

Lademanagement in der Tiefgarage

Immer mehr Elektrofahrzeuge kommen auf den Markt, sodass man sich als Elektroplaner auch über die sinnvolle Ladeinfrastruktur Gedanken machen sollte. Welche Lösungskonzepte bieten sich an, welche Eigenschaften haben diese und welche Bedeutung hat dabei das Lademanagement? Auf diese und weitere Fragen geht der folgende Artikel ein.

Markus Gehrig*

Nicht jeder Investor sieht die Notwendigkeit einer Ladeinfrastruktur oder ist bereit, dafür im Voraus Geld auszugeben. Dennoch gibt es einige gute Argumente, eine kostengünstige Grundinstallation bereitzustellen.

Dazu meine erste Analyse: Heute sind in Unterniveaugaragen meist erst ein paar vereinzelte Elektrofahrzeuge anzutreffen. Andere Leute haben sich vielleicht schon mit der Anschaffung beschäftigt und warten zu, bis die Ladeinfrastruktur erstellt ist. Wiederum andere sehen eine Anschaffung in absehbarer Zeit nicht. Diesem Umstand sollte Rechnung getragen werden. Also sollte die Ladeinfrastruktur idealerweise mit diesem Bedürfnis einhergehen.

Der Autor dieses Beitrags hat zudem die Erfahrung gemacht, dass bei einer in Etappen zu realisierenden Installation (gleich welcher Art) vom Endausbau ausgegangen werden sollte, denn damit kann der grösstmögliche Nutzen erzielt werden. Konzeptlose Leerrohre sind darum oft Fehlinvestitionen. Also machen wir uns zuerst einige Gedanken über das Erschliessungskonzept.

Sternförmige Erschliessung

Diese Erschliessungsart ermöglicht den Anschluss an den Wohnungszähler in der Hauptverteilung und erspart weitere Zähler. Die Skalierbarkeit ist hier sehr gross und in einem ersten Schritt sind nur Leerrohre ab der Hauptverteilung und dem Platz für die Sicherungen erforderlich. Allerdings sind da relativ viele Leitungen nötig; deshalb ist diese

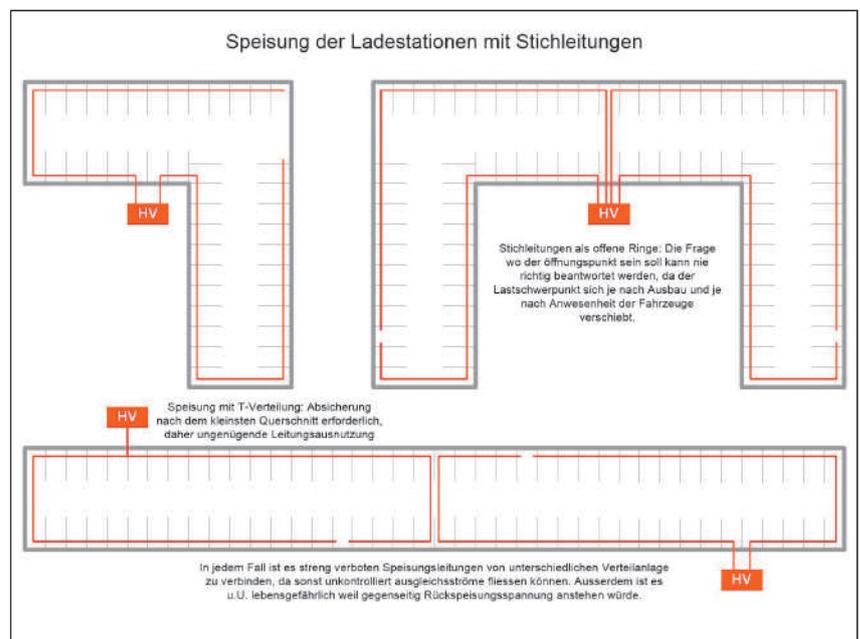
Erschliessungsart nur für wenige Ladeeinrichtungen geeignet.

Stichförmige Erschliessung

Die Erschliessung im Stich ergibt eine hohe Belastung an der Speisungsstelle und muss entsprechend dimensioniert werden. Je nach Geometrie und Grösse der Tiefgarage sind allenfalls mehrere Stichleitungen sinnvoll. Die Messung erfolgt jeweils beim Ladepunkt und jeder Ladepunkt muss über einen MID-tauglichen Zähler verfügen. Heute gibt es dazu schon sehr gute, teilweise sogar vollautomatische Abrechnungssysteme wie zum Beispiel von Smart-me bzw. von eCarUp.

Ringförmige Erschliessung

Eine ringförmige Erschliessung mit offenem Ring hat den Nachteil, dass der Lasttiefpunkt nicht bestimmt werden kann, da sich dieser je nach Anzahl und Ort der anwesenden Fahrzeuge verschiebt. Dieser Nachteil kann mit einer geschlossenen Ringleitung behoben werden. Der Nachteil des etwas grösseren Magnetfeldes durch die grossflächige Schlaufe kann in der Regel in einer Tiefgarage vernachlässigt werden. Der Erdschluss am Fehlerort ist eine Funktion der beiden Leitungslängen bis zur Speisungsstelle (Überstromunterbrecher an beiden Enden). Im Extremfall ist der



Stichleitungserschliessung. (Bilder: MG Power Engineering AG)

eine Leitungsabschnitt bis zum Fehlerort sehr kurz und der andere sehr lang. Im Fehlerfall teilt sich der Kurzschlussstrom proportional mit dem Scheinleitwert (Betrag der Admittanz) auf, was zur Folge haben kann, dass das Schutzgerät am kürzeren Abschnitt schneller auslöst als das andere. Somit muss gewährleistet sein, dass die Abschaltbedingung am Ende der Ringleitung mit nur einem eingeschalteten Schutzgerät eingehalten wird.

Ferner wären Spaltschalter mit Richtungserkennung entlang des Ringes eine technisch herausragende, aber auch sehr teure Lösung, die sich nur in sehr grossen Tiefgaragen lohnt. Im Fehlerfall würde der Ring in zwei Stiche aufgeteilt. Mit einer Art Richtungsvergleichschutz, also mit einer Zonen-selektivität, könnte das Problem auch gelöst werden; dazu müsste aber ein virtueller Öffnungspunkt definiert werden. Damit könnte eine sehr schnelle selektive Abschaltung erreicht werden.

Aber Achtung: Zwei Einspeisungen von unterschiedlichen Verteilungen auf einen gemeinsamen Ring oder einen an beiden Enden gespeisten Stich sind nicht zulässig, da dies zu Ausgleichsströmen führen kann und gefährliche Rückspeisungsspannung entstehen kann.

Dimensionierung

Dann stellt sich die Frage, wie gross denn eine Leitung dimensioniert werden soll. Dazu finden Sie in den Tabellen 1 und 2 ein Beispiel. Eine minimale Grundinstallation besteht aus einem

Begriffe

Abkürzung	Bedeutung
Admittanz	Komplexer Leitwert (AC), entspricht dem Kehrwert der Impedanz. Die Admittanz einer Leitung ist nach dem ohmschen Gesetz das Verhältnis eines sinusförmigen Wechselstroms, der durch die Leitung fliesst, zu der sinusförmigen Wechselspannung, die daran abfällt.
BMS	Batteriemanagementsystem
MID	Messgeräte-Richtlinie (Richtlinie 2004/22/EG über Messgeräte), engl. Measuring Instruments Directive, abgekürzt MID. Die Richtlinie gilt für alle Arten von Zählern. Für die Elektrizitätszähler (Wirkenergie) gilt MI-003, sie gilt auch in der Schweiz insbesondere zum Zweck der Verrechnung.
Median	Zentralwert, anders als beim arithmetischen Mittelwert (Durchschnitt) wird hier der Wert ermittelt, der in der Mitte gleich vieler grösserer und kleinerer Werte liegt. Damit werden sehr kleine und sehr grosse Werte weniger stark berücksichtigt.
Mod3	Ladebetriebsart 3 mit Pilotfunktion und Ladeleistungsbegrenzung (siehe ET 8/18, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge)

oder mehreren genügend dimensionierten Elektroröhren. Als grobe Abschätzung der Ladezeit kann die durchschnittliche Kapazität von Elektrofahrzeugen, derzeit etwa 24 kWh, angenommen und diese durch die maximale Steckdosenleistung dividiert werden. Allerdings ergibt sich daraus ein zu optimistisches Resultat, denn die Ladezeit nimmt gegen Ende der Ladung zu, daher sollte jeweils eine Stunde dazugerechnet werden. Ausserdem nimmt auch die Ladedauer bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt und über 25 °C zu, da bei tiefen Temperaturen die chemischen Prozesse länger dauern und bei hohen Temperaturen bei Elektrofahrzeugen eine batterieschonende Kennlinie gefahren wird.

Für die Ladestation in der Unterniveau-garage kann also mit guter Nähe-

rung die folgende Formel verwendet werden:

$$\text{Ladezeit } t = \left(\frac{\text{Ladekapazität}}{\text{Ladeleistung}/\eta} + k \right) \cdot (1 - R)$$

Mit:

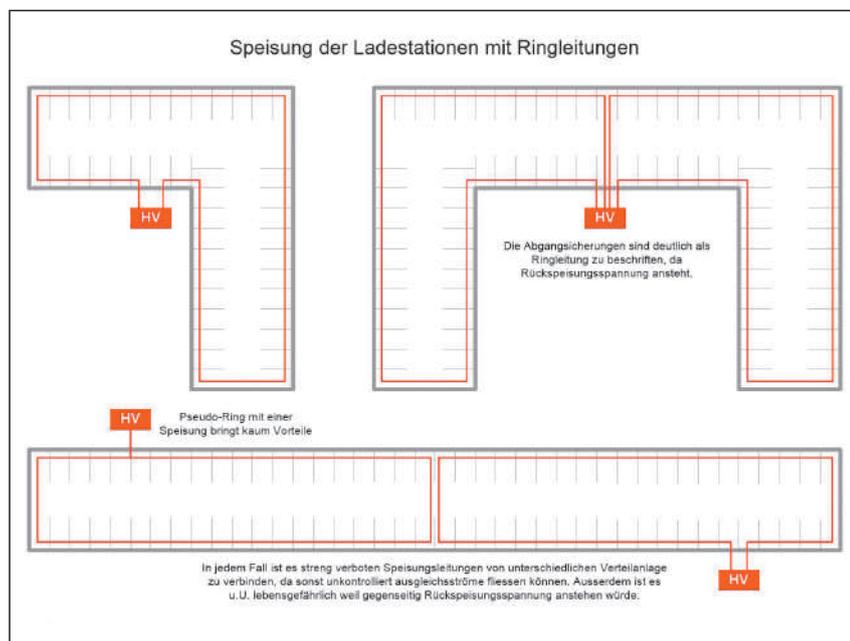
R = Reduktionsfaktor für die Restladung (z. B. 10 %) und den angestrebten Endladezustand (z. B. 80 %), der erreicht werden soll.

k = Konstante als ungefähre Annäherung der nicht linearen Ladekurve.¹

Die Ladekapazität ist je nach Fahrzeug stark unterschiedlich. Je nach Quelle beträgt die Batteriekapazität im Durchschnitt etwa 24 kWh (Stand Dez. 2018). Eine Auswahl von gängigen Elektrofahrzeugen hat einen Median von 32 kWh ergeben. In Tabelle 1 wurde mit der genannten Formel die Ladedauer ermittelt. Allerdings ist auch der Faktor für die Restladung sehr vorsichtig geschätzt. In der Praxis ist oft weit mehr Restladung vorhanden, wenn das Fahrzeug wieder an die Ladestation kommt. Zu beachten ist auch, dass nicht jedes Fahrzeug in der Lage ist, die volle Ladeleistung aufzunehmen, welche die Ladesäule oder Wallbox hergibt (mit einer Leistung von 6.9 kW, also 10 Ampere Drehstrom am 400-Volt-Netz, können die meisten Fahrzeuge innert 6 Stunden geladen werden).

In der Tabelle 2 werden drei verschiedene Nutzerprofile angenommen:

Der brave Familienvater, der um 17.30 Uhr gleich nach Feierabend nach Hause kommt und um 6.30 Uhr wieder zur Arbeit geht. Der «Vereinsmeier» und der «Workaholic», welche erst um 20.30 Uhr nach Hause kommen, müssen aber ebenfalls um 6.30



Ringleitungserschliessung.

Tabelle 1: Ladedauer Elektrofahrzeuge für 70% Ladung (10% bis 80%)

Anschluss	Max. Leistung	Renault Twizy 6.1 kWh	Smart EQ 17.6 kWh	Renault Zoe Z.E. 22 kWh	BMW i3 28 kWh	VW Golf 36 kWh	Nissan Leaf 40 kWh	Audi e-tron 95 kWh	Tesla S 100D 100 kWh	Median Zentralw. 32 kWh
Haushaltsteckdose	2.3 kW	2.8 h	6.7 h	8.1 h	10.2 h	12.8 h	14.2 h	32.8 h	34.5 h	11.5 h
Typ 2	6.9 kW	–	2.7 h	3.2 h	3.9 h	4.7 h	5.2 h	11.4 h	12.0 h	4.7 h
Typ 2	11.0 kW	–	1.9 h	2.3 h	2.7 h	3.2 h	–	7.4 h	7.8 h	3.0 h
Typ 2	22.0 kW	–	1.3 h	1.5 h	–	–	–	4.1 h	4.2 h	2.8 h

Tabelle 2: erforderliche Ladeleistung

Ladung 10%–80%		Ankunft	Abfahrt	Ladezeit	Anzahl Fahrzeuge	Erforderliche Ladeenergie	Erforderliche Ladeleistung
Ladezeit lang	Familienvater	17.30 h	6.30 h	13 h	10	223 kWh	17.2 kW
Ladezeit mittel	Vereins-Meier	20.30 h	6.30 h	10 h	10	223 kWh	22.3 kW
Ladezeit kurz	Nachtschwärmer	23.30 h	7.30 h	8 h	10	223 kWh	27.9 kW
Summen					30	670 kWh	67.4 kW
Ladezeit im Durchschnitt:		6 h		Erforderliche Stromstärke:		97.7 A	
Erforderliche Ladung in % und kWh		70%	22.33 kWh		Verfügbare Energie bei 14 h:		944 kWh
Wirkungsgrad		0.9		Noch verfügbare Volllaststunden (67.4 kW):		4.1 h	

Uhr wieder raus. Der Nachtschwärmer kommt dann erst um 23.30 Uhr nach Hause und geht dafür erst um 7.30 Uhr wieder weg. So gibt es laut Annahme je 10 Autofahrer dieser verschiedenen Typen. Hausmänner und Homeworkerinnen laden ihr Auto tagsüber; diese lassen wir in dieser Betrachtung aussen vor, da sie nicht kritisch für den Engpass sind.

Wir rechnen, dass jedes Auto durchschnittlich mit 10% Restladung ankommt und mit mindestens 80% Ladung am Morgen wieder losfahren soll.

Somit benötigt jedes Fahrzeug 70% der maximalen Ladekapazität.

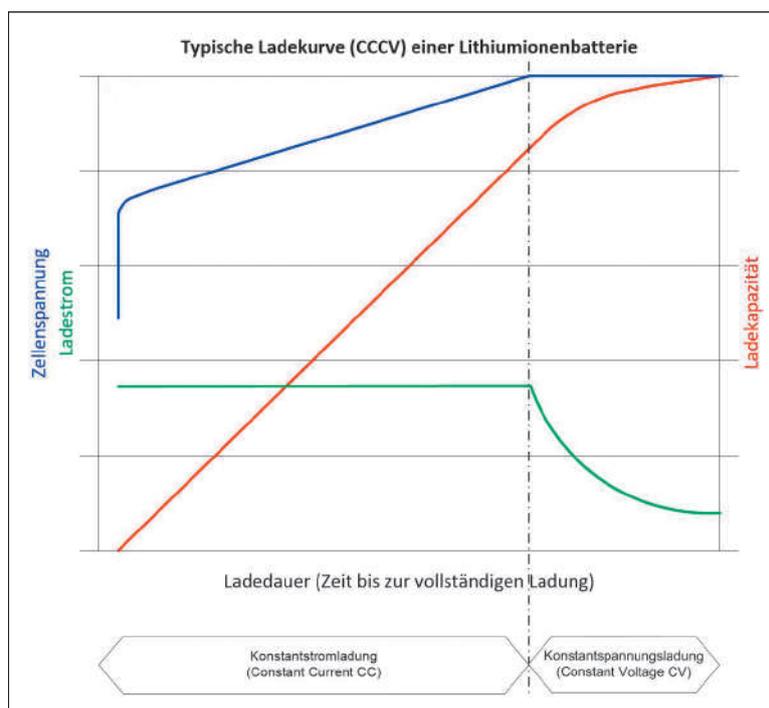
Aus der Tabelle 2 geht hervor, dass für dieses angenommene Nutzerprofil eine Leistung von 67.4 kW oder knapp 100 A verfügbar sein muss. Mit der Leistung von 67.4 kW würde in der insgesamt verfügbaren Zeit von 17.30 bis 7.30 Uhr, also 14 Stunden, eine Energiemenge von 944 kWh, also fast die Hälfte der erforderlichen Energie, mehr zur Verfügung stehen. Das entspricht weiteren 4.1 Volllaststunden. Mit einem guten Lastmanagement ist das System längst nicht ausgelastet.

Die Leitung kann nun als Stichleitung für 100 A oder als Ringleitung mit 63 A ausgelegt werden. Dazu könnte ein Flachkabel verwendet werden wie zum Beispiel Wieland podis CON. Damit lässt sich einfach eine Grundinstallation erstellen und es können später beliebig Ladestationen angeschlossen werden. Bei der Ringleitung muss allerdings der Lastfluss geprüft werden. Dieser ergibt sich aus der Geometrie der Garage und dem effektiven Kabel. Wie das gerechnet wird, hat der Autor bereits in ET2/18² erklärt. Damit haben wir den Endausbau für eine Unterniveaugarage mit 30 Einstellplätzen berechnet und das unter der Voraussetzung, dass alle innerhalb von 14 Stunden laden wollen. Das lässt sich natürlich beliebig skalieren.

Ettappierung

Als Grundinstallation können im einfachsten Fall die Rohrinstallation zur Garage und die Auslegung der Hauptverteilung angesehen werden. Auch der Hausanschluss sollte entsprechend dimensioniert werden. Allerdings fallen da auch Anschlussgebühren an. Daher ist die Kombination von Photovoltaik und Speicher ebenfalls zu prüfen.

Will man bei der Grundinstallation weiter gehen, was meistens der Fall ist, wenn die ersten konkreten Bedürfnisse angemeldet werden, ist zusätzlich die gesamte Kabelinstallation auszuführen. Bei der Flachkabelinstallation können später im Rahmen der Vollausbauplanung beliebig viele Ladestationen angeschlossen werden.



Typische Ladekurve.

Abrechnung und Lastmanagement

Im Weiteren ist zu beachten, wie alles abgerechnet werden soll. Dazu gibt es verschiedene Lösungen. Bei eCarUp hat man eine besonders einfache und clevere Lösung gefunden: Die Abrechnung funktioniert über eine vollautomatische Cloudlösung, welche über eine App bedient werden kann. So kann der Ladepunkt u. a. auch geteilt werden. Das integrierte Lastmanagement verteilt die momentan verfügbare Energie aufgrund der erhobenen Echtzeitdaten und aufgrund der Leitungsabsicherung über einen speziellen Algorithmus auf die anwesenden Elektrofahrzeuge. Dieser gibt dem Mod3-Controller in der Ladestation das entsprechende Signal zur Freigabe einer bestimmten Ladeleistung. Ferner ist bis ca. Ende 2019 auch eine Integration von Gebäudedaten inkl. Photovoltaik und Speicher zu erwarten.

Auch Schneider Electric bietet ein Lademanagement für mehrere Ladepunkte an. Hier können Szenarien vorgewählt werden: gleichmässiges Reduzieren der Leistung bei einem Engpass und Reduzieren der höchsten Leistungen. Auch eine Bevorzugung durch eine VIP-Karte ist möglich. Bis zu 200 Ladepunkte können geregelt werden. Dabei können auch Asymmetrien durch einphasige Ladung ausgeglichen werden. Das System bietet auch eine Schnittstelle (OCPP) zu einem Back End für verschiedene Abrechnungslösungen.

Algorithmen

Da stellt sich natürlich auch die Frage, wie solche Algorithmen funktionieren.

Über das optimierte Laden von mehreren Elektroautos wurde schon viel nachgedacht. Am KIT wurde beispielsweise eine interessante Forschungsarbeit verfasst, wie ein Lademanagement für einen Flottenbetreiber und einen Ladeinfrastrukturbetreiber unter Einbezug der Akteure und des Energiemarktes aussehen kann. Die Optimierung orientiert sich einerseits am biologischen Evolutionsprozess, der bereits früher mathematisch erfasst wurde, und an den Scheduling-Prozessen der Organisationslehre sowie anderen Algorithmen. Die so ermittelten Parameter werden je nach Netzauslastung und Verfügbarkeit von lokalen erneuerbaren Energien zur Optimierung der Ladekurve und der Verschiebung der Last verwendet.

Das Lastmanagement kann auch helfen, einen Netz- oder Hausanschlussausbau zu vermeiden. Es optimiert innerhalb von harten und weichen Grenzen. Die harten Grenzen dürfen nicht verletzt werden, da die Funktion als Ganzes gefährdet wäre.

Harte Grenzen sind zum Beispiel die Lastgrenze – vorgegeben durch den Überstromunterbrecher oder durch die Einspeisekapazität von erneuerbarer Energie –, wenn das so festgelegt wird. Aber auch wenn die Ladefunktion immer zwischen minimaler und maximaler Ladeleistung oder null sein soll, zählt zu den harten Grenzen. Bei den weichen Grenzen handelt es sich um Kriterien, die gewünscht sind, jedoch vom Lademanagement nicht garantiert werden können. Das Lademanagement strebt die Einhaltung möglichst optimal

an, denn das Nichterfüllen führt zu einer schlechteren Bewertung der Lösung gegenüber der Konkurrenz. Zu den weichen Grenzen zählen, dass die Fahrzeuge am Ende des Ladevorgangs die gewünschte Energiemenge erreicht haben. Die harten Grenzen können die Einhaltung der weichen Grenzen im Falle eines Engpasses einschränken. Bei den harten Grenzen wäre es wünschenswert, wenn beide Speisungspunkte einer Ringleitung überwacht werden können.

Fazit

Mit ausgereiften Lastmanagement-Algorithmen können in Zukunft auch die Installationen besser ausgelastet, erneuerbare Energien geschickt genutzt und auch andere Lasten optimiert werden. Die derzeit bekannten marktgängigen Lademanagement-Lösungen überzeugen noch nicht vollends. Ursprünglich war bei Mod3 in den Normen 61851 und 62196 das Auslesen des Ladezustandes (SoC) nicht vorgesehen. In naher Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass das Auslesen des SoC nach ISO 15118 rasch umgesetzt wird. Das Zuwarten mit der Investition in das Lademanagement dürfte klug sein. Hingegen sollte die Elektroinstallation vorangetrieben werden. ■

Quellenverzeichnis

- Anton Karle, Elektromobilität Grundlagen und Praxis, Hanser Verlag, 3. Auflage, 2018
- Peter Kurzweil/Otto K. Dieltmeier, Elektrochemische Speicher, Springer Vieweg, 2015
- Fraunhofer-Institut, Technische Begleitforschung Allianz Elektromobilität, Abschlussbericht 2016
- Sarah Katharina Detzler, Lademanagement für Elektrofahrzeuge, Diss. am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- Markus Gehrig, Energiespeicher heute und morgen, Zeitschrift Elektrotechnik ET 4/17, 2017
- Markus Gehrig, Elektrische Verteiltechnik, Zeitschrift Elektrotechnik ET 2/18, 2018
- Markus Gehrig, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge, Zeitschrift Elektrotechnik ET 8/18, 2018

Erläuterungen

- ¹ Die einschlägige Literatur macht hier unterschiedliche Angaben. Der Autor hat eine pragmatische Lösung aufgezeigt. Die Begründung finden Sie im Kasten.
- ² ET 2/18, Elektrische Verteiltechnik, S. 12
- ³ Kurzweil/Dieltmeier, S. 19 (Lithiumbatterien), 95 % und Ladegerät etwa 95 %. Der ADAC hat eine Messung des benötigten Ladestroms für verschiedene Elektrofahrzeuge durchgeführt: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- ⁴ Fraunhofer-Institut, Technische Begleitforschung Allianz Elektromobilität, Abschlussbericht, S. 17 ff.

Autor

*Markus Gehrig, dipl. El.-Ing. HF/REG B, Ausbilder mit eidg. FA, Dozent an der Höheren Fachschule der IBZ für die Fächer Schutz- und Leittechnik sowie Anlagenbau/Energietechnik, MG Power Engineering AG, m.gehrig@powerengineering.ch.

Links

web.ecarup.com
wieland-electric.com
download.schneider-electric.com

Laden eines Lithium-Ionen-Akkus

Jeder Lithium-Ionen-Akku hat ein internes Batteriemanagementsystem (BMS), welches die Ladung des Akkus steuert und auch den Akku vor Tiefentladung schützt (vgl. ET 4/17, Energiespeicher heute und morgen). So steuert das BMS auch die bei Li-Ion-Akkus kritische maximale Ladespannung, welche je Zelle den Wert von 4.2 Volt bei einer Ladung von über 80 % nicht überschreiten darf. Bei geringerem Ladestand sind die Akkus weniger empfindlich. Daraus ergibt sich zwangsläufig eine Abflachung der Ladekurve am Ende der Ladedauer. Das Ladegerät lädt den Akku nach dem CCCV-Verfahren (Constant Current Constant Voltage), was heisst, dass der Akku bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung mit konstantem Strom und danach mit konstanter Spannung geladen wird (siehe Abb. 3). Daher wird bei einer Schnellladung nur etwa 80 % der Kapazität genutzt. Daraus wird eine Ladezeitverlängerung von etwa einer Stunde approximiert. Die Leistung wird um den Wirkungsgrad erhöht, womit die erforderliche Leistung aus dem Netz errechnet wird. Der Wirkungsgrad setzt sich aus dem Ladewirkungsgrad der Ladestation (Netzgerät für Steuerung) des Akkus und des Ladegerätes zusammen. Er beträgt zusammen mindestens 90 %³. Der Entladewirkungsgrad ist hier nicht relevant und hängt auch mit der Entladedauer zusammen.

Die vereinfachten Berechnungen sind erforderlich, da in der Praxis die Ladekurven der verschiedenen Fahrzeuge sehr unterschiedlich sind⁴.