

Einfluss der vertikalen Genauigkeit von DGM auf das EcoRouting von Elektrofahrzeugen

Felix BACHOFER

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

Zusammenfassung

Trotz steigender Popularität haben Elektrofahrzeuge noch immer ein Akzeptanzproblem. Dies liegt an hohen Anschaffungskosten, langen Ladezeiten und vor allem an geringeren Reichweiten gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, aber auch an ungenauen Angaben zur Reichweite. Neben Investitionen in die Weiterentwicklung von Akkutechnik, Batteriemanagementsystemen und in die Gewichtsreduktion von Fahrzeugen bieten auch die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) weiteres Potenzial zur Effizienzsteigerung. Dazu gehören vor allem intelligente Routinglösungen, welche die ökonomischsten Routen berechnen und damit dazu beitragen können, Reichweiten zu vergrößern. Wesentliche Bestandteile solcher Modelle sind Fahrzeugenergiemodelle und Höheninformationen zu Steigungen und Gefälle der Straßensegmente. Die Höhendaten sind relevant, da beispielsweise bei einer Steigung von vier Prozent je nach Geschwindigkeit ein circa 50-100 % höherer Energiebedarf als für eine ebene Strecke besteht. Durch die Integration unterschiedlicher digitaler Geländemodelle (DGM) in ein energiebasiertes Routing konnte nachgewiesen werden, dass der modellierte Energiebedarf im Durchschnitt nur zu einem geringen Maß von der vertikalen Genauigkeit der Höhenmodelle abhängig ist. Bei Einzelstrecken traten hingegen Abweichungen von über 30 % auf. Gegenüber kostenintensiven hochaufgelösten DGM liefern gängige SRTM-Höhendaten eine ausreichende Basis für energiebasierte Routinganwendungen.

1 Einleitung

Elektromobilität ist eines der großen Schlagworte der letzten Jahre. Klimawandel, Umweltschutz und sich verteuernde fossile Rohstoffe gehören zu den treibenden Faktoren dieses Umstandes. Die Politik reagiert weltweit mit direkter Förderung von Industrie, Forschungsförderung in Modellregionen und Subventionierung beim Kauf von Elektrofahrzeugen. Die dominierenden Absichten dabei sind, den Schadstoffausstoß langfristig zu minimieren und die eigene Industrie am erhofften Boom teilhaben zu lassen. Die meisten der Elektro-Pkws im deutschsprachigen Raum werden derzeit in Modellregionen und Forschungsflotten eingesetzt, wohingegen es für private Nutzer noch schwierig ist, Fahrzeuge zu erwerben. Verschiedene Hersteller kündigten jedoch schon den Verkaufsstart für die ersten Serienfahrzeuge im Zeitraum 2011/2012 an. Wie intensiv diese neuen Produkte von den Verbrauchern in nachgefragt werden, ist noch fraglich. Zwar können sich viele Verbraucher den Kauf von

E-Fahrzeugen grundsätzlich vorstellen, jedoch vermindert sich deren Anteil drastisch, wenn auf hohe Anschaffungskosten, lange Ladezeiten, geringere Reichweiten und unzuverlässige Reichweiteprognosen hingewiesen wird (KOLKE 2009, VDE 2010). Für Forschung und Industrie gilt es diese Akzeptanzprobleme bei den Nutzern zu minimieren, um Elektrofahrzeuge in relevantem Umfang auf die Straße zu bringen. Hierbei sind die wichtigsten Forschungs- und Investitionsfelder die Akku-Technik und die Reichweite (VDE 2010).

1.1 Stand der Forschung und Zielsetzung

EcoRouting (Economic Routing) und GreenNavigation bezeichnen Routingapplikationen, welche nicht das Ziel haben die schnellste oder kürzeste Route vorzuschlagen, sondern die ökonomisch sinnvollste Route hinsichtlich des Energieverbrauchs. Im Optimalfall lassen sich damit Kosten und Emissionen senken. Der Einsatz erfolgt über On-Board Navigationssysteme, welche mittels Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) auch teilweise externe Daten in Echtzeit verarbeiten und mit welchen Routinganweisungen für den Fahrer generiert werden. Auf dem Markt sind bereits unterschiedliche Ansätze für energieeffizientes Routing und Reichweiteprognosen mittels IKT im Einsatz, welche sich auch auf Elektrofahrzeuge übertragen lassen. KONO et al. (2008) beschreiben einen Ansatz zum EcoRouting für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, bei dem sie einen signifikanten Einfluss der Topographie und von Verkehrsbehinderungen auf den Energieverbrauch feststellen konnten. Bei ihren Testberechnungen konnten Einsparungen beim Verbrauch von 9 % erzielt werden. GONDER (2008) vergleicht in einer Studie verschiedene vorausschauende Routingansätze („look-ahead-strategies“), welche aus dem bisherigen Fahrverhalten Routingvorschläge sowie den optimierten Einsatz des Elektroantriebs bei Plug-In-Hybridfahrzeugen liefern. KNAUER (2010) stellt eine Softwareentwicklung vor, welche den aktuellen und den zu erwartenden Verkehrsfluss sowie exakte topographische Daten verwendet, um den streckenbezogenen Energiebedarf von E-Fahrzeugen zu berechnen. ARTMEIER et al. (2010) konzentrieren sich in ihrer Forschungsarbeit auf die Anpassung des Shortest Path Algorithmus auf die speziellen Rahmenbedingungen von E-Fahrzeugen, wie beispielsweise der Rekuperation unter Berücksichtigung von Höheninformationen.

Wesentlicher Bestandteil der vorgestellten Arbeiten sind – neben den Energiemodellen von Fahrzeugen – Höhendaten, über die Steigung und das Gefälle von Straßenabschnitten ermittelt werden können. Werden diese Höhendaten aus rasterbasierten DGMs auf die Knoten und Kanten der routingfähigen Straßennetze übertragen, stellt sich die Frage der Qualität der verwendeten Höhendaten. Die räumliche Auflösung, sowie die vertikale Genauigkeit unterschieden sich je nach Erfassungsmethode, der weiteren Prozessierung oder den Quelldaten der verwendeten DGMs. In dieser Arbeit wird untersucht, inwieweit räumliche Auflösung und vertikale Genauigkeit das Ergebnis des EcoRoutings beeinflussen und welche DGMs als Datenquelle empfohlen werden können.

1.2 Untersuchungsregion und Datengrundlage

Die Untersuchungsregion ist das bayerische Allgäu, welches mit seiner reliefintensiven Voralpenlandschaft, starken Steigungen und Gefällestrecken, auch Strecken mit geringen Höhenunterschieden bietet. Gleichzeitig ist das Allgäu Modellregion im Forschungsverbund IKT für Elektromobilität und beherbergt eine E-Fahrzeugflotte, welche für die Untersuchungen herangezogen wurde.

Für die Untersuchungen stehen ein aktueller Teleatlas MultiNet© als Basis für das Routing zur Verfügung. Die Leistungsdaten eines Elektrofahrzeugs wurden mit Batteriemesstechnik erfasst und mit Positionsdaten eines On-Board-GPS-Tracking-Systems zusammen geführt. Um den Einfluss der Genauigkeit der Höheninformation zu erfassen, liegen unterschiedliche DGMs vor. Das Referenz-DGM ist ein LIDAR-DGM der bayerischen Landesvermessung mit 5 m Bodenauflösung.

2 Vergleich der Digitalen Geländemodelle

Um den Einfluss der vertikalen Genauigkeit der DGMs einordnen zu können, wurde vor der weiteren Analyse eine Validierung der Geländemodelle durchgeführt. Diese gibt jedoch nur einen Hinweis, auf die Auswirkungen eines energiebasierten Routings, da vor allem die relativen Abweichungen zum Referenz-DGM eine Rolle spielen. Für die Validierung von Geländemodellen gibt es ausführliche Arbeiten aus unterschiedlichen Fachbereichen. FISHER & TATE (2006) diskutieren die Eignung („fitness for use“) von DGMs für unterschiedliche Fragestellungen und stellen fest, dass im optimalen Fall folgende Frage beantwortet werden kann: „Welche der verfügbaren Informationen die man sich leisten kann ist die passendste?“ Als Gründe für die Abweichungen in DGMs werden zum einen die Datendichte und Unregelmäßigkeiten bei der Erfassung, zum anderen Prozessierungsmethoden und auch Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Erfassungsmethoden und Oberflächeneigenschaften (v. a. Hangneigung und Landbedeckung) genannt (LI et al. 2005, FISHER & TATE 2006, DENG et al. 2007).

2.1 Die verfügbaren Geländemodelle

Als Referenz-DGM dient ein LIDAR-DGM (Light Detection and Ranging) mit 5 m Bodenauflösung der bayerischen Landesvermessung mit über 3.000 km² Fläche. Die angegebene vertikale Genauigkeit von $\pm 0,3$ m konnte durch eigene Messungen mit einem Differential-GPS bestätigt werden (Postprocessing mit Festpunktinformationen; XYZ-Genauigkeit im Subdezimeterbereich). Für die gleiche Fläche liegen zur Validierung folgende DGM vor (vgl. Tabelle 1): Das ASTER-GDEM (Global Digital Elevation Model) wurde aus der photogrammetrischen Auswertung von optischen ASTER-Satellitenszenen prozessiert. Es liegt global für die Landfläche zwischen 86 Grad nördlicher und 86 Grad südlicher Breite vor. Das SRTM-X (30 m) deckt 40 % der Landfläche zwischen dem 60. nördlichen und 58. südlichen Breitengrad ab. Es wurde während der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Jahr 2000 mittels X-SAR aufgenommen. Parallel dazu wurde das global verfügbare SRTM-3 mittels SIR-C für die gleiche Nord-Süd Ausdehnung erfasst. Die anderen beiden DGM sind SRTM-Derivate. Beim CGIAR-SRTM-DGM wurden verschiedene Höhendaten und fortgeschrittene Interpolationstechniken verwendet, um vorhandene Lücken zu schließen, welche bei bestimmten Oberflächeneigenschaften auftreten können. Zudem wurde der Datensatz horizontal korrigiert (GOROKHOVICH & VOUSTIANIOUK 2006). Das HydroSHED-DGM nutzt Algorithmen der hydrologischen Modellierung, um nicht plausible Inlandssenken im Geländemodell zu identifizieren und um schließlich einen hydrologisch konsistenten Datensatz zu berechnen. (LEHNER et al. 2006). Um die Geländemodelle miteinander vergleichen zu können, wurden alle in ein einheitliches Höhenreferenzsystem mit Bezug auf das WGS84 – Earth Gravitational Model 1996 (EGM96) Geoid transformiert.

2.2 Validierung der Geländemodelle

Die für die Validierung in der Fachliteratur zumeist herangezogenen Maße sind die mittlere Abweichung (ME), die mittlere absolute Abweichung (MAE), die Standardabweichung (SD), die Spannweite der Abweichungen und der Root Mean Squared Error (RMSE) (KOCH et al. 2002, FISHER & TATE 2006, GAO 2007, CONGALTON & GREEN 2008, JACOBSEN 2010). Die Validierung wurde mit 20.000 zufällig erzeugten Samples mit einem Mindestabstand von 100 m durchgeführt. Die räumliche Auflösung des Referenz-DGM wurde an die Auflösung des jeweiligen Testdatensatzes angepasst.

Die Validierung zeigt, dass das ASTER-GDEM und das HydroSHED-DGM die geringsten Genauigkeiten im Allgäu aufweisen. Die höchsten Genauigkeiten im Vergleich zum Referenz-DGM zeigen die SRTM-X-Daten und das CGIAR-SRTM-Geländemodell. Werden anstatt der zufällig erzeugten Punkte alle Knoten des Teleatlas-Straßendatensatzes herangezogen (circa 173.000 mit unterschiedlichem Abstand), so verringern sich die Abweichungen nur gering (z. B. SRTM-X: ME = -6,31; MAE = 7,50; SD = 5,48; RMSE = 8,36). Insgesamt sind die Abweichungen leicht höher als die in der zuvor genannten Literatur aufgeführten Werte. Dieser Umstand ist weitestgehend der stark reliefierten Topographie des Allgäus geschuldet.

Tabelle 1: Vergleich der vertikalen DGM-Genauigkeit

	LIDAR	ASTER-GDEM	SRTM-X	SRTM-3	CGIAR-SRTM	Hydroshed-SRTM
Horizontale Auflösung	5 m	30 m	30 m	90 m	90 m	90 m
Quelle/ Anbieter	LVG Bayern	NASA + METI (Japan)	DLR – Deutsches Luft- und Raumfahrt- zentrum	JPL – Jet Propulsion Laboratory der NASA	CGIAR Consortium for Spatial Information	WWF's Conserva- tion Science Program
ME	–	-12,08	-3,19	-1,44	-1,52	-1,52
MAE	–	14,49	9,06	9,70	9,14	11,80
SD	–	11,71	11,46	13,83	12,64	17,83
Spannweite	–	200,89	307,86	272,14	220,55	370,18
RMSE	–	16,83	11,90	13,91	12,73	17,90

3 Energiemodelle von E-Fahrzeugen und Routing

Für die Untersuchungen wurde ein empirisches Energiemodell für das Elektro-Leichtfahrzeug SAM (vgl. Abb. 1) erstellt. Das Fahrzeug hat eine Lithium-Polymer Batterie mit 7 kWh bei einer Dauerleistung des Motors von 11,6 kW, eine ungefähre Reichweite je Batterieladung von 80-100 km, eine Höchstgeschwindigkeit von 95 km/h, ein Gesamtgewicht von 500 kg und kann über eine elektrische Motorbremse Energie rück gewinnen (Rekuperation).



Abb. 1:
E-Leichtfahrzeug SAM
(eigene Aufnahme)

Die Fahrenergie, die zur Fortbewegung eines Fahrzeuges notwendig ist, ist abhängig von den vier Teilwiderständen: Rollwiderstand (F_R), Luftwiderstand (F_L), Steigungswiderstand (F_S) und Beschleunigungswiderstand (F_B). Während der Einfluss des Luftwiderstandes gegenüber der Geschwindigkeit exponentiell wächst, spielt der stets konstante Rollwiderstand nur bei geringen Geschwindigkeiten eine wichtige Rolle. Abbildung 2 zeigt, dass sich Steigungs- und Beschleunigungswiderstand äquidistant zum Luftwiderstand hinsichtlich des Gesamtfahrwiderstandes verhalten. Dies resultiert darin, dass die bei einer steilen Bergfahrt ($\alpha =$ Steigungswinkel) benötigte Leistung, durch die geringe Geschwindigkeit und der starken Hangabtriebskraft, eher einer Geraden als einer Parabel gleicht (KLAUKE 2009). Der für diese Arbeit besonders relevante Steigungswiderstand errechnet sich aus $F_S = m * g * \sin \alpha$ (wobei $g =$ Erdbeschleunigung und $m =$ Gesamtmasse Fahrzeug).

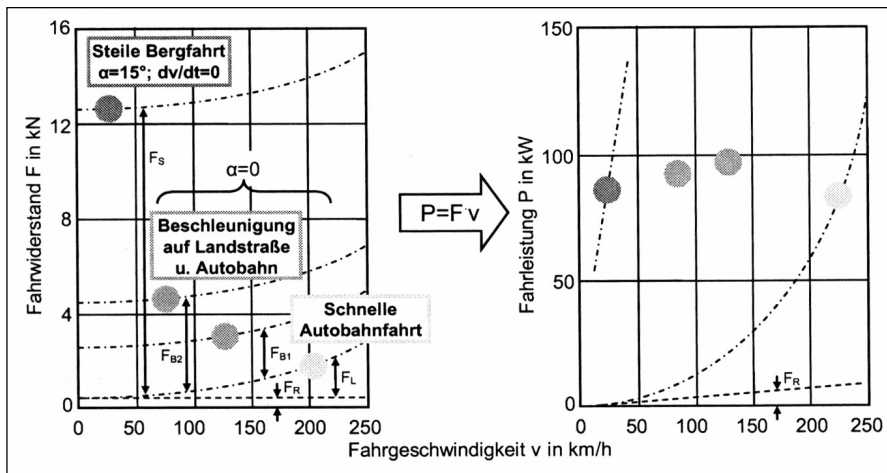


Abb. 2: Bedarfskennung eines Pkws in verschiedenen Fahrsituationen
(KLAUKE 2009, nach KLEINSCHMIDT 2006)

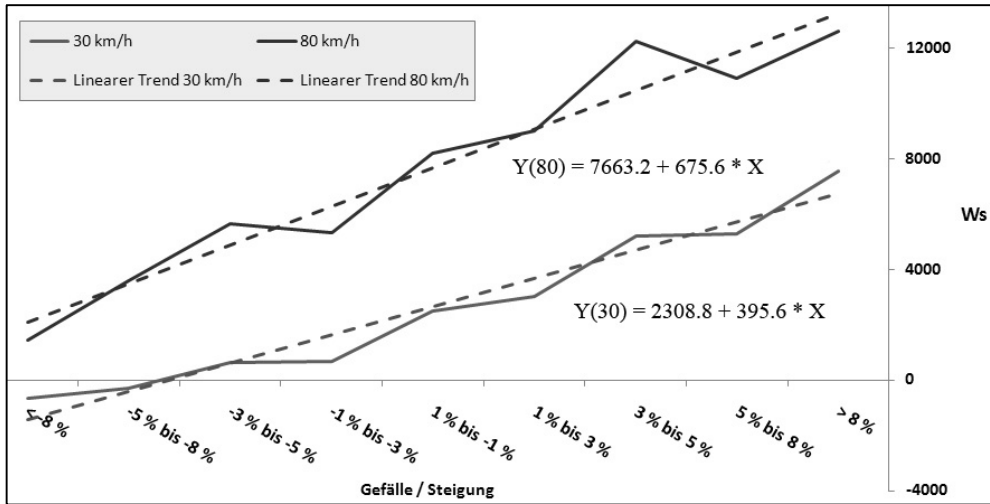


Abb. 3: Beispiel: Zusammenhang zwischen Steigung/Gefälle (%) und Energieverbrauch (Ws)

Da sich zuverlässige Energiemodelle, bei welchen alle Teilwiderstände modelliert werden, für die verfügbaren E-Fahrzeuge zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch in der Entwicklung befinden, wurde ein vereinfachtes empirisches Modell entwickelt. Dabei wurden für Messfahrten (SAM mit zwei Personen im ECO-Modus) bei konstanter Geschwindigkeit Stromstärke und Akkuspannung für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen im Sekundentakt erfasst und die entsprechenden Steigungen für die einzelnen Messpunkte aus dem Referenz-DGM abgeleitet (vgl. Abb. 4). Beschleunigungsfahrten wurden bei diesem vereinfachten Modell nicht berücksichtigt, allerdings die Rekuperation bei negativer Steigung. Dies erklärt die Abweichungen zu dem in Abbildung 2 dargestellten Modell. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Steigung/Gefälle (%) und Energieverbrauch (Ws) für die Geschwindigkeitsklassen 30 km/h und 80 km/h.

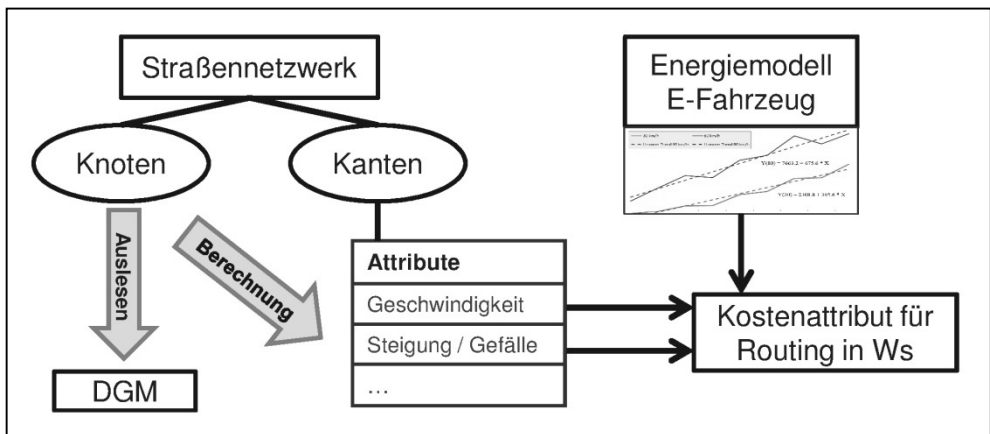


Abb. 4: Schema zur Integration der Höhendaten

Ausgehend von diesem vereinfachten Energiemodell wurden die Leistungsdaten in den Netzwerkdatsatz integriert (vgl. Abbildung 4). Auf Basis der Attribute Steigung / Gefälle, Segmentlänge und Geschwindigkeit je Straßensegment im MultiNet© Datensatz wurde für den ganzen Straßendatsatz ein neues Kostenattribut berechnet, welches den potenziellen Energieverbrauch jeder Kante in Ws (Wattsekunde) angibt. Für die Geschwindigkeitsklasse 30 km/h ergibt sich demnach bei einer Steigung von $\alpha = 3^\circ$ ein Leistungsbedarf von $P = 3495,6 \text{ Ws}$. Das Energiemodell wurde für eine 46 km lange Teststrecke der FH Kempten getestet und berechnete einen Energiebedarf von 4,05 kWh. Der durchschnittliche tatsächliche Verbrauch auf der Strecke beträgt 5,5 kWh, allerdings mit Energieverlusten durch Beschleunigungsfahrten, welche bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurden. Da das Modell nur zum Vergleich unterschiedlicher DGM-Eingangsdaten dienen soll, ist das dies für das weitere Vorgehen ausreichend.

Durch die Möglichkeit der Rekuperation werden auch negative Verbrauchswerte modelliert, das Fahrzeug gewinnt also Energie zurück. Dabei ist zu beachten, dass die in den gebräuchlichen Geoinformationssystemen (GIS) verwendeten Routingalgorithmen wie der Dijkstra Algorithmus nicht mit negativen Werten umgehen können (DE SMITH et al. 2009). Von daher müssen die Verbrauchswerte alternativ akkumuliert werden oder auf eigene Scripting-Lösungen oder Algorithmen zurückgegriffen werden (ARTMEIER et al. 2010).

4 Einfluss der DGMs auf das EcoRouting

Um darzustellen, inwieweit unterschiedliche DGMs energieeffizientes Routing oder Reichweiteprognosen beeinflussen können, werden im Folgenden der Energiebedarf des ganzen Straßennetzwerkes im Untersuchungsgebiet und auch einzelner Routen – basierend auf dem bereits vorgestellten Energiemodell – vorgestellt.

Der verwendete Ausschnitt des Straßennetzwerkes setzt sich aus 1.672 km für PKW zugänglichen Verkehrswegen zusammen (60.200 Kanten) und erstreckt sich mit einer Fläche von 900 km² von Oberstdorf bis nördlich von Kempten. Tabelle 2 zeigt beispielhaft für drei Geländemodelle die modellierten Energiebedarfswerte für den gesamten Ausschnitt bei eine berücksichtigte Fahrtrichtung je Kante (abhängig von der Digitalisierichtung). Trotz der zuvor festgestellten Abweichungen der DGM zum Referenz-DGM lassen sich nur geringe Abweichungen im Modellierungsergebnis feststellen.

Tabelle 2: Modellierte Energiebedarfswerte für ein zusammenhängendes Netzwerk

DGM	Benötigte kWh	Abweichung zu Modellierung mit Referenz-DGM
5 m LIDAR-DGM	126,06	–
SRTM-X	125,75	0,25 %
ASTER-GDEM	126,34	0,22 %
SRTM-3	125,7	0,29 %

Als Nächstes werden Einzelfahrten betrachtet (Tabelle 3). Dazu wurden für 460 zufällig generierte Routen (durchschnittlich 22 km lang) auf dem Netzwerk eine Origin-Destination-Matrix berechnet und die gerouteten Energiewerte statistisch ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die Abweichungen zwar wie erwartet größer werden, jedoch trotz einiger starker Ausreißer bei den SRTM-Daten unter einem Prozent liegen. Lediglich die ASTER-GDEM-Daten weichen trotz der Bodenauflösung von 30 m mit 1,54 % etwas stärker im Ergebnis ab.

Es zeigt sich, dass bei flächenhaften Reichweitekarten und längeren Routingdistanzen die Ungenauigkeiten der Geländemodelle weitgehend ausgeglichen werden. Zu einem noch zu bestimmenden Faktor spielt hier die Rekuperation eine Rolle. Bei einzelnen, vor allem kürzeren Routen mit großen Höhenunterschieden kann es zu größeren Abweichungen von über 30 % kommen, jedoch bildete dies eher die Ausnahme.

Tabelle 3: Modellierter Energieeinsatz für Einzelstrecken

DGM	Abweichung zu Modellierung mit Referenz-DGM	Spannweite
SRTM-X	0,63 %	0 – 31 %
ASTER-GDEM	1,54 %	0 – 27 %
SRTM-3	0,95 %	0 – 33 %

5 Fazit und Ausblick

Trotz der Abweichungen zwischen den einzelnen Geländemodellen sind die Auswirkungen auf das Routing vergleichsweise gering. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die SRTM-X Daten im Vergleich zu dem Referenz-DGM die genauesten Modellierungsergebnisse liefert. Da diese jedoch nicht frei verfügbar sind und auch nicht flächendeckend vorliegen, empfiehlt es sich auf SRTM-3 Daten oder auf die CGIAR-DGMs auszuweichen. Bei den ASTER-GDEM-Daten wurden trotz der höheren horizontalen Auflösung höhere Ungenauigkeiten festgestellt. Für die meisten EcoRouting Anwendungen ist es somit nicht notwendig auf kostenintensive hochauflösende Höhenmodelle zurückzugreifen um verlässliche Angaben zur Reichweite von E-Fahrzeugen zu berechnen.

Weitere Forschungen zu dem Verhältnis zwischen Straßensegmentlänge und Rasterauflösung müssen noch durchgeführt werden. Ziel hierbei ist es, für die verfügbaren Höhenmodelle Minimal- und Maximalempfehlungen zur Segmentlänge zu geben und somit Genauigkeitsverlust durch Maßstabskonflikte zu minimieren. Auch die räumliche Genauigkeit der Netzwerkdaten kann in Verbindung mit den DGMs zu negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit führen. Auch hier sind entsprechende Studien notwendig. Zur Verifizierung der Ergebnisse stehen in Zukunft komplexere Energiemodelle für unterschiedliche Fahrzeugtypen der E-Fahrzeugflotte zur Verfügung. Auch die Verwendung von OpenStreet-Map-Daten (OSM) interessante Option, bislang erfordern jedoch topologische Inkonsistenzen, fehlende Attributierung und mangelnde Vollständigkeit einen sehr hohen Aufwand bei der Datenaufbereitung und beeinflussen die Genauigkeit der EcoRoutingergebnisse negativ.

Literatur

- ARTMEIER, A., HASELMAYR, J., LEUCKER, M. & SACHENBACHER, M. (2010): The optimal routing problem in the context of battery-powered electric vehicles. CPAIOR Workshop on Constraint Reasoning and Optimization for Computational Sustainability (CROCS).
- CONGALTON, R. G. & GREEN, K. (2008): Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices, Boca Raton, Fla. [u. a.], CRC Press.
- DE SMITH, M. J., GOODCHILD, M. F. & LONGLEY, P. (2009): Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools. Matador, Leicester.
- DENG, Y., WILSON, J. P. & BAUER, B. O. (2007): DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science*, 21, S. 187-213.
- FISHER, P. E. & TATE, N. J. (2006): Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30, S. 467-489.
- GAO, J. (2007): Towards accurate determination of surface height using modern geoinformatic methods: possibilities and limitations. *Progress in Physical Geography*, 31, S. 591-606.
- GONDER, J. D. (2008): Route-Based Control of Hybrid Electric Vehicles. SAE 2008 World Congress, Detroit, USA.
- GOROKHOVICH, Y. & VOUSTIANIOUK, A. (2006): Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 104, S. 409-415.
- JACOBSEN, K. (2010): Vergleich von ASTER GDEM- mit SRTM-Höhenmodellen. DGPF Tagungsband 19/2010, 3-Ländertreffen, Wien.
- KLAUKE, D. (2009): Batterie-Elektrofahrzeuge: Stand der Technik und zukünftiges Entwicklungspotenzial. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken.
- KNAUER, M. (2010): "Grüne Navigation" für E-Autos. *Automobilwoche*, 12/13, S. 29.
- KOCH, A., HEIPKE, C. & LOHMANN, P. (2002): Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen - Methodik und Ergebnisse. *PFG*, 6/2002, S. 389-398.
- KOLKE, R. (2009): Alternative Antriebe im Straßentest – ein ADAC Bericht. *EMobile plus solar*, 75, S. 44.
- KONO, T., FUSHIKI, T., ASADA, K. & NAKANO, K. (2008): Fuel Consumption Analysis and Prediction Model for "Eco" Route Search. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting.
- LEHNER, B., VERDIN, K. & JARVIS, A. (2006): HydroSHEDS Technical Documentation. Version 1.
- LI, Z., ZHU, Q. & GOLD, C. (2005): Digital terrain modeling: principles and methodology, Boca Raton, FL [u. a.], CRC.
- VDE (2010): E-Mobility 2020. Technologien – Infrastruktur – Märkte. Kongressbeiträge, 8.-9. November 2010, Congress Center Leipzig. VDE VERLAG, Berlin.

ASTER-GDEM (Global Digital Elevation Model) is a product of METI and NASA.