

Wissenschaftliche Begleitforschung in der Elektromobilitäts-Region VLOTTE

Andreas Schuster*, Christoph Leitinger

TU Wien – Inst. für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, Gußhausstr. 25/E373-1
1040 Wien, +4315880137334, schuster@ea.tuwien.ac.at, <http://www.ea.tuwien.ac.at>

Kurzfassung: Im Rahmen dieser Begleitforschung werden die eingesetzten Elektrofahrzeuge und die Ladestellen mittels Monitoring genauer analysiert, um Optimierungspunkte in den zukünftigen Anwendungen zu finden. Die umfangreichen Einzel-, Messreihen und Dauer-messungen zeigen die Probleme der derzeit verwendeten ZEBRA-Batterien sehr deutlich. Im Gegensatz zu den Li-Ionen-Zellen benötigen sie nach längerer Stillstandszeit zusätzliche Heizenergie in der Größenordnung von 0,165 kWh/h. Der reine Fahrverbrauch liegt bei rund 20,3 kWh/100km, wobei durch Rekuperation etwa 1,2 kWh wiedergewonnen wurde. Auch die Aufladeverluste von rund 25% geben Anlass die akt. Leistungselektronik zu verbessern.

Keywords: Elektromobilität, Modellregion, Ladestellen, Monitoring

1 Einleitung

Durch das Umsetzungsprojekt „VLOTTE“ unter anderem sind mehr Elektrofahrzeuge denn je auf Österreichs Straßen unterwegs. Mit Stichtag 16. Juni 2009 sind bereits 30 Elektrofahrzeuge in Vorarlberg im täglichen Verkehr unterwegs.[3] Der baldige Erfolg dieser wird einerseits durch die/den FahrerIn bzw. KäuferIn bestimmt und andererseits Einfluss auf die technische Realisierung der Elektroautos, Ladestellen und Energiebereitstellung haben. Deshalb und um zukünftige Systeme zu optimieren, ist es schon in der frühen Phase wichtig, die Erkenntnisse aus den ersten Modellregionen präzise zu bestimmen und die Daten der Fahrzeug-, Ladestellen- und Energieverteilungskomponenten wissenschaftlich zu erheben. Die Aufgaben der TU Wien bei dieser Begleitforschung in VLOTTE sind das Fahrzeug- sowie Ladestellenmonitoring.

2 Messaufbau und deren Durchführung

Betrachtet man die Ladekette aus der Sicht eines einzelnen FZs, so zeigt Abbildung 1 den Messaufbau schematisch. Direkt nach der Netzsteckdose ist der Ladeleistungs-Logger (CLM) installiert. Dieser erfasst Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie deren Energien, Strom und Spannung. Somit wird der Gesamtenergieverbrauch (inkl. der Verluste der Kontrolleinheit) der einzelnen Elektroautos zeitlich protokolliert. Das anschließende Ladekabel verbindet das FZ mit dem Stromnetz. Gleich nach der FZ-Steckdose befinden sich die Summenzähler für Wirkenergie, Ansteckzeit und -anzahl. Die vom Auto aufgenommene Energie wird, wie später noch ersichtlich wird, einerseits für das Heizsystem, welches die ZEBRA-Batterie auf über 260°C [1] hält, und andererseits zur Ladung der Batterie verwendet. Die Energieflüsse (Strom und Spannung) in die und aus der Batterie, „State-of-Charge“ (SOC),

Temperatur und Zustand werden ständig vom Batteriemanagementsystem (BMS) überwacht. Mittels CAN-Bus können diese Daten aus dem FZ gelesen und via Software am Notebook in Drei-Sekunden-Abständen gespeichert werden.

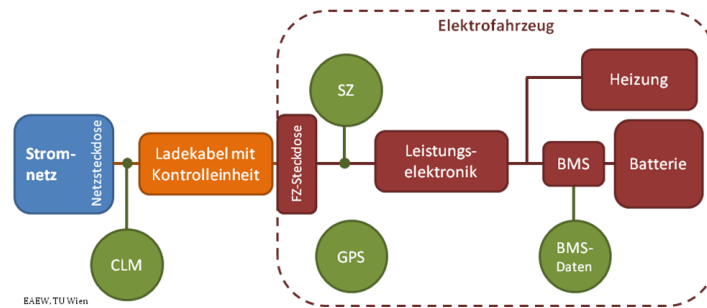


Abbildung 1: Messaufbau aus der Sicht eines FZs

Desweiteren sind die beobachteten FZ mit GPS-Loggern ausgestattet, welche geschwindigkeitsabhängig Längen- und Breitengrade sowie Höhe in bis zu Ein-Sekunden-Intervallen mit notieren. Beim Stillstand der Elektroautos werden keine Daten geloggt, um den begrenzten Speicherplatz nicht zu überschreiten. Zusätzlich wird in allen Wagen ständig ein Fahrtenbuch geführt.

Die obig beschriebenen Messgeräte wurden in abwechselnden Kombinationen sowie unterschiedlichen Zeitintervallen im und am FZ installiert. Die Konfigurationen können in Einzel-, Messreihen- und Dauermessungen unterteilt werden. Diese werden folgend genauer beschrieben.

2.1 Einzelmessungen

Bei diesen Messungen wurde immer dasselbe Elektroauto („THINK city“ von der VWK) untersucht. Die daraus gewonnen detaillierten Daten geben Rückschluss auf alle zukünftig beobachteten „THINK city“ in punkto Ladeleistungsverlauf, Aufladeverluste, Fahrverbrauch, Rekuperation und Selbstentladung.

2.2 Messreihenmessungen

Durchführung: Jeweils 10 FZ (ausschließlich „THINK city“) werden gleichzeitig mit folgenden Messgeräten ausgestattet. Die Installation der Logger sollte mit dem Augenmerk auf die Benutzerfreundlichkeit und vor allem Manipulationssicherheit durchgeführt werden. Nach Ende der dreiwöchigen Messdauer müssen die Geräte wieder ausgebaut und anschließend die Daten ausgelesen werden.

- CLM nimmt Leistung, Strom und Spannung des Gesamtsystems (30-Sekunden-Intervall) auf.
- GPS speichert Längen- und Breitengrade sowie Höhe während den Fahrten (1- bis 6-Sekunden-Intervall bzw. keine Protokollierung im Stillstand).

Messdauer: 3 Wochen

Dieser Messvorgang wird nach anschließender Überprüfung der Datenqualität mindestens einmal mit anderen Elektrofahrzeugen wiederholt. Dadurch vervielfacht sich die Datengrundlage und die Gesamtmessung liefert bessere Ergebnisse. Eventuell werden saisonale Unterschiede erkennbar.

2.3 Dauermessungen

Die installierten Stromimpulszähler im VKW-Parkhaus sowie am Abstellplatz der Landesregierung Vorarlbergs liefern verbrauchte Energiewerte im 10 Minuten-Intervall. Diese Daten werden ständig protokolliert und finden daher ergänzend Eingang.

3 Messergebnisse bzw. Datenauswertung

Die Fülle der gesammelten Daten ermöglicht eine Vielzahl unterschiedlicher Auswertungen und Ergebnisse. In dieser Arbeit wird auf das Fahrzeugmonitoring im ersten Schritt näher eingegangen.

3.1 Zustände der Leistungsaufnahme

Das besondere an FZ mit ZEBRA-Batterien ist, dass sie nicht nur während des Fahrens Energie verbrauchen, sondern auch bei längeren Stehphasen Heizenergie benötigen. Diese Tatsache und dass zukünftige Elektroautos mittels Li-Ionen-Technologie, bei welchen dieser Effekt nicht auftritt, ausgestattet sind, macht es sehr schwierig energetische Vergleiche mit Li-Ionen-Technologie anzustellen.

Daher und auch wie in Abbildung 2 ersichtlich ergeben sich folgende Zustände des FZs:

- **FZ ist nicht angesteckt (Fahrphase):** Leistungsaufnahme bzw. –abgabe nur im Auto zwischen Batterie, Elektromotor und Heizsystem. Unabhängig ob sich das Auto bewegt und Energieverlust auch beim Stehen möglich, da Heizregelung immer aktiv ist.
- **FZ lädt (Ladephase):** In Abbildung 2 ist diese beispielhaft von 10:30 Uhr bis rund 22:30 Uhr und zusätzlich die kurze Nachladung um 00:30 Uhr. Muss die Batterie während des Ladens geheizt werden, so verringert sich die Ladeleistung des BMS währenddessen. Diese Regelung tritt dann in Kraft, wenn der Netzstrom den an der Kontrolleinheit festgesetzten Maximalstrom von 10A übersteigt. Von rund 20:00 Uhr bis 20:30 Uhr deaktiviert die ZEBRA-Batterie die Ladungsaufnahme. Dieses Phänomen tritt jedes Mal auf, wenn der Ladestand der Batterie 80% SOC beträgt und ermöglicht, nach persönlicher Einschätzung, gewisse Ausgleichladungen zwischen den Zellen. Die Ladephase beinhaltet demnach etwaige Heizphasen und kurze Unterbrechungen.
- **FZ ist im Stand-by (Stand-by-Phase):** In der restlichen Zeit ist das Elektroauto zwar angesteckt, aber die Batterie nimmt keine Leistung auf. Temperaturgesteuert wird in periodischen Zeitabständen das Heizsystem mit Energie aus dem Netz gespeist. In Abbildung 2 erkennt man, dass das Gesamtsystem auch abseits der Heizung eine ständige Leistung aufnimmt, welche auf Verluste sonstiger Geräte schließen lässt. Die gesamte Phase ist für ZEBRA-Technologien typisch und sollte mit zukünftigen Li-Ionen-Batterien deutlich besser sein, da diese keine so hohen Betriebstemperaturen besitzen.

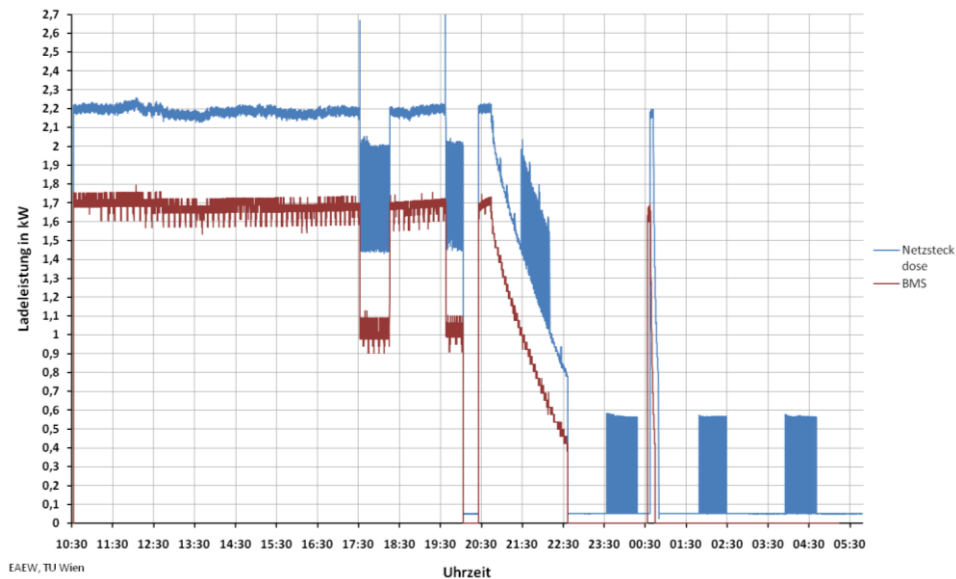


Abbildung 2: Wirkleistungsverlauf aller FZ-Zustände

Aus diesen Gründen ist es nur beschränkt sinnvoll die gesamt verbrauchte Energie aus dem Netz auf die gesamt gefahrenen Kilometer zu beziehen. In den folgenden Analysen wird jeweils die in den Stand-by-Phasen verbrauchte Energie auf die Zeitdauer sowie die in den Ladephasen konsumierte Energie auf die vorher gefahrenen Kilometer bezogen. Längere Stillstandszeiten während der Fahrphase bewirken einen Energieverlust der Batterie durch das Heizen, welcher in dieser Messanordnung nur der anschließenden Ladephase dazugerechnet werden kann. Ein ständiges Mitloggen der BMS-Daten auch während der Messreihen (Realisierung mittels CAN-Logger) könnte Klarheit über die tatsächlichen Fahrverbräuche bringen, wurde aber bislang nicht durchgeführt.

3.2 Batterieaufladung

Abbildung 2 zeigt den Ladewirkleistungsverlauf der Netzsteckdose und des BMS einer Aufladung von rund 30% bis 100% SOC inkl. mehrerer Heizperioden über die Zeit. Der Unterschied zwischen der gelieferten Netz- und der eingespeisten Batterieenergie bildet die Aufladeverluste.

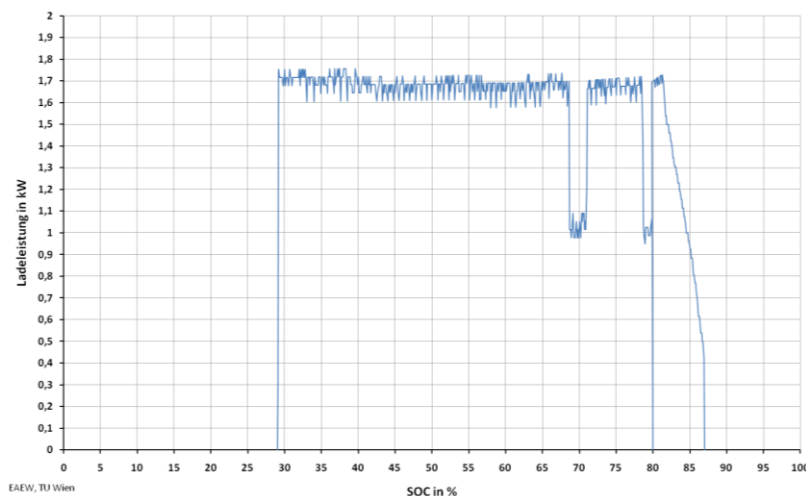


Abbildung 3: Ladewirkleistungsverlauf über SOC - BMS

In Abbildung 3 ist derselbe BMS-Verlauf über den Batterieladestand SOC aufgetragen. Abgesehen von den heizbedingten Ladeleistungsrückschaltungen und der kurzen Pause bei 80% SOC werden diese Ladungen mit dem klassischen IUa-Verfahren (nähere Infos unter [2] und [4]), welches auch bei Li-Ionen-Systemen verwendet wird, durchgeführt.

Betrachtet man die Wiederaufladung im energetischen Blickwinkel so zeigen die zwei Einzelmessungen, dass im Mittel rund 25% an Aufladeverlusten entstehen. Abbildung 4 zeigt die Aufteilung der Ladeenergien zusammenfassend.

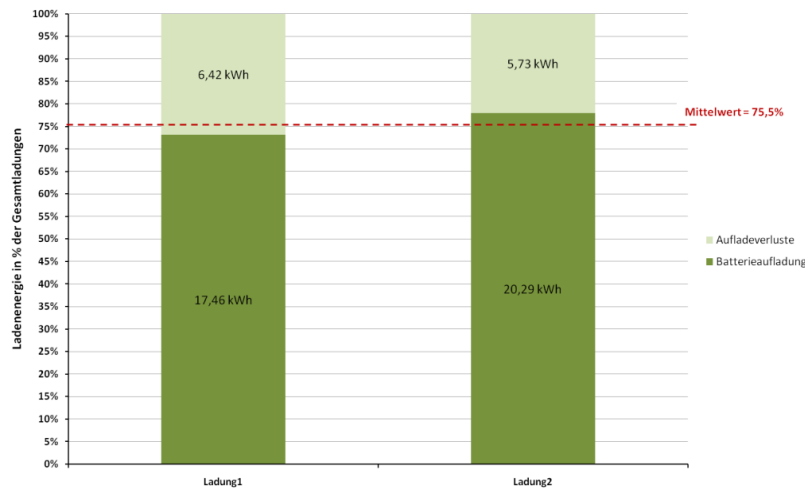


Abbildung 4: Ladungsenergieaufteilung in Testfahrten bei gleichem FZ

3.3 Fahrverbräuche

Für die Berechnung der Fahrverbräuche werden zumindest bei den Einzelmessungen alle Messgeräte verwendet. Die Messreihenmessungen wurden ohne BMS-Logger durchgeführt.

3.3.1 Ergebnisse aus Einzelmessungen

Die aus den Einzelmessungen resultierenden Verbräuche können in einen durch Rekuperation wiedergewonnen und tatsächlich verbrauchten Energieanteil geteilt werden. Dafür notwendig sind die während der Fahrt mitgeloggten BMS-Daten, welche durch das verhältnismäßig große Abtastintervall von 3 Sekunden sehr ungenau sind.



Abbildung 5: Fahrtenenergie rückgewinnung aus Batteriedaten

Die Ergebnisse der BMS-Datenmittelung sind in Abbildung 5 dargestellt. Im Mittel werden demnach rund 8% der gesamten Energieabgabe während der Fahrt wiederzurückgewonnen. Wie schon oben beschrieben ist dieser Wert durch die Zeitmittelung mit Vorsicht zu genießen.

Betrachtet man die erste Fahrt etwas genauer, so zeigt Abbildung 6 die Verbräuche sowie Rekuperationen der Gesamtfahrt und Teilabschnitte ohne Aufladeverluste (direkt aus den BMS-Daten). Die knapp zweistündige Fahrt beinhaltet sehr abwechslungsreiche Abschnitte und zeigt einen repräsentativen Querschnitt Vorarlbergs. Sehr hoch sind die Rekuperationen bei der Berg- und Talfahrt sowie in der Stadt. Dennoch sind die Fahrverbräuche in diesen Abschnitten noch immer die höchsten. Als Schlussfolgerung dieser Messung, welche bedingt durch die Zeitmittelung noch Fehler beinhaltet, gilt, dass vergleichbar mit den herkömmlichen FZ gleichbleibende und mäßige Geschwindigkeiten auch bei den „TH!NK city“ den niedrigsten Verbrauch erzielen. Die Rekuperation kann hier die Energieverluste des „Stop&Go“-Verkehrs nicht kompensieren, aber sehr stark mindern.

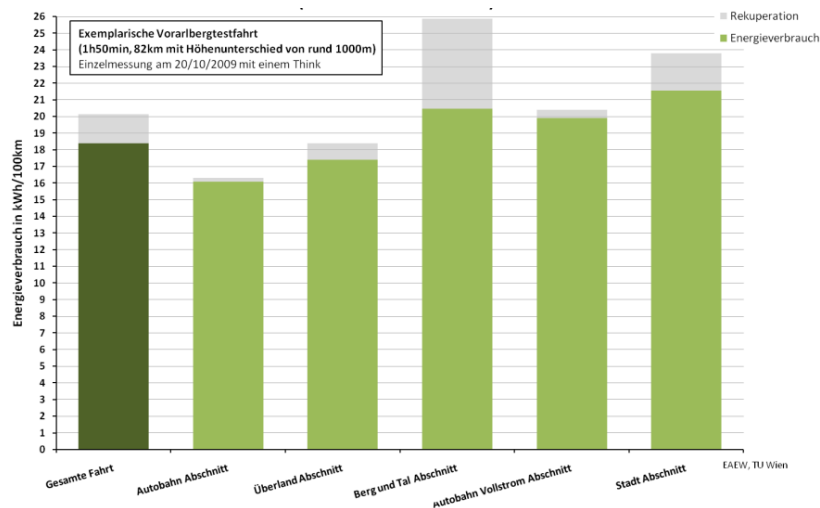


Abbildung 6: Fahrverbrauch (ohne Aufladeverluste) aus Batteriedaten

Die im Anschluss der zweiten Testfahrt, welche mit der ersten Fahrt sehr vergleichbar ist, durchgeführte Ladung ist in Abbildung 7 energetisch dargestellt. Hierbei wurden auf die BMS- sowie CLM-Daten der Ladephase zurückgegriffen und daher ist der Fehler durch die Zeitmittelung der Batteriegrößen drastisch minimiert worden. Der Energieverbrauch der Batterie ist mit rund 20,3 kWh/100km auch etwas höher als der durch die Berechnung mittels BMS-Daten während der Fahrt ermittelte Wert. Rechnet man die Aufladeverluste von 22% der Gesamtenergie dazu, so liegt der Fahrverbrauch bei dieser Testfahrt bei 26,0 kWh/100km. Diese Werte beinhalten kaum Heizverluste, da die Testfahrt an einem Stück absolviert und das FZ dann gleich anschließend zum Laden angesteckt wurde.

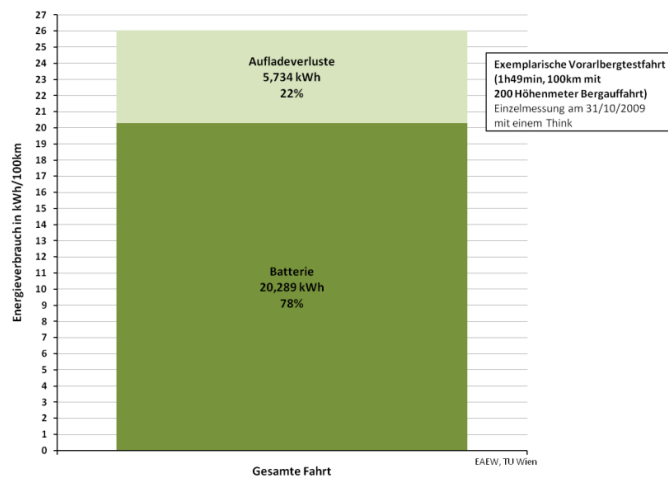


Abbildung 7: Fahrverbrauch eines „THINK city“ für eine Testfahrt

3.3.2 Ergebnisse aus den Messreihen

Die Gesamtfahrleistungen laut Fahrtenbuch sowie die Energieverbräuche laut CLM im angestecktem Zustand sind je nach FZ sehr unterschiedlich und sind in Tabelle 1 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Gesamtfahrleistung und Energieverbräuche während der Messdauer

FZ	1	2	3	4+6	7	8	9	10
km	430	397	273	1372	889	621	285	411
kWh	190,5	184,8	154,0	491,3	294,4	236,7	119,0	196,6

Bei der Betrachtung der Messreihen ist es wichtig nur die für die Wiederaufladung benötigte Energie von den übrigen Stand-by-Verlusten aus den CLM-Daten zu extrahieren. Etwaige Heizverluste beim Stillstand während der Fahrphase werden den Fahrverbräuchen, aus messtechnischen Motiven, dazugerechnet. Die Fahrzeuge 4 und 6 müssen in Folge zusammen betrachtet werden, da während der Messdauer augenscheinlich die zwei Ladekabel, auf denen der CLM-Logger montiert war, vertauscht wurden.

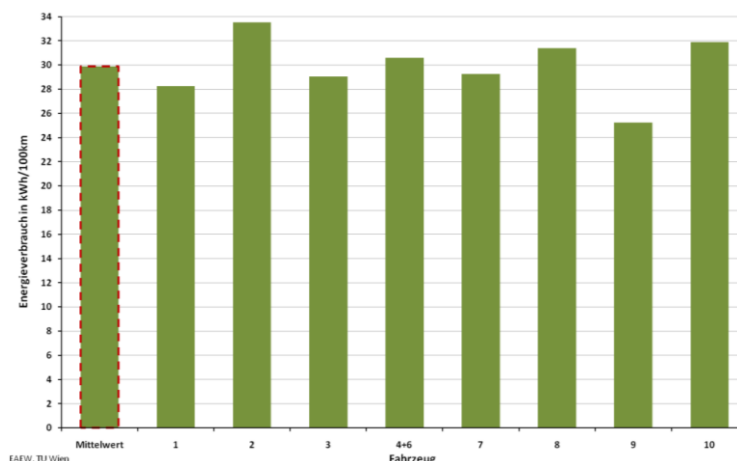


Abbildung 8: Fahrverbräuche (inkl. Aufladeverluste) aus Messreihe

Der Mittelwert, wie in Abbildung 8 dargestellt, der Fahrverbräuche inkl. Auflade- und etwaiger Heizverluste während der Fahrphase ist 29,9 kWh/100km.

3.4 Stand-by-Verluste

Steht ein Elektroauto mit ZEBRA-Batterie ausgestattet längere Zeit still, so entstehen Heizverluste. Ist das FZ am Netz angesteckt, wird diese Energie direkt von dort bezogen. Hingegen beim ausgesteckten Fall muss die Batterie diese Heizenergie liefern. Erst der darauffolgende Ladeprozess am Netz lädt diese Energie wieder in die Batterie. Dies führt zu zusätzlichen Aufladeverlusten.

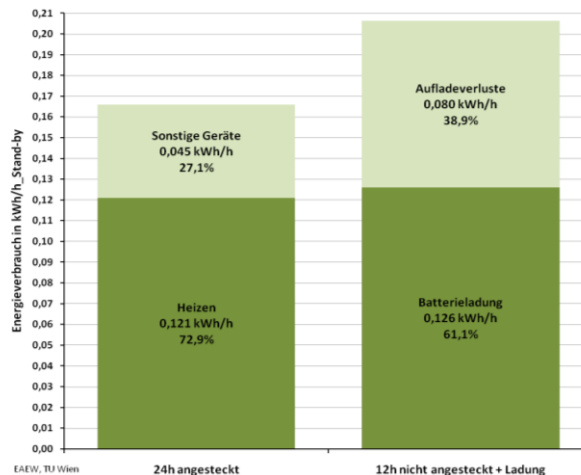


Abbildung 9: Stand-by-Verluste eines „THINK city“ bezogen auf die Stand-by-Zeit

Um diese zwei unterschiedlichen Varianten des Heizens im Stillstand zu untersuchen, wurden zwei Einzelmessungen durchgeführt. Einerseits wurde ein vollgeladenes Auto 24 Stunden angesteckt und der Energieverbrauch ermittelt. In Abbildung 9 zeigt dies der linke Balken. Unter der Rubrik „Sonstige Geräte“ ist die Dauerleistung von etwa 50W (siehe Abbildung 2), welche auftritt unabhängig ob die Batterie gerade geheizt wird, gemeint. Auf der rechten Seite der Abbildung 9 ist das Ergebnis der zweiten Messung dargestellt. Hierbei wurde das Fahrzeug 12 Stunden nicht angesteckt und anschließend musste die Batterie wieder geladen werden. Diese Batterieladung ist energetisch vergleichbar mit der Heizenergie aus der ersten Messung. Jedoch sind die Aufladeverluste höher als die der sonstigen Geräte. Bezogen auf die Stand-by-Zeit sind die Stand-by-Verluste niedriger, wenn das FZ immer angesteckt ist.

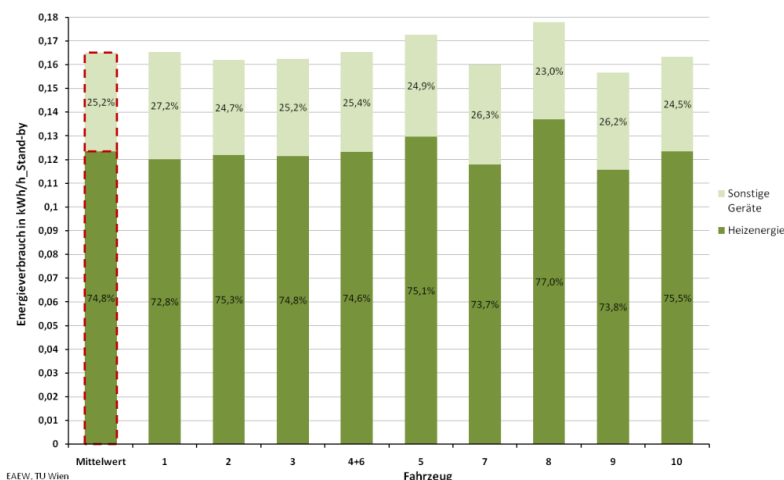


Abbildung 10: Stand-by-Verluste bezogen auf die Stand-by-Zeit aus Messreihe

Gleiche Werte wie bei der ersten Einzelmessung wurden auch bei der Messreihe erreicht. Abbildung 10 zeigt die Stand-by-Verluste aller 10 FZ bezogen auf die Stand-by-Zeit. Im Mittel werden Stand-by-Verluste von rund 0,165 kWh/h Stand-by erreicht. Der große Anteil der sonstigen Geräte von rund 25% stellt eine zukünftige Optimierungsaufgabe der Leistungselektronik zur Minimierung dar.

4 Zusammenfassung

Fahrzeugverbräuche gliedern sich in Fahrverbräuche, Aufladeverluste und Stand-by-Verluste (inkl. Heizverluste). Aus den bisherigen Messungen lässt sich ableiten:

- Der reine Fahrverbrauch liegt bei rund 20,3 kWh/100km (Testfahrt). Inkludiert man die Aufladeverluste wird ein Verbrauchswert von 26,0 kWh/100km erzielt.
- Aufladeverluste bewegen sich bei verwendeter ZEBRA-Technologie im Bereich von 22 bis 27 Prozent der Gesamtenergie.
- Die Rekuperation beträgt gemittelt über alle Streckenabschnitte etwa 8 Prozent der gesamten Energieabgabe.
- Die Messreihenanalyse ergibt reale Verbrauchswerte von 29,9 kWh/100km. Diese beinhalten aufgrund von unangesteckten Stillstandszeiten auch Heizverluste sowie die Aufladeverluste.
- Stand-by-Verluste (Heizen, Leistungselektronik) ergeben sich zu Werten von 0,165 kWh/h. An einem Tag ohne Fahren sind bei ZEBRA-Batterien mit Stand-by-Verlusten von 3,96 kWh je Fahrzeug zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- [1] **Besenhard, J. O.** *Handbook of battery materials*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 1999.
- [2] **Schuster, A.** *Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen*. Wien : Diplomarbeit, 2008.
- [3] **Germann, C.** *Elektromobilität - Modellregion Vorarlberg*. München : 3. EUROFORUM-Konferenz "Elektromobilität und ihre Auswirkungen auf die Energiewirtschaft, 2009.
- [4] **Jossen, A.; Weydanz, W.** *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. Neusäß : Ubooks-Verlag, 2006.