

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer

Nutzungsverhalten und
Infrastrukturanforderungen für den Einsatz von
Elektrorollern in urbanen Gebieten

Abschlussbericht
zum
DBU-Forschungsprojekt
28943-21/0

Osnabrück, Dezember 2013

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer (Projektleitung)

1 Titelblatt



Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer

Nutzungsverhalten und Infrastrukturanforderungen für den Einsatz von Elektrorollern in urbanen Gebieten

Abschlussbericht

zum

DBU-Forschungsprojekt

28943-21/0

Osnabrück, Dezember 2013

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Pfisterer (Projektleitung)

Über das Nutzungsverhalten von Elektrorollern liegen aktuell nur Schätzungen vor. Das Projekt soll diese Lücke schließen und verwertbare Erkenntnisse über die konkreten Anforderungen an Elektroroller erbringen.

Die Elektromobilität wird sich nur dann entwickeln, wenn den Nutzern ein zweckdienliches Ladenetz zur Verfügung steht, mit dem sie eine ähnliche Mobilität erreichen, wie mit den herkömmlichen Strukturen. Der Flottenversuch mit den Elektrorollern liefert Daten, die zur Ermittlung eines solchen Infrastrukturnetzes nötig sind.

Die Stadtwerke Osnabrück AG sammeln seit einigen Monaten erste Erfahrungen mit eigenen Elektrorollern. So sind bereits Erkenntnisse über die tatsächlichen Reichweiten der Roller und erste Erfahrungen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen gemacht worden. Jedoch wird erst eine Nutzung durch diverse Nutzergruppen zeigen, wie sich Elektroroller im täglichen Einsatz bewähren, wie häufig und wie lange Tankvorgänge dauern, wie viele Stunden die Roller in der Woche und am Wochenende in Betrieb sind und für welche Tätigkeiten sie sich besser oder weniger gut eignen.

Konkrete Aussagen über

- Ladetätigkeiten,
- Betriebsdauer,
- Reichweiten und
- Nutzungsverhalten, aber auch über die
- Wirtschaftlichkeit

soll das Projekt liefern. Somit werden die Stärken und Schwächen von Elektrorollern und die Anforderungen an effiziente Ladestrukturen klar definiert. Zusätzlich soll die Wirtschaftlichkeit für Netzbetreiber und für Endkunden nachgewiesen werden: Elektrofahrzeuge werden sich nur durchsetzen, wenn diese auch finanziell vorteilhaft für den Endbenutzer sind. Diese Erkenntnisse sollen den Endkunden bereitgestellt werden, denn eine klare wirtschaftliche Rechnung wird die Kauflust steigern.

Auf Grundlage dieser Arbeit können Energieversorgungsunternehmen sinnvolle Infrastrukturen schaffen und Fahrzeughersteller ihre Produkte optimieren. Konkret sind für EVU vor allem Stromverbrauchsdaten interessant. Diese werden als Basis dienen, um z. B. Programme für Ladevorgänge zu entwickeln. Damit werden mit größter Wahrscheinlichkeit Anreize für die Kunden geschaffen, die ihr Ladeverhalten positiv beeinflussen, so dass eine Ladesäule nicht länger als nötig blockiert wird.

All dies wird zu einer erhöhten Akzeptanz und einer schnelleren Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen führen.

Für die Hochschule Osnabrück werden durch die gewonnenen Daten Rückschlüsse auf die Auslegung einzelner Komponenten eines Elektrorollers gezogen. Diese Resultate sind für die Lehre und Forschung an elektrisch betrie-benen Fahrzeugen relevant.

Die Science to Business GmbH der Hochschule Osnabrück stellt das Verbindungsglied zwischen Fachhochschule und Wirtschaft dar und profitiert somit ebenfalls von dem neu gewonnenen Know-how.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zunächst werden von der Science to Business GmbH Datenerfassungsgeräte entwickelt und diese in die von den Stadtwerken Osnabrück bereitgestellten Elektroroller verbaut. Die Datenerfassungsgeräte erfassen sowohl im Fahrbetrieb als auch im Ladebetrieb wichtige Betriebsparameter der Elektroroller. Die gewonnenen Praxisdaten werden mit den entsprechenden Referenzdaten der abgeglichen. Die Referenzdaten werden ermittelt, indem Elektroroller

auf einem Rollenprüfstand betrieben werden. Durch den Datenabgleich wird auf das Nutzungsverhalten und die technische Belastung der Elektroroller geschlossen. Ergänzend werden Fahrtenbücher geführt und Nutzerbefragungen durchgeführt.

Die Elektroroller werden regelmäßig technisch geprüft, um eventuelle Alterungserscheinungen zu dokumentieren. Insbesondere die verwendeten Batterien werden einer Lebensdauerbewertung unterzogen.

Nach der zweiten Testseason werden die Daten wissenschaftlich analysiert. Es werden Nutzergruppen definiert und weiterführend jeweils nach der Wirtschaftlichkeit der Elektroroller bewertet.

Durch die Auswertung der Fahr- und Ladezyklen können Empfehlungen an die Ladeinfrastruktur gemacht werden.

3 Inhaltsverzeichnis

1 TITELBLATT	2
2 PROJEKTKENNBLATT	3
3 INHALTSVERZEICHNIS	6
4 VERZEICHNIS VON TABELLEN, BILDERN UND GRAFIKEN	8
5 ZUSAMMENFASSUNG	10
6 EINLEITUNG	11
7 HAUPTTEIL	12
7.1 Ausgangssituation	12
7.2 Fragestellung	14
7.3 Aktueller Stand der Elektromobilität	16
7.4 Projektablauf	18
7.5 Nutzungsverhalten im urbanen Osnabrück	18
7.5.1 Entwicklung Datenloggersystem V1	18
7.5.2 Entwicklung Datenloggersystem V2	19
7.5.3 Auswertung der Daten	21
7.5.4 Untersuchung des Fahrverhaltens im Stadtverkehr	24
7.5.5 Schlussfolgerungen über das Nutzungsverhalten	25
7.6 Nutzungsverhalten im überregionalen touristischen Bereich	26
7.6.1 E-Mobilitäts Marathon Nürtingen	26
7.6.2 Tour durch Deutschland, Frankreich, Österreich und Schweiz	27
7.6.3 Schlussfolgerungen für den Einsatz im touristischen Bereich	38
7.6.4 Weiterführung des Projektes	41
7.7 Elektrorollerprüfstand	42
7.7.1 Aufbau Elektrorollerprüfstand	42
7.7.2 Prüfstandtests	43
7.7.3 Vergleich verschiedener Elektroroller	46
7.7.4 Weitere Verwendung / zukünftige Kooperationen	50
7.8 Batterieteststand	51
7.8.1 Aufbau des Teststandes	51
7.8.2 Prüfstandtests	54
7.8.3 Weitere Verwendung / zukünftige Kooperationen	54

8	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	55
9	FAZIT	56
11	LITERATURVERZEICHNIS	58

4 Verzeichnis von Tabellen, Bildern und Grafiken

ABBILDUNG 1: EMISSIONEN DES STRAßENVERKEHRS	12
ABBILDUNG 2: TREIBHAUSGASEMISSIONEN VON UNTERSCHIEDLICHEN ANTRIEBSARTEN (QUELLE: DENA IN: ERNEUERBARE ENERGIEN, MÄRZ 2010 S. 81)	13
ABBILDUNG 3: ZONENSCHHEMA REGION OSNABRÜCK	15
ABBILDUNG 4: DATENLOGGER HARDWAREVERSION V2	20
ABBILDUNG 5: KARTENAUSWERTUNG DER GPS-DATEN	20
ABBILDUNG 6: ÜBERSICHTSBILD 1 (MITTELWERTBILDUNG) - INNOSCOOTER	21
ABBILDUNG 7: ÜBERSICHTSBILD 2 (MITTELWERTBILDUNG) - INNOSCOOTER	22
ABBILDUNG 8: DETAILAUFNAHME 1-1	22
ABBILDUNG 9: DETAILAUFNAHME 1-2	22
ABBILDUNG 10: DETAILAUFNAHME 2-1	23
ABBILDUNG 11: DETAILAUFNAHME 2-2	23
ABBILDUNG 12: DETAILAUFNAHME 2-3	23
ABBILDUNG 13: DETAILAUFNAHME 2-4	23
ABBILDUNG 14: DETAILAUFNAHME 2-5	23
ABBILDUNG 15: DETAILAUFNAHME 2-6	23
ABBILDUNG 16: TESTSTRECKE FÜR FAHRVERHALTEN	24
ABBILDUNG 17: ERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER FAHRSTILE	25
ABBILDUNG 18: E-ROLLER MARATHON NÜRTINGEN GPS-DATEN AUSWERTUNG	27
ABBILDUNG 19: E-ROLLER MARATHON NÜRTINGEN BATTERIEAUFZEICHNUNG	27
ABBILDUNG 20: TOURISTIKTOUR TAG 1/1	28
ABBILDUNG 21: TOURISTIKTOUR TAG 1/2	29
ABBILDUNG 22: TOURISTIKTOUR TAG 1/3	29
ABBILDUNG 23: TOURISTIKTOUR TAG 1/4	30
ABBILDUNG 24: TOURISTIKTOUR TAG 1/5	30
ABBILDUNG 25: TOURISTIKTOUR TAG 1/6	31
ABBILDUNG 26: TOURISTIKTOUR TAG 1/7	31
ABBILDUNG 27: TOURISTIKTOUR TAG 1/8	32
ABBILDUNG 28: TOURISTIKTOUR TAG 1/9	32
ABBILDUNG 29: TOURISTIKTOUR TAG 1/10	33
ABBILDUNG 30: TOURISTIKTOUR TAG 1/11	33
ABBILDUNG 31: TOURISTIKTOUR TAG 2/1	34
ABBILDUNG 32: TOURISTIKTOUR TAG 2/2	35
ABBILDUNG 33: TOURISTIKTOUR TAG 2/3	35
ABBILDUNG 34: TOURISTIKTOUR TAG 2/4	36
ABBILDUNG 35: TOURISTIKTOUR TAG 2/5	36
ABBILDUNG 36: TOURISTIKTOUR TAG 2/6	37
ABBILDUNG 37: TOURISTIKTOUR TAG 2/7	37
ABBILDUNG 38: TOURISTIKTOUR TAG 2/8	38
ABBILDUNG 39: TOURISTIKTOUR TEILNEHMER 1	39
ABBILDUNG 40: TOURISTIKTOUR TEILNEHMER 2	40
ABBILDUNG 41: TOURISTIKTOUR TEILNEHMER 3	41
ABBILDUNG 42: E-ROLLER PRÜFSTAND	42
ABBILDUNG 43: KREIDLER RMC-E HIKER 50 (QUELLE KREIDLER.COM)	43
ABBILDUNG 44: LADEVORGANG NACH STADTFAHRT (0,65 KWH)	44
ABBILDUNG 45: PRÜFSTANDSFAHRT MIT KONSTANTER LAST(LEISTUNG)	45
ABBILDUNG 46: PRÜFSTANDSFAHRT MIT KONSTANTER LAST (SPANNUNG)	45
ABBILDUNG 47: PRÜFSTANDSFAHRT MIT KONSTANTER LAST (STROM)	45
ABBILDUNG 48: LADEVORGANG NACH TESTFAHRT AUF ROLLERPRÜFSTAND (1,93 KWH)	46

ABBILDUNG 49: E-ROLLER KENNDATEN	47
ABBILDUNG 50: VERGLEICH ROLLERTYPEN BZGL. ZUGKRAFT	47
ABBILDUNG 51: VERGLEICH ROLLER ELEKTR. LEISTUNG	48
ABBILDUNG 52: VERGLEICH ROLLER BZGL. WIRKUNGSGRAD	48
ABBILDUNG 53: VERGLEICH ROLLER BZGL. EFFIZIENZ	49
ABBILDUNG 54: FUNKTIONSMUSTER DC/DC WANDLER BATTERIEPRÜFSTAND	52
ABBILDUNG 55: „HOCHSPANNUNGSLEITERPLATTE“ BATTERIEPRÜFSTAND	53
ABBILDUNG 56: „HOCHSTROMLEITERPLATTE“ BATTERIEPRÜFSTAND	53
ABBILDUNG 57: „NETZSTROMRICHTER“ BATTERIEPRÜFSTAND	53

5 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurden derzeit verfügbare Elektroroller auf ihre Alltagstauglichkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht. Hierfür wurden an verschiedene Nutzergruppen unterschiedliche Elektroroller ausgegeben. Das Nutzungsprofil sowie die dabei entstehenden Belastungen wurden durch ein Datenerfassungssystem im Feld erfasst und ausgewertet. Die dadurch gewonnenen Daten können sowohl für die Verbesserung der Elektroroller im technischen und wirtschaftlichen Bereich genutzt werden. Ebenso können diese Daten zur Erstellung von Infrastrukturmaßnahmen zur Förderung der Elektromobilität genutzt werden.

Im Bereich Optimierung der Infrastruktur wurde deutlich das Lademöglichkeiten hauptsächlich im häuslichen Bereich und an der Arbeitsstelle / Ausbildungsstelle geschaffen werden müssen. Diese Ladeinfrastruktur muss deutlich preiswerter sein. Eine Investition für einen Ladepunkt sollte im Bereich 300 bis 500 EUR liegen. Derzeit sind die Investitionen zur Schaffung öffentlicher Ladepunkte etwa um den Faktor zehn- bis fünfzehn-fach höher. Hier muss ein Paradigmenwechsel einsetzen.

Ergänzungen durch öffentliche Ladepunkte in den hochfrequentierten Innenstädten sind gut jedoch nicht unabdingbar.

Durch die Konstruktion eines Elektrorollerprüfstandes und eines Batterieprüfstandes können auf Basis der Felddaten detailliertere Elektroroller- und Komponententests durchgeführt werden. Derzeit sind die eingesetzten Komponenten hauptsächlich auf die Herstellkosten optimiert. Das Thema Effizienz bzw. Wirkungsgradkette wird in diesem Bereich kaum beachtet. Hier können durch Effizienzsteigerungen bei gleichen Reichweiten die Kosten für das Gesamtsystem Elektroroller durchaus reduziert werden in dem die Effizienz gesteigert wird. Gleichzeitig wird der Energiebedarf gesenkt.

Eine weitergehende Nutzung der Elektroroller außerhalb urbaner Strukturen kann durchaus empfohlen werden. Allerdings ist der Einsatz der Roller als klassisches Pendlerfahrzeug aus dem Umland nur dann zu empfehlen wenn die üblichen Geschwindigkeitsbeschränkungen für diesen Einsatzzweck aufgehoben werden. Generell sind die verwendeten Elektroroller in der Regel Rahmenkonstruktionen auf Basis von Verbrennungsrollern der 125 cm³ Klasse. Diese sind für Geschwindigkeiten von mindestens 80 km/h bereits ausgelegt und erprobt. Das führen solch eines Rollers ist jedoch nur mit einer entsprechenden Fahrerlaubnis erlaubt. Mittlerweile werden einige schnellere Varianten bereits auf dem Markt angeboten.

Eine Nutzung im touristischen Bereich kann sehr attraktiv sein. Man gleitet mit einem guten Gewissen nahezu lautlos durch entsprechende Regionen. Ein durchgeführter Versuch zeigte eindrucksvoll wie leistungsfähig die heute zur Verfügung stehenden Elektroroller bereits sind. Der Einsatz in alpiner Umgebung ist ebenso möglich wie der Einsatz in der norddeutschen Tiefebene. Der Verleih von Elektrorollern und ggf. organisierte Rundreisen würden als ein sehr mächtiges Werbeinstrument zur Verbreitung der Elektromobilität beitragen.

6 Einleitung

In vielen Ballungszentren werden Luftverschmutzung und Geräuschbelastungen zu immer größeren Problemen. Geräuschemissionen in Ballungszentren werden hauptsächlich durch den Verkehr erzeugt. Diese Geräusche führen langfristig zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Luftverschmutzung, insbesondere die Feinstaubbelastung in Städten führen ebenfalls zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Somit muss eines der zukünftigen gesellschaftlichen Ziele die Vermeidung von Verkehr und soweit dies nicht möglich ist die Verminderung der entsprechend schädlichen Nebenwirkungen von Verkehr wie Feinstaub und Geräuschemissionen anzustreben.

Die Elektromobilität kann genau diese zwei Punkte deutlich vermindern. Bei der Nutzung von Elektromobilen ergibt sich kein lokaler Ausstoß von Feinstaub und mit der Umstellung der Energieversorgung auf regenerative Energien kann die Nutzung umweltschonender Ressourcen ausgeweitet werden.

Elektromobile haben deutlich geringere Geräuschemissionen. Diese bestehen hauptsächlich aus Abrollgeräuschen und aerodynamischen Geräuschen. Beide Arten sind sehr stark von der Geschwindigkeit abhängig und treten merklich nur bei höheren Geschwindigkeiten wie sie in unseren Städten eher unüblich sind auf.

Elektromobilität ist somit ein geeignetes Mittel die Feinstaubbelastung und Geräuschemission in urbanen Strukturen deutlich zu vermindern und somit die Lebensqualität sehr zu verbessern.

In diesem Projekt wird sich hauptsächlich auf den Einsatz von Elektrorollern fokussiert. Viele grundsätzliche Aussagen sind jedoch auf alle Formen der Elektromobilität übertragbar.

Elektroroller haben in urbanen Strukturen einen weiteren Vorteil – sie benötigen nur eine geringe Stellfläche. Dies macht sie zu einem schnellen, preisgünstigen und komfortablen Fortbewegungsmittel für kleine, mittlere und große Städte.

7 Hauptteil

7.1 Ausgangssituation

Das Ziel der Bundesregierung ist es, die CO₂ Emissionen bis zum Jahr 2020 um 40% gegenüber dem Stand von 1990 abzusenken. Dabei trägt der Verkehrssektor jährlich zwischen 18% und 20% zu den gesamten CO₂ – Emissionen in Deutschland bei. Alleine der Straßenverkehr war im Jahr 2007 für die Emission von rund 140Mio. Tonnen CO₂ verantwortlich (s. Abbildung 1). Verursacht werden diese durch Verbrennungsmotoren, die neben dem CO₂ aber auch noch andere Schadstoffe verursachen, wie z.B. NO_x, SO₂ und VOCs.

Emissionen des Straßenverkehrs

		1990	1995	2000	2005	2007
CO ₂	1000t	150 358,33	165 104,03	171 243,27	151 123,11	144 114,21
CH ₄	1000t (CO ₂ -Äquivalente)	1 271,10	637,06	329,29	176,86	145,97
N ₂ O	1000t (CO ₂ -Äquivalente)	608,35	1 436,56	1 493,19	1 170,92	1 077,42
NO _x	1000t	1 341,45	1 146,46	997,66	650,04	566,14
CO	1000t	6 527,26	3 823,15	2 452,04	1 516,31	1 279,37
NM VOC	1000t	1 408,97	593,00	278,41	149,80	127,63
SO ₂	1000t	90,20	69,31	19,68	0,80	0,80

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990-2007 (Stand: 12.11.2008); <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

Energiebedingte CO₂-Emissionen in Deutschland im Jahr 2007: Verkehr im Vergleich zu anderen Quellgruppen

Quellgruppe	Anteil in %	Veränderung zu 1990 in %
Verkehr	20,1	-6,6
darunter Straßenverkehr	19,1	-4,2
Energiewirtschaft	51,0	-7,1
Haushalte	11,4	-33,6
Verarbeitendes Gewerbe	11,8	-42,3
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	4,7	-43,9

Quelle: Umweltbundesamt, Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland 2009, CRF-Tabellen 1990-2007, Berichtstabellen nach dem Common Reporting Format für die Emissionsberichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, April 2009 (Stand: 12.11.2008); <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

Abbildung 1: Emissionen des Straßenverkehrs

Eine Alternative zu den Verbrennungsmotoren sind Elektromotoren. Diese Antriebe produzieren kaum CO₂ oder sonstige Schadstoffe, sofern der verbrauchte Strom durch regenerative Energien erzeugt wurde (s. Abbildung 2).

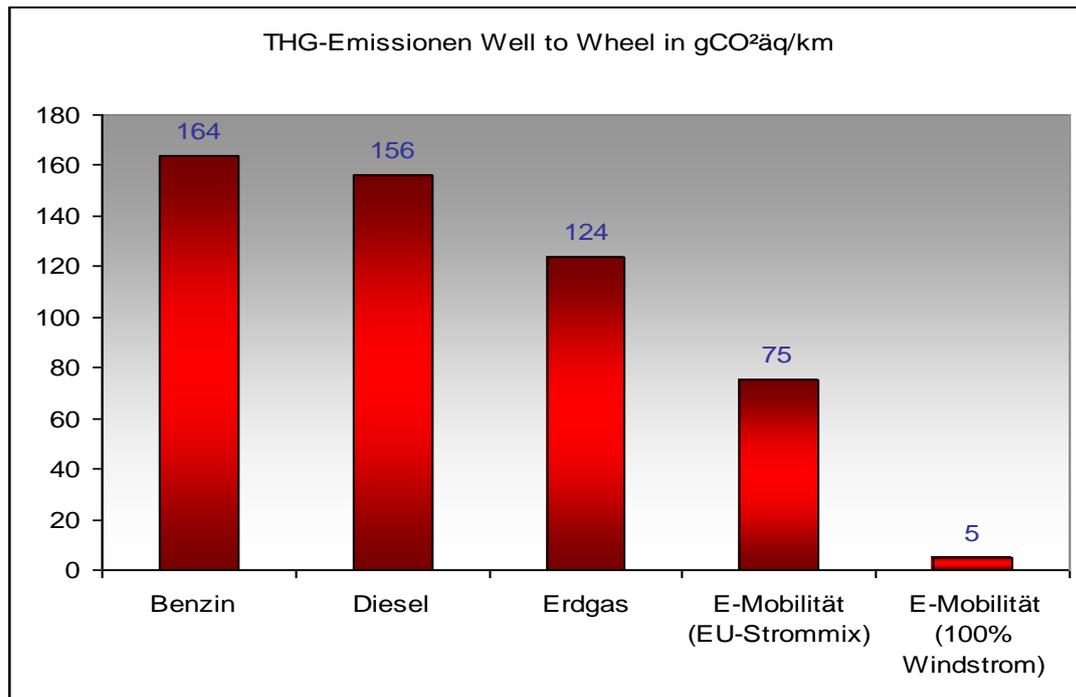


Abbildung 2: Treibhausgasemissionen von unterschiedlichen Antriebsarten (Quelle: Dena in: Erneuerbare Energien, März 2010 S. 81)

Der Markt für Elektrofahrzeuge befand sich bei der Beantragung dieses Projektes in der Entstehung. Es gab nur wenige serienreife E-PKW Modelle. Elektroroller waren hingegen bereits marktreif und im Fachhandel erhältlich. Technologisch waren sie weitgehend ausgereift, wenn auch vereinzelte Modelle noch mit Kinderkrankheiten kämpften. E-Roller eignen sich besonders für den Einsatz in urbanen Gebieten. Dennoch benötigen sie eine gut entwickelte öffentliche Infrastruktur. So sollen auch Nutzern, die nicht die Möglichkeit haben, ständig eine private Lademöglichkeit nutzen zu können, der Umstieg auf Elektroroller erleichtert werden. Bevor jedoch elektrisch betriebene Fahrzeuge in großer Stückzahl eingesetzt werden können, waren noch einige Fragestellungen zu klären. Es musste eine Infrastruktur für Ladeeinrichtungen geschaffen werden, die es den Nutzern ermöglicht, ihre Fahrzeuge am Fahrtziel wieder aufzuladen. Dadurch kann z. B. der Wechsel für Pendler mit größeren Strecken attraktiver erscheinen.

Bisher gab es allerdings keinerlei Erfahrungen mit einer flächendeckenden Infrastruktur. Inzwischen sind zwar technische Konzepte für Ladesäulen verfügbar. Allerdings ist noch nicht bekannt, welche Standorte, Ladezeiten und Ladeprofile sich daraus ergeben werden.

Der gesamte Bereich Elektromobilität erfährt in Deutschland und Europa derzeit einen Aufmerksamkeitsschub. Auf Messen, in Zeitungen und Zeitschriften und im TV werden beinahe täglich Neuigkeiten über E-Autos, Ladekonzepte und Zukunftsvisionen verbreitet. Dies täuscht darüber hinweg, dass gegenwärtig der Anteil an elektrisch betriebenen Autos verschwindend gering ist. Gerade einmal 1.500 Elektroautos fuhren Ende 2009 auf deutschen Straßen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2010). Zusätzlich waren zur Antragsstellung nur rund 1.200 E-Roller in Deutschland zugelassen (Fischer, 2010). Daher fehlte in Deutschland nicht nur viel technologisches Know-how über die Konstruktion von Batterien und E-Fahrzeugen, sondern auch die praktischen Erfahrungen mit Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr.

Während in den meisten Teilen der Welt Elektromobilität erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewann, wird in Asien und insbesondere in China, schon seit vielen Jahren an der Erprobung und dem Einsatz von Elektrofahrzeugen gearbeitet. So wurde die Weiterentwicklung von elektrischen Fahrrädern in China beispielsweise schon 1991 als eines der zehn wichtigs-

ten Forschungsziele des neunten *5-Jahres Plans* betrachtet (Weinert et al. 2007). Seit 2005 werden in China jährlich mehr als zehn Millionen E-Fahrräder verkauft (Weinert et al. 2007). Deutschland und Europa hinkten diesem Trend noch weit hinterher. Im Jahr 2008 wurden in Europa laut dem Allgemeinen Deutschen Fahrrad-Club 300.000 E-Fahrräder verkauft, davon etwa 100.000 in Deutschland (ADFC, 2009). Allerdings zeigen die Wachstumsraten deutlich nach oben. Die Händler erwarten derzeit jährliche Verkaufssteigerungen um 30% (Brand Eins, 2010). Im Jahr 2009 betrug der Anteil von Elektrofahrrädern am gesamten Fahrradverkauf in Deutschland mit rund 150.000 Exemplaren nur 4% (Wadlinger, 2010).

Auch die Zahl der Elektroroller in China steigt kontinuierlich. Im Jahr 2006 wurden in China mit 20 Millionen verkauften E-Rollern erstmals mehr E-Roller als Roller mit Verbrennungsmotoren zugelassen (Brand Eins, 2010).

Die ersten Erfahrungen mit Elektromobilität im Straßenverkehr scheinen jedoch ambivalent zu sein. In China werden die E-Fahrräder und E-Roller in den verschiedenen Städten sehr unterschiedlich aufgenommen. Während einige Städte (z. B. Shanghai) Roller mit Verbrennungsmotoren (mit Ausnahme von LPG-betriebenen Rollern) aus den Stadtzentren verbannt haben und diese durch E-Fahrräder und E-Roller ersetzen, haben andere chinesische Großstädte Elektrofahrräder inzwischen verboten (z. B. Guangzhou, Fuzhou, Wuhan und Haikou) (Weinert et al. 2007). Grund dafür sind die Befürchtungen, dass die Elektromobile zu einer Gefahr im Straßenverkehr werden können, da sie verhältnismäßig langsam und sehr leise sind.

Für deutsche Städte lag bisher praktisch keine Informationen vor, welche Auswirkungen ein steigender Anteil von E-Fahrzeugen auf den Verkehr hat. Dabei ist zu erwarten, dass Elektrofahrzeuge durchaus den Verkehrsfluss beeinflussen werden, beispielsweise werden die noch recht schwachen Akku-Leistungen an Steigungen wohl kaum das Verkehrstempo von Benzinern halten können.

7.2 Fragestellung

Die Einführung und Marktdurchdringung von Elektromobilität in Deutschland hängt an mehr Faktoren, als an der Preisentwicklung von Batterien und E-Fahrzeugen. Bisher fokussieren fast alle Modellregionen (s. unten) nur auf E-PKW's und werden in Großstädten und überregionalen Ballungszentren durchgeführt. Der Ansatz dieses Projektes ist es, den Schwerpunkt nicht auf noch nicht serienreife und für den Privatkunden kaum bezahlbare Elektroautos zu legen, sondern auf die besser entwickelten E-Roller. Gleichzeitig steht Osnabrück stellvertretend für eine große Zahl von mittleren Großstädten in Deutschland, für die so Erkenntnisse gesammelt werden können.

Ziel ist es, Daten zu sammeln, die einer Vielzahl von Städten und Stadtwerken dabei helfen können, wesentliche Fragestellungen rund um das Thema Elektromobilitätsinfrastruktur zu erkennen und Anfängerfehler zu vermeiden. Entscheidend ist es daher, Erkenntnisse über Mobilitätshemmnisse zu sammeln.

Mobilitätshemmnisse sind grundsätzlich entscheidend für die Wahl des Transportmittels. So können die lokale Verkehrsinfrastruktur oder Topographie die Transportmittelwahl ebenso beeinflussen, wie die eingesetzte Technologie. Damit E-Roller sich am Markt durchsetzen können, müssen sie gegenüber anderen Transportmitteln im Vorteil, mindestens aber ebenbürtig sein.

Die Anforderungen an Transportmittel können je nach der Nutzergruppe sehr unterschiedlich ausfallen. Bewohner des Umlandes müssen beispielsweise größere Strecken zurücklegen, Familien brauchen mehr Platz und Stauraum, Dienstleister müssen schnell und flexibel sein, andere Nutzer wollen vor allem günstig oder trocken zum Ziel kommen.

Welche Nische die E-Roller besetzen können hängt entscheidend von ihren Leistungsmerkmalen ab, u. a. welche Distanzen sie überwinden können, welche Steigleistungen möglich sind, ob genügend Lademöglichkeiten verfügbar sind, oder ob die Motorleistung ausreicht um auf

Hauptstraßen ‚mitzuschwimmen‘.

Vergleichen müssen sich E-Roller vor allem mit herkömmlichen Rollern; vielleicht aber in Zukunft auch vermehrt mit Pedelecs (Fahrräder mit ele. Unterstützung), da diese die Reichweite der normalen Fahrräder erhöhen. Nach einer Studie von 2006 (Weinert et al. 2006) sind die Strecken die mit einem Pedelec in Shijiazhuang (China) zurückgelegt werden im Schnitt 32% länger als mit normalen Fahrrädern. Durchschnittlich werden mit einem Pedelec 5,8 km pro Fahrt gefahren, während herkömmliche Räder nur etwa 4,4 km pro Einsatz bewegt werden. Nur in Ausnahmefällen werden Strecken länger als 18 km gefahren (Weinert et al. 2006). E-Roller haben im Gegensatz zu Rollern mit Verbrennungsmotoren eine verringerte Reichweite. Die Hersteller versprechen mit einer elektrischen Vollladung eine Reichweite von rund 70 km. Doch erste Erfahrungen der Stadtwerke Osnabrück AG zeigen, dass diese Angaben zumeist übertrieben sind. Dabei messen die Hersteller ihre Entfernungsdaten unter optimalen Bedingungen (ca. 20°C; windstill; ebene, unbefahrene Landstraße). Mit der Realität des städtischen Straßenverkehrs hat dies wenig zu tun. Ständiges Anfahren und Abbremsen erhöht den Stromverbrauch, ebenso wie kaltes Wetter, Steigungen oder Gepäck.



Abbildung 3 Zonenschema Region Osnabrück

Die Abbildung 4 zeigt die Region Osnabrück aufgeteilt in zwei Zonen: das Innenstadtgebiet mit einer durchschnittlichen Entfernung zur Stadtmitte von ca. 3 km, und den größeren Ring der zusätzlich auch die umliegenden Gemeinden umfasst und Entfernungen bis zu 25 km zum Stadtzentrum aufweist. Bei einer Entfernung von 25 km kann ein Elektroroller ohne zu tanken

eine Hin- und Rückfahrt sicher bewältigen. Diese Entfernungen werden E-Roller täglich leisten müssen, damit sie zu einer echten Alternative werden können. Studien belegen, „[...] dass der durchschnittliche Pkw-Fahrer an etwa 80 % der Tage eines Jahres weniger als 40 km zurücklegt.“ (Pehnt et al. 2007). Diese Fahrleistung wäre mit einem E-Roller problemlos möglich.

Für Anwohner der innerstädtischen Zone wird ein E-Roller wahrscheinlich weniger interessant sein, da mit einem Fahrrad kurze Strecken ähnlich bequem zu überwinden und Kosten sowie Parkprobleme gering sind. In den städtischen Randzonen und in den umliegenden Gemeinden ist die Situation jedoch eine andere. Die Entfernungen nehmen zu und auch das Radwegenetz ist dort schlechter ausgebaut.

Auch für Personen, die außerhalb der Stadtgrenzen von Osnabrück leben oder arbeiten, kann ein E-Roller zur Alternative werden. Laut der Stadt Osnabrück pendeln täglich ca. 48.494 Arbeitnehmer in die Stadt. Davon stammen 29.778 Pendler aus dem Landkreis Osnabrück. Gleichzeitig pendeln 17.558 Personen aus der Stadt, wovon 8.365 Personen in den Landkreis auspendeln (Stadt Osnabrück, 2010).

Laut dem Statistischen Bundesamt nutzen rund 10% der Beschäftigten Motorroller, Mopeds, Motorräder und ähnliche Geräte. Bei 38.143 Personen die täglich zwischen der Stadt und dem Landkreis Osnabrück pendeln, könnte sich damit ein Potenzial von rund ca.

3.800 E-Roller Nutzern

in der Region ergeben.

Die Idee zu dem Projekt ist, im normalen Alltag zu testen, welche Möglichkeiten die E-Roller dem Nutzer derzeit bieten können. Des Weiteren wird geprüft, welche Limitierungen in Kauf genommen werden müssen und wo regionale Infrastrukturdienstleister wie die Stadtwerke agieren müssen, um mit dieser Grundlage E-Roller in deutschen Städten erfolgreich einzuführen.

Für die Erhebung sicherer und exakter Daten sollen sogenannte Datenlogger in die E-Roller eingebaut werden. Diese können Informationen über das Nutzungsverhalten liefern, die über Kundenbefragungen und Schätzungen nicht in vergleichbarer Qualität zu erheben wären.

7.3 Aktueller Stand der Elektromobilität

In den letzten beiden Jahren wurden mehrere Großprojekte, in verschiedenen Regionen Deutschlands gefördert und durchgeführt. Dies förderte zwar eine hohe öffentliche Akzeptanz, führte jedoch nicht zu einer nennenswerten Marktdurchdringung. Grund hierfür ist, dass nicht ausreichend Fahrzeuge bereitgestellt werden konnten. Die angekündigten E-PKWs sind bisher in der Fläche kaum verfügbar – durch diesen Umstand ist eine gewisse Ernüchterung in möglichen Nutzergruppen eingetreten.

Nachdem im Jahre 2009 der Verkauf von E-Bikes deutlich zugenommen hat, kann man heute davon ausgehen, dass sich diese Technologie etabliert und die Nutzung großflächige Akzeptanz gefunden hat.

Elektroroller wurden im Jahre 2009 in nennenswerter Zahl nur in China verkauft. Einige deutsche Importeure hatten in den Jahren 2009 bis 2011 versucht diese Elektroroller mit geringen Anpassungen für den deutschen Markt zu vermarkten – mit sehr geringem Erfolg. Die Absatzzahlen der führenden E-Rolleranbieter waren bis Ende 2011 verschwindend gering. Im

ersten Quartal 2012 machte sich jedoch ein nahezu explosionsartiger Anstieg der Absatzzahlen bemerkbar.

Verantwortlich für diesen Anstieg sind mehrere Gründe die nahezu zeitgleich auftraten:

- Deutlicher Anstieg der Kraftstoffpreise
- Hohe öffentliche Aufmerksamkeit im Bereich Elektromobilität
- Regionale Gesetzgebungen (Verbot von Rollern mit Verbrennungsmotoren in einigen urbanen Gebieten)
- Anpassung der importierten Elektroroller an europäische Anforderungen (2. Generation der Importroller)
- Einstieg von neuen Vertriebspartnern (Stadtwerke, Unternehmen, Baumärkte)

Die derzeit verfügbaren E-Roller können mit ihren Reichweiten von 50 – 60 km und Geschwindigkeiten von 45 km/h ideal im innerstädtischen Bereich genutzt werden.

Die deutlich gestiegenen Absatzzahlen führen mittlerweile zu weiteren Investitionen in die Entwicklung neuer E-Roller Generationen. Hierbei fällt auf, dass sowohl die technischen Systeme Batterie, Leistungselektronik und Elektromotor weiterentwickelt als auch ein deutlich größeres Spektrum an Fahrzeugtypen angeboten werden (Reichweiten erhöhen sich und es werden auch E-Roller mit Geschwindigkeiten bis 100 km/h entwickelt).

Bedingt durch die höheren Geschwindigkeiten werden diese neuen E-Roller ein weiteres Marktsegment erobern: die Berufspendler aus dem ländlichen Umfeld von Städten.

Ein großes Problem für die Verbreitung von Elektrorollern stellt die nicht vorhandene Ladeinfrastruktur dar. Im städtischen Raum wurden in den letzten Jahren einige zentrale Ladepunkte installiert. Jedoch reichen diese bei weitem nicht aus um eine entsprechende Lademöglichkeit jedem potentiellen Nutzer zu gewährleisten. Zurzeit sind die Nutzer auf Lademöglichkeiten zu Hause und bei ihrem Arbeitsplatz begrenzt. Dies schränkt wiederum die Verbreitung im städtischen Umfeld stark ein.

Einer der Gründe für die mangelnde Infrastruktur ist das fehlende wirtschaftliche Geschäftsmodell. Die Installation von Ladesäulen kostete bei Beginn dieses Projektes etwa 15.000 EUR pro Ladepunkt. Diese Ausgaben sind unwirtschaftlich bei den derzeitigen und absehbaren künftigen Strompreisen. In den beiden letzten Jahren wurden somit nahezu ausschließlich subventionierte Ladepunkte geschaffen. Die Preise für Ladesäulen geben jedoch derzeit sehr stark nach: Neben den Highend Landesäulen werden mittlerweile auch preisgünstigere Modelle bereit gestellt. Darüber hinaus bieten die Hersteller inzwischen Wandboxen – die an Hauswänden montiert werden - an, die. Durch diesen Wandel vermindern sich die Kosten massiv. Derzeit liegen Ladesäulen mit Abrechnungssystem bei ca. 5.000 EUR pro Stück; Wandboxen mit Abrechnungssystem werden in den nächsten Monaten für etwa die Hälfte angeboten; Systeme ohne Abrechnungssystem, z. B. für Unternehmensparkplätze oder private Ladestationen, können unter 1.000 EUR bereitgestellt werden. Eine großflächige Ausstattung mit Ladepunkten wird jedoch erst in wenigen Jahren mit einem weiteren Preisverfall um den Faktor 4-5 möglich sein.

7.4 Projektablauf

In einer ersten Phase des Projektes wurden die Datenlogger entwickelt. Diese erste Generation der Datenlogger kann Batteriespannungen, Batterieströme und Temperaturen aufzeichnen. Mit den Geräten wurden zunächst zwölf Elektroroller der Stadtwerke Osnabrück ausgestattet. In einem ersten Feldtest wurden sowohl die Datenlogger als auch Strom- / Spannungsprofile der Batterien in den E-Rollern erfasst.

Nach einer dreimonatigen Testphase wurden die Daten zunächst analysiert. Die Analyse der Daten führte zu einer Weiterentwicklung der Datenerfassungssysteme während der Wintersaison. Die Datenlogger bekamen eine Hardwareerweiterung und eine Softwareanpassung. Durch die Hardwareerweiterung ist es möglich, neben den reinen elektrotechnischen Daten, auch Geodaten zu erfassen (Position, Geschwindigkeit, Höhendifferenz). Dies ermöglicht eine deutlich bessere Auswertung der elektrotechnischen Daten und deren Korrelation zu Fahrsituationen. Durch die Softwareüberarbeitung wurde eine Benutzerunabhängige Datenerfassung gewährleistet und eine intelligentere Erfassung der Daten (kein festes Zeitraster sondern situationsabhängiges Zeitraster).

Diese Datenlogger wurden im zweiten Jahr zunächst in drei Fahrzeugen getestet (im Stadtgebiet Osnabrück) und nach einer kurzen Testphase in weiteren drei Fahrzeugen (touristische Touren) eingesetzt. In der dritten Saison werden sämtliche Testfahrzeuge mit dieser Generation ausgestattet.

Parallel zu der Datenerfassung im Feld wurden ein Prüfstand für Elektroroller sowie ein Prüfstand für Batterien entwickelt und aufgebaut. Seit etwa eineinhalb Jahren gibt es Kontakte zu verschiedenen Herstellern von Elektrorollern und Batteriesystemen. In der dritten Saison werden sowohl mehrere Elektroroller auf dem Prüfstand und als auch die neuen Batteriespeichersysteme untersucht werden.

In der zweiten „Winterpause“ wurde ein Datenbanksystem mit entsprechender Auswertesoftware entwickelt, um die erheblichen Datenmengen automatisiert auswerten zu können.

7.5 Nutzungsverhalten im urbanen Osnabrück

7.5.1 Entwicklung Datenloggersystem V1

Das Datenloggersystem V1 besteht aus einem Mikrokontroller basierendem Datenerfassungssystem. Ziel dieses Systems ist eine möglichst preiswerte Datenerfassung die in einem em E-Roller integriert werden kann. Der Funktionsumfang wurde zunächst beschränkt, um möglichst schnell Erfahrungen mit der Erfassung und Verarbeitung von Felddaten zu sammeln. In diesem System sind folgende Komponenten integriert:

- Mikrokontrollersystem
- Echtzeituhr
- Wechselspeichereinheit (SD-Karte)
- Abgesicherte Eigenenergieversorgung mit Weitbereichseingang (5V bis 72V)
- Spannungsmesseingang (0V bis 72V)

- Strommesseingang (-300A bis 300A)
- Zwei Temperaturmesseingänge (-40°C bis 80°C)
- LED-Anzeige
- Taster zum Entfernen der SD-Speicherkarte
- Programmierschnittstelle

Das Komplettsystem wurde in ein Plastikgehäuse untergebracht. Das Messsystem wird in der Regel unter der Sitzbank des Elektrorollers untergebracht. Die Spannungsmesseinrichtung und die Energieversorgung direkt mit der Batterie verbunden. Die Strommesseinrichtung wird in der Regel zwischen der Batterie und dem Fahrkontroller (Leistungselektronik zur Ansteuerung des Elektromotors) integriert – der Ladestrom wird bei den von den Stadtwerken benutzten E-Rollertypen ebenfalls durch den Stromsensor geführt. Somit ist sowohl der Lade- als auch der Entladestrom der Batterien messbar. Die Temperatursensoren werden sowohl an der Batterie als auch am Rahmen des Rollers montiert. Es werden somit die Umgebungstemperatur und die Temperatur im Batteriebereich erfasst. Die Daten werden zunächst in einem festen Zeitraster erfasst. Das Zeitraster wurde standardmäßig auf zwei Sekunden eingestellt, ist jedoch individuell einstellbar. Die Daten werden für jeden Tag in eine separate Textdatei geschrieben und können mit Excel oder mit einem anderen Datenbanksystem verarbeitet werden. Jede Messung wird durch einen Zeitstempel gekennzeichnet.

Es wurden 15 Datenlogger der Version 1 gebaut, wovon 12 Datenlogger in Elektrorollern der Stadtwerke im Einsatz waren bzw. noch sind. Ein Datenlogger wurde zur Erfassung von Umweltgrößen in Gebäuden verwendet. In diesem Einsatzbereich werden Temperaturen und Luftfeuchtigkeit erfasst. Ein weiterer Datenlogger wird im Labor versuchsweise zur Datenerfassung und zur Regelung von geschlossenen Atmosphären eingesetzt. Hiermit ist es möglich, Pflanzenstecklinge nicht wie üblich per Luftfracht sondern per Seefracht ohne Qualitätseinbußen zu befördern (Voruntersuchung / Bachelorarbeit für ein mögliches Projekt mit hohem Umwelteinfluss).

7.5.2 Entwicklung Datenloggersystem V2

Aufbauend auf das Datenloggersystem Version 1 wurde eine zweite Version entwickelt. Hierbei wurden die im Feld gewonnenen Ergebnisse berücksichtigt und der Funktionsumfang erweitert. Das System wurde modular aufgebaut, so dass eine Erweiterung um weitere Funktionen möglich ist. Zudem kann das System in verschiedenen Ausbaustufen aufgebaut und weitere Kosten gespart werden.

Die in den Elektrorollern verwendete Variante der Version 2 besitzt folgende zusätzliche Module:

- GPS-Empfänger und Auswertung (Position, Geschwindigkeit und Höhe)
- Mögliche Anbindung an ein Lokal Area Network (LAN)
- USB-Anschluss zur Speicherung von Daten
- Intelligente Datenerfassung



Abbildung 4: Datenlogger Hardwareversion V2

Die in dieser Version enthaltene „intelligente Datenerfassung“ passt die Messintervalle den unterschiedlichen Betriebs- und Fahrzustände des Elektrorollers an. So wird bei längeren Standzeiten die Datenerfassung abgeschaltet, um Energie und Speicherplatz zu sparen. Der GPS Empfänger wird außerhalb des Batteriefachs angebracht und über ein entsprechendes Kabel mit dem Datenlogger verbunden. Das aufgefangene Signal wird direkt im Datenlogger analysiert und die Positions-, Geschwindigkeits- und Höhendaten gespeichert. Zusätzlich wird gespeichert wie zuverlässig diese Daten sind, um mögliche Fehler ausschließen zu können.

Die GPS-Daten werden gemeinsam mit den Spannungs-, Strom- und Temperaturdaten ausgewertet. Die Fahrinformationen werden in einer Karte angezeigt.

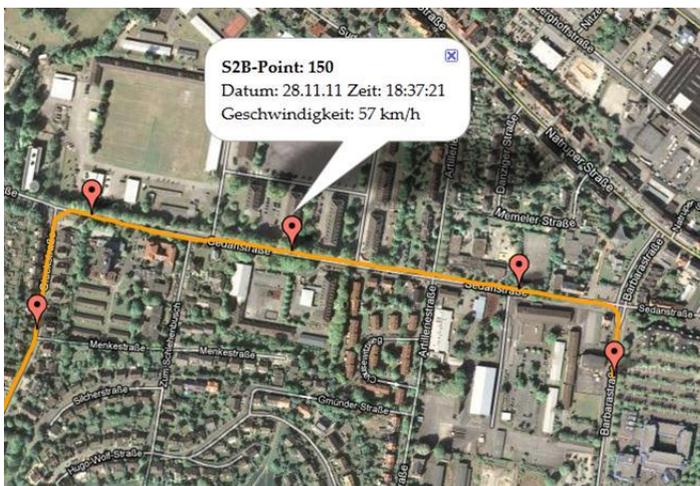


Abbildung 5: Kartenauswertung der GPS-Daten

Weitere mögliche Erweiterungsmodulare des Datenloggers Version 2 sind die Datenübertragung per UMTS, WLAN und Benutzeridentifikation (RFID). Hiermit kann der Datenlogger in größere Fahrzeugflotten eingesetzt werden mit der positiven Konsequenz, eines einfacheres Datenauslesens. Datenerhebung im urbanen Gebiet Osnabrück

Am Flottenversuch in Stadtgebiet Osnabrück waren insgesamt zwölf Elektroroller unterschiedlicher Fabrikate und Ausführungen eingesetzt. Sämtliche E-Roller wurden von den Stadtwerken bereitgestellt und zehn der Elektroroller von den Stadtwerken direkt betreut. Die zehn Roller der Stadtwerke wurden an unterschiedliche Stellen der Stadtwerke, Tochterunternehmen der Stadtwerke und der Stadt Osnabrück genutzt. Zwei Elektroroller wurden an der Hochschule Osnabrück stationiert und von Mitarbeitern der Elektrischen Antriebstechnik betreut. Einer dieser Roller wurde zum Berufspendeln und Botenfahrten eingesetzt.

Während der bisherigen Testphase (Sommer 2011 und komplett 2012) waren drei Roller in Unfälle mit größerem Schaden verwickelt. Ein Elektroroller musste vollständig, zwei weitere für mehrere Wochen, aus dem Versuch genommen werden. Die beiden E-Roller sind aber 2013 wieder einsatzfähig.

Im Sommer 2011 wurden mit drei Datenloggern Daten erfasst und bewertet. Das Jahr 2012 wurde komplett mit allen zur Verfügung stehenden Fahrzeugen erfasst.

7.5.3 Auswertung der Daten

Die Auswertung der Daten wurde zunächst per Excel durchgeführt. Hierfür wurden entsprechende Makros programmiert. Die Textdateien werden zunächst einzeln für jeden Tag eingelesen. Die Spannungs-, Strom- und Temperaturdaten werden zunächst in Fahrblöcke eingeteilt. Jeder Fahrblock wird dann gesondert ausgewertet. Es werden Übersichtsdiagramme durch Mittelwertbildung mehrerer Messpunkte - in denen Fahrprofile zu erkennen sind - erstellt. In Detaildiagrammen können die entsprechenden Beschleunigungsphasen, Segelphasen, Bergfahrphasen und Standphasen dargestellt werden. Darüber hinaus werden in diesen Diagrammen Belastungen der Batterie analysiert.

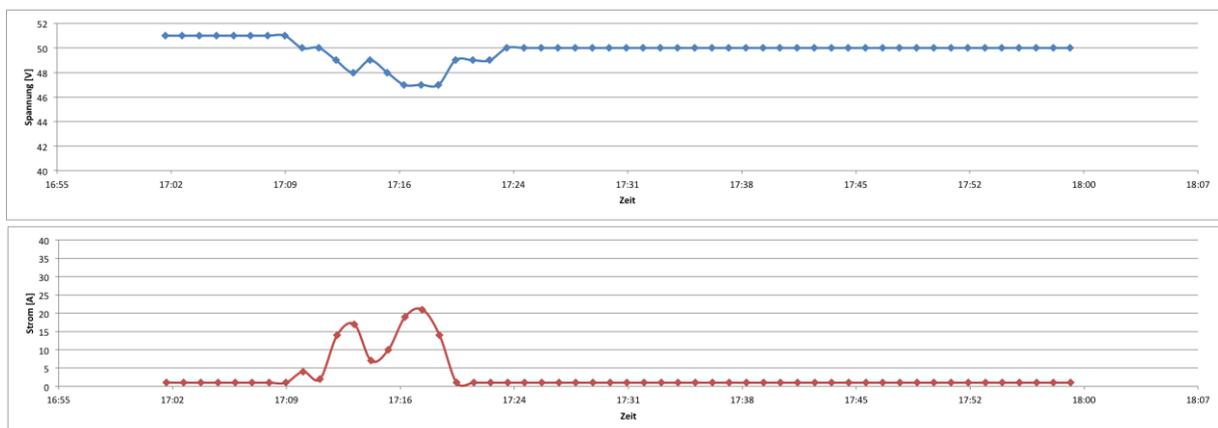


Abbildung 6: Übersichtsdiagramm 1 (Mittelwertbildung) - Innoscooter

Im Übersichtsdiagramm (Abbildung 6) ist zu erkennen, dass die Fahrt gegen 17:09 Uhr gestartet wurde und bis 17:20 Uhr gedauert hat. Nach einer Pause von 17:20 Uhr bis 18:08 Uhr wurde die Fahrt wieder aufgenommen und dauerte bis 18:38 Uhr (Abbildung 7). Diese beiden Fahrten sind typisch für Stadtfahrten. Im Innenstadtbereich kann innerhalb von 10 Minuten bereits eine beachtliche Strecke zurückgelegt werden. Eine Fahrt mit einer Dauer von 30 Minuten ist bereits eine lange Fahrt.

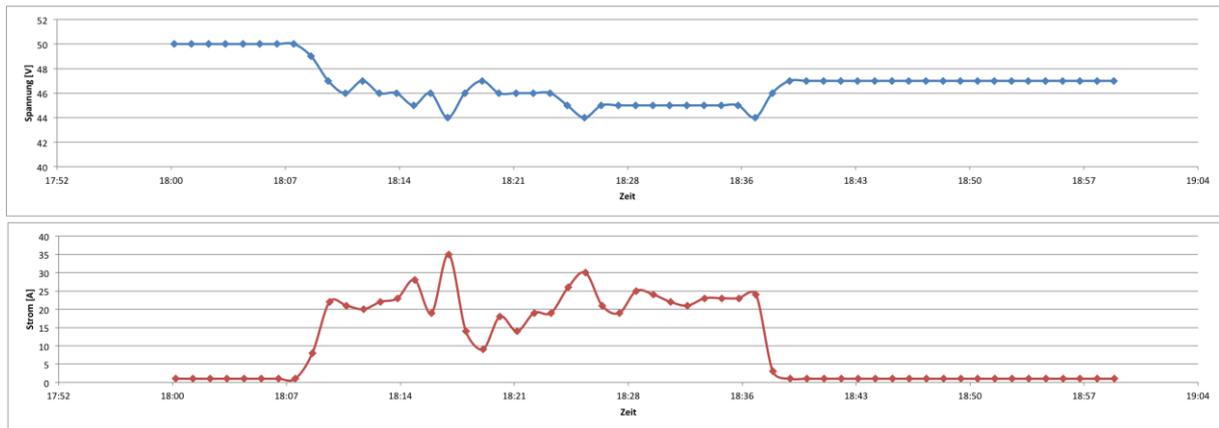


Abbildung 7: Übersichtsbild 2 (Mittelwertbildung) - Innoscooter

In beiden Diagrammen wurden die Rohdaten stark gemittelt. Aus diesem Grund sind die Stromdaten (Zeitkonstante des Antriebssystems ist deutlich kleiner als die gezeigten Zeitabstände) nicht aussagekräftig. An den Spannungsdaten (51 V) kann dennoch abgelesen werden, dass der Roller zunächst mit einer vollgeladenen Batterie übernommen wurde. Durch die Belastung während der Fahrt bricht die Spannung an den Batterieklemmen deutlich ein. Nach Ende des ersten Fahrtabschnitts beträgt die Klemmenspannung 50 V. Während der Standzeit von 48 Minuten erholt sich die Klemmenspannung nur unwesentlich. Während des zweiten Fahrzyklus sinkt die Spannung auf 44 Volt ab. Nach dem Fahrzyklus stellt sich stationär eine Spannung von 47 Volt ein. Zur genaueren Beurteilung der Batteriebelastung müssen detailliertere Diagramme (mit geringerer Mittelung) herangezogen werden.

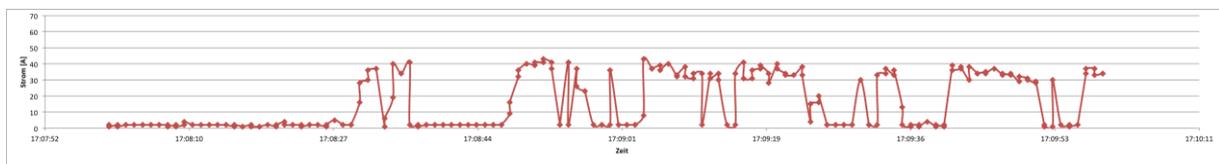


Abbildung 8: Detailaufnahme 1-1

In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass der Spitzenstrom des Antriebssystems auf 40 Ampere bei diesem Elektroroller begrenzt wurde. Diese Begrenzung schützt die Leistungselektronik und Batterie vor Zerstörung bzw. vor der unverhältnismäßigen Reduktion der Batterielebensdauer. Der Elektroroller wird innerhalb weniger Sekunden auf seine Endgeschwindigkeit beschleunigt und dann im Segel-, Beschleunigungs- und Bremsbetrieb gefahren. Dies entspricht dem subjektiven Gefühl einer digitalen „Gasvorgabe“ am Handgriff.

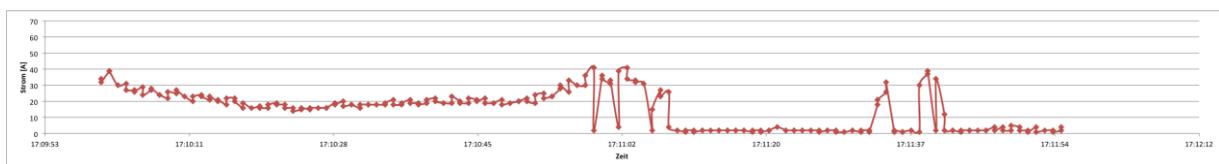


Abbildung 9: Detailaufnahme 1-2

In Abbildung 9 erkennt man eine längere Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit. Beim Erreichen der Geschwindigkeitsgrenze wird die Leistung des Antriebes „gedrosselt“ dies führt zu einem Strombedarf von um die 20 Ampere. Nach einem kurzen Höhenunterschied (Anstieg des Stromes) folgt eine Segelfahrt / Beschleunigungsfahrt gefolgt von einem Abbremsen über die mechanische Reibbremse. Nach etwa 30 Sekunden Standzeit wird der Elektroroller kurz zweimal beschleunigt. Man erkennt an den immer positiven Batterieströmen dass dieser Elektroroller keine Rekuperationsmöglichkeiten besitzt.

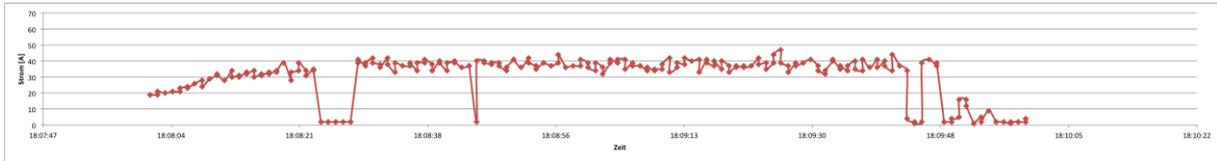


Abbildung 10: Detailaufnahme 2-1

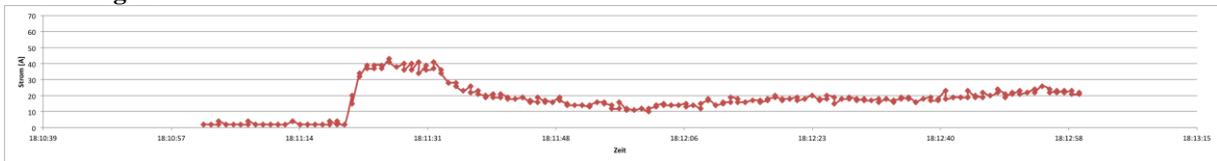


Abbildung 11: Detailaufnahme 2-2

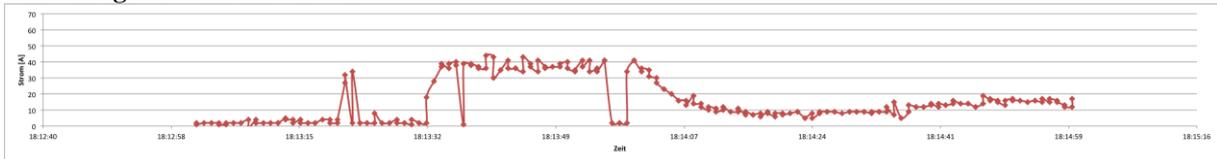


Abbildung 12: Detailaufnahme 2-3

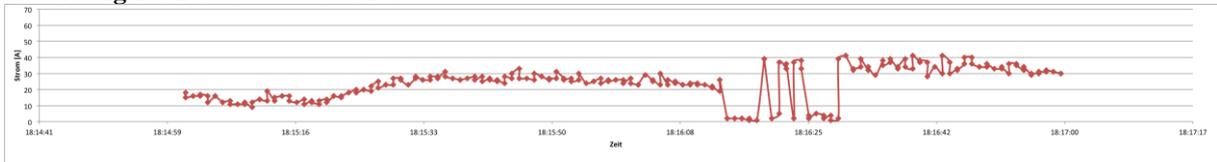


Abbildung 13: Detailaufnahme 2-4

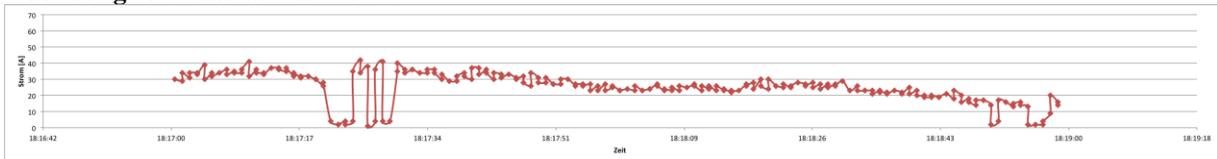


Abbildung 14: Detailaufnahme 2-5

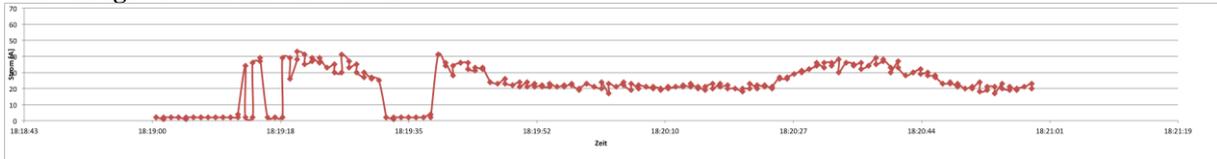


Abbildung 15: Detailaufnahme 2-6

In den Abbildungen 10 bis 15 ist zu erkennen, dass diese längere Fahrt mit deutlich geringeren Unterbrechungen gekennzeichnet ist. Der Elektroroller wurde mehrmals für längere Zeit an der Geschwindigkeitsgrenze betrieben.

7.5.4 Untersuchung des Fahrverhaltens im Stadtverkehr

Um den Einfluss unterschiedlicher Fahrstile mit dem hier betrachteten Elektroroller zu ermitteln, wurden auf einer vorher festgelegten Teststrecke durch die Osnabrücker Innenstadt zwei Testfahrten mit dem gleichen, vorher vollgeladenem Roller absolviert. Auf der ersten Testfahrt wurde der Roller immer mit voller Leistung beschleunigt und möglichst zügig durch den Stadtverkehr bewegt. Bei diesem Fahrstil entspricht das Vorkommen in etwa der Geschwindigkeit eines PKW. In der zweiten Runde wurde der Roller nur unter Teillast beschleunigt, und der Antrieb durch eine vorausschauende Fahrweise möglichst wenig belastet. Die Auswertung der Aufzeichnungen des Datenloggers zeigten für die zweite Runde wesentlich geringere Motorströme, was sich positiv auf die Reichweite auswirkt. Die folgende Abbildung zeigt die gefahrene Teststrecke mit einer Gesamtlänge von 8,9 km.

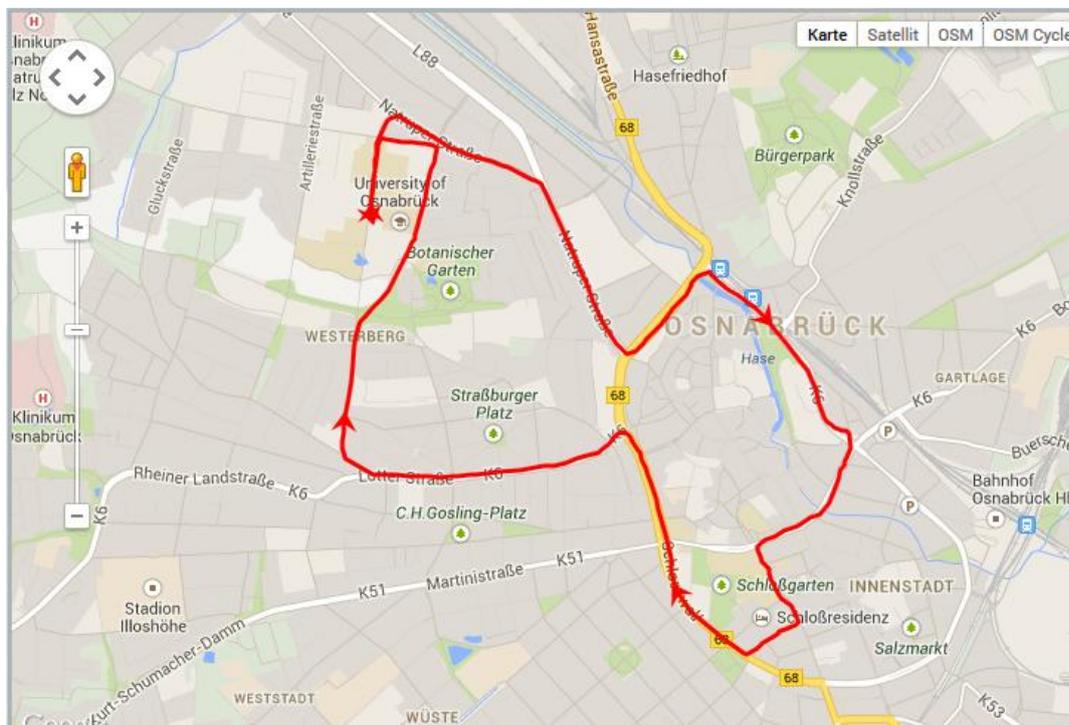


Abbildung 16: Teststrecke für Fahrverhalten

Beide Testfahrten wurden unter gleichen Verkehrs- und Witterungsbedingungen durchgeführt (Wochentag, 10:00-11:30, 22°C). Wie die folgende Tabelle zeigt, ist der Energieverbrauch in der zweiten Runde deutlich geringer ausgefallen, ohne dass die Fahrt wesentlich länger gedauert hat.

	1. Testfahrt	2. Testfahrt
Stromverbrauch elektrischer Antrieb	321 Wh	257 Wh
Wirkungsgrad Akku	72 %	77 %
Zum Wiederaufladen benötigte Energie	509 Wh	388 Wh
CO₂/km nach Strommix 2012	33 g	25 g
Fahrtzeit	21 min.	24 min.

Abbildung 17: Ergebnisse unterschiedlicher Fahrstile

Im gewöhnlichen Stadtverkehr muss der Roller sehr oft und stark beschleunigt werden, um ein zügiges Vorankommen zu ermöglichen. Der Rest der Fahrtzeit besteht größtenteils aus Phasen mit geringer Stromaufnahme wie die Fahrt auf Endgeschwindigkeit (ca. 30A) oder Wartezeiten vor Ampeln. Wie auf der Testfahrt zu sehen ist die Leistungsfähigkeit des Akkus bei dieser Fahrweise bereits nach gut zehn Kilometern Fahrt erschöpft. Auffällig war dabei, dass die Leerlaufspannung, welche ein Merkmal für den Ladestand ist, kaum unter den Wert des vollgeladenen Akkus gefallen ist. Wie sich später auf dem Rollenprüfstand zeigte, nimmt der Antrieb während der gesamten Beschleunigungsphase den größtmöglichen Strom auf, der je nach Ladezustand zwischen 55 und 65 A variiert. Erst bei Erreichen der Endgeschwindigkeit fällt der Strom auf Werte um 30A. Auf dem Rollenprüfstand konnte der Roller die Endgeschwindigkeit über eine volle Stunde halten, was einer Reichweite von etwa 40 Kilometern entspricht. Daraus lässt sich schließen, dass vor allem die hohen Ströme eine überdurchschnittliche Belastung für die Batterie darstellen.

Die Betrachtung der für die Ladung benötigten Energie zeigt, dass die hohe Stromaufnahme des Antriebs die Reichweite des Rollers deutlich einschränkt, auf den Wirkungsgrad des Gesamtsystems aber eher geringen Einfluss hat. Der Energiebedarf je Kilometer im Stadtverkehr entspricht etwa der Fahrt auf Endgeschwindigkeit. Auf der Probefahrt im Stadtverkehr wurde der Roller häufig von kleinen Geschwindigkeiten beschleunigt, bei denen der Antrieb einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad aufweist.

7.5.5 Schlussfolgerungen über das Nutzungsverhalten

Der Nutzer betreibt den Elektroroller hauptsächlich in zwei Betriebszuständen. Der erste Betriebszustand tritt bei Bergauffahrten, Beschleunigungen und teilweise bei Fahrten an der Geschwindigkeitsgrenze auf. In diesem Betriebszustand zieht die Leistungselektronik die maximal zulässige Leistung aus den Batterien. Der Zustand ist gekennzeichnet durch eine Strombegrenzung (kleine Zeitkonstante) und eine thermische Begrenzung der Leistungselektronik (große Zeitkonstante). Der zweite Betriebszustand ist der Leerlauf dieser Zustand tritt beim Segeln, Bergabfahrten und in Haltephasen auf. Hierbei wird keine Beschleunigungsenergie

benötigt – der Elektroroller muss ausschließlich seinen Eigenbedarf an Energie zur Verfügung gestellt bekommen. Die Fahrten in der Innenstadt zeigen somit ein nahezu „digitales“ Benutzerverhalten.

Mit einer einfachen Erweiterung der Leistungselektronik könnte der Leistungsfluss auch umgedreht werden. Energie könnte während der Brems- und Bergabfahrten rekuperiert werden.

Generell sind die Fahrten in der Stadt meist Punkt zu Punkt Fahrten oder Hin- und Rückweg somit ist spätestens jeder zweite Halt ein längerer Aufenthalt an dem sich eine Ladung der Energiespeicher durchaus lohnen würde. Die Fahrlängen liegen deutlich unterhalb der Reichweite der Elektroroller. In einigen Anwendungen ist die wöchentliche zurückgelegte Entfernung der Elektroroller geringer als die Reichweite der Fahrzeuge. Die Selbstentladung der Fahrzeuge spielt somit in den Übergangsmonaten und im Winter eine durchaus bedeutende Rolle. Das regelmäßige Laden ist somit wichtig für den Erhalt der Ladung und abhängig von den verwendeten Batterietypen auch wichtig für die Lebensdauer der Energiespeicher.

Die meisten Ladungen wurden an privaten und halb-öffentlichen Ladepunkten vorgenommen. Es ist für die Nutzung der Elektroroller eine Ladestelle im privaten Bereich als auch eine Lademöglichkeit beim Arbeitgeber / Schule vollkommen ausreichend. Eine weiterführende Ladefrastruktur erscheint für den Einsatz der Elektroroller im urbanen Alltag nicht nötig.

Bei der Erstellung von Ladepunkten sollten somit hauptsächlich Arbeitgeber bzw. Ausbildungsstätten involviert werden. Auf der privaten Seite müssten gerade in urbanen Gebieten in denen die Bevölkerungsdichte sehr hoch ist Straßenladepunkte in Wohngebieten geschaffen werden. Dies könnte durch Ladepunkte an Hauswänden realisiert werden oder durch integrierte Ladepunkte an Straßenlaternen. Hierbei sollte beachtet werden das derzeit jeder E-Roller ein eigenes Ladegerät (mit Wechselstromanschluss) mit sich führt das allerdings nicht in den Roller integriert wurde. Unsere Empfehlung wäre Gleichstromladepunkte mit hocheffizienten Ladegeräten zu installieren. Dies würde den Wirkungsgrad des Ladevorgangs deutlich verbessern und vor Diebstahl oder Vandalismus deutlich besser schützen.

7.6 Nutzungsverhalten im überregionalen touristischen Bereich

Auf Initiative der Stadtwerke Nürtingen und des E-Roller Herstellers emco aus Lingen wurde der Projektumfang erweitert. Ziel der Stadtwerke Nürtingen war die Elektromobilität deutlich stärker in das Bewusstsein der Bürger zu rücken. Seit mehreren Jahren wird in Nürtingen ein Elektromobilitätsmarathon veranstaltet mit lokaler und landesweiter politischer Prominenz. Wobei eine sehr hohe Bürgerbeteiligung aus den unterschiedlichsten gesellschaftlichen Schichten zu beobachten ist. Die große Aufmerksamkeit des Events und die hohe Nachfrage haben dazu geführt das die Stadtwerke Nürtingen mittlerweile auch Elektrofahrzeuge vertreiben.

7.6.1 E-Mobilitäts Marathon Nürtingen

Der E-Mobilitätsmarathon in Nürtingen sollte über eine Strecke von 41km ausgetragen werden. Wegen der unsicheren Wetterlage wurde die Strecke jedoch auf etwa 25km verkürzt. Der E-Mobilitätsmarathon war ebenfalls Auftaktveranstaltung einer Elektrorollerexpedition.

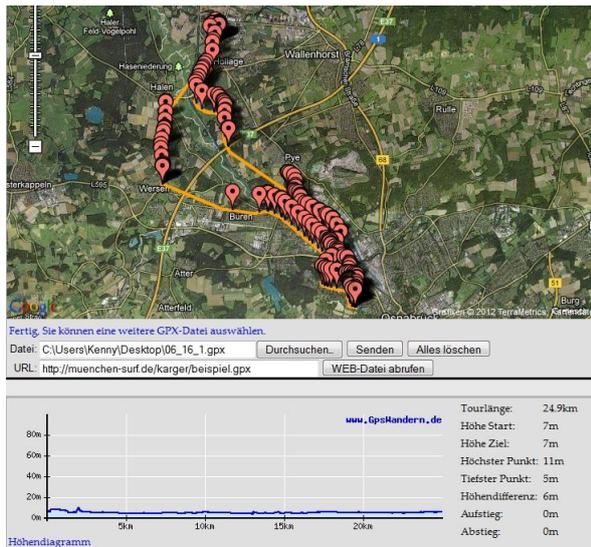


Abbildung 18: E-Roller Marathon Nürtingen GPS-Daten Auswertung

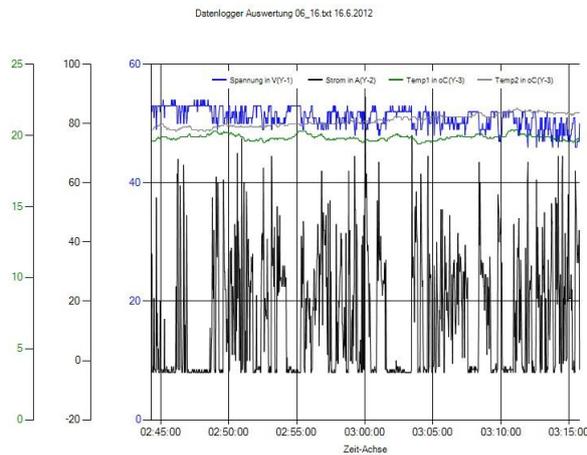


Abbildung 19: E-Roller Marathon Nürtingen Batterieaufzeichnung

7.6.2 Tour durch Deutschland, Frankreich, Österreich und Schweiz

Es wurden aus unzähligen Bewerbern drei Personen ausgewählt die je einen Elektroroller für einen Monat zur Verfügung bekamen. Zusätzlich bekam jeder Teilnehmer ein Budget für Übernachtung und Verpflegung von 800 EUR. Ziel des Wettbewerbs war die Leistungsfähigkeit von Elektrorollern nachzuweisen und mit einer hohen Medienpräsenz auf das Thema Elektromobilität aufmerksam zu machen. Die Ladeinfrastruktur stand nicht im Fokus.

Die Hochschule Osnabrück beteiligte sich an diesem Event mit dem Ziel möglichst viele Nutzungsdaten in kürzester Zeit zu sammeln und auszuwerten. Natürlich spielte auch eine gewisse Neugierde eine Rolle. Welche Touren sind mit einem Elektroroller möglich? Gibt es genügend Ladepunkte die es ermöglichen in einer fremden Umgebung täglich eine gewisse Strecke zurücklegen zu können? Wie werden die Teilnehmer ihren Tagesablauf und das Nachladen organisieren?

Beispielhaft sind hier zwei Tagestouren des Teilnehmers Gerhard Keppler aufgeführt:

Fahrten am 9. Juli 2012:

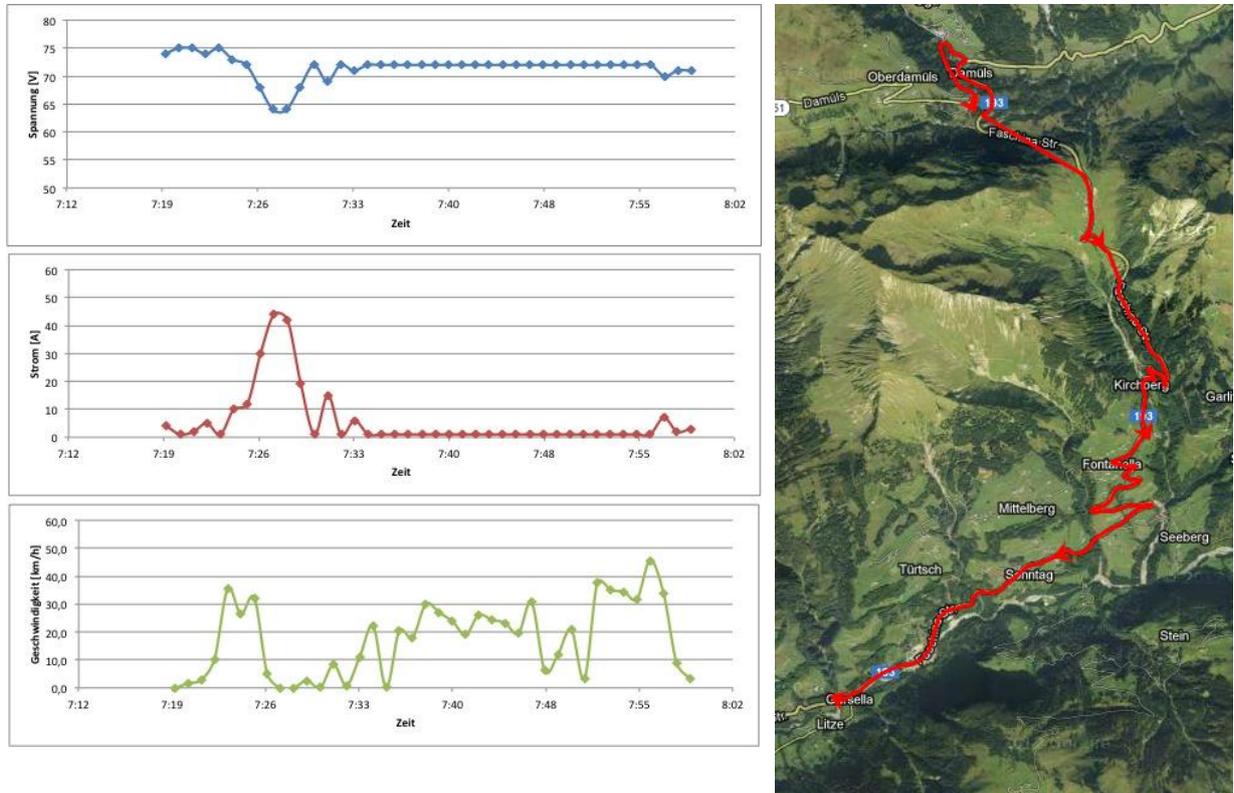


Abbildung 20: Touristiktour Tag 1/1

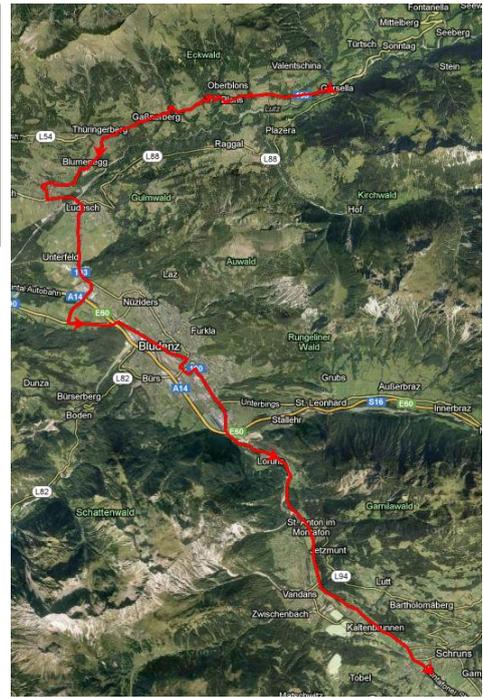
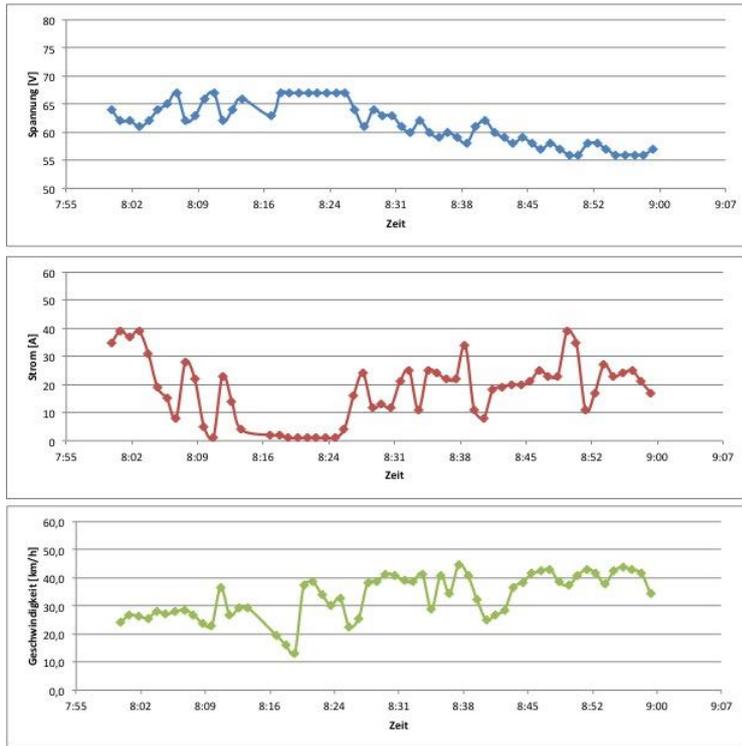


Abbildung 21: Touristiktour Tag 1/2

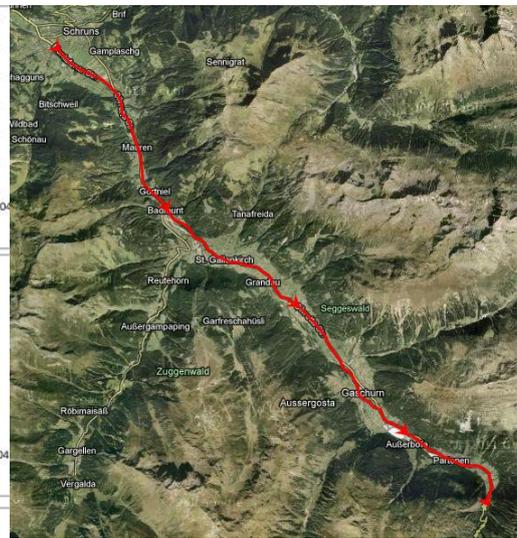
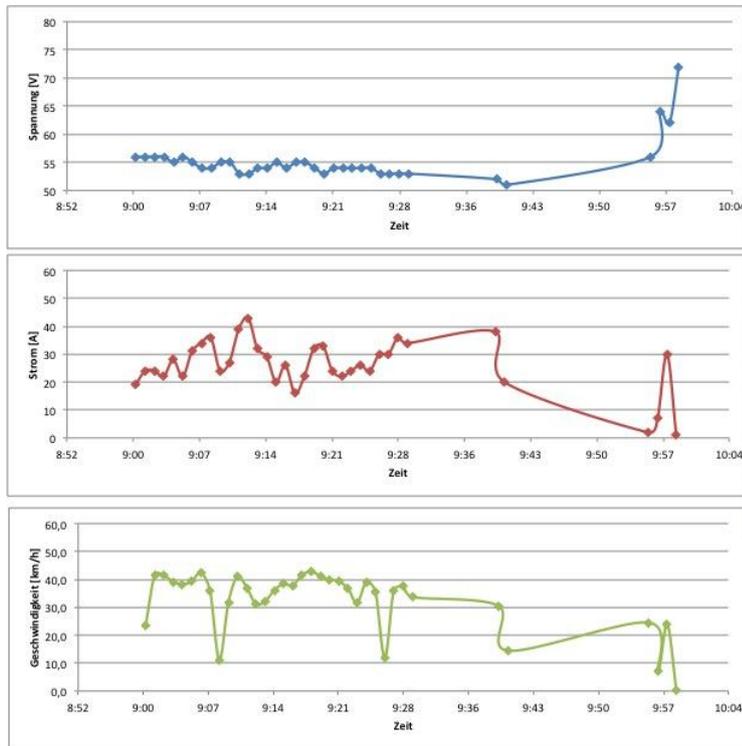


Abbildung 22: Touristiktour Tag 1/3

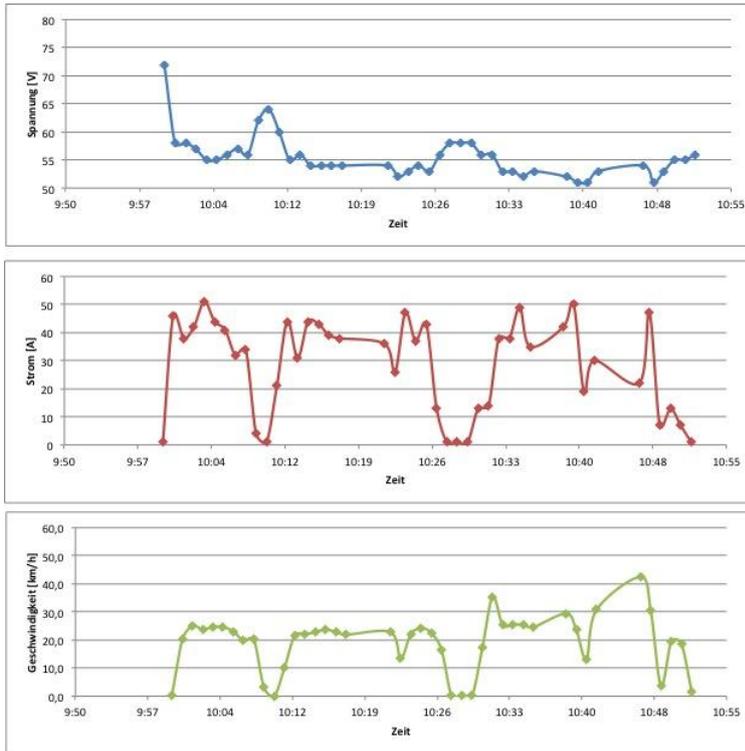


Abbildung 23: Touristiktour Tag 1/4

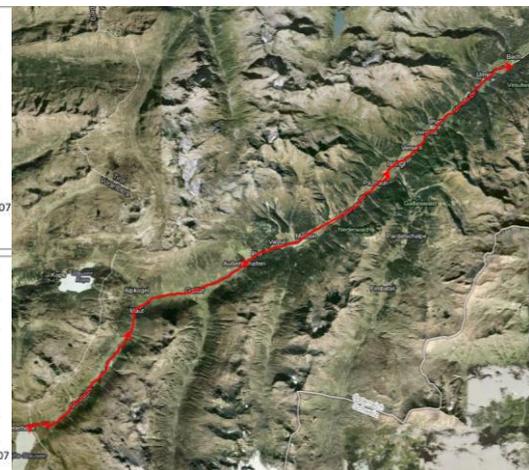
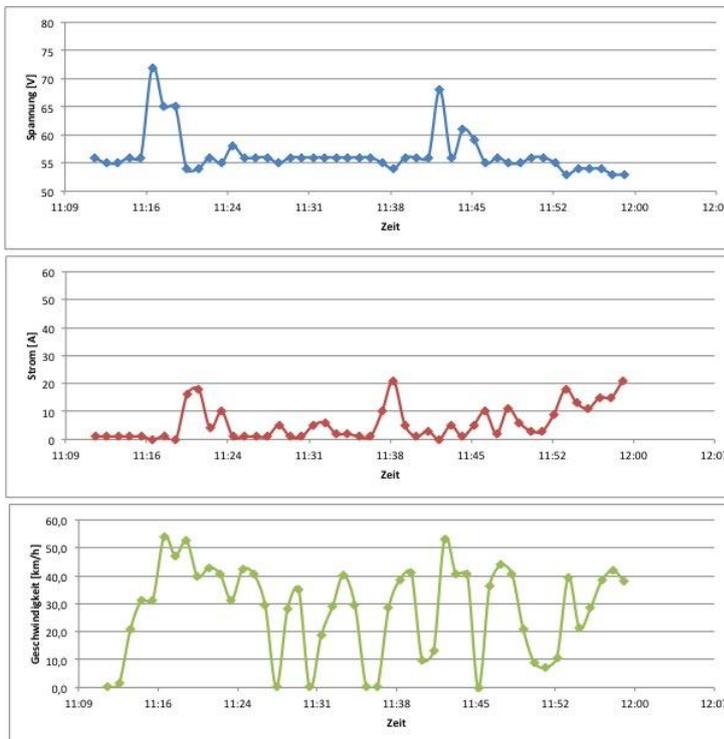


Abbildung 24: Touristiktour Tag 1/5

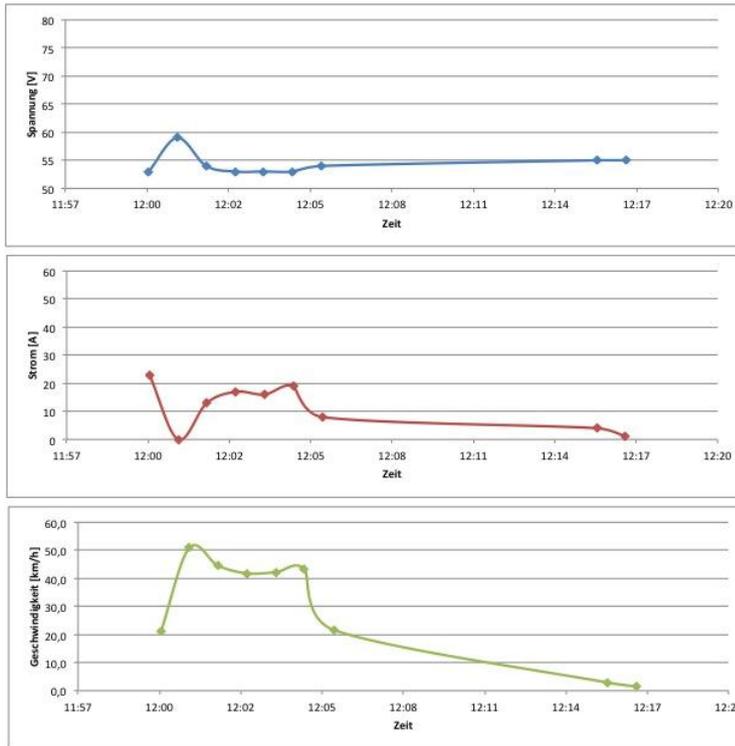


Abbildung 25: Touristiktour Tag 1/6

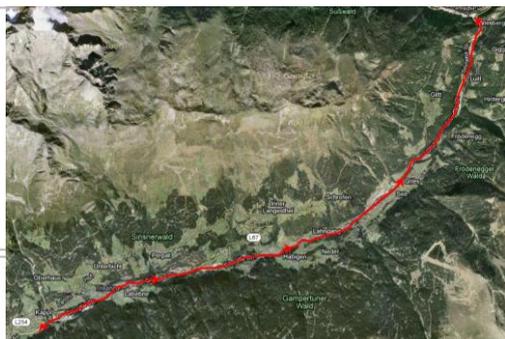
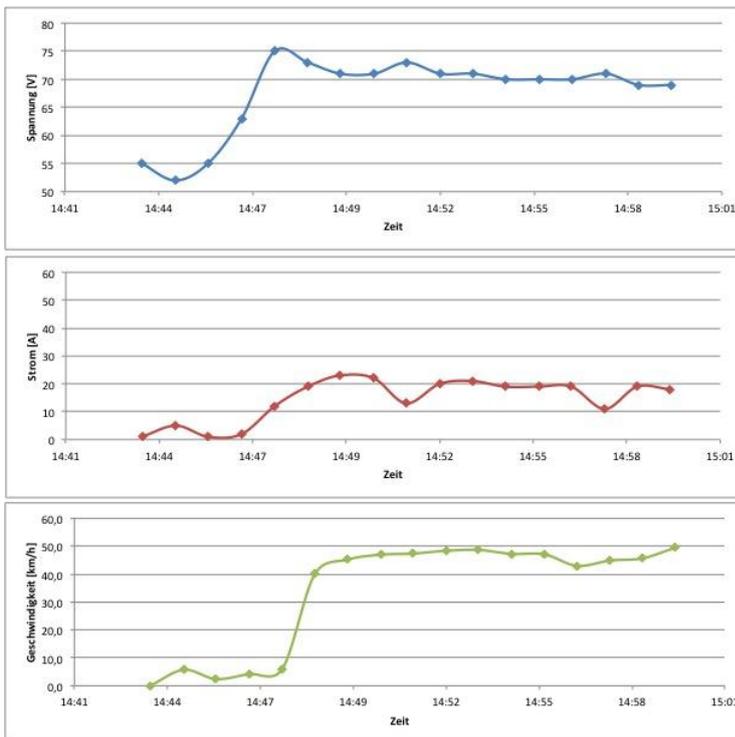


Abbildung 26: Touristiktour Tag 1/7

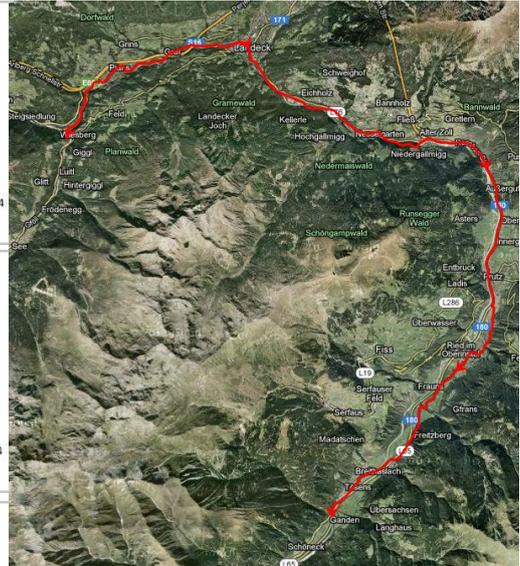
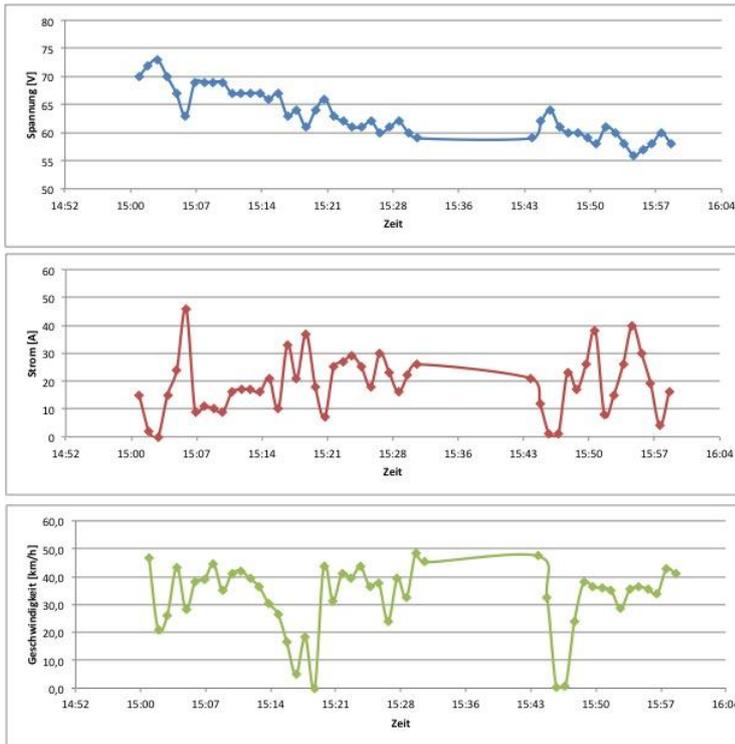


Abbildung 27: Touristiktour Tag 1/8

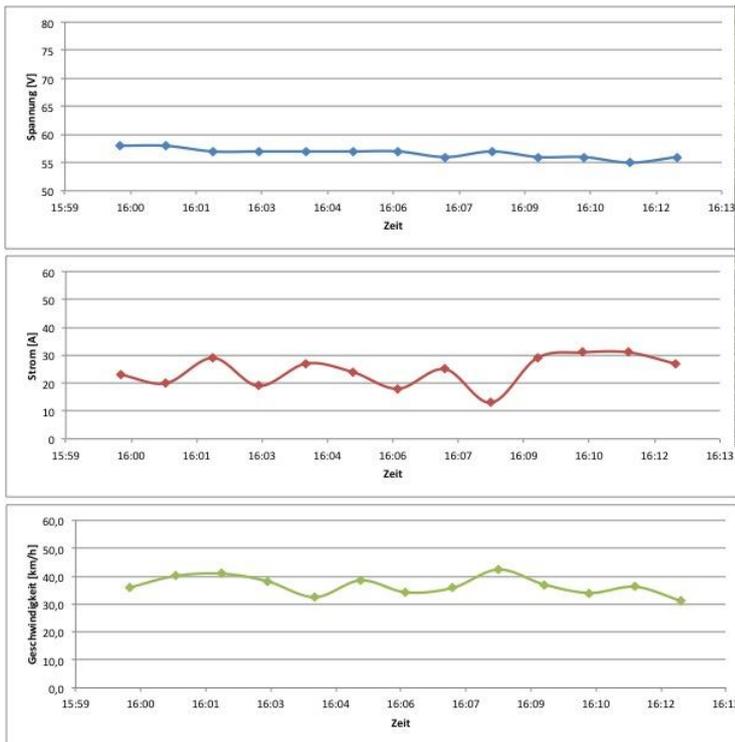


Abbildung 28: Touristiktour Tag 1/9

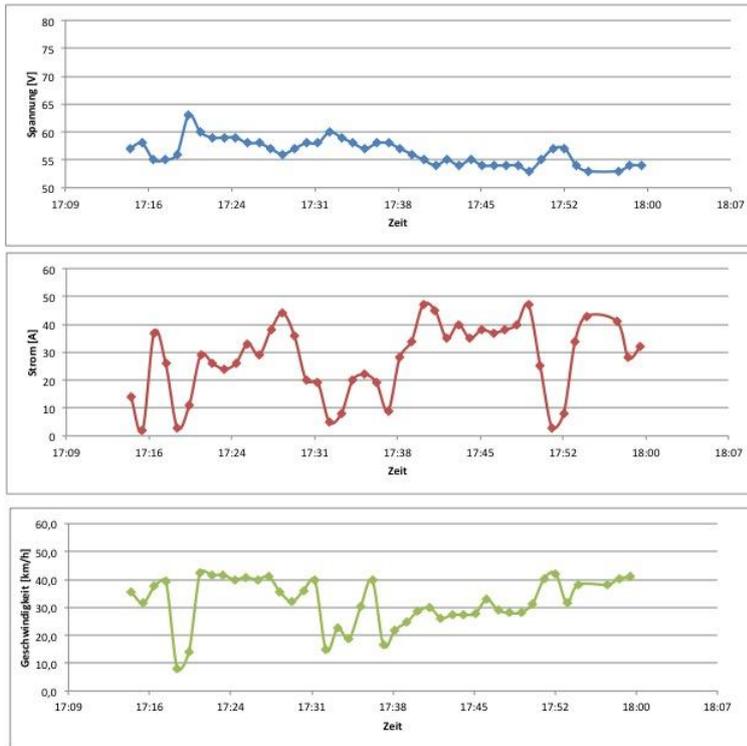


Abbildung 29: Touristiktour Tag 1/10

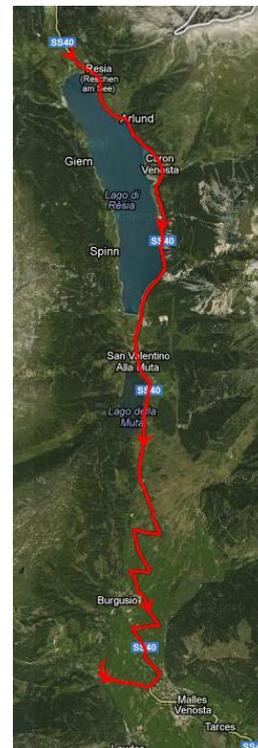
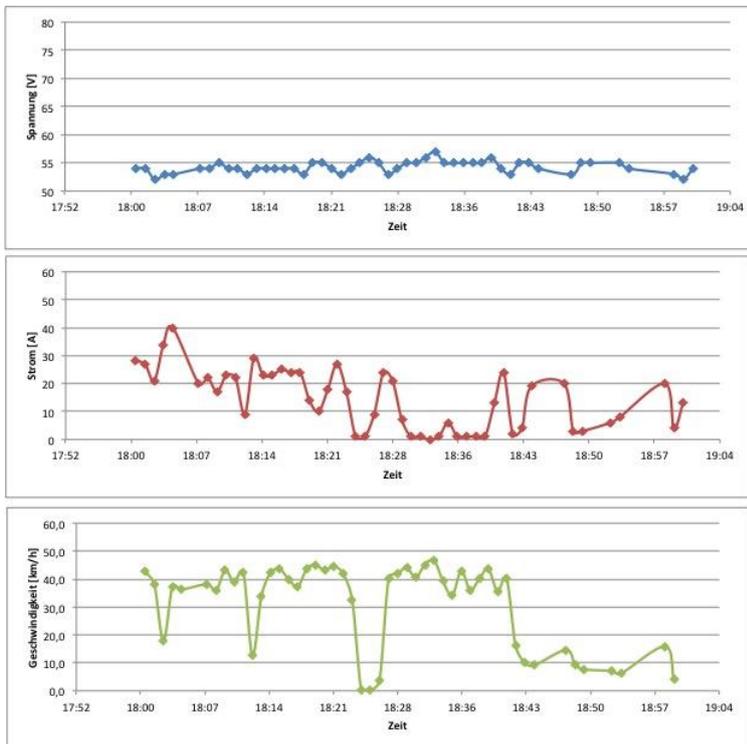


Abbildung 30: Touristiktour Tag 1/11

Fahrten am 10. Juli 2012:

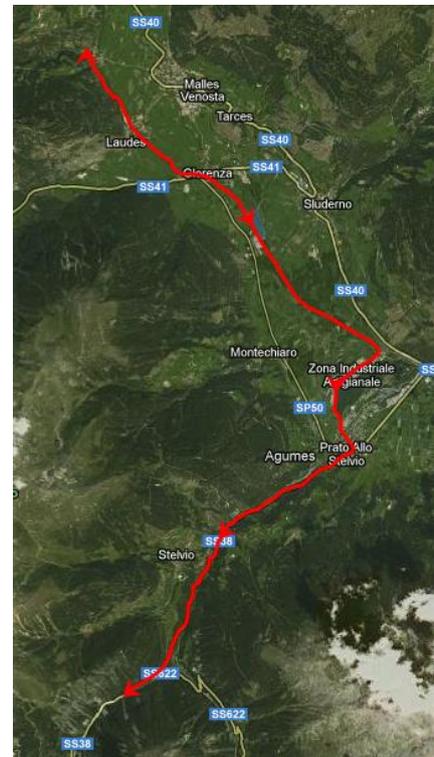
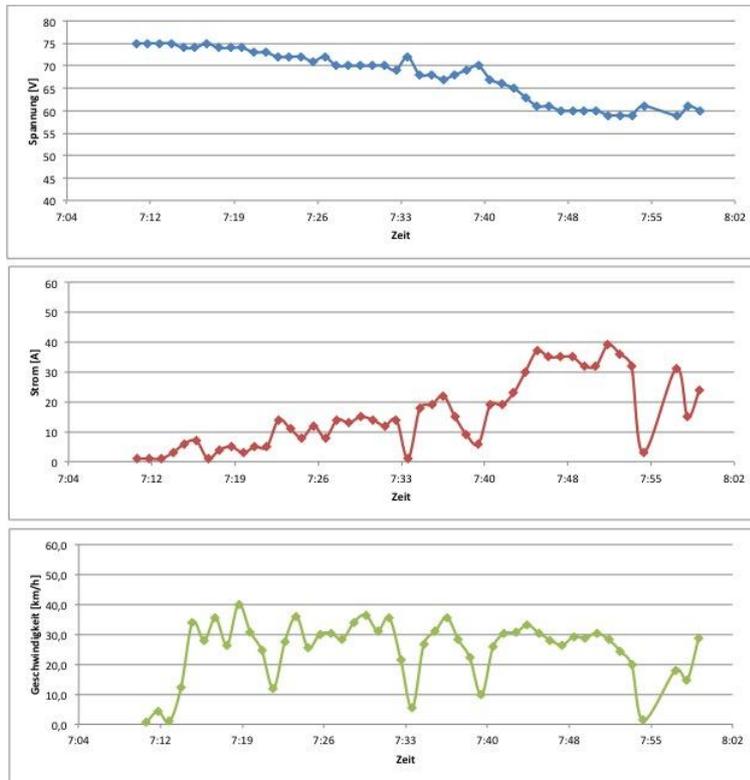


Abbildung 31: Touristiktour Tag 2/1

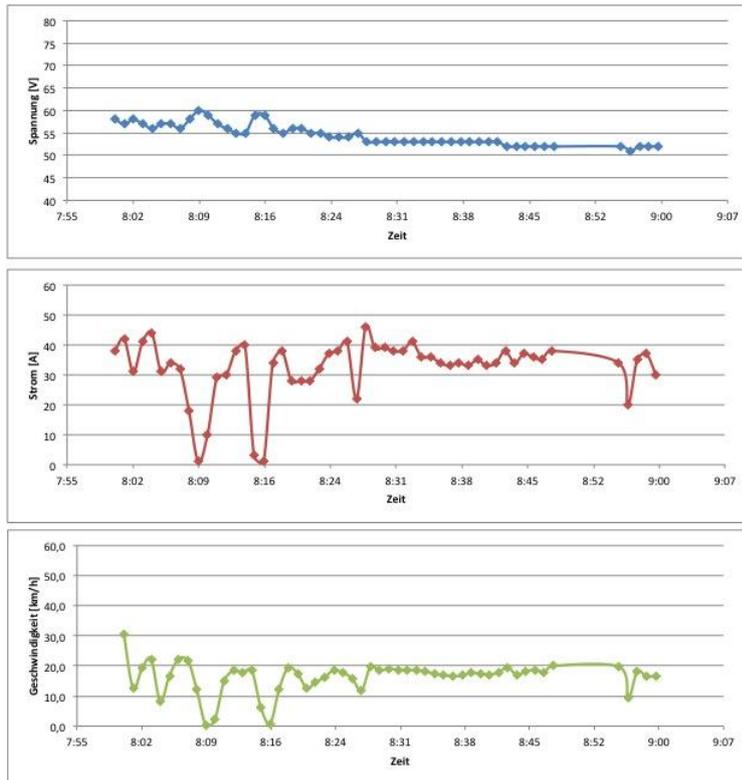


Abbildung 32: Touristiktour Tag 2/2

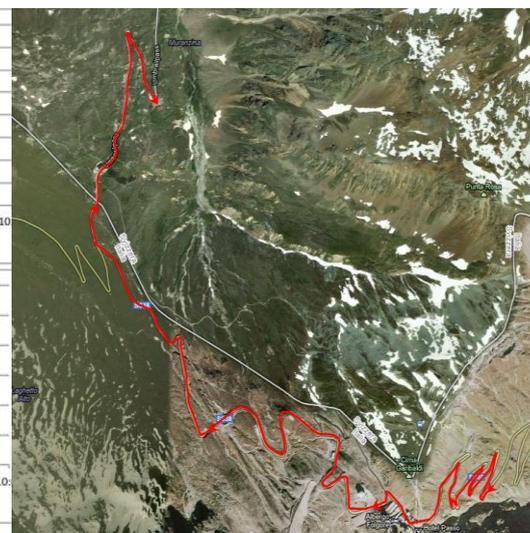
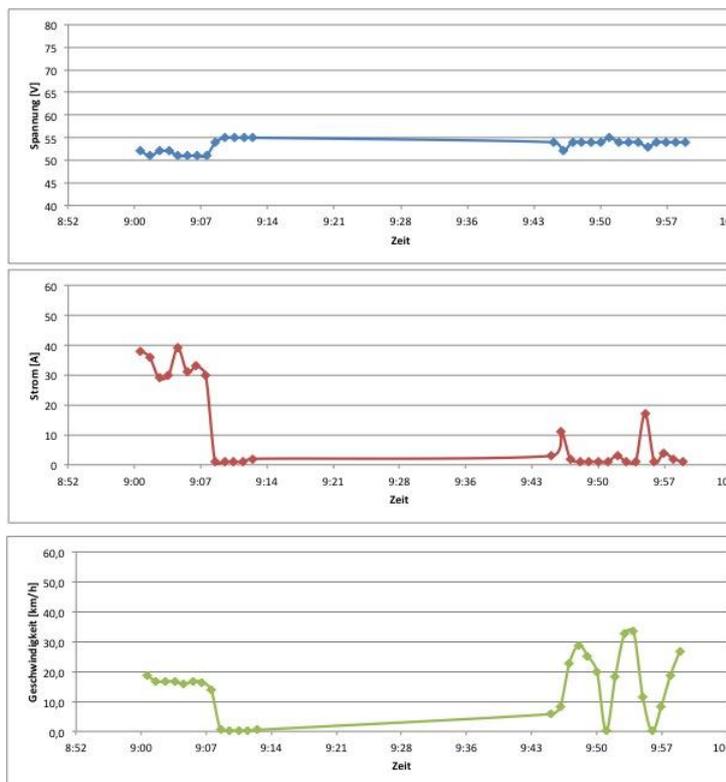


Abbildung 33: Touristiktour Tag 2/3

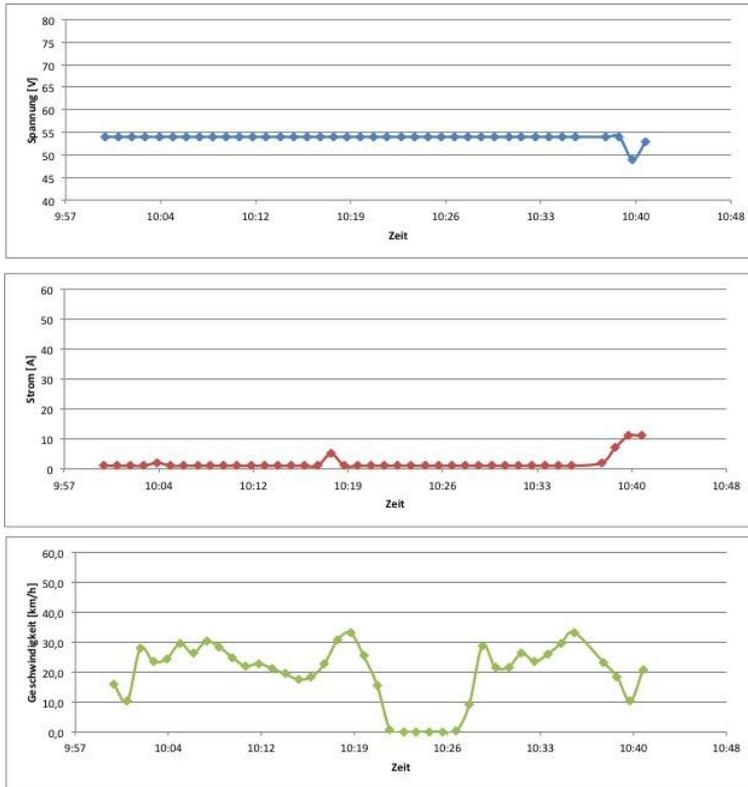


Abbildung 34: Touristiktour Tag 2/4

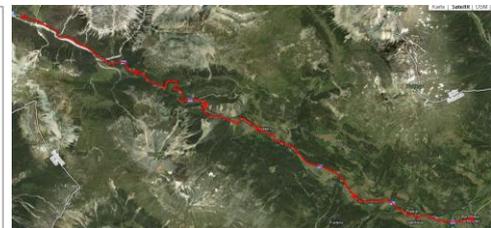
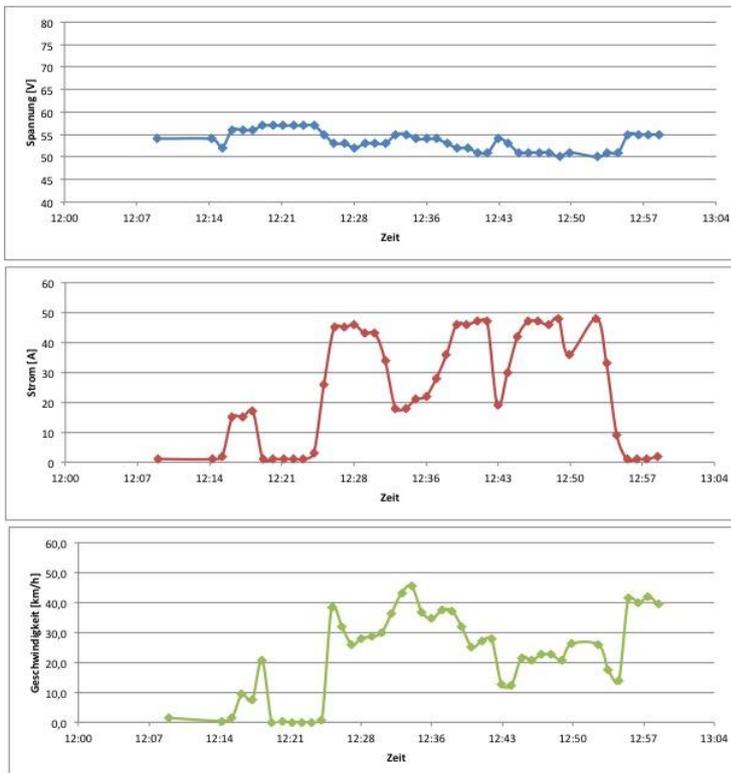


Abbildung 35: Touristiktour Tag 2/5

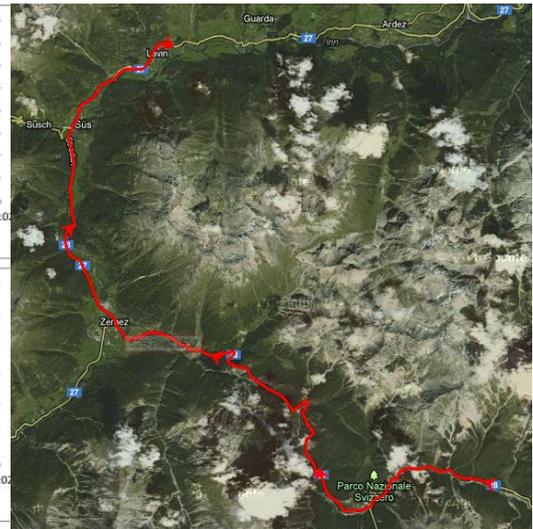
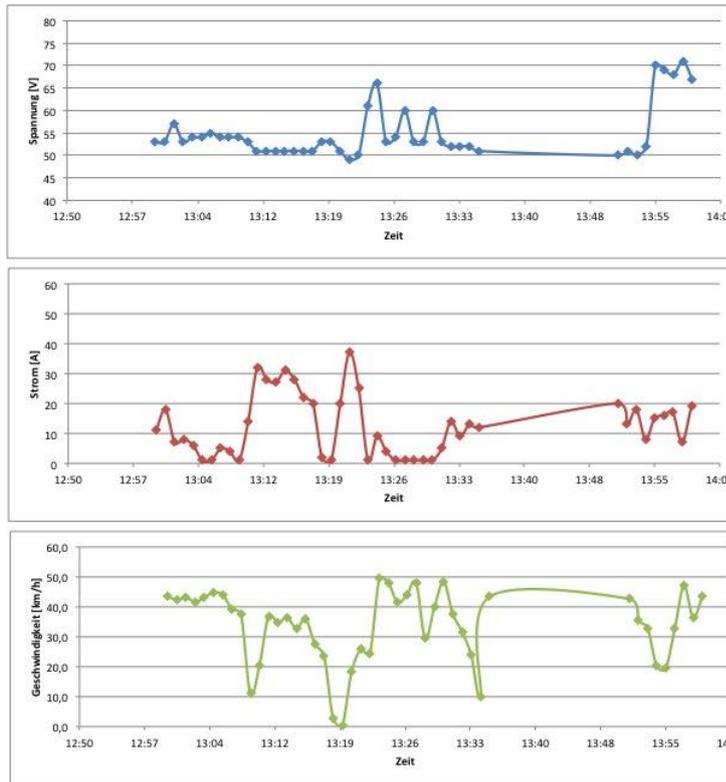


Abbildung 36: Touristiktour Tag 2/6

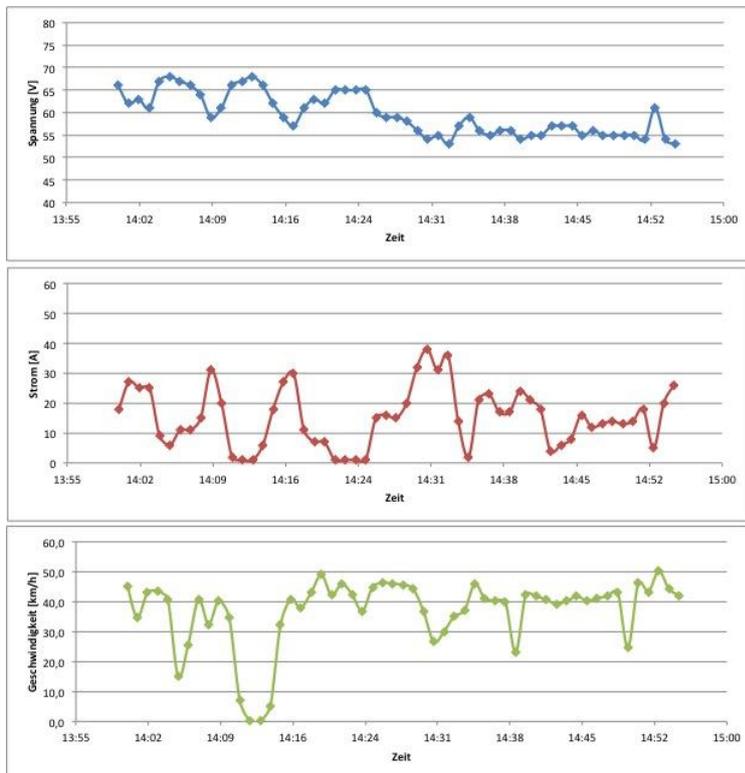


Abbildung 37: Touristiktour Tag 2/7

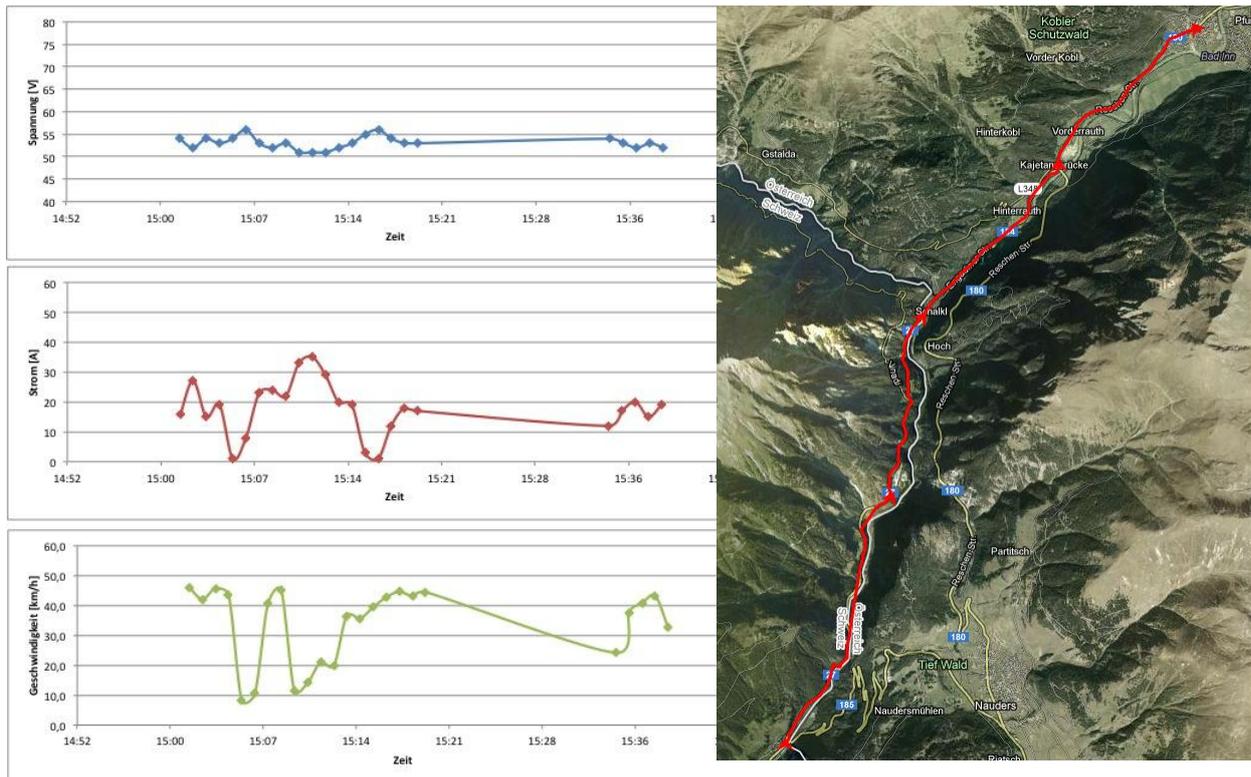


Abbildung 38: Touristiktour Tag 2/8

7.6.3 Schlussfolgerungen für den Einsatz im touristischen Bereich

Die innerhalb des einen Monat gefahrenen Strecken waren beeindruckend. Die von den drei Teilnehmern insgesamt gefahrene Strecke von 6.809 km und 90.575 Höhenmeter teilten sich folgendermaßen auf:

Teilnehmer 1:

1.464 km und 14.866 Höhenmeter

Die Strecke führte durch Baden-Württemberg, Bayern, Tschechien und Österreich.

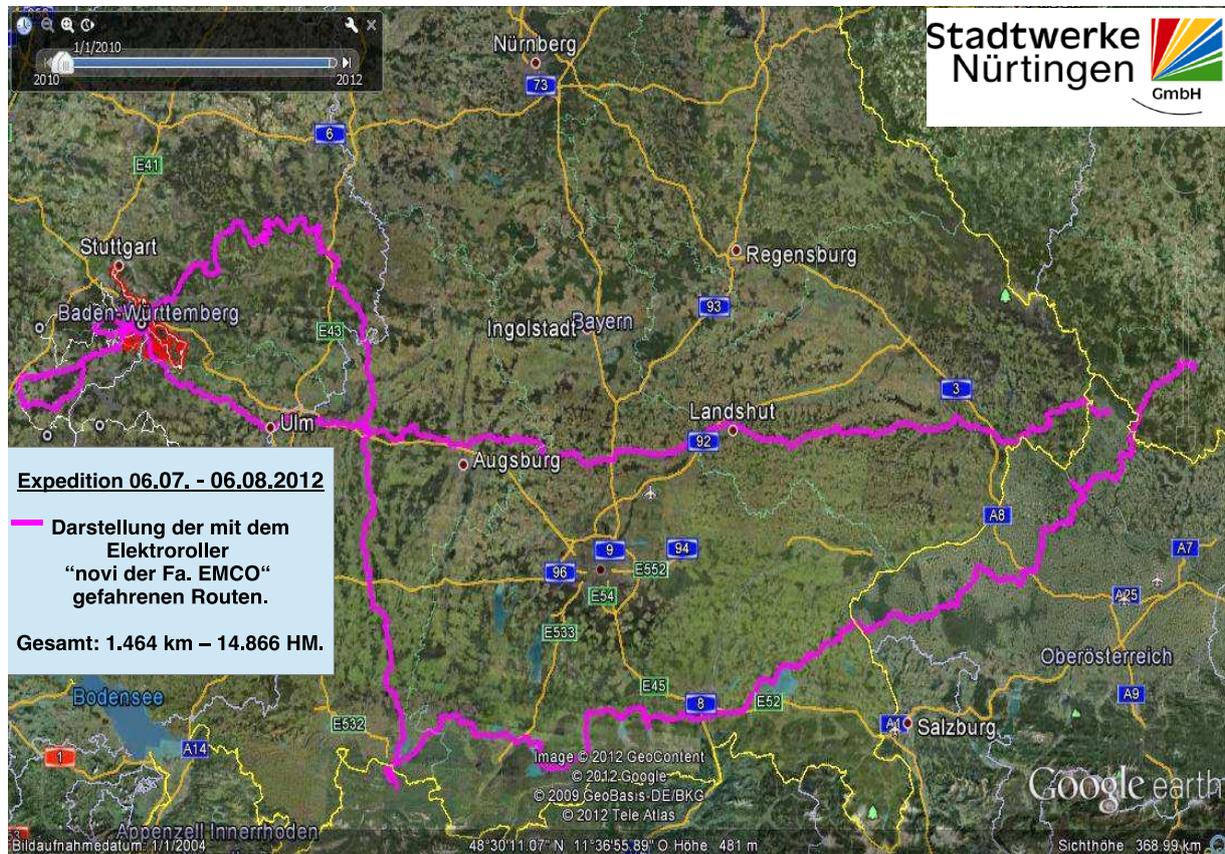


Abbildung 39: Touristiktour Teilnehmer 1

Teilnehmer 2:

1.520 km und 23.334 Höhenmeter

Die Strecke führte nahezu ausschließlich durch Baden-Württemberg praktisch wurde die komplette Landesgrenze abgefahren.

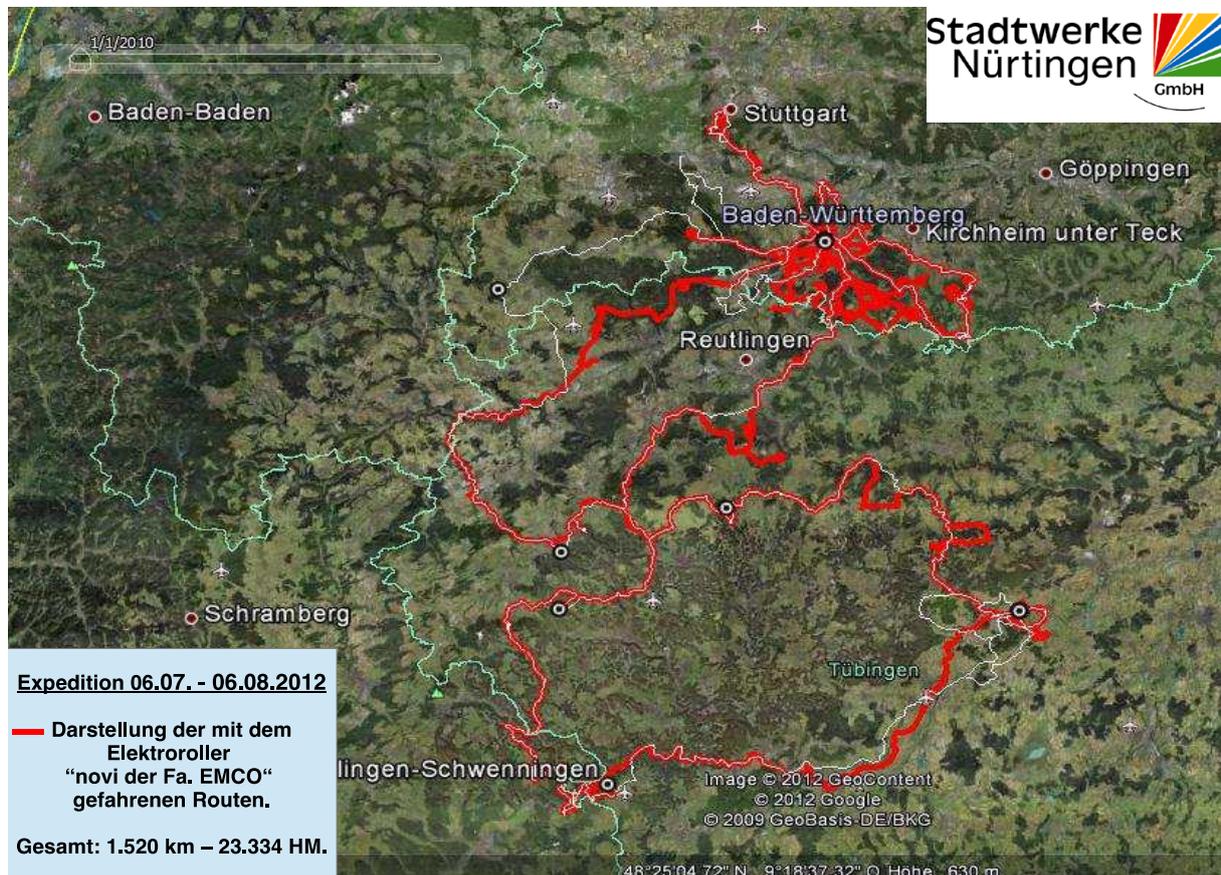


Abbildung 40: Touristiktour Teilnehmer 2

Teilnehmer 3:

3.825 km und 52.375 Höhenmeter

Die Strecke führte durch Frankreich, Baden-Württemberg, Österreich und die Schweiz. Ein Großteil der Strecke wurde in den österreichischen Alpen zurückgelegt. Der Teilnehmer hat einen entsprechenden Reisebericht im Internet veröffentlicht unter <http://www.elektroroller-expedition.de/>

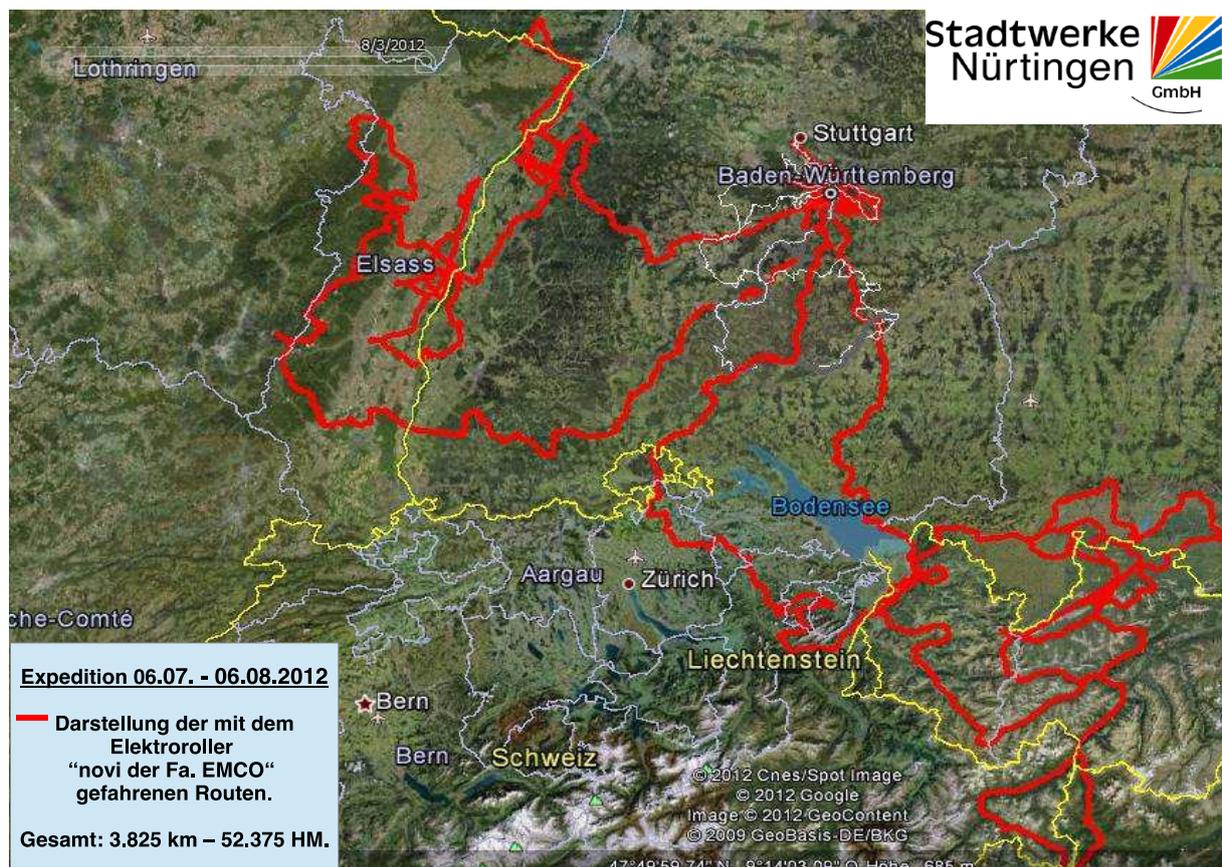


Abbildung 41: Touristiktour Teilnehmer 3

Es wurde in diesem Projekt auf eindrucksvolle Weise bewiesen dass Elektromobilität durchaus eine attraktive Möglichkeit bietet umweltbewusst Land und Leute kennenzulernen und beträchtliche Fahrleistungen zu erbringen.

7.6.4 Weiterführung des Projektes

Auf Wunsch der Stadtwerke Nürtingen wird sich die Hochschule Osnabrück auch im Jahre 2013 wieder an der Aktion beteiligen. Bei der diesjährigen Tour wird die Aufnahme entsprechender Leistungsdaten noch stärker in den Fokus gestellt. Mit dem Hersteller emco wird derzeit über ein gemeinsames Projekt zur Verbesserung des Antriebsstrangs und der Energiespeicher seiner E-Rollerflotte gesprochen.

Gespräche über eine ähnliche touristische Aktion wurden mit den Stadtwerken Osnabrück und der Stadt Osnabrück geführt.

7.7 Elektrorollerprüfstand

Der Elektrorollerprüfstand wurde zur ergänzenden Untersuchung von Elektrorollern konzipiert. Insbesondere sollen die Belastungen im Alltagsbetrieb auf diesem Prüfstand simuliert werden. Einzelne Komponenten des Antriebsstranges können hierbei mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet werden und tiefere Daten gemessen werden. So kann z.B. eine Wirkungsgradkette vom Ladegerät über die Batterie zur Leistungselektronik über den E-Motor aufgestellt werden. Schwachpunkte in den heutigen E-Rollerausführungen werden identifiziert und können dann Schritt für Schritt optimiert werden. Hierdurch wird der Gesamtwirkungsgrad erhöht. Eine wirtschaftliche Betrachtung der Optimierungen ist ebenfalls möglich.

7.7.1 Aufbau Elektrorollerprüfstand

Der Elektrorollerprüfstand besteht aus einer Stahlkonstruktion in der eine elektrische Gleichstrommaschine über eine Kette eine gummierte Rolle antreibt. Auf dieser gummierten Rolle kann das Hinterrad des Elektrorollers positioniert werden. Der Elektroroller wird durch eine verstellbare Halterung an seinem Vorderrad fixiert. Der nötige Anpressdruck des Hinterrades auf der Rolle wird über eine entsprechende Spannvorrichtung sichergestellt. Die Gleichstrommaschine wird im Vierquadrantenbetrieb gefahren. Das heißt es ist prinzipiell sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsfahrt durch den Prüfstand möglich. Das Drehmoment kann ebenfalls positiv als auch negativ eingestellt werden dies ermöglicht Fahrt- und Bremsbetrieb des Elektrorollers. Der Vierquadrantensteller ist in einem Schaltschrank integriert in dem auch sämtliche Mess- und Regeleinrichtungen verbaut wurden. Die Regelung basiert auf einem dSpace-System mit entsprechender graphischen Oberfläche. Derzeit kann der Prüfstand über ein Geschwindigkeitsprofil als auch über ein Kraftprofil geregelt werden.



Abbildung 42: E-Roller Prüfstand

7.7.2 Prüfstandtests

Die Prüfstandtests wurden im Sommer 2013 durchgeführt. Beispielfhaft wurde der Test an einem bereits für längere Zeit im Alltagseinsatz gefahrenen Elektroroller durchgeführt.

7.7.2.1 Kenndaten des Modells

- Typ: Kreidler RMC-E Hiker 50 45km/h
- Antrieb: 3000 Watt Radnabenmotor
- Energiespeicher: 48 V 40 Ah Blei-Akku
- Eigengewicht: 140 kg

7.7.2.2 Vorgeschichte

Der getestete Roller befindet sich seit etwa 2 Jahren im Gebrauch an der Hochschule Osnabrück und wird gelegentlich für Kurzstrecken genutzt. Die bisherige Laufleistung beträgt etwa 600km. Die Leistung der Blei-Akkus ist seit einer Tiefentladung deutlich reduziert.

7.7.2.3 Testfahrt im Stadtverkehr

Um einen Überblick über die Leistungsfähigkeit und Reichweite des Rollers zu bekommen wurde dieser zunächst vollständig geladen und dann auf einer etwa 11 km langen Strecke durch die Osnabrücker Innenstadt getestet. Um im PKW-Verkehr kein Hindernis darzustellen ist nahezu ständig die volle Leistung des Elektrorollers erforderlich, außerdem wurde auf dieser Fahrt bewusst auf einen Energie sparenden Fahrstil verzichtet. Am Ende der Fahrt war der Akku bereits so weit entladen, dass der Antrieb bei „Vollgas“ wegen zu starkem Spannungsfall aussetzte. Um Typische Betriebspunkte des Rollers zu ermitteln wurden alle Betriebsparameter mit dem eingebauten Datenlogger erfasst.



Abbildung 43: Kreidler RMC-E Hiker 50 (Quelle Kreidler.com)

7.7.2.4 Ladevorgang

Geladen wird der Roller mit einem mitgelieferten Ladegerät über eine Ladebuchse, die außen am Roller angebracht ist. Für die Betrachtung der Energiebilanz wird die benötigte Energie gemessen, um den Roller nach den verschiedenen Tests wieder voll zu laden.

7.7.2.5 Ladevorgang nach der Testfahrt im Stadtverkehr

Das folgende Diagramm zeigt den Strom und Spannungsverlauf während des Ladevorgangs. Auffällig ist, dass die volle Ladung des Akkus bereits nach knapp drei Stunden erreicht ist, was für entladene Blei-Akkus eher ungewöhnlich ist. Insgesamt wurden von dem Akku 10,13 Ah aufgenommen, was etwa einem Viertel seiner Nennkapazität entspricht.

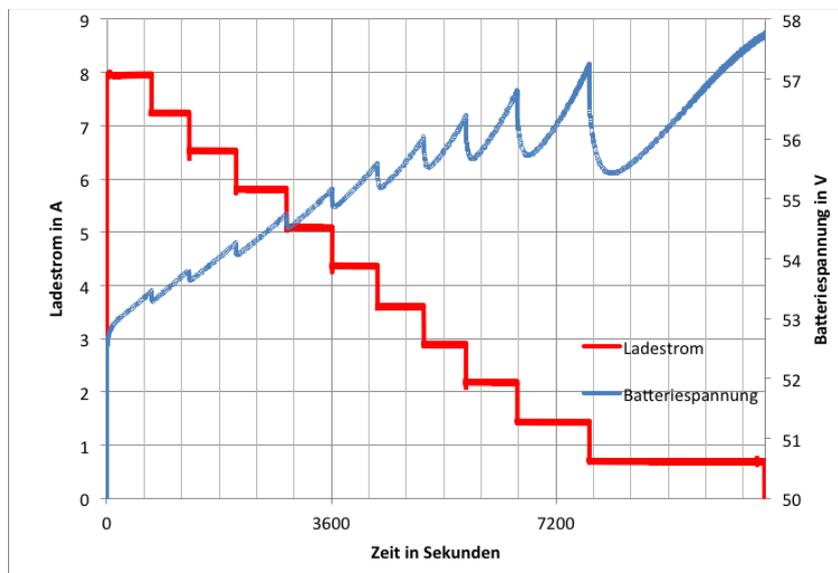


Abbildung 44: Ladevorgang nach Stadtfahrt (0,65 kWh)

Für die vollständige Ladung wurden aus dem Netz 0,65 kWh elektrische Energie entnommen. Umgerechnet auf den deutschen Strommix 2012 (576 g CO₂/kWh, Quelle: statista.com) ergibt sich eine CO₂-Emission von 34 g je gefahrenen Kilometer.

7.7.2.6 Testfahrt auf dem Rollenprüfstand

Um Kapazität und Wirkungsgrad der Batterie unter Teillastbedingungen zu messen, soll der vollständig geladene Roller jetzt auf dem Rollenprüfstand komplett „leer gefahren“ werden. Um gleichzeitig eine Einschätzung für die theoretisch mögliche Reichweite zu ermöglichen, wird ein Betriebspunkt gewählt, welcher der stationären Fahrt bei Endgeschwindigkeit relativ nahe kommen müsste. Für die Testfahrt wird der Prüfstand auf eine konstante Widerstandskraft von 70 N eingestellt, der vollgeladene Roller erreicht dabei eine Endgeschwindigkeit etwa 43 km/h. Stromaufnahme und Geschwindigkeit entsprechen ziemlich genau den mit dem Datenlogger ermittelten Werten.

Die folgenden Diagramme zeigen den Verlauf der Betriebsparameter über die Versuchsdauer von etwa 60 Minuten:

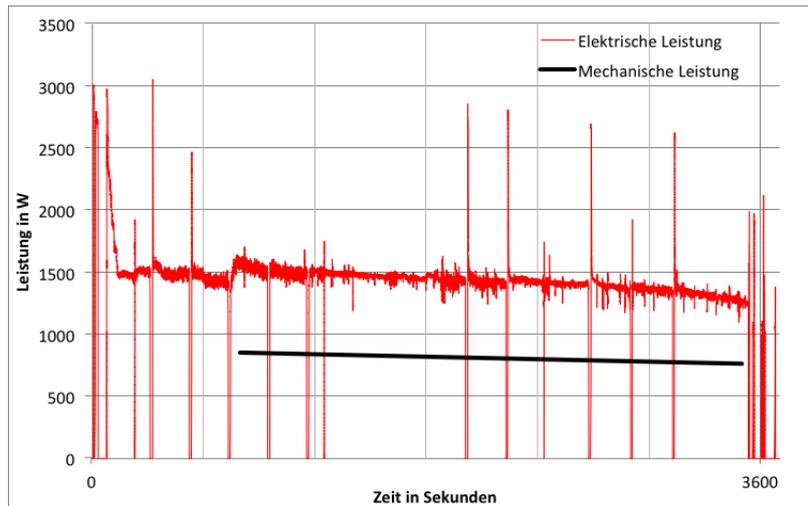


Abbildung 45: Prüfstandsfahrt mit konstanter Last(Leistung)

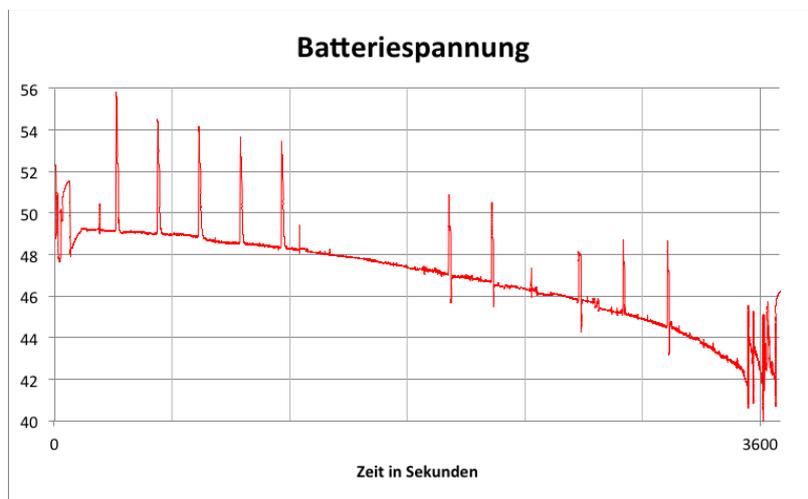


Abbildung 46: Prüfstandsfahrt mit konstanter Last (Spannung)

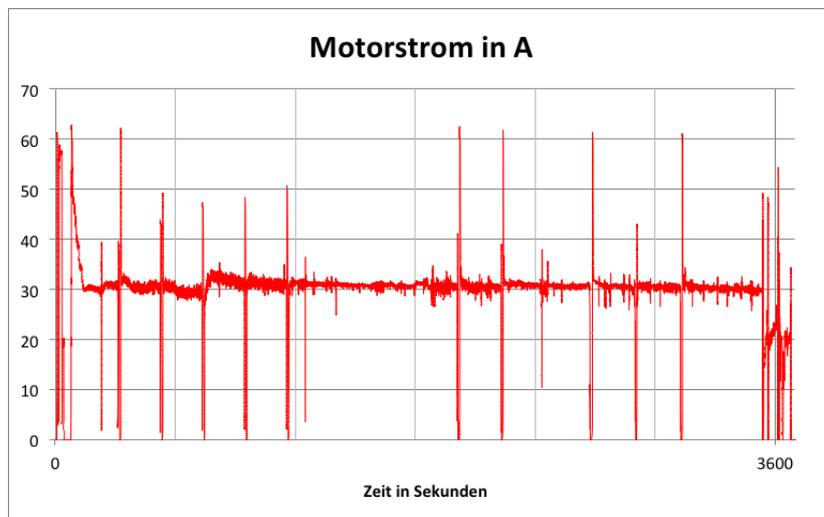


Abbildung 47: Prüfstandsfahrt mit konstanter Last (Strom)

Die Kurzzeitigen Peaks bei den Strom-, Spannungs- und Leistungswerten wurden von Störungen im Betrieb des Rollenprüfstands verursacht und sollen hier nicht weiter betrachtet werden. Während der Testfahrt wurden dem Akku 30,4 Ah entnommen, was mehr als $\frac{3}{4}$ der Nennkapazität entspricht. Der Wirkungsgrad entsprach erwartungsgemäß der oben dargestellten Kennlinie. Die vom Roller „gefahrte Strecke“ müsste etwa 40 km entsprechen, eine genauere Messung ist mit dem Rollenprüfstand zurzeit leider nicht möglich.

7.7.2.7 Ladevorgang nach der Testfahrt auf dem Rollenprüfstand

Wie schon bei der Fahrt auf dem Prüfstand zu erkennen, kann der Akku bei geringeren Strömen sehr viel größere Mengen Energie bereitstellen. Der Ladevorgang dauerte dementsprechend deutlich länger, nach acht Stunden nahm der Akku 32,4 Ah Stunden auf, was etwa $\frac{3}{4}$ seiner Nennkapazität entspricht. Während der Ladung wurden dem Akku 1,65 kWh elektrische Energie zugeführt, auf der Testfahrt wurden 1,375 kWh verbraucht. Damit ergibt sich für den Akku ein Wirkungsgrad von 83%.

Ladestrom- und Spannungsverlauf nach der Testfahrt auf dem Rollenprüfstand:

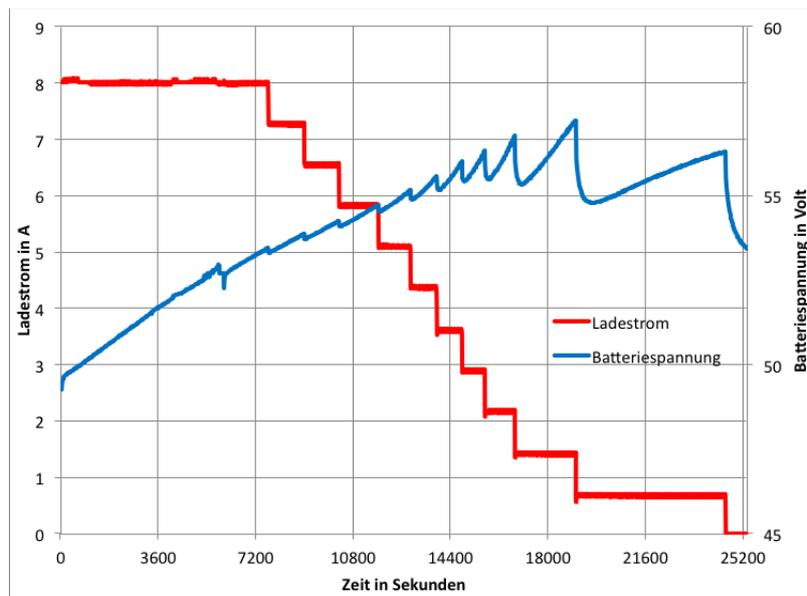


Abbildung 48: Ladevorgang nach Testfahrt auf Rollerprüfstand (1,93 kWh)

Für diesen Ladevorgang wurde aus dem Netz 1,93 kWh elektrische Energie entnommen. Unter der Annahme, dass auf dem Rollenprüfstand eine Entfernung von 40 km zurückgelegt wurde ergibt sich nach dem Strommix 2012 (576 g CO₂/kWh, Quelle: statista.com) eine CO₂ Emission von 28 g je gefahrenen Kilometer.

7.7.3 Vergleich verschiedener Elektroroller

Um einen Überblick über die Stärken und Schwächen verschiedener Modelle zu bekommen, sollen jetzt zwei weitere Modelle in einheitlichen Tests untersucht und verglichen werden.

Alle Roller sind für eine Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h zugelassen und seit 2010 in Gebrauch.

Modellbezeichnung	Kreidler RMC-E Hiker 50	E-Max 90 S	Innoscooter EM 2500 Lithium
Batterietyp	Blei-Gel	Blei-Gel	Lithium-Polymer
Spannung, Kapazität	48V 40Ah	48V 40 Ah	48,1V 42 Ah
Antriebsleistung	3000 W	2500 W	3000 W
Eigengewicht	140 kg	155 kg	85 kg
Reichw. lt. Hersteller	55 km	60-70 km	100 km
Preis	2199 €	2995 €	3690 €
Kilometerstand	650 km	1900 km	2400 km
Ladegerät	8 A, Luftgekühlt	20 A, Luftgekühlt	5,5 A, passiv gekühlt

Abbildung 49: E-Roller Kenndaten

7.7.3.1 Kennlinie des elektrischen Antriebs

Um die Leistungsfähigkeit der Radnabenmotoren besser einschätzen zu können wird jetzt auf dem Rollenprüfstand die größtmögliche Zugkraft bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gemessen. Anhand der Eingangsleistung des Elektroantriebs und der vom Rollenprüfstand ermittelten Daten kann außerdem der Gesamtwirkungsgrad des Systems ermittelt werden.

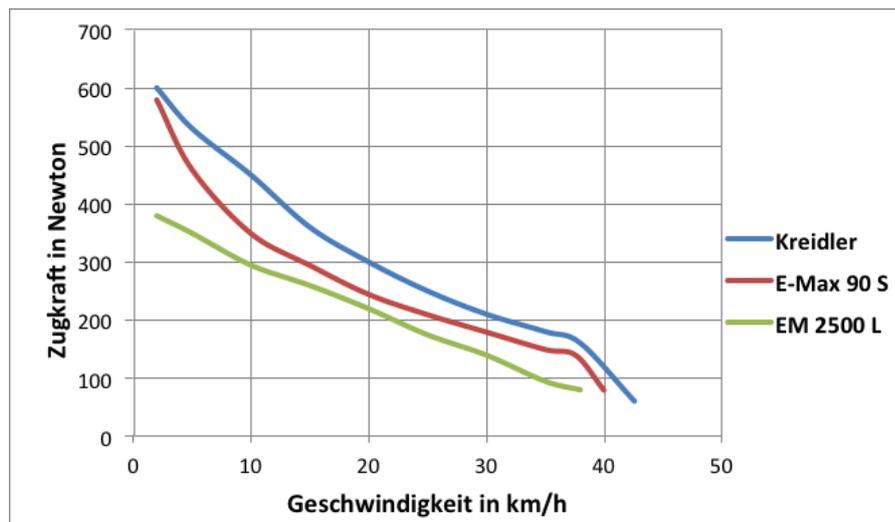


Abbildung 50: Vergleich Rollertypen bzgl. Zugkraft

Wie anhand der Kennlinien zu erkennen hat der Innoscooter EM 2500 L den mit Abstand leistungsschwächsten Antrieb. Da das Eigengewicht des Rollers aber erheblich geringer ausfällt hat dieser Roller vom Fahrgefühl trotzdem die besten Beschleunigungseigenschaften.

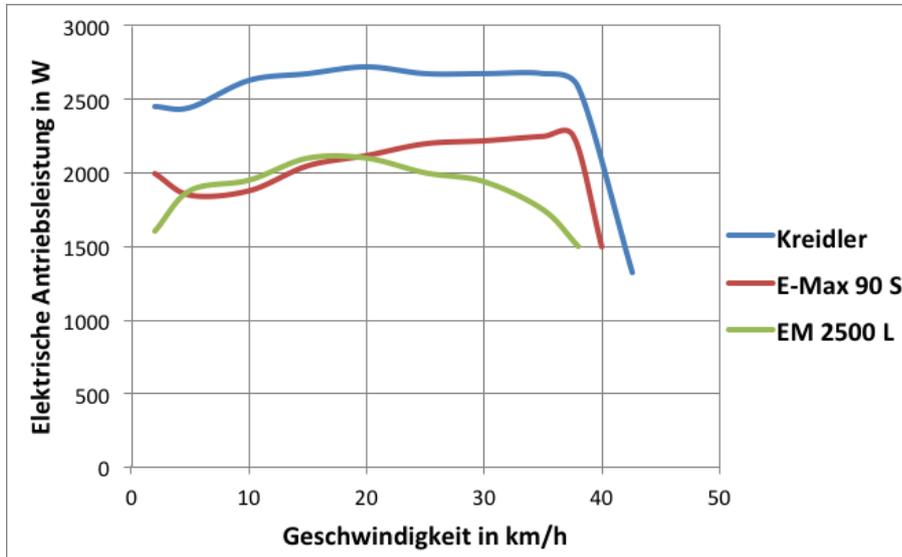


Abbildung 51: Vergleich Roller elektr. Leistung

Diese Messung hat ergeben, dass keiner der untersuchten Roller die Herstellerangaben der elektrischen Leistung erreicht. Der Kreidler-Elektroller, der den Test dazu mit einer durch Tiefentladungen geschädigten Batterie antritt, kommt seiner Werksangabe von 3000 W noch am nächsten.

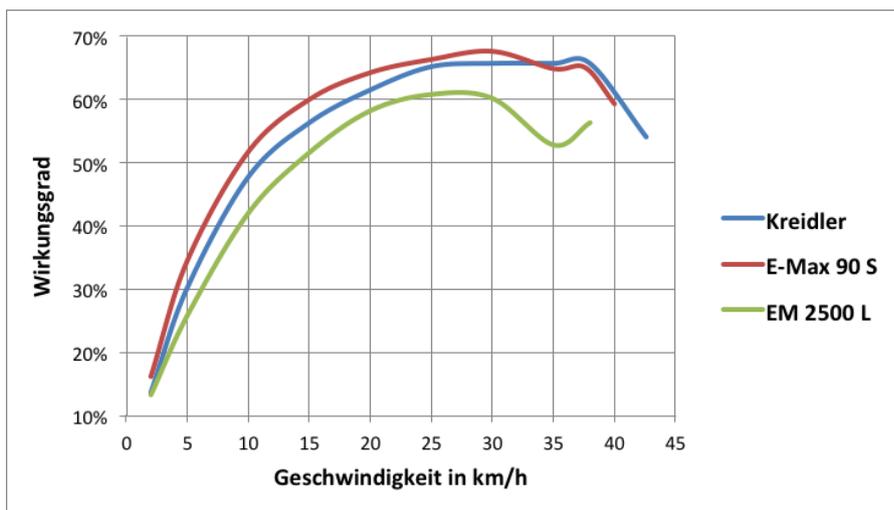


Abbildung 52: Vergleich Roller bzgl. Wirkungsgrad

Beim Wirkungsgrad der Antriebe herrscht die gleiche Reihenfolge wie beim gesamten Qualitätseindruck und dem Fahrkomfort. Wenn man von dem eher schwachen Antrieb absieht

macht der E-Max einen hochwertigen Eindruck und fährt sich ebenso wie der Kreidler sehr komfortabel.

7.7.3.2 Vergleich anhand von Testfahrten

Um die Energiebilanz der unterschiedlichen Modelle unter realen Bedingungen zu vergleichen, wurden mit den drei unterschiedlichen Modellen Testfahrten im Stadtverkehr von Osnabrück unternommen. Als Teststrecke wurde wieder die auf Seite sechs abgebildete Route mit einer Länge von 8,9 km gewählt und jeweils an einem Wochentag um die Mittagszeit abgefahren. Für den Kreidler wurden hier die Werte aus dem obigen Vergleich der Fahrstile übernommen.

Modellbezeichnung	Kreidler RMC-E Hiker 50	E-Max 90 S	Innoscooter EM 2500 Lithium
Energieverbrauch elektrischer Antrieb	321 Wh	336 Wh	271 Wh
Zum Wiederaufladen benötigte Energie	509 Wh	615 Wh	350 Wh
Wirkungsgrad der Batterie	72%	62%	87%
Wirkungsgrad des Ladegeräts	85%	87%	89%
Ladedauer	2:45 h	1:10 h	2:53 h
Fahrdauer	21 min.	23 min.	21 min.
CO ₂ /km nach Strommix 2012	33g	40g	23g

Abbildung 53: Vergleich Roller bzgl. Effizienz

Wie in diesem Vergleich zu sehen konnte der Innoscooter trotz seines vergleichsweise ineffizienten Antriebs die besten Ergebnisse erzielen. Daraus lässt sich schließen, dass vor allem das geringere Eigengewicht im dynamischen Stadtverkehr einen großen Vorteil mit sich bringt. Mit Ausnahme des E-Max sind die Ladezeiten für eine Fahrtzeit von unter einer halben Stunde eher lang. Wenn man aber bedenkt, dass eine solche Fahrt nur einen Bruchteil der Kapazität einer intakten Rollerbatterie ausmacht, sollte das keine Rolle spielen. Dazu kommt noch, dass zum Beispiel beim Innoscooter über 60% der Energie bereits nach den ersten 40 Minuten wieder nachgeladen waren, was für eine Zwischenladung, beispielsweise an einer öffentlichen Ladesäule, vollkommen ausreicht. Für eine längere Lebensdauer sollten vor allem die Blei-Gel-Batterien aber in der Regel vollständig geladen werden. Da der gesamte Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs dieser Größe eher gering ausfällt, können diese Roller

problemlos an jeder Steckdose geladen werden, ohne dass die Gefahr einer Überlastung besteht.

Ein weiterer Vorteil des Innoscooter ist der leichte und problemlos zu entnehmende Akku. Sollte am Abstellplatz des Rollers keine Lademöglichkeit zur Verfügung stehen, kann der Akku zum Laden mit ein paar Handgriffen zur nächsten Steckdose mitgenommen werden. Das vereinfacht auch die Lagerung im Winter, da kein Batterietyp über längere Zeit Temperaturen unter 0°C verträgt. Gerade die Lagerung und Pflege in der kalten Jahreszeit hat sich bei den hier betrachteten Fahrzeugen mit Blei-Gel Akkus als Problem heraus gestellt. Da die Roller während dieser Zeit in der Regel weder genutzt noch geladen werden, ist es mehrfach zu schädlichen Tiefentladungen gekommen. Die Kreidler-Roller haben durch die damit einhergehende Sulfatierung den größten Teil ihrer Leistungsfähigkeit verloren.

Der Akku des E-Max 90 S hatte während der Zeit am Ladegerät eine auffällig hohe Selbstentladung. Der eigentliche Aufladevorgang war bereits nach 1:10h beendet. Durch das ständige nachladen wurde in den darauf folgenden 12 Stunden die gleiche Energie verbraucht wie für das vorherige Aufladen, was sich stark negativ auf die gesamte Energiebilanz des Fahrzeugs auswirkt. Da die Vorgeschichte des Rollers nur teilweise bekannt war wurde diese Auffälligkeit nicht weiter untersucht.

7.7.3.3 Untersuchung der Reichweite

Nach einer vollständigen Ladung soll jetzt die Reichweite des E-Max 90 S untersucht werden. Laut Hersteller soll die 60 kg schwere Blei-Gel-Batterie für 40-60 km reichen. Nach 90 Minuten und 48 km fahrt in und um Osnabrück war die Kapazität der Batterie noch längst nicht erschöpft, allerdings musste der aus dem Fuhrpark der Stadtwerke geliehene Roller wieder zurückgegeben werden. Die Messung mit dem Datenlogger ergab eine Stromaufnahme von 35,1 Ah, was bereits 88% der Nennkapazität entspricht. Da sich die Batterie schon seit über 3 Jahren in Gebrauch befindet, ist das ein sehr guter Wert, wobei die Kapazität am Ende des Tests nicht einmal vollständig erschöpft war. Bei einem durchschnittlichen Strompreis von 28,73 Cent/kWh (April 2013) würden für diese Fahrt Kosten von weniger als 0,90 € anfallen.

7.7.4 Weitere Verwendung / zukünftige Kooperationen

Im Fuhrpark der Stadtwerke Osnabrück sind seit Sommer 2010 vier Elektroroller in Gebrauch. Alle haben einen Kilometerstand von 1900-2500 km, werden aber anscheinend nach anfänglichem Interesse der Mitarbeiter praktisch gar nicht mehr benutzt. Über den ausgewerteten Zeitraum von knapp drei Sommermonaten wurden mit allen vier Rollern zusammen sechs Fahrten mit einer Gesamtlänge von 55km unternommen. Zwei der Roller waren über Wochen hinweg in einem tiefentladenen Zustand, was eine starke Alterung der Batterien zur Folge hat. Wie die vorherigen Tests ergeben hat die geringe Nutzung der Fahrzeuge ihre Ursache aber nicht in der geringen Reichweite.

An der Hochschule Osnabrück sind seit Juli 2010 zwei Elektroroller vom Typ Kreidler RMC-E Hiker 50 in Gebrauch. Mit einem Kilometerstand von 1150 km und 650 km wurden beide nur sehr wenig genutzt. Zum Teil ist das sicherlich auf die geschädigten Batterien zurückzuführen, welche die Reichweite erheblich einschränken.

Der erste Roller wurde an 10 von 36 ausgewerteten Tagen bewegt. Der Roller hat mit einer durchschnittlichen Tageskilometerleistung von 6,3 Kilometern das Stadtgebiet von Osnabrück nie verlassen. Für diese Strecken reicht selbst die geringe Reichweite von 10-15 km vollkommen aus.

Es wird angestrebt neue Speicherkonzepte mit den Elektrorollern in Zukunft zu erproben.

7.8 Batterieteststand

Derzeit werden die Energiespeicher bei den Elektrorollerherstellern nur rudimentär getestet. In der Regel werden die Speicher nicht mit einer realistischen Last belastet sondern nur mit einer Last deren Leistung proportional des Quadrates der Batteriespannung ist (typische Last ist ein Anordnung von Glühbirnen). Um nun die Lebensdauer und das Verhalten der Energiespeicher besser nachvollziehen zu können ist es nötig die Speichermodule realistischen Lasten auszusetzen. Hierbei muss man verschiedene Szenarien berücksichtigen. Zunächst muss die Batterie einer mittleren Lastkurve folgen die der Stromaufnahme der im Elektroroller verbauten Leistungselektronik entspricht. Dies ermöglicht bereits eine deutlich verbesserte Nachbildung der Last Elektroroller. Ein zweites Szenarium arbeitet nicht nur mit den Mittelwerten sondern belastet das Batteriesystem mit den entsprechenden entstehenden Pulsströmen. Dies realistisch nachzubilden für jeden unterschiedlichen Elektroroller wäre sehr aufwendig man benötigt hierfür eine entsprechend leistungsstarke, hochdynamische Leistungsquelle / -senke.

7.8.1 Aufbau des Teststandes

Der in unserem Hause entwickelte Teststand kann die hochdynamischen Ströme nicht exakt jedoch zu einem gewissen Grad nachbilden. Hierfür wurden zwei DC/DC-Wandler (Abbildung 54) entwickelt die parallel arbeiten. Diese DC/DC Wandler haben jeder für sich eine entsprechende Pulsstrombelastung für den angeschlossenen Energiespeicher. Beide DC/DC Wandler können phasenversetzt arbeiten. Hierbei gibt es zwei Extrembetriebspunkte. Im ersten Betriebspunkt arbeiten die DC/DC Wandler synchron das führt dazu, dass sich die dreieckförmigen Pulsströme positiv überlagern und eine sehr hohe Pulsstrombelastung für den Energiespeicher entsteht. Der zweite Betriebspunkt für die DC/DC Wandler ist eine um 180° versetzte Betriebsweise. Hierbei addieren sich die Pulsströme negativ und löschen sich bei einem Aussteuergrad von 50% komplett aus. Durch die Änderung des Aussteuergrades und des Phasenversatz kann die Pulsstrombelastung in gewissen Grenzen variiert werden.

Der DC/DC Wandler besteht aus einer Primärseite welche als „Hochspannungsseite“ (Abbildung 55) ausgeführt wurde. Hier wird im Ladebetrieb die vorhandene Gleichspannung (350V) zu einer Wechselspannung umgeformt welche über einen Übertrager auf die „Hochstromseite“ übertragen wird. Die „Hochstromseite“ (Abbildung 56) kann bis zu zweimal 100A Strom führen diese richtet die Wechselströme entsprechend gleich und filtert hochfrequente Pulsströme. Im Entladebetrieb übernimmt die „Hochstromseite“ die Wandelung von Gleich-

spannung in eine hochfrequente Wechselspannung welcher nach der Übertragung auf der „Hochspannungsseite“ gleichgerichtet wird.

Die beiden DC/DC Wandler sind auf Seite des Energiespeichers parallel angeschlossen. Auf Seite des Gleichspannungszwischenkreises werden die Wandler in Serie geschaltet. Dadurch addieren sich die Ausgangsspannungen. Ein Netzeinspeisestromrichter übernimmt die Kopplung zum öffentlichen Netz. Das System ist bidirektional d.h. die Batterien können sowohl geladen als auch entladen werden. Dabei wird die Energie dem Netz entnommen bzw. wieder in das Netz eingespeist. Die mittlere Ladeleistung kann über die Netzaufnahmeleistung geregelt werden.

Das System kann derzeit alle Batterietypen mit einer Klemmenspannung zwischen 40V und 60V testen. Sämtliche Komponenten für den Testaufbau wurden erstellt und in Betrieb genommen. Derzeit wird das Gesamtsystem integriert.

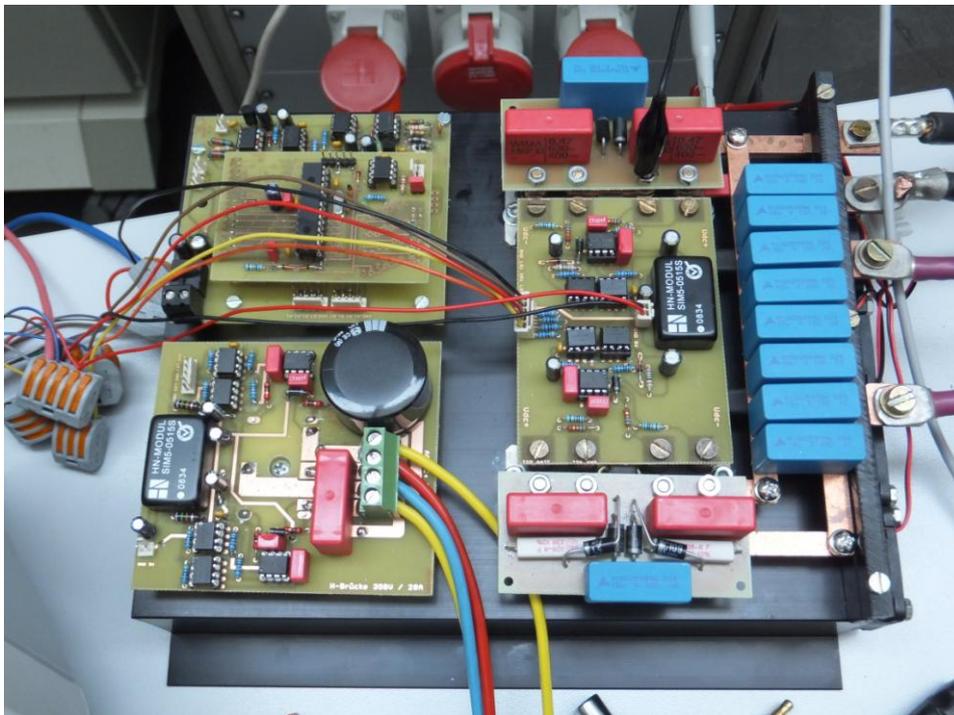


Abbildung 54: Funktionsmuster DC/DC Wandler Batterieprüfstand

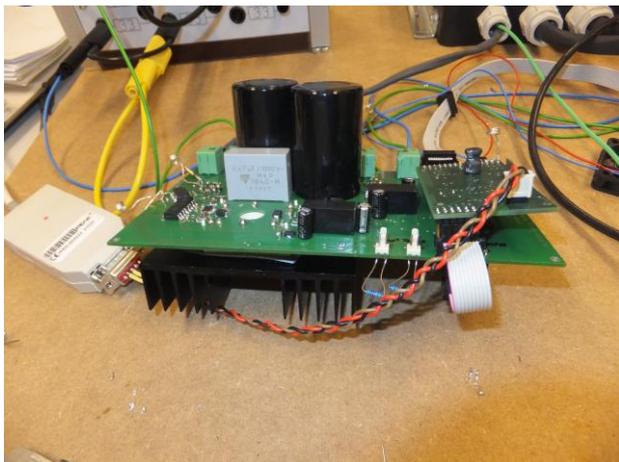


Abbildung 55: „Hochspannungsleiterplatte“ Batterieprüfstand

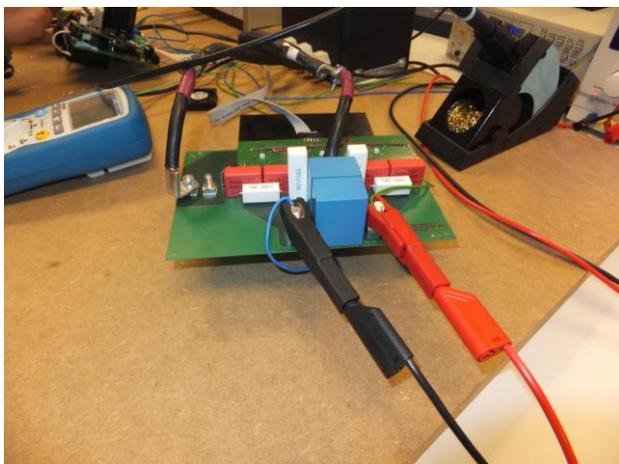


Abbildung 56: „Hochstromleiterplatte“ Batterieprüfstand

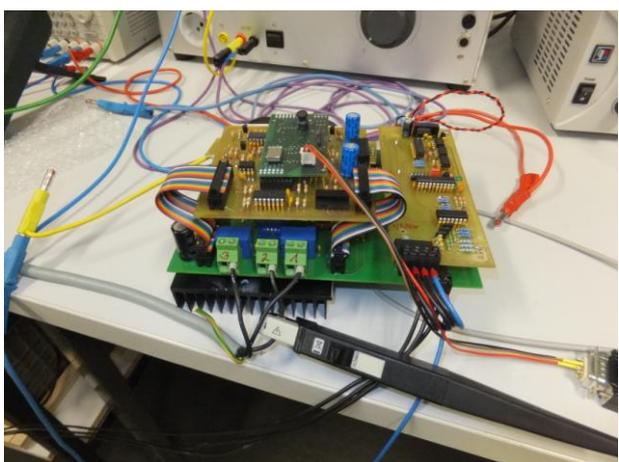


Abbildung 57: „Netzstromrichter“ Batterieprüfstand

7.8.2 Prüfstandtests

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden mittlerweile Prüfstands Tests mit Blei-Gel Batterien durchgeführt. Die Tests dienen jedoch ausschließlich der Inbetriebnahme der Elektroniken. Es wurden Batterieeingangsspannungen zwischen 32V und 60V realisiert bei Batterieströmen von 80A bis 170A. Die entsprechenden DC/DC Wandler sind somit voll einsetzbar. Der DC/AC Wandler konnte bisher nur bis etwa 7 kW Leistung betrieben werden.

7.8.3 Weitere Verwendung / zukünftige Kooperationen

Der Prüfstand wird sowohl für die Prüfung von Speichersystemen für Elektroroller als auch für stationäre Speichersysteme Verwendung finden. Derzeit gibt es entsprechende Gespräche mit dem Elektrorollerhersteller emco in Lingen sowie diverse Gespräche mit Herstellern von stationären Speichersystemen.

8 Öffentlichkeitsarbeit

Während der Laufzeit des Projektes wurden verschiedene Veröffentlichungen durchgeführt. Diese unterscheiden sich sowohl in Form als auch im Medium. Es wurden Berichte in den folgenden Medien gezeigt / veröffentlicht:

- Zeitungsartikel
- Internetveröffentlichungen
- Internetseiten
- Forschungs- und Technologieberichte der Hochschule Osnabrück
- Messeauftritte
- Veröffentlichungen der Verbraucherzentralen / Stiftung Warentest
- Talkshow im Fernsehen
- Vorträge vor nationalem und internationalem Publikum

Einige Veranstaltungen und Veröffentlichungen werden hier herausgegriffen:

- IHK-Vortragsreihe zur Elektromobilität am 12. April 2012
- Tag der offenen Tür der Hochschule Osnabrück am 6.5.2012 mit eigenem E-Roller Pavillon und Probefahrten
- EV1.tv der Talk „Elektromobilität“ Talkshow am 11.4.2012
- Vortrag German Center for Research and Innovation (GCRI) am 6.11.2012; Deutsche Vertretung bei den Vereinten Nationen, New York
- Forschungsbericht der Hochschule Osnabrück 2012
- Messeauftritt auf dem Technologiestand des Landes Niedersachsen auf der Hannover Messe 2013
- Vortrag Elektromobilität VDI Veranstaltung am 29.4.2013 in Osnabrück
- Beiratssitzung Niedersächsische Landesinitiative Energiespeicher und Brennstoffzellen am 24.09.2013
- Internationales IEEE-Meeting zur Elektromobilität am 21.11.2013
- Industry Day der Niedersächsische Landesinitiative Energiespeicher und Brennstoffzellen am 05.12.2013

9 Fazit

Mit den erfassten und ausgewerteten Daten kann für die Nutzung der Elektroroller in urbanen Gebieten folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Reichweite der Elektroroller ist für den Einsatz in urbanen Strukturen mehr als ausreichend. Es besteht in Bezug auf die Reichweite kein Verbesserungsdruck.
- Durch die Verwendung eines Hybridspeichersystem kann eine Reduktion der Speicherkapazität ermöglicht werden und somit die Anschaffungskosten für einen Elektroroller stark reduziert werden.
- Die Qualität und Lebensdauer der während der Tests verfügbaren Elektroroller lässt ein großes Potential zur Verbesserung. Insbesondere die Verarbeitungsqualität der mechanischen Bauteile könnte verbessert werden. Die am Anfang der Tests zur Verfügung gestellten Batteriesysteme sind unzureichend. Es gab in den letzten beiden Jahren jedoch eine Reihe von Verbesserungen die die Lebensdauer der eingesetzten Energiespeicher deutlich erhöht haben.
- Die Lebensdauer einiger Energiespeicher hängt sehr stark von der Nutzung und Nichtnutzung ab. Es müssen dem Nutzer eindeutige Hinweise gegeben werden.
- Die Infrastruktur in Bezug auf Lademöglichkeiten ist noch nicht ausreichend. Es können zwar die Elektroroller von bestimmten Benutzergruppen ohne Einschränkung komfortabel benutzt werden jedoch ist die Größe der Benutzergruppe durch eine fehlende Ladeinfrastruktur stark eingeschränkt. Es muss mindestens eine Lademöglichkeit vorhanden sein entweder an der Arbeitsstelle oder zu Hause.
- Zur weiteren Verbreitung der Elektromobilität muss zunächst eine Ladeinfrastruktur dort geschaffen werden wo die Fahrzeuge längere Zeit unbenutzt stehen. Dies ist an der Arbeitsstelle und zu Hause. Für beide Standorte sind die derzeit hauptsächlich angebotenen Ladeeinheiten ungeeignet – da deutlich zu teuer.
- Im Bereich Arbeitsplatz müssen entsprechende Vereinbarungen getroffen werden und die Ladung möglichst ohne energieabhängiges Abrechnungssystem durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine hohe Ladepunktdichte bei sehr geringen Investitionskosten für den Arbeitgeber.
- Zu Hause gibt es die Möglichkeit direkt an der Steckdose zu laden – allerdings nur für den Personenkreis der auf seinem Grundstück einen Stellplatz samt Elektroanschluss hat. Für weitere – gerade im urbanen Bereich – zahlreiche Kunden die solch einen Stellplatz nicht haben müssen möglichst einfache Stellplätze / Lademöglichkeit flächendeckend geschaffen werden. Ein Ladesäulensystem ist zu kostspielig. Es muss einfache integrierte Systeme geben welche direkt an Hauswänden zu installieren oder in Straßenleuchten zur Verfügung gestellt werden.
- Die Ladegeräte müssen für den mobilen Einsatz konzipiert werden und nach Möglichkeit in den Roller integriert werden.
- Die Anschaffungskosten der Elektroroller sind noch zu hoch. Durch die seit 2012 deutlich steigenden Verkaufszahlen werden diese Anschaffungskosten jedoch sinken. Der Elektroroller wird auch für die Privatperson wirtschaftlich vorausgesetzt man misst der komfortablen und schnellen Fortbewegung in der Stadt einen gewissen Mehrwert bei.

-
- Die Hauptargumente für die Nutzung von Elektroroller liegt in den geringen Verbrauchskosten, der extrem hohen Flexibilität, der Schnelligkeit im innerstädtischen Verkehr und schließlich der geringen nötigen Stellfläche (keine Parkplatzprobleme!!).
 - Es müssen Regularien in den Städten eingeführt werden die einen Anreiz für die Nutzung von Elektromobilität bieten (Parkflächen, eigene Verkehrsspuren und Fahrverbotszonen für konventionelle Fahrzeuge).

11 Literaturverzeichnis

- [Arm08] ARMANDO, E., GUGLIELMI, P., MARTINO, M. und PASTORELLI, M.: *Big electric scooter: an experience from lab to the road*. ICIEA Conference, 2008.
- [All09] ALLGEMEINER DEUTSCHER FAHRRAD-CLUB: *ADFC-Information zu Pedelecs und E-Bikes*.
http://www.adfc.de/misc/filePush.php?mimeType=application/pdf&fullPath=http://www.adfc.de/files/2/135/2009-12_ADFC-Information_Elektro-Fahrraeder.pdf, 2009.
- [Bra10] BRAND EINS: *Knattern war gestern*.
http://www.brandeins.de/uploads/tx_brandeinsmagazine/034_b1_10_09_e_mobility_01.pdf, 2010.
- [Sta09] STATISTISCHES BUNDESAMT: *STATMagazin: Pendler: Die Mehrheit nimmt weiter das Auto*.
http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Publikationen/STATmagazin/Arbeitsmarkt/2009__10/2009__10PDF,property=file.pdf, 2009.
- [Dow10] DOW JONES NEWS GMBH: *Dow Jones E-Mobility Newsletter Mai 2010 Nr.1*.
http://www.djnewsletters.de/files/2005/DowJones_E-Mobility_AusgabeMai2010.pdf, 2010.
- [Fod12] FODOREAN, D. und SZABO, L.: *Control of a permanent magnet synchronous motor for electric scooter application*, Conference SPEEDAM, 2012.
- [Kra10] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2010): *Emissionen, Kraftstoffe - Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2010*.
http://www.kba.de/cln_007/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/EmissionenKraftstoffe/2010__b__emi__eckdaten__absolut.html, 2010.
- [Min11] MINCIUNESCU, P., BALABAN, R., MINCIUNESCU, C. und CHEFNEUX, M.: *Permanent magnet brushless machine for a hybrid electric scooter*. Conference ATEE, 2011

- [Peh07] PEHNT, M., HÖPFNER, U. und MERTEN, F.: *Elektromobilität und erneuerbare Energien*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Wuppertal, Heidelberg
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektromobilitaet_ee_arbeitspapier.pdf, 2007.
- [Pel09] PELLEGRINO, G., ARMANDO, E. und GUGLIELMI, P.: *Integrated battery charger for electric scooter*, Conference EPE, 2009.
- [Sta10] STADT OSNABRÜCK: *Statistik über Ein- und Auspendler*.
http://www.osnabrueck.de/images_design/Grafiken_Inhalt_Rathaus_online/Sozialversicherungspflichtig_Beschaeftigte_nach_dem_Arbeits-_und_Wohnort.pdf, 2010