

# Power System Hardware in the Loop (PSHIL) Netzintegrationstests – Netzstabilität und - flexibilisierung mittels Schwungradspeicher

Christopher GRADWOHL <sup>1</sup>, Thomas KIENBERGER

Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Energieverbundtechnik,  
christopher.gradwohl@unileoben.ac.at, +43 3842 402 5418

## **Kurzfassung:**

Die gegenwärtige Antriebswende von fossil betriebenen Personenkraftfahrzeugen hinzu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), und der zeitgleich vermehrte Einsatz von volatilen erneuerbaren Energieerzeugern, stellt das vorhandene Energiesystem – insbesondere das Mittel- und Niederspannungsnetz – vor Herausforderungen in Bezug auf Versorgungssicherheit und Netzqualität. Eine Abhilfe zur Reduktion von Netzbelastungen durch zeitgleiche Energieeinspeisungen und BEV-Ladevorgängen, stellen dezentrale Energiespeicher dar, die unter anderem auf elektrochemischen oder mechanischen Energieumwandlungsprozessen beruhen. Aus diesem Hintergrund heraus wurde im Forschungsproject „FlyGrid“ ein Schwungradspeicher entwickelt, der bei vorhandener Ladeinfrastruktur als netzstützende Maßnahme dient. In der vorgelegten Arbeit wird eine Methode zur Systemvalidierung des Schwungradspeichers auf seine netzbezogene Eignung als flexibles Energiespeichersystem vorgestellt. Die Methode der Systemvalidierung beruht dabei auf einem sogenannten „Power System Hardware in the Loop“ Ansatz, der ein Einbinden des Schwungradspeichersystems – inklusive aller Steuer- und Leistungsanschlüsse – in eine elektrische Laborinfrastruktur erlaubt. Darüber hinaus werden Betriebscharakteristika des Systems bei vorgegebenen zeitaufgelösten Ladenutzerverhalten vorgestellt und Handlungsempfehlungen für die tatsächliche Einsatzumgebung abgegeben.

**Keywords:** Schwungradspeichersystem, Lastspitzenglättung, Netzentlastung, Flexibilität, Power System Hardware in the Loop, Elektromobilität

## **1 Einleitung**

Aufgrund der Tatsache, dass mehr als ein Viertel aller Treibhausgasemissionen der Europäischen Union dem Verkehrssektor geschuldet sind, ist es unerlässlich ein Hauptaugenmerk der Klimaneutralität EU 2050 „European Green Deal“ auf die verkehrsbedingten Emissionen zu richten [1]. Diese verkehrsbedingten Emissionen werden neben dem Schiffs- und Luftverkehr vor allem durch den Straßenverkehr verursacht, einschließlich Personenkraftwagen (60 %), schwere Lastkraftwagen und Busse (27 %) und leichte Nutzfahrzeuge (11 %). Folglich wird – unter anderem – durch eine verstärkte

---

<sup>1</sup> Jungautor

Elektrifizierung des Verkehrssektors große Hoffnung in der Reduktion verkehrsbedingter Emissionen gesehen [2]. Während die Elektrifizierung spezifischer Fahrzeugklassen eindeutig zur Klimaneutralität des Verkehrssektors beiträgt, wird sie das bestehende Stromsystem mit erhöhten Energie- und vor allem Strombedarf konfrontieren. Unter anderem stellt der vermehrte Einsatz von Ladeinfrastrukturen – insbesondere für batterieelektrische Fahrzeuge mit hoher Ladeleistung – lokale Versorgungsnetze vor Kapazitätsgrenzen [3]. Eine Abhilfe über einen verstärkten Netzausbau gilt es in diesem Zusammenhang zu reduzieren, da dieser als kostenintensiv gilt. Vor diesem Hintergrund verdeutlichen die Autoren aus [4] das Einbinden von mechanischen Schwungradspeichersystemen an bestehende Ladeinfrastrukturen für ausgewählte Elektromobilitätsanwendungen, wie zum Beispiel das Hochleistungsladen von BEVs an Autobahnschnellladern, von E-Bussen oder last-mile Delivery Fahrzeugen als vielversprechende Möglichkeit einer flexiblen Netzentlastung. In Hinblick darauf wurde im Forschungsprojekt „FlyGrid“ [5] ein Schwungradspeichersystem entwickelt, das als zyklenfester Energiespeicher einem teuren Netzausbau bei hochzyklisch auftretenden hohen Ladeleistungen entgegen wirken kann. In der vorgelegten Arbeit wird eine Methode zur Systemvalidierung des Schwungradspeichers auf seine netzbezogene Eignung als flexibles Energiespeichersystem vorgestellt. Die Methode zur Systemvalidierung beruht dabei auf einem sogenannten „Power System Hardware in the Loop“ Ansatz, der ein Einbinden des Schwungradspeichersystems – inklusive aller Steuer- und Leistungsanschlüsse – in eine elektrische Laborinfrastruktur erlaubt.

## 1.1 Projekt FlyGrid und Struktur dieser Arbeit

Im Projekt "FlyGrid" [5] soll ein leistungsfähiges Schwungradenergiespeichersystem (Flywheel Energy Storage System, FESS) wie aus Abbildung 1 ersichtlich in (Schnell-)Ladestationen integriert werden.

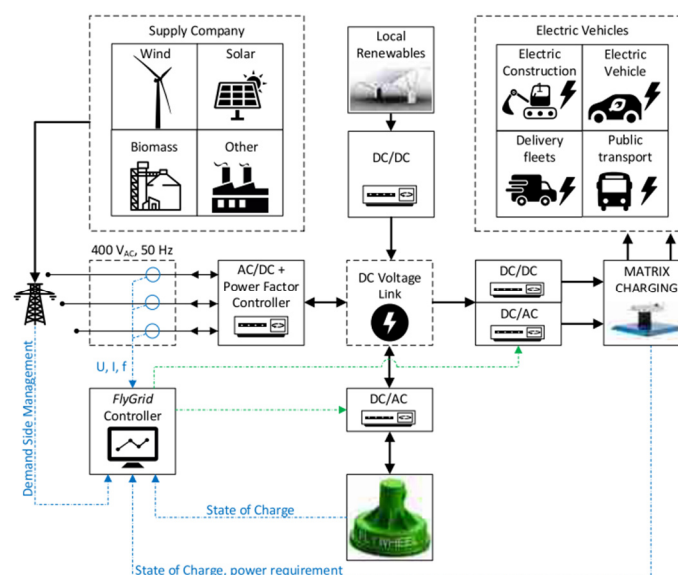


Abbildung 1: Schematische Darstellung FlyGrid System [6]

Im Wesentlichen besteht das System aus einem Schwungrad mit einer rotierenden Masse (Rotor), die mit einer Synchron-Reluktanzmaschine verbunden ist und als Motor/Generator agiert. Die Systemsteuerung erfolgt über einen Wechselrichter der an einen

Gleichspannungszwischenkreis gekoppelt ist, wobei ein Rückspeisen in ein elektrisches Netz oder direkt in das Elektrofahrzeug durch die jeweilige Leistungselektronik ermöglicht wird. Dementsprechend kann die Ladestation sowohl Wechsel- als auch Gleichstrom liefern. Dadurch kann auch auf der Niederspannungsebene eine hohe Ladeleistung erreicht und gleichzeitig das Stromnetz stabilisiert werden. Im Hinblick auf die kurzzeitige Versorgung von Elektrofahrzeugen mit hoher Ladeleistung bietet das Schwungrad im Vergleich zu Batteriespeichersystemen einige Vorteile: Hohe Lebenszykluszahl, hohe Leistungsdichte, schnelle Zugriffszeit, geringer Wartungsaufwand, geringe Umweltbelastung und die voneinander unabhängige Auslegung von Leistung und Energieinhalt. Als Nachteile stehen dem vergleichsweise hohe Standby-Verluste gegenüber, was eine stark zyklische Anwendung dieser Technologie bedingt [3, 4].

Aus diesen Charakteristika wurden für die Implementierung eines FESS wichtige Lade-Nutzerverhalten und Ladeleistungen unter Techno-ökonomischen Gesichtspunkten identifiziert und zeitaufgelöst modelliert, um ein optimales Last-Lademanagement durch Reduzierung der netzseitigen Spitzenleistungen zu bewerkstelligen [4]. Eine Übersicht aller wesentlichen Lade-Nutzerverhalten ist in Tabelle 1 angeführt – für FESS-Systeme geeignete Nutzergruppen sind entsprechend (grau) markiert:

*Tabelle 1: Elektrofahrzeug Lade-Nutzerverhalten und Ladeleistung aus dem Projekt „FlyGrid“*

	<b>Lade-Nutzerverhalten</b>	<b>Ladeleistung (kVA)</b>
1	Laden an öffentlichen Parkplätzen	3.7 – 44.0
2	E-Carsharing	3.7 – 100.0
3	Schnellladen an Autobahnen	50.0 – 350.0
4	Öffentliches Laden in Shopping Center	3.7 – 100.0
5	Elektrifizierte Busse	100.0 – 600.0
6	Elektrifizierte Taxis	3.7 – 100.0
7	Elektrifizierte Last-Mile Zustellfahrzeuge	100.0 – 350.0

Die Autoren aus [3] resümieren, dass das technische und wirtschaftliche Optimum von Schwungradspeichern wesentlich von den Lade-Nutzerverhalten, der Ladeleistung und dem Netzanschlusspunkt der Ladeinfrastruktur abhängt. Daraus geht unter anderem hervor, dass ein Techno-ökonomischer Betrieb von Schwungradspeichern bei hoher Entladeleistung und hohen Ladezyklen mit geringer Energiemenge gegeben ist – wie es bei den markierten Nutzergruppen der Fall ist.

Aus diesem Hintergrund kann angemerkt werden, dass für einen Großteil geeigneter Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen, Schwungradspeichersysteme mit einer Ladeleistung von 100 kVA und einer Speicherkapazität von 5 kWh herangezogen werden können [4]. Infolgedessen wurde im Forschungsprojekt „FlyGrid“ ein FESS mit einer Speicherkapazität von 5 kWh – in einer ersten Ausbaustufe für den Probetrieb 1 kWh – und einer Lade- und

Entladeleistung von 100 kVA für Ladestationen entwickelt – eine detaillierte Beschreibung der Auslegung führen die Autoren in [6] an.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit eine Methodik zur Systemvalidierung des Schwungradspeichers auf seine netzbezogene Eignung als flexibles Energiespeichersystem (Abschnitt 2) vorgestellt. Die Ergebnisse der wesentlichen Anwendungsfälle zusammengefasst (Abschnitt 3) und abschließend die wichtigsten Schlussfolgerungen (Abschnitt 4) aus den bisherigen Projekterkenntnissen gezogen und ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen gegeben.

## 2 Methode

Eine wesentliche Herausforderung in gegenwärtigen Technologieentwicklungsprojekten wird im Erreichen von höheren technologischen Reifegraden (Technology Readiness Level, TRL) als dem Entwicklungsstatus „Proof of Concept“ (TRL 3) und dem Betrieb im realen Betriebsumfeld (TRL 6-7) gesehen. Für eine optimale Integration von Technologien in das vorhandene Energiesystem werden umfassende Validierungs- und Demonstrationsstrategien in tatsächlichen Einsatzumfeldern gefordert, wobei Systemtests im realen Einsatzgebiet in frühen Entwicklungsphasen meist mit erheblichen Kosten verbunden sind [7].

Eine Strategie zur Anwendung und Unterstützung der Implementierungsphase wird in Abschnitt 2.1 vorgestellt. Die zur Validierung erforderlichen zeitaufgelösten Lade- und Entladeleistungsvorgaben werden dabei aus den im Projekt „FlyGrid“ entwickelten realen Ladeprofilen abgeleitet und in Abschnitt 2.2 beschrieben.

### 2.1 Methodischer Ansatz Systemvalidierung

Ein vielversprechender Ansatz zur Validierungs- und Demonstrationsstrategie in tatsächlichen Einsatzumfeldern beruht dabei auf der sogenannten „Power System Hardware in the Loop“ (PSHIL) Methode, die ein Einbinden des FESS – inklusive aller Steuer- und Leistungsanschlüsse – in eine elektrische Laborinfrastruktur erlaubt. PSHIL Tests kombinieren die Vorteile von numerischen Simulationen – wie in etwa der entwickelten Lade-Nutzerverhalten und Ladeleistungen – und Hardwaretests durch einen tatsächlichen physischen Energieaustausch, womit ein fortschrittliches Testen und Validieren von Energiesystemen mit tatsächlichen Komponenten bzw. Geräten unter wahren Umgebungsbedingungen ermöglicht wird [8].

Ein wesentlicher Vorteil wird in der Erprobung von extremen Betriebsbedingungen unter minimalen Kosten und Risiken für das zu testende System gesehen, wobei unter anderem Probleme frühzeitig aufgezeigt werden, und somit ein tiefgründiges Systemverständnis aufgebaut wird [9]. Die Strategie zur Systemvalidierung wird dabei im entwickelten PSHIL-Labor – NEFI\_Lab:InToPublic [10] umgesetzt und soll den Technologieentwicklungsfortschritt des gegenständlichen Schwungradspeichers beschleunigen.

Für die Validierungs- und Demonstrationsstrategie im Projekt „FlyGrid“ wurde das FESS – inklusive aller Steuer- Regel- und Leistungsanschlüsse – in eine elektrische Laborinfrastruktur integriert. Der Systemaufbau ist aus Abbildung 2 ersichtlich, wobei die Laborinfrastruktur mit einer Testkapazität von 100kVA auf Niederspannungsebene inklusive der physikalischen Input- und Output-Schnittstellen, einen realen Netzanschlusspunkt des

FESS und der Ladesäulen repräsentiert. Die Emulation – das physikalische Nachbilden von modellierten Signalen – der Ladesäulen, erlaubt somit das Validieren des FESS unter modellierten zeitaufgelösten Ladeprofilen (siehe Abschnitt 2.2). Ein kollektiver Vorteil der PSHIL-Testmethode besteht in der Anwendung von einem zentralen Informations- und Kommunikationssystem, das alle vorhandenen Mess- und Informationsschnittstellen der jeweiligen Akteure zusammenführt. In Kombination mit umfangreichem Messequipment für Leistungsanalysen an den jeweiligen Schnittstellen – Netzanschluss, Lade- und Entladeleistung Schwungradspeicher, Ladeleistung Ladesäule – wird somit eine holistische Systemüberwachung, -steuerung und -analyse ermöglicht. Zur Steuerung und Datenakquise des Systems wurde LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) von National Instruments eingesetzt. Somit kann eine Kommunikation der emulierten Ladesäule und dem FESS realisiert werden, um per Drehmomentregelung die geforderte Leistung an das Netz abzugeben oder zu beziehen. Die anschließende Datenauswertung erfolgt per Matlab (Matrix Laboratory) der Firma MathWorks.

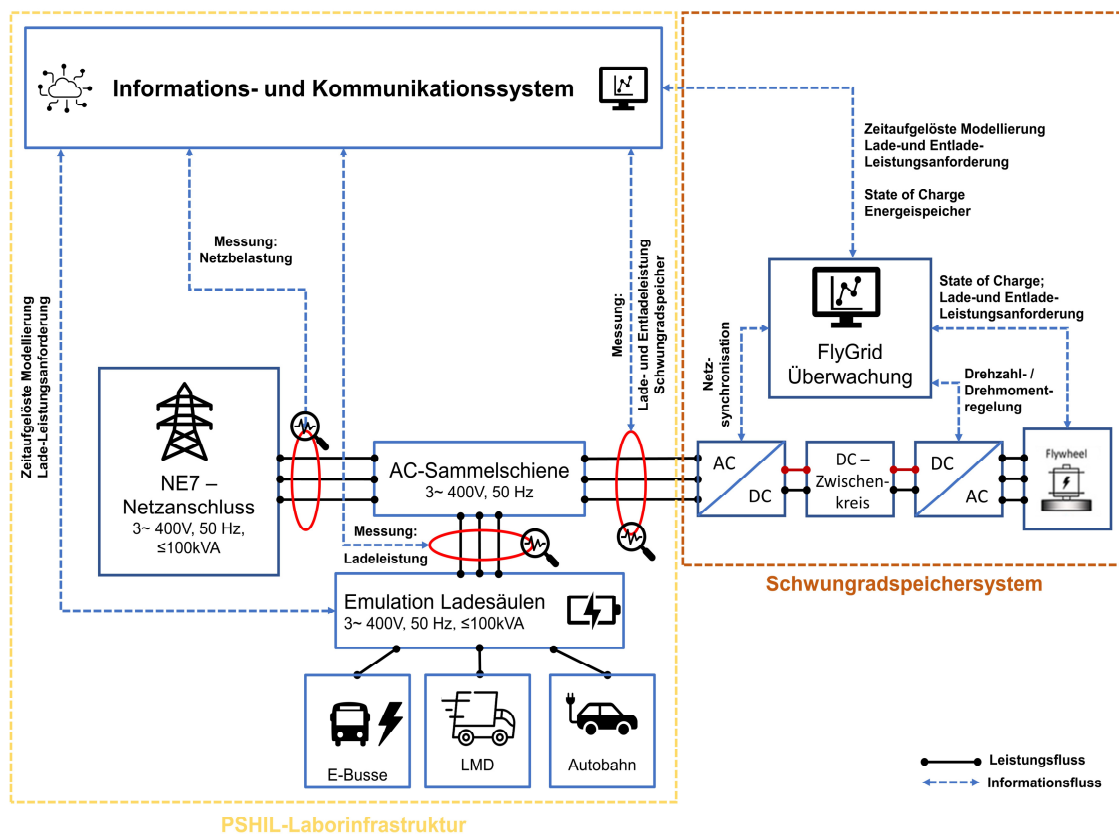


Abbildung 2: PSHIL-Aufbau Validierung Schwungradspeichersystem

Folgende Aspekte sollen durch die Anwendung der PSHIL-Testmethode untersucht werden:

- Systemvalidierung des Schwungradspeichers unter realen Betriebsbedingungen bei vorgegebenen zeitaufgelösten Lade- und Entladeleistungsvorgaben (Nutzerverhalten).
- Erprobung hinsichtlich Eignung als flexibles Energiespeichersystem bei dynamischen Ladevorgängen sowie der Netzverträglichkeit (gemäß Tor-Erzeuger Typ A [11]): Betrachtet wurden insbesondere Aspekte der Spannungsqualität gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [12]) bei vorgegebenen zeitaufgelösten Ladenutzerverhalten

## 2.2 Zeitaufgelöste Ladeprofile für Lade- und Entladeleistungsvorgaben

Die zur Validierung erforderlichen zeitaufgelösten Lade- und Entladeleistungsvorgaben werden aus den im Projekt „FlyGrid“ entwickelten und veröffentlichten realen Ladeprofilen abgeleitet [3, 4, 6]. Die Modellbildung basierte dabei auf stochastischen Modellierungen für die in Tabelle 1 definierten Nutzerverhalten und Ladeleistungen mit folgenden Eingangsgrößen:

- Die räumliche Verteilung der Ladepunkte
- Individuelle Mobilitätsmuster (Ladezeit und zurückgelegte Strecke)
- Spezifische Kennwerte Batterieelektrischer Fahrzeuge (Batteriekapazität, spezifischer Energieverbrauch und Ladeeffizienz)

Wie bereits in der Einleitung diskutiert, resümieren die Autoren aus [3], dass die Eignung von FESS Systemen besonders bei folgenden Nutzergruppen gegeben ist: Schnellladen an Autobahnen, Elektrifizierte Busse und Elektrifizierte Last-Mile Zustellfahrzeuge.

Vor diesem Hintergrund wurden für die Laborversuche reale Ladeprofile für dies Gruppen „Elektrobusse“ und „Schnellladestation Autobahn“ für jeweils einen 24h Zeitabschnitt abgeleitet – eine Übersicht ist in Abbildung 3 gegeben.

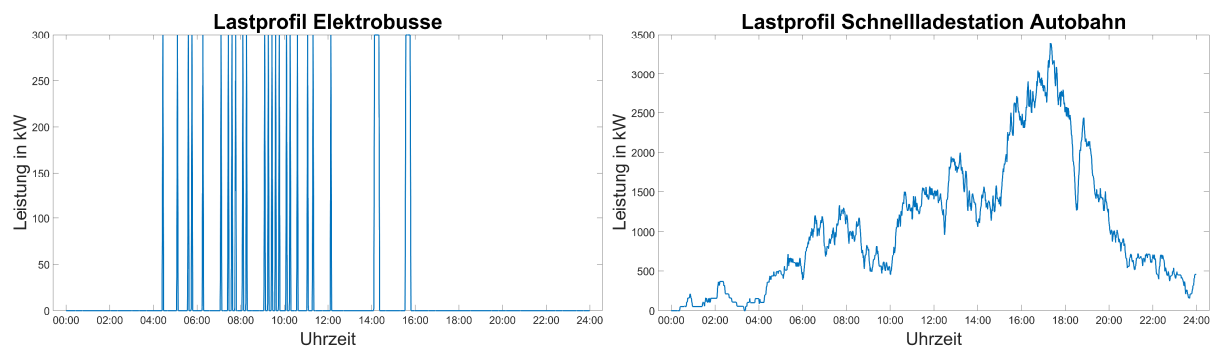


Abbildung 3: (links) Lastprofil Elektrobusse, (rechts) Lastprofil Schnellladestation Autobahn

Aufgrund der Leistungskapazitätsgrenze der PSHIL-Laborinfrastruktur, wurden die Ladeprofile jeweils auf eine maximal 100kW emulierte Ladeleistung reduziert. Darüber hinaus wurden aus dem Lastprofil „Elektrobusse“ repräsentative Zyklen entnommen sowie das Lastprofil „Schnellladestation Autobahn“ – aufgrund der kleinen Energiemenge des FESS von 1 kWh – von 24x60 Minuten-Zeitschritten auf 24x60 Sekunden-Zeitschritte überführt.

## 3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Systemvalidierung des Schwungradspeichers unter realen Betriebsbedingungen bei vorgegebenen zeitaufgelösten Ladelastprofile – Lastprofil Elektrobus und Schnellladestation Autobahn – diskutiert.

### 3.1 Leistungsverlauf Lade- Entladeleistung

In den gegenwertigen Laborversuchen wurde anhand der skalierten Ladelastprofile und des verwendeten FESS mit einer Speichergöße von 1kWh und einer Lade- und Entladeleistung von 100 kVA eine maximale Netzentlastung durch sogenanntes „Peak Shaving“ angestrebt – ein Überblick ist aus Abbildung 4 ersichtlich.

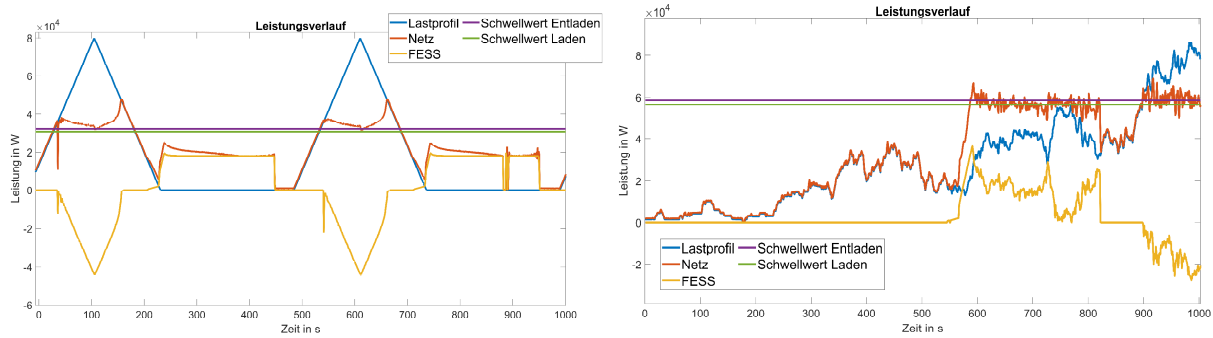


Abbildung 4: Leistungsverläufe Netz, Lastprofil, FESS: (links) Elektrobus (rechts) Autobahn Schnellladestation

Die jeweiligen waagrechten Schwellwerte „Entladen“ und „Laden“ definieren jene Leistungswerte, um bei den gegebenen Ladelastprofilen eine optimale Netzentlastung durch das FESS hinsichtlich der Spitzenbelastungen zu erreichen: Bei Überschreitung „Schwellwert Entladen“ gibt das FESS Leistung an das Netz ab und bei Unterschreitung „Schwellwert Laden“ – für das Beschleunigen des Schwungrades – wird Leistung vom Netz bezogen. Die jeweilige orange Kurve stellt die Summenleistungskurve der Netzbelastung dar. Im gegenwertigen Fall konnte eine Reduktion der Netzspitzenbelastung im Lastprofil „Elektrobusse“ um etwa 50% und im Fall „Schnellladestation Autobahn“ um 30% realisiert werden. Diese Werte sind jedoch auf die jeweiligen realen Lastprofile zu skalieren, womit dementsprechend höhere Lade- und Entladeleistungen sowie Speicherkapazitäten des FESS erforderlich werden.

### 3.2 Roundtrip Efficiency

Zur Ermittlung der Effizienz eines Lade- und Entladezyklus des FESS – der sogenannten Roundtrip Efficiency – soll der Energieinhalt in Abhängigkeit der Schwungrad-Drehzahl ermittelt werden – siehe Abbildung 5. Der Ladezustand des FESS kann dabei als Funktion der Drehzahl betrachtet werden, wobei bei der Ermittlung der Round Trip Efficiency sämtliche Verluste – mechanische und elektrische Verluste des FESS – berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich aus den Ladennutzerprofilen für „Elektrobusse“ eine Roundtrip Efficiency von rund 70% und im Szenario „Autobahn Schnellladestation“ eine Roundtrip Efficiency von 69 %

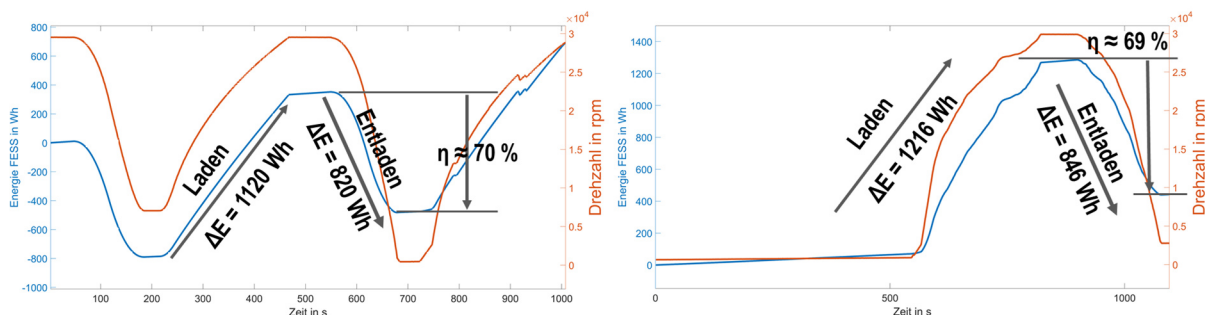


Abbildung 5: Energieinhalt- Drehzahl-Diagramm: (links) Elektrobus (rechts) Autobahn Schnellladestation

### 3.2.1 Netzverträglichkeit und Spannungsqualität

Zur Untersuchung der Netzverträglichkeit wurden insbesondere Aspekte der Spannungsqualität gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [12] bei vorgegebenen zeitaufgelösten Ladenutzerverhalten untersucht. In Abbildung 6 sind dazu die Effektivwerte der Spannungsverläufe der jeweiligen Phasen (sekundenaufgelöst) über die Versuchsdauer dargestellt. Aus der Abbildung wird verdeutlicht, dass im vorliegenden Fall durch die Netzbelastung des FESS keine Spannungsbandverletzung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 aufgetreten ist.

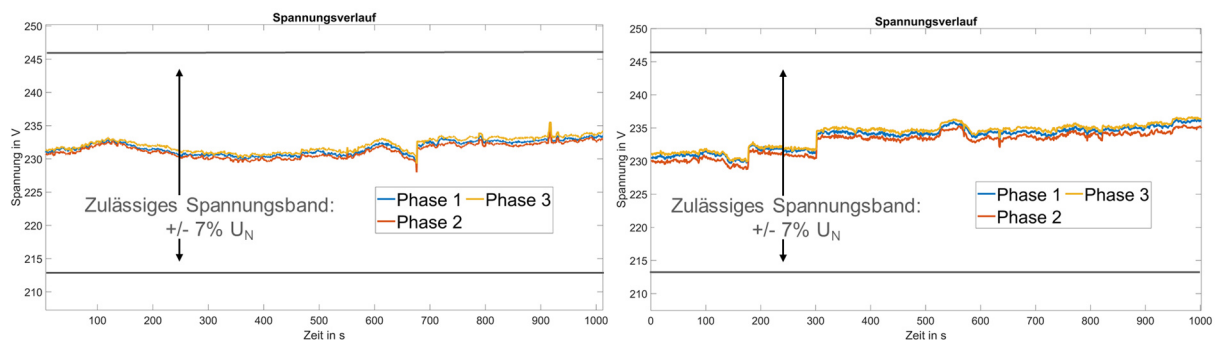


Abbildung 6: Phasen-Spannungsverlauf: (links) Elektrobus (rechts) Autobahn Schnellladestation

Darüber hinaus wird gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50106 der mittlere 10-Minuten Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung einer Periode – oder einem ganzzahlig vielfachen der Periode – (Total Harmonic Distortion, THD) auf 8% limitiert.

Zur Analyse der entstehenden Oberschwingungen der Spannungswerte – die sich jeweils als Vielfache der Grundschwingungsfrequenz ergeben – wurden die Rohdaten der Spannungsmessungen (bei einer Aufzeichnungsrate von 25 kHz) einer diskrete Fourier-Transformation (DFT) unterzogen, um diese bis zur 25. Harmonischen Oberschwingung zu untersuchen. Aus Abbildung 7 kann dabei das Spektrum der auftretenden Frequenzen entnommen werden.

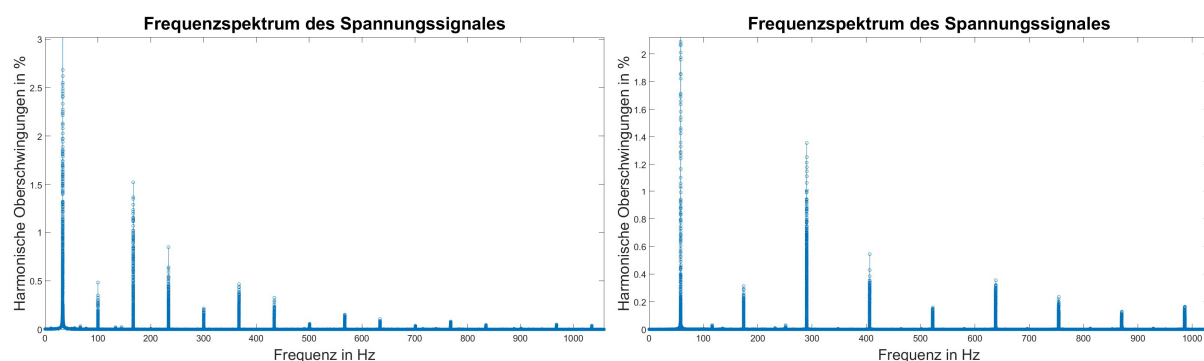


Abbildung 7: Auswertung Oberschwingungsgehalt THD: (links) Elektrobus (rechts) Autobahn Schnellladestation

Aus der DFT Analyse geht zudem hervor, dass die Oberschwingungen bis zur 25. Harmonischen eingehalten werden. Die THD Werte betragen jedoch im Ladenutzerprofil für „Elektrobusse“ 12,04 % und bei „Autobahn Schnellladestation“ 24,12%. Die Auswertungen



liefern den Grund zur Annahme, dass durch den Betrieb leistungselektronischer Bauteile im FESS Verzerrungen der Sinusspannung hervorgerufen werden. Dies erfordert eine Überprüfung der Netzfilterelemente im FESS vor tatsächlichem Netzanschluss, um den Spannungsqualitätskriterien zu genügen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorgelegten Arbeit wurde eine Methode zur Systemvalidierung eines Schwungradenergiespeichersystems auf seine netzbezogene Eignung als flexibles Energiespeichersystem vorgestellt. Der methodische Ansatz „Power System Hardware in the Loop“ erlaubt ein Einbinden des Schwungradspeichersystems – inklusive aller Steuer- und Leistungsanschlüsse – in eine elektrische Laborinfrastruktur. Wobei durch reale Ladenutzerverhalten mit hoher Ladeleistung und geringer Energiemenge das gegenwärtigen FESS mit einer Speicherkapazität von 1 kWh bei einer Lade-/Entladeleistung von 100 kVA erprobt werden konnten. Anhand der Systemvalidierung konnte ein tiefes Systemverständnis des FESS bei normalen und extremen Betriebslastsituationen erlangt werden, wobei unter anderem Probleme frühzeitig aufgezeigt und Handlungsempfehlungen für eine optimierte Betriebsweise des Schwungradspeichersystems im realen Einsatzfeld abgegeben wurden.

Die Laborversuche haben unter anderem gezeigt, dass das FESS schnellen Ladelastwechsel akkurat folgen kann und bedeutende Gesamtwirkungsgrade bei hohen Lade- und Entladezyklen aufweist. Darüber hinaus lässt sich sagen, dass insbesondere bei bekannten Ladenutzerverhalten – wie in etwa dem Fahrplan von öffentlichen Verkehrsmitteln – ein hohes Reduktionspotential der Netzspitzenbelastung bei optimierter Wiederaufladung eines FESS gesehen wird. Als Ausblick lässt sich zusammenfassen, dass die Erkenntnisse auf Basis der skalierten Lade-Nutzerverhalten auf die jeweiligen realen Lastprofile mit größeren Schwungradspeichersystemen umzulegen sind, was wiederum höhere Lade- und Entladeleistungen sowie Speicherkapazitäten des FESS erfordert. Die Autoren aus [6] heben dazu hervor, dass Schwungradspeichersysteme für höhere Leistungs- und Energieanforderungen modular verschalten werden können.

## 5 Acknowledgements

Diese Arbeit wurde im Zuge des Projektes "FlyGrid" ([www.flygrid.tugraz.at](http://www.flygrid.tugraz.at)) realisiert und durch den österreichischen Klima- und Energiefonds über die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Programm "Leuchttürme eMobilität" (Fördernummer 865447) gefördert.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Green Deal – Überprüfungsdatum 2023-02-08*
- [2] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY: *Decarbonising road transport — the role of vehicles, fuels and transport demand : Transport and environment report 2021* : Publications Office of the European Union, 2022 (EEA report no. 2022, 02)
- [3] THORMANN, Bernd ; PUCHBAUER, Philipp ; KIENBERGER, Thomas: *Analyzing the suitability of flywheel energy storage systems for supplying high-power charging e-mobility use cases*. In: *Journal of Energy Storage* 39 (2021), S. 102615
- [4] THORMANN, Bernd ; BRAUNSTEIN, Rene ; KIENBERGER, Thomas: *FlyGrid – Integration of Energy Storage Systems into EV Fast Charging Infrastructure*, Bd. 12. In: 12. *Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*.
- [5] *Official Website of the FlyGrid project*. URL [www.tugraz.at/en/projekte/flygrid/home/](http://www.tugraz.at/en/projekte/flygrid/home/) – Überprüfungsdatum 2022-11-26
- [6] A. BUCHROITHNER ; R. PREßMAIR ; P. HAIDL ; H. WEGLEITER ; B. THORMANN ; T. KIENBERGER ; P. AUER ; J. DOMITNER: *Grid Load Mitigation in EV Fast Charging Stations Through Integration of a High-Performance Flywheel Energy Storage System with CFRP Rotor*. In: *2021 IEEE Green Energy and Smart Systems Conference (IGESSC)*, 2021, S. 1–8
- [7] HEUSSEN, Kai ; STEINBRINK, Cornelius ; ABDULHADI, Ibrahim F. ; VAN NGUYEN, Hoa ; DEGEFA, Merkebu Z. ; MERINO, Julia ; JENSEN, Tue V. ; GUO, Hao ; GEHRKE, Oliver ; BONDY, Daniel Esteban Morales ; BABAZADEH, Davood ; PRÖSTL ANDRÉN, Filip ; STRASSER, Thomas I.: *ERIGrid Holistic Test Description for Validating Cyber-Physical Energy Systems*. In: *Energies* 12 (2019), Nr. 14, S. 2722
- [8] BARRAGÁN-VILLAREJO, Manuel ; GARCÍA-LÓPEZ, Francisco de Paula ; MARANO-MARCOLINI, Alejandro ; MAZA-ORTEGA, José María: *Power System Hardware in the Loop (PSHIL): A Holistic Testing Approach for Smart Grid Technologies*. In: *Energies* 13 (2020), Nr. 15, S. 3858
- [9] STRASSER, Thomas I. ; JONG, Erik C. W. de ; SOSNINA, Maria: *European Guide to Power System Testing*. Cham : Springer International Publishing, 2020
- [10] *NEFI\_Lab:InToPublic : Physische Laborinfrastruktur*. URL <https://www.nefi.at/de/nefi-lab/physische-nefi-labs> – Überprüfungsdatum 2022-11-27
- [11] E-CONTROL: *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen: TOR Erzeuger Typ A (idF v. V1.2)* (2022-04-18)
- [12] OVE EN 50160. 2020-12-01. *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*