

Schwungradspeicher für Elektrofahrzeug-Schnellladestationen

Armin Buchroithner¹, Hannes Wegleiter¹, Bernhard Schweighofer¹,
Michael Bader², Peter Haidl²

¹ Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung – TU Graz, Inffeldgasse 23/II - 8010 Graz, +43 316 873 30514, armin.buchroithner@tugraz.at, emt.tugraz.at

² Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik – TU Graz, Inffeldgasse 21b/II – 8010 Graz

Kurzfassung:

Der Ausbau der Ladestelleninfrastruktur stellt einen entscheidenden Faktor für die erfolgreiche Entwicklung und Marktdurchdringung der Elektromobilität dar. Für die Versorgungsnetze bedeutet ein zeitgleiches, unkoordiniertes Laden von Elektrofahrzeugen, vor allem zu Stoßzeiten, eine möglicherweise unzulässig hohe Belastung. Als Gegenmaßnahme wäre ein Netzausbau möglich. Da dieser sehr kostenintensiv ist, wird nach alternativen Lösungen gesucht. Ein vielversprechender Ansatz ist die Ausstattung der Fahrzeug-Ladestationen mit Energiespeichern, wodurch die Netzbelastung zu den Stoßzeiten reduziert wird. Theoretisch wären verschiedene Energiespeicher für diese Anwendung denkbar, jedoch hat sich gezeigt, dass ein elektromechanischer Schwungradspeicher die optimale Lösung darstellt. Das Gesamtsystem einer Schnellladestation, welche neben einem Schwungradenergiespeicher auch ein Carport mit Photovoltaikanlage zur Integration lokaler, erneuerbarer Energie enthält, wird exemplarisch dargestellt. Eine Pilotanlage dieses Konzeptes wird im Zuge des FFG-Leuchtturmprojekts „FlyGrid“ entwickelt, aufgebaut und 6 Monate im Praxisbetrieb in Graz evaluiert.

Keywords:

Elektromobilität, Schnellladestation, Ladestation mit Energiespeicher, Ladestellen Infrastruktur, Grid Stability, Load Shifting, Energiespeicher, Schwungradspeicher, Flywheel, FESS

1 Einleitung

Der Umstieg von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zur reinen Elektromobilität gilt als einer der wichtigsten Schritte im Zuge der Dekarbonisierung. Dabei geht es in gleichem Maße um das Erreichen der Klimaschutzziele wie um politisch-ökonomische Unabhängigkeit. Rund die Hälfte der Treibhausgasemissionen in Österreich und den anderen westlichen Industrienationen werden durch den Verkehr verursacht [1]. Neben der Weiterentwicklung der Elektrofahrzeuge selbst stellt eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur einen entscheidenden Faktor für den Siegeszug der Elektromobilität dar. Während derzeit Elektrofahrzeuge primär als Zweitfahrzeuge genutzt und über Nacht mit geringen elektrischen Leistungen geladen werden, ändert sich dieser Umstand zusehends, da die täglichen Fahrtstrecken über 70 km kontinuierlich zunehmen. Folglich steigt der Bedarf an Schnellladestationen, speziell entlang

des hochrangigen Straßennetzes, da die Kundenakzeptanz stark von den Wartezeiten für Zwischenladevorgänge abhängt [2].

Während der starke prognostizierte Zuwachs an Elektrofahrzeugen als durchwegs positive Entwicklung zu bezeichnen ist, ergeben sich daraus eine Reihe neuer Herausforderungen für Energieversorger, Netzbetreiber, Fahrzeug- und Ladesäulenhersteller und im Endeffekt auch für den Kunden.

Ein Konzept einer Schnellladestation, die durch Integration eines Hochleistungsspeichers sowohl die Nachfrage nach Schnellladung, als auch eine Entlastung des Netzes realisieren kann, wird in Kapitel 5 vorgestellt. Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften bieten sich Schwungradenergiespeicher als lokales Speichersystem an. Deren Eigenschaften werden in Kapitel 4 behandelt.

2 Ladestellen-Infrastruktur für die Elektromobilität

Die Möglichkeit einer Schnellladung (mit Leistungen von 100 kW und mehr) ist als absolut notwendig zu bezeichnen, um dem Kunden die Angst vor der zu geringen Reichweite eines Elektrofahrzeugs (Electric Vehicle, EV) zu nehmen. Das Fehlen einer geeigneten Schnellladeinfrastruktur gilt in Expertenkreisen als die größte Bedrohung der E-Mobility [3]. Abbildung 1 zeigt die in Österreich installierte Ladeinfrastruktur für E-Fahrzeuge, welche entlang des hochrangigen Straßennetzes am dichtesten ausgebaut ist. Insgesamt sind 2.356 Stationen verfügbar, wovon lediglich rund 15 % eine Ladeleistung von mehr als 22 kW bereitstellen (Schnellladestationen) [4].

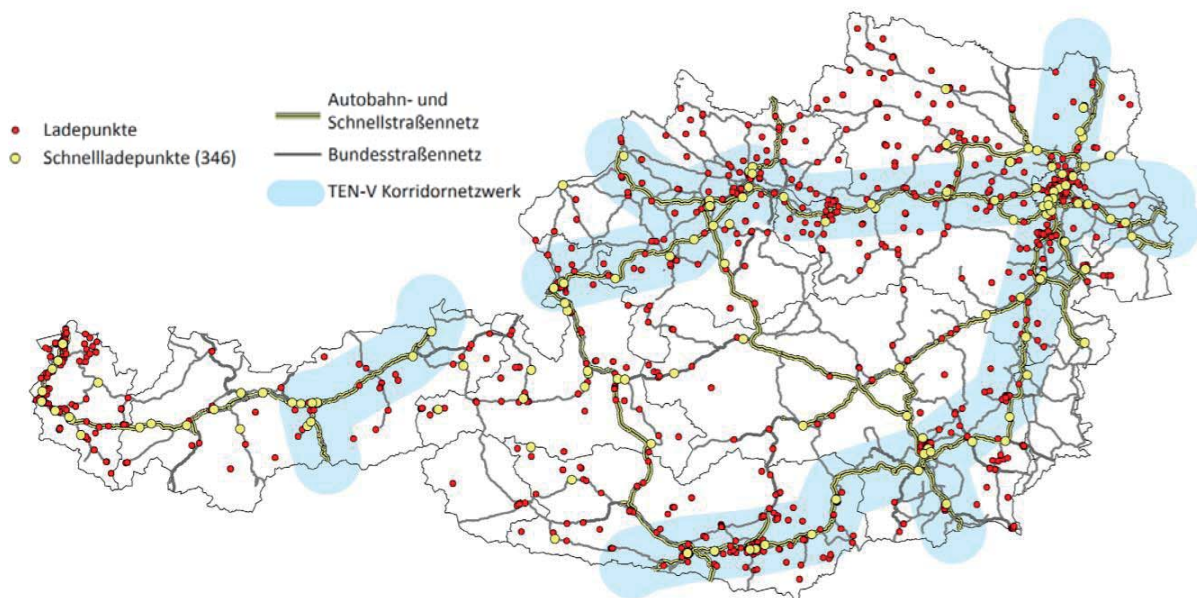


Abbildung 1 – Übersicht der öffentlich zugänglichen Ladepunkte in Österreich [4]

Untersuchungen haben gezeigt, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen der Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen und der Verfügbarkeit von Schnellladestationen gibt [3]. Um den Prognosen des „Global EV Outlook 2017“ der International Energy Agency (IEA) zu genügen muss die Anzahl an EV-Ladestationen bis zum Jahr 2025 um den Faktor 25 zunehmen [5]. Die Ausstattung der Schnellladestationen mit der notwendigen leistungsfähigen Stromversorgung stellt jedoch einen enormen Investitionsaufwand dar. Wie bereits erwähnt,

ergäbe sich mit steigender Anzahl an Schnellladestationen aufgrund der Netzbelastung zusätzlich die Notwendigkeit, den Netzausbau entsprechend voran zu treiben. Der zunehmende Anteil volatiler, erneuerbarer Energiequellen verstärkt diesen Effekt [6].

Nicht nur die Netzbelastung sowie Leistungsbereitstellung volatiler Energiequellen ist zeitlich nicht konstant, auch der Leistungsbedarf eines EV's verändert sich während des Ladevorgangs stark. Abbildung 2 links zeigt die Ladeleistung eines *Tesla Model S* in Abhängigkeit vom Ladezustand, rechts wird der Ladeleistungsverlauf eines *Nissan Leaf* in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Dabei weisen beide Beispiele einen maximalen Leistungsbedarf zu Beginn auf, welcher im Laufe des Ladevorganges signifikant abnimmt.

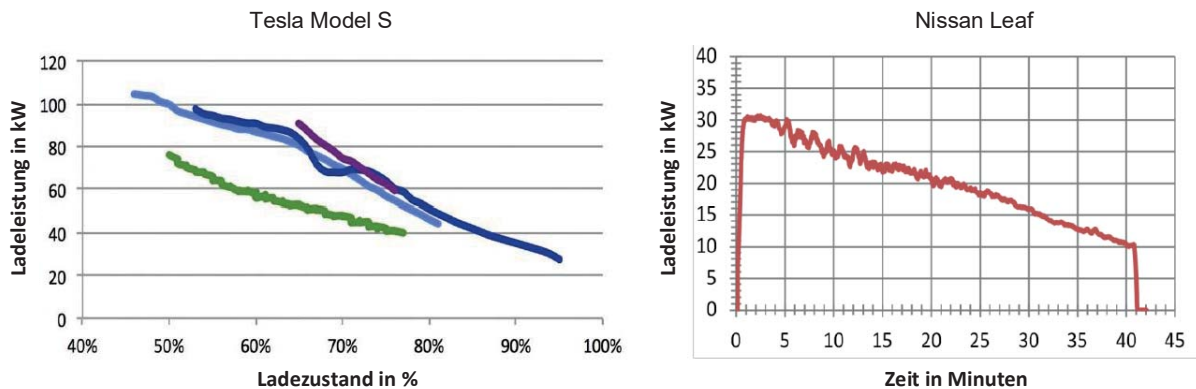


Abbildung 2 - Ladeleistung abhängig vom Ladezustand eines *Tesla Model S* (links) [7] und Ladeleistung abhängig von der Zeit eines *Nissan Leaf* (rechts) [8].

Durch die Integration eines leistungsfähigen Energiespeichers in eine Schnellladestation können selbst bei Anschluss in einem konventionellen Niederspannungs-Verteilernetz hohe Ladeleistungen bei gleichzeitiger Netzglättung erreicht werden. Hierbei wird die Ladecharakteristik von Elektrofahrzeugen berücksichtigt. Die lediglich zu Beginn des Ladevorgangs benötigte hohe Leistung wird im Wesentlichen vom Energiespeicher zur Verfügung gestellt, während der Netzanschluss (nach Entleerung des Speichers) eine weitere Ladung mit deutlich geringerer Konstantleistung („Trickle charging“) gewährleistet. Wird selbst diese nicht abgefragt, kann der Speicher wieder geladen werden. Veranschaulicht wird dieser Prozess in Abbildung 3. Zu Beginn des Ladevorganges werden im gezeigten Fall 100 kW Ladeleistung benötigt, wovon 22 kW vom Netz und 78 kW vom Energiespeicher bereitgestellt werden. Der Speicher wird dadurch entladen. Mit steigendem Ladezustand der Fahrzeugbatterie reduziert sich die erforderliche Ladeleistung, weshalb die vom Energiespeicher zur Verfügung gestellte Leistung abnimmt. Die vom Netz bezogene Leistung bleibt stets konstant. Unterschreitet der Leistungsbedarf des EV-Ladevorgangs jenen Wert, welcher vom Netz bereitgestellt werden kann (die nominelle Anschlussleistung), so wird der vom Netz bezogene Leistungsüberschuss zur Wiederaufladung des Energiespeichers genutzt. Findet kein Ladevorgang statt, wird die gesamte, vom Netz bereitgestellte Leistung zur Wiederaufladung des Energiespeichers herangezogen. Dieses Konzept fußt darauf, dass der durchschnittliche Ladeleistungsbedarf jenen Wert, welcher vom Netz bereitgestellt wird, nicht überschreitet. Anderenfalls wäre ein Netzausbau unumgänglich.

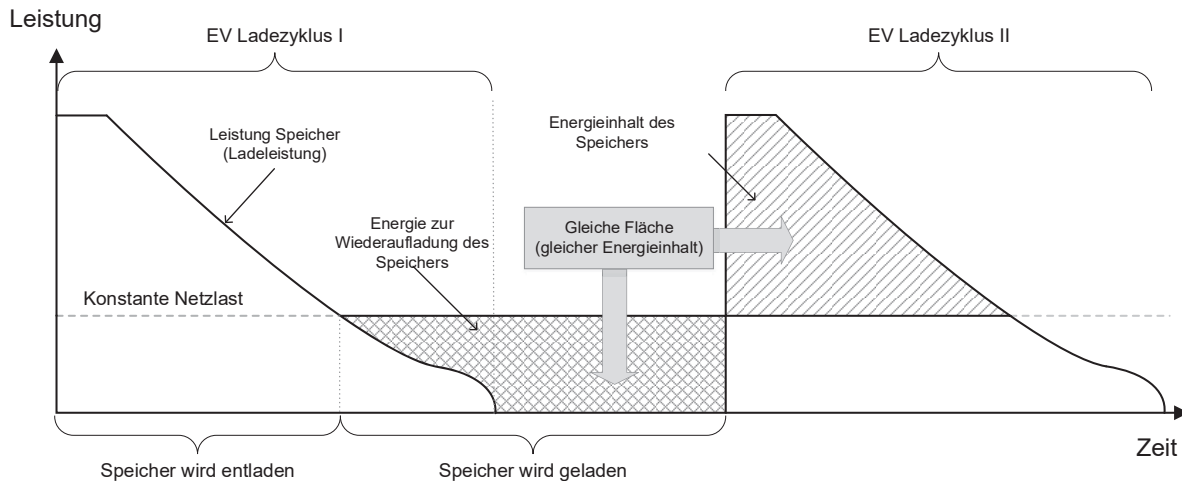


Abbildung 3 - Ladezyklus einer Schnellladestation mit Energiespeicher

3 Vergleich unterschiedlicher Energiespeicher

Grundsätzlich können Energiespeicher vom technischen Gesichtspunkt durch zwei Eigenschaften charakterisiert werden: Die Energie- und die Leistungsdichte. Nachfolgend werden für den Einsatz in Schnellladestationen drei unterschiedliche Technologien betrachtet: Batterien, Supercaps und Schwungrad-Energiespeicher (englisch Flywheel Energy Storage Systems, oder FESS). Während Batterien grundsätzlich höhere spezifische Energien aufweisen als konkurrierende Technologien, so zeichnen sich Schwungrad-Energiespeicher und Supercaps durch ihre hohen Leistungsdichten aus [9]. Prinzipiell können alle drei Konzepte zur Energiespeicherung bei Schnellladestationen eingesetzt werden, sofern sie so dimensioniert sind, dass sowohl die erforderliche Leistung als auch der notwendige Energieinhalt bereitgestellt wird. Ein entscheidender Vorteil von Schwungrad-Speichern stellt die Möglichkeit dar, Leistung und Energieinhalt unabhängig voneinander dimensionieren und so einem spezifischen Anwendungsfall anpassen zu können [10].

Weitere Auswahlkriterien inklusive einer qualitativen Bewertung sind in Abbildung 4 angeführt. Infolge der geringen spezifischen Energie von Supercaps steigen der Platzbedarf und damit auch die Kosten zur Realisierung der erforderlichen Energieinhalte stark an. Batterien weisen eine deutlich geringe Zyklenfestigkeit auf, weshalb dieser Speichertyp bei Verwendung in einer Schnellladestation häufig getauscht werden müsste. Aus diesem Grund wären die jährlichen Betriebskosten für eine batteriebasierte Lösung sehr hoch. Zusätzlich existieren strenge Transportauflagen für Batterien mit entsprechenden Energieinhalten, da selbst im entladenen Zustand Energiemengen gespeichert sind, welche im Falle von Kurzschluss oder Thermal Runaway zu gefährlichen Bränden oder Explosionen führen können. Eine komplette Entladung für den sicheren Transport ist für das FESS jedoch ohne Probleme möglich.

Als Speichersysteme bieten sich elektromechanische Schwungrad-Energiespeicher (Flywheel Energy Storage Systems – FESS) an, die im Gegensatz zu Batterien die folgenden Vorteile aufweisen:

- Hohe Zyklenfestigkeit (hohe Lebensdauer)
- Keine Kapazitätseinbußen durch Alterung
- Hohe Leistungsdichte
- Voneinander unabhängige Dimensionierung von Leistung und Energieinhalt

- Betrieb bei geringen Umgebungstemperaturen unproblematisch
- Einfache Bestimmung des Energieinhaltes zu jedem Zeitpunkt
- Zustandsüberwachung / Gesundheitszustand einfach überprüfbar
- Problemlose Tiefentladung (keine Transportauflagen/Probleme)
- Keine giftigen oder seltenen Rohstoffe erforderlich, unproblematisches Recycling
- Produktion in Österreich möglich, Unabhängigkeit vom asiatischen Markt
- Hohes theoretischen Potential für mögliche spezifische Energien





















| |  Kosten |  Zyklusfestigkeit |  Wirkungsgrad |  Transportrisiko |  Knock-Out Kriterien |
|--|---|---|---|--|--|
|  Chem. Batterie |  |  |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Zyklusfestigkeit / Kosten: Hohe Kosten infolge regelmäßigen Wechsels der Batterie wegen geringer Zyklusfestigkeit • Transportrisiko: Reglementierung für Transport • Gefahr: Überhitzung |
|  Super Cap |  |  |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Kosten: Hohe spezifische Kosten. • Energiedichte: Erforderlicher Energieinhalt benötigt zu viel Platz für Ladestationen. |
|  FESS |  |  |  |  | <ul style="list-style-type: none"> • Keine: Kein Knock-Out Kriterium basierend auf dem physikalischen Prinzip! |

Abbildung 4 - Qualitative Darstellung ausgewählter Kriterien für Energiespeicher von Schnellladestationen

4 Schwungrad Energiespeicher

Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines FESS. Energie wird kinetisch durch eine rotierende Masse (Rotor – Schwungmasse) gespeichert und mit Hilfe einer elektrischen Maschine gewandelt. Der Energieinhalt wird dabei durch das Produkt von Massenträgheitsmoment und dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit bestimmt. Im Betrieb weist dieses System entsprechende Lager- und Luftreibungsverluste auf, welche zur Selbstentladung des Speichers führen. Um die Luftreibung zu minimieren ist eine Evakuierung des Gehäuses und somit eine Vakuumpumpe erforderlich. Weitere Peripheriekomponenten sind ein Kühlsystem und der Frequenzumrichter zum Betrieb der elektrischen Maschine.

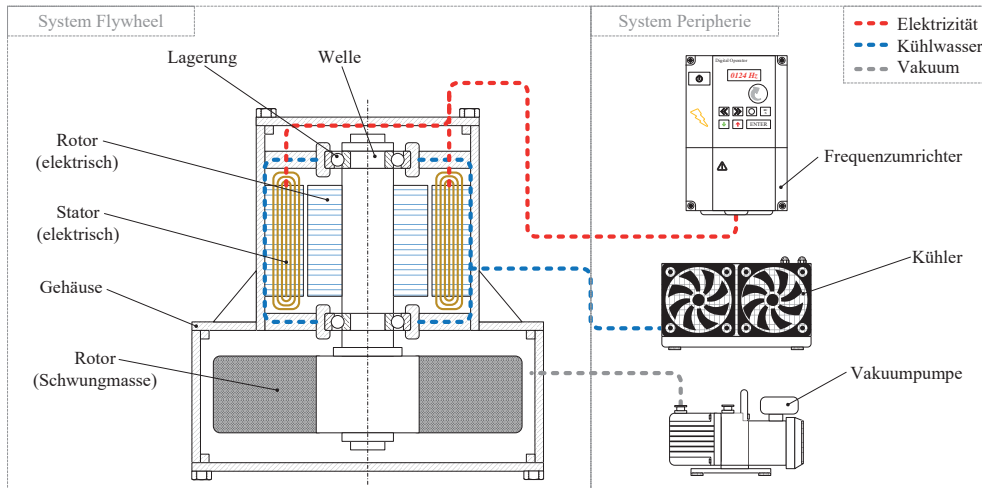


Abbildung 5 - Grundsätzlicher Aufbau des Schwungradspeichersystems

Die Entwicklungsschwerpunkte zur Verbesserung der Systemeigenschaften dieser Speichersysteme liegen in der Optimierung der Lagersituation und somit Minimierung der Selbstentladung, sowie der Erhöhung der spezifischen Energie der Schwungmasse durch Nutzung des Potentials leistungsfähiger Werkstoffe.

Die spezifische Energie des Systems wird durch das Verhältnis von zulässiger Spannung zur Dichte des Rotorwerkstoffes definiert [10]. Rotoren aus Kohlefaserverbund weisen eine hohe Zugfestigkeit bei geringer Dichte auf, weshalb jene Rotoren hohe spezifische Energien erreichen können. Tabelle 1 zeigt maximal erreichbare spezifische Energien basierend auf unterschiedlichen Rotormaterialien. Das *theoretische* Potential, welches *Carbon Nano Tubes* aufweisen liegt bei Energieinhalten über jenem fossiler Energieträger, der beispielsweise für Diesel bei 11,9 kWh/kg liegt.

Tabelle 1 - Zugfestigkeit, Dichte und spezifischer Energie ausgewählter Werkstoffe





| Material | Zugfestigkeit σ_{\max} | Dichte ρ | Spezifische Energie σ_{\max}/ρ |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|--|
| | N/mm ² (MPa) | kg/dm ³ | Wh/kg |
| Baustahl | 340 | 7,8 | 12,1 |
| Hochfester Elektro Stahl ^a | 1200 | 8,1 | 41,2 |
| CFRP ("T1000G") ^b | 3040 | 1,5 | 281 ^x |
| Carbon Nanotubes | 11000 bis 150000 | 1,4 | 1,1 - 14,9 kWh/kg ^x |

^a www.vacuumschmelze.com ^b www.toraycfa.com

^x Für Faserverbundwerkstoffe wird von Hohlfasern mit einem Matrixanteil von 40 % ausgegangen

Unter Optimierung der Lagersituation wird in diesem Fall eine Minimierung der Lagerreibungsverluste verstanden. Dies wird primär durch eine Reduktion der Lagerbelastung erreicht, wofür zwei wesentliche Ansätze verfolgt werden. Ein Permanentmagnet kompensiert die Eigengewichtsbelastung des Rotors, wodurch die Lagerung nur mit einem geringen Teil der Rotormasse belastet wird [11]. Zum anderen sorgt eine nachgiebige Aufhängung der Lagerung und der daraus resultierende überkritische Betrieb des Rotors für geringe Radialbelastungen im Betriebsdrehzahlspektrum [12]. Die Belastung hängt lediglich von der Steifigkeit der Lageraufhängung und der Exzentrizität der Unwucht ab. Somit kann der Rotor mit einfachen Methoden kostengünstig gewuchtet werden, da die erforderlichen Wuchtgüten gering ausfallen. Eine Zusammenfassung dieser Punkte zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2 - Optimierungsansätze für FESS

| Key Innovationen | | Optimierungsaspekt | Verbesserung über den Stand der Technik hinaus |
|---------------------------------------|---|--|--|
| Magnetische Gewichtsentlastung |  | Reduzierte Selbstentladung | Reibungsverluste vergleichbar mit Magnetlagern |
| Nachgiebige Lageraufhängung |  | Reduzierte Selbstentladung, Verbesserte Lagerlebensdauer | Passive Vibrationskontrolle abgestimmt auf das Gesamtsystem |
| Rotor aus hochfesten Kohlestofffasern |  | Optimierte Energiedichte | Low-cost Schwungradspeicher, in Österreich gefertigt |
| Optimierter Reluktanzmotor |  | Stabiles thermisches Verhalten und Systemoptimierung | Kosteneinsparung und verbesserte Eignung für hohe Drehzahlen |

5 Lösungskonzept *FlyGrid*

Ein Gesamtsystem einer Schnellladestation in Form eines Carports, das neben dem zuvor beschriebenen Schwungradenergiespeicher auch eine Photovoltaikanlage als exemplarische Integration einer volatilen, erneuerbaren Energiequelle beinhaltet, wird im Projekt „FlyGrid“ realisiert. Dabei handelt es sich um ein von der FFG finanziertes Flagship Projekt der *9ten Ausschreibung – Leuchttürme der Elektromobilität* mit dem Titel *Flywheel Energy Storage for EV Fast Charging and Grid Integration*. Im Konsortium werden durch die Projektpartner die Kompetenzen dargestellt, um einen hochleistungsfähigen Schwungrad-Energiespeicher speziell für E-Ladestellen zu entwickeln, praktisch umzusetzen und anschließend in einer innovativen, vollautomatischen Ladestation zu integrieren. Das Gesamtsystem im Sinne eines holistischen Ansatzes wird durch entsprechende Projektpartner – beginnend von den Netzanforderungen, über das Speichersystem, bis hin zum Ladevorgang – entwickelt. Das System sieht vor, lokale volatile Quellen – wie exemplarisch die PV-Module auf dem Carport – zu integrieren und trägt somit zu einer Erhöhung des Anteils an erneuerbarer Energie bei. Überlegene Zyklenlebensdauer des Energiespeichers, die Möglichkeit Leistung in das Netz rückzuspeisen um Blackouts zu vermeiden, sowie die einfache Transportierbarkeit als mobile „Schnellladebox“ (z.B. für elektrifizierte Baumaschinen) sind weitere Charakteristika des *FlyGrid*-Konzeptes. Eine grafische Veranschaulichung zeigt Abbildung 6. *FlyGrid* ist eine in Österreich herstellbare, disruptive Technologie, durch welche folgende übergeordnete Ziele mit hohem sozioökonomischem Impact erreicht werden können:

- Reduktion der Ladedauer von EVs und somit höhere Marktdurchdringung von EV's
- Reduktion der Schwellenangst beim Umstieg auf EV's bzw. höhere Kundenzufriedenheit durch ein verbessertes Ladenetz
- Vermeidung eines kostenintensiven Netzausbaus
- Verbesserte Integration erneuerbarer Quellen für die Versorgung der Elektromobilität
- Verbesserte Netzstabilität und Spannungsqualität
- Portable Schnelllade-Lösung für elektrische Baumaschinen oder Events.

Das grundlegende Konzept:

Dezentrale Energiespeicherung bei EV-Schnellladestationen
+ hohe Leistungen, + verbesserte Netzstabilität, + Vermeidung Netzausbau, etc.



→ **Hohe Zyklenfestigkeit** sowie **Leistungsdichte** stellen die entscheidenden Vorteile von FESS gegenüber chemischen Batterien und Supercaps dar!

Abbildung 6 - Grundkonzept *FlyGrid* Demoanlage

Das vielseitige, interdisziplinäre Projektkonsortium bestehend aus zwei Forschungseinrichtungen und neun Industriepartnern, sowie die weltweit erstmalige Kombination von Schwungradspeicher, hochinnovativer, vollautomatischer Ladetechnik) und lokalen Erneuerbaren) unterstreichen die Einmaligkeit des Projektes.

Im Rahmen des Projektes wird eine Schnellladestation für Elektrofahrzeuge mit integriertem Schwungrad-Energiespeicher entwickelt und 6 Monate betrieben. Die Testanlage wird in der Grazer Innenstadt installiert und mit einer Firmenflotte erprobt.

Schlussendlich profitieren unterschiedliche Wirtschaftszweige von der Umsetzung des *FlyGrid* Konzeptes. Beginnend mit ökonomischen Vorteilen, erhöhter Flexibilität bzw. gesteigerter Akzeptanz beim Endkunden, Zeitersparnis und verbesserter Infrastruktur bis hin zu reduzierten Kosten durch Vermeidung kostenintensiven Infrastrukturausbaus. Hauptnutznießer einer Umsetzung sind

- Betreiber von Ladestellen
- Hersteller von Elektrofahrzeugen
- Energieversorger
- Hersteller und Betreiber von Baufahrzeugen
- Öffentliche Transportunternehmen
- Private Endkunden

6 Literatur

- [1] VDIK - Association of International Motor Vehicle Manufacturers, „*Climate protection - mobility must remain affordable even with ever scarcer resources*,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.vdik.de/departement/environment/climate-protection.html>.
- [2] F. Pötscher, „*Szenarien zur Entwicklung der Elektromobilität in Österreich*,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2015.
- [3] W. Sierzchula, S. Bakker, K. Maat, B. van Wee „*The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption*,“ Energy Policy, pp. 183-194, 2014
- [4] AustriaTech – Gesellschaft des Bundes für technologiepolitische Maßnahmen GmbH, „*Elektromobilität in Österreich, Zahlen & Daten*“ 2016. [Online]. Verfügbar: https://www.bmvit.gv.at/verkehr/elektromobilitaet/downloads/oesterreich2016_de.pdf.
- [5] International Energy Agency, „*Global EV Outlook 2017*“, OESC / IEA, 2017
- [6] B. Kirchbeck, „*Blackout: E-Mobilität bedroht stabile Stromversorgung*,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/blackout-e-mobilitaet-bedroht-stabile-stromversorgung-a-678945>.
- [7] J. Voelcker, „*Tesla boosts Supercharger electric-car charging rate to 145 kw*,“ 28 July 2016. [Online]. Available: http://www.greencarreports.com/news/1105234_tesla-boosts-supercharger-electric-car-charging-rate-to-145-kw.
- [8] EPRI - Electric Power Research Institute, „*Charging Power as a Function of Time - Leaf*,“ 2012. [Online]. Available: <https://i.imgur.com/qbT79cv.png>.
- [9] M. Bader, A. Buchroithner, I. Andrasec, A. Brandstätter, „*Schwungradhybride als mögliche Alternative für den urbanen individual- und nahverkehr*,“ EnInnov, 2012
- [10] A. Buchroithner, „*Effizienterer Einsatz von Schwungradspeichern in Fahrzeugen durch interdisziplinäre und multidimensionale Optimierung ihres Sub- und Supersystems*,“ Technische Universität Graz, Graz, 2017
- [11] A. Buchroithner, C. Voglhuber, „*Untersuchung eines verlustarmen Low-Cost Lagerkonzepts für Schwungradspeicher – Eine Schlüsseltechnologie für die Speicherung erneuerbarer Energie*,“ 12. VDI-Fachtagung Gleit- und Wälzlagerungen, Schweinfurt, 2017
- [12] P. Haidl, A. Buchroithner, M. Bader, M. Zisser, B. Schweighofer, H. Wegleiter, „*Improved test rig for vibration control of a rotor bearing system*,“ ICSV 23, Athen, 2016