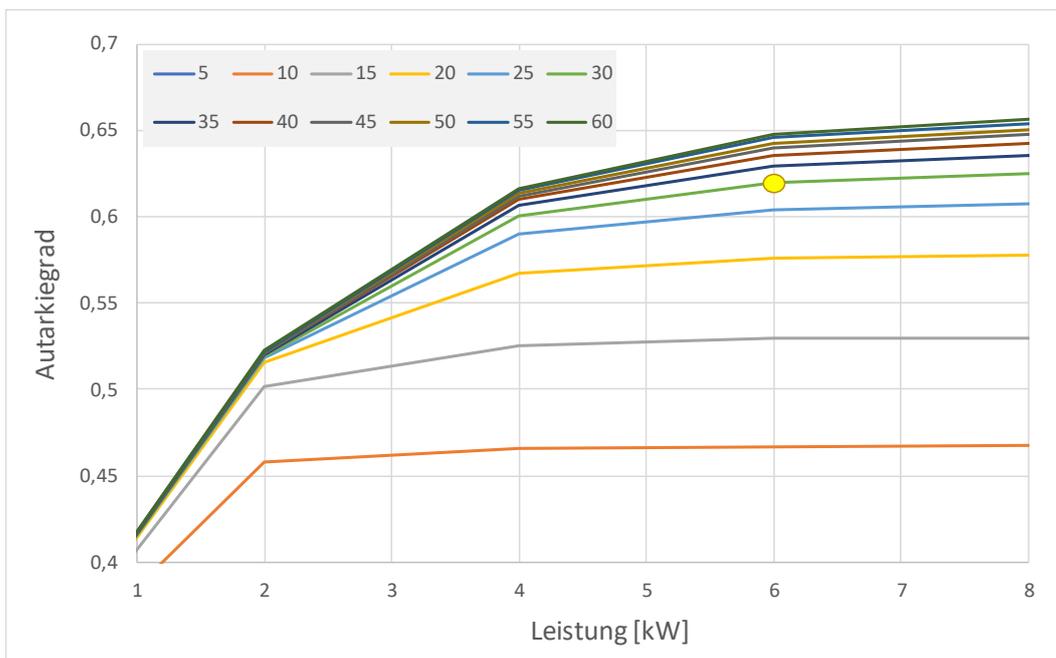


Abbildung 7: Autarkiegrad bei Variation der Kapazität über die Speicherleistung im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“

Bei Variation von Maschinenleistung und Speicherkapazität im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“ ergeben sich Ergebnisse für den Autarkiegrad wie sie Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt sind. In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Werte für Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil in dreidimensionaler Form wiedergegeben.

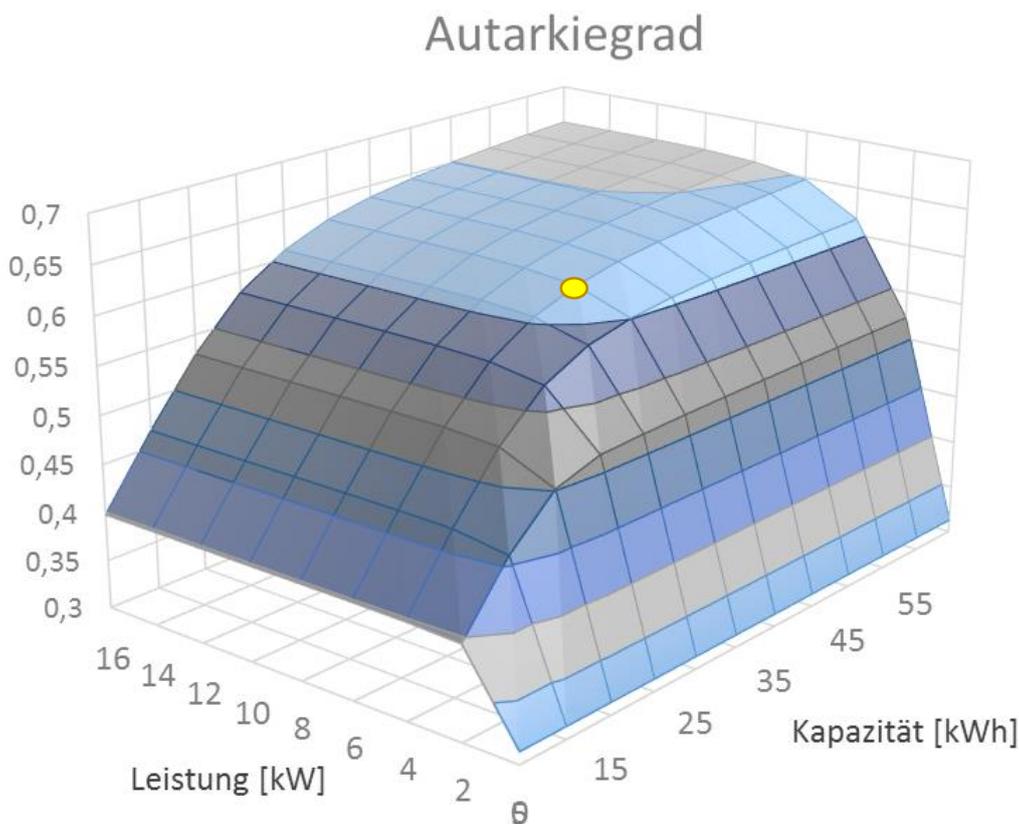


Abbildung 8: Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“; Autarkiegrad in Abhängigkeit von Speicherkapazität und Speicherleistung

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die gelben Punkte markieren die für die weitere Vorauslegung als sinnvoll erachteten Speichereigenschaften, welche nicht überschritten werden sollten. Oberhalb dieser Werte sind nur mehr geringfügige Verbesserungen von Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil zu erwarten, jedoch die Systemkosten anhaltend ansteigend. Die empfohlene Speicherleistung wird dabei auf 6 kW und die Speicherkapazität auf 30 kWh festgelegt.

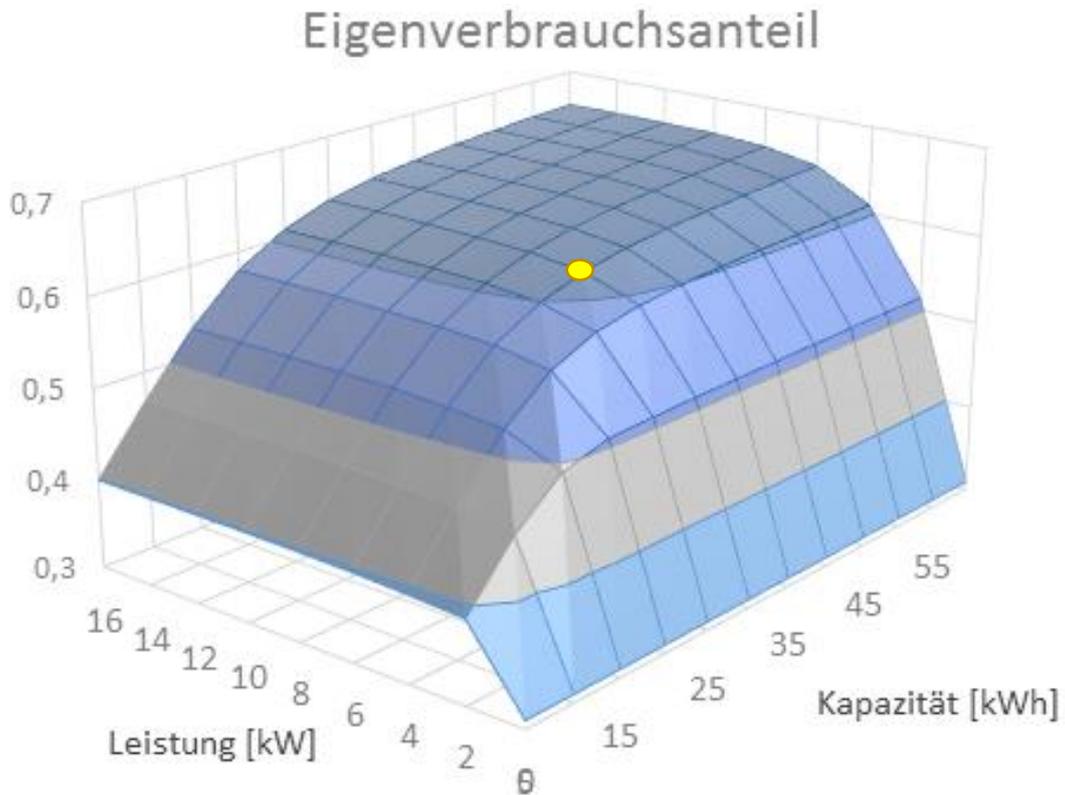


Abbildung 9: Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“; Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Speicherkapazität und Speicherleistung

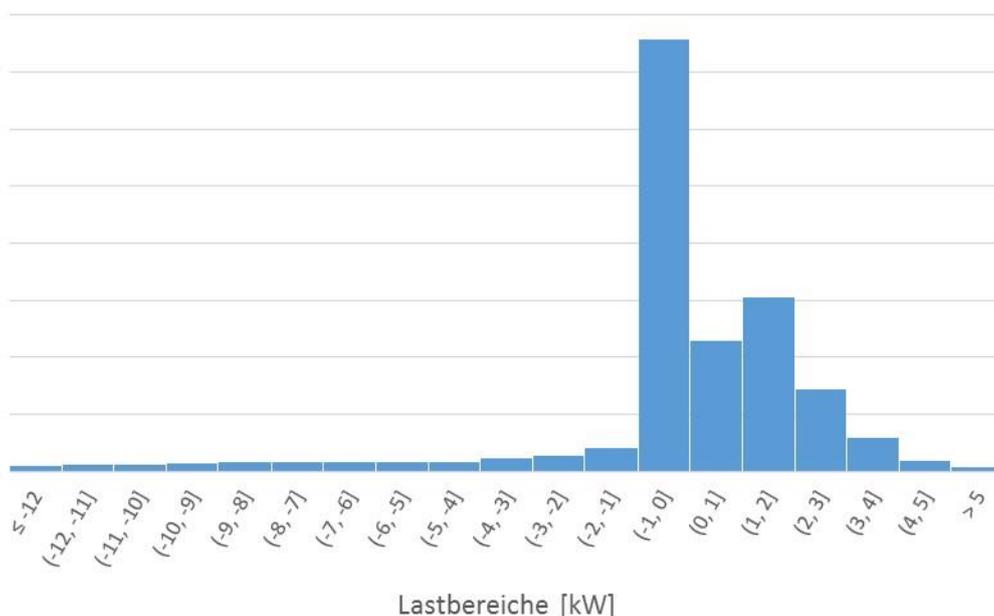


Abbildung 10: Lastkollektiv im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In Abbildung 10 ist das Lastkollektiv in 1 kW Lastbereichen für diese Berechnung dargestellt. Negative Werte beziehen sich auf die Einspeicherleistung und positive Werte auf die Ausspeicherleistung. Gut zu erkennen ist der deutliche Unterschied der Lastkollektive von Ein- und Ausspeichern. Während beim Ausspeichern vorwiegend Leistungen zwischen 0 und 4 kW vorkommen, werden die Einspeicherleistungen zum einen auf ein Band zwischen 1 und 12 kW verteilt und zum anderen ein großer Anteil auf den Bereich 0-1 kW beschränkt. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Vorauslegung im Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“ zusammengefasst. Der Jahresverbrauch des Wohnungsverbundes und die Jahreserzeugung der Photovoltaikanlage sind mit 18,5 und 18,7 MWh/a annähernd gleich. Die maximal angebotene Leistung zum beladen des Speichers liegt bei 15,5 kW und die maximal geforderte Entladeleistung bei 8,9 kW. Daraus ergeben sich anzustrebende Speichereigenschaften von 6 kW und 30 kWh. Die in dieser Vorauslegung errechneten Werte für Leistung, Kapazität, Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad mit Speichereinsatz sind auf einen idealen Speicher ohne Verluste (Ein- / Ausspeichern, Standby) bezogen. Verlustbehaftete Simulationen wurden in der detaillierten Auslegung in AP3 durchgeführt. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Simulation eines Jahres für den Anwendungsfall „Wohngebäude“ und Tabelle 5 für den Anwendungsfall „Gewerbebetrieb“.

Tabelle 3: Ergebnisse Anwendungsfall „Mehrfamilienwohngebäude“

Jahresverbrauch	18,5 MWh/a
PV-Anlage Jahreserzeugung	18,7 MWh/a
Max. angebotene Einspeicherleistung	15,5 kW
Max. geforderte Ausspeicherleistung	8,9 kW
Eigenverbrauchsanteil ohne Speicher	30,9 %
Autarkiegrad ohne Speicher	31,3 %
Empfohlene Speicherdimensionierung	
Leistung:	6 kW
Kapazität:	30 kWh
Eigenverbrauchsanteil mit idealem Speicher	61,5 %
Autarkiegrad mit idealem Speicher	62 %

Tabelle 4: Ergebnisse Anwendungsfall „Wohngebäude“

Jahresverbrauch	5,79 MWh/a
PV-Anlage Jahreserzeugung	5,8 MWh/a
Max. angebotene Einspeicherleistung	5 kW
Max. geforderte Ausspeicherleistung	4,8 kW
Eigenverbrauchsanteil ohne Speicher	27,6 %
Autarkiegrad ohne Speicher	27,7 %
Empfohlene Speicherdimensionierung	
Leistung:	3 kW
Kapazität:	15 kWh
Eigenverbrauchsanteil mit Speicher	64,6 %
Autarkiegrad mit Speicher	63,9 %

Tabelle 5: Ergebnis Anwendungsfall „Gewerbebetrieb“

Jahresverbrauch	291,5 MWh/a
PV-Anlage Jahreserzeugung	290 MWh/a
Max. angebotene Einspeicherleistung	288 kW
Max. geforderte Ausspeicherleistung	61 kW
Eigenverbrauchsanteil ohne Speicher	37,7 %
Autarkiegrad ohne Speicher	37,6 %
Empfohlene Speicherdimensionierung	
Leistung:	90 kW
Kapazität:	500 kWh
Eigenverbrauchsanteil mit Speicher	73 %
Autarkiegrad mit Speicher	73,3 %

## 3.2 Dimensionierung des Energiespeichers

Zur sinnvollen Abschätzung der erforderlichen Größe des Energiespeichers wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Um die Abschätzung zu vereinfachen wurde von einem *idealisierten Referenzspeichersystem* (100 % Wirkungsgrad, keine Leerlaufverluste) ausgegangen. Die Lade- und Entladeleistung wird als nicht begrenzt angenommen. Dadurch wurde die überschüssige Energiemenge ermittelt, welche für späteren Bedarf gespeichert werden kann. Anschließend wurde die Leistung des Systems definiert. Basis für diese Berechnung stellt die Rahmenbedingung dar, dass über 99 % der theoretisch verfügbaren Energie auch gespeichert werden kann. Diese Einschränkung verhindert, dass Ausreißer in den Messdaten die Berechnung verfälschen. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Simulationsergebnisse.

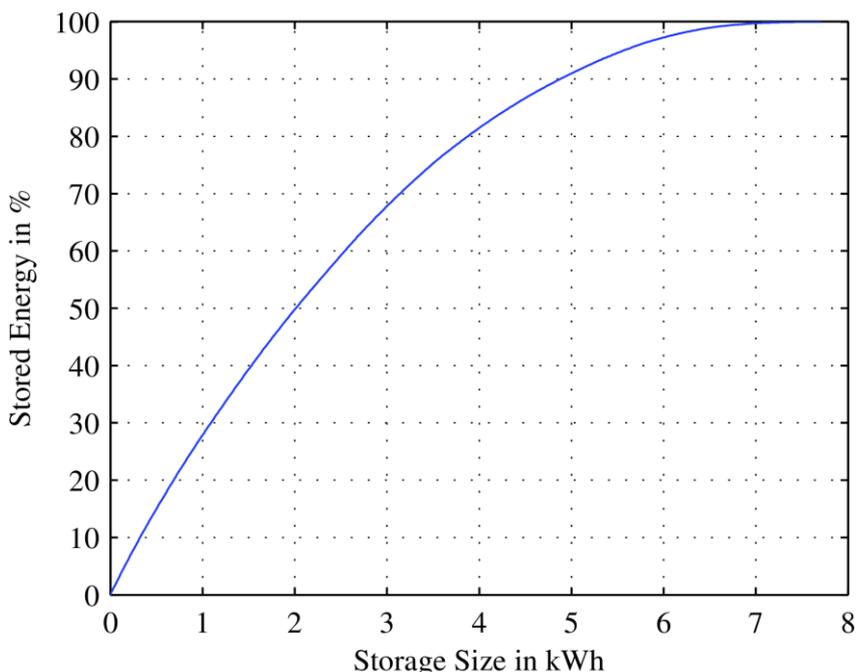


Abbildung 11 - Gespeicherte Energie in Abhängigkeit von der Speichergöße

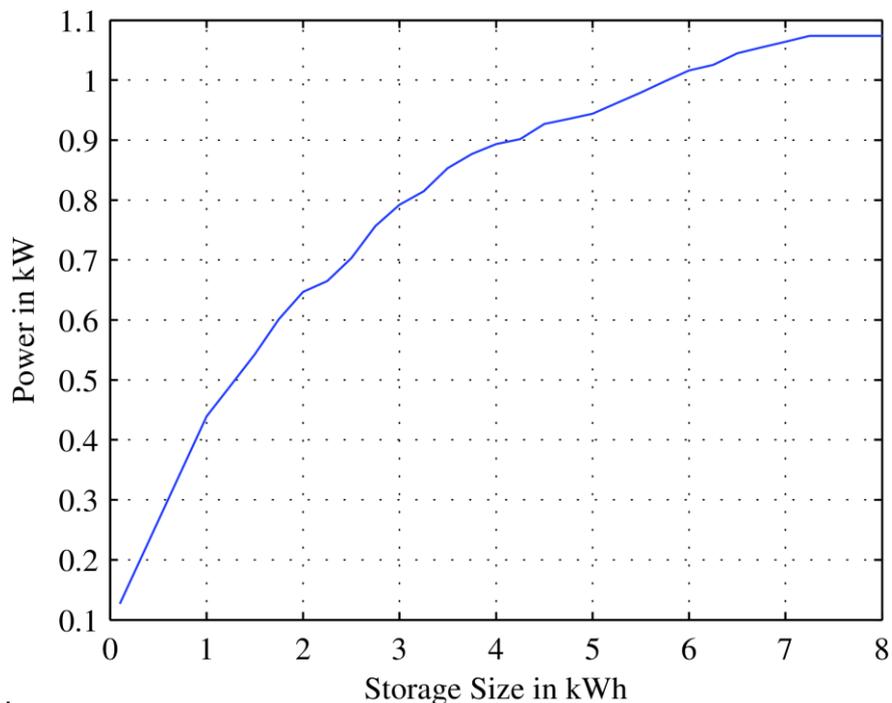


Abbildung 12 - Erforderliche Speiseleistung um 99 % der überschüssigen Energie speichern zu können.

Auf Basis der Steigung des Graphen in Abbildung 11 liegt eine angemessene Speichergröße im Bereich von 4 bis 5 kWh, wobei 80 – 90 % der überschüssigen Energie gespeichert werden können. Abbildung 12 legt eine Leistung von 1 kW oder höher nahe, wobei höhere Leistungen speziell am Abend vorteilhaft sind. Aktuell verfügbare Speicherlösungen (zB. *Tesla Power Wall*, etc. (SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016)) weisen ähnliche Spezifikationen auf.

### 3.3 Wirtschaftlichkeit von Speichersystemen - Kostenschätzung

Auf Basis aktueller Energiekosten in Österreich (rund *20 Cent/kWh Kauf* und *5 Cent/kWh Rückspeisung*) und der Amortisierungszeit eines Speichersystems kann auf die zulässigen Kosten für ein Speichersystem geschlossen werden. Die Rechnung wurde einfach gehalten (keine altersbedingte Wertminderung der Photovoltaikanlage, keine Reparaturkosten, keine Inflation) um eine Parametervariation bei kurzen Rechenzeiten durchführen zu können. Trotzdem sei gesagt, dass infolge der aktuellen Situation in Österreich und Deutschland die Profitabilität der Rückspeisung von Energie aus kleinen PV-Anlagen in den kommenden Jahren voraussichtlich abnehmen wird. Die Ergebnisse der Amortisationsrechnung des Energiespeichers sind in Abbildung 13 dargestellt.

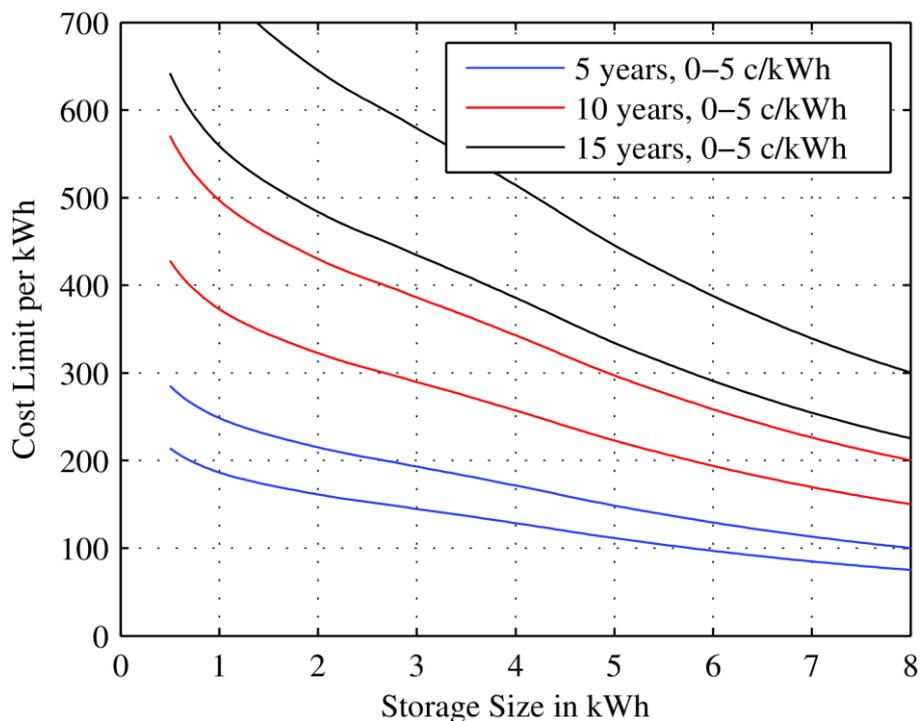


Abbildung 13 - Speicherkostenlimit pro kWh, abhängig von Speichergröße, Amortisationszeit und Rückspeisetarif.

Abbildung 13 zeigt das Kostenlimit in Abhängigkeit von der Speicheramortisationsdauer, welche durch die unterschiedlichen Farben dargestellt wird. Zusätzlich wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Rückspeisetarife auswirken, wobei der untere Verlauf einer Amortisationskategorie einem Tarif von 5 Cent/kWh entspricht und der obere von keiner Vergütung der Rückspeisung ausgeht. Bleisäurebatterien, welche für die betrachtete Anwendung eine Lebensdauer von rund 10 Jahren aufweisen, müssten sich folglich nach etwa 5 Jahren amortisieren um noch genügend Gewinn zu lukrieren. Angesichts der vorherigen Aussage, dass die Speicherkapazität etwa 5 kWh betragen sollte und eine Amortisierungszeit von etwa 5 Jahren angestrebt wird, sollten die Kosten für den Energiespeicher daher unter 110 - 150 EUR/kWh liegen (je nach Höhe der Einspeisevergütung), einschließlich der Installation – d.h. „Endkundenpreis“. Unter Annahme einer Amortisierungszeit von 10-15 Jahren dürften sich die Speicherkosten auf ca. 220-450 EUR/kWh erhöhen. Sogar dieser Wert würde noch immer deutlich unter der Preisspanne für derzeit verfügbarer Home-Storage-Lösungen liegen (SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016).

## 4 FESS Grundlagen

Das Konzept von Schwungrad-Energiespeichern (FESS) basiert auf dem Prinzip der Energiespeicherung mittels einer rotierenden Masse und wird durch dessen Massenträgheitsmoment  $I$  und Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  charakterisiert. Der Energieinhalt kann leicht unter Verwendung der nachfolgenden Formel quantifiziert werden:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * I \omega^2 \quad (1)$$

Energie kann dem Schwungrad auf unterschiedliche Weise zugeführt und entnommen werden. Da es sich dabei um einen reversiblen Vorgang handelt verhält sich das System wie eine Batterie. Obwohl einige rein mechanische Batterien erfolgreich in Hybridfahrzeugen implementiert wurden (Bader & Buchroithner, 2011), betrachtet diese Publikation ausschließlich elektromechanische Ausführungen. Abbildung 14 zeigt einen möglichen Aufbau eines Flywheel-Systems mit erhöhtem Energieinhalt (Außenläufer).

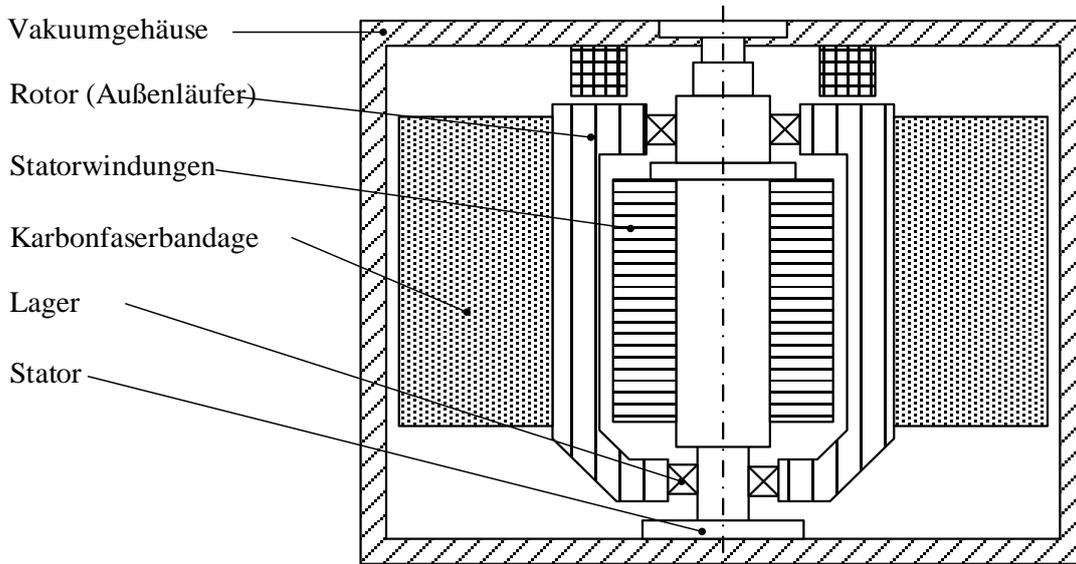


Abbildung 14 – Aufbau eines elektromechanischen FESS (A. Buchroithner, I. Andrasec, M. Bader, 2012).

Schwungradspeicher weisen eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu chemischen Batterien auf, wodurch diese für die Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen interessant werden. Die wichtigsten davon sind:

- Hohe Energiedichten bis 5 kW/kg möglich
- Leistung und Energieinhalt unabhängig voneinander dimensionierbar
- Sehr hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen
- Keine Temperaturabhängigkeiten oder alterungsbedingte Kapazitätseinbußen
- Genaue und einfache Ermittlung des Ladezustands und des Gesundheitszustands

Bis jetzt wurden FESS in hochdynamischen Anwendungen eingesetzt, wie z.B. zur Netzstabilisation, für unterbrechungsfreie Stromversorgungssysteme oder zur Spitzenglättung in Hybridfahrzeugen. Ein Grund dafür liegt in der geringen Bedeutung eines großen Nachteils von FESS, der Selbstentladung. In den letzten Jahren haben unterschiedliche Prototypen und Studien gezeigt, dass FESS jedoch für eine Vielzahl von Anwendungen geeignet sind. Kleinserienfertigung und die Verwendung von high-end Komponenten wie Faserverbundwerkstoffe und aktive Magnetlager führten zu teuren Systemen und verhinderten einen erfolgreichen Markteintritt.

## 4.1 Herausforderungen bei der Entwicklung von FESS

Der Schlüssel um FESS populärer zu machen liegt in einem konsequenten low-cost Ansatz. Zusätzlich müssen folgende Herausforderungen bewältigt werden:

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

## Hohe Selbstentladung

Trotz des Betriebs im Vakuum ist ein gewisser Anteil an Strömungsverlusten nicht vermeidbar. Der Großteil der Verluste wird jedoch durch die Lagerreibung verursacht. Auch bei hochpreisigen aktiven Magnetlagern resultiert deren Energiebedarf in einer Reduktion des Gesamtsystemwirkungsgrades.

## Sicherheitsaspekte

Unfälle wie der Berstfall im *Beacon Power Flywheel Plant* in Stephentown, USA im Jahre 2011 (The Eastwick Press, 2011) oder die Berstkammerexplosion bei *Quantum Technologies* nahe San Diego (Tarryn Mento, 2015) haben dem Image der FESS-Technologie geschadet, obwohl sie keine Todesfälle zur Folge hatten. Folglich müssen sichere und innovative Rotor- und Gehäusekonzepte entwickelt werden.

## Hohe Kosten

Obwohl viele Unternehmen FESS-Systeme zur Netzstabilisation anbieten (*Temporal Power, Active Power, Beacon Power, Piller Powerbridge, etc.*) sind die Preise für die entsprechenden Systeme noch vergleichsweise hoch (Patrick T. Moseley, 2014). Eine solche Investition rentiert sich für Elektrizitätsgesellschaften aber nicht für Personenhaushalte, welche die Energie ihrer PV-Anlage vor Ort speichern möchten.

## 5 FESS für PV-Dachanlagen

Abbildung 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schwungradspeicher-Systems zur dezentralen Speicherung von Solarstrom. Die Leistungselektronik, welche aus dem VFD-Frequenzumrichter für die Motor-/Generatoreinheit und dem DC/AC Wechselrichter besteht, ist mit der Speichereinheit verbunden und die PV-Anlage mit dem öffentlichen Stromnetz. Eine Vakuumpumpe stellt einen Druck im Gehäuse im Sub-Millibarbereich sicher, um Strömungsverluste zu minimieren. Die Statorwindungen sind wassergekühlt, wobei die Wärme durch einen Wärmetauscher an die Umgebungsluft abgeführt wird.

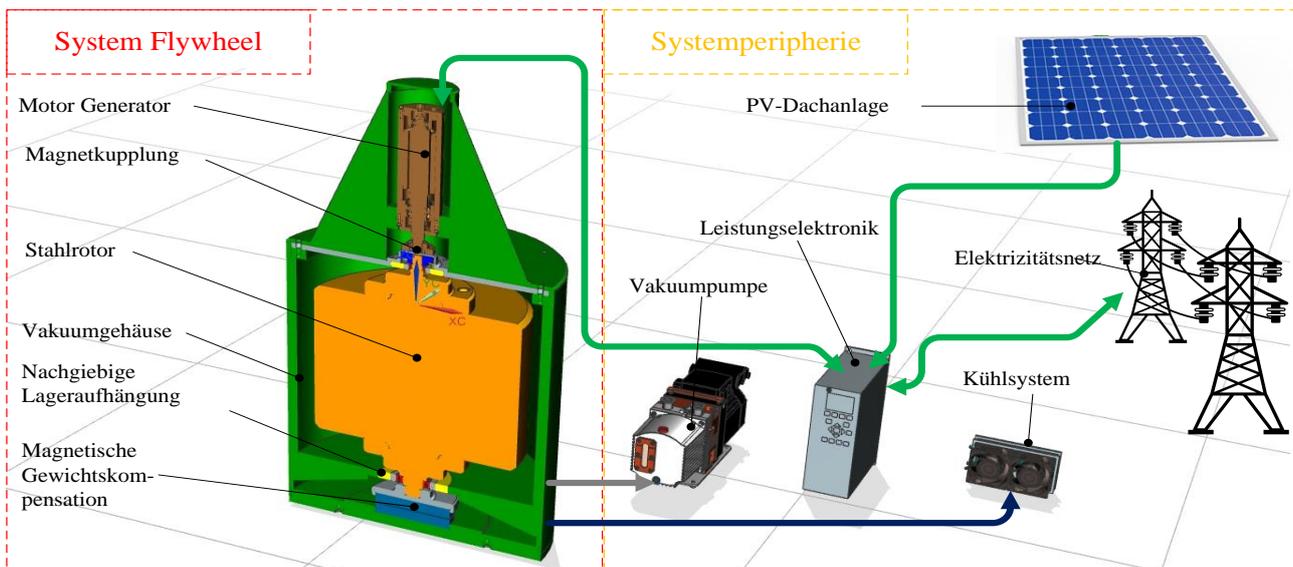


Abbildung 15 – Aufbau eines Schwungradspeichers zur dezentralen Speicherung der Energie von PV-Anlagen

## 6 Technische Lösungen

Die folgenden Ansätze wurden entwickelt um die oben aufgeführten Nachteile eines FESS zur Speicherung von Solarstrom zu verbessern. Auf Basis des in Abbildung 15 dargestellten Gesamtsystems wurden die Komponenten des elektromechanischen Speicherkonzeptes definiert.

Der LCSS besteht aus einem Motor-Generator mit angeflanschter Schwungmasse, wobei auf diese bei ausreichendem Massenträgheitsmoment des elektrischen Rotors auch verzichtet werden kann (vollintegrierte Bauweise). Die möglichen Architekturvarianten sind in *Abbildung 16* dargestellt.

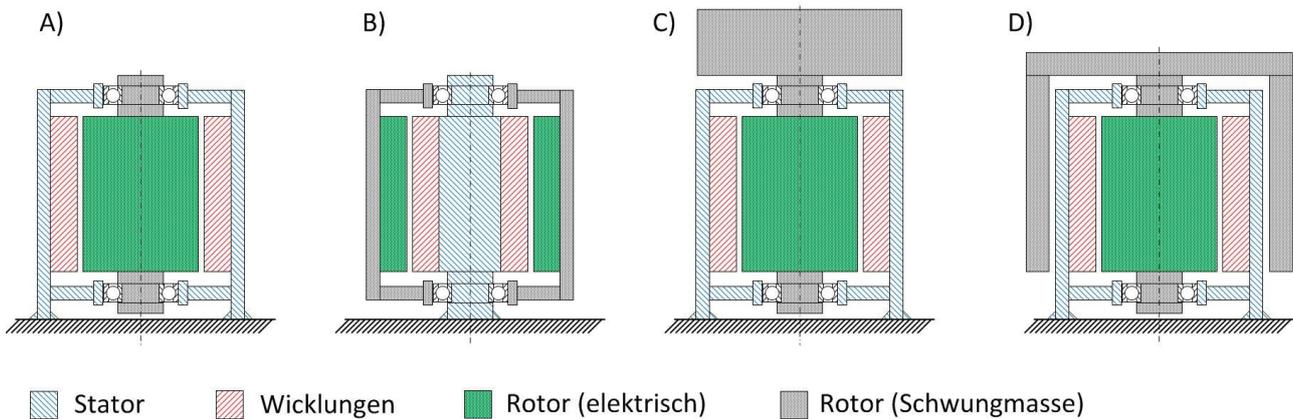


Abbildung 16: Verschiedene Topologien von elektromechanischen Schwungradspeichern. A) Innenläufer, vollintegriert B) Außenläufer C) Innenläufer, aufgelöste Bauweise D) Innenläufer mit Glockenrotor.

Eine systematische Analyse der Varianten hat Typ C („Innenläufer, aufgelöste Bauweise“) als am besten für die vorliegende Anwendung geeignet eingestuft. Dies ist in erster Linie auf den relativ hohen Energieinhalt bei geringer Leistung zurückzuführen, weshalb die E-Maschine verglichen zur Schwungmasse als „klein“ bezeichnet werden muss.

### 6.1 Anforderungen an die relevanten Komponenten

Das Konzept eines Außenläufers bringt neben dem Einsatz einer Sonder-E-Maschine auch den Nachteil der Außenringrotation des Wälzlagers mit sich. Zur Reduktion der Strömungsverluste befinden sich alle rotierenden Teile im Vakuum. Die somit wegfallende aerodynamische Konvektion erfordert abhängig vom Lastzyklus eine zusätzliche Wasserkühlung der E-Maschine und Lagerung. Zu den Peripheriekomponenten gehören ebenso Vakuumpumpe und Frequenzumrichter. Eine für die Vorauslegung relevante Anforderungsliste der LCSS-Komponenten ist in Tabelle 6 gegeben.

Tabelle 6: Anforderungsprofil an Systemkomponenten

Komponente / Modul	Eigenschaften und Anforderungen
<b>Rotor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abmessungen: maximal 1x1x1 m</li> <li>Energieinhalt: ~5 kWh</li> <li>Wertstoff: Vergütungsstahl</li> </ul>
<b>Lagerung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wälzlagerung</li> <li>Lebensdauer: 25 Jahre</li> <li>Reibungseigenschaften: Geringes Verlustmoment</li> <li>Vakuuntauglich</li> </ul>
<b>Vakuumpumpe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Druckniveau kleiner 10 mbar</li> </ul>

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

<b>Motor/Generator</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ölwechselintervalle größer 5 Jahre</li> <li>• Drehzahlbereich bis 20.000 UpM</li> <li>• Max. Losbrechmoment. 2 Nm</li> <li>• Temperaturbeständig bis mindestens 60°C</li> <li>• Wirkungsgrad größer 90%</li> </ul>
<b>Frequenzumrichter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lebensdauer: 25 Jahre</li> <li>• Wirkungsgrad größer 90%</li> </ul>
<b>Gehäuse</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gute Dämpfungseigenschaften</li> <li>• Dichtheit gegenüber Vakuum</li> <li>• Sicherheit gegen Rotorbersten oder Lagerversagen</li> </ul>

## 6.2 Analytische Vorauslegung

Die Variation des Durchmesser-Längen-Verhältnisses (folgend als K1-Faktor bezeichnet) erlaubt Die Analytische Vorauslegung des Konzeptentwurfs stützte sich auf die in Abbildung 17 dargestellte Vorgehensweise in Kombination mit dem in Abbildung 18 dargestellten „Igeldiagramm“.

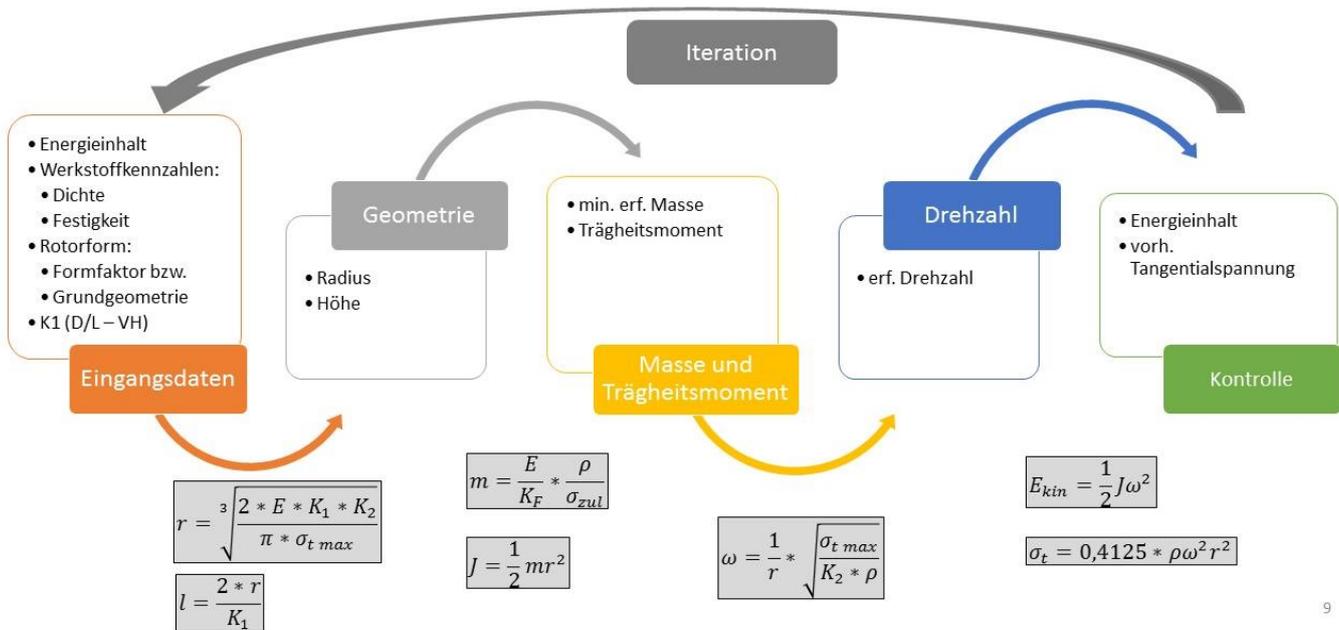


Abbildung 17: Berechnungsflussdiagramm zur Auslegung eines mechanischen Schwungradspeichers

Abbildung 18 zeigt, dass mit Hilfe von 4 Grundgrößen Drehzahl  $\omega$ , die Scheibendicke  $l$ , der Radius der Schwungradscheibe  $r$  und die Werkstoffdichte  $\rho$ , das Flywheel in seiner Geometrie, den auftretenden Belastungen und dem Energieinhalt beschrieben werden kann. Die 4 Grundgrößen stellen damit die wichtigsten Einflussparameter auf das Design des Flywheels da, welche sich aufgrund unterschiedlicher Potenzen als stärkere oder schwächere Parameter auszeichnen. So hat beispielsweise der Radius der Schwungradscheibe  $r$  (4.te Potenz) einen größeren Einfluss auf den Energieinhalt als die Drehzahl (2.te Potenz), d.h. eine Verdoppelung des Radius bewirkt bei konstantem Energieinhalt eine Absenkung der Drehzahl auf ein Viertel. Meist wird aus praktischen und anschaulichen Gründen die Dichte und die Geometrie (indirekt über Volumen) zum Grundparameter Masse zusammengeführt.

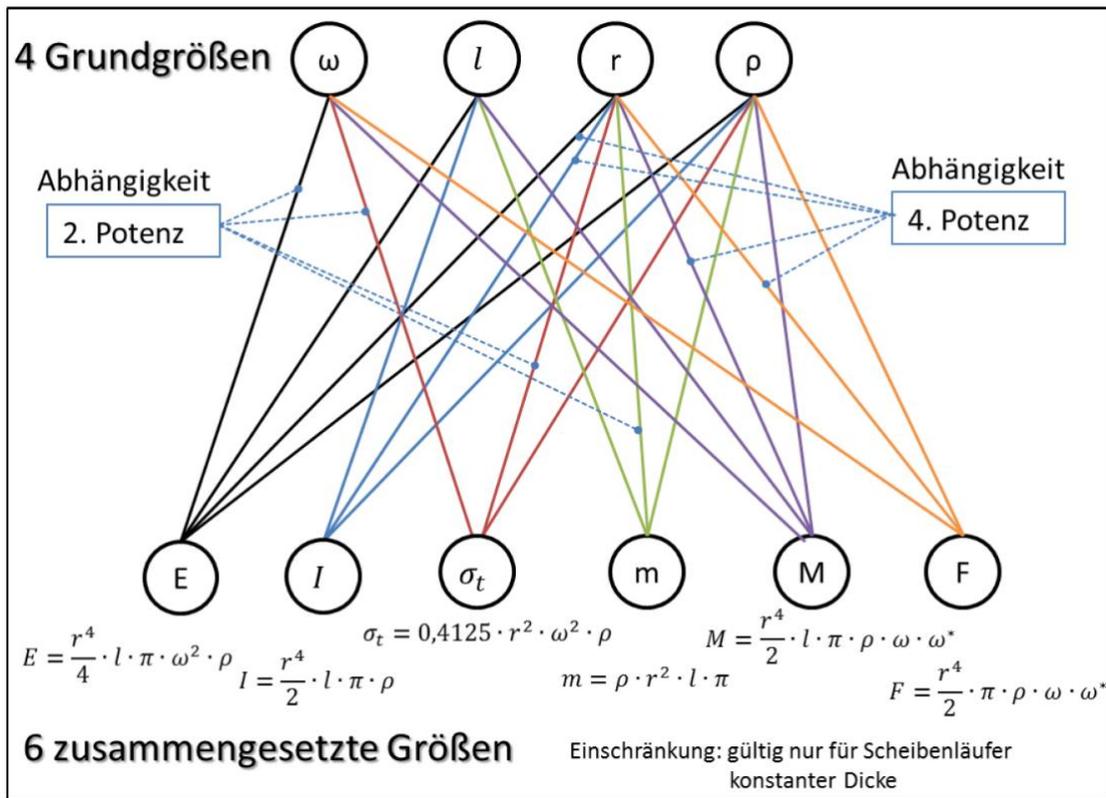


Abbildung 18: Das „Igeldiagramm“ zeigt, wie die 4 Grundgrößen der Schwungradspeicherauslegung die abgeleiteten Größen beeinflussen.

## 6.3 Low-Cost Rotordesign

Die Energiedichte der Schwungräder wird durch das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Dichte des Rotorwerkstoffes begrenzt. Abbildung 19 zeigt die Spannungssituation eines scheibenförmigen Rotors anhand eines Elements.

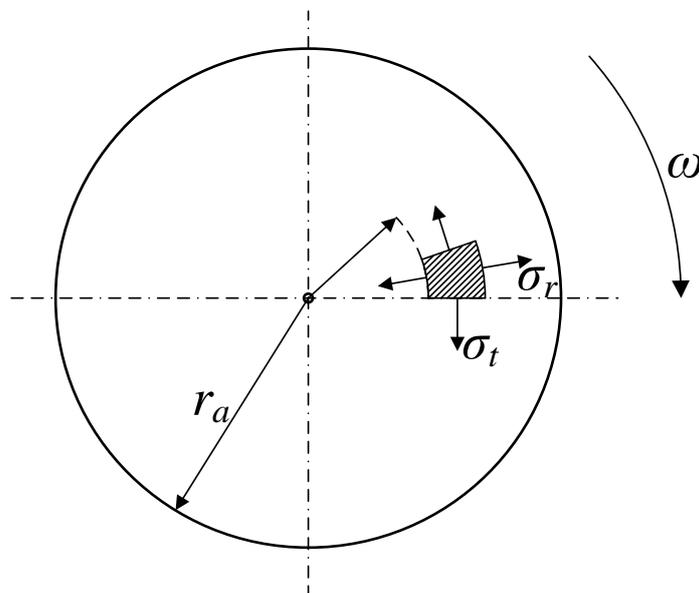


Abbildung 19 - Spannungssituation eines Scheibenrotors.

Der spezifische Energieinhalt wird wie folgt berechnet:

$$\frac{E_{max}}{m_{rotor}} = \frac{1}{4c_1} * \frac{\sigma_{yield}}{\rho} \tag{2}$$

Dabei entspricht  $E_{max}$  dem Energieinhalt,  $m_{rotor}$  der Rotormasse  $\sigma_{yield}$  der Streckgrenze und  $\rho$  der Dichte des Werkstoffes.  $C_1$  ist eine Konstante, welche von der Poisson'schen Zahl  $\nu$  abhängt:

$$c_1 = \frac{3 + \nu}{8} \tag{3}$$

Dies besitzt Gültigkeit für einfache Vollscheiben, wobei Schwungradrotoren in der Regel komplexe Geometrien aufweisen. Daher wird der Formfaktor  $K_{shape}$  eingeführt, welcher zwischen 0.3 und 1 liegt, woraus sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$\frac{E_{max}}{m_{rotor}} = K_{shape} * \frac{\sigma_{yield}}{\rho} \tag{4}$$

Im Vergleich zum Vollzylinder reduziert sich der maximale Energieinhalt bei Hohlzylindern um etwa den Faktor zwei. Dennoch bleibt der grundlegende Zusammenhang der maximalen Energiedichte als Funktion von  $\sigma/\rho$  erhalten. Tabelle 7 gibt einen Überblick über unterschiedliche Rotormaterialien und sich daraus ergebende theoretische Energiedichten.

Tabelle 7 – Rotormaterial und daraus resultierende Energiedichten

Material	Zugfestigkeit $\sigma_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	Dichte $\rho$ Kg/dm <sup>3</sup>	Spezifische Energie $\sigma_{max}/\rho$ Wh/kg
Mild Steel	340	7,8	12,1
Standard Electrical Sheet	400	8	13,9
Alloy Special Steel (42CrMo4)	1100	7,8	36,6
Birchwood	137	0,65	58,5
Aluminum ("Ergal 65")	600	2,72	61,3
Titanium ("ZK 60")	1150	5,1	62,6
High Strength Steel (AlSi 4340)	1790	7,83	63,5
Metal Matrix Composite	1450	3,3	122
FRP (E-Glass/EP 60 %)	960	2,2	132
Kevlar ("Aramid 49EP" / 60 %)	1120	1,33	234
CF ("M60J")	2010	1,5	372
CF ("T1000G")	3040	1,5	563

Wie in Tabelle 7 gezeigt ist, ermöglichen Faserverbundwerkstoffe die höchsten Energiedichten aufgrund ihrer überlegenen Zugfestigkeit und der Tatsache, dass die Fasern in Richtung der maximalen Belastung ausgerichtet werden können. Allerdings sind die Verarbeitungsverfahren aufwendig und die Lebensdauerabschätzung komplex (S.J. DeTeresa, S.E. Groves, 2001), wodurch sich hohe Kosten ergeben. Zusätzlich reduziert sich durch Alterungsprozesse die maximale Energiedichte infolge von Festigkeitseinbußen des Matrixmaterials auf unter 50% in einem Zeitraum von mehreren Jahren (J.

Koyanagi, 2011). Solche Verbundrotoren werden typischerweise im Rennsport eingesetzt (D. Cross and C. Brockbank, 2008), wo die spezifische Energiedichte und Leistung wichtiger sind als die Kosten. Diese Ausführung widerspricht einem konsequenten low-cost Ansatz für stationäre, dezentrale Energiespeicher für PV-Anlagen. Stahl ist bezüglich dessen Eigenschaften und Verarbeitung sehr gut beherrscht und auch eine genaue Lebensdauerberechnung ist Stand der Technik. Simulationen haben gezeigt, dass ein Energieinhalt von 5 kWh für ein Einfamilienhaus ausreicht. Als Material für den Rotor wurde der Vergütungsstahl 42CrMo4 (1.7225) gewählt, da die Materialkosten, Bearbeitbarkeit und Festigkeit in einem günstigen Verhältnis zueinander stehen. Durch die Duktilität des Stahles ist die Detektion von Unwuchtkräften durch Plastifizieren vor dem Berstfall infolge zu hoher Zentripetalkraft möglich. Nach Formel (2) hängt der maximale Energieinhalt des Rotors nur von dessen Materialeigenschaften und der Geometrie ab. Folglich kann bei gegebenem Material und gefordertem Energieinhalt auf jene Geometrie mit dem geringsten Materialbedarf rückgerechnet werden. Daraus folgt eine optimale Ausnützung des Werkstoffes. Abbildung 20 zeigt, dass bei gegebenem Energieinhalt die Rotormasse (strichlierte Linie) unabhängig von dessen Durchmesser zu Länge Verhältnis ( $d/l$ ) und Drehzahl ist.

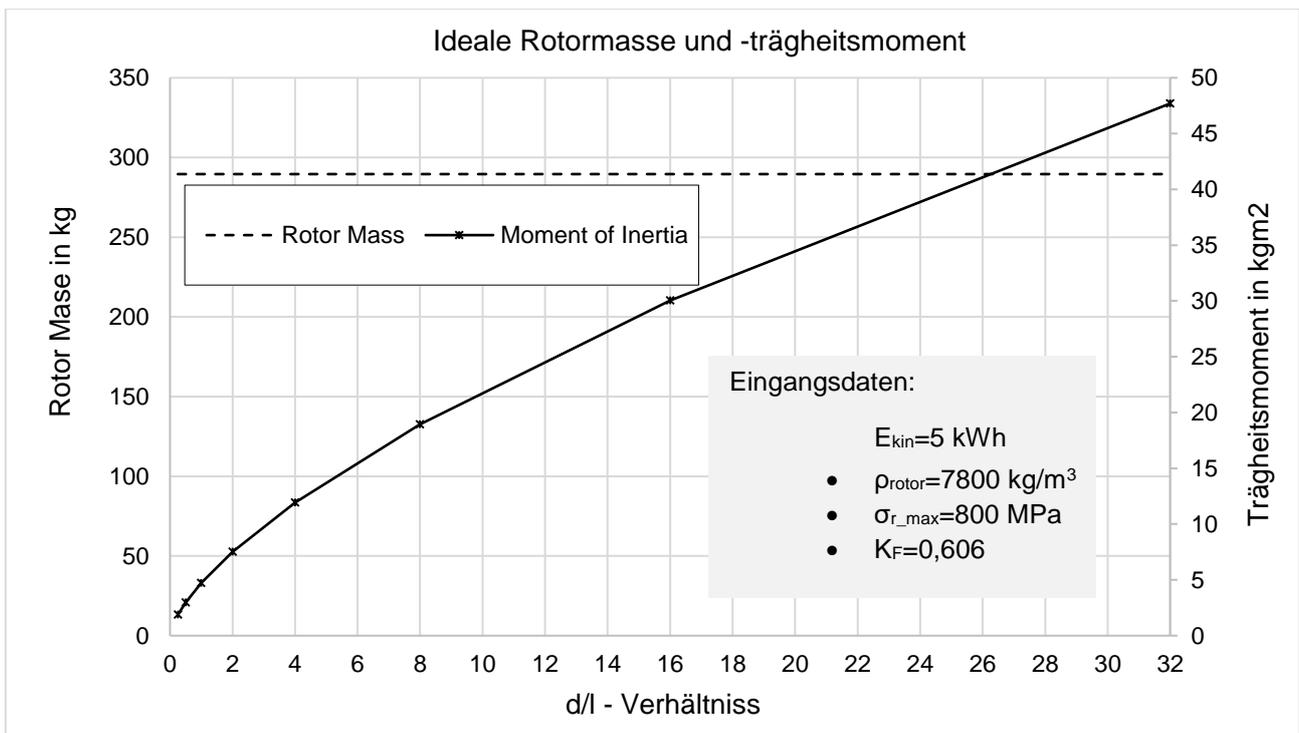


Abbildung 20 - Ideales Massenträgheitsmoment und Masse eines FESS-Rotors

Nach der Bestimmung der Rotormasse in Hinblick auf optimale Materialausnutzung (in diesem Fall 300 kg) können Durchmesser und in weiterer Folge die Drehzahl berechnet werden. Abbildung 21 zeigt die Rotordrehzahl bei einer Variation des  $d/l$ -Verhältnisses bei einem konstanten Energieinhalt von 5 kWh. Außerdem ist der Zusammenhang zwischen Durchmesser und Drehzahl aufgetragen. Infolge des erhöhten Massenträgheitsmomentes liegt die erforderliche Drehzahl bei einem Scheibenläufer deutlich unter jener eines Walzenförmigen.

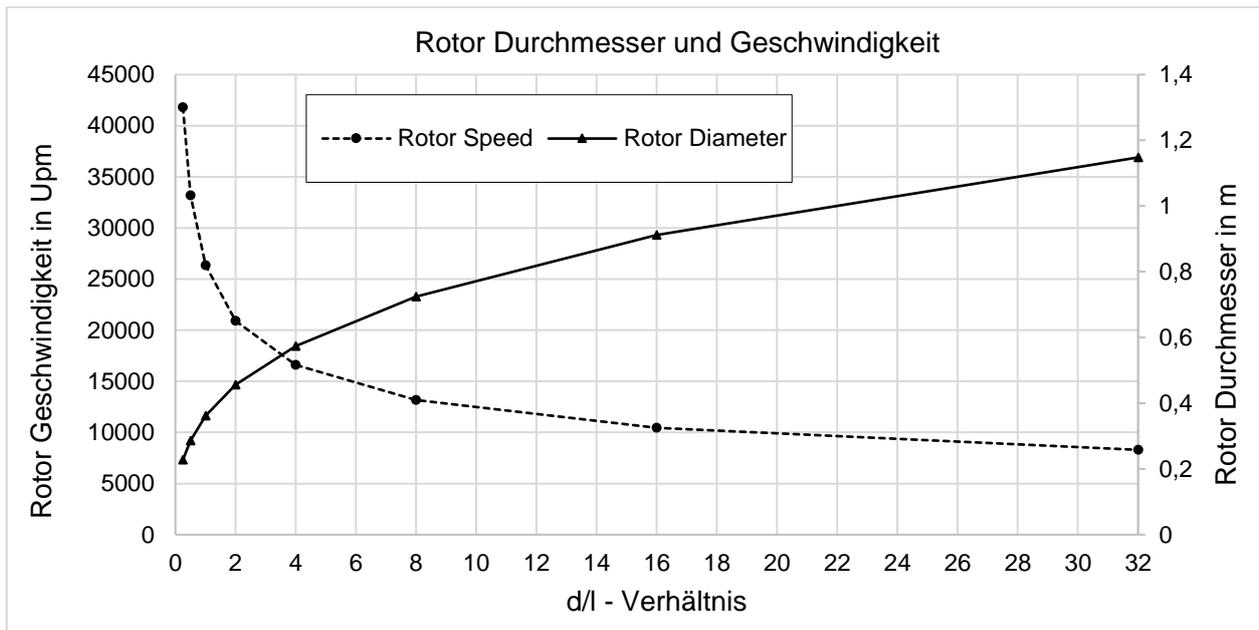


Abbildung 21 - Optimale Rotordrehzahl und Durchmesser für einen Scheibenläufer.

Somit wurde als optimierte Rotorgeometrie ein Durchmesser von 400 mm und 300 mm Höhe ermittelt. Allerdings gilt zu berücksichtigen, dass die Festigkeit eines Materials mit zunehmender Bauteilgröße signifikant abnimmt, wie Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8 - Mechanische Eigenschaften von 42CrMo4 (Breslavsky, 2016)

Nominelle Bautaildicke (mm)	bis 8	8 - 20	20 - 60	60 - 100	100- 160	160-250
<b>R<sub>m</sub> Zugfestigkeit (MPa)</b>	900	750	650	550-500	460-500	390

Daher wurde das Konzept des Rotors aus einzelnen 8 mm dicken Scheiben aufgebaut, welche mittels Laser zuzuschneiden sind. Zur Sicherstellung einer Sicherheit gegen Bersten wurde von einer Zugfestigkeit von 800 N/mm<sup>2</sup> ausgegangen. Die einzelnen Elemente sind durch die beiden äußersten Scheiben aus Chrom-Vanadium Warmarbeitsstahl (1.2343) verspannt, welche auch die Lagerung enthalten, wie Abbildung 22 zeigt.

Zusätzlich zur gesteigerten maximalen Energiedichte weist der Blechstapelaufbau Vorteile in Sicherheitsaspekten auf. Im Berstfall brechen massive, isotrope Rotoren in zwei bis drei große Bruchstücke mit hohem kinetischen Energieinhalt (von Burg, 1996). Dünne Scheiben hingegen bersten in eine große Anzahl an Fragmenten, wobei ein Teil der Energie in Reibung verloren geht. Das umgebende Berstschutzgehäuse erfährt dann in guter Näherung eine gleichmäßige Druckbelastung anstelle weniger massiver Einschläge. Dieses Konzept wurde bereits in einem früheren Forschungsprojekt durch Berstversuche validiert, wie Abbildung 23 zeigt.

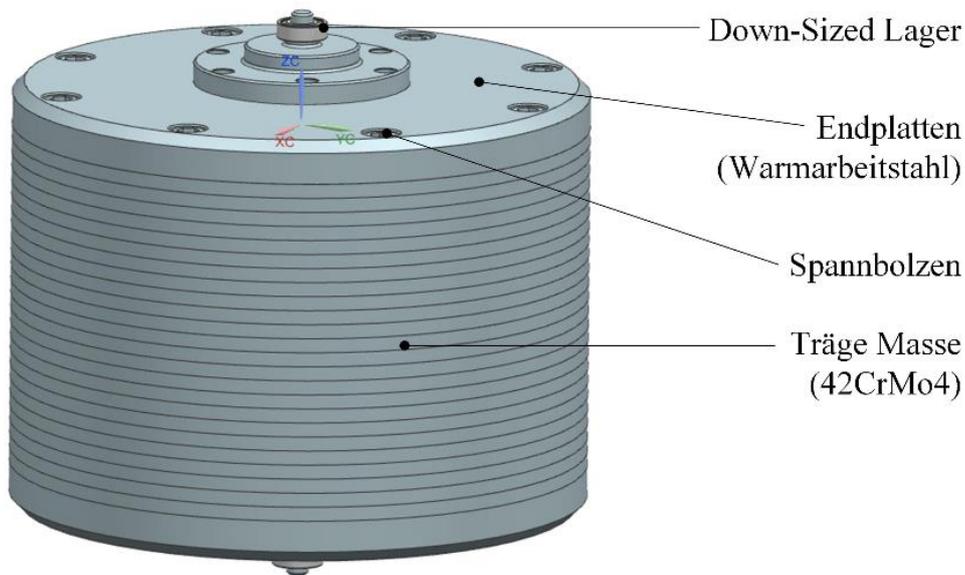


Abbildung 22 - 3D-Ansicht des Rotors in Blechstapelbauweise

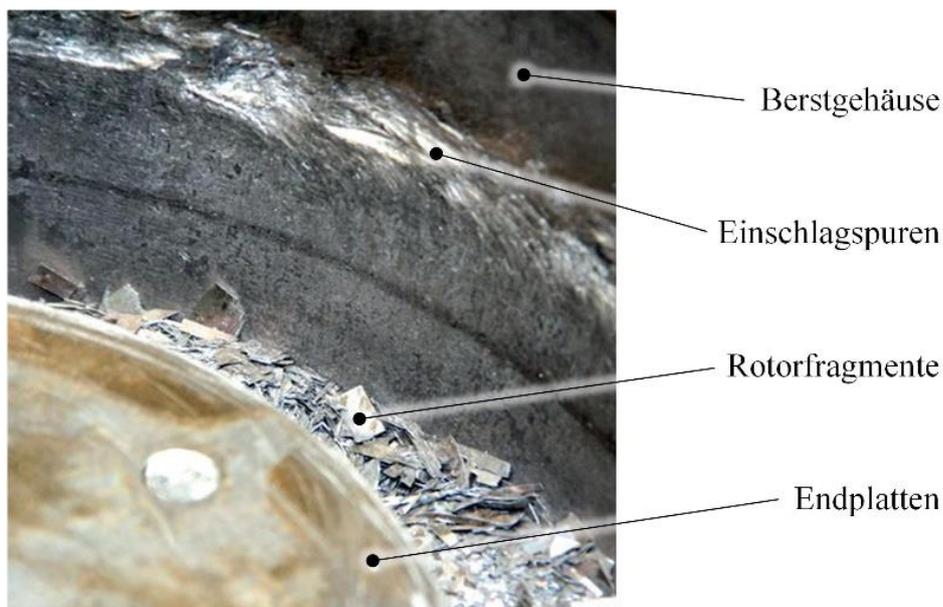


Abbildung 23 – Rotorbruchstücke nach Berstversuch eines Rotors aus Blechstapelbauweise

## 6.4 Verwendung von Standardkomponenten

Schwungradspeicher werden aktuell in geringen Stückzahlen produziert, wodurch die Komponentenkosten hoch ausfallen. Daher liegt der Ansatz um die Kosten zu senken in der Verwendung von preiswerten, in Massenproduktion hergestellten, Standardkomponenten. Als Motor/Generator kommt eine high-speed Frässpindel für CNC-Maschinen zum Einsatz. Dieser Asynchronmotor ist in unterschiedlichen Ausführungen zwischen 0,5 bis über 5,0 kW Antriebsleistung erhältlich. Der Drehzahlbereich liegt zwischen 10.000 und 42.000 Upm, welcher für die Zielanwendung ausreicht. Da keine Permanentmagnete verwendet werden sind die Leerlaufverluste gering, was eine Grundanforderung für FESS-Anwendungen darstellt.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 24 – Low-cost Standardkomponenten. Links: Huanyang Motor-Generator Modell GDZ-80-2.2 A (Huanyang Electrical Co. Ltd., 2016). Rechts: Mucoła einstufige Vakuumpumpe (Mucoła GmbH, 2016).

Passende Frequenzumrichter werden meist mit den entsprechenden Motoren angeboten. Da die meisten Umrichter Anschlüsse für Bremswiderstände aufweisen, sind diese auch zur Energierückgewinnung geeignet. Mit einer einstufigen Drehschieber-Vakuumpumpe wurden bei Tests an der TU Graz ausreichend geringe Drücke für die Anwendung im LCSS System erreicht. Einen Überblick über alle verwendeten Standardkomponenten gibt Tabelle 9.

Tabelle 9 – Standardkomponenten für das LCSS System

Komponente	Hersteller/ Type	Einzelhandelspreis in €	Abschätzung Serienfertigung <sup>a</sup> in €
Motor/Generator	GDZ-80-2.2 A	125	80
Vakuumsensor	Varian 531	100	40
Frequenzumrichter	Huanyang 2,2	105	60
Vakuumpumpe	Mucoła 50/120	60	30
Drehzahlsensor	UniTest 2	10	5
Lager	FAG 6302	6	3
Temperaturmessung	Pt100	5	2
<b>Gesamtkosten</b>		<b>411</b>	<b>220</b>

<sup>a</sup> Auf Basis von Kostenvoranschlägen auf Alibaba.com und Aliexpress.com.

Obwohl eine Kostenabschätzung von aktiven Magnetlagern mit Unsicherheiten verbunden ist (da es sich nicht um Standardkomponenten handelt) liegt deren Preis deutlich über jenem von Standard-Wälzlagern. Verwendet werden Lager des Typs 6302 mit den Abmessungen 15x42x13 mm und einem Stückpreis von unter drei Euro (Carnell Sales, Inc., 2016).

## 6.4.1 Eigenschaften wichtiger Standardkomponenten

Die in Abbildung 24 dargestellten Komponenten wurden praktischen Messungen unterzogen um ihre Eignung für den geplanten Einsatz im LCSS zu verifizieren:

- Abhängig vom Lastpunkt wurden für E-Maschine und Umrichter „Round Trip Efficiencies“ von 80-90% ermittelt. Eine Bestimmung der Verlustleistung, welche mit einem *HAMAG 8 kW Power Meter Typ HM8115-2* durchgeführt wurde, ergab Verluste zwischen 60 und 140 W.
- Das erreichbare Druckniveau der *Mucola Vakuumpumpe* wurde durch direktes Anflanschen einer Pirani-Sonde mit einer Genauigkeit von  $0.1 \times 10^{-3}$  mbar ermittelt. Dabei konnten je nach Temperatur des Vakuümöls und Einschaltdauer der Pumpe Drücke von etwa 1-3 mbar erreicht werden.

## 6.4.2 Kostenanalyse

Die Abschätzung der Fertigungskosten für kundenspezifische Komponenten ist schwierig, da diese material- und größenabhängig sind. Im Zuge der Umsetzung skalierter Komponentenprüfstände wurden Angebote eingeholt, welche durch Skalierung eine Kostenabschätzung ermöglichen. Diese ist in Tabelle 10 angeführt.

Tabelle 10 – Spezifische Komponenten für Solar-FESS

<b>Komponente</b>	<b>Prototyp-Preis<sup>b</sup></b>	<b>Abschätzung Serienfertigung<sup>c</sup></b>
<i>Rotor</i>	3200	1100
<i>Gehäuse</i>	1500	420
<i>SmCo-Magnete</i>	1400	250
<i>Welle mit Lagersitzen</i>	500	50
<i>Wuchten des Rotors</i>	300	50
<i>Diverses</i>	40	5
<i>Befestigungsmaterial</i>		
<b>Total Cost</b>	<b>6940</b>	<b>1875</b>

<sup>b</sup> Auf Basis der Fertigungskosten der Teile der Komponentenprüfstände.

<sup>c</sup> Auf Basis von Kostenvoranschlägen und Erfahrung des IME/EMT.

Ein Großteil der Herstellungskosten entfällt auf den Rotor, wobei die Bearbeitungs- und Herstellungskosten den Hauptanteil ausmachen. Die Gesamtkosten für einen einzelnen Prototyp betragen 6940 €, wobei eine Reduktion auf 1875 € bei großen Stückzahlen realistisch erscheint. Dies entspricht Kosten zwischen 400 und 500 €/kWh, welche zwar höher sind als die in der Simulation ermittelten Grenzkosten, siehe Kapitel 3.3, allerdings unter den Preisen aktueller Batteriesysteme (800 – 1400 €/kWh) liegen (SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016).

## 6.5 Minimierung der Selbstentladung

Wie in Kapitel 4.1 erläutert, stellt die Selbstentladung einen der größten Nachteile von FESS-Systemen dar. Aktive Magnetlager (AMBs) oder Hochtemperatur-supraleitende Magnete (HTS) können die Lagerreibung minimieren, allerdings benötigen diese Systeme Versorgungsenergie, sind teuer und konstruktiv aufwendig umzusetzen. Zur Lösung dieses Problems wurde eine low-cost Wälzlagerung mit

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

minimalem Durchmesser, speziell für stationäre FESS, entwickelt. Der grundlegende Aufbau, wie er in Abbildung 25 gezeigt ist, wurde durch einen skalierten Versuchsaufbau verifiziert.

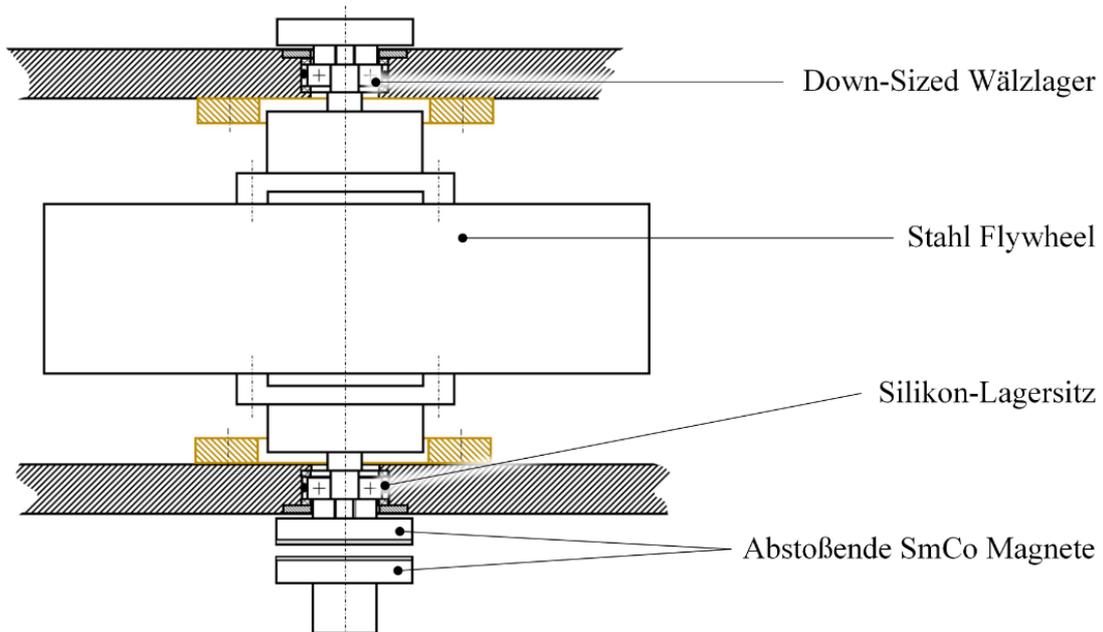


Abbildung 25 Aufbau eines low-loss, low-cost Lagerkonzeptes für FESS

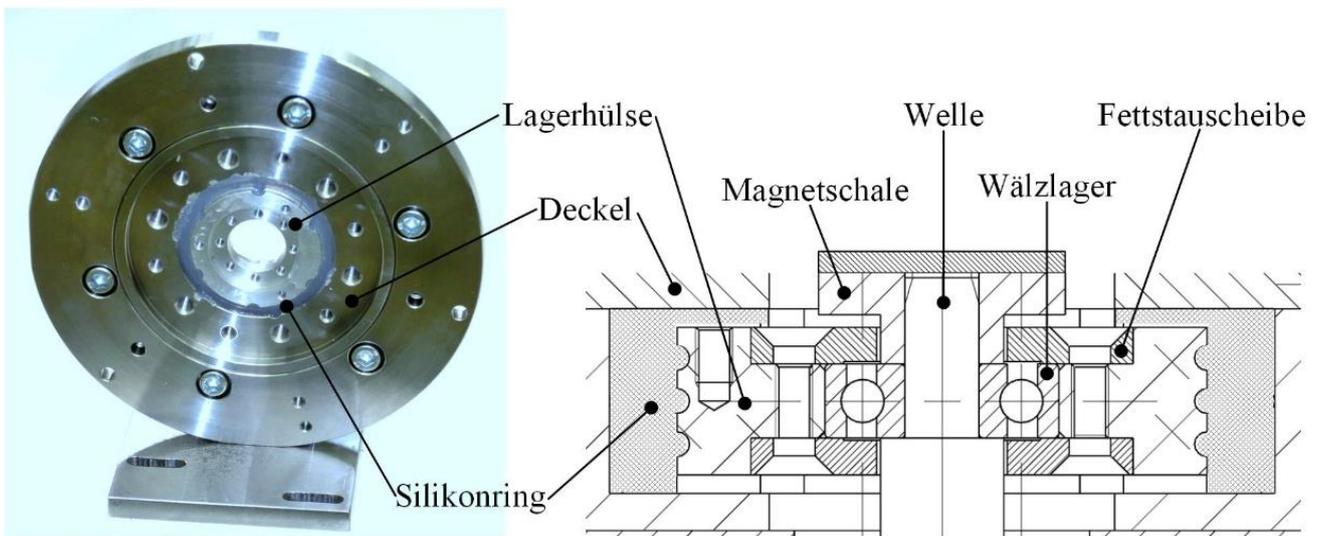


Abbildung 26: Gusssilikon-Lagersitz des LCSS-Konzeptes für verringerte Selbstentladung

Radiale Lagerlasten werden durch Unwuchtkräfte verursacht, welche durch wuchten reduziert, aber infolge von Fertigungsungenauigkeiten nicht vollständig vermieden werden können. Diese Belastungen werden durch einen nachgiebigen Lagersitz aus Gusssilikon und damit verbundenem überkritischen Betrieb reduziert. Radiale Lagerlasten wurden im Vergleich zu dessen Maximalwert während der Resonanzdurchfahrt um den Faktor 3 reduziert. Ausführlicher werden diese Ergebnisse in (P. Haidl, A. Buchroithner, M. Bader, M. Zisser, B. Schweighofer and H. Wegleiter, 2016) beschrieben.

Axiale Lagerlasten wurden nicht nur reduziert, sondern durch eine passive, magnetische Entlastung fast vollständig kompensiert. Eine Gewichtskompensation durch eine anziehende Anordnung bestehend aus

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

einem Ringmagneten und dem Stahlrotor wurde aufgrund erhöhter Wirbelstromverluste bei hohen Drehzahlen verworfen. Die Verwendung einer Anordnung zweier Magnete zur Gewichtskompensation ermöglicht eine Minimierung von Wirbelstromverlusten. Diese Option bestehend aus der anziehenden und der abstoßenden Anordnung wurde aufgrund deren inhärenter Stabilität gewählt. Viele Magnetwerkstoffe haben die Eigenschaft sich bei für das LCSS System relevanten Betriebstemperaturen gegenseitig zu entmagnetisieren. Aufgrund der fehlenden konvektiven Kühlung infolge des Vakuums steigen diese auf 60 - 80 °C.



Abbildung 27: Scheibenförmige Magnetkupplung zur Gewichtsentlastung

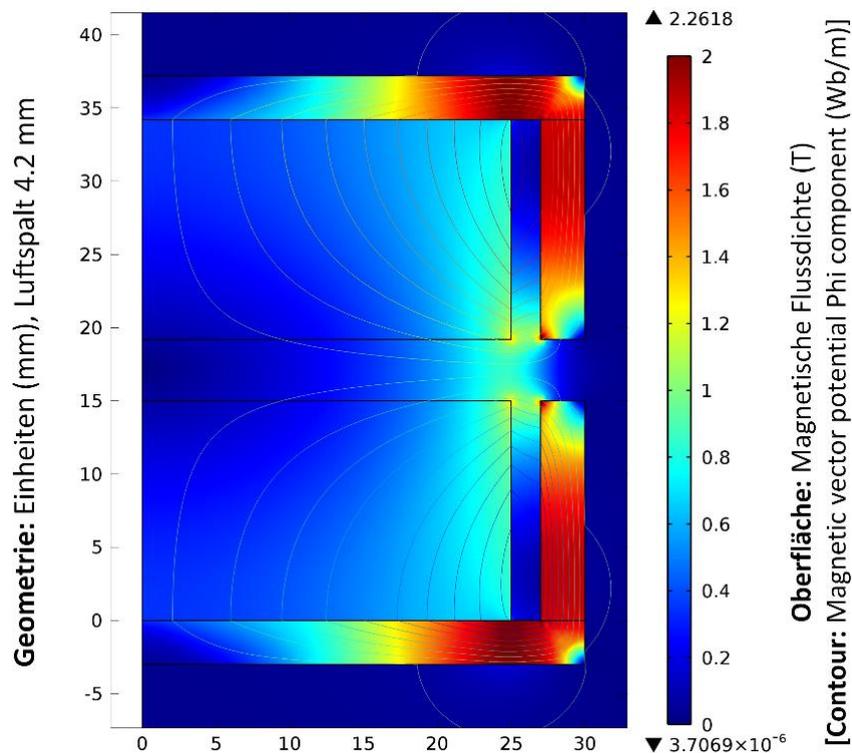


Abbildung 28 – Magnetfluss zweier abstoßender Magnete im Abstand von 4.2 mm

Gewählt wurde eine scheibenförmige Magnetkupplung aus *Samarium Cobalt* (SmCo) Magneten. Die im skalierten Versuchsaufbau verwendete Kupplung wird in Abbildung 27 gezeigt. Mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 15 mm des Magneten kann eine Entlastung um bis zu 400 N realisiert werden. Infolge des geringen Durchmessers stellen Belastungen durch Drehzahlen bis 24.000 Upm kein Festigkeitsproblem dar. Eine Simulation des magnetischen Flusses zeigt Abbildung 28.

## 6.6 Erhöhte Lebensdauer und reduzierter Lagerdurchmesser

Die oben angeführten Maßnahmen – magnetische Gewichtskompensation und nachgiebige Lageraufhängung – erlauben eine signifikante Reduktion des Lagerdurchmessers. Als Folge reduziert sich das Verlustmoment weiter. Für den im Konzept vorgesehenen 300 kg Rotor (5 kWh) sind Wälzlager mit einem Durchmesser von 15 mm ausreichend. Der skalierte Versuchsaufbau mit 30 kg Rotormasse wird durch 6 mm Lager gestützt.

Eine Hauptanforderung an Schwungradspeicher ist die hohe Lebensdauer, weshalb dem Nachweis der geforderten Lagerlebensdauer besondere Bedeutung zukommt. Der Grad an magnetischer Gewichtsentlastung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lagerlebensdauer, wie in Abbildung 29 erläutert. Der Nachweis wurde basierend auf der *modifizierten Lebensdauerberechnung* von FAG durchgeführt. Es führt die analytische Berechnung ab einer Entlastung von 92% zu einer konstanten Lebensdauer von 30.000 Stunden. In der Praxis ist eine weitere Erhöhung zu erwarten.

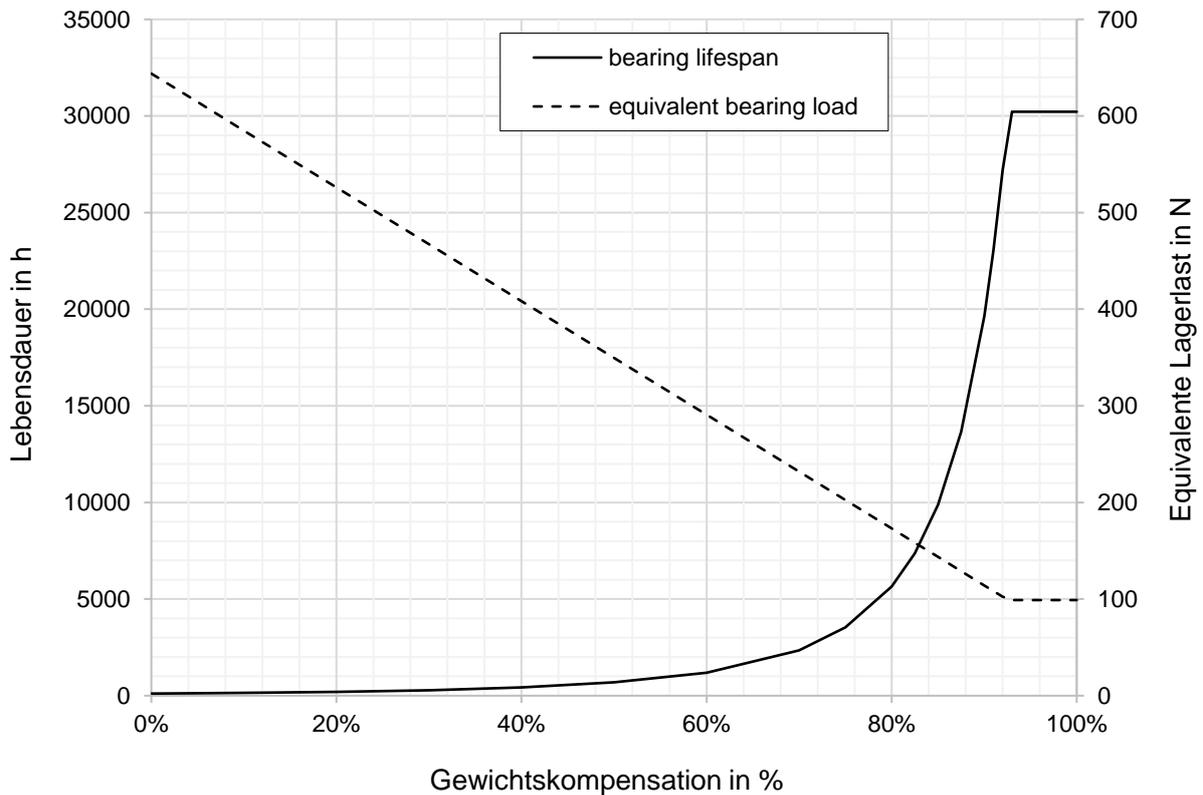


Abbildung 29 – Zusammenhang zwischen Gewichtskompensation und Lagerlebensdauer.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

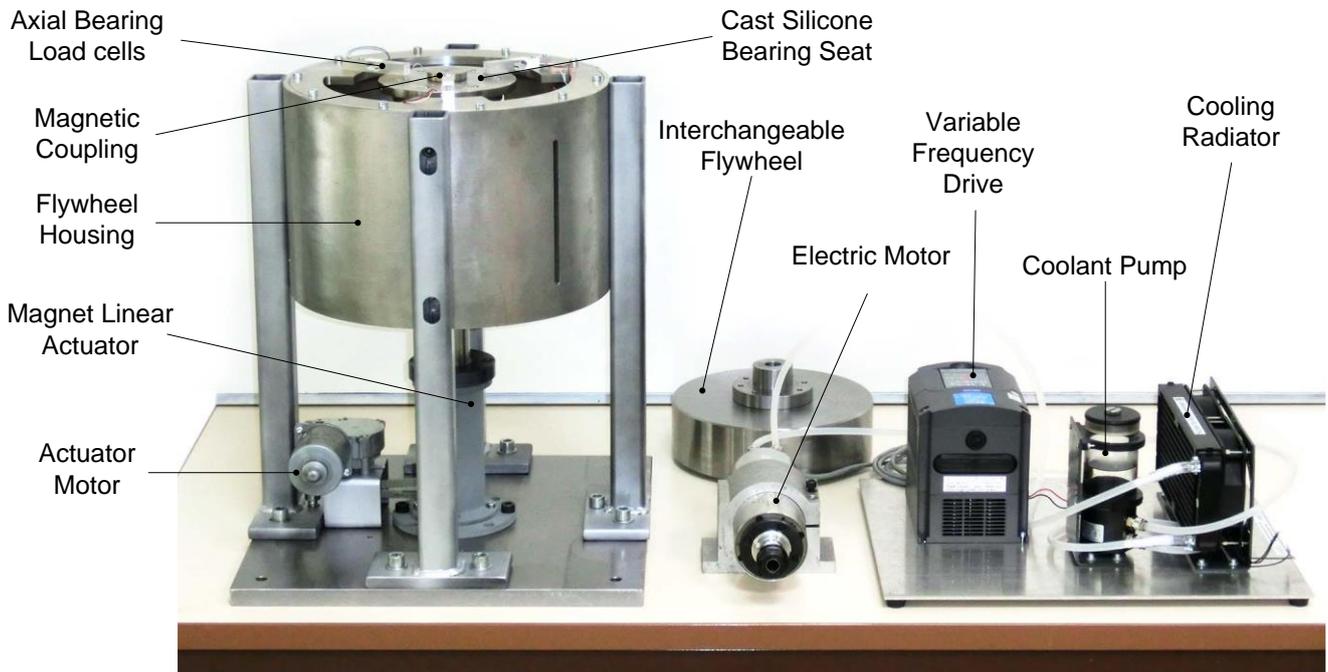


Abbildung 30 – Versuchsaufbau eines low-loss Lagerkonzepts während des Zusammenbaus

Alle zuvor genannten Messungen wurden durch einen skalierten Aufbau, wie in Abbildung 30 gezeigt, validiert. Es wurde nachgewiesen, dass das Verlustmoment durch die zuvor beschriebenen Maßnahmen um rund 50% reduziert werden kann, wie Abbildung 31 zeigt. Da die Versuche bei Umgebungsdruck durchgeführt wurden enthalten die Messungen auftretende Strömungsverluste. Des Weiteren wurde über eine Variation der Vakuumbüte ein akzeptabler Kompromiss aus Kosten für die Vakuumpumpe und deren maximalem Unterdruckbereich gefunden. Die Ergebnisse der Auslaufversuche am Lagerprüfstand unter Vakuum sind in Abbildung 32 dargestellt.

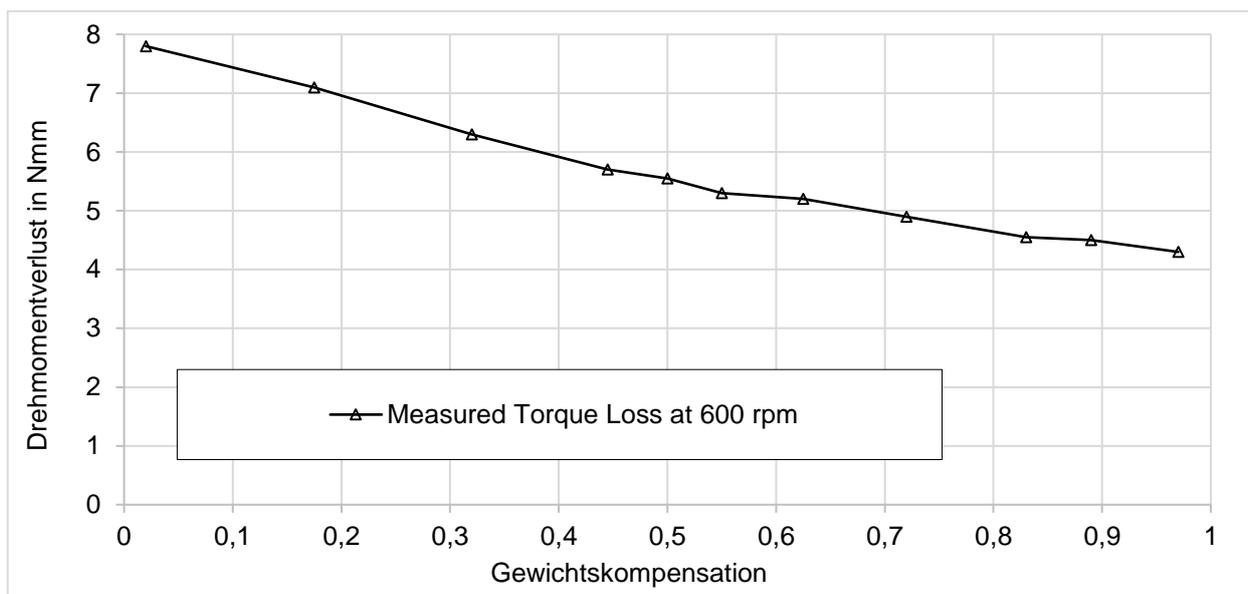


Abbildung 31 – Verlustmomentminimierung durch Gewichtskompensation eines Rotors bei 600 upm und Umgebungsdruck.

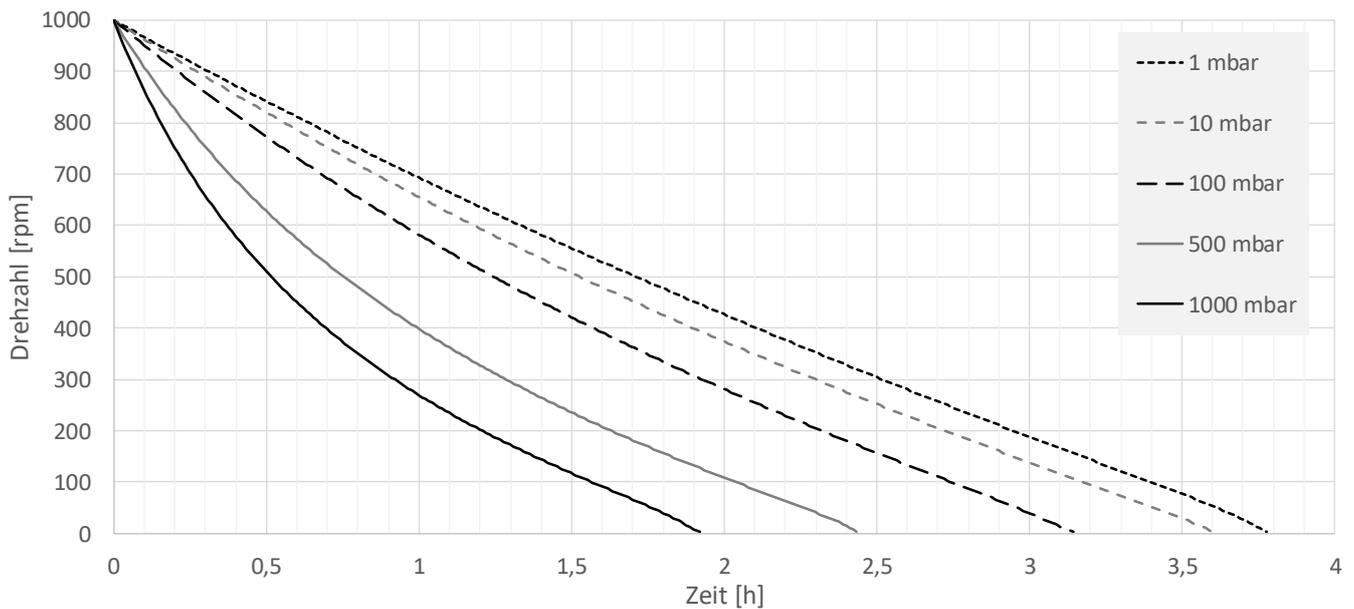


Abbildung 32: Auslaufzeit des Schwungradmodells am Vakuumprüfstand in Variation der Vakuumgüte

## 7 Performancevergleich unterschiedlicher Konzepte

### 7.1 Option 1 – Frässpindel außerhalb der Vakuumkammer

Diese Systemvariante stellt das preiswerteste Konzept dar. Der Motor ist durch eine Magnetkupplung mit dem Rotor verbunden und befindet sich außerhalb des Vakuumgehäuses. Das Konzept zeigt Abbildung 33.

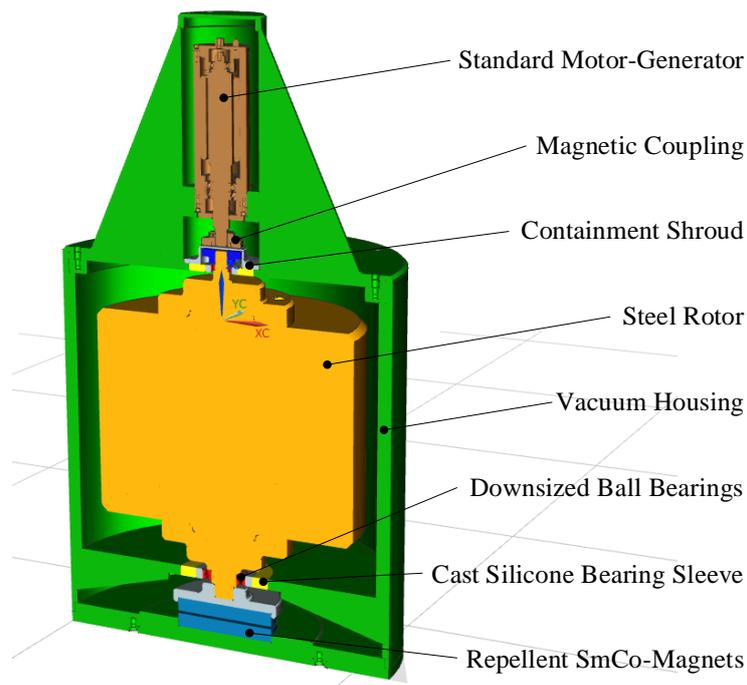


Abbildung 33- Aufbau von Option 1 – Frässpindel außerhalb der Vakuumkammer.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Bei diesem Konzept gibt es keine Probleme mit der Kühlung der Antriebseinheit, da durch den Betrieb bei Umgebungsdruck der konvektive Wärmetransport ausreicht. Allerdings weist es durch auftretende Strömungsverluste der Spindel ebenfalls die größte Selbstentladung auf. Ein Großteil der Verluste wird durch die Spindel verursacht. Zum einen handelt es sich um Strömungsverluste des Rotors, zum anderen um Reibungsverluste ihrer Lagerung. Für diese Anwendung ist die Lagerung der Spindel stark überdimensioniert, da sie für hohe Radialkräfte bei Fräsarbeiten ausgelegt wurde und nicht um minimale Reibungsverluste aufzuweisen. Die verbauten Schrägkugellager sind axial in einer back-to-back Anordnung verspannt, weshalb sich hohe Verlustmomente im Vergleich zur low-loss Konfiguration des Speichers aus Kapitel 7.2 ergeben. Alle Verluste von Option 1 sind in Abhängigkeit von der Drehzahl in Abbildung 34 aufgetragen. Die strichpunktierte Linie stellt die Verlustleistung der Frässpindel dar und setzt sich zusammen aus Lagerreibung, Strömungsverlusten und elektrischen Verlusten des Frequenzumrichters.

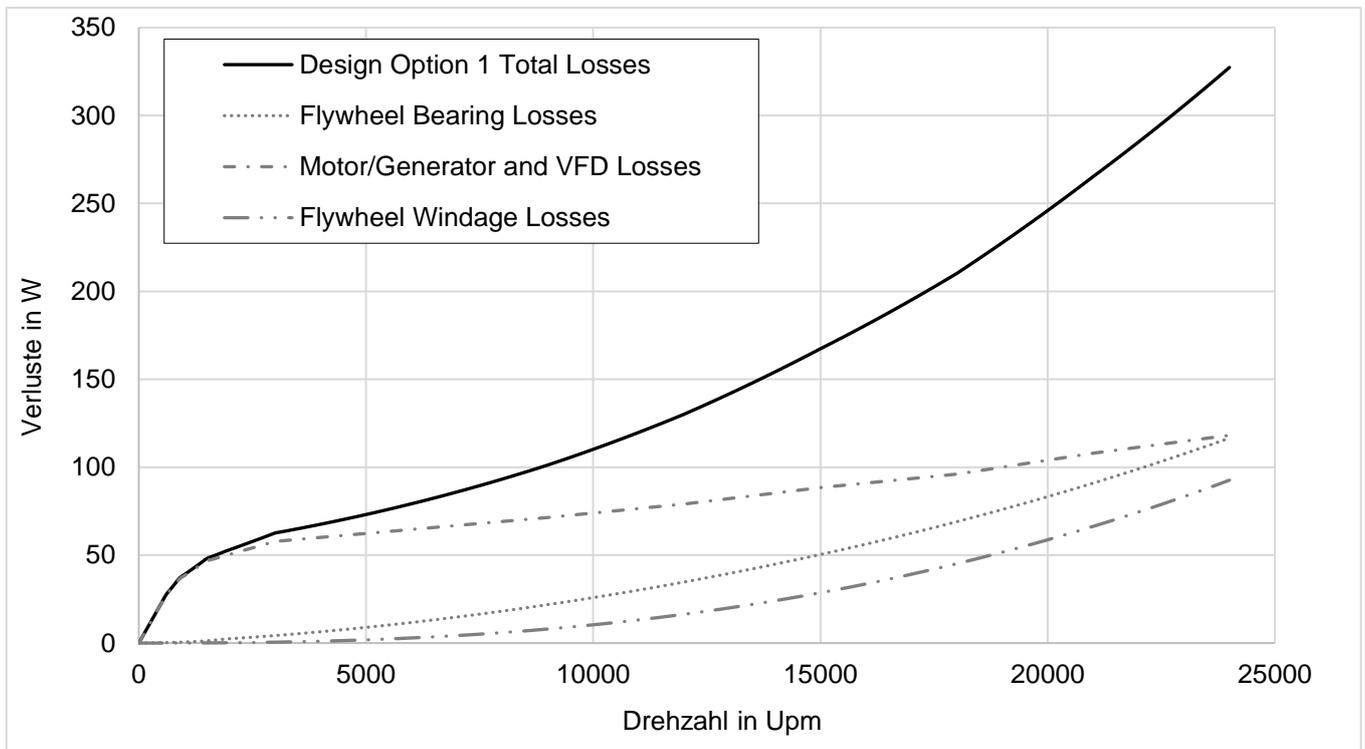


Abbildung 34 Verlustleistung von Option 1.

Wie in Abbildung 34 gezeigt ist, dominieren die Verluste der Frässpindel das Spin-down Verhalten des Speichers. Der Energieinhalt von 5 kWh würde sich binnen 30 Stunden vollständig selbst entladen. Diese Variante eignet sich für dynamische Lastkollektive, jedoch nicht für die Speicherung von Energie über Nacht, wie es für PV-Anlagen gedacht ist.

## 7.2 Option 2 – Integrierte Bauweise:

Der Ansatz die Frässpindel in die Vakuumkammer zu integrieren wurde aufgrund von thermischen Problemen nicht verfolgt. Die thermische Masse des Rotors hätte als thermische Senke und folglich als

Kühlung für die Spindel fungieren sollen. Allerdings haben Berechnungen gezeigt, dass das Wärmeleitungsvermögen der dünnen Ausgangswelle des Motors zu gering ist um die Verlustwärme der Spindel infolge elektrischer Verluste abzuführen.

Bei der Verwendung der Frässpindel würden die Lagerreibungsverluste des Antriebes immer noch das Selbstentladungsverhalten dominieren. Dieses Problem kann durch einen speziell für die Anwendung entwickelten, in Rotor und Gehäuse integrierten Antrieb umgangen werden. Der Aufbau von Option 2 wird in Abbildung 35 gezeigt. Die gesamten Verluste von *Option 2* entsprechen jenen von *Option 1* bei entkoppelter Antriebseinheit.

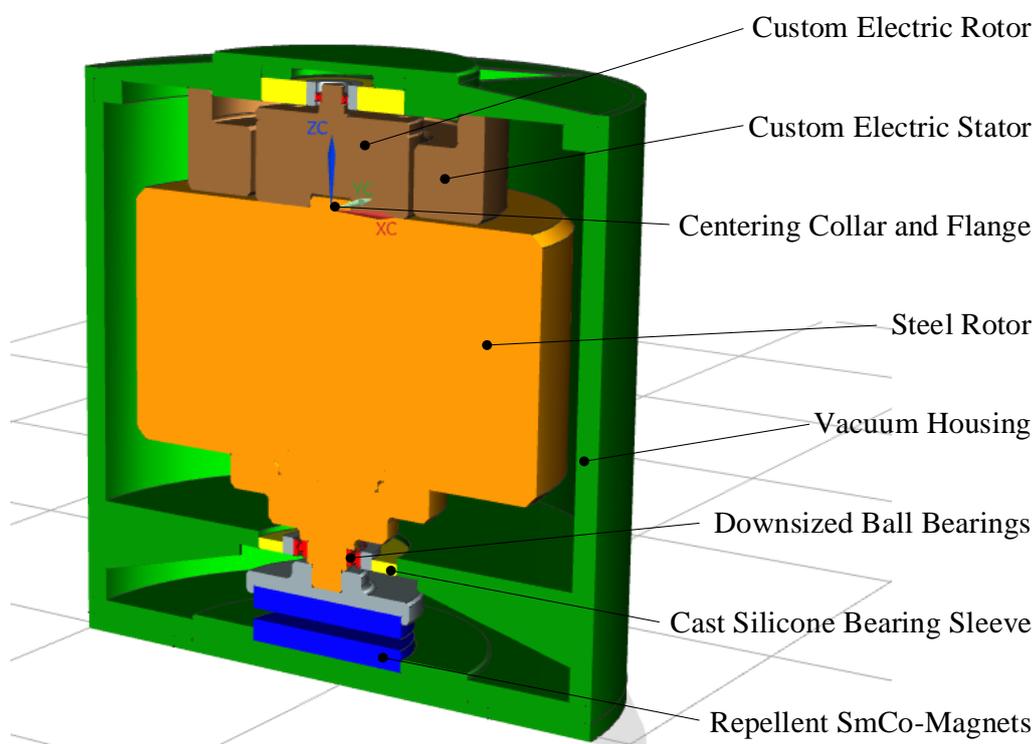


Abbildung 35: Aufbau von Option 2 – Antriebseinheit innerhalb der Vakuumkammer

## 7.3 Performance Vergleich

Obwohl *Option 2* geringere Verluste aufweist als *Option 1* müssen die Kosten für die Antriebseinheit von *Option 2* durch entsprechende Stückzahlen minimiert werden um ökonomisch interessant zu werden.

Die gemessenen Leerlaufverluste des untersuchten *Huanyang* 2,2 kW Motor-Generators sind in Abbildung 36 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese Verluste deutlich größer sind, als jene der Strömung bzw. der Low-loss Lagerung der beinahe 300 Kg schweren Schwungmasse (vergleiche Abbildung 34).

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

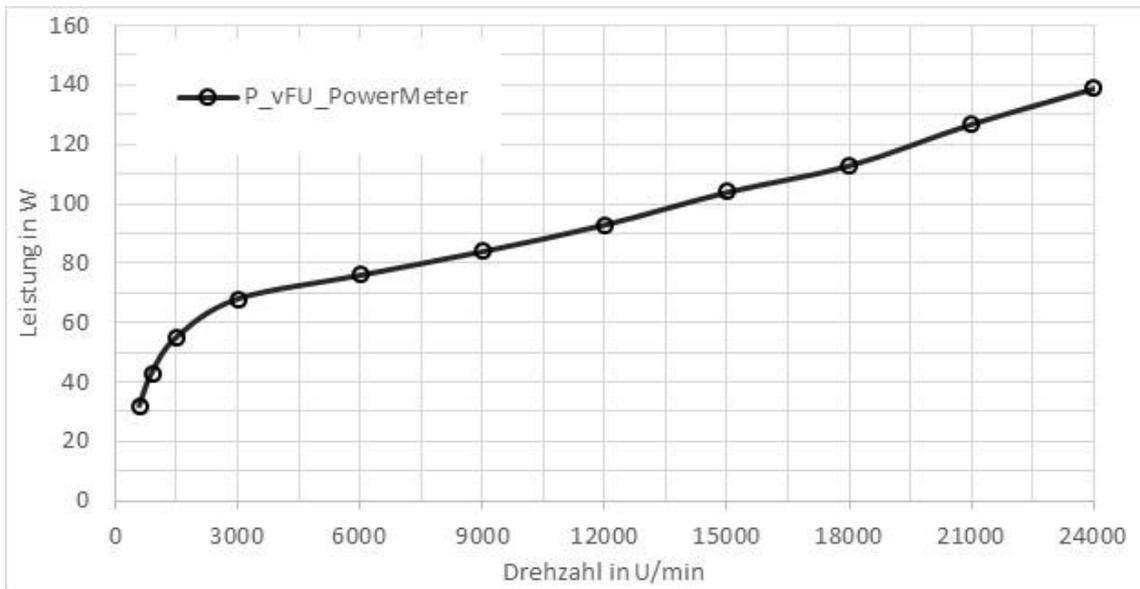


Abbildung 36: Mittels HAMAG 8 kW Power Meter Typ HM8115-2 ermittelte Leerlaufverluste der Antriebsmaschine. Für Prototypen geeignete Elektromotore (z.B. Reluktanzmotore) wurden an der TU Graz getestet und die Eignung für FESS-Anwendungen bestätigt. Der Preis liegt jedoch weit über jenem, welcher durch Massenfertigung möglich ist, da die Elektrobleche üblicherweise lasergeschnitten oder drahterodiert und die Verdrahtung der Windungen händisch durchgeführt wird. Abbildung 37 zeigt eine Gegenüberstellung der Auslaufcharakteristik von *Optionen 1* und *2*. Das analytische Berechnungsmodell, welches den Verläufen zugrunde liegt, wurde durch die Ergebnisse aus den Versuchen skalierten Modellprüfstand validiert.

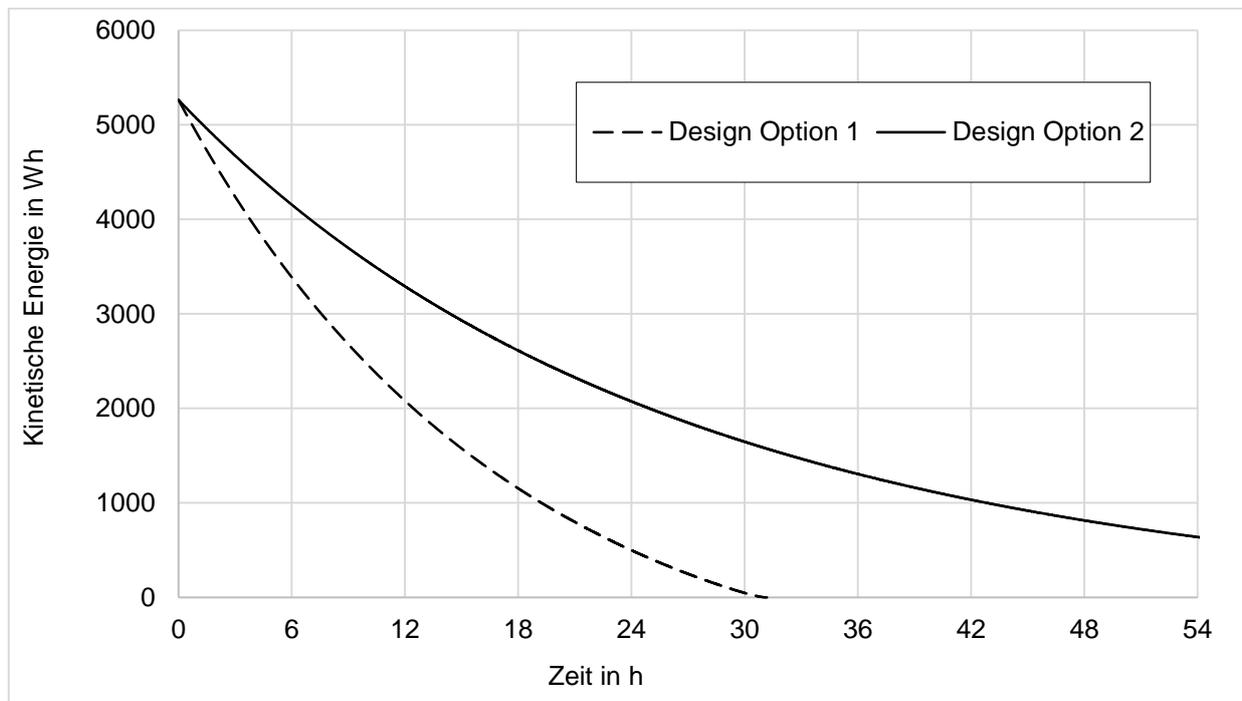


Abbildung 37: Vergleich des Auslaufverhalten der Optionen 1 und 2.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine Schwungradspeicher-Lösung zur dezentralen Speicherung von Solarstrom aus PV-Anlagen vorgestellt. Detaillierte Simulationen ausgehend von Leistungsmessungen an PV-Anlagen wurden verwendet um den optimalen Energieinhalt zu bestimmen und eine Amortisationsrechnung durchzuführen. Es wurde ermittelt, dass eine angemessene Speichergröße bei 5 kWh pro Haushalt liegt. Weiters wurde gezeigt, dass aktuelle Kosten für Speicherlösungen noch zu hoch sind um sich während ihrer Lebensdauer zu amortisieren.

Das in diesem Projekt entwickelte low-cost, low-loss Schwungradspeicher-System (LCSS) wurde als Alternative zu chemischen Batterien vorgestellt. Das System verwendet kostengünstige, in Massenfertigung hergestellte Standardkomponenten kombiniert mit einem Stahlrotor um die Kosten zu minimieren. Das low-loss Lagerkonzept basiert auf möglichst kleinen Wälzlagern in einer Silikonaufhängung mit zusätzlicher magnetischer Gewichtsentlastung des Rotors um die Lagerbelastung zu minimieren. Das Konzept wurde durch einen Versuchsaufbau mit einem skalierten Modell validiert, Messergebnisse daraus wurden ebenfalls präsentiert.

Das vorliegende Sondierungsprojekt hat gezeigt, dass eine Low-cost, Low-tech Lösung für ein stationäres Flywheel zur Tag-Nacht Speicherung von erneuerbarer Energie möglich ist. Jedoch sind für eine zukünftige Konkurrenzfähigkeit gegenüber chemischen Speichertechnologien weitere Forschungen bezüglich der kostendominierenden Komponenten notwendig.

Der Einsatz des im Projekt erarbeiteten Systementwurfs ist aus aktueller Sicht für Neuplanungen sowie für Nachrüstungen gleichermaßen geeignet. Das Anlagendesign erlaubt es, den LCSS in unterschiedlichen Anwendungsgebieten einzusetzen und auf die spezifischen Randbedingungen anzupassen. Durch die externe Anordnung der E-Maschine kann die Speicherleistung mit geringen Modifikationen problemlos variiert werden. Bezüglich des Energieinhalts ist es möglich, den Rotor und die damit zusammenhängenden Systemkomponenten auf die erforderliche Größe zu skalieren. Die Grenzen der Skalierbarkeit werden dabei durch die wirtschaftlich verfügbaren Fertigungsanlagen für den Rotor vorgegeben. Für größere Energieinhalte kann das LCSS-System multipliziert eingesetzt werden.

Eine Handlungsempfehlung für die Reduktion der Verluste, liegt in der Optimierung der Lagerung der externen Antriebsspindel. Der hierfür eingesetzte Motor aus der Großserie ist für Fräsarbeiten gedacht und weist eine großzügig dimensionierte, angestellte Lagerung auf. Um eine spielfreie, exakte Führung zu erreichen sind die Schrägkugellager axial vorgespannt, was in erhöhten Reibungsverlusten resultiert. Der Durchmesser der Lager der gewählten 2,2 kW-Spindel beträgt 30 mm, wodurch das Verlustmoment deutlich höher ist, als bei der beinahe 300 kg schweren Schwungmasse. Folgende Umbaumaßnahmen könnten die Verluste der in Abbildung 38 dargestellten Spindel deutlich verringern:

- Reduktion von 3 auf 2 Lagerstellen
- Umbau von angestellter auf schwimmende Lagerung
- Reduktion des Wälzlagerdurchmessers von 30 auf 10 mm
- Einsatz von berührungslosen Lagerdichtungen

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 38: Ausgebauter Läufer des Spindeltriebs GDZ-80-2.2 A mit Lagerstellen

Die aktuelle Konfiguration sieht die erste Eigenfrequenz der Schwungmasse bei ca. 800 Upm vor, wie das Diagramm in Abbildung 39 zeigt. Es ist jedoch ratsam noch weitere Versuche durchzuführen, um die ideale Konfiguration für geringste Verluste zu ermitteln. Dies beinhaltet eine Variation des Entlastungsmechanismus, um Wirbelstromverluste zu minimieren, sowie eine Variation der Steifigkeit des Lagersitzes um eine optimale Resonanzdurchfahrt zu ermitteln.

Beschleunigungen am Lagersitz - LCSS-Lagerkonzept (Resonanzuntersuchung)

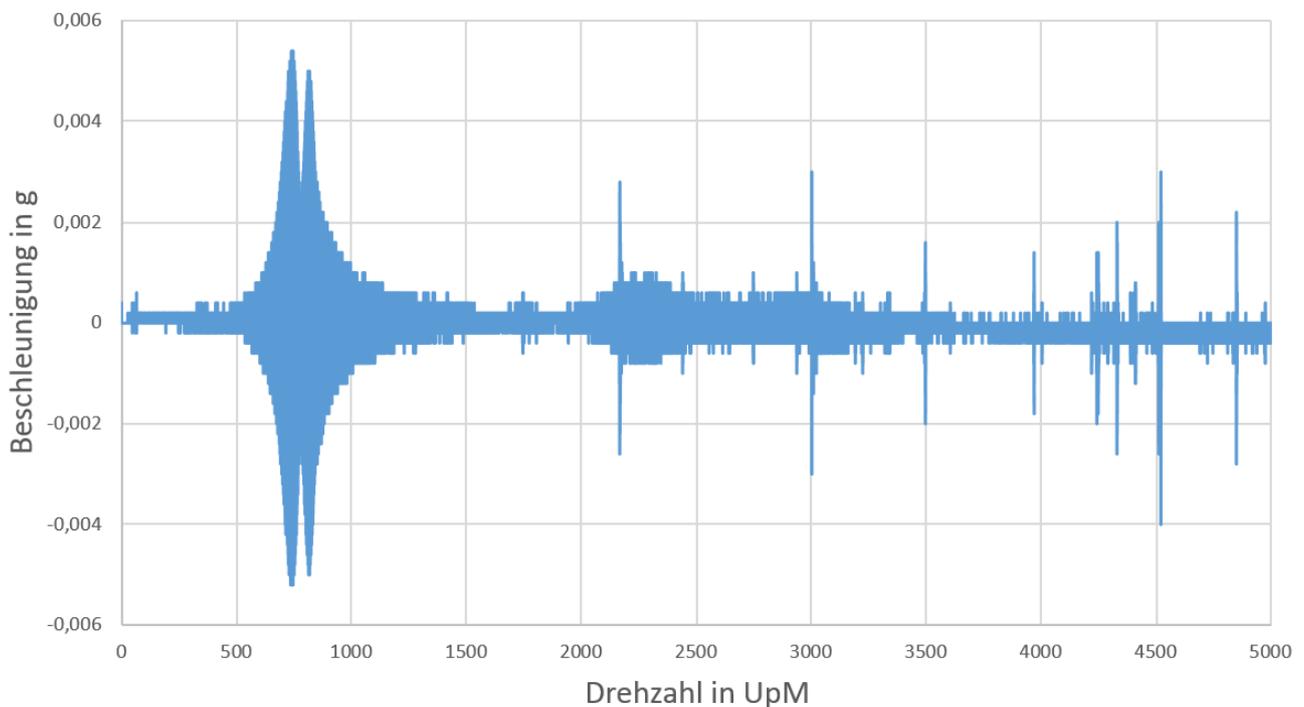


Abbildung 39: Beschleunigungswerte am Lagersitz im Drehzahlband von 0 bis 5000 Upm.

Da der prognostizierte Serienpreis des LCSS bei etwa 400 €/kWh liegt, wird festgestellt, dass das Kostenziel von 220 - 450 €/kWh erreicht werden konnte. Im Vergleich dazu liegen aktuelle Batteriespeichersysteme mit 800 – 1400 €/kWh deutlich über diesem Wert (SEC SolarEnergyConsult

Energiesysteme GmbH, 2016). Jedoch kann erwartet werden, dass sich die Preisentwicklung bei Li-Ion Speichersystemen weiter fortsetzt und Systemkosten von unter 200 €/kWh in einigen Jahren möglich sind (Patrick T. Moseley, 2014). Daher werden in der weiteren Forschungstätigkeit innovative Ansätze, z.B. mit einem flexiblen, matrixlosen Kunstfaserrotor angestrebt, um eine weitere Kostenreduktion des LCSS zu ermöglichen.

## 9 Danksagung



Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2016 durchgeführt.

## 10 Literaturverzeichnis

Carnell Sales, Inc., 2016. *The Big Bearing Store*. [Online]

Available at: <https://www.thebigbearingstore.com/6302-2rs-6302-zz-radial-ball-bearing-15x42x13/>

[Zugriff am 22 07 2016].

A. Buchroithner and M.Bader, 2014. *Hybrid vehicles, energy storage and operating strategies for modern transportation. (Hybridfahrzeuge, Energiespeicher und Betriebsstrategien in der modernen Mobilität)*, Graz, Austria: 13. Symposium Energieinnovation.

A. Buchroithner, I. Andrasec, M. Bader, 2012. *Optimal system design and ideal application of flywheel energy storage systems for vehicles*. Florence, IEEE Xplore.

Bader, M. & Buchroithner, A., 2011. *History and development trends of flywheel-powered vehicles as part of a systematic concept analysis*. Brussels, s.n.

Breslavsky, D., 2016. *European steel and alloy grades and numbers*. [Online]

Available at: [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=335](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=335)

[Zugriff am 22 07 2016].

D. Cross and C. Brockbank, 2008. *Mechanical hybrid system comprising a flywheel and CVT for motorsport & mainstream automotive applications*, s.l.: SAE International.

EUROSTAT, 2015. *Key figures on Europe (2015 edition)*, Luxembourg: European Commission.

Haidl, P. et al., 2016. *Improved test rig design for vibration control of a rotor bearing system*. Athens, Greece, s.n.

Huanyang Electrical Co. Ltd., 2016. *Product Information Model No.: HY02D223B GDZ-80-2.2/220V*, Zhejiang, China: HKTDC.com.

J. Koyanagi, 2011. Durability of filament-wound composite flywheel rotors. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(1), pp. 71-83.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

MG Solar Shop, 2016. *LG CHEM RESU 6.4 LI-IO 6.4 kWh storage batterie for SMA Sunny Island.*

[Online]

Available at: <http://www.mg-solar-shop.de/pv-battery-offgrid-systems/LG-CHEM-RESU-6-4--LI-IO-6-4-kWh-storage-batterie-for-SMA-Sunny-Island.html>

[Zugriff am 21 07 2016].

Mucola GmbH, 2016. *Vakuumpumpe Unterdruckpumpe elektrisch 50 l/min, s.l.: s.n.*

Patrick T. Moseley, 2014. *Electrochemical energy storage for renewable sources and grid balancing.* s.l.:Elsevier.

Photovoltaik4All, kein Datum *Photovoltaik Solarstrom-Speichersysteme.* [Online]

Available at: <http://www.photovoltaik4all.de/speicher/?p=1>

[Zugriff am 21 07 2016].

S.J. DeTeresa, S.E. Groves, 2001. *Properties of fiber composites for advanced flywheel energy storage devices,* Long Beach, California: Society for Advancement of Material and Process Engineering - Symposium 2001.

SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016. *Photovoltaik4all.* [Online]

Available at: <http://www.photovoltaik4all.de/speicher/?p=1>

[Zugriff am 23 06 2016].

SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016. *Photovoltaik4all.* [Online]

Available at: <http://www.photovoltaik4all.de/speicher/?p=1>

[Zugriff am 23 06 2016].

SEC SolarEnergyConsult Energiesysteme GmbH, 2016. *Photovoltaik4all.* [Online]

Available at: <http://www.photovoltaik4all.de/speicher/?p=1>

[Zugriff am 23 06 2016].

Tarryn Mento, B. R., 2015. Injuries reported in explosion at Poway Business Park. *KPBS Public Broadcasting,* Issue Thursday, June 11, 2015.

The Eastwick Press, 2011. A mishap at the Beacon Power frequency flywheel plant. 29 07.

von Burg, P., 1996. *Schnelldrehendes Schwungrad aus Faserkunststoff.* Zürich: ETH Zürich.

# Energieforschungsprogramm - 01. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

## 11 Kontaktdaten

DI Dr. Hermann Edtmayer (Projektleitung)  
4ward Energy Research GmbH  
Reininghausstrasse 13a/EG/17, 8020 Graz  
+43 664 889 29 638  
[hermann.edtmayer@4wardenergy.at](mailto:hermann.edtmayer@4wardenergy.at)  
<http://www.4wardenergy.at>

DI Armin Buchroithner  
DI Peter Haidl  
DI Dr. Habil. Michael Bader  
Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik, Technische Universität Graz  
<https://www.tugraz.at/institute/ime/home/>

DI Bernhard Schweighofer  
DI Dr. Habil. Hannes Wegleiter  
Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung, Technische Universität Graz  
<https://www.tugraz.at/institute/emt/home/>