

Entwicklung eines Bewertungssystems für Radverkehrsnetze auf der Grundlage eines digitalen Modells und einer 4-D-Bewertungsmethode

Jiayao Qiu, Felix Taubitz, Ian Brow, Markus Stöckner, Christian Holldorb

(M.Sc. Jiayao Qiu, Hochschule Karlsruhe HKA, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, jiayao.qiu@h-ka.de)

(M.Eng. Felix Taubitz, Hochschule Karlsruhe HKA, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, felix.taubitz@h-ka.de)

(M.Sc. Ian Brow, Hochschule Karlsruhe HKA, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, ian.brow@h-ka.de)

(Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner, Hochschule Karlsruhe HKA, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, markus.stoeckner@h-ka.de)

(Prof. Dr.-Ing. Christian Holldorb, Hochschule Karlsruhe HKA, Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe, christian.holldorb@h-ka.de)

1 ABSTRACT

Im Rahmen des Transferprojektes „move.mORE“ wird ein nachhaltiges Asset-Management-System entwickelt, das zur Förderung der Mobilitätswende und zur Steigerung der Entwicklungspotenziale von Radverkehrsnetzen, insbesondere im ländlichen Raum, beitragen soll. Die konzeptionellen Aufgaben der Modellierung und Bewertung werden dargestellt. Durch eine multidimensionale Qualitätsbewertung auf Grundlage eines einheitlichen Datenmodells kann die Qualität von Radverkehrsnetzen strukturiert evaluiert und Handlungsbedarfe gezielt ermittelt werden.

Keywords: Datenmodell, Radwegenetzmodellierung, 4-D-Qualitätsbewertung, Asset Management, Radverkehrsinfrastruktur

2 EINLEITUNG

2.1 Hintergrund und Motivation

Das Fahrrad ist in Deutschland essenzieller Bestandteil der alltäglichen Mobilität. Es benötigt im Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln eine geringe Flächeninanspruchnahme und besitzt unabhängige Betriebszeiten. Trotz der flexiblen Einsatzmöglichkeiten des Fahrrades ist die wesentliche Grundlage für die sichere und komfortable Nutzung eine befahrbare und funktionsgerechte Infrastruktur. Für eine Erhöhung des Radverkehrsaufkommens ist diese von wesentlicher Bedeutung (Popp et al., 2024). Verwaltungen, die Verantwortlichkeiten für Unterhaltung, Erhaltung, Instandhaltung, Bau und Betrieb auf Radverkehrsnetzen besitzen, müssen kompetent und organisiert sicherstellen, dass alle Anforderungen für eine qualitätsgerechte Infrastruktur erfüllt werden, sind jedoch gleichzeitig dazu verpflichtet mit ihrem zu betreuenden Anlagenbestand möglichst ressourcenschonend und sparsam zu wirtschaften. Hierfür müssen gezielt und strukturiert Maßnahmen über den gesamten Lebenszyklus priorisiert werden – eine Definition des Asset Managements. Vorhandene Problemstellen mit qualitativen Mängeln müssen in Abhängigkeit ihrer Ausprägung priorisiert und durch Maßnahmen optimiert werden. Ausreichende Fachkenntnisse zur effektiven und sachgerechten Entscheidungsfindung bilden die Grundlage der Umsetzung. Strategische, taktische und operative Aufgaben müssen hierfür definiert und in Prozessabläufen berücksichtigt sein. Ein einheitliches System, welches digital und objektbezogen den Bestand und Zustand der Infrastruktur übersichtlich und dynamisch widerspiegelt und infolge der notwendigen Anforderungen die Qualität bewertet, kann bei einer strukturierten Entscheidungsfindung helfen. Der nationale Radverkehrsplan beschreibt das Ziel vom Fahrradland Deutschland im Jahr 2030 und betont die Infrastruktur mit dem Leitziel von lückenlosen, sicheren, komfortablen und intuitiv nutzbaren Radverkehrsnetzen (BMDV, 2022). Um diese Ziele in der Praxis umzusetzen, müssen unzureichende Netzbereiche erkannt, identifiziert und verbessert werden. Für eine möglichst wirtschaftliche Nutzung von Ressourcen, sollten identifizierte Problemstellen in Hinblick auf deren Gesamtbedeutung priorisiert werden. Ein digitales Asset-Management-System auf Radverkehrsnetzen ist daher erstrebenswert, wofür bereits Ansätze zur Implementierung vorgestellt wurden (Stöckner, 2023). Die wesentlichen Teilbereiche der Modellierungsaufgabe und konzeptionellen Bewertung werden im Folgenden dargestellt.

2.2 Ziele

Ziele dieses Asset-Management-Systems sind die digitale Abbildung der Radverkehrsinfrastruktur sowie die Visualisierung einer Qualitätsbewertung. Dies bildet die Grundlage für Priorisierungen und Finanzprognosen späterer Maßnahmen. Der Qualitätserhalt der Infrastruktur soll dadurch effizient sichergestellt werden. Der Bewertungsprozess soll anhand der ausgewählten Kriterien so aussagekräftig sein, dass ein repräsentatives

Abbild geschaffen wird, ohne dabei zu viele Details zu berücksichtigen. Der Fokus liegt auf der Betrachtung von Radverkehrsnetzen für den Alltag.

3 THEORETISCHER HINTERGRUND

3.1 Asset Management

Im Infrastrukturwesen umfasst Asset Management die strukturierte Optimierung im Rahmen von Instandhaltung, Erneuerung und Verwaltung infrastruktureller Vermögenswerte über den gesamten Lebenszyklus eines Assets, welcher den Bau, Betrieb, Instandhaltung und Rückbau beinhaltet. Die Infrastruktur soll unter Berücksichtigung von anfallenden Kosten innerhalb der Lebensdauer, möglichst effizient betrieben werden, sodass der Lebenszyklus möglichst lange und der finanzielle Aufwand möglichst gering ist. Hierfür müssen zunächst die Assets, also der zu erfassende Anlagenbestand, definiert werden. Für den Radverkehr werden die Radverkehrsinfrastrukturelemente berücksichtigt. Um präventiv durch Wartung und Instandhaltung die Lebensdauer der Anlagenbestände zu maximieren, müssen deren gegenwärtige materiellen und technischen Zustände hinsichtlich Leistungs- und Betriebsfähigkeit klassifiziert werden. Die Zustandsermittlung erfolgt auf Basis von Indikatoren, um Kennwerte zur Leistungsfähigkeit bilden zu können. Der Zustand unterschiedlicher Infrastrukturelemente wird in Hinblick auf Ressourcenaufwand zur Wiederherstellung abgeglichen, sodass eine Priorisierungsreihung für die jeweiligen Elemente entsteht. Dies ermöglicht ein effizientes Risikomanagement, zur Reduktion von Kosten und Erhöhung der Langlebigkeit der Assets. Auf Grundlage dessen können spätere Finanzbedarfsberechnungen, welche im Rahmen von Maßnahmen zur Wiederherstellung und Verbesserung aufgewendet werden müssen, erstellt werden.

3.2 Radverkehrsnetze

In Deutschland wird unterschieden in Radverkehrsnetze für Tourismus, Freizeit und Alltag (FGSV, 2018). Diese können sich überschneiden, haben jedoch grundsätzlich variierende Anforderungen. Innerhalb eines Radverkehrsnetzes kann der Radverkehr unterschiedlich geführt werden. Welche Netzabschnitte dafür berücksichtigt werden, hängt in erster Linie vom Verkehrsaufkommen und der Netzbedeutung ab. Obwohl es standardisierte Vorgehensweisen für eine integrierte Netzgestaltung in Deutschland gibt (FGSV, 2009), finden sich auf Radverkehrsnetzen vielerorts noch Netzlücken. Zukünftig müssen diese Lücken im Radverkehr ermittelt und geschlossen werden. Zusätzlich muss der verfügbare Bestand des Radverkehrsnetzes bestimmte Qualitätskriterien erfüllen, um möglichst attraktiv für dessen Nutzung zu sein. Ein Radverkehrsnetz kann als hochwertig klassifiziert werden, wenn es eine hohe subjektive und objektive Verkehrssicherheit aufweist und komfortabel mit möglichst geringem Energiebedarf zu befahren ist. Außerdem sollten Verbindungen direkt sein und mit geringen räumlichen oder zeitlichen Umwegen einhergehen, wofür ein konnektives und zusammenhängendes Netz benötigt wird, welches relevante Orte miteinander verknüpft und gleichzeitig attraktiv in die Umgebung eingegliedert ist. (Ahmed et al., 2024; Arellana et al., 2020; FGSV, 2002, 2010; McCarthy et al., 2016; Weikl & Mayer, 2023). Konkrete Qualitätsbeschreibungen eines Radverkehrsnetzes ermöglichen einen gezielten Einsatz von Maßnahmen zur Erhaltung, Umbau, Ausbau sowie Neubau.

3.3 Qualität und Bewertung von Radverkehrsinfrastruktur

Zur Bewertung der Qualität auf Radverkehrsnetzen zeigt sich aus der Literatur eine Zieldefinition hinsichtlich der Kriterien Sicherheit, Komfort, Direktheit, Konnektivität und Attraktivität, wobei Sicherheit als wichtigstes Kriterium definiert wird. (Ahmed et al., 2024; Arellana et al., 2020; McCarthy et al., 2016; Weikl & Mayer, 2023). Eine Bewertung auf Basis dieser Kriterien ermöglicht die angepasste Kriterienkombination in Abhängigkeit des betrachteten Radverkehrsnetzes. Für die Analyse von Alltagsradverkehrsnetzen sollte dem Kriterium Direktheit eine größere Gewichtung zugeteilt werden als dem Kriterium Attraktivität, wohingegen für ein Freizeitradverkehrsnetz die Attraktivität höher gewichtet werden sollte (McCarthy et al., 2016). Laut (FGSV, 2018) ist der Einfluss der infrastrukturellen Umgebung für die Routenwahl des Radverkehrs deutlich höher als bei anderen Verkehrsmitteln. Eine Vielzahl von Indikatoren wirkt sich auf die Hochwertigkeit und Nutzbarkeit eines Radverkehrsnetzes aus. Hierzu zählen die Führung des motorisierten Individualverkehrs (FGSV, 2021a; Liu et al., 2019; Rossetti et al., 2019; Watkins et al., 2020), parkende Kraftfahrzeuge (FGSV, 2021b, 2021a; Liu et al., 2019; Rossetti et al., 2019; Watkins et al., 2020), Führungen des Fußverkehrs (Arellana et al., 2020; Barrero & Rodriguez-Valencia, 2022; FGSV,

2021b), Längsneigungen (Barrero& Rodriguez-Valencia, 2022; FGSV, 2021b), die Breite der Radverkehrsführung (FGSV, 2021a; Pais et al., 2022; Song et al., 2021; Watkins et al., 2020), Hindernisse und Barrieren (FGSV, 2021b; Ros-McDonnell et al., 2020), das Verkehrsaufkommen des motorisierten Individualverkehrs (Arellana et al., 2020; FGSV, 2021a, 2021b; Song et al., 2021), die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Kraftfahrzeuge (Arellana et al., 2020; Song et al., 2021), Beleuchtungen (Barrero& Rodriguez-Valencia, 2022; FGSV, 2018, 2021b; Grigore et al., 2018), Markierungen (Ahmed et al., 2024; Lowry et al., 2016; McCarthy et al., 2016), die Oberflächenqualität (Ahmed et al., 2024; Merkens et al., 2024; Pais et al., 2022; Silvestri et al., 2024), Vorfahrtsregelungen an Knotenpunkten (Arellana et al., 2020; Jensen, 2012), Wartezeiten und Zeitverluste (Ahmed et al., 2024; FGSV, 2018; Reggiani et al., 2022; Silvestri et al., 2024), die Überquerungsdistanz an Knotenpunkten (Jensen, 2012; Lowry et al., 2016), der Umwegefaktor (Arellana et al., 2020; Reggiani et al., 2022; Schmid-Querg et al., 2021; Weikl & Mayer, 2023), Abstellanlagen (Ahmed et al., 2024; Ros-McDonnell et al., 2020; Schmid-Querg et al., 2021), die ÖPNV-Anbindung (Pucher & Buehler, 2008; Silvestri et al., 2024) oder die Netzdichte (Ahmed et al., 2024; Gu et al., 2018; Vierø et al., 2024).

Analysen zu infrastrukturellen Einflüssen auf den Radverkehr sind international weit verbreitet (Ahmed et al., 2024). Mit dem BSIR (Bicycle Safety Index Rating) wurde bereits in den 80er Jahren die erste Bewertungsmethode für die Sicherheit von Radfahrenden entwickelt (Davis, 1987). Seither hat sich eine Vielzahl weiterer Bewertungsmethoden gebildet, wie beispielsweise dem BLOS (TRB, 2010), dem BCI (Liu et al., 2019), dem LTS (Mekuria et al., 2012) oder dem BI (Arellana et al., 2020).

Nach (Ahmed et al., 2024) ist der systematische Prozess zur Konzeption von Bewertungsmethoden in mehrere Bereiche aufgeteilt. Er beginnt mit einer Zieldefinition von Kriterien, für welche eine Zusammensetzung aus Indikatoren ermittelt wird. Für jeden Indikator muss eine klassifizierende Einstufung gebildet und in Abhängigkeit dessen Ausprägung bewertet werden. Anschließend müssen die Indikatoren untereinander in Abhängigkeit ihres Einflusses gewichtet werden (Ahmed et al., 2024). Der Gewichtungprozess gestaltet sich hierbei komplexer als die Identifikation der Indikatoren, eine Gewichtung ist jedoch essenziell, da eine gleichgroße Berücksichtigung der Indikatoren nicht repräsentativ ist.

3.4 Analytischer Hierarchieprozess

Der Analytische Hierarchieprozess (AHP), entwickelt durch (Saaty&Kearns, 1985), ermöglicht die Gewichtung mehrerer Parameter, um auf Basis komplexer, multikriterieller Einflüsse, strukturiert und konsistent, Entscheidungen treffen zu können. Wesentlicher Bestandteil des AHP ist der paarweise Vergleich im Rahmen einer Präferenzenmatrix entsprechend der relativen Bedeutung der Kriterien untereinander. Im Rahmen der Bewertung von Radverkehrsnetzen wurde der AHP von (Karolemeas et al., 2022; Zuo& Wei, 2019) verwendet. Im Kontext der durchgeführten Methodik wird der AHP zur Gewichtungsermittlung eingesetzt, um die Relevanz der Parameter relativ zueinander zu bewerten.

3.5 Digitale Modelle

Die Zukunft des Planens, Bauens und Betriebens wird wesentlich durch den digitalen Wandel bestimmt (BMDV, 2015). Um von der Digitalisierung zu profitieren und damit die Anforderungen bei der netzweiten Qualitätsbewertung und bei einem effizienten Asset Management der Radverkehrsnetze erfüllen zu können, ist ein geeignetes digitales Modell erforderlich. Hierzu ist eine klare Standardisierung für die Datendefinition und -struktur von zentraler Bedeutung. Vor diesem Hintergrund stellt die Building Information Modelling (BIM) Methode ein gutes Beispiel dar. Die Quintessenz von BIM besteht unter anderem darin, eine konsistente und kompatible Datengrundlage zu schaffen, sodass gemeinsame, reibungslose Kommunikation und Arbeit möglich sind. Der Standard für die Datengrundlage ist als „Industry Foundation Classes“ (IFC) bekannt und setzt sich aus der semantischen Beschreibung eines Bauteils und seiner geometrischen Repräsentation zusammen. Dabei ist die semantische Beschreibung als eine Entität dominierend und kann mit einer oder mehreren geometrischen Verkörperungen verbunden werden (Borrmann et al., 2021). Die BIM-Methode schafft große Vorteile durch realitätsnahe 3D-Modellierung für die Planung und den Neubau eines Bauwerks. Wird der Schwerpunkt von Neubau auf die Betriebs- und Erhaltungsphase verlagert, dann werden zusätzlichen externen dynamischen Echtzeitdaten aus dem Bestand in Ergänzung zu statischen Daten aus der Planungsphase benötigt, um ein immer mit der Realität synchronisiertes digitales Modell zu erhalten. Somit wird die Arbeitsmethode „Digitaler Zwilling“ als Erweiterung von BIM genutzt, um eine optimierte

Entscheidungsgrundlage für ein nachhaltiges Management im Lebenszyklus der Infrastruktur zu schaffen (Fazekas, 2024). Im Vergleich zu BIM und dem digitalen Zwilling konzentriert sich die GIS-Methode auf geodatenbezogene Analysen und Darstellungen eines Betrachtungsraums. Die detaillierten Geometrie- und Funktionsbeschreibungen besitzt teilweise nur eine sekundäre Bedeutung, sodass diese oft vereinfacht oder weggelassen werden können. Die Grundstruktur bei der Modellierung, also die Kombination von Geometriemodell und dem damit verbundenen standardisierten Datenmodell bleibt jedoch gleich. Ein typischer Standard für GIS ist beispielsweise das GML (Geography Markup Language) entwickelt vom OGC (Open Geospatial Consortium) (Jarosch, 2023).

Im Sinne von Asset Management eines Straßennetzes liegt der Schwerpunkt eines digitalen Modells auf einer großräumigen, netzweiten Zustandsanalyse zur optimalen Erhaltung der vorhandenen Infrastruktur. Zu diesem Zweck wurde die Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) erarbeitet, sodass alle überörtlichen Straßen im Netz mit umfassend genauen Daten analysiert und bewertet werden können. Die Straßeninformationsbank (SIB) nach ASB setzt sich aus einem Ordnungssystem basiert aus Netzknoten und Stationierungssystem sowie einer damit verbundenen Datenbank zusammen. Das Ordnungssystem bildet die Grundlage für die Visualisierung der Daten und Auswertergebnisse in GIS. Die damit verbundene Datenbank ist ein Datenmodell mit einer standardisierten Struktur, auf dem eine beliebige Anzahl von Daten angehängt werden können. Die Standardisierung für den Datenaustausch wird in dem OKSTRA festgehalten und fortgeschrieben. OKSTRA ist ein Katalog von Objekten des Straßen- und Verkehrswesens sowie den zugehörigen Sachdaten und Beziehungen (BMDV, 2024). Die SIB nach ASB ist somit eine Art „Semi-“ Digitaler Zwilling, sie übernimmt die Vorteile von BIM, GIS und digitalem Zwilling und passt die Konzipierungsstruktur nach konkreten Anwendungsfällen und Zielsetzungen für ein geeignetes Datenbanksystem an.

Für Radverkehrsnetze bestehen derzeit weder standardisierte Verfahren zur Zustandserfassung und -bewertung (ZEB), noch ein offizielles Netzmodell. Bestehende Modelle zur Radverkehrsinfrastruktur konzentrieren sich vor allem auf die Routingfähigkeit und grundlegenden Datendokumentationen. OSM (Open Street Map) ist eine communitybetriebene Datenplattform für Karten und beinhaltet auch Daten zur Infrastruktur. Es folgt einem einfachen Modell basierend aus Punkten (Nodes), Linien (Ways) und Relationen (Relations), wobei Punkte sowohl Knotenpunkte als auch zahlreiche andere Objekte wie Bäume, Gebäude und Lampen darstellen können. Die Geometrie von Linien kann durch Referenz von Punkten definiert werden. Zusätzliche Eigenschaften können durch sogenannte „Tags“ beliebig hinzugefügt werden. Da die Daten nicht aus offiziellen Quellen stammen, sind die Qualität und Vollständigkeit oft unzureichend. Es bietet jedoch eine Datengrundlage mit guter Aktualität und globaler Zugänglichkeit, die auf Überprüfung und Korrektur bei Datenmängeln nützlich sein können. In Baden-Württemberg wurden 2011 die Online-Anwendung des Radroutenplaner und 2020 die Datenplattform RadVIS (Radverkehrs-Infrastruktur-System) entwickelt. Der Radroutenplaner berücksichtigt unter anderem das Radnetz von Baden-Württemberg und ist in erster Linie für Nutzende gedacht, um Empfehlungen zu einfachen und bequemen Routen zu geben. RadVIS ist eine Datenbank zur Unterstützung der Städte und Kommunen bei der Konzeption und Dokumentation ihrer Radnetze. Im Rahmen der Digitalisierung der Radverkehrsinfrastruktur können beide Plattformen als großer Fortschritt verzeichnet werden. Angesichts der steigenden Anforderungen eines Managementsystems für die Fahrradinfrastruktur zeigen sich dennoch Schwächen. So wird beispielsweise in RadVIS nur ein vereinfachtes Modell für Knotenpunkte gepflegt, sodass nur die reine Information der Knotenpunktart berücksichtigt werden kann, was für eine repräsentative Bewertung der Knotenpunkte und folglich des gesamten Netzes ungünstig wirken kann. In (BALM, 2023) wurden die Rahmenangaben des nationalen Datenschemas der Radverkehrsdaten analog zum OKSTRA im Straßensystem vorgelegt. Damit ist eine Grundstruktur für ein einheitliches Datenmodell vom Radverkehrssystem errichtet. Das Datenschema ist jedoch derzeit auf kein Bewertungsverfahren ausgelegt, sodass die Vollständigkeit und Umsetzbarkeit noch zu prüfen sind. Im Rahmen des vier-dimensionalen Qualitätsbewertungsverfahrens für Radverkehrssysteme nach (Stöckner, 2023) sind deutlich höhere Anforderungen zum digitalen Radnetzmodell zu erwarten, insbesondere bezüglich Netzstruktur und Datenmodell. Die bestehende Datenbank muss auf eine standardisierte Weise erweitert werden. Es ist davon auszugehen, dass ein geeignetes Informationssystem je nach gesonderten Anwendungsfällen und Ansprüchen für Radwegenetze analog zur SIB in naher Zukunft eine immer wichtigere Rolle spielen wird, wodurch eine Standardisierung zweckmäßig ist. Im Kontext der Zielsetzung einer Qualitätsbewertung und Asset Management des

vollständigen Radverkehrsnetzes liegt der Fokus nicht auf nuancenreichen 3D-Geometrie-Planungen und Visualisierungen von einzelnen Straßenelementen. Vielmehr spielen ihre geographischen Positionen und Qualitätsmerkmalen eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund ist eine Kombination zwischen einem Geometriemodell auf Basis von GIS und einem Datenmodell im Sinne von BIM oder digitalem Zwilling zielführend. Dabei ist zu beachten, dass eine Standardisierung mit Berücksichtigung bestehender Datenmodelle bei der Modellierung anzustreben ist, um den künftigen Datenaustausch reibungslos zu gestalten.

4 METHODIK

4.1 Entwicklung des konzeptionellen Bewertungsmodells

Das Bewertungsmodell soll bisherige Methoden durch die Kombination der Zielkriterien mit einer differenzierten Elementbetrachtung von Strecke und Knotenpunkt erweitern und so eine georeferenzierte Defizitanalyse bei gleichzeitig ganzheitlicher Qualitätsbetrachtung ermöglichen. Zunächst wird das Radverkehrsnetz in Elemente von Streckenabschnitten und Knotenpunkten eingeteilt, da aufgrund der individuellen Qualitätsmerkmale eine Bewertung getrennt für beide Elemente durchgeführt werden muss. Diese sind in beliebiger Form und Anzahl miteinander verknüpfbar, sodass durchgehende Verbindungen entstehen können, welche als Routen bezeichnet werden. In Abhängigkeit der zu bewertenden Eigenschaften, werden individuelle Streckenabschnitte, Knotenpunkte, Routen oder das gesamte Netz betrachtet. Nach (Taubitz et al., 2025) können unterschiedliche Zielgrößen für die Bewertungsbereiche gebildet werden. Hierbei bleibt die Attraktivität im Rahmen der Betrachtung von Alltagsradverkehrsnetzen unberücksichtigt, da diese stark von subjektiven Faktoren beeinflusst wird und eine vernachlässigbare Bedeutung im Alltagsradverkehr aufweist. Ein einzelner Streckenabschnitt ist gekennzeichnet durch Sicherheit und Komfort. Knotenpunkte können ebenfalls hinsichtlich Sicherheit und Komfort bewertet werden. Für Routen ergibt sich eine zusätzliche Bewertung der Direktheit und im gesamten Netz kann die Konnektivität analysiert werden. Das aufeinander aufbauende System ermöglicht je nach Anwendungsbereich, Einzelbewertungen und Gesamtbewertungen. Dies ist erforderlich, um Mängel innerhalb des Radverkehrsnetzes georeferenziert zu identifizieren, da eine gesamtheitliche Betrachtung auf Netzebene keine Georeferenzierung erlaubt. Im Rahmen der durchgeführten Methodik wird je ein Gesamtwert für die individuellen Bewertungsbereiche Strecke, Knotenpunkt, Route und Netz benötigt. Dies erfordert die Gewichtung und Erstellung von je einem analytischen Hierarchieprozess für alle Parameter je Bewertungsbereich.

4.2 Parameter und Daten

Die zu berücksichtigende Parameter sollten keine zeitlich zu hohen Änderungen aufweisen, da kurzweilige Qualitätseinschränkungen keine langfristigen Auswirkungen auf die Gesamtqualität des Radverkehrsnetzes haben. Ziel des Bewertungssystem ist es, die grundlegenden und langfristigen Qualitätseinschränkungen zu identifizieren und quantifizieren und nicht geringfügige Aspekte in Form von Details in die Betrachtung einfließen zu lassen. Die Befahrbarkeit sollte auf hochwertigen Radverkehrsnetzen durch eine betriebliche Unterhaltung sichergestellt sein, ist jedoch aufgrund der nicht kompensatorischen Eigenschaften nicht in den folgenden Parametern berücksichtigt. Die betriebliche Unterhaltung umfasst die Abwicklung der betrieblichen Aufgaben hinsichtlich Winterdienst, Reinigung, Grünpflege, Wartung und Instandhaltung der Ausstattung sowie baulicher Unterhaltung. Diese Aufgaben unterliegen im Verlauf eines Jahres starken Schwankungen und müssen über die Zuständigkeiten der Baulastträger hinweg koordiniert werden. Dafür ist eine ausreichende Personal- und Maschinenkapazität notwendig. Diese Anforderungen resultieren in einer komplexen Umsetzungssituation, die jedoch an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt wird. Nach (Taubitz et al., 2025) werden den Kriterien Sicherheit und Komfort an Streckenabschnitten und Knotenpunkten folgende Parameter zugeteilt:

Sicherheit Strecke: Baulicher Zustand, Breiten, Verkehrsaufkommen Kfz, zulässige Höchstgeschwindigkeit Kfz, Trennungen zum Kfz-Verkehr, Parken Kfz, Beleuchtungen, Markierungen

Komfort Strecke: Baulicher Zustand, Breiten, Längsneigung, Trennungen zum Fußverkehr, Hindernisse

Sicherheit Knotenpunkt: Baulicher Zustand, Breiten, Verkehrsaufkommen Kfz, zulässige Höchstgeschwindigkeit Kfz, Vorfahrtsregelung, Trennungen zum Kfz-Verkehr, Markierungen

Komfort Knotenpunkt: Baulicher Zustand, Breiten, Überquerungslängen, Wartezeiten, Trennungen zum Fußverkehr

Die Einzelbewertungen der Parameter werden in eine Skala von eins (sehr schlecht) bis fünf (sehr gut) übertragen. Der bauliche Zustand (BZ) bewertet die Oberflächenqualität auf Basis von Ebenheit, Substanzmerkmalen und Griffigkeit (Merkens et al., 2024). In Abhängigkeit der vorhandenen Ausprägungen von beispielsweise Rissen, Abplatzungen oder Wurzelhebungen wird ein Gesamtwert zur Oberflächenqualität auf Basis des vorhandenen Oberflächenmaterials im Rahmen einer Zustandserfassung und -bewertung gebildet. Für die Bewertung der Breiten (BR) wird die vorhandene Breite mit der vorgegebenen Mindestbreite (B_{min}) und Regelbreite (B_{reg}) aus dem Regelwerk abgeglichen (FGSV, 2010; Weikl & Mayer, 2023). Das Verkehrsaufkommen (VA) entspricht der durchschnittlich täglichen Verkehrsstärke (DTV) für den Kfz-Verkehr. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Kfz-Verkehrs wird stufenhaft eingeteilt und geringere Geschwindigkeiten besser bewertet. Die Führungsform des Radverkehrs im Vergleich zum Kfz-Verkehr dient der Bewertung von Trennungen zum Kfz-Verkehr (TK). Zur Bewertung von Parken Kfz (PA) wird der Abstand zu parkenden Fahrzeugen von der Radverkehrsführung ermittelt (Weikl & Mayer, 2023). Die Bewertung der Beleuchtung (BE) umfasst das Vorhandensein und die Abwesenheit von Beleuchtungsanlagen. Die Bewertung der Markierungen (MA) erfolgt in Abhängigkeit von vorhandenen Bodenmarkierungen. Zur Bewertung der Längsneigung (LN) werden vorhandene Steigungen als auch die Länge der Steigungsstrecke benötigt. Die Bewertung erfolgt nach (Weikl & Mayer, 2023) in Form eines Steigungsindex, mit der Formel $S = H^2 * L$ (S = Steigungsindex, H = Steigung, L = Streckenlänge). Die Bewertung von Trennungen zum Fußverkehr (TF) basiert auf der Führungsform des Radverkehrs und des Fußverkehrs. Hindernisse (HI) wie beispielsweise Poller, Pfosten, Umlaufgitter oder sonstige Einbauten werden zur Bewertung entsprechend der Anzahl pro 1.000 Meter bewertet. Die Bewertung erfolgt mit der Formel $HI = 1000m/L * AH$ (L = Streckenlänge, AH = Anzahl der Hindernisse). Zur Bewertung der Vorfahrtsregelung (VR) wird die Art der Vorfahrtsregelung für den Radverkehr ermittelt und die Bewertung der Überquerungslängen (ÜL) berücksichtigt die Länge des zu überquerenden Knotenpunktes. Die Bewertung der Wartezeiten (WZ) erfolgt stufenhaft in Abhängigkeit der vorhandenen Wartezeiten am Knotenpunkt. In Tabelle 3 sind die möglichen Einteilungen zusammengefasst, welche in Abhängigkeit des erstrebten Qualitätsniveaus angepasst werden können.

Parameter	1	2	3	4	5
BZ [-]	5	4	3	2	1
BR [m]	<0,7*B _{min}	0,7*B _{min} – B _{min}	>B _{min} – <B _{reg}	B _{reg}	>B _{reg}
VA [Kfz/Tag]	≥5.000	≥2.500	≥2.000	≥1.000	<1.000
HG [km/h]	>70	70	50	30	<30
TK [-]	Mischverkehr	Radfahrstreifen; Schutzstreifen	Fahrradstraße	Straßen-begleitende Führung	Separate Führung
PA [m]	<0,75	<1,50	<2,00	<5,00	≥5,00
BE [-]	Nicht vorhanden				Vorhanden
MA [-]	Keine Markierung		Randstreifen		Flächenhafte Einfärbung
LN [m]	≥0,400	≥0,200	≥0,075	≥0,033	<0,033
TF [-]	Gehweg mit Radverkehr frei	Geh- und Radweg gemeinsam	Landwirtschaft-licher Weg; Waldweg	Geh- und Radweg getrennt	Separate Führung
HI [1/km]	≥4	3	2	1	0
VR [-]	Keine Regelung	Rechts-vor-links	Verkehrszeichen ohne Vorfahrt	Verkehrszeichen mit Vorfahrt	Lichtsignal-anlage
ÜL [m]	>20	≤20	≤15	≤10	≤5
WZ [s]	>20	≤20	≤15	≤10	≤5

Tabelle 1: Mögliche Bewertungen für Parameter von Strecke und Knotenpunkt, teils basierend auf (Weikl & Mayer, 2023)

Die Parameter, welche zur Bewertung der Kriterien Direktheit und Konnektivität verwendet werden, sind:

Direktheit Route: Umwegfaktor, Zeitverluste an Knotenpunkten

Konnektivität Netz: Abstellanlagen, ÖPNV-Anbindung, Netzdichte, Hauptradwegenetzanteil

Zur Bewertung des Umwegfaktors (UF) muss das Verhältnis aus Luftliniendistanz und Routenlänge zwischen Start- und Zielort mittels folgender Formel gebildet werden $UF = LR/LD$ (LR = Routenlänge, LD = Luftliniendistanz). Die Zeitverluste an Knotenpunkten (ZK) werden pro Routenkilometer angegeben und mit der Formel $ZK = \sum(WZ)/LR$ (WZ = Wartezeit je Knotenpunkt, LR = Routenlänge) berechnet. Die Bewertung von Abstellanlagen erfordert die Ermittlung des Typs der Abstellanlage sowie deren Auslastung (Weikl & Mayer, 2023). Die Kombination der Bewertungen wird durchgeführt durch $AA = (BS+AL)*0,5$

(BS = Stellplatzbewertung, AL = Auslastung). Die ÖPNV-Anbindung (ÖA) wird durch Ermittlung der Luftliniendistanz zwischen Haltestelle und Radverkehrsnetz ermittelt. Die Netzdichte (ND) setzt sich zusammen aus der Länge des Radverkehrsnetzes und der Fläche des Radverkehrsnetzes mit der Formel $ND = FN/LN$ ($FN =$ Netzfläche, $LN =$ Netzlänge). Zur Bewertung des Hauptradwegenetzanteils (HN) wird die Länge des Hauptradwegenetzes im Verhältnis zur Netzlänge berechnet mit $HN = LH/LN$ ($LH =$ Hauptradwegenetzlänge, $LN =$ Netzlänge). Mögliche Einstufungen der Bewertungen basieren größtenteils auf (Weigl & Mayer, 2023) und sind in Tabelle 2 dargestellt.

Parameter	1	2	3	4	5
UF [-]	>1,5	>1,4	>1,3	>1,2	≤1,2
ZK [s/km]	>46	>36	>26	>16	≤16
BS [-]	Vorderradanschluss	Anlehnbügel	Sammelanlage	Fahrradbox	Fahrradparkhaus
AL [%]	≥90	<90	<80	<70	<60
ÖA [m]	>500	>400	>300	>200	≤200
ND [m]	>1000	>500	>400	>250	≤250
HN [%]	<40	≥40	≥50	≥60	≥70

Tabelle 2: Mögliche Bewertungen für Parameter von Route und Netz, größtenteils nach (Weigl & Mayer, 2023)

4.3 Gewichtungs- und Bewertungsverfahren

Damit eine georeferenzierte Gesamtwertanalyse ermöglicht wird, müssen für jeden Bewertungsbereich neue Kombinationen der Gesamtwertbildung erfolgen. Auf Basis der Analyse verschiedener wissenschaftlicher Quellen (Arellana et al., 2020; McCarthy et al., 2016; Weigl & Mayer, 2023) wurde eine mögliche Struktur für die Gewichtungverteilung für Alltagsradverkehrsnetze abgeleitet.

$$\text{Gesamtwert Strecke} = 0,60 * \text{Sicherheit Strecke} + 0,40 * \text{Komfort Strecke}$$

$$\text{Gesamtwert Knotenpunkt} = 0,60 * \text{Sicherheit Knotenpunkt} + 0,40 * \text{Komfort Knotenpunkt}$$

$$\text{Gesamtwert Route} = 0,48 * \text{Sicherheit} + 0,31 * \text{Komfort} + 0,21 * \text{Direktheit}$$

$$\text{Gesamtwert Netz} = 0,40 * \text{Sicherheit} + 0,29 * \text{Komfort} + 0,16 * \text{Direktheit} + 0,15 * \text{Konnektivität}$$

Da im Gesamtbewertungssystem jeder Parameter individuell angezeigt werden kann, kann spezifisch nach Schwachstellen gefiltert werden. Die Gesamtwertbildung dient der Priorisierung auf Netzebene. Die Gewichtungsermittlung der jeweiligen Parameter wurde durch analytische Hierarchieprozesse in Abhängigkeit der definierten Parameter durchgeführt. Die Gewichtungen innerhalb der analytischen Hierarchieprozesse basieren auf generischen Einschätzungen, welche durch Ergebnisse der Literaturanalyse gestützt werden, da keine numerischen Daten verfügbar waren.

Die Bewertung der Streckenabschnitte erfordert Gesamtwerte zu Sicherheit und Komfort. Für jeden dieser Kriterien wurde ein analytischer Hierarchieprozess durchgeführt, um Einzelgewichte der Parameter zu ermitteln. Die Ergebnisse sind in den folgenden Gleichungen dargestellt.

$$\text{Sicherheit Strecke} = 0,10 * BZ + 0,09 * BR + 0,19 * VA + 0,13 * HG + 0,39 * TK + 0,02 * PA + 0,03 * BE + 0,05 * MA$$

$$\text{Komfort Strecke} = 0,17 * BZ + 0,38 * BR + 0,36 * LN + 0,06 * TF + 0,03 * HI$$

Zur Ermittlung der Gewichte der Parameter für Knotenpunkte wurden ebenfalls zwei analytische Hierarchieprozesse entsprechend den definierten Parametern durchgeführt mit folgenden Ergebnissen.

$$\text{Sicherheit Knotenpunkt} = 0,04 * BZ + 0,03 * BR + 0,22 * VA + 0,20 * HG + 0,37 * VR + 0,11 * TK + 0,03 * MA$$

$$\text{Komfort Knotenpunkt} = 0,10 * BZ + 0,20 * BR + 0,04 * UL + 0,54 * WZ + 0,08 * TF + 0,04 * MA$$

Die Gewichtungsverteilungen zu den Kriterien Direktheit und Konnektivität sind nachstehend dargestellt. Für beide Kriterien wurde ein AHP durchgeführt.

$$\text{Direktheit Route} = 0,83 * UF + 0,17 * ZK$$

$$\text{Konnektivität Netz} = 0,57 * AA + 0,05 * ÖA + 0,25 * ND + 0,13 * HN$$

Um die vollständige Bewertung einer Route durchzuführen, werden zusätzlich zur Direktheit die Kriterien Sicherheit und Komfort benötigt. Diese setzen sich zusammen aus der relativen Sicherheit für Strecken unter Berücksichtigung der jeweiligen Streckenlänge sowie der durchschnittlichen Sicherheit an Knotenpunkten entsprechend deren Anzahl. Die folgenden Gleichungen veranschaulichen dies.

$$\text{Sicherheit Route} = \left(\sum (\text{Sicherheit Streckenabschnitt} * \text{Streckenlänge}) / \text{Routenlänge} + \right.$$

$$\frac{\sum (\text{Sicherheit Knotenpunkt}) / \text{Anzahl Knotenpunkte} / 2}{\text{Komfort Route} = (\sum (\text{Komfort Streckenabschnitt} * \text{Streckenlänge}) / \text{Routenlänge} +$$

$$\sum (\text{Komfort Knotenpunkt}) / \text{Anzahl Knotenpunkte} / 2$$

Für die Gesamtbewertung des Netzes muss zusätzlich zum Kriterium Konnektivität eine Betrachtung von Sicherheit, Komfort und Direktheit unter Berücksichtigung aller Strecken, Knotenpunkte und Routen erfolgen. Sicherheitswert und Komfortwert werden aus Streckenabschnitten und Knotenpunkten gleich der Vorgehensweise der Routenkombination gebildet, mit der Erweiterung, dass alle Streckenabschnitte und alle Knotenpunkte berücksichtigt werden. Um eine Aussagekräftige Bewertung zur Direktheit eines Radverkehrsnetzes geben zu können, müssen alle relevanten Routen berücksichtigt werden, bevor der Durchschnittswert als Kriterium der Netzbewertung einfließt. Dies betrifft die Verbindung relevanter Start- und Zielpunkte in Form individueller POI (Points of Interest) innerhalb des Radverkehrsnetzes. Die Kombinationen der Kriterien sind in den folgenden Formeln veranschaulicht.

$$\text{Sicherheit Netz} = (\sum (\text{Sicherheit Streckenabschnitt} * \text{Streckenlänge}) / \text{Netzlänge} +$$

$$\sum (\text{Sicherheit Knotenpunkt}) / \text{Anzahl Knotenpunkte} / 2$$

$$\text{Komfort Netz} = (\sum (\text{Komfort Streckenabschnitt} * \text{Streckenlänge}) / \text{Netzlänge} +$$

$$\sum (\text{Komfort Knotenpunkt}) / \text{Anzahl Knotenpunkte} / 2$$

$$\text{Direktheit Netz} = \sum (\text{Direktheit Route} * \text{Routenlänge}) / \sum \text{Routenlängen}$$

Auf Basis der bisherigen Bewertungen können Einstufungen entsprechend der infrastrukturellen Qualität unabhängig vom Radverkehrsaufkommen getroffen werden. Sofern vorhandene Daten zum Radverkehrsaufkommen vorliegen, können diese mit den vorhandenen Qualitätswerten überlagert werden. Dies ermöglicht eine verkehrsabhängige Priorisierung, sodass die Qualität auf Netzbereichen mit viel Radverkehrsaufkommen eine höhere Bedeutung hat als die Qualität auf Netzbereichen mit wenig Radverkehrsaufkommen. Sofern keine Daten zum Radverkehrsaufkommen auf dem Radverkehrsnetz vorliegen, kann die Netzbedeutung in Abhängigkeit der räumlichen Relevanz des Netzabschnitts berücksichtigt werden.

4.4 Modellierungsrichtlinie

Um das Bewertungsmodell umzusetzen, wird ein digitales Netzmodell als Grundlage benötigt. Grundelemente dafür sollten die bestehenden Modellsysteme und Zustandserfassungsmethoden berücksichtigen. Infolge von unterschiedlichen Nutzungsansprüchen der Anwendungsfälle muss ein Kompromiss zwischen Übersichtlichkeit, Leistungsfähigkeit, Begreifbarkeit, Genauigkeit, Effizienz und Wirtschaftlichkeit gefunden werden. Dies bedeutet, dass das Modell möglichst einfach aber gleichzeitig ausreichend robust für folgende Anwendungsfälle sein muss:

- Darstellung der Topologie und Geometrie des Radverkehrsnetzes
- Georeferenzierung
- Dokumentation und Fortschreibung der umfangreichen Bestands- und Zustandsdaten der Infrastruktur
- Streckenbezogene, Knotenpunktbezogene, Routenbezogene sowie Netzbezogene Qualitätsbewertung und Defizitanalyse anhand der Bewertungsalgorithmen und Zustandsdaten
- Visualisierung der Bewertungsergebnisse
- Effiziente Datenübertragung und -zuweisung aus Quellen wie SIB und RadVIS

Demzufolge wird ein Objektmodell mit den Grundelementen in Tabelle 3 erarbeitet.

Die Trennung der Richtung für eine Strecke hängt ausschließlich davon ab, ob Radfahrende aus zwei Richtungen dieselbe Fahrspur teilen müssen oder ob eine zusätzliche Zustandserfassung für die Gegenrichtung durchgeführt werden muss. Die Unterscheidung von NK und LK besteht darin, die Verkehrssituation ausreichen bewerten zu können. Typische LK finden sich dort, wo Radfahrende als häufigstes Verkehrsmittel vertreten sind. In solchen Fällen sind die zu verbindenden Strecken oft auch durch eine einzige Primärstrecke für beide Richtungen repräsentativ. An großen Knotenpunkten mit LSA ist es

sowohl für die Bewertung des Knotenpunktes als auch für Routenbewertung relevant, die Fahrbeziehungen getrennt zu betrachten. Die Verbindungsstrecken sind entsprechend der vorhandenen Verkehrsführung anzulegen, indem zum Beispiel für indirektes Linksabbiegen eine zweistufige Verbindung modelliert wird und für direktes Linksabbiegen eine diagonale Verbindung anzulegen ist. Die Verbindungsstrecken sind neben ihrer topologischen Verbindungsfunktion wichtig für die Betrachtung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit. Unabhängig von Start- und Endnetzknotten wird die Geometrie einer Strecke analog zur SIB bzw. OSM durch eine Punktliste definiert. Abb. 1 zeigt eine Beispielmodellierung.

Objektkategorie	Objekttyp	Kennzeichen	Bedeutung und Merkmale
Knotenpunkt	Netzknotten	NK	Große Knotenpunkte, Netzbedeutung; Achsenschnittpunkt
	Teilknoten	TK	Teil von einem großen Knotenpunkt; Streckenanschlusspunkt
	Lokalknoten	LK	Kleine Knotenpunkte, lokale Verbindung; Streckenanschlusspunkt
Streckenabschnitt	Primärstrecken	PS	Beschreibt eine ganze Strecke zwischen NK; Zur Datenübertragung, ZEB-Datenimport
	Sekundärstrecken	SS	Segmente von zugehöriger PS; Zur differenzierten Datenhaltung und Datenvisualisierung
	Verbindungsstrecken	VS	Verbindet TK; Zur separaten Betrachtung unterschiedlicher Fahrbeziehungen

Tabelle 3: Grundelemente als Kernkonzept für das Netzmodell

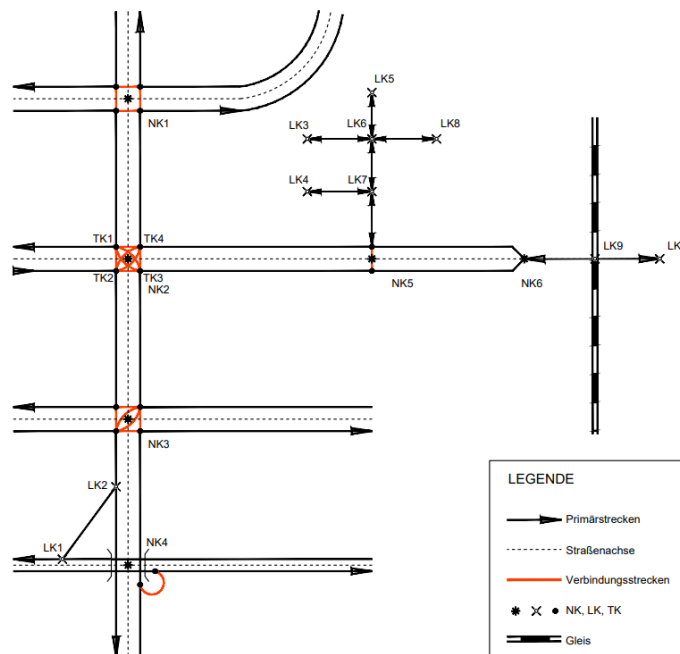


Abb. 1: Schematische Darstellung für das Modellierungsgrundprinzip

Aufbauend auf dem Modell können Routen sowie Netze zusätzlich definiert werden. In Abhängigkeit der Verkehrssituation kann die Netzstruktur vereinfacht dargestellt werden oder komplexe Fahrbeziehungen repräsentieren. Dabei wird besonders die Datenübertragung aus dem Netzknottensystem der SIB berücksichtigt. Zwischen Netzknotten und Teilknoten sowie Primärstrecken und Sekundärstrecken soll eine Referenzstelle hergestellt werden, sodass die Beziehung verdeutlicht und unterschiedliche Darstellungen ermöglicht werden können. Die Netzübertragung und Datenzuweisung kann über zwei Lösungsansätze erfolgen. Die erste Lösung umfasst die Datenzuweisung durch den Abgleich von klar definierten Routen aus zwei Systemen. Hierbei müssen Von- und Nach-Netzknotten sowie der gesamte Routenverlauf aus zwei Systemen klar definieren werden. Um beispielsweise die Ergebnisdaten der ZEB von NK1 nach NK6 aus der SIB auf das Zielmodell zu übertragen, wird zunächst die gleiche Route in zwei Systemen festgelegt, beispielsweise von NK1 über NK2 und NK5 nach NK6. Anschließend wird der Datenstrom aus dem Quellsystem exportiert, sortiert und auf das Zielmodell übertragen. Die Primärstrecken werden dabei entsprechend der Auflösung vom Quelldatenstrom in Sekundärstrecken segmentiert, welche den einzelnen Datensatz pro Einheitstrecke mit einer räumlichen Auflösung von beispielsweise einem Meter auffangen. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass für die manuelle Definition ein Abgleich der Routen erforderlich ist.

Die zweite Lösung umfasst die Datenübertragung auf Basis automatischer Abgleichung der Koordinaten der Netzknoten aus zwei Systemen. Hierbei werden die Lokalknoten des Zielmodells wie Netzknoten behandelt, Teilknoten jedoch vernachlässigt. Sobald die Koordinaten der Netzknoten aus zwei Systemen innerhalb von bestimmten Abweichungstoleranzen übereinstimmen, werden sie als identische Netzknoten betrachtet, obwohl sich die Nummerierungen unterscheiden können. Dieser Schritt kann als NK-Übersetzung verstanden werden. Anschließend sollen im Zielnetz alle vorhandene Streckenobjekte basierend auf ausgefilterten NK aufgelistet werden und mit denen im Zielnetz verglichen werden. Wenn die Strecke in zwei Systemen besteht, wird diese Strecke als eine Route betrachtet und die Datenübertragung analog zur Vorgehensweise der ersten Lösung durchgeführt. Sofern eine Strecke der gleichen NK-Matrix im Inputnetz vorhanden, jedoch im Zielnetz nicht vorhanden ist, werden die Von- und Nach-NK von der Strecke verwendet, um die kürzeste Route im Zielnetz zu erzeugen. Sobald die Länge der erzeugten Route im Rahmen bestimmter Abweichungstoleranzen der Länge der Strecke im Inputnetz entspricht, werden die Route und die Strecke gleichgesetzt. Andernfalls kann diese Strecke entweder als neue Strecke ins Zielmodell aufgenommen oder abgelehnt werden. Falls der NK im Inputnetz nicht vorhanden ist, wird er für die Datenübertragung nicht berücksichtigt. Falls der NK im Inputnetz vorhanden, jedoch im Zielnetz nicht vorhanden ist, dann kann dieser entweder ins Zielnetz aufgenommen oder abgelehnt werden. Eine Aufnahme sorgt automatisch für die Vervollständigung des Netzes und Einbezug von Daten. Abb. 2 zeigt die schematische Darstellung des Übertragungskonzeptes.

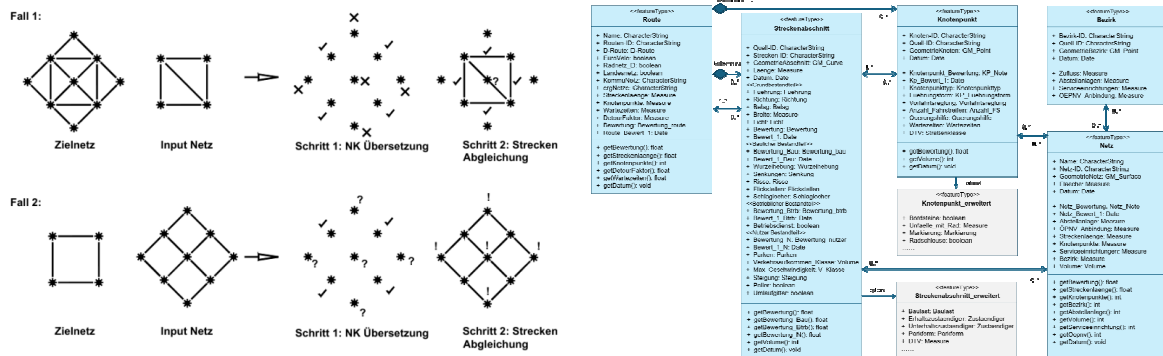


Abb. 2 (links): Schematische Darstellung für das Datenübertragungskonzept. Abb. 3 (rechts): UML für die Objektplanung des Modells.

Je nach Anforderung des Bewertungsmodells lassen sich Attribute zum jeweiligen Objekt ableiten und somit ein Objektkatalog verfassen. Dies stellt die Grundlage für die Implementierung des Datenmodells dar (Abb. 3).

Zur Unterstützung des Datenimport aus unterschiedlichen Quellen ist es zweckmäßig, ein Parameter-Wörterbuch zu erstellen, sodass die Barriere zwischen unterschiedlichen Semantiksystemen abgebaut werden können. Mit der Integration von Bewertungsalgorithmen des Bewertungsmodells lassen sich so auf netzweiter Analyse, Ergebnisse visualisieren.

5 DISKUSSION

Es wurde eine Methodik vorgestellt, um die Qualität auf Radverkehrsnetzen ganzheitlich zu bewerten und digital abzubilden. Um die Nutzung des Fahrrads als Verkehrsmittel besser zu ermöglichen, muss die Radverkehrsinfrastruktur nicht nur die baulichen und regulatorischen Anforderungen einhalten, sondern auch den Bedarfen und Bedürfnissen der Nutzenden entsprechen. Eine effektive Förderung des Radverkehrs setzt voraus, dass Qualitätsmängel nicht nur identifiziert, sondern auch behoben werden. Hierbei sind für bauliche Maßnahmen oder betriebliche Unterhaltungen die Baulastträger auf den verschiedenen Abschnitten verantwortlich. Das digitale Modell und die Bewertungsmethodik können zwar Defizite identifizieren, für die spätere Instandsetzungen, Umbauten, Ausbauten sowie Neubauten müssen jedoch konkrete Maßnahmen und Vereinbarungen erbracht werden. Um aussagekräftige Qualitätswerte zu erhalten, welche die Basis für eine langfristige, ganzheitliche Förderung des Radverkehrs sicherstellen, ist eine Vielzahl von Daten notwendig. Diese müssen für die Bewertung auf dem gesamten Radverkehrsnetz vorliegen. Landesweite Radverkehrsnetze, wie beispielsweise das Radnetz Baden-Württemberg verfügen bereits über eine hohe Anzahl von Bestandsdaten. Kleinere Gebietskörperschaften verfügen jedoch häufig nur über geringere

Datenbestände, was eine vollumfängliche Bewertung erschwert. Um dennoch Qualitätsbewertungen durchführen zu können, müssen zukünftig alternative Parameter und Minimalanforderungen zur Bewertung definiert werden. Die Ermittlung der Gewichtungen ist bisher nur qualitativ durchgeführt worden. Um genauere Ergebnisse liefern zu können, muss eine Sensitivitätsanalyse in realen Netzen durchgeführt werden. Hierbei können auch Parameter mit Einflüssen auf die Attraktivität berücksichtigt werden, um zukünftige Bewertungen für Radverkehrsnetze für den Tourismus und Freizeit durchführen zu können. Das beschriebene Modell ist auf Basis von der Modellierungsrichtlinie zu implementieren und mithilfe von Pilotprojekten auf Handhabung und Leistungsfähigkeit zu prüfen.

6 FAZIT

Das bisherige System ermöglicht die Abbildung und Bewertung von Radverkehrsnetzen zur Unterstützung der datengetriebenen Entscheidungsfindung zu Maßnahmen auf Radverkehrsnetzen. Die Erweiterung der Parameter ist durch die Berücksichtigung von beispielsweise Unfalldaten, Serviceeinrichtungen, wegweisender Beschilderung, Sichtfeldern oder Fahrtgeschwindigkeiten möglich, sofern der Gewichtungprozess angepasst wird. Eine Ergänzung des Bewertungssystems kann durch die Implementation von Erreichbarkeiten erfolgen. Auch die Verteilung von Bevölkerungsdichten kann in einer Erreichbarkeitsanalyse berücksichtigt werden. So könnte beispielsweise eine Pufferzone um das bestehende Radverkehrsnetz gelegt werden und diese mit den Bevölkerungszahlen überlappt werden. Inwiefern sich die Qualität eines Radverkehrsnetzes auf das Verkehrsmittelwahlverhalten auswirkt, kann wichtige Erkenntnisse zur Förderung zukünftiger nachhaltiger Mobilität geben. Hierzu müsste untersucht werden, wie sich eine Veränderung der Qualität auf die Verkehrsmittelwahl auswirkt. Das bisherige System berücksichtigt ausschließlich Anlagen des Radverkehrs. Eine Erweiterung des Systems unter der Berücksichtigung des Fußverkehrs ermöglicht eine vollumfängliche Aussagekraft zu komplexen Verkehrssystemen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- AHMED, T., PIRDAVANI, A., WETS, G., & JANSSENS, D.: Bicycle Infrastructure Design Principles in Urban Bikeability Indices: A Systematic Review. *Sustainability*, 16(6), 2545. 2024. <https://doi.org/10.3390/su16062545>.
- ARELLANA, J., SALTARÍN, M., LARRAÑAGA, A. M., GONZÁLEZ, V. I., & HENAO, C. A.: Developing an urban bikeability index for different types of cyclists as a tool to prioritise bicycle infrastructure investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 139, 310–334. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.07.010>.
- BALM: Dokumentation „Nationales Datenschema“ für Geodaten zur Radverkehrsinfrastruktur. 2023.
- BARRERO, G. A., & RODRIGUEZ-VALENCIA, A.: Asking the user: A perceptual approach for bicycle infrastructure design. *International Journal of Sustainable Transportation*, 16(3), 246–257. 2022. <https://doi.org/10.1080/15568318.2020.1871127>.
- BMDV: Fahrradland Deutschland 2030 – Nationaler Radverkehrsplan 3.0. 2022. Berlin, 2022. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/StV/Radverkehr/nationaler-radverkehrsplan-3-0.html>.
- BMDV: Anweisung Straßeninformationsbank (ASB), Version 2.05. 2024. <https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V-ASB.html>.
- BMVI: Stufenplan Digitales Planen und Bauen. 2015. https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C., & BEETZ, J.: Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis (2., aktualisierte Auflage). Springer Vieweg. 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>.
- DAVIS, W. J.: Bicycle Safety Evaluation. Auburn University, City of Chattanooga, and Chattanooga-Hamilton County Regional Planning Commission. 1987.
- FAZEKAS, A: Digitaler Zwilling Bundesfernstrassen. Federal Highway Research Institute. 2024. <https://doi.org/10.60850/DZ-BFSTR-DEF-V1>.
- FGSV: H RaS. FGSV-Verlag. Köln. 2002.
- FGSV: RIN. FGSV-Verlag. Köln. 2009.
- FGSV: ERA. FGSV-Verlag. Köln. 2010.
- FGSV: Hinweise zur Anwendung der RIN. FGSV-Verlag. Köln. 2018.
- FGSV: H EBRA. FGSV-Verlag. Köln. 2021a.
- FGSV: H RSV. FGSV-Verlag. Köln. 2021b.
- GRIGORE, E., GARRICK, N., FUHRER, R., & AXHAUSEN, K. W.: Bikeability in Basel. 2018. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000283763>.
- GU, P., HAN, Z., CAO, Z., CHEN, Y., & JIANG, Y.: Using Open Source Data to Measure Street Walkability and Bikeability in China: A Case of Four Cities. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(31), 63–75. 2018. <https://doi.org/10.1177/0361198118758652>.
- HARTANTO, K., GRIGOLON, A., MAARSEVEEN, M. V., & BRUSSEL, M.: Developing a bikeability index in the context of transit-oriented development (TOD). University of Twente. 2017.
- HEINEN, E., VAN WEE, B., & MAAT, K.: Commuting by Bicycle: An Overview of the Literature. *Transport Reviews*, 30(1), 59–96. 2010. <https://doi.org/10.1080/01441640903187001>.

- JAROSCH, M.: Vermessung im Bauwesen: Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. Springer Vieweg, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2118-8>.
- JENSEN, S. U.: Pedestrian and Bicycle Level of Service at Intersections, Roundabouts and other Crossings. 2012.
- KAROLEMEAS, C., VASSI, A., TSIGDINOS, S., & BAKOGIANNIS, DR. E.: Measure the ability of cities to be biked via weighted parameters, using GIS tools. The case study of Zografou in Greece. *Transportation Research Procedia*, 62, 59–66. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.02.008>.
- LIU, Q., HOMMA, R., & IKI, K.: Improvement of Cycleway by Evaluating Road Environment and Estimating Bicycle Traffic Volume. 2019.
- LOWRY, M. B., FURTH, P., & HADDEN-LOH, T.: Prioritizing new bicycle facilities to improve low-stress network connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 124–140. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.02.003>.
- MCCARTHY, O. T., CAULFIELD, B., & DEENIHAN, G.: Evaluating the quality of inter-urban cycleways. *Case Studies on Transport Policy*, 4(2), 96–103. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2015.11.004>.
- MEKURIA, M. C., FURTH, P. G., & NIXON, H.: Low-Stress Bicycling and Network Connectivity. Mineta Transportation Institute. 2012.
- MERKENS, T., STÖCKERT, U., & HEBEL, C.: Definition of indicators for the assessment of the structural condition and riding comfort of cycle paths. *MATEC Web of Conferences*, 396, 05001. 2024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439605001>.
- PAIS, F., MONTEIRO, J., SOUSA, N., COUTINHO-RODRIGUES, J., & NATIVIDADE-JESUS, E.: A multicriteria methodology for maintenance planning of cycling infrastructure. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*, 175(5), 248–264. 2022. <https://doi.org/10.1680/jensu.21.00088>.
- POPP, M., RAU, H., & MAHNE-BIEDER, J.: Auf dem Weg zum Fahrradland – Barrieren von Nichtradfahrerinnen und Nichtradfahrern identifizieren und überwinden. Standort. 2024. <https://doi.org/10.1007/s00548-023-00903-9>.
- PUCHER, J., & BUEHLER, R.: Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany. *Transport Reviews*, 28(4), 495–528. 2008. <https://doi.org/10.1080/01441640701806612>.
- REGGIANI, G., VAN OIJEN, T., HAMEDMOGHADAM, H., DAAMEN, W., VU, H. L., & HOOGENDOORN, S.: Understanding bikeability: A methodology to assess urban networks. *Transportation*, 49(3), 897–925. 2022. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10198-0>.
- ROS-MCDONNELL, L., DE-LA-FUENTE, M. V., ROS-MCDONNELL, D., & CARDÓS, M.: Development of a biking index for measuring Mediterranean cities mobility. *International Journal of Production Management and Engineering*, 8(1), 21. 2020. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.10834>.
- ROSSETTI, T., SAUD, V., & HURTUBIA, R.: I want to ride it where I like: Measuring design preferences in cycling infrastructure. *Transportation*, 46(3), 697–718. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11116-017-9830-y>.
- SAATY, T. L., & KEARNS, K. P.: Analytical planning: The organization of systems (1st ed). Pergamon Press. 1985.
- SCHMID-QUERG, J., KELER, A., & GRIGOROPOULOS, G.: The Munich Bikeability Index: A Practical Approach for Measuring Urban Bikeability. *Sustainability*, 13(1), 428. 2021. <https://doi.org/10.3390/su13010428>.
- SCHNÖTZLINGER, P.: Big Data in cycling A transport planning centered analysis of large-scale movement data from Bike Citizens. 2019.
- SILVESTRI, F., BABAEI, S. H., & COPPOLA, P.: Improving Urban Cyclability and Perceived Bikeability: A Decision Support System for the City of Milan, Italy. *Sustainability*, 16(18), 8188. 2024. <https://doi.org/10.3390/su16188188>.
- SONG, Y., THATCHER, D., LI, Q., MCHUGH, T., & WU, P.: Developing sustainable road infrastructure performance indicators using a model-driven fuzzy spatial multi-criteria decision making method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110538. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110538>.
- STÖCKNER, M.: Qualitätsbewertung von Radverkehrsnetzen. In 3. Kolloquium Straßenbau in der Praxis: Tagungshandbuch 2023 (S. 363–373). Kolloquium Straßenbau in der Praxis, Tübingen. expert verlag. 2023.
- TAUBITZ, F., QIU, J., BROW, I., STÖCKNER, M., & HOLLDORB, C.: Nachhaltiges Asset Management für die Radverkehrsinfrastruktur. In 4. Kolloquium Straßenbau in der Praxis: Tagungshandbuch 2025 (S. 327 – 337). Kolloquium Straßenbau in der Praxis, Tübingen. expert verlag. 2025.
- TRB.: Highway Capacity Manual (Vol. 1). Washington, DC: National Academies Press. 2010.
- VIERØ, A. R., VYBORNOVA, A., & SZELL, M.: BikeDNA: A tool for bicycle infrastructure data and network assessment. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 51(2), 512–528. 2024. <https://doi.org/10.1177/23998083231184471>.
- WATKINS, K. E., CLARK, C., MOKHTARIAN, P., CIRCELLA, G., HANDY, S., KENDALL, A.: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Bicyclist Facility Preferences and Effects on Increasing Bicycle Trips (S. 25792). Transportation Research Board. 2020. <https://doi.org/10.17226/25792>.
- WEIKL, S., & MAYER, P.: Data-driven quality assessment of cycling networks. *Frontiers in Future Transportation*, 4, 1127742. 2023. <https://doi.org/10.3389/ffut.2023.1127742>.
- ZUO, T., & WEI, H.: Bikeway prioritization to increase bicycle network connectivity and bicycle-transit connection: A multi-criteria decision analysis approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 129, 52–71. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.08.003>.