

Hybrid Energy Storage Solutions

Das Beste aus zwei Welten

50 Prozent leichter, dauerverfügbar, dreifache Lebensdauer – Ansmann und das Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des KIT haben ein Supercap-Lithium-Hybridspeichersystems entwickelt und vor Kurzem einen Prototyp vorgestellt, der sich für den Einsatz in Mobilitätssystemen empfiehlt. Von René Eschenweck, Marvin Sperling und Miriam Leunissen

Nun, die Idee ist nicht neu, das Patent auch schon einige Jahre jung – aber seine konsequente Umsetzung löst für den Anwender gleich mehrere Probleme auf einmal. Auf der diesjährigen Batterie & Power World-Konferenz des WEKA-Verlags im Februar 2024 hat Ansmann zusammen mit dem Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) erstmals einen, auf ihrer Zusammenarbeit basierenden, Prototyp eines kombinierten Supercap-LiIon-Hybridspeichersystems (HESS) vorgestellt.

Zum Einsatz kommen soll dieses hocheffiziente Hybridspeichersystem zunächst in fahrerlosen Transportsystemen (FTS) sowie in Autonomous Mobile Robots (AMRs), lässt sich in deren Betriebsumgebung doch die optimale System- und Ladeinfrastruktur bereitstellen (**Bild 1**). Entwickelt wurde der Prototyp mit Fördermitteln des »Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) – Fördernummer KK5040304ZG0. Nun geht es im nächsten Schritt darum,

einen FTS-Hersteller als Partner für die praktische Umsetzung in Kundenanwendungen zu finden.

Versuche, Doppelschichtkondensatoren, auch Supercaps genannt, und Akkuzellen zu Hybridspeichersystemen zu kombinieren, gab es in der Vergangenheit bereits. Neu ist bei diesem Prototyp von Ansmann und IFL, ein Konzept umzusetzen, bei dem die Supercaps binnen 30 Sekunden an präzise dimensionierten dezentralen Ladepunkten auf 95 Prozent schnellgeladen werden. Danach ist das Fahrzeug

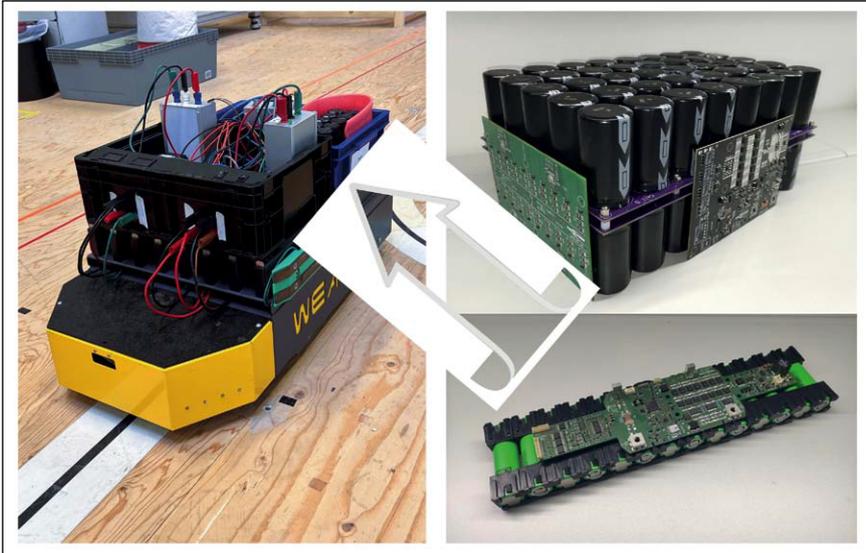


Bild 1. Als kompakte, leichte, dauerverfügbare und mit einer langen Lebensdauer ausgezeichnete Lösung empfiehlt sich das Supercap-Lithium-Hybridspeichersystem (HESS) nicht nur für den Einsatz in fahrerlosen Transportsystemen (FTS) und autonomen mobilen Robotern (AMR), sondern auch für Anwendungen in elektrifizierten Linienbussen und Zustellfahrzeugen im urbanen Raum. (Bild: Ansmann)

wieder einsatzbereit und die Superkondensatoren können unterwegs sukzessive das Akkumodul laden. Dieses kann dann das Fahrzeug auf längeren Strecken, die der Supercap nicht abdecken kann, mit Energie versorgen.

Welche Zellen dabei verwendet werden und auch ob kontaktbasiertes oder kontaktloses, induktives Laden bevorzugt wird, spielt dabei für das System keine Rolle. Voraussetzung ist: Der hohe Ladestrom für die Supercaps an allen dezentralen Ladestellen muss binnen Sekundenbruchteilen am Ladesystem anliegen und die Ladeleistung nach dem Constant-Current-Constant-Voltage(CCCV)-Verfahren reguliert werden.

Das Ergebnis: Ein um fast die Hälfte kleineres Energiespeichersystem mit um bis zu 80 Prozent weniger Akkuzellen, das weniger Kapazität für identische Einsätze benötigt. Mehr Nachhaltigkeit aufgrund der Ressourceneinsparung und der besseren Recyclingfähigkeit von Supercaps im Vergleich zu Akkuzellen. Lange Ladezeiten und nicht ausreichende Reichweiten inklusive der damit verbundenen bekannten Verfügbarkeitsprobleme derzeit üblicher FTS gehören der Vergangenheit an. Da alle mit einem solchen Hybridspeichersystem betriebenen FTS oder AMRs je nach Bedarf bis zum Dreischichtbetrieb

(24/7) durchgehend im Einsatz bleiben könnten, werden zudem signifikant weniger von ihnen benötigt.

Grundsätzlich verfügen Supercaps zwar über eine geringere gravimetrische Energiedichte (Wh/kg) und benötigen mehr Bauraum. Letztlich war der von Ansmann und IFL konstruierte Prototyp durch den anwendungsspezifisch optimierten modularen Aufbau und den kombinierten Einsatz der Supercaps und Akkuzellen dennoch kleiner und rund die Hälfte leichter als ein traditionelles, rein zellenbasiertes

Energiespeichersystem. Dies reduziert den Energieverbrauch und erhöht die Reichweite.

Darüber hinaus ist die Degression der Akkukomponenten durch die Integration der beiden Speichersysteme deutlich geringer: die zyklische Lebensdauer des Akkus erhöht sich durch die Kombination von Supercaps mit elektrochemischen Zellen theoretisch von 500 Zyklen auf über 1.250 Zyklen. Dabei ist das System so ausgelegt, dass die Geräte sich auch bei längeren Standzeiten wie etwa übers Wochenende nicht mehr entladen, wie dies bei früheren Systemen auf Basis von Superkondensatoren der Fall war.

Technische Varianten von Hybridspeichersystemen

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, ein hybrides Energiespeichersystem technisch zu realisieren. Marvin Sperling vom IFL des KIT in Karlsruhe forscht seit mehr als 5 Jahren an Energiespeicher- und Ladesystemen für FTS/AMR. Seine Dissertation beschäftigt sich mit dem Thema der Energie- und Speicherbedarfsmodellierung von intralogistischen und fahrzeugspezifischen Einflussfaktoren. Er gab durch seine Suche nach einem Umsetzungspartner die Initialzündung für den nun fertiggestellten FTS-HESS-Prototyp.

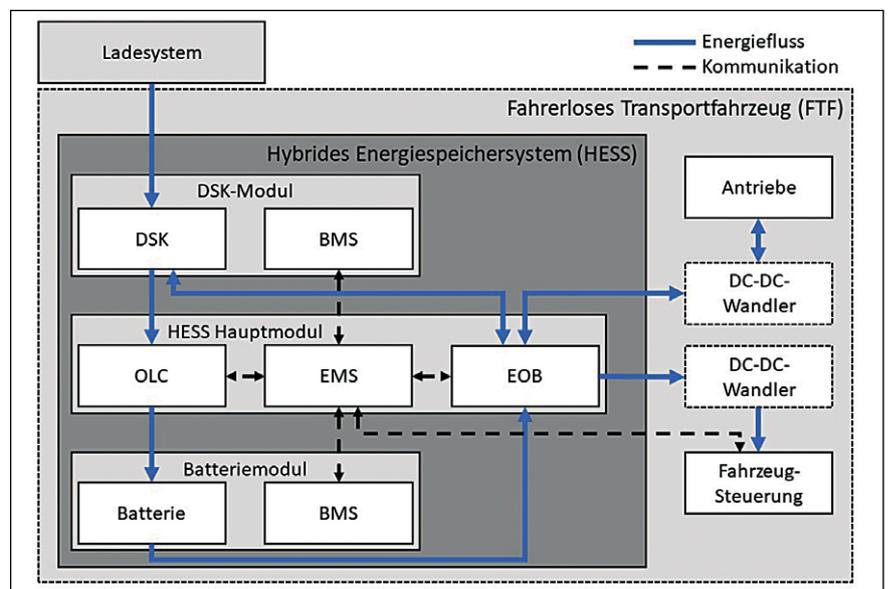


Bild 2. Systemarchitektur des hybriden Energiespeichersystems. (Bild: Ansmann)

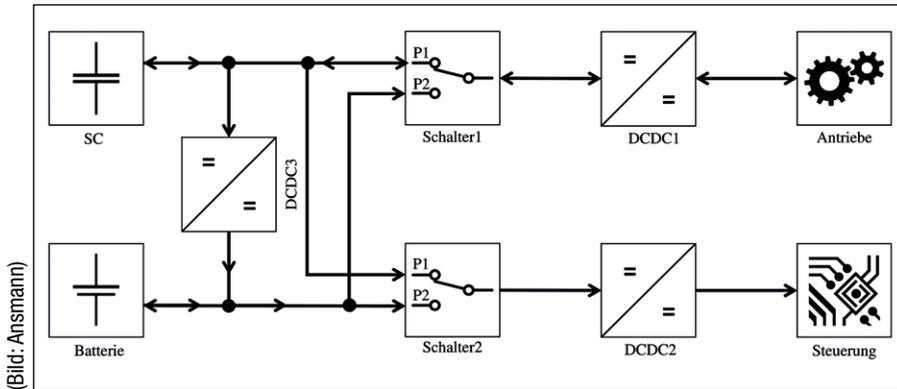
Hybride Energiespeichersysteme sind in Forschung und Entwicklung seit vielen Jahren Thema. Häufig wurde parallel zum primären Batteriespeicher parallel ein sekundärer Supercap-Speicher geschaltet, mit dem Ziel, hohe Entladestromspitzen beispielsweise bei Beschleunigungen von E-Motoren, in den Batteriezellen zu minimieren und die Lebensdauer der Batterie zu maximieren. Ähnliche Anwendungen finden sich in der Forschung und Entwicklung zur E-Mobilität, bei der neben den Beschleunigungen auch die zur Batterie zurückgespeisten Leistungsspitzen beim Bremsen durch die Supercaps reduziert werden.

Eine frühere Anwendung eines hybriden Energiespeichersystems für den Einsatz in FTS/AGV besaß einen Supercap-Speicher als primäre, mobile Energiequelle, wohingegen der Batteriespeicher als sekundäre Back-up-Lösung agiert hat. Bei Unterschreiten der minimalen Spannung des Supercap-Speichers wird bei diesem System auf die Batterie als alleinige Energieversorgungsquelle umgeschaltet. Dies ist beispielsweise im Stand-by-Betrieb über das Wochenende oder bei längeren Wartezeiten ohne Ladesystem der Fall.

Ansmanns aktuelles, hybrides Energiespeichersystem weist in Form des Prototyps ebenfalls einen primären Supercap-Speicher (Doppelschichtkondensatoren, DSK) und einen sekundären Akkuspeicher (Batterie) auf. Allerdings liegt in diesem Fall eine völlig andere interne Interaktion der beiden Komponenten vor. Bewusst wird hier innerhalb des Betriebs durch das intelligente Energiemanagementsystem (EMS), in Abhängigkeit von aktuellen Betriebsparametern, das jeweilige Energiespeichersystem als alleinige Energiespeicherquelle für das FTS/AMR über das Energieoperationsboard (EOB) aktiviert, wie in **Bild 2** dargestellt.

Neben der elektrischen Verbindung von Supercap-Speicher und Batteriespeicher mit dem EOB sind dabei auch die Batteriemanagementsysteme (BMS) des Supercap-Moduls und des Batteriemoduls mit dem zentralen Energiemanagementsystem des hybriden Energiespeichersystems verbunden. Dort werden auf Basis eines speziell entwickelten Systems des Partners Ansmann wichtige Statusinformationen wie Ladezustand, Gesundheitszustand, Temperaturen, Strom und Spannung abgefragt und kommuniziert.

In **Bild 3** ist das Schaltungsdesign des HESS dargestellt. DCDC1 und DCDC2 sind die zu den Verbrauchern Antriebe und Steuerung zugehörigen Spannungswandler, wie in Bild 1 rechts dargestellt. Der DCDC3 entspricht dem Onboard-Ladecontroller (OLC) und die Umschaltvorrichtungen Schalter1 und Schalter2 sind die Hauptbestandteile des EOB. Die Umschaltvorrichtungen sind modular mit leistungselektronischen Bauteilen ausgeführt und skalierbar auf die jeweils benötigte Leistungsklasse entwickelt worden (**Bild 4**). Die Toplevel-Steuerung des Energiemanagementsystems des HESS folgt der Logik einer Zustandsmaschine mit insgesamt 7 Zuständen (**Bild 5**): Laden, StandbySC+, StandbySC, StandbyBat, AktivSC+, AktivSC und AktivBat. Das »+« bezeichnet das Laden der Batterie durch den Supercap während der Fahrt. Während der Ausgangszustand das Laden des SC ist, bei dem zugleich die Batterie aus dem Supercap geladen wird,



(Bild: Ansmann)

Bild 3. Darstellung des Schaltungsdesigns mit zwei Umschaltvorrichtungen (Schalter1 und Schalter2).

kann bei einem neuen Transportauftrag abhängig von dem zu erwartenden Energiebedarf des Fahrzeugs bis zur nächsten Ladestation in den Zustand AktivSC+ oder AktivSC gewechselt werden. Im Falle mehrerer verketteter Transportfahrten, bei denen keine Ladestation auf der Route liegt, kann die gespeicherte Energiemenge des SC nicht ausreichen. In diesem Fall wird in den Zustand AktivBat gewechselt. Dasselbe gilt für die Stand-by-Zustände. Durch das im Forschungsprojekt entwickelte Dimensionierungsverfahren für hybride Energiespeichersysteme lässt sich weiterhin ein für den Anwendungsfall optimale Energiespeichergröße beider Module berechnen, was bei Reduzierung der benötigten elektrochemischen, schwierig recyclebaren Energiespeicherzellen einen großen Beitrag zur Nachhaltigkeit leistet.

Praktische Umsetzung bei Ansmann

Bei den ursprünglichen theoretischen Berechnungen des IFL wurden verschiedenste praktische Aspekte bewusst außer Acht gelassen. Darum bestand die größte Herausforderung für das Ansmann-Entwicklungsteam darin, die Zellen optimal zu überwachen und die tatsächliche Auswahl der genutzten Komponenten und Steuerungen im System so vorzunehmen, dass sie alle Anforderungen auch im täglichen Einsatz erfüllen konnten. Berücksichtigt werden mussten dabei unter anderem der vorhandene Bauraum, die Effizienz der genutzten Konverter und Speicher, die konkreten Anforderungen

an das Handling der Ströme und Ladungen sowie die Alterungsprozesse von Caps und Zellen sowie deren Überwachung im System. So hängt die Speicherkapazität C eines Kondensators im Wesentlichen von der Oberflächengröße der Elektroden und ihrem Abstand zueinander ab.

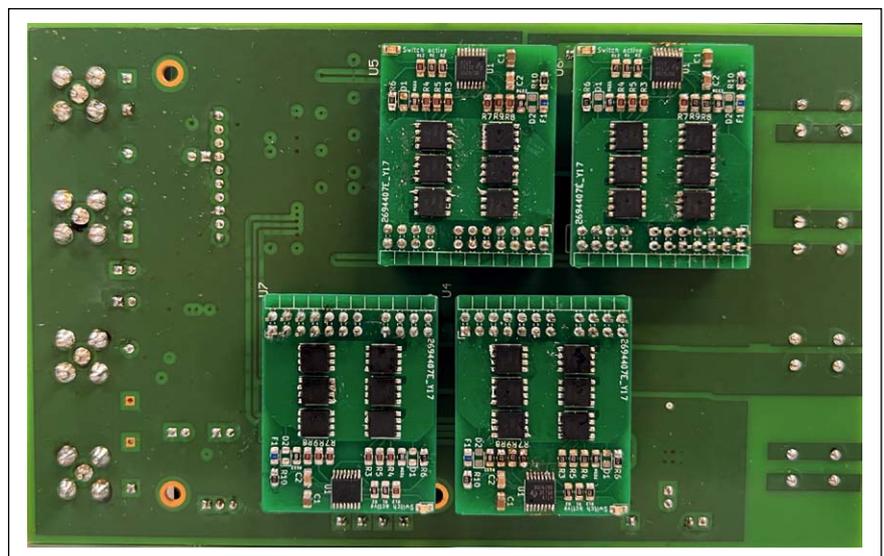
Nach Test und Sichtung verschiedener Supercaps im Hinblick auf Leistung, Preis, Bauraum und Verfügbarkeit, fiel die Wahl des Ansmann-Entwicklungsteams auf die Superkondensatoren DSF3577Q3R0 und DSF477Q3R0 von Cornell Dubilier mit Leiterplattenstiften zur Durchkontaktierung auf einer Platine, mit einer Nennspannung von je 3 V (DC). Konfiguriert werden können diese im vorliegenden Gerät – zur einfachen Anpassung an den Kundenbedarf – modular: von 20s1p bis 20s4p für die vierfache Leistung, bei einer Modulnennspannung von 60 V (DC). Dabei

richtet sich die Konfiguration nach der Kundenanwendung. Größere Module sind ebenso möglich.

Bei den Zellen des Akkus im aktuellen Prototyp handelt es sich um 18650-Lithium-Ionen-Hochleistungszellen von LG in einer 14s1p-Konfiguration, die eine Nennspannung von 35 bis 51,6 V aufweisen. Wobei nach Angaben des Entwicklerteams auch nichts gegen den Einsatz anderer Zellgrößen oder -chemien wie beispielsweise Lithium-Eisen-Zellen oder 21700er-Baugrößen spricht.

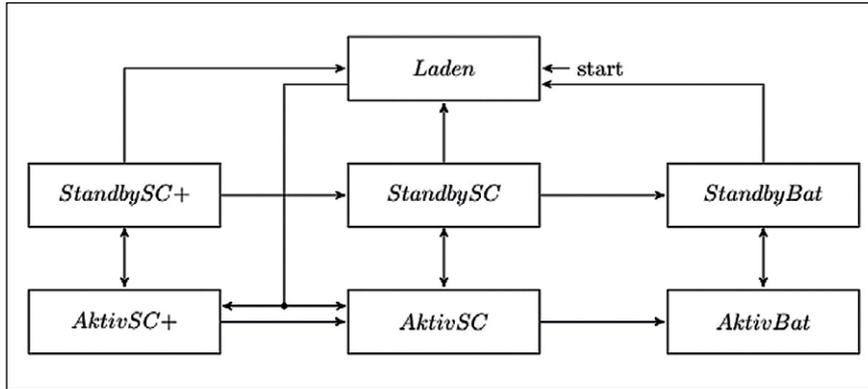
Als Verbindung zwischen Batterie und Doppelschichtkondensator-Modul fungiert ein von Ansmann entwickelter Onboard Ladecontroller (OLC). Dieser reguliert den Energiefluss zur Batterie. Muss diese geladen werden, so wird die Energie von Supercap zum Li-Ion-Modul geleitet. Der Stromfluss beider Module – geht an das HESS-Modul, welches den Energiefluss zum Rest des Fahrzeuges regelt, indem es vorgibt, ob Energie aus Supercap oder Akku genutzt werden soll. Es steuert somit den Energiefluss und reguliert das Ladeverhalten des Systems.

Damit liegt die erreichbare Gesamtkapazität des Supercap-Moduls für den Betrieb der FTS und AMR (modular) zwischen 8,75 Wh (bei 20s1p/350F) bis 60 Wh bei einer vierreihigen 4p/600-F-Konfiguration und dem Einsatz des größten im Prototyp getesteten Super-



(Bild: Ansmann)

Bild 4. Realisierung der Umschaltvorrichtungen für die Positionen P1 und P2 von Switch1 und Switch2.



Control-Strategie im AGV als Toplevel-Zustandsmaschine des Energiemanagements (angelehnt an Sperling und Kivelä 2022). (Bild: Ansmann)

caps. Die durchschnittliche Anzahl der möglichen Ladezyklen der Lithium-Ionen-Speichers verdreifacht sich durch den Einsatz der Superkondensatoren als Hauptenergieträger. Zugleich wird durch die Optimierung der Ladeparameter zwischen Supercaps und Zellen die Zyklenfestigkeit des Packs erhöht. Letztlich können durch den eingeschränkten Nutzbereich pro Zelle auf 3,0 bis 4,1 V statt 400 insgesamt mehr als 1000 Ladevollzyklen des Akkupacks erreicht werden. Im praktischen Einsatz kommt das Gerät in der Praxis damit auf mehrere 1000 Ladungen, da die Zelle im Einsatz nie Vollzyklen fährt. Als besondere Herausforderung bei der Verwendung von Supercaps als Energiespeicher erwies sich dabei das Balancing, da die Ströme durch den Einsatz der Superkondensatoren deutlich höher waren als in herkömmlichen Batteriepacks. Daraus ergeben sich besondere Ansprüche an das Wärmemanagement: Um die entstehende Wärme leichter abführen zu können, wurden die Balancing-Ströme auf mehrere Lastwiderstände verteilt. Ebenso wurde darauf geachtet, viel Kupferfläche unter den Widerständen zu haben, und dies auch über mehrere Leiterplatten-Layer, um die Wärme gleichmäßig über die Platine abführen zu können. Auch bei den Leiterbahnen galt es neue Wege zu gehen, da diese üblicherweise für eine weniger hohe Strombelastbarkeit ausgelegt werden. Im neuen Prototyp waren deutlich dickere und breitere Leiterbahnen nötig als sonst üblich – ebenfalls über mehrere Leiterplatten-Layer.

Zusätzlich wurde bei der Entwicklung dieser hybriden Akkusysteme für FTS in noch deutlich höherem Umfang als üblich auf Modularität geachtet: An sich ist das Grundsystem anderen Ansmann-Akkusystemen sehr ähnlich. Während jeder Standard-Akku normalerweise ein eigenes BMS hat, ist bei diesen Geräten alles modular und per Plug-and-play zwischen den Leistungsklassen austauschbar.

Dimensionierung des Systems

Um ein solches Hybridsystem in der Praxis beim Kunden unterbrechungslos betreiben zu können, ist darüber hinaus besonderes Know-how bei der statistischen Auslegung des Systems für die konkrete Kundenanwendung erforderlich. Seit Jahren wird am IFL hierzu geforscht.

Für die Dimensionierung eines hybriden Energiespeichersystems sind folgende Faktoren von hoher Wichtigkeit: die minimale, maximale und durchschnittliche Transportdistanz beziehungsweise die Verteilung der Transportdistanzen, die Häufigkeiten und Auftretswahrscheinlichkeiten von spezifischen Transportaufträgen, die zu berücksichtigende Wahrscheinlichkeit des Auftretens aufeinanderfolgender Transportaufträge ohne Ladestationen auf der Route sowie die Verteilung von Ladestationen im Transportlayout. Weiterhin sind auch die Fahrzeugparameter wichtig, wie etwa der Energiebedarf der Fahrtriebe, Fahrzeugsteuerung inkl. der Sicherheitstechnik und der Sensorik sowie des Lasthandling-Systems.

Wie in Untersuchungen am IFL gezeigt wurde, ist der Einfluss des Energiebedarfs der Fahrzeugsteuerung mindestens genauso groß, wie der Energiebedarf der Antriebe.

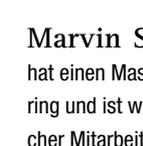
Speziell bei dem hybriden Energiespeichersystem ist weiterhin bei der Dimensionierung auf das Nutzungsverhältnis zwischen Batterie und SC zu achten, bei dem ein 80/20-Verhältnis (SC/BAT) SC-seitig nicht unterschritten werden sollte. Demnach muss das SC-Modul mindestens so groß dimensioniert werden, dass für 80 Prozent aller Transportaufträge, beziehungsweise aller Verkettungen von Transportaufträgen bis zum Erreichen einer auf der Transportroute liegenden Ladestation, das FTS durch den SC gespeist werden kann.

Fazit und Ausblick

Grundsätzlich ist ein HESS sinnvoll für jede Anwendung im Dauerbetrieb, bei der die Verteilung des Energiebedarfs sowie die Wahrscheinlichkeit, eine Ladestation zu erreichen, bereits bei Dimensionierung des Systems bekannt ist. Dies träge neben Logistiksystemen und ARMs beispielsweise auch für elektrifizierte Linienbusse oder elektrifizierte Zustellfahrzeuge im urbanen Raum zu, bei denen sich der Abruf von elektrischer Energie in regelmäßigen Zyklen wiederholt. eg



René Eschenweck
hat sein Studium mit einem Bachelor of Science abgeschlossen und arbeitet als Innovationsingenieur bei Ansmann.



Marvin Sperling
hat einen Master of Engineering und ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).



Miriam Leunissen
schloss ihr Journalismusstudium mit Diplom ab und arbeitet als freie Technologiejournalistin.