

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 Fahrzeugsbetriebsstrategie	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 FEES	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 Primäranstriebs	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</i> des <i>VIMS</i> -Rotors	151
7.5.2	Bersttest des <i>VIMS</i> -Rotors	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