

Human-biometeorologisch angepasste Routenführungen durch mathematische Optimierung

Lena Albert, Nicolas Fröhlich, Nils Hausbrandt, Sascha Henninger, Tessa Maurer, Stefan Ruzika

(Prof. Dr. Sascha Henninger, TU Kaiserslautern, Fachbereich Raum- und Umweltplanung, Pfaffenbergstraße 95, 67663 Kaiserslautern, Sascha.henninger@ru.uni-kl.de)

(Prof. Dr. Stefan Ruzika, TU Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, ruzika@mathematik.uni-kl.de)

(Dr. Nicolas Fröhlich, TU Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, froehlich@mathematik.uni-kl.de)

(Lena Albert, MSc., TU Kaiserslautern, Fachbereich Raum- und Umweltplanung, Pfaffenbergstraße 95, 67663 Kaiserslautern, lena.albert@ru.uni-kl.de)

(Nils Hausbrandt, MSc., TU Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, nils.hausbrandt@mathematik.uni-kl.de)

(Tessa Maurer, BSc., TU Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern, t_maurer@rhrk.uni-kl.de)

1 ABSTRACT

Innerstädtische Freiflächen, aber auch Wälder und Waldflächen, werden zur Erholung, zur Bewegung und dem Aufenthalt im Freien von verschiedenen Bevölkerungs- und Nutzergruppen aufgesucht. Für den Aufenthalt im Freiraum spielen bioklimatische und lufthygienische Faktoren eine wichtige Rolle, die sich für verschiedene Altersgruppen unterscheiden. Tatsächlich können durch die grüne Infrastruktur nicht nur eine Vielzahl von Vorteilen verzeichnet werden, sondern es entstehen durchaus auch gesundheitliche Beeinträchtigungen durch sogenannte biologische Noxe.

Ziel der Forschungsk Kooperation ist es, möglichst lokalklimatisch, lufthygienisch und gesundheitlich optimierte Routen auszuweisen. Eine erste Untersuchung erfolgt am Beispiel von Waldflächen und der Ozonvorläufersubstanz Isopren. Isopren gehört zur Gruppe der biogenen Kohlenwasserstoffe und wird von verschiedenen Baumarten in unterschiedlicher Konzentration emittiert. Diese Emissionsrate hängt von unterschiedlichen Bedingungen ab, wie meteorologische Faktoren (z.B. Strahlungstemperatur und -intensität), aber auch dem Alter der Bäume sowie den Standort- und Bodeneigenschaften. Bei autochthonen Wetterlagen erreichen die Isoprenemissionen ihr Maximum. Nur sind dies auch die Zeitpunkte, an denen Menschen Grünflächen zur Erholung und Abkühlung aufsuchen. Hierzu gehören auch Waldflächen. Dort finden sich unterschiedliche Baumarten, respektive unterschiedliche Emissionspotenziale; allerdings sind dort aber auch viele Wanderrouten zu verzeichnen.

Ziel ist es daher, diejenigen Bereiche, in denen ein erhöhtes Ozonbildungspotenzial vorhanden ist, durch eine angepasste Wegführung zu meiden. Hierzu werden OpenStreetMap-Daten des betrachteten Wandergebiets in ein mathematisches Knoten-Kanten-Netzwerk transformiert und jeder Kante deren Länge und deren Isoprenwert basierend auf dem Baumbestand entlang der Kante zugeordnet. In einer ersten Untersuchung wird dabei zwischen drei Isoprenwerten (niedrig, mittel, hoch) unterschieden. Der Isoprenwert eines Weges ergibt sich aus der Summe der Isoprenwerte aller Kanten entlang des Weges.

Das zugrundeliegende Optimierungsproblem beschreibt die Aufgabe, zu einem gegebenen Wanderweg einen alternativen Weg geringeren Isoprenwerts zu ermitteln. Dabei soll der neue Weg den selben Start- und Endknoten wie der gegebene Weg haben und möglichst wenig von diesem abweichen. Das Problem wird mathematisch modelliert und mit Methoden der ganzzahligen Optimierung gelöst. Die beschriebene Technik liefert nachweislich gute Lösungen und ist auf jedes beliebige Wandergebiet durch Austausch der Datengrundlage übertragbar. Gleichzeitig eröffnet die Problemstellung neue Forschungsrichtungen in der mathematischen Grundlagenforschung zu restringierten Kürzesten-Wege-Problemen. Die vorgestellte Arbeit bildet die Basis zur algorithmischen Berechenbarkeit gesundheitsfreundlicher Wanderwege und motiviert tiefergehende Forschung zukünftig auch tagesaktuelle Werte wie Wind oder Temperatur in die Berechnungen einfließen zu lassen und so tagesaktuelle Empfehlungen auszusprechen.

Das Vorhaben ist in das Verbundprojekt „Ageing Smart – Räume intelligent gestalten“ eingebunden. Das Projekt wird durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert. Das Gesamtprojekt adressiert die geburtenstarken Jahrgänge 1955 bis 1969, die Babyboomer. Durch deren Eintritt in das Rentenalter sind Kommunen oftmals damit konfrontiert, altersgerechte Wohnstandorte, Versorgungs- sowie Freizeitstrukturen zu schaffen. Ziel des Gesamtprojektes ist es, ein datengestütztes Entscheidungsunterstützungssystem zu entwickeln, das öffentliche Akteure in ihren Planungsprozessen unterstützt.

Keywords: Navigationssystem, Lokalklima, Human-biometeorologie, Mathematische Optimierung , grüne Infrastruktur

2 EINLEITUNG

Besonders in den Sommermonaten gehören (urbane) Grünflächen zu den am häufigsten und intensivsten genutzten Räumen (vgl. Henninger 2013, 74 f.). Soweit vorhanden und erreichbar, gehören hierzu auch Waldflächen. Sie bieten vielfältige Nutzungsmöglichkeiten, sei es zur Erholung oder als Bewegungs- oder Aufenthaltsräume. Die positiven Aspekte, Nutzen und Vorteile der sogenannten grünen Infrastruktur sind häufig thematisiert und allgemein bekannt. Allerdings können auch gesundheitliche Beeinträchtigungen für die Bevölkerung durch das Vorhandensein von Pflanzen und Bäumen durch sogenannte biologische Noxe auftreten (vgl. Dosch et al. 2015, 47).

Ein Beispiel hierfür sind biogene flüchtige organische Kohlenwasserstoffe (BVOC), die zu den Vorläuferstoffen des sekundären Schadstoffes Ozon gehören. Durch das Vorhandensein dieser BVOCs kann die Bildung des troposphärischen (bodennahen) Ozons verstärkt werden und der positiven gesundheitlichen Wirkung der Grün- und Waldflächen entgegen wirken.

Hier setzt das dargestellte Forschungsprojekt an. Mit Hilfe mathematischer Modellierung und Optimierung soll algorithmisch ermittelt werden, wie Bereiche mit potenziell lufthygienischen Beeinträchtigungen bei bestimmten Wetterlagen vermieden und umgangen werden können. Hierfür soll eine Art „human-biometeorologisches“ Navigationssystem entwickelt werden.

2 LITERATUR

In der Literatur existieren unterschiedliche Ansätze, bestehende Waderrouten algorithmisch zu verbessern oder neue Wanderrouten zu generieren. Cziferszky & Winter 2002 haben einen Algorithmus entwickelt, der Wanderrouten berechnet, die möglichst viele Kriterien eines Nutzers erfüllen. Diese Kriterien wurden zur Berechnung neuer Routen gewichtet und die Gewichte aus einer Umfrage ermittelt. Cyganski 2007 hat mit Hilfe eines adaptiven Ameisenalgorithmus nutzerangepasste Wanderrouten generiert. Insbesondere wird die Frage adressiert, wie geeignete Start- und Zielpunkte bestimmt werden können. Im Gegensatz zu dem in dieser Forschung gewählten Ansatz, berechnen beide Verfahren neue Wege in einem gegebenen Netzwerk und zielen nicht darauf ab, bestehende Wege zu optimieren. Mayr et al. haben basierend auf Dijkstras Algorithmus ein Routenplanungssystem entwickelt, das optimierte Wege, speziell Bergwanderwege, bestimmt. Im Fokus steht die Beachtung der positiven und negativen Höhenmeter entlang eines Weges. Allgemeine Routenplanungsprobleme (z.B. im Verkehr oder der Logistik) sind natürlich ein sehr gut untersuchtes Forschungsgebiet, so dass dieses spezielle Anwendungsproblem auf einer soliden Grundlage aufbauend behandelt werden kann.

3 UNTERSUCHUNGSGEGENSTÄNDE

Um ein solches Navigationssystem entwickeln zu können, wird ein Luftschadstoff sowie ein Untersuchungsgebiet benötigt. Hierfür werden in einem ersten Schritt beispielhaft die Waldgebiete in und um Kaiserslautern, Deutschland, sowie der Ozonvorläuferstoff Isopren, gewählt.

Als sekundärer Schadstoff wird Ozon durch photochemische Reaktionen von Vorläuferstoffen in der Gegenwart von Sonnenstrahlung gebildet. Demnach treten die höchsten Ozonkonzentrationen an Tagen mit hoher Strahlungsintensität und hohen Temperaturen, also im Sommer auf. Da Ozon gleichzeitig ein Reizgas ist, hat das Vorhandensein von hohen Ozonkonzentrationen gesundheitliche Auswirkungen auf die Menschen, die sich besonders an solchen Wetterlagen vermehrt im Freien aufhalten (vgl. Umweltbundesamt 2022, o.S.).

Zu den Ozonvorläuferstoffen gehört die Stoffgruppe der biogenen Kohlenwasserstoffe, die durch verschiedene Arten von Grünpflanzen und Bäume in unterschiedlichen Konzentrationen und Raten ausgestoßen werden. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Atmosphärenchemie und beeinflussen die Bildung von verschiedenen sekundären Schadstoffen (vgl. Kesselmeier & Staudt 1999, 25). Neben der oftmals hohen Reaktivität von BVOC spielt auch die hohe Rate ebendieser eine bedeutende Rolle, da sie die Emissionsraten von anthropogenen Kohlenwasserstoffen übersteigen (vgl. Sharkey et al. 2008, 5). Zudem sind sie nur schwer einer Beeinflussung zugänglich.

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die Emissionsrate der biogenen Kohlenwasserstoffe, wie beispielsweise das Pflanzen- und Baumalter, die jeweilige Phänologie, die verfügbaren Nährstoffe. Auch Wasser- und Hitzestress haben einen Einfluss auf die Ausstoßraten. Zusätzlich dazu sind die meteorologischen Bedingungen wie die Lufttemperatur und die Intensität der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) bedeutende Faktoren (vgl. Wiedinmyer et al. 2004, 128 ff.).

In einem ersten Schritt wird aus der Gruppe der biogenen Kohlenwasserstoffe der Stoff Isopren zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Isopren weist eine hohe Reaktivität auf und ist durch die hohe Emission durch Vegetation ein bedeutender Ozonvorläuferstoff (vgl. Wagner & Kuttler 2014, 104). Wie auch bei den weiteren BVOCs ist bei Isopren eine hohe Emission durch Pflanzen an Tagen mit autochthonen Wetterlagen, also an warmen und windarmen Tagen, zu verzeichnen. Das Isopren wird besonders durch Laubbäume emittiert, während Nadelbäume stattdessen häufiger Monoterpene emittieren (vgl. Henninger & Weber 2020, 220). Diese gehören auch zur Gruppe der BVOC, werden an dieser Stelle aber nicht weiter betrachtet.

Durch das Vorhandensein vieler Baumarten bieten sich Waldflächen besonders als Untersuchungsgebiet für die Entwicklung des Navigationssystems an. Dementsprechend erfolgt die weitere Betrachtung zunächst am Beispiel der Waldflächen in und um Kaiserslautern, als Ausläufer der Pfälzerwaldes. Da eine vereinfachte und planungspraxisbezogene Betrachtung anvisiert ist, liegt der Fokus auf den vorhandenen Hauptbaumarten. Diese Informationen sollten den zuständigen Forstämtern bereits digitalisiert vorliegen und können so zur weiteren Untersuchung genutzt werden.

Neben den genannten Aspekten bieten sich Waldflächen zudem an, da sie häufig eine Vielzahl von offiziell ausgewiesenen Wanderwegen beherbergen. In Kaiserslautern sind übersichtliche Routen vorhanden, da im Rahmen eines abgeschlossenen Projektes in Kooperation mit der Stadt Kaiserslautern zahlreiche offizielle, inoffizielle, regionale sowie überregionale Wanderwege untersucht und zusammengefasst wurden. Ebendiese übersichtlichen Routen bilden nun die Grundlage für die human-biometeorologische Optimierung der Routen sowie die Entwicklung des Navigationssystems.

4 VORGEHENSWEISE

Die Grundlage der Untersuchung stellt das Untersuchungsgebiet mit den vorhandenen Baumarten dar. In Kooperation mit den zuständigen Forstämtern werden die vorhandenen Informationen aufgearbeitet und in Form von Geodaten in ein Geographisches Informationssystem (GIS) übernommen. Zur Vereinfachung der Untersuchung und der besseren Übertragbarkeit auf andere deutsche Waldflächen werden die Baumarten gemäß ihrer Gattungen in Cluster zusammengefasst (s. Tab. 1). Die flächenhafte Darstellung dieser Cluster in Form von Polygonen ermöglicht somit eine erste Visualisierung der Verteilung der Hauptbaumarten (Abb. 1).

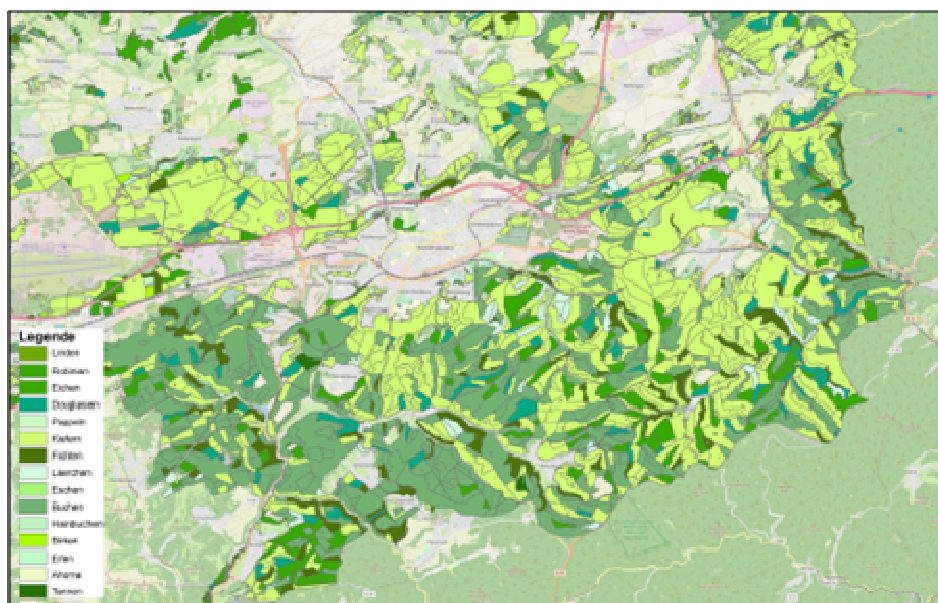


Abb. 1: Darstellung der Baumarten-Cluster am Beispiel der Wälder der Forstämter Kaiserslautern und Otterberg (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Verknüpfung dieser Cluster mit dem Isopren erfolgt durch die Zuordnung von Isopren-Mittelwerten nach Wiedinmyer et al. 2004 sowie Werten aus der weiteren Literatur nach 2004. Diese Mittelwerte beinhalten sämtliche Isoprenemissionswerte von im Untersuchungsgebiet und in Deutschland vorkommenden Baumarten. Durch das Vorgehen im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung werden somit alle möglichen potenziellen Emissionen in die Betrachtung eingeschlossen. Aus allen gesammelten Werten wird das arithmetische Mittel gebildet, um einen Durchschnittswert für die jeweilige Baumgattung zu erhalten.

Die so erhaltenen Werte werden in Anlehnung an Calfapietra et al. 2009 in Emissionsklassen eingeteilt. Dies ermöglicht eine bessere Betrachtung und die Darstellung der Klassen und Waldflächen im Sinne eines Ampel-Systems mit den zugehörigen Farben grün, gelb und rot. Zu den drei Emissionsklassen gehören low-emitter-Baumarten mit $0,1 - 3 \mu\text{g g(dw)}^{-1} \text{h}^{-1}$ Isopren, medium-emitter-Baumarten mit einer Spanne von $3 - 20 \mu\text{g g(dw)}^{-1} \text{h}^{-1}$ sowie high-emitter-Arten mit Emissionsraten $> 20 \mu\text{g g(dw)}^{-1} \text{h}^{-1}$ (vgl. Calfapietra et al. 2009, 1479).

wiss. Name Gattung	deutscher Name	Isopren-Mittelwert ($\mu\text{g g(dw)}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Emitter-Klasse nach Calfapietra et al. 2009
<i>Abies</i>	Tanne	27	high
<i>Acer</i>	Ahorn	< 0,1	low
<i>Alnus</i>	Erle	< 0,1	low
<i>Betula</i>	Birke	< 0,1	low
<i>Carpinus</i>	Hainbuche	0,21	low
<i>Fagus</i>	Buche	< 0,1	low
<i>Fraxinus</i>	Esche	< 0,1	low
<i>Larix</i>	Lärche	< 0,1	low
<i>Picea</i>	Fichte	4,24	medium
<i>Pinus</i>	Kiefer	0,28	low
<i>Populus</i>	Pappel	58,32	high
<i>Pseudotsuga</i>	Douglasie	0,7	low
<i>Quercus</i>	Eiche	61,83	high
<i>Robinia</i>	Robinie	32	high
<i>Tilia</i>	Linde	0	low

Tab. 1: Isopren-Mittelwerte nach Wiedinmyer et al. 2004 für vorhandene Baumgattungen und zugehörige Emmitter-Klassen (Quelle: Eigene Bearbeitung nach Wiedinmyer et al. 2004, Calfapietra et al. 2009, 1479)

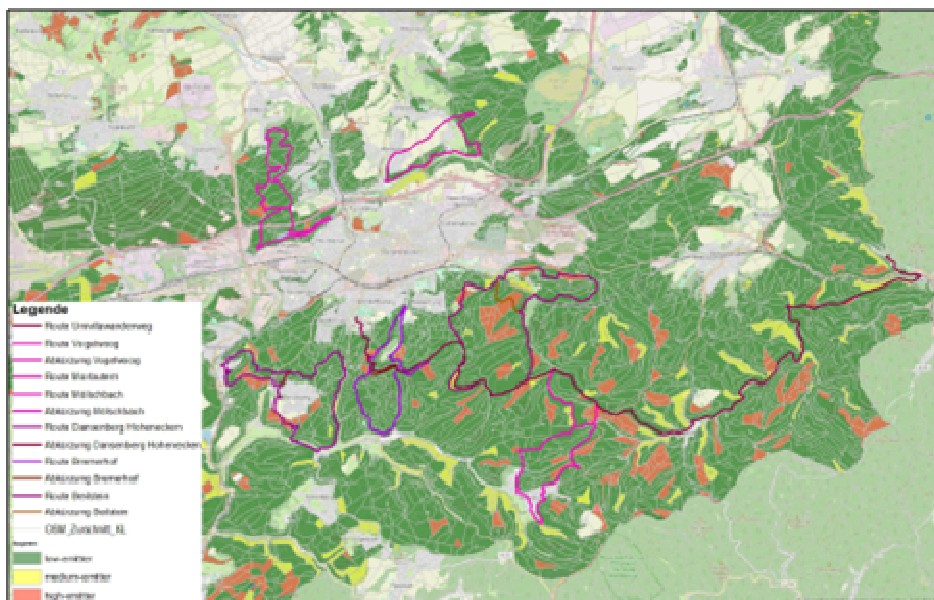


Abb. 2: Überlagerung des Emissionskatasters und der Wanderwege am Beispiel der Wälder der Forstämter Kaiserslautern und Otterberg (Quelle: Eigene Darstellung)

Durch die Visualisierung der Klassen als Ampel-System entsteht ein „Isopren-Baum-Kataster“. Dieses zeigt auf, welche Gebiete welche potenziellen Isopren-Emissionen besitzen und wo dementsprechend das Ozonbildungspotenzial erhöht ist.

Das Kataster wird dann mit den vorhandenen Wanderwegen, bestehend aus offiziellen Wanderwegen, eigens erfassten GPS-Routen sowie OpenData in Form von OpenStreetMap, überlagert. Dieses Vorgehen ermöglicht die Visualisierung der Streckenabschnitte im Wald, an denen während autochthoner Wetterlagen die Isoprenkonzentration und damit verbunden das Ozonbildungspotenzial erhöht ist (Abb. 2).

Auf dieser Basis kann nun die Optimierung der Wanderrouten aus human-biometeorologischer Sicht erfolgen.

5 MODELLIERUNG

Basierend auf Hamacher & Klamroth 2006 werden in diesem Kapitel die wichtigsten graphentheoretischen Definitionen formuliert und beschrieben, wie aus den Rohdaten ein mathematisches Modell entsteht. Für die spätere Optimierung muss das reale Wegenetz in ein mathematisches Netzwerk transformiert werden. Im Folgenden wird aufgezeigt, wie ein solches mathematisches Netzwerk definiert ist.

Definition 1: Ein mathematisches Netzwerk $G = (V, E)$ ist ein Graph mit nichtleerer Knotenmenge V und Kantenmenge E , wobei jede Kante $e \in E$ eine nicht-negative Länge $l(e)$ besitzt.

Definition 2: Ein Weg P in G ist eine Folge von Knoten $P = (v_1, \dots, v_i, v_{i+1}, \dots, v_r)$ mit $e_i = [v_i, v_{i+1}] \in E$ und $e_i \neq e_{i+1}$ für alle $i = 1, \dots, r-1$. Der Knoten v_1 heißt Anfangsknoten des Weges P und der Knoten v_r heißt Endknoten des Weges P .

Definition 3: Neben einer Länge $l(e)$ besitze jede Kante $e \in E$ einen nicht-negativen Isoprenkoeffizienten $k(e) \in \mathbb{R}_+$. Der Isoprenwert $i(e)$ einer Kante $e \in E$ ist gegeben durch das Produkt ihrer Länge $l(e)$ und ihres Isoprenkoeffizienten $k(e)$. Der Isoprenwert eines Weges P ist gegeben durch die Summe der Isoprenwerte aller Kanten entlang des Weges.

Die im Projekt genutzten und relevanten OpenStreetMap-Daten weisen sog. nodes (Punkte) und ways (Linienzüge) aus. Jeder node hat eine eindeutige ID sowie geographische Position gespeichert. Ein way besteht aus einer geordneten Liste von mindestens zwei nodes. Wann immer mindestens zwei ways über den selben node verlaufen, handelt sich bei diesem node im realen Wegenetz um eine Kreuzung. Ein solcher node wird daher zu einem Knoten im mathematischen Netzwerk. Zwei Knoten im mathematischen Netzwerk werden durch eine Kante verbunden, wenn ein way (oder eine Komposition von ways) existiert, der beide Knoten aufeinanderfolgend enthält. Die realen Wanderwege werden nun durch die entsprechende Abfolge der Knoten im mathematischen Netzwerk repräsentiert. Jeder Wanderweg wird anschließend mit einem Weg im mathematischen Netzwerk identifiziert: Der Anfangsknoten s bzw. der Endknoten t ist der Knoten im Netzwerk, der am nächsten an den Koordinaten des Startpunktes bzw. Endpunktes des Wanderweges liegt.

Die Länge einer Kante entspricht der Strecke in Metern von ihrem Startknoten zu ihrem Endknoten entlang des räumlichen Verlaufs des ways und damit im Allgemeinen nicht der Luftlinienentfernung zwischen Start- und Endknoten. Weiterhin besitzt jede Kante $e \in E$ auch einen Isoprenwert $i(e)$, der angibt, wie hoch der Isoprenausstoß der angrenzenden Bäume entlang der Kante ist. Der Isoprenwert $i(e)$ ergibt sich aus dem Produkt der Länge $l(e)$ und des Isoprenkoeffizienten $k(e)$. Basierend auf der Unterteilung der Wanderkarte in vier verschiedene Farbbereiche der Cluster (Abb. 2), wird dementsprechend zwischen vier Isoprenkoeffizienten unterschieden. Befindet sich eine Kante vollständig in einem grünen (gelben, roten) Gebiet, werden die Isoprenkoeffizienten als den mittleren Ausstoßwert 1,5 (11,5, 40,5) des jeweiligen Gebietes definiert. In weißen Flächen liegt kein Baumbestand vor oder wurde in den Daten des Forstamtes nicht erfasst, sodass Kanten, die vollständig in einer weißen Fläche liegen, einen Isoprenkoeffizienten von 0,7 erhalten. Kanten, die durch verschieden gefärbte Flächen verlaufen, werden an den Übergängen zwischen zwei Flächen geteilt. Den entstandenen neuen Kanten wird der Isoprenkoeffizient der Fläche, in der sie sich befinden, zugeordnet. Weiterhin berechnen wir für jede neue Kante ihre Länge.

Jede Kantenteilung erhöht die Anzahl der Kanten und damit die Laufzeit des Algorithmus auf dem Netzwerk. Daher werden Kanten erst ab einer Länge von 25 m geteilt. Einer kürzeren Kante kann jeder Isoprenkoeffizient, der zu den Flächen gehört, in denen sich die Kante befindet, zugeordnet werden. Abhängig von einem Parameter können optimistischere oder pessimistischere Szenarien modelliert werden. Verläuft beispielsweise eine Kante, deren Länge kleiner als 25 m ist von einem grünen Bereich in einen roten, so kann in einem optimistischeren (pessimistischeren) Szenario die Kante den Isoprenkoeffizienten der Farbe Grün (Rot) bekommen.

6 PROBLEMSTELLUNG

Die mathematische Modellierung aus Kapitel 5 ergibt folgende Probleminstanz: gegeben ist ein mathematisches Netzwerk $G = (V, E)$ und ein Weg P in G mit Startknoten s und Endknoten t . Jede Kante $e \in E$ besitze eine Länge $l(e)$ und einen Isoprenwert $i(e) = l(e) \cdot k(e)$. Dabei ist zu beachten, dass s und t nicht notwendigerweise verschieden sein müssen.

Gesucht ist nun ein neuer Weg P' mit Startknoten s und Endknoten t , der einen geringeren Isoprenwert als der Weg P aufweist und sich zudem nur möglichst geringfügig von P unterscheidet. Diese Problemstellung beinhaltet zwei gegensätzliche Ziele, ist also eigentlich ein multikriterielles Optimierungsproblem: zum einen gilt es möglichst viele Abschnitte des gegebenen Weges zu laufen und zum anderen möglichst wenig Isopren aufzunehmen. Die Suche nach möglichst isoprenarmen Wegen führt tendenziell zu einer kürzeren Alternative, da mehr Strecke auch ein höheres Potenzial zur Isoprenaufnahme bietet. Auf der anderen Seite führt die Bedingung, dass möglichst viel Strecke auf dem gegebenen Weg liegen soll, zu längeren Alternativen. Die Problemstellung führt somit im Allgemeinen nicht zu einer eindeutigen Optimallösung.

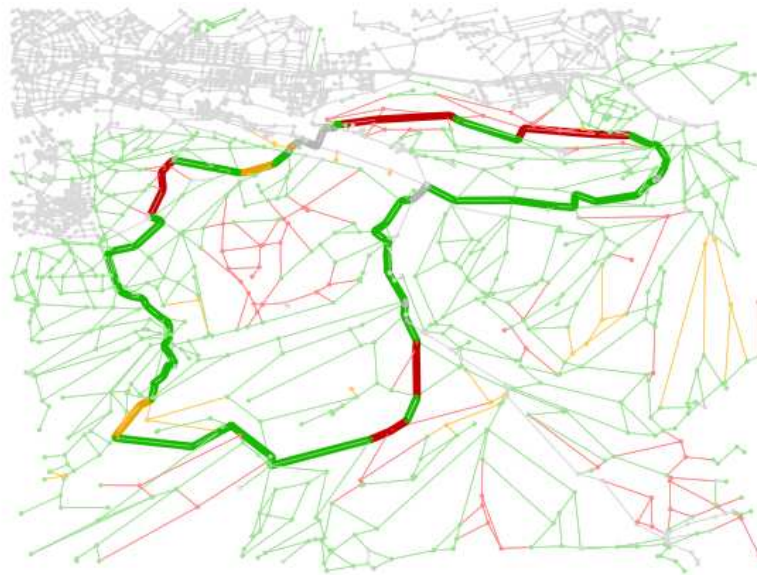


Abb. 3: Die Graphik zeigt den Wanderweg "Route Beilstein" und den zugehörigen Ausschnitt des mathematischen Netzwerkes rund um den Wanderweg. Jede Kante besitzt die Farbe des Gebietes, in dem sie sich befindet.

7 LÖSUNGSVERFAHREN

Um eine Lösung für die Problemstellung zu finden, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, zwei heuristische Verfahren zu verwenden, die mit unterschiedlicher Priorität die beiden Ziele berücksichtigen. Das erste Verfahren beabsichtigt, möglichst viele Abschnitte des gegebenen Weges zu benutzen und dabei möglichst wenig Isopren aufzunehmen. Das zweite Verfahren erlaubt eine höhere Variabilität bei der Auswahl neuer Kanten und liefert Wege, deren Isoprenwert mindestens so klein ist wie der Isoprenwert des Weges, der mit dem ersten Verfahren berechnet wurde. Beide Verfahren beruhen auf Dijkstras Algorithmus und berechnen Wege, die einen geringeren Isoprenausstoß als der gegebene Weg P aufweisen. Hat der Weg P bereits einen minimalen Isoprenwert, ist keine Verbesserung möglich und die gewählten Verfahren geben P als Optimallösung aus. Die Verfahren sind exemplarisch an dem Wanderweg "Route Beilstein" aus Abbildung 3 durchgeführt. Es ist jedoch zu beachten, dass die Verfahren auf jedes beliebige Wandergebiet und jeden Wanderweg übertragbar sind. Hierzu muss lediglich die Datengrundlage bestehend aus den OpenStreetMap-Daten und dem Emissionskataster des Wandergebietes sowie die GPS-Koordinaten der Wanderwege ausgetauscht werden.

7.1 Verfahren 1

Das erste Verfahren berechnet einen Weg, der alle grünen und weißen Teilstücke des Weges P beibehält, um eine große Übereinstimmung mit P zu sichern. Mit P_1, \dots, P_k bezeichnen wir die Teilstücke des Weges P , die nur grüne oder weiße Kanten enthalten. Hierbei wird angenommen, dass die Teilstücke in der Reihenfolge vorliegen, in der sie im Weg P abgelaufen werden. Seien $P_l = (v_1, \dots, v_p)$ und $P_{l+1} = (w_1, \dots, w_q)$ zwei aufeinanderfolgende Teilstücke grüner oder weißer Kanten von P . Für je zwei

solcher Teilstücke P_l und $P_{(l+1)}$ wird der isoprenärmste Weg zwischen dem Endknoten v_p von P_l und dem Anfangsknoten w_1 von $P_{(l+1)}$ berechnet. Hierzu wird der Algorithmus von Dijkstra (Dijkstra 1959) verwendet, um einen kürzesten Weg zwischen v_p und w_1 bezüglich der Isoprenwerte $l(e) \cdot k(e)$ zu berechnen.

Die Berechnung wird beispielhaft für den Wanderweg „Route Beilstein“ aus Abbildung 3 durchgeführt. In Abbildung 4 wird die berechnete Alternative gezeigt. Diese behält Großteile der ursprünglichen Route bei, enthält aber im Gegenzug auch nur eine geringe Isoprenreduktion. In der oberen linken Ecke wurde ein ca. 300 m langer Abschnitt roter Kanten durch grüne Kanten ersetzt. Die Alternative ist ca. 500 m länger als das Original. Abbildung 6 zeigt die Zusammensetzung roter, gelber, grüner und weißer Kanten der Wanderroute vor und nach der Optimierung durch Verfahren 1.

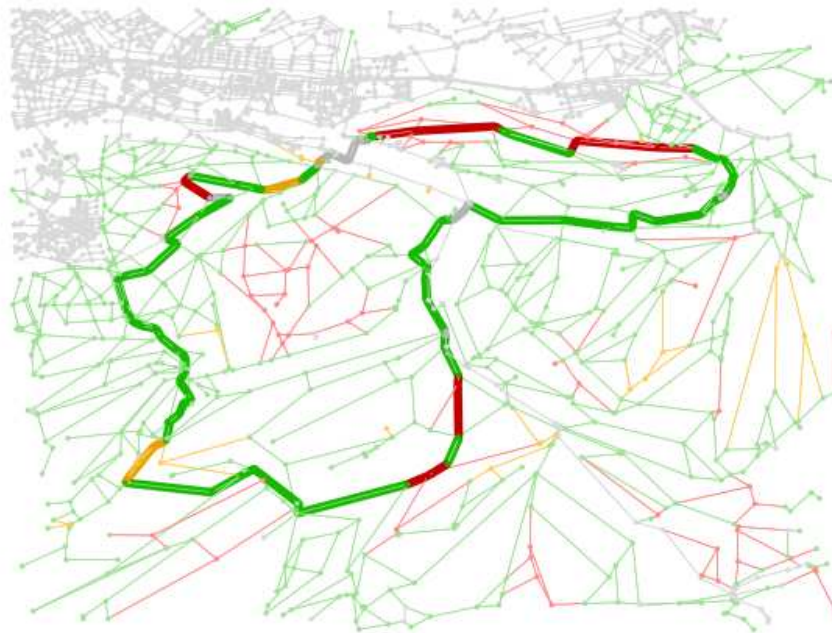


Abb. 4: Die von Verfahren 1 berechnete isoprenärmere Alternative zur Route „Beilstein“.

7.2 Verfahren 2

Das Festsetzen eines gesamten Teilstücks $P_l=(v_1, \dots, v_p)$ grüner oder weißer Kanten kann einen negativen Einfluss auf den Isoprenwert der berechneten Lösung haben. Führen beispielsweise alle benachbarten Knoten des Endknotens v_p in einen roten Bereich, so kann es besser sein, das Teilstück P_l bereits in einem vorherigen Knoten v_i mit $i < p$ zu verlassen. Verfahren 2 wirkt dieser Einschränkung entgegen und erlaubt eine höhere Variabilität in der Auswahl der Kanten.

Nimmt man wie zuvor an, dass P_1, \dots, P_k die Teilstücke des Weges P sind, die nur grüne oder weiße Kanten enthalten, und nimmt man zudem an, dass die Teilstücke in der Reihenfolge vorliegen, in der sie im Weg P abgelaufen werden, dann sind $P_l=(v_1, \dots, v_p)$ und $P_{(l+1)}=(w_1, \dots, w_q)$ zwei aufeinanderfolgende Teilstücke grüner oder weißer Kanten von P . Anstatt den isoprenärmsten Weg zwischen v_p und w_1 zu bestimmen, wird anschließend der isoprenärmste Weg zwischen einem Knoten $v_i \in P_l$ und einem Knoten $w_j \in P_{(l+1)}$ berechnet. So ist sichergestellt, dass jedes Teilstück in der berechneten Lösung zumindest teilweise vorhanden ist.

Betrachtet man aber je zwei Paare P_l und $P_{(l+1)}$ ohne das darauffolgende Teilstück $P_{(l+2)}$, kann man einen Knoten in $P_{(l+1)}$ besuchen, der einen Weg mit vergleichsweise hohem Isoprenwert zwischen $P_{(l+1)}$ und $P_{(l+2)}$ impliziert. Um das zu verhindern, werden zwischen je zwei Paaren P_l und $P_{(l+1)}$ die zehn isoprenärmsten Wege ermittelt. Anschließend kommt es zu einer Verknüpfung dieser Wege mit allen zehn isoprenärmsten Wegen zwischen $P_{(l+1)}$ und $P_{(l+2)}$. Diese werden vom Startknoten s zum ersten Teilstück P_1 bis zum letzten Teilstück P_k zusammen- und anschließend zum Endknoten t fortgeführt – und unter allen möglichen Kombinationen die Alternative mit geringstem Isoprenwert ausgewählt.

Nach Konstruktion kann die von Verfahren 1 berechnete Lösung immer auch mit Verfahren 2 berechnet werden. Somit besitzt der von Verfahren 2 berechnete Weg einen Isoprenwert, der mindestens so klein ist, wie der des von Verfahren 1 berechneten Weges.

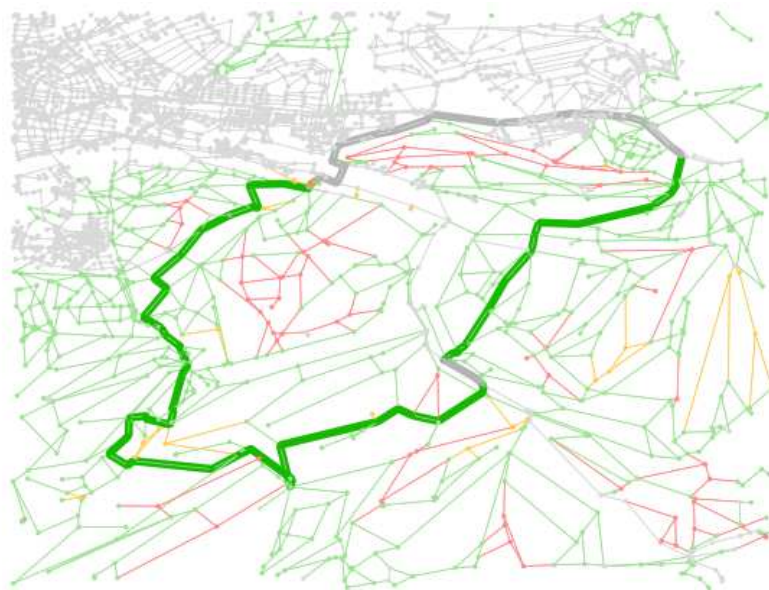


Abb.5: Die mit Verfahren 2 berechnete isoprenärmere Alternative zur Route „Beilstein“.

In Abbildung 5 wird die mit Verfahren 2 berechnete Alternative zur Route „Beilstein“ gezeigt. Diese stellt eine größere Abweichung von der ursprünglichen Route dar, verfügt dafür aber über einen deutlich geringeren Isoprenwert. Mit Ausnahme eines kurzen gelben Abschnittes (ca. 40 m) in der oberen linken Ecke, beinhaltet die Alternative nur grüne und weiße Kanten. Die Alternative stellt also eine erheblich gesundheitsfreundlichere Route als die ursprüngliche dar. Die Alternative ist ca. 500 m kürzer als das Original. Abbildung 6 zeigt die Zusammensetzung roter, gelber, grüner und weißer Kanten der Wanderroute vor und nach der Optimierung durch Verfahren 2.

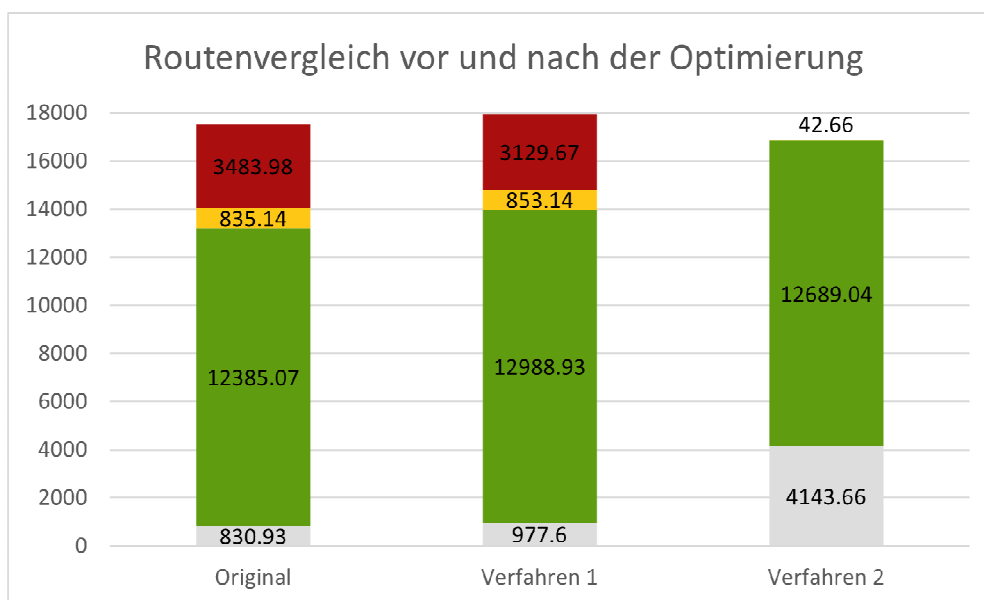


Abb. 6: Die durch Verfahren 2 berechnete Lösung ist etwas kürzer, läuft weniger Strecke auf dem Originalweg, besitzt aber einen erheblichen besseren Isoprenwert.

8 AUSBLICK & HERAUSFORDERUNGEN

Nach erfolgreicher Erprobung des Algorithmus wird die Entwicklung eines Navigationssystems als App angestrebt, die es ermöglicht, potenziell gesundheitsschädigende Routenabschnitte von Wanderwegen bei bestimmten Wetterlagen vermeiden zu können. Ziel hierbei ist es, alternative Streckenabschnitte aufzuzeigen, die sich an der Länge der ursprünglichen Route orientieren und möglichst kurze Umwege

aufzeigen. Ist dies erfolgt und anwendbar, wird es als Ziel gesetzt, die Ergebnisse auf weitere Luftschadstoffe sowie Standorte übertragen zu können. Auch wäre es möglich, in Abhängigkeit der Meteorologie und der Bebauungsdichte/ -struktur, aus stadtklimatologischer Sicht optimale Routen für Fußgänger aufzuzeigen. So soll die Funktionalität sowohl im ruralen, suburbanen und urbanen Raum gegeben sein. Ebenso soll im weiteren Verlauf des Projektes der Einsatz Künstlicher Intelligenz (KI) geprüft werden. Denkbar wäre hierbei die Datengenerierung anhand von Sensoren mit Echtzeit-Daten sowie damit verbunden automatische KI-gestützte Analysen.

In einem weiteren Schritt sollten die neuen vorgeschlagenen Routen bzw. Wegabschnitte auf ihre Begehbarkeit sowie Attraktivität für Besuchende geprüft werden. Diese Notwendigkeit ergibt sich dadurch, dass zur mathematischen Optimierung alle vorhandenen Wege genutzt werden, unabhängig ihres Zustandes. Gegebenenfalls werden hier Handlungsempfehlungen nötig, die eine Aufwertung der gesundheitsfreundlicheren Streckenführungen als Ziel haben.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes sollen nicht nur Nutzenden im Sinne der Navigationsapp dienen, sondern auch für Planungs- und Entscheidungsträger nutzbar werden. Dies könnte in Form von Handlungs- und Planungsempfehlungen erfolgen. So soll aufgezeigt werden, wie besonders im Bestand mit möglichen Gesundheitsbelastungen durch Pflanzen und Bäume sowie lokaler Überwärmung umgegangen werden kann. Auch für die Neuplanung von Grünflächen und damit verbunden die Neupflanzung sollen mögliche Empfehlungen dargestellt werden.

Anpassungsmaßnahmen und neue Forschungsansätze sind im Hinblick auf den Klimawandel und die Auswirkungen auf lokaler Ebene unbedingt erforderlich, um die positiven Wirkungen der grünen Infrastruktur und vor allem städtische Räume als lebenswerte Orte erhalten zu können. Dieses Forschungsprojekt stellt hierzu einen ersten Ansatz dar.

9 QUELLEN

- CALFAPIETRA, C.; FARES, C.; LORETO, F.: Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone, In: *Environmental Pollution* 157 (2009), pp. 1478 – 1486. 2009.
- CYGANSKI, R.: Generierung nutzerangepasster Wandertouren mit Hilfe eines adaptierten Ameisenalgorithmus. In: *Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 19. AGIT-Symposium Salzburg* pp. 127-136. H. Wichmann Verlag. 2007.
- CZIFERSZKY, A.; WINTER, S.: Automatisches Generieren von Wanderrouten. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIV*, 77 – 86. Heidelberg, Fraunhofer IRB Verlag, Wichmann. 2002.
- DIJKSTRA, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik*, 1, 269–271. 1959
- DOSCH, F.; HAURY, S.; SKOWSKI, J.; WAHLER, B.; WILLINGER, S.; ARNDT, T.; MAYER, F.; HOMMES, M.; MÖSCH, S.: *Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft – Grünbuch Stadtgrün*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Berlin.
https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bauen/wohnen/gruenbuch-stadtgruen.pdf;jsessionid=0579552F86E06061833DBE35443E1754.2_cid373?__blob=publicationFile&v=4 (Zugriff 01.07.2022). 2015.
- HAMACHER, H. W.; KLAMROTH, K.: *Lineare und Netzwerkoptimierung* In: Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden. 2006
- HENNINGER, S.: Notwendiger Wandel im Umgang mit innerstädtischen Grünflächen? in: Junkernheinrich, M.; Ziegler, K.: *Räume im Wandel*. 2013.
- HENNINGER, S.; WEBER, S.: *Stadtklima*. Schöningh Verlag, Paderborn. 2020.
- KESSELMEIER, J.; STAUDT, M.: Biogenic Volatile Organic Compounds (VOC): An Overview on Emission, Physiology and Ecology. In: *Journal of Atmospheric Chemistry* 33: pp. 23-88. 1999.
- MAYR, S., KLEINDIENST, H., HELLER, A.: Der Weg ist das Ziel - Online Routenplanung auf Wanderwegen. In: Strobl, J.; Blaschke, T.; Griesebner, G. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik. Beiträge zum 18. AGIT-Symposium Salzburg*, pp. 415 – 422. 2006.
- MUREKATETE, R., M., SHIRABE, T.: An experimental analysis of least-cost path models on ordinal-scaled raster surfaces. *International Journal of Geographical Information Science*, 35:8, 1545-1569. 2021.
- SHARKEY, T; WIBERLEY, A.; DONOHUE, A.: Isoprene Emission from Plants: Why and How. In: *Annals of Botany* 101: pp. 5-18. 2008.
- UMWELTBUNDESAMT: Gesundheitsrisiken durch Ozon, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-ozon#gesundheitsrisiken-von-ozon-und-hoher-lufttemperatur>, Zugriff: 08.07.2022. 2022.
- WAGNER, P.; KUTTLER, W.: Biogenic and anthropogenic isoprene in the near-surface urban atmosphere – A case study in Essen, Germany. In: *Science of the Total Environment* 475 (2014), pp. 104-115. 2014.
- WIEDINMYER, C.; GUENTHER, A.; HARLEY, P.; HEWITT, N.; GERON, C.; ARTAXO, P.; STEINBRECHER, R.; RASMUSSEN, R.: Global Organic Emissions from Vegetation. In: Granier, C.; Artaxo, P.; Reeves, C. (Edit.): *Emissions of Atmospheric Trace Compounds*, pp. 115-170, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 2004.