

# Per Pedes Routing

## Verbesserung der Alltagsmobilität älterer und mobilitätseingeschränkter Personen durch Einsatz von Crowdsourcing-Ansätzen

*Das vorliegende Projekt wurde gefördert durch den mFund des  
BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)  
Förderkennzeichen 19F2001*

**Prof. Dr. Christian T. Haas**  
**Prof. Dr. Karsten Weihe**  
**Helmut Sage**  
(für das Projektkonsortium)

**Idstein**  
**Darmstadt**  
**Frankfurt am Main**

**im Juni 2019**

**Kontaktadressen der Konsortialpartner:**

Prof. Dr. Christian T. Haas  
Hochschule Fresenius - Institut für komplexe Systemforschung  
Limburgerstr. 2  
65510 Idstein  
Email: [haas@hs-fresenius.de](mailto:haas@hs-fresenius.de)

Prof. Dr. Karsten Weihe  
TU Darmstadt - Fachbereich Informatik  
Hochschulstr. 10  
64289 Darmstadt  
Email: [weihe@cs.tu-darmstadt.de](mailto:weihe@cs.tu-darmstadt.de)

Helmuth Sage  
DB System GmbH  
Jürgen-Ponto-Platz 1  
60329 Frankfurt am Main  
Email: [helmuth.sage@deutschebahn.com](mailto:helmuth.sage@deutschebahn.com)

**Assoziierte Partner:**

DB Regio AG - Sparte Bus  
DB Dialog GmbH  
Samsung Electronics GmbH

## **Inhaltsverzeichnis**

	Seite
<b>1 Hintergrund</b>	4
<b>2 Barriere-Identifikation</b> (Hochschule Fresenius, DB System)	4
<b>3 Routing</b> (TU Darmstadt)	8
<b>4 Einordnung und Ausblick</b>	14

---

## 1 Hintergrund

„Mobilität“ ist in unserer Gesellschaft ein häufig verwendeter Begriff, zu dem eine große Bandbreite an Bedeutungsverständnissen und Assoziationen vorliegt. Bezug nehmend auf den älteren Teil der Bevölkerung steht Mobilität – als komplexes Konstrukt aus endogenen Fähigkeiten und Fertigkeiten sowie exogene Voraussetzungen – in einem hohen Zusammenhang mit Lebensqualität, eigenständiger Versorgungsfähigkeit und Gesunderhaltung (u.a. durch die Erreichbarkeit von medizinisch-therapeutischen Versorgungsinstitutionen).

Im Hinblick auf die Zielerreichung finden verschiedene Mobilitätsmodi Verwendung. Grundsätzlich lassen sich die Primär- und die Sekundärmobilität unterscheiden. Erstere entsteht ohne technische Hilfsmittel (zu Fuß laufen), letztere mit technischer Unterstützung (wobei hier noch motorisierte (z.B. PKW, ÖPNV) und nicht-motorisierte Unterstützungsformen (z.B. Fahrrad) differenziert werden können). Häufiger werden auch beide Mobilitätsformen miteinander verknüpft, um den angestrebten Zielort erreichen zu können. Die Entscheidung für den einen oder anderen Mobilitätsmodus und die damit verbundene Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung wird entscheidend durch individuell vorliegende Förder- oder Hemmfaktoren geprägt. Bezugnehmend auf die Primärmobilität stellen Fußwegbarrieren für einen größeren Teil der Bevölkerung einen weitgehend generalisierenden Hemmfaktor dar. Gleichwohl bestehen erhebliche Erkenntnislücken sowohl dahingehend, welches physikalische Konstrukt für welche Bevölkerungsgruppe eine Barriere darstellt, als auch wo solche Barrieren lokalisiert sind.

Ausgehend von dieser Situation bestand das Kern-Ziel des vorliegenden Projektes darin, **technische Lösungen** zu entwickeln, die einerseits eine einfache **Identifikation** von **Fußweg-Barrieren** erlauben und andererseits ein **angepasstes, personalisiertes Routing** ermöglichen. Die technische Basis der Identifikation und des Routings stellen dabei Smartphones und die verbundenen App- und Softwareentwicklungen dar.

Um bei der Barriere-Identifikation eine ausreichend hohe Informationsdichte zu erhalten, wurde ein Crowdsourcing Ansatz verfolgt.

## 2 Barriere-Identifikation

**Grundlagen und Ansatz:** Der Untersuchungsteil der Barriere-Identifikation untergliedert sich im Kern in zwei Bereiche:

Zum einen wurde eine App entwickelt, die - über die im Smartphone implementierten Sensoren (3-dimensionaler Beschleunigungssensor, 3-dimensionaler Gyroskopsensor, Barometer) - das Bewegungsverhalten des Smartphones bzw. der sich fortbewegenden Person erfasst und auf der Basis von Mustererkennungsverfahren Rückschlüsse auf den Untergrund bzw. die Barriere zulässt (biomechanische Datenerhebung). Zum anderen wurde ein psycho-physiologischer Ansatz verfolgt, d.h. Untersuchungsteilnehmer wurden zur subjektiven Bewertung von Barrieren befragt, und diese Einordnungen wurden mit physiologischen Leistungswerten (Gehfähigkeit, Gleichgewichtskontrolle) korreliert.

**Vorgehen:** Nach verschiedenen Voruntersuchungen wurden für den Untersuchungshauptteil insgesamt 48 ältere Personen im Alter von 61 Jahren bis 78 Jahren rekrutiert und im Hinblick auf ihre mobilitätsbezogene Leistungsfähigkeit biomechanisch und klinisch analysiert. Die Probanden wiesen dabei eine recht geringe Variabilität in der Leistungsfähigkeit sowie vergleichsweise geringe Einschränkungen auf.

Die biomechanische Datenerhebung startete mit der Analyse von „Standardbarrieren“. Alle Untersuchungsteilnehmer haben jeweils vier Durchgänge à sieben verschiedene Standardsituationen bewältigt. Anhand der resultierenden Signale aus 28 Standardsituationen pro Proband wurde ein künstliches neuronales Netz generiert und als Mustererkennungstool für spätere Datensätze, die im Alltag erhoben wurden, trainiert.

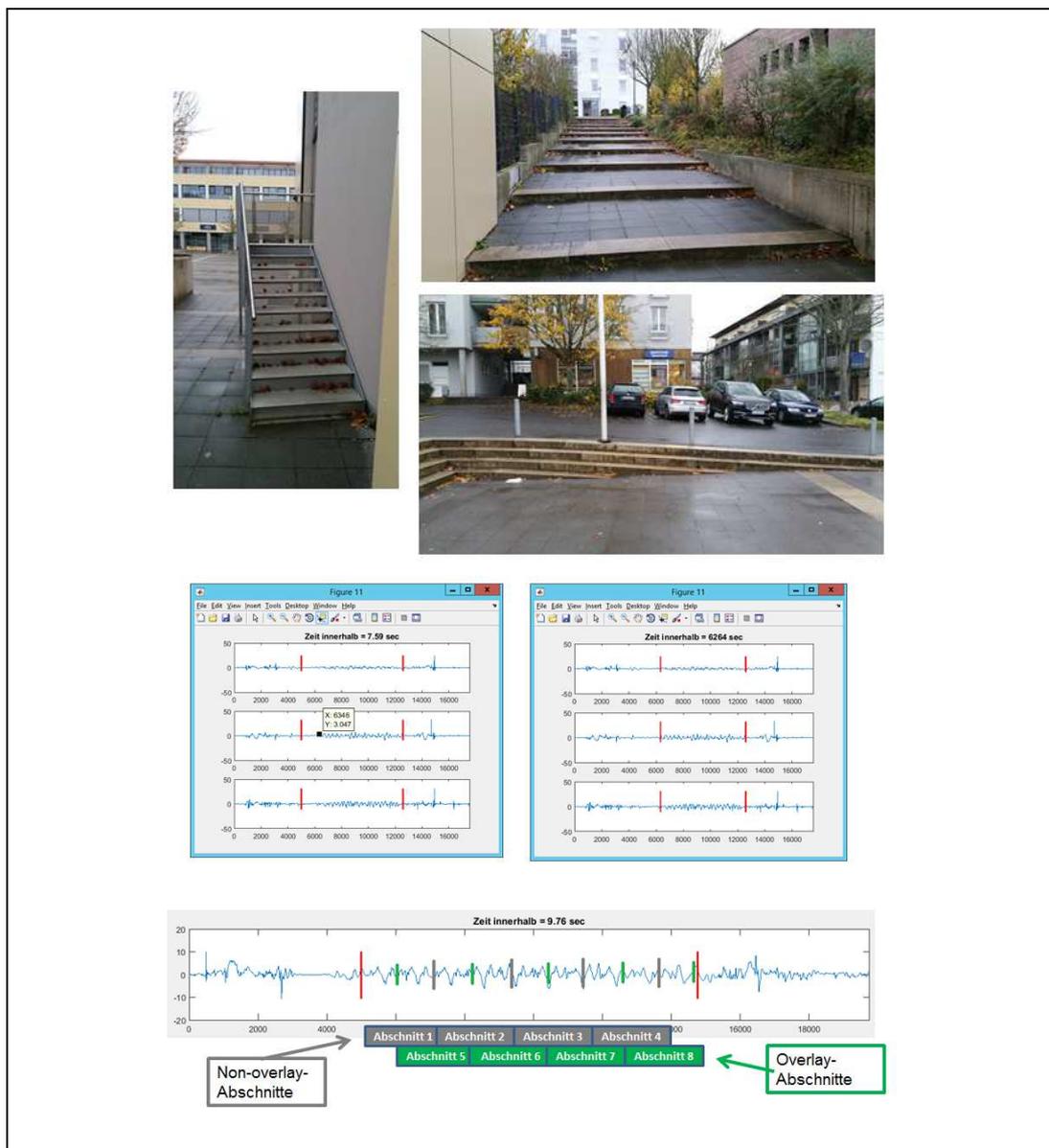


Abb. 1: Oben: Ausgewählte Standardsituationen: Treppe nach DIN-Norm, flache Treppe, Schräge (die schiefe Ebene oberhalb der Treppen). Unten: Exemplarische Signale im Verlauf der biomechanischen Datenerfassung von Standardbarrieren.

Auf der Basis der erhobenen Sensorsignale wurden 45 verschiedene Parameter berechnet und mittels multivariater Verfahren auf Redundanzen und Varianzaufklärung geprüft. Bei Verwendung von 5 Variablen konnten ca. 60% und bei 10 Variablen ca. 80% der Gesamtvarianz erklärt werden. Via Selektion konnte somit eine erhebliche Datenreduktion vorgenommen werden.

In einem weiteren Schritt wurden künstliche neuronale Netze generiert, die einerseits zwischen Treppen und Nicht-Treppen unterscheiden bzw. sieben Standardsituationen fein diskriminieren sollen (siehe Abb. 2).

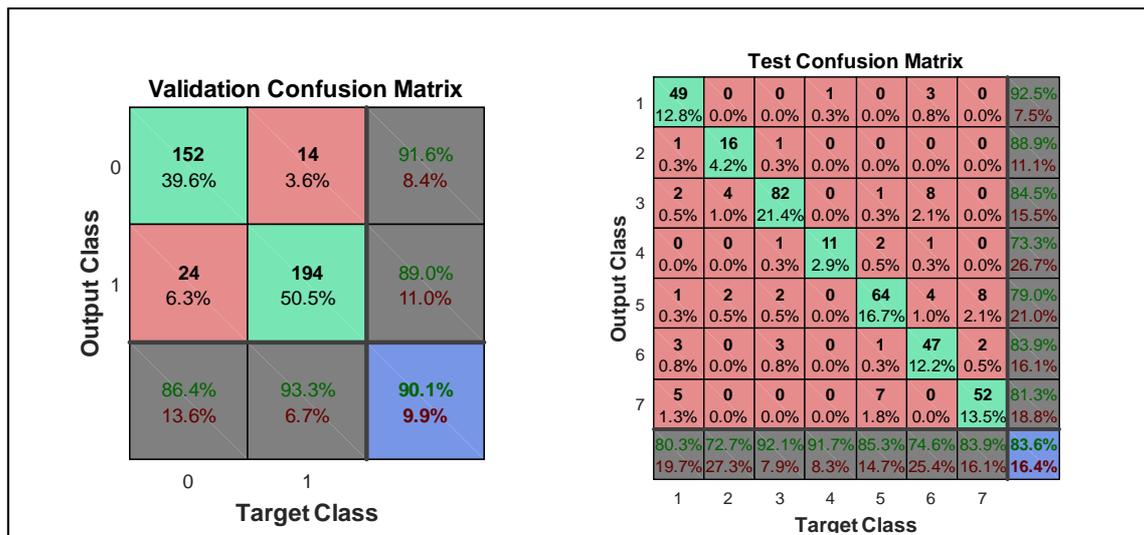


Abb. 2: Konfusionsmatrizen der Trainings-, Validierungs- und Testdaten. Das künstliche neuronale Netz klassifiziert bei Treppen- Nicht-Treppen Unterscheidung rd. 90% korrekt (links), bei den sieben weiteren Situationen wird eine Genauigkeit von rd. 84% erreicht (Gerade = 0, Nicht vergeben = 1, Treppe hoch = 2, Treppe flach hoch = 3, Treppe runter = 4, Treppe flach runter = 5, Schräge hoch = 6, Schräge runter = 7).

In Abhängigkeit von der Sensor- und Parameterauswahl sowie vom jeweiligen Klassifikationsalgorithmus lassen sich Erkennungsraten von >96% erreichen.

Der Ansatz ist somit prinzipiell im Alltag zur Barriere-Identifikation anwendbar, unterliegt jedoch gewissen alltagsassoziierten „Störeinflüssen“ wie dem Modus der Smartphone-Mitführung (z.B. in einer Tasche) oder einem diskontinuierlichen Bewegungsverhalten der Testpersonen bei der Barriere-Bewältigung (z.B. Stoppen auf der Treppe). Ein weiterer Störeinfluss resultiert aus der in Teilen geringen Genauigkeit der GPS-Daten. Diese Einschränkung kann jedoch durch die Verrechnung anderer lokaler Signale (z.B. WLAN) reduziert werden und stellt somit kein generelles Defizit dar.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im vorliegenden Forschungsprojekt bestand in der Erhebung psychologischer Parameter beim Umgehen mit / Überwinden von Barrieren. Dazu wurden die teilnehmenden Testpersonen u.a. gebeten, an verschiedenen Tagen den subjektiven Schwierigkeitsgrad der Überwindungen der gleichen Barrieren anzugeben. Dabei zeigte sich, dass die Teilnehmer zu jeweils denselben Barrieren – allerdings zu verschiedenen Zeitpunkten – ein hoch unterschiedliches Rating abgaben. Da die Veränderungen in den

Ratings in beide Richtungen gingen, kann keine Tagesform verantwortlich gemacht werden. Unterschiedliche Wetterbedingungen sind ebenfalls nicht als Erklärung verwendbar.



Abb. 3: Intrapersonelle Bewertung der Barrieren zu unterschiedlichen Zeitpunkten (TN-Teilnehmer, MZP-Messzeitpunkt: 1 bzw. 2, Werte: 1=geringe Schwierigkeit, 10=sehr hohe Schwierigkeit)

Kuriose Befunde zeigten sich auch bei der Prüfung des Zusammenhangs zwischen motorischer Leistungsfähigkeit und subjektiver Barriere-Bewertung. Klassischerweise wird von einem inversen Zusammenhang ausgegangen d.h. je höher die Leistungsfähigkeit, desto geringer ist die Schwierigkeit der Barriere-Überwindung.

Die nachfolgende Korrelationsmatrix zeigt hier kaum Korrelationskoeffizienten die dieser Annahme entsprechen:

Tab. 1: Korrelationsmatrix zwischen motorischen Leistungstests und subjektiver Schwierigkeitsbewertung (Standardbarrieren Eingangstest)

TUG-Timed up an go; TUG DT- Timed up and go dual task; DGI-Dynamic gate index; Tinetti GG-Tinetti Test Gleichgewicht Tinetti G-Tinetti Test Gang; Tinetti Gesamt ThG-Treppe hoch Geländer TrG-Treppe runter Geländer; Th-Treppe hoch; Tr-Treppe runter; ShG-Steigung hoch gering; Shm-Steigung hoch mittel; Shs-Steigung hoch steil; Srs-Steigung runter steil

	ThG	TrG	Th	Tr	Shg	Shm	Shs	Srs	Untergrund
TUG	-0.22	0.21	-0.80	0.99	-0.06	-0.71	-0.36	0.80	0.15
TUG-DT	0.41	-0.07	-0.40	0.98	0.98	-0.50	-0.05	0.99	0.36
DGI	-0.00	0.04	0.99	-1	0.53	0.12	-0.15	-0.94	0.74
Tinetti GG	0.53	0.58	0.98	-0.94	0.23	0.76	0.49	-0.75	0.33
Tinetti G	0.05	0.48	0.99	-0.98	0.66	0.48	0.10	-0.84	0.55
Tinetti Ges	0.35	0.54	0.99	-0.97	0.44	0.74	0.35	-0.80	0.45

Bei 54 möglichen Angaben (motorische Leistungsfähigkeit vs. subjektive Barriere-Bewertung) korrelieren lediglich 12 (bei einem Korrelationskoeffizienten von  $r \geq 0.5$ ), bei allen anderen Werten liegt entweder keine Korrelation vor (rot markiert), bzw. der statistisch ermittelte Korrelationskoeffizienten steht in keinem systemlogischen Zusammenhang d.h. trotz guter Ergebnisse bei den Mobilitätstests werden die Barrieren mit höheren und damit schlechteren subjektiven Werten eingestuft, bzw. trotz schlechterer Mobilität werden die Barrieren mit niedrigen Werten (also leicht überwindbar) geratet (blau markiert). Weitere Feldtestanalysen zeigen die gleiche unsystematische Charakteristik.

Ebenso zeigen begleitende Interviews ein breites Spektrum an Zuordnungen, wann etwas eine Barriere darstellt: „...*Barriere ist auch, wenn ich als Fußgänger auf dem Bürgersteig gehe und überall diese Schilderwälder sehe und diese Plakate sehe und die Mülltonnen sehe und ich komme nicht daran vorbei.*“ [J.4].

Ferner wird auch die zeitliche Varianz in den Interviews thematisiert „...*und besonders nicht, wenn ich zum Arzt gehe, dann ist mir manchmal nicht gut oder so. Ja, dann schaffe ich es manchmal nicht (Barrieren zu überwinden).*...“

In Teilen werden Barrieren allerdings auch als förderlich eingeordnet „...*Also eigentlich fördert das den Kreislauf und die Gesundheit. Und auch diese mentale, geistige Aktivität.*...“ [J.38].

Zusammenfassend lässt sich für den Bereich der Barriere-Identifikation festhalten, dass ein Großteil der technischen Fragestellungen inzwischen gut beantwortet werden kann, vor allem dann, wenn mehrere Personen dieselben Barrieren überwinden würden und entsprechende Signale verarbeitet werden könnten, wodurch einzelne Störgrößen reduziert und die Güte der Erkennung erhöht werden könnten.

Die Interaktion zwischen physikalischer Barriere-Charakteristik und psycho-physiologischen Daten zeigt allerdings keine einfachen Zusammenhangsstrukturen. Hier lassen sich zwar verschiedene Phänomene als Erklärung anführen (spezifische Trainingseffekte, Nocebo Funktion, etc.), die formale Steuerung bleibt gleichwohl schwierig und erfordert weitere spezifische Untersuchungen.

### 3 Routing

**Grundlagen und Ansatz:** Ausgehend von der Annahme einer grundsätzlichen Möglichkeit, Fußweg-Barrieren in einer ausreichend hohen Anzahl und mit einer bestimmten Güte identifizieren zu können, wurden in einem weiteren Teil des Projektes Routingansätze entwickelt und evaluiert, die für Personen mit spezifischen Mobilitätseinschränkungen geeignet sind:

Ganz allgemein wird unter Routing hier die Suche nach möglichst guten Reisewegen von einem Startpunkt zu einem Zielpunkt verstanden. Darunter fallen beispielsweise Navis im Auto, also Suche nach Fahrtrouten im Straßenverkehrsnetz, aber etwa auch Fahrplanauskunftssysteme, das heißt, Reisewege mit öffentlichen Verkehrsmitteln wie Bahn und Bus. Zu allen bislang relevanten Arten von Routing existiert umfangreiche Forschung.

Trotz seiner offenkundig hohen gesellschaftlichen Relevanz finden sich nur punktuelle Forschungsergebnisse zum Routing für Personen mit Einschränkungen, weshalb das vorliegende Projekt versucht, einen Mehrwert sowohl im Hinblick auf Forschung als auch bzgl. praktischer Umsetzung zu liefern.

Hierzu war es sinnvoll – obwohl sich Per Pedes Routing auf reine Fußwege konzentriert – die Entwicklung von Algorithmen so anzulegen, dass eine Anbindung an erweiterte Szenarien und multimodale Reiseketten, wie etwa öffentliche Verkehrsangebote (Bahn, Bus etc.) und Individualverkehr (eigenes KFZ, Taxi, Car-Sharing etc.), möglich ist.

Das konkrete algorithmische Problem, das im Rahmen des Projektes Per Pedes Routing bearbeitet wurde, bestand darin, möglichst gute Fußwege von einem Startpunkt (z.B. von zuhause) zu einem Zielpunkt (z.B. Bushaltestelle) zu finden. Das Kriterium für die Güte eines Fußweges setzt sich zusammen aus (1) seiner Länge bzw. geschätzten Dauer und (2) seiner Beschwerlichkeit: Für Personen mit Einschränkungen ist beispielsweise eine Treppe ein Hindernis, das eher vermieden werden sollte, solange der dafür notwendige Umweg nicht zu lang wird. Bei schwerer Einschränkung muss die Treppe in jedem Fall umgangen werden. Die wesentlichen Kriterien für die Güte eines algorithmischen Ansatzes sind (1) Güte der berechneten Fußwege und (2) die Antwortzeiten für Suchanfragen.

Eine solche Fußwegsuche muss berücksichtigen, in welcher Art und wie schwer Nutzer individuell eingeschränkt sind. Im vorn genannten Beispiel ist der Umweg, den ein Nutzer zur Vermeidung einer Treppe zu tolerieren bereit ist, abhängig davon, wie beschwerlich diese Treppe für den Nutzer individuell ist. Daher muss der Algorithmus auf eine möglichst große Bandbreite von individuellen Nutzerprofilen anwendbar sein.

Die Schwerpunkte der Arbeiten lagen primär in der Konzeption und Implementierung prototypischer Softwarekomponenten. Dies umfasste die Konzeption und Umsetzung aller Komponenten im Bereich der Datenhaltung, des algorithmischen Routing-Kerns und der Erstellung von geeigneten Benutzeroberflächen (sowohl als Webseite als auch als mobile Android Applikation).

Die Software wurde im Laufe des Projekts erfolgreich zu einem vollständigen System von der Datenerfassung, Datenaufbereitung und Datenhaltung über den Routing Algorithmus bis hin zu Bedienoberflächen (mobil und web-basiert) weiterentwickelt. Das System hat in allen Validierungsmaßnahmen seine Praxistauglichkeit unter Beweis stellen können:

Im Gegensatz zu vielen bisherigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen, die sich stark auf Rollstuhlfahrer konzentrieren, umfasst das Projekt Per Pedes Routing eine umfassendere Zielgruppe, die insbesondere ältere Menschen mit typischen altersbedingten Mobilitätseinschränkungen mit einschließt. Ohne jede Änderung an der Software ließen sich auch eingeschränkte Nutzer wie beispielsweise “zierliche Person mit schwerem Kinderwagen” oder die Vermeidung von Angstzonen für risikoaverse Nutzer (mit individuellem Grad von Aversion) integrieren.

Um das breit gefächerte Spektrum an Einschränkungen in allen Zielgruppen abzudecken, ist das Routing im Per Pedes Routing Projekt personalisiert (individualisiert). Um Hindernisse rechnerisch handzuhaben, verlässt sich Per Pedes Routing weder auf eine gewichtete Summe zur Verrechnung von Hindernissen mit Reisezeit noch allein auf einen totalen

Ausschluss von Wegen. Stattdessen wurde für Per Pedes Routing ein (im Bereich des Fußgänger-Routings) neuartiger multikriterieller Ansatz entwickelt (s.u.), der dafür sorgt, dass die Nutzer/innen aus einer Menge von verschiedenen Routen auswählen können, auf denen überwindbare Hürden die Bewertung der Route verschlechtern. Praktisch läuft das darauf hinaus, dass die Nutzer nicht bei jeder Suchanfrage selbst die Entscheidung treffen müssen, sondern das ein Abgleich mit dem individuellen Nutzerprofil vorgenommen wird, um dem Nutzer nur noch - die für sein Profil potentiell optimalen Wege - vorzuschlagen.

Grundsätzlich ist bei vielen mobilitätseingeschränkten Menschen nicht davon auszugehen, dass Hindernisse unüberwindbar sind. Eine binäre Entscheidung "Hindernis zumutbar ja/nein" ist daher inadäquat. Denn würden Hindernisse wie beispielsweise Treppen grundsätzlich ausgeschlossen, kann dies zu unnötig großen Umwegen führen: Ist beispielsweise der Umweg, um eine kurze Treppe zu umgehen, mehrere hundert Meter lang, sind die Nutzer/innen, je nach Einschränkungsggrad, sicherlich an beiden Alternativen interessiert, um selbst entscheiden zu können. Ein kategorischer Ausschluss von Wegen, die bestimmte Hindernisse enthalten, ist folglich nicht zielführend.

Das hier entwickelte Routing findet optimale Wege, bezogen auf die beiden Kriterien Laufzeit und Beschwerlichkeit. Da die Beschwerlichkeit eines Hindernisses und die Laufgeschwindigkeit von der Art und Schwere der Einschränkungen der Nutzer/innen abhängen, wurde das Routing personalisiert. Das heißt, das spezifische Profil der Einschränkungen des Menschen (Basisparameter wie Laufgeschwindigkeit sowie individuelle Einschränkungen) wird während der Berechnung der Wege berücksichtigt.

Darüber hinaus berücksichtigt der Algorithmus beim Routing wichtige Detailinformationen wie bspw. unterschiedliche Straßenseiten (Abb. 4), und er verwendet beim Wechsel der Straßenseite bevorzugt Fußgängerampeln und Zebrastreifen (Abb. 5). Der Wechsel der Straßenseite ohne Fußgängerübergang ist ein weiteres Beispiel für den Generalisierungsgrades des Ansatzes im Vergleich zu anderen, denn ein solcher Wechsel kann einfach als weitere Art von überwindbarer Barriere, die für verschiedene Nutzerprofile unterschiedlich beschwerlich ist, integriert werden.

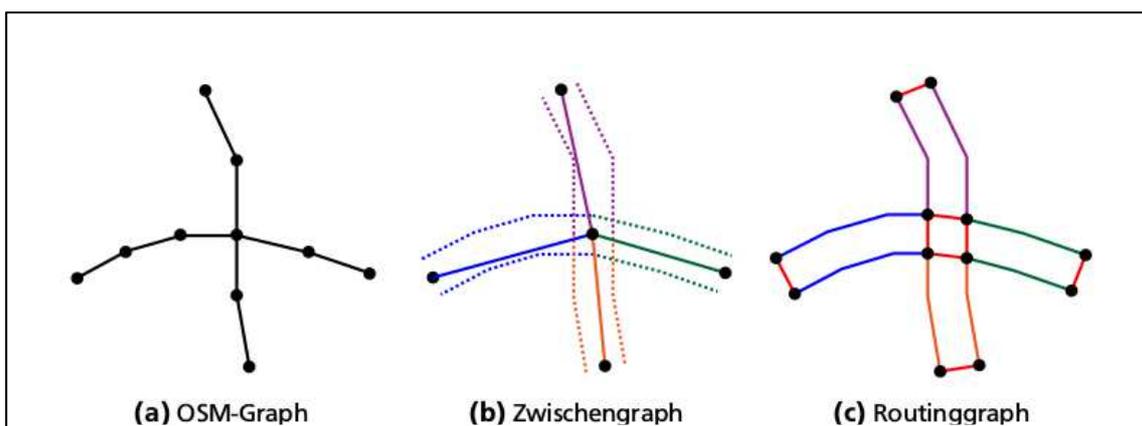


Abb. 4: Berücksichtigung verschiedener Straßenseiten im Rahmen der grundlegenden Transformation der OpenStreetMap Daten in den Routing Graph.

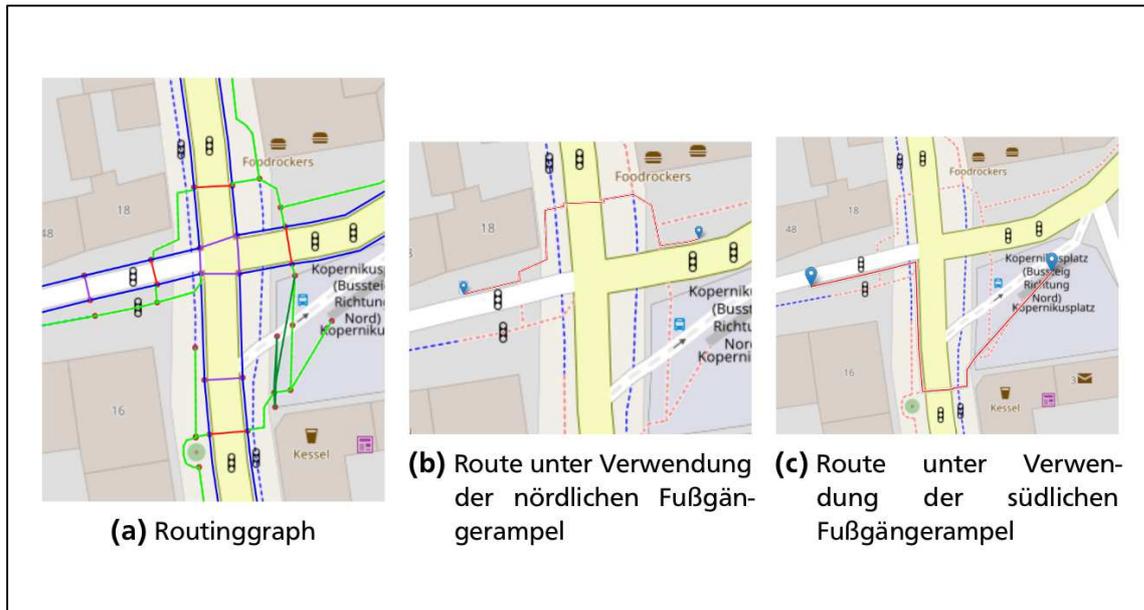


Abb. 5: Straßenüberquerung; lila Straßenquerungen sind Querungen ohne Querungsanlage (Ampel/Zebrastrreifen), rote Straßenquerungen sind Querungen mit Querungsanlage; grüne Wege sind Fußwege aus OpenStreetMap; blaue Wege sind Gehwege, die von unserer Datentransformation aus reinen Straßendaten (ohne Gehwege) generiert wurden.

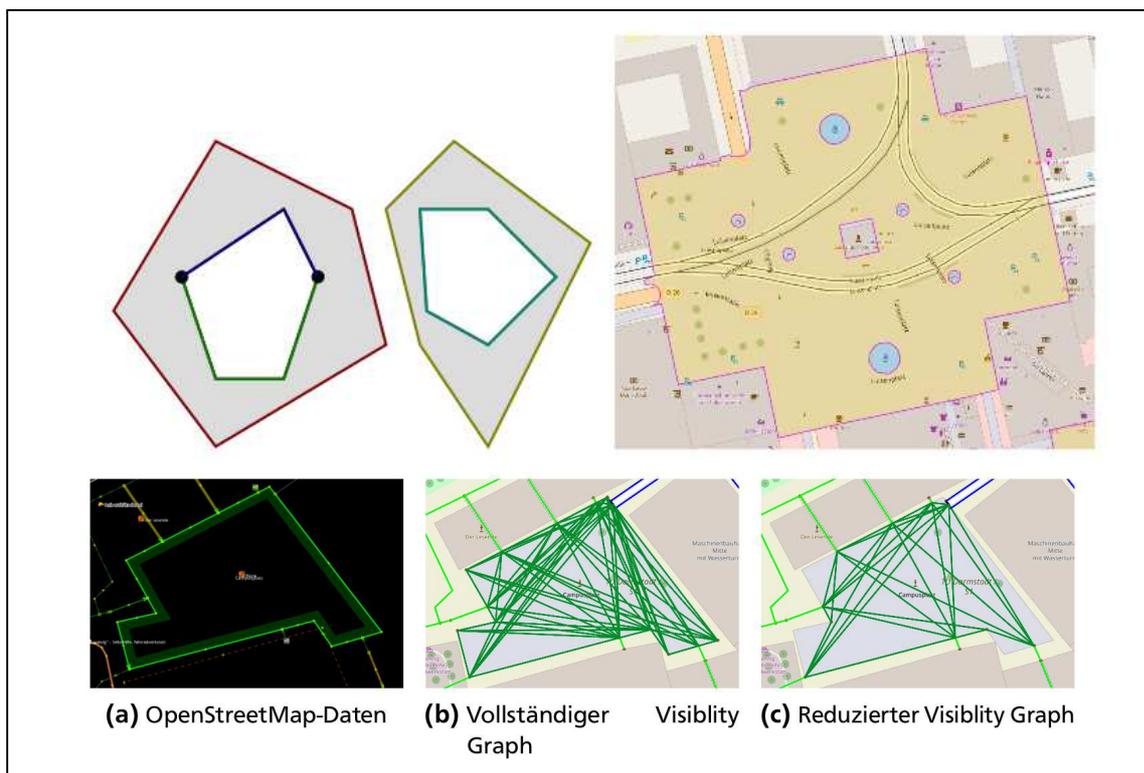


Abb. 6: Oben Beispiele für Plätze, dargestellt als Multipolygon (innere Polygone sind nicht begehbare Flächen, z.B. Gebäude auf dem Platz; rechts der Luisenplatz in Darmstadt mit der Ludwigssäule und zwei Brunnen als nicht begehbaren Flächen). Unten: Generierter Routinggraph vor und nach Optimierung (Reduktion der Kantenzahl).

---

Für Plätze und Flächen wird ein optimierter Routing-Graph berechnet (Abb. 6). Der Algorithmus bietet zudem die Möglichkeit, ein Höhenprofil (z.B. aus Lasermessungen aus der Luft) zu berücksichtigen. Höhenunterschiede werden in diesem Fall in die Beschwerlichkeit des Weges eingerechnet. Um zu allen umliegenden Haltestellen gleichzeitig zu routen, wurde ein spezieller Anfragetyp implementiert. Dies ist eine Vorbereitung für die Einbindung in Reiseketten mit öffentlichen Verkehren, denn häufig kommen mehrere Haltestellen in Fußwegdistanz vom Startpunkt für die Weiterfahrt zum Ziel infrage.

**Validierung:** Algorithmen / Software für ein Optimierungsproblem sind grundsätzlich nach zwei Kriterien zu evaluieren: Erstens nach der Güte der vom Algorithmus berechneten Ergebnisse - also wie weit weg die Ergebnisse vom Optimum gemäß individuellem Nutzerprofil entfernt sind unter der Voraussetzung, dass die Eingabedaten korrekt sind - und zweitens die Antwortzeiten. Diese beiden Kriterien stehen in einem Widerspruch zueinander: Je bessere Ergebnisse man haben möchte, desto länger werden in der Regel die Antwortzeiten sein. Beim vorliegenden algorithmischen Ansatz kann man prinzipiell verschiedene Kompromisse zwischen diesen beiden Kriterien durch Voreinstellungen schließen. Bei den validierenden Computerstudien waren die Voreinstellungen im Algorithmus allerdings so getroffen, dass die Ergebnisse garantiert optimal sind. Die Frage, die die Computerstudien beantworten sollten, war daher, wie die Antwortzeiten auch unter dieser maximal strengen Vorgabe sein würden. Sollten die Antwortzeiten mit diesen Einstellungen schon ausreichend gut sein, erübrigen sich Computerstudien mit suboptimalen Einstellungen mangels Bedarfs.

Einer der Meilensteine für das Projektende war eine umfassende Studie mit Daten der Deutschen Bahn. Hier kommt das Fußgänger-Routing für die Fußwege von der Start-Adresse zur ersten ÖV-Haltestelle/Station und auf dem Weg von der letzten ÖV-Haltestelle/Station zur Zieladresse zum Einsatz, was ja der Fokus von Per Pedes Routing ist. Die Evaluation wurde mit allen Fahrten des öffentlichen Verkehrs (Fernzüge, Nahverkehrszüge, Busse, Straßenbahnen, usw.) durchgeführt. Die Auswertung schließt ganz Deutschland ein. Für intermodale Anfragen benötigt das System im Schnitt weniger als eine Sekunde (887 Millisekunden). Selbst aufwendige Anfragen können in weniger als drei Sekunden (99% Quantil 2808ms) beantwortet werden. Damit ist die Praxistauglichkeit prinzipiell nachgewiesen.

Ein wesentlicher Aspekt des Kriteriums Antwortzeiten ist die Skalierbarkeit, also das Verhalten der Antwortzeiten bei wachsenden Datenmengen. Daher wurde das im Projekt Per Pedes Routing neu entwickelte Fußgänger-Routing speziell auch auf seine Skalierbarkeit hin analysiert. Dabei wurde deutlich, dass auch ein OpenStreetMap Datensatz, der ganz Deutschland umfasst, ohne Probleme im Routing verwendet werden kann.

**Praxisimplementierung:** Die Deutsche Bahn sowie die verschiedenen lokalen Verkehrsverbünde bieten Verbindungsauskünfte an Schaltern, am Fahrkartenautomaten und im Internet an. Das heißt, man gibt Abfahrts- und Anfahrtsort, Tag, gewünschte Abfahrts- oder Ankunftszeit sowie optional besondere Wünsche wie beispielsweise Fahrradmitnahme an und erhält eine Reihe von Vorschlägen, wie man schnell vom Abfahrtsort zum Ankunftsort

unter diesen Rahmenbedingungen reisen kann. Viele Systeme bieten Verbindungen von Haustür zu Haustür, also einschließlich der Fußwege am Beginn und Ende der Reise.

Das von der Darmstädter Arbeitsgruppe entwickelte intermodale Auskunftssystem MOTIS wurde nun um das Fußgänger-Routing aus dem Per Pedes Routing Projekt erweitert. MOTIS erlaubt Tür-zu-Tür Verbindungen mit beliebigen Verkehrsangeboten (Abb. 7). Die erste und letzte Etappe einer solchen Verbindung sind in der Regel Fußwege (in MOTIS alternativ auch Taxi, Fahrrad o.a. möglich). Dank Per Pedes Routing ist die Suche speziell bei Fußwegen in MOTIS nunmehr Barriere-sensitiv, das heißt, die Suche gezielt nach beanspruchungsarmen und dennoch kurzen Wegen zu/von Haltestellen und Bahnhöfen (z.B. für ältere Reisende) ist jetzt möglich.

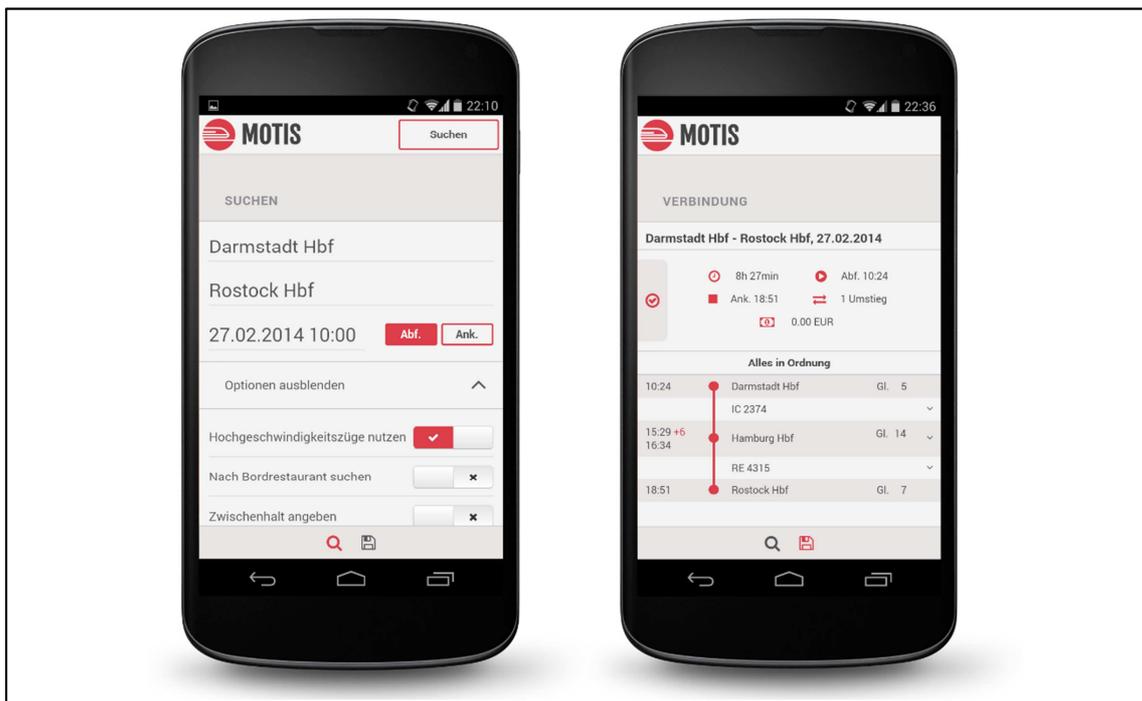


Abb. 7: Das vom Darmstädter Kooperationspartner entwickelte prototypische Auskunftssystem MOTIS auch als App.

Abbildung 8 (nachfolgende Seite) zeigt exemplarische Routinglösungen, d.h. einen zusätzlichen Fußweg, der aber eine Treppe enthält - in Verbindung mit dem öffentlichen Verkehr: Hier wird eine Verbindung gefunden, die zwar eine Minute länger benötigt, dafür im Gegensatz zur schnellsten Verbindung aber keine Treppe enthält.

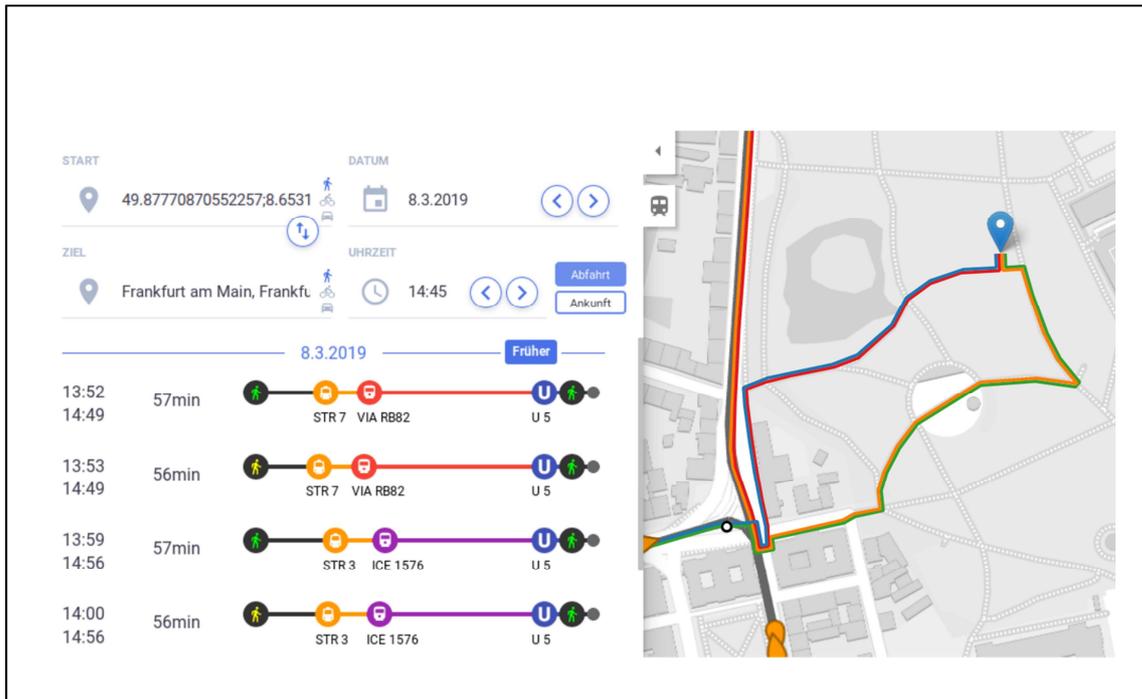


Abb. 8: Routing Web Oberfläche mit einem Beispiel für Wegealternativen. Gezeigt wird der Startpunkt in Darmstadt-Innenstadt (blauer Marker) sowie die in diesem Fall einzige infrage kommende Haltestelle (kleiner weißer Kreis mit schwarzem Rand) für die Weiterfahrt per ÖV nach Frankfurt am Main. Von dieser Haltestelle aus gibt es zwei optimale Alternativen per ÖV zum Ziel: eine Richtung Norden (rot und orange) und eine Richtung Westen (blau und grün). Die Haltestelle kann aus dem Park entweder über den kurzen Weg mit Treppe (blau und rot) oder über den etwas längeren Weg ohne Treppe (grün und orange) erreicht werden. Durch die beiden optimalen Pfade im ÖV ab der Haltestelle und die beiden optimalen Pfade zu Fuß bis zur Haltestelle ergeben sich insgesamt vier optimale Alternativen (blau, rot, orange und grün).

#### 4 Einordnung und Ausblick

Im vorliegenden Forschungs- und Entwicklungsprojekt sollten im Kern zwei Problembereiche bzw. Fragestellungen untersucht bzw. beantwortet werden:

- Zum einen die technische Machbarkeit - sowie die Güte der jeweiligen Lösungen - einer Smartphone-basierten Identifikation von Fußwegbarrieren und ein entsprechend aufbauendes Routingsystem;
- Zum anderen die Nutzungskriterien und Effekte der technischen Entwicklungen für die ältere Bevölkerung.

Bezugnehmend auf die technischen Teile wurden verschiedene Lösungsansätze entwickelt und evaluiert und inzwischen so modifiziert, dass größtenteils eine zufriedenstellende bis hohen Güte gewährleistet werden kann.

Eine grundsätzliche Voraussetzung eines funktionierenden Routingsystems besteht allerdings auf der Verfügbarkeit von engmaschigen Barriere-Informationen, weshalb ein Crowdsourcing Ansatz zugrunde gelegt wurde und verfolgt werden soll. Die zu klärende Frage für die Zukunft besteht vor allem darin, Ansätze zu entwickeln, die es erlauben eine große Personenanzahl für den Ansatz der Barriere-Identifikation zu begeistern.

Eine weitere zu klärende Frage besteht darin, die hohe intra- und interindividuelle Varianz in der Barriere-Bewertung zu erklären, um eine valide Schnittstelle zu individuellen Leistungsprofilen generieren zu können.

Ein wichtiger Schritt erscheint ferner darin zu liegen, variierende exogene Einflüsse, wie z.B. Wetterverhältnisse, dynamisch an das Routingsystem anzubinden. Ferner könnte eine Erweiterung auf regelmäßig wiederkehrende Barrieren, wie z.B. Mülltonnen die an bestimmten Tagen und zu bestimmten Uhrzeiten auf Gehwegen Barrieren darstellen, erfolgen.

Neben diesen Aspekten müssen zukünftigen Fragen zur Kommunikation von und über Barrieren beantwortet werden. So kann eine häufige Ansprache des Themas „Barriere“ oder „Barrierefreiheit“ entweder dazu führen, dass ein physikalisches Barriere-Konstrukt zunehmend als unüberwindbar empfunden wird, oder es kann auch einen Aufforderungscharakter zur Überwindung enthalten und damit einen positiven physiologischen Trainingseffekt erzeugen.