

Integration von Bodenbelagsinformationen zum energieeffizienten Routen von Elektrorollstühlen

Dženan DŽAFIĆ, Danni BAUMEISTER, Dominik FRANKE und Stefan KOWALEWSKI

RWTH Aachen · dzafic@embedded.rwth-aachen.de

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

Fahrbahnen, deren Oberfläche aus Kopfsteinpflaster besteht, stellen nicht nur für Fahrer eines Elektrorollstuhls einen unbequemen Verkehrsträger dar. Diese Beobachtung legt nahe, den Einfluss des Straßenbelags auf die Güte einer durch ein Navigationssystem berechneten Route zu begutachten. Insbesondere bei der Betrachtung des Energieverbrauchs ist bekannt, dass der Straßenbelag die Motorleistung und somit den Stromverbrauch beeinflusst. Dieser Beitrag beschreibt den Vorgang der Integration des Faktors Rollwiderstand in das Navigationssystem eNav und liefert eine ausführliche Auswertung der potenziellen Energieeinsparung durch Betrachtung der Steigungsinformationen und des Straßenbelags. Das System wird dabei neben dem bereits integrierten Einflussfaktor Steigung, um den Straßenbelag ergänzt, sodass anhand von Reibungsfaktoren eine Erweiterung der bereits bestehenden Verbrauchsfunktion vorgenommen werden kann. Eine Evaluation mit Testrouten, die auf Basis zufällig generierter Start- und Zielpunkte berechnet werden, gibt abschließend Aufschluss über die Auswirkung des Straßenbelags auf den Stromverbrauch. Insgesamt lässt sich eine Verbesserung der Genauigkeit der Verbrauchsfunktion feststellen, jedoch ist der Einfluss des Straßenbelags auf den Energieverbrauch geringer als zunächst erwartet.

1 Einleitung

Navigationssysteme bieten bezüglich der Routenberechnung in der Regel zwei Auswahlmöglichkeiten. Zum einen wird für die Berechnung die Distanz zugrunde gelegt und dadurch die kürzeste Route berechnet, zum anderen bezieht das Navigationssystem die maximale Geschwindigkeit ein und liefert eine schnellste Route. Der Energieverbrauch wird vernachlässigt. Fahrradfahrer bemerken intuitiv, dass auf gewissen Strecken ein größerer Kraftaufwand nötig ist als auf anderen (WILSON 2004, SHIRABE 2008). Das Navigationssystem eNav versucht von dieser Erkenntnis hinsichtlich der Nutzung von Elektrorollstühle zu profitieren und ermittelt eine energieeffiziente Route, was bereits durch einige Veröffentlichungen thematisiert wird (FRANKE et al. 2011, FRANKE et al. 2012, DZAFIC et al. 2013). Der Energieverbrauch wird dabei anhand topographischer Eigenschaften, wie beispielsweise der Steigung, kalkuliert. Dazu bedarf es Kartenmaterial, das um zusätzliche Informationen ergänzt wird. Die Basis bietet dabei OpenStreetMap (OSM) Kartenmaterial, das bereits mit Höheninformationen aus einem Laserscan der Bezirksregierung aus Köln

angereichert ist. Das Kartenmaterial verfügt somit über dreidimensionale Komponenten. Für die Integration der Straßenbeläge ist eine weitere Datenquelle notwendig, da OSM über unzureichende Informationen verfügt. Weitere auf den Energieverbrauch Einfluss nehmende Faktoren, wie Temperatur oder Reifendruck, sollen außerdem für die zukünftigen Erweiterungen eine Rolle spielen.

2 Grundlagen

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Basis für das Navigationssystem eNav, welche die Integration der Rollwiderstände begünstigt. Eine Erläuterung des A*-Algorithmus (HART et al. 1968) und der Modifikationen (DZAFIC et al. 2013) wird aufgrund der Beschränkung der Seitenzahl ausgelassen. Eine detaillierte Beschreibung ist in (NORVIG et al. 2012) zu finden. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf der Beschreibung der Zuordnung und der Integration der Straßenbeläge aus dem Shapefile des Stadtbetriebs Aachen in das OSM-Kartenmaterial.

2.1 eNav

Das Projekt eNav ist eine Entwicklung mit dem Ziel, die Mobilität von Nutzern von Elektorollstühlen zu steigern, indem die Berechnung von energieeffizienten Routen eine bessere Ausnutzung der Akkukapazität erlaubt. Dazu bezieht das Navigationssystem bisher den Faktor Streckensteigung in die Berechnung ein, um Routen auswählen zu können, die die Motorleistung durch ein flaches Terrain, bzw. die Ausnutzung von Gefällen weniger beanspruchen. Der in das System integrierte modifizierte A*-Algorithmus liefert eine energieeffiziente Route unter Verwendung der Höheninformationen, welche die Berechnung der Steigung zwischen zwei Knoten ermöglichen. Die gerichtete Kante zwischen den beiden Knoten wird vorbereitend mit dem Energieverbrauch beschriftet, sodass eine Ersetzung des Kantengewichtes, welches ursprünglich als Distanzwert gespeichert wird, stattfindet. Der bisherige Energieverbrauch setzt sich wie folgt zusammen:

$$\text{Verbrauch} := \text{Normalverbrauch} * \text{Distanz} * 1,15^{\text{Steigung}}$$

Diese Verbrauchsfunktion ist im Ursprung aus (FRANKE et al. 2011) hervorgegangen. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung führt zu der angeführten Form. Für eine detaillierte Beschreibung der Verbrauchsfunktion wird auf (DZAFIC et al. 2013) verwiesen. Die Korrektheit der Heuristik, die bei der Verwendung des A*-Algorithmus zum Einsatz kommt, wird ebenfalls in dieser Veröffentlichung belegt. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf zwei zentralen Punkten. Zum einen wird die Erweiterung der Verbrauchsfunktion um den Faktor Straßenbelag und der damit verbundenen Anpassungen des Kartenmaterials vorgestellt, zum anderen wird das eNav-System einer umfassenden Evaluierung unterzogen.

2.2 OpenStreetMap

Frei erhältliches Kartenmaterial ist für ein Projekt in frühen Entwicklungsstadien eine attraktive Lösung. OpenstreetMap (OSM) bietet sich für das eNav-Projekt dabei in besonderem Maße an, da eine enorme Datendichte und eine ständige Aktualisierung des Kartenmaterials durch eine große Anzahl an Mitgliedern eine hohe Qualität sicherstellt (RAMM et al.

2010). Das Format der OSM-Dateien ermöglicht eine einfache Weiterverarbeitung der Daten sowie ein Hinzufügen von neuen Informationen über definierte Tags, welche in Form von Key-Value-Paaren vorliegen. Bisher steht die Verwendung der Tags *Altitude* und *Elevation*, welche in OSM als Synonym angesehen werden, im Vordergrund. Für die Integration des Rollwiderstandes spielt der Tag *Surface* eine wichtige Rolle, da aus der Bezeichnung der Straßenoberfläche ein Widerstandswert abgeleitet werden kann. Die Informationen in OSM, die sich hinter den Oberflächentypen verbergen, sind allerdings bezüglich der Genauigkeit für das Projekt eNav nicht ausreichend. Auf diese Problematik wird in einem späteren Abschnitt noch genauer eingegangen. Der Zugriff auf eine weitere Datenquelle, welche im nächsten Abschnitt thematisiert wird, wird nötig.

2.3 Straßenbelagsinformationen

Aufgrund der Tatsache, dass die Angaben über die Straßenoberfläche in OSM nicht vollständig bzw. ungenau sind, ist eine Ergänzung durch weitere Daten erforderlich. Der Stadtbetrieb Aachen stellt eine Datei mit Informationen über die Bodenbeschaffenheit der Straßen bereit, die für die Zwecke von eNav geeignet sind. Die Daten liegen in einem GeofORMAT namens Shapefile vor. Eine solche Datei setzt sich aus mindestens drei unterliegenden Dateien zusammen, wobei sich optional weitere Dateien hinzufügen lassen. Eine SHP-Datei für die Speicherung der Geometriedaten, eine DBF-Datei für Sachdaten im dBASE-Format und eine SHX-Datei, die zur Verknüpfung der beiden erstgenannten Dateien dient, bilden die Grundlage eines Shapefiles. Zusätzlich fallen bei genauer Studie der Daten einige Konventionen auf, die beim Handling zu beachten sind. Eine Straße besteht aus einer oder mehreren Spuren. Eine Spur wird durch ein Polygon, dessen Länge im Bereich von 50 Meter bis 150 Meter liegt, repräsentiert. Jeder Spur ist ein Straßenbelag zugeordnet und es existieren eine positive und eine negative Bezeichnung für die Spurnummer, die Auskunft darüber zulässt, ob die Hausnummern auf der Straßenseite gerade oder ungerade sind. Grafisch darstellen lässt sich das Shapefile mit der Software QGis. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Shapefile.

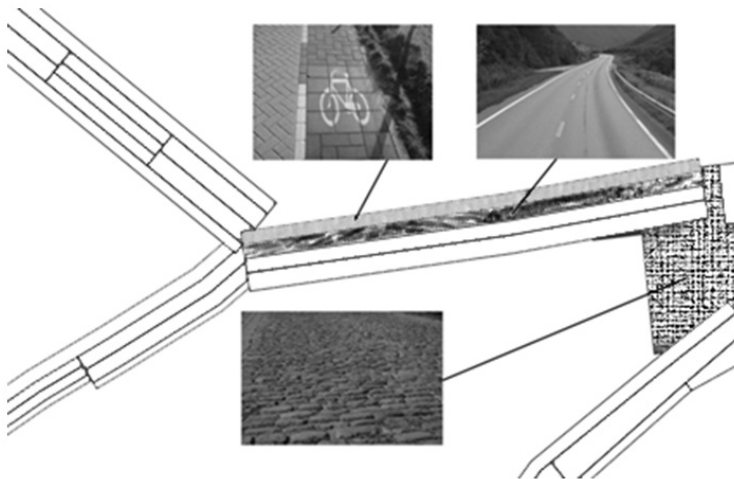


Abb. 1: Spuren im Shapefile

3 Einbeziehung des Straßenbelags in die Routenberechnung

Um die Berechnung einer energieeffizienten Route unter Berücksichtigung des Straßenbelags durchführen zu können, sind einige Anpassungen nötig. Das in den Grundlagen beschriebene OSM-Kartenmaterial ist um die Straßenbeläge aus dem Shapefile anzureichern. Dazu ist ein Mapping der unter dem Tag *surface* vorhandenen Belagbezeichnern auf die in dem Shapefile befindlichen erforderlich. Überdies ergibt sich durch Möglichkeiten unterschiedlicher Erfassung von Straßen in OSM eine Herausforderung. Es ist möglich mehrere Fahrbahnen in einer einzigen Kante parallel zu speichern, z. B. lässt sich ein Fahrradweg einer Straße hinzufügen. Dazu bedarf es nur eines Wahrheitswertes, der die Existenz eines Fahrradwegs anzeigt. In einem solchen Fall müsste eine solche Kante bei unterschiedlichen Straßenbelägen über zwei separate Werte für den Tag *surface* verfügen. Es lässt sich jedoch nur ein Wert speichern. Ein Informationsverlust ist deshalb nicht vermeidbar.

Eine besondere Herausforderung ergibt sich aus der folgenden Aufgabe. Innerhalb des Shapefile verfügt eine Straße über mehrere Spuren, deren Straßenbelag sich deutlich unterscheiden kann. Abbildung 2 macht die Unterschiede der beiden Datenformate in grafischer Form sichtbar. Die zusätzlichen Informationen im Shapefile sind für das eNav-System nützlich, erfordern aber eine Strategie für die Zuordnung des Straßenbelags. Die Länge der Polygone, die eine Spur repräsentieren, entspricht in der Regel nicht der Kantenlänge in OSM und erschwert dadurch ebenfalls ein exaktes Matching des Straßenbelags. Einige Strategien eignen sich für die Zuteilung der Straßenbeläge. Unter der Verwendung eines Parsers lassen sich nicht alle effizient realisieren oder weisen bezüglich der Genauigkeit Mängel auf. Die gewählte Strategie liefert allerdings eine für das eNav-Projekt akzeptable Genauigkeit und ist bezüglich der Laufzeit effizient. Aus Platzgründen wird die Strategie nicht weiter vorgestellt.

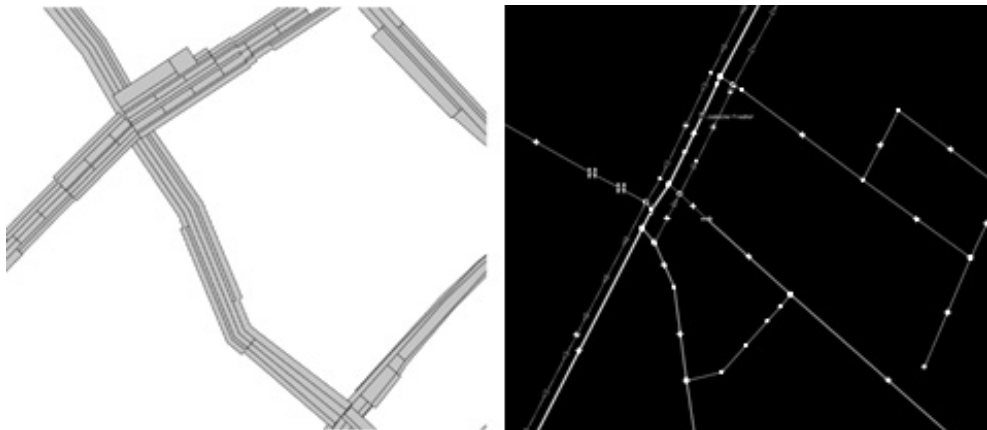


Abb. 2: Vergleich von Shapefile- und OSM-Darstellung

Für die Modifikation der Verbrauchsfunktion ist die Identifikation des Straßenbelags nicht ausreichend. Erst die Verknüpfung des Straßenbelags mit einem Reibungsfaktor ermöglicht eine Berechnung des Energieverbrauchs. Eine Studie der Universität Wuppertal liefert

Reibungskoeffizienten für die jeweiligen Straßenbeläge (SCHMITT et al. 2003). Diese sind jedoch nur in Intervallen angegeben, sodass ein konkreter Wert noch zu wählen ist. In Tabelle 1 sind die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Straßenwesen der RWTH abgeleiteten Reibungsfaktoren aufgelistet, die bei der Berechnung den Energieverbrauch beeinflussen. Der Reibungskoeffizient von Asphalt ist der Basiswert für die Funktion, da dieser Straßenbelag den niedrigsten Widerstand erzeugt. Alle anderen Faktoren ergeben sich durch die Relation des konkreten Reibungskoeffizienten im Vergleich zu Asphalt.

Tabelle 1: Zuordnung von OSM-Tags und Reibungsfaktoren

Shapefile	OSM-Tag	Faktor
Asphalt	Asphalt	1,00
Beton	Concrete	1,00
Großer Natursteinpflaster	cobblestone	1,05
Kleiner Natursteinpflaster	cobblestone:flattened	1,02
Betonpflaster	paving_stones	1,01
Plattenbelag	concrete_plates	1,02
Unbefestigte Beläge	Pepplestone	1,07

Nach der Zuordnung der Werte lässt sich der Reibungsfaktor als zusätzlicher Parameter an die Verbrauchsfunktion anbinden. Die daraus resultierende Formel hat die folgende Form:

$$\text{Verbrauch} := \text{Normalverbrauch} * \text{Distanz} * 1,15^{\text{Steigung}} * \text{Reibungsfaktor}$$

Bezüglich der A*-Heuristik wird der Reibungsfaktor von Asphalt verwendet, da es unter den betrachteten Straßenbelägen keinen gibt, der Asphalt unterbietet. Daraus lässt sich folgern, dass die Anforderung an die Korrektheit der A*-Heuristik aufrechterhalten wird. Dadurch ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Verbrauch} := \text{Normalverbrauch} * \text{Distanz} * 1,15^{\text{Steigung}} * 1,00$$

Das Einsetzen des Faktors 1 führt dazu, dass die Formel äquivalent ist zu:

$$\text{Verbrauch} := \text{Normalverbrauch} * \text{Distanz} * 1,15^{\text{Steigung}}$$

Diese Funktion ist identisch zu der bisherigen und der Korrektheitsbeweis behält seine Gültigkeit (DZAFIC et al. 2013).

4 Evaluation

Dieses Kapitel stellt eine Testmenge aus kürzesten und effizientesten Routen gegenüber und untersucht, inwiefern sich die Wahl der effizientesten Route bezüglich des Energieverbrauchs auszahlt. Eine größere Untersuchung ist bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht existent, jedoch gibt es Indizien dafür, dass die Rentabilität der effizienten Route deutlich höher ist als bei der kürzesten Route. Die folgenden Unterkapitel untersuchen genau diese Annahme.

4.1 Testablauf

Bei der Durchführung der Tests werden 100.000 Routen über zufällig erzeugte Start- und Zielpunkte berechnet. Diese Punkte liegen dabei innerhalb eines abgegrenzten Bereichs der Stadt Aachen. Für jedes der 100.000 generierten Paare aus Start- und Zielpunkten wird sowohl die kürzeste als auch die effizienteste Route berechnet. Als Information für die Logdatei werden Start- und Zielpunkt gespeichert, sowie die Distanz, als auch der Verbrauch beider Routen. Anschließend werden die Daten mithilfe einer PostgreSQL-Datenbank importiert und ausgewertet. Für die Auswertung wird bei der Berechnung der effizientesten Route sowohl die Steigung als auch der Straßenbelag einbezogen.

4.2 Vergleich kürzeste vs. effizienteste Route

Als erster zu untersuchender Punkt ist die Anzahl der Routen, bei denen die effizienteste Route einen niedrigeren Energieverbrauch aufweist als die kürzeste Route, zu nennen. Abbildung 3 zeigt den prozentualen Anteil, bei dem die effizienteste Route weniger Strom veranschlagt als die kürzeste Route. In 41 % der Fälle kann durch die effizienteste Route Energie eingespart werden. In den anderen 59 % sind die effizienteste und die kürzeste Route identisch. Um die Güte besser einschätzen zu können, ist zu erwähnen, dass der Höhenunterschied in Aachen von 125 Meter bis 410 Meter über dem Meeresspiegel reicht. In flacheren Gebieten fällt das Verhältnis wahrscheinlich anders aus. Bei der Berechnung des Durchschnittswertes ergibt sich, dass eine Effizienzsteigerung von 2 % erreicht wird. Dieser Wert entsteht dadurch, dass ein Großteil der kürzesten und effizientesten Routen sich um weniger als 1 % unterscheidet. Ein Wechsel der Straßenseiten ist für dieses Phänomen verantwortlich. Abbildung 4 stellt die Relation zwischen effizientester und kürzester Route unter Verwendung eines Filters dar. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass alle Fälle, bei denen die Effizienz um weniger als 1 % gesteigert wird, unbeachtet bleiben. Ein solcher Filter ist notwendig, da die Häufigkeit dieser Fälle sehr groß ist und den tatsächlichen Wert verfälscht. Das Ergebnis zeigt, dass nur in 31 % der Fälle die effizienteste Route energiesparsamer ist als die kürzeste Route. Im Durchschnitt ergibt sich bei Anwendung des Filters ein Unterschied des Verbrauchs um 6 %, ohne wären es jedoch nur 2 %.

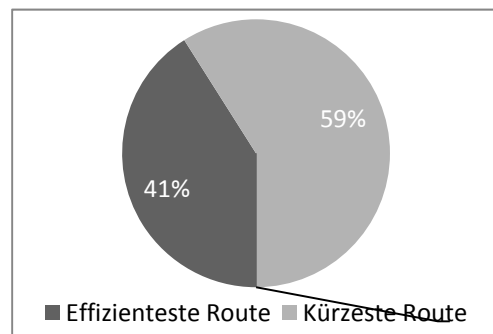


Abb. 3: Routenvergleich

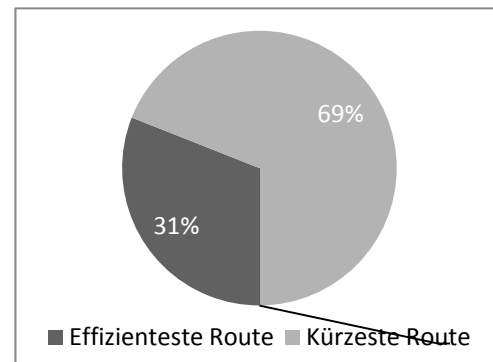


Abb. 4: Routenvergleich mit Filter

Eine genaue Verteilung der 41 % effizienterer Routen ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Unterteilung der prozentualen Energieeinsparung ist in Intervallen vorgenommen. In Klammern ist die absolute Häufigkeit der Routen angegeben. Eine interessante Beobachtung ist, dass Routen existieren, die über 50 % der Energie einsparen. Der maximale Wert liegt bei 61 % bei einer Distanz von 1,8 km und einem Umweg von 160 Metern. Auffällig ist zudem, dass in dem ersten Intervall mit 67 % die meisten Routen eingeordnet sind. Aufgrund dessen wird dieser Bereich in Abbildung 7 noch genauer unterteilt. Das beschriebene Phänomen des Straßenseitenwechsels ist in 9,7 % der Fälle der gesamten Testmenge zu beobachten. Dieser Wert führt dazu, dass der Durchschnitt zu Beginn deutlich gesenkt wird.

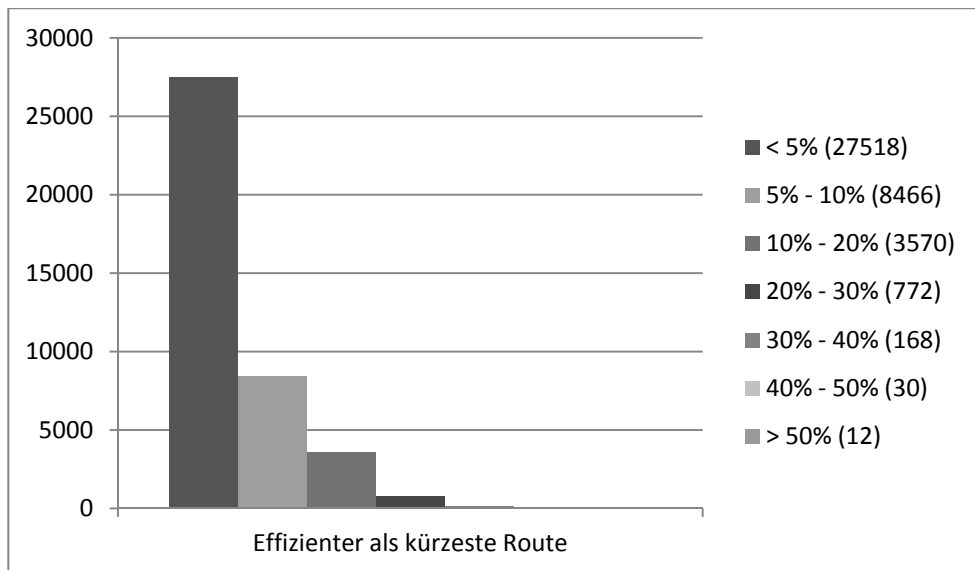


Abb. 5: Verteilung der effizientesten Routen

Bei der Betrachtung des Box Plots in Abbildung 6 lässt sich feststellen, dass die beiden Quantils unterhalb der 10%-Grenze liegen. Selbst bei der Anwendung des Filters bleiben beide darunter. Beachtenswert ist, dass die Hälfte der Routen eine Energieersparnis von mehr als 7 % aufweist, was den Nutzen von effizienten Routen bekräftigt. Besonders unter Berücksichtigung der Umwege, die in der Regel kurz sind, ist dies positiv zu bewerten. Der Ausreißer bei 61 % fällt ebenfalls besonders ins Auge, da so große Ersparnisse eher selten vorkommen.

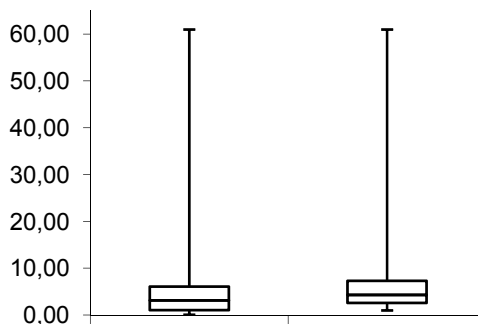


Abb. 6: Effizienteste Route ohne (links) und mit Filter (rechts)

Bei der Untersuchung der für die effizienteste Route benötigten Streckenlänge im Vergleich zur kürzesten Route ergibt sich aus Abbildung 8 aus dem ersten Intervall das gleiche Phänomen. Seitenwechsel führen zu sehr kurzen Umwegen von einigen Metern. Insgesamt ergibt sich im Durchschnitt ein Umweg von 1 % der Gesamtlänge. Unter Ausschluss der beobachteten Seitenwechsel bei 1 % Abweichung liegt der Unterschied bei durchschnittlich 5 %. Interessanterweise liegen die Durchschnittswerte nahe beieinander, allerdings ist in der Gesamtheit kein Zusammenhang zwischen dem Umweg und der Energieersparnis zu erkennen. Der maximale Umweg innerhalb der Testrouten liegt bei 180 % der kürzesten Strecke und spart dabei immerhin 30 % der Energie ein. Im Vergleich dazu beträgt die Ersparnis bei einer Route aus der Testmenge mit einem Umweg von 160 % der Streckenlänge nur 5 %. Aus diesem Grund ist sinnvoll, den Nutzer selbst zwischen der kürzesten und effizientesten Route wählen zu lassen, da nicht jeder Umweg dienlich ist.

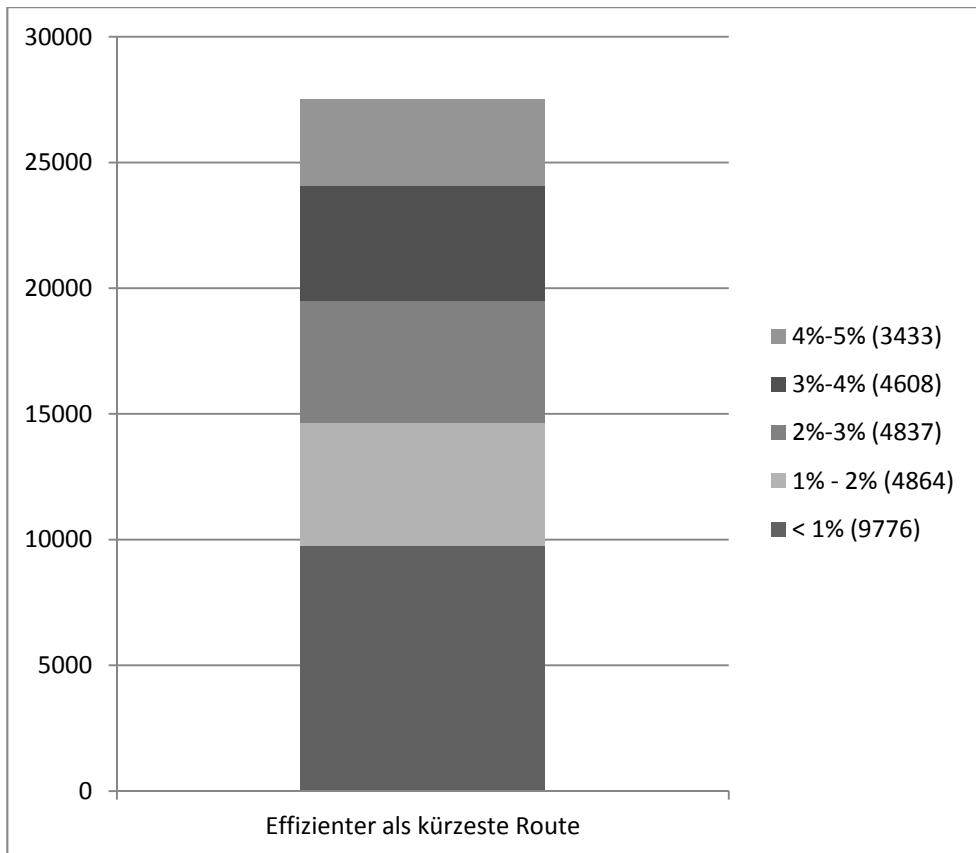


Abb. 7: Verteilung der Routen bis 5 %

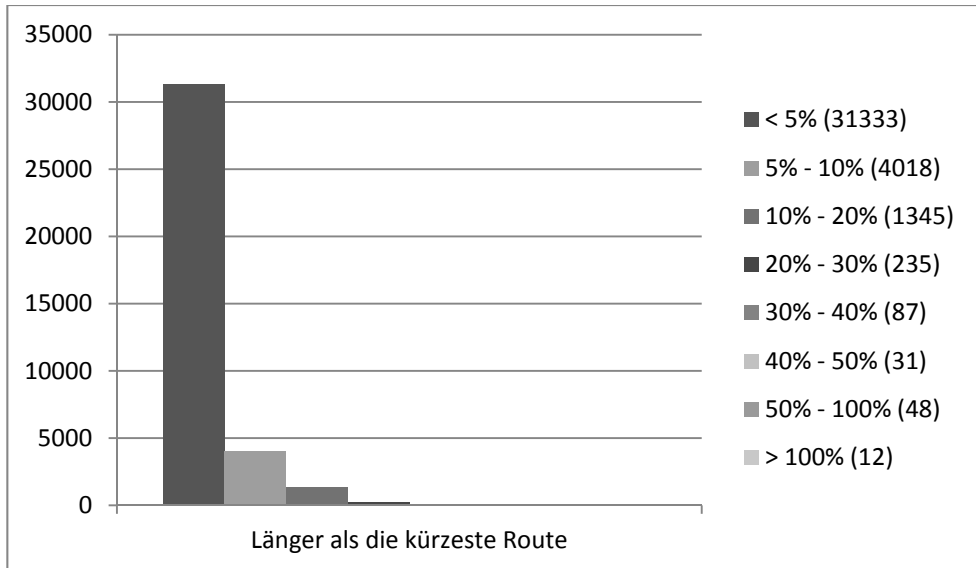


Abb. 8: Zusatzaufwand bezüglich der Streckenlänge

5 Fazit und Ausblick

Die Erweiterung des Navigationssystems eNav um den Einflussfaktor Reibung verbessert die Genauigkeit der Verbrauchsfunktion. Insgesamt wirkt sich der Einflussfaktor Reibung im Vergleich zur Steigung nicht signifikant auf den Energieverbrauch aus. Die Berücksichtigung des Faktors ist technisch realisierbar und trägt trotz eines eher geringen Effekts zur Verbesserung der Verbrauchsfunktion bei. Ein Punkt, der die Betrachtung des Straßenbelags aufwertet, ist der Reisekomfort. Dieser kann mithilfe der Informationen über den Straßenbelag angehoben werden und somit einen weiteren Beitrag zur Verbesserung der Mobilität von Elektrorollstuhlfahrern leisten.

Der Test des e-Nav Systems unter Berücksichtigung des Straßenbelags und der Steigung ergibt, dass zu ca. einem Drittel der Start- und Zielknotenpaare eine effiziente Route existiert. Diese Tatsache bestätigt, dass effiziente Routen unter der Betrachtung der Steigung und des Straßenbelags nützlich sind und bei geringer Akkukapazität bis zu 50 % Ersparnis erreichen. Allerdings lässt sich festhalten, dass bei einem hohen Akkustand und unter Zeitdruck eine effizienteste Route nicht ausnahmslos die sinnvollste Wahl sein muss.

Die Integration der Straßenbeläge und der Steigung haben gezeigt, dass sich der Energieverbrauch reduzieren lässt. Die Erfahrungen dienen als Motivation, um sich weiteren Einflussfaktoren zu widmen. Als vielversprechender Faktor ist die Temperatur hervorzuheben, da in der Theorie bei Kälte eine beträchtliche Reduzierung der Akkukapazität nachgewiesen ist. Die Temperatur hat keinen signifikanten Einfluss auf die Routenwahl für Elektrorollstühle, jedoch kann das Navigationssystem dem Fahrer eine genauere Auskunft über die Reichweite des Akkus geben.

Literatur

- ANDRE, F. (2008), Modellierung einer Li-Ionen Batterie für Hybridfahrzeug-Simulationen – Modellbildung und Echtzeitsimulation technischer Systeme. TU Berlin.
- DZAFIC, D., FRANKE, D., BAUMEISTER, D. & KOWALEWSKI, S. (2013), Modifikation des A*-Algorithmus für energieeffizientes 3D-Routing. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angeordnete Geoinformatik 2013*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 414-423.
- HART, P. E., NILSSON, N. J. & RAPHAEL, B. (1968), A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE (Hrsg), *Transactions on Systems Science and Cybernetics*. Menlo Park, California, USA.
- FRANKE, D., DZAFIC, D., WEISE, C. & KOWALEWSKI, S. (2011), Konzept eines Mobilen OSM-Navigationssystems für Elektrofahrzeuge. In: STROBL, J. et al. (Hrsg.), *Angeordnete Geoinformatik 2011*. Wichmann, Berlin/Offenbach, 148-157.
- FRANKE, D., DZAFIC, D., BAUMEISTER, D. & KOWALEWSKI, S. (2012), Energieeffizientes Routing für Elektrorollstühle. In: 13. Aachener Kolloquium Mobilität und Stadt (AMUS/ACMOTÉ), Aachen, 65-67.
- NORWIG, P. & RUSSELL, S. (2011), *Künstliche Intelligenz – Ein Moderner Ansatz*. München.
- RAMM, F. & TOPF, J. (2010), *OpenStreetMap – Die freie Weltkarte nutzen und mitgestalten*. Berlin.
- SCHMITT, S. & SCHLENDER, D. (2003), *Untersuchung zum saisonalen Reifenwechsel unter Berücksichtigung technischer und klimatischer Aspekte*. Bericht, Bergische Universität Wuppertal.
- SHIRABE, T. (2008), Minimum work paths in elevated networks. *Networks*, 88-97.
- WILSON, D. (2004), *Bicycling Science*. MIT Press.