
Schwungradspeicher in der Fahrzeugtechnik

Armin Buchroithner

Schwungradspeicher in der Fahrzeugtechnik

Armin Buchroithner
Graz University of Technology
Graz, Österreich

ISBN 978-3-658-25570-1 ISBN 978-3-658-25571-8 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25571-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Die Erstellung dieses Buchs wäre ohne die Mitarbeit der folgenden Personen nicht möglich gewesen:

- *Gunter Jürgens*, der mich bereits vor etlichen Jahren bei der Durchführung meiner Diplomarbeit auf die Wichtigkeit der systematischen Analyse bestehender Systeme hingewiesen hat und mich ermutigt hat, dieses Buch zu verfassen.
- *Michael Bader*, ohne dessen umfangreiche Unterstützung und permanente Einbringung von Know-how die Durchführung der zahlreichen empirischen Untersuchungen, welche Kern dieses Buchs darstellen, nicht möglich gewesen wäre.
- *Hannes Wegleiter* und *Bernhard Schweighofer* deren exzellente und mittlerweile jahrelange freundschaftliche Zusammenarbeit, nicht genug gewürdigt werden kann und in der Gründung der Arbeitsgruppe Energy Aware Systems resultierte.
- *Peter Haidl* der mit grenzenlosem Idealismus wertvollen Inputs bezüglich der Untersuchung von Wälzlagern im Grenzbereich des technisch Machbaren beisteuerte.
- *Andreas Brandstätter* und *Manes Recheis*, die mit Hilfe numerischer und empirischer Methoden die Kreiselkinematik von Schwungrädern besser verständlich machten.
- *Clemens Voglhuber*, der durch engagierte Mitarbeit bei der Untersuchung des Verlustmoments von Wälzlagern für Schwungradspeicher half neue Erkenntnisse zu gewinnen.
- *Christoph Birgel* und *Rupert Preßmair*, die besonderen Einsatz bei der Untersuchung von Rotoren und Sicherheitskonzepten für Schwungradspeicher zeigten.
- *Thomas Muraier* und *Martin Simonyi*, die wichtige Ergebnisse betreffend das thermische Verhalten von Wälzlagern im Vakuum beigesteuert haben.

Besonderer Dank gilt auch meiner Lebensgefährtin und einer Familie, die mir stets den Freiraum gaben mich Projekten wie diesem Fachbuch zu widmen.

Zusammenfassung

Das Speichern von Energie muss als größte technologische Herausforderung des beginnenden 21. Jahrhunderts angesehen werden und spielt eine zentrale Rolle in der Dekarbonisierung unserer Gesellschaft. Effiziente Energiespeicher sind nicht nur für den Umstieg auf erneuerbare, volatile Energiequellen unerlässlich, sondern sind auch Schlüsselement sämtlicher mobiler Anwendungen, wobei ihnen im Zusammenhang mit der nachhaltigen Mobilität eine ganz besondere Bedeutung beigemessen werden muss.

Dieses Buch behandelt das Design und die Optimierung von Schwungradenergiespeichern (Englisch: *Flywheel Energy Storage Systems*, FESS) in Fahrzeugen als Alternative zu konventionellen Lösungen wie chemische Batterien oder Kondensatoren. Eine mögliche Fahrzeugtopologie mit FESS ist in Abb. 1. exemplarisch dargestellt. Trotz der vermeintlichen Einfachheit des physikalischen Prinzips, nämlich der Speicherung von Energie in kinetischer Form, sind bis dato nur wenige erfolgreiche, serienreife Lösungen am Markt verfügbar.

Im ersten Teil des Buchs, der *Supersystem-Analyse*, werden Schwungradspeicher durch einen holistischen Ansatz im globalen Kontext bewertet. Äußere Einflüsse wie Fahrzeug, Fahrer, Betriebsstrategie und Umgebung, bis hin zu sozio-psychologische Aspekte werden im Hinblick auf ihre Wechselwirkung mit dem eigentlichen Speicher analysiert. Daraus werden nicht nur optimale Einsatzszenarien für FESS abgeleitet, sondern auch die für einen Markterfolg relevanten Entwicklungsziele definiert. Die Supersystem-Analyse stützt sich dabei auch auf eine detaillierte Untersuchung von über 50 historischen Schwungrad-Fahrzeugkonzepten, die im Zuge einer umfangreichen Literaturrecherche zur Evaluierung des Stands der Technik ermittelt wurden.

Auf Basis der im Zuge der *Supersystem-Analyse* eruierten technisch-energetischen spezifischen Zieleigenschaften von Schwungradspeichern folgt im zweiten Teil eine detaillierte Betrachtung des Subsystems von FESS. Es werden jene kritischen Komponenten innerhalb des FESS identifiziert, welche für das Erreichen dieser Wunschspezifikationen verantwortlich sind. Unter dem Gesichtspunkt maximaler Kostenreduktion werden konkrete technische Lösungen für Schlüsselkomponenten diskutiert und deren Eignung durch empirische Untersuchungen validiert. Der Fokus liegt dabei klar auf der Optimierung von

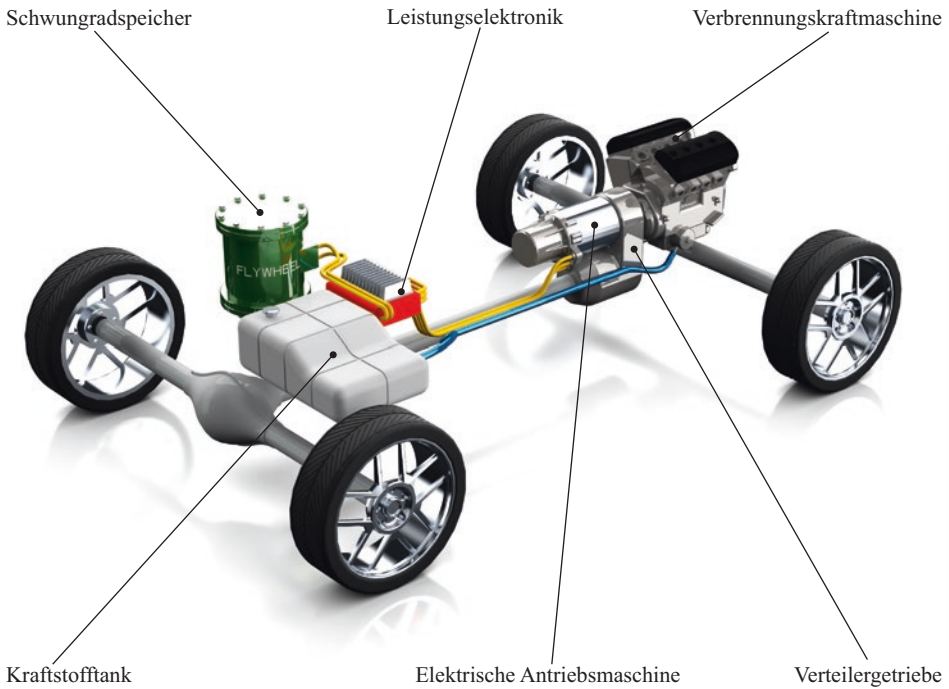


Abb. 1 Typischer Aufbau eines hybriden Antriebsstrangs mit Schwungradspeicher (FESS). Der Energiespeicher erlaubt Lastpunktverschiebung, Bremsenergieerückgewinnung und „Boosting“, z. B. bei Überholmanövern

Gehäuse, Lagerung und Rotor, wobei zu jedem der drei Baugruppen praxisrelevante Fallbeispiele anhand von Prototypen gegeben werden.

Abschließend wird ein alternatives, stationäres FESS-Konzept präsentiert, welches die spezifischen Probleme mobiler Schwungradspeicher größtenteils umgeht, aber dennoch einen Beitrag zur nachhaltigen Mobilität zu leisten vermag.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zum Aufbau des Buchs	3
1.2	Motivation für eine holistische Betrachtung des Systems Speicher-Fahrzeug-Umgebung	5
1.3	Ausgangssituation – Europa in der Energiewende	12
1.4	Die Rolle des Transportsektors	13
1.5	Die Zukunft der Mobilität	15
	Literatur	18
2	Komplexität, Bedeutung und Gesamtsystemabhängigkeit der Fahrzeugbetriebsstrategie	21
2.1	Systembetrachtung – Fahrzeug, Fahrer und Umwelt	21
2.2	<i>Subsystem</i> des Schwungradspeichers	22
2.2.1	Grundlagen kinetischer Energiespeicher	23
2.2.2	Unterscheidung nach Übertragung der gespeicherten Energie	24
2.2.3	Systemkomponenten eines FESS	32
2.3	Stand der Technik im Bereich der Schwungradspeicher	35
2.3.1	Bestehende Systeme – Stationäre Anlagen	35
2.3.2	Mobile Schwungradspeicher für Fahrzeuge	37
	Literatur	45
3	<i>Supersystem</i> eines mobilen Schwungradspeichers	49
3.1	Fahrzeug und Fahrzeugtopologie	49
3.2	Eigenschaften des Primärtriebs	51
3.3	Eigenschaften mobiler Energiespeicher	52
3.4	Geografie, Infrastruktur und Verwendungszweck des Fahrzeugs	54
3.4.1	Geografie und Infrastruktur	54
3.4.2	Verwendungszweck des Fahrzeuges	59
3.5	Fahrer und Energiepsychologie	61
	Literatur	63

4	Interaktion zwischen <i>Sub-</i> und <i>Supersystem</i> eines mobilen Schwungradspeichers	65
4.1	Beispiele der direkten Beeinflussung von <i>Super-</i> und <i>Subsystem</i> des FESS	66
4.2	Optimierung im <i>Supersystem</i>	68
4.2.1	Einfluss des Fahrzyklus auf das FESS	68
4.2.2	Energiebedarf des Fahrzeugs	70
4.2.3	Rentabilität eines FESS im Fahrzeug	74
	Literatur	78
5	Optimierung des Speichereinsatzes im <i>Supersystem</i>	79
5.1	Emotion versus Ratio – Personenkraftwagen versus Nutzfahrzeug	79
5.2	Aspekte des <i>Supersystems</i> von öffentlichem Nahverkehr und Nutzfahrzeugen	80
5.2.1	Energetische Betrachtung von Nutzfahrzeugen	81
5.2.2	Betriebsbedingungen für Hybridantriebe und Anforderungen an den Energiespeicher	85
5.3	Individualverkehr und Pkw	88
5.3.1	Aspekte des <i>Supersystems</i> Pkw	88
5.3.2	Fahrer und Psychologie	92
5.3.3	Zieleigenschaften mobiler Schwungradspeicher	95
5.4	Energetische Threshold-Spezifikationen	96
5.4.1	Bestimmung von energetischen <i>Threshold Kriterien</i> für FESS	96
5.5	Relevante Erkenntnisse der Systembetrachtung	101
5.5.1	Zusammenfassung – Optimierung des <i>Supersystems</i> eines FESS	102
5.5.2	Allgemeingültige, erstrebenswerte FESS Verbesserungen	102
	Literatur	103
6	Optimierung im <i>Subsystem</i>	107
6.1	Abweichung zwischen <i>Wunsch-</i> und <i>Ist-Eigenschaften</i>	107
6.1.1	Analyse von Kosten und Gewicht der Systemkomponenten zweier Prototypen	108
6.2	<i>Systeminterne Interdependenzen</i> – Wechselwirkungen zwischen kritischen Komponenten	112
6.2.1	Kategorisierung der Zusammenhänge	114
6.2.2	Kritische Interdependenzen im <i>Subsystem</i> des FESS	115
6.2.3	Identifikation kritischer Komponenten	117
6.3	Ergebnis: Kritische Komponenten im FESS	118
	Literatur	120
7	Rotoren für mobile Schwungradspeicher	121
7.1	Wesentliche physikalische Zusammenhänge des FESS-Rotordesigns	121
7.2	Analyse bestehender Systeme/Stand der Technik	125

7.2.1	Schwungräder aus Faserverbundkunststoffen	125
7.2.2	Schwungräder aus Stahl	137
7.3	Anforderungen abgeleitet aus <i>Supersystem-Analyse</i>	140
7.4	Lösungsansatz/Fallbeispiel: Beispiel <i>CMO-Rotor</i>	141
7.4.1	Systembeschreibung <i>Clean Motion Offensive Flywheel</i>	141
7.4.2	Das CMO-Rotorkonzept	143
7.5	Lösungsansatz/Fallbeispiel: <i>VIMS-Flywheel</i>	148
7.5.1	<i>Aufbau des VIMS-Rotors</i>	151
7.5.2	Bersttest des <i>VIMS-Rotors</i>	156
7.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse – Vollintegrierter Mehrscheibenrotor (<i>VIMS</i>)	165
	Literatur	168
8	Gehäuse	173
8.1	Anforderungen abgeleitet aus <i>Supersystem-Analyse</i>	173
8.2	Sicherheitstechnische Anforderungen an mobile Energiespeicher	176
8.3	Analyse bestehender Systeme/Stand der Technik	180
8.3.1	Beispiel: Lamellengehäuse für Faserverbundrotoren stationärer FESS.	180
8.4	Relevante Erkenntnisse aus vorhergehenden Forschungsprojekten.	181
8.4.1	Partikelkinematik	182
8.5	Konstruktive Ausführungen von Gehäusen	186
8.6	Analytische Berechnungsmethoden zur Auslegung des Berstschutzes.	188
8.6.1	Berechnung nach Lockheed Missiles Company	188
8.6.2	Berechnung nach <i>Giancarlo Genta</i>	190
8.6.3	Berechnung nach <i>NASA</i>	191
8.7	Anwendung der Berechnungsvorschriften und Gegenüberstellung der Ergebnisse	192
8.7.1	Zusammenfassung und Plädoyer für empirische Gehäuseuntersuchungen	194
8.8	Qualitative Analyse und Übersicht bisheriger Berstversuche	195
8.9	Empirische Untersuchungen von Schutzgehäusen	197
8.9.1	Kommerziell verfügbare Schleuderstände und Services	199
8.9.2	Aufbau des Berstprüfstands.	201
8.9.3	Methode und Versuchsablauf	203
8.9.4	Energiebilanz	207
8.9.5	Zusammenfassung bisheriger Ergebnisse	210
	Literatur.	213
9	Lagerung	217
9.1	Analyse bestehender Systeme und Stand der Technik.	217
9.2	Anforderungen abgeleitet aus der <i>Supersystem-Analyse</i>	218
9.2.1	Ermittlung der Lagerlasten	220

9.3	Gyroskopische Reaktionskräfte in Schwungradspeichern	221
9.3.1	Das <i>Supersystem</i> der Lagerung – Analyse der Umgebungsparameter	221
9.3.2	Einfluss FESS-spezifischer Betriebsbedingungen auf die Lagerung	222
9.4	Komplexität und Bedeutung der FESS-Lagerauslegung	225
9.5	Bestimmung gyroskopischer Lagerlasten	226
9.5.1	Schritt 1: Analytische Abschätzung	226
9.5.2	Schritt 2: Numerische Simulation	229
9.5.3	Schritt 3: Empirische Verifikation	236
9.5.4	Conclusio bezüglich gyroskopischer FESS-Lagerlasten	239
9.6	Unwuchtkräfte in Schwungradspeichern	241
9.6.1	Wuchten und Wuchtmöglichkeiten am Fallbeispiel <i>VIMS</i> -Rotor	243
9.7	Nachgiebige Lagersitze für Wälzlager in FESS	257
9.7.1	Fallbeispiel <i>CMO</i> -Lagerung	257
9.7.2	Untersuchung alternativer Lagersitzkonzepte – Praxisbeispiel <i>LESS</i>	260
9.8	Thermische Eigenschaften der Lagerung	266
9.8.1	Prüfstand zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern	267
	Literatur	270
10	Stationäre FESS für die moderne Mobilität	273
10.1	Verringerung des Verlustmoments von FESS-Lagern	274
10.1.1	Lagerkonzepte für stationäre Schwungradspeicher	274
10.2	Lasten und Reibungsverluste in Wälzlagern für FESS-Anwendungen	275
10.2.1	Lagerlasten von stationären Schwungradspeichern	276
10.2.2	Analytische Bestimmung des Verlustmoments	276
10.3	Lagerlastreduktion bei Schwungradspeichern mit Wälzlagern	278
10.3.1	Reduktion der Axiallasten	278
10.4	Reduktion der Radiallasten	285
10.4.1	Lagersitz aus Guss silikon	285
10.5	<i>FlyGrid</i> – Schwungradspeicher für EV-Schnelladestationen und Netzintegration	291
10.5.1	Entwicklungen in der Elektromobilität	292
10.5.2	Ziele des <i>FlyGrid</i> Projektes	292
10.5.3	Kernelement Schwungradspeicher	293
	Literatur	295
11	Zusammenfassung und Ausblick	297

Abkürzungen

<i>ASM</i>	Asynchronmaschine
<i>ATTB</i>	Advanced Technology Transit Bus
<i>CFK</i>	Carbon Fiber Komposite
<i>CMO</i>	Clean Motion Offensive
<i>CVT</i>	Continuously Variable Transmission
<i>E3oN</i>	Effizienter elektrischer Energiespeicher für den öffentlichen Nahverkehr
<i>EMT</i>	Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung
<i>EV</i>	Electric Vehicle
<i>FESS</i>	Flywheel Energy Storage System
<i>FFG</i>	(Österreichische) Forschungsförderungsgesellschaft
<i>FTP</i>	Federal Test Procedure
<i>GRM</i>	Geschaltete Reluktanzmaschine
<i>IME</i>	Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik
<i>KERS</i>	Kinetic Energy Recovery System
<i>LESS</i>	Lebensdauererhöhung von Schwungrad-Speichersystemen
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle
<i>Nfz</i>	Nutzfahrzeug
<i>Pkw</i>	Personenkraftwagen
<i>PMS</i>	Permanenterregte Synchronmaschine
<i>PTO</i>	Power Take-Off (Zapfwelle)
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>Ref.</i>	Referenz (Literaturquelle)
<i>SynRM</i>	Synchrone Reluktanzmaschine
<i>TUG</i>	Technische Universität Graz
<i>USV</i>	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
<i>VIMS</i>	Vollintegrierter Mehr-Scheiben Aufbau
<i>VKM</i>	Verbrennungskraftmaschine
<i>WLTP</i>	Worldwide Harmonized Test Procedure

Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
c_W	Spezifischer Luftwiderstandsbeiwert	–
E	Elastizitätsmodul	N/m^2
E_k	Kinetische Energie	Joule
E_p	Potentielle Energie	Joule
F_a	Axialkraft	N
F_{Bed}	Bedarfskraft	N
F_{Luft}	Luftwiderstand des Fahrzeuges	N
f_R	Rollreibungskoeffizient	–
F_r	Radialkraft	N
F_{Rad}	Rollwiderstand des Rads	N
F_{Steig}	Steigungswiderstand des Fahrzeuges	N
g	Gravitationskonstante	m/s^2
G	Wuchtgüteklasse	Mm/s
G_b	Wärmeleitwert	W/K
H	Drehimpuls	$kg \cdot m^2/s$
ΔH	Höhendifferenz	m
h_0	Ausgangshöhe	m
i	Übersetzung eines Getriebes	–
I	Trägheitsmoment	$kg \cdot m^2$
K_{dyn}	Dynamikkennzahl eins Fahrzyklus	–
K_{Shape}	Formfaktor des Schwungrades	–
L	Länge	m
m	Masse	kg
m^*	Verallgemeinerte Masse	kg
M_K	Gyroskopisches Moment	Nm
M_R	Verlustmoment eines Wälzlagers	Nm
n_{zul}	Maximale Grenzdrehzahl	UpM
P	Äquivalente Lagerlast	kN
r	Radius (allgemein)	m
R	Äußerer Radius	m
$R_{0,2}$	Streckgrenze	N/mm^2

Symbol	Bezeichnung	Einheit
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
s^*	Schlupf des Rads	–
u	Unwuchtmasse	g
U	Unwucht	g·mm
v	Geschwindigkeit	m/s
v_0	Ausgangsgeschwindigkeit	m/s
w	Auslenkung	m
W_{Bed}	Bedarfsenergie	Joule
$W_{Rück}$	Rückgewinnbare Energie	Joule
x	Weg	m
α	Rotation um die Y-Achse des Fahrzeugs (Nicken)	rad
α_s	Steigungswinkel	°
β	Rotation um die Y-Achse des Fahrzeugs (Nicken)	rad
γ	Rotation um die Z-Achse des Fahrzeugs (Gieren)	rad
γ_k	Winkel um die Rotationsachse des FESS	rad
λ	Drehmassenfaktor	–
λ_j	Eigenwert der transzendenten Gleichung	–
$\lambda_w, \lambda_{Steg}$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit	W/m·K
μ	Querkontraktionszahl	–
$\mu(x)$	Massenbelegung	Kg/m ²
ρ_L	Luftdichte	kg/m ³
σ_{max}	Maximalspannung	N/mm ²
σ_r	Radialspannung	N/mm ²
σ_t	Tangentialspannung	N/mm ²
Φ_{ish}	Korrekturfaktor Schmierfilmdicke	–
Φ_{rs}	Einflussfaktor Schmiermittelverdrängung	–
ω_j	Eigenkreisfrequenz	Hz