

mFUND Projekt

Entwicklung eines bedarfsgerechten Vertiport- netzwerks am Beispiel Nordrhein-Westfalens – VertiNet



Leitfaden zur Ermittlung des Vertiportbedarfs innerhalb von Verwaltungsgebieten

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Lehrstuhl für Flughafenwesen und Luftverkehr
Verkehrswissenschaftliches Institut
der RWTH Aachen (VIA)

I Inhaltsverzeichnis

I Inhaltsverzeichnis.....	ii
II Abkürzungsverzeichnis.....	3
1 Einleitung	4
1.1 Ausgangslage und Motivation	4
1.2 Ziel und Aufgabenstellung.....	4
2 Methodik zur Bedarfsermittlung	5
2.1 Vorbereitende Arbeiten	5
2.2 Anwendung.....	6
2.3 Ergebnisauswertung und -darstellung	10
2.4 Übertragbarkeit	11
3 Berücksichtigung bestehender Infrastruktur	12
3.1 Vorbereitende Arbeiten	12
3.2 Anwendung.....	13
3.3 Ergebnisauswertung und -darstellung	15
4 Literaturverzeichnis.....	17
Anhang	19

II Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
eVTOL	Electric Vertical Takeoff and Landing Aircraft
LAU	Local Administrative Unit (Verwaltungsgemeinden)
NRW	Nordrhein-Westfalen
NUTS-3	Nomenclature of territorial units for statistics (Kreise und kreisfreie Städte)
POI	Point of Interest
PAX	Passagiere
RIN	Richtlinie für integrierte Netzgestaltung
VIA	Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen
ZO	Zentrale Orte

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Dieser Leitfaden wurde im Rahmen des durch den mFund geförderten Projekts „VertiNet“ erarbeitet.

Weltweit befindet sich eine Vielzahl von Flugtaxivehikeln in der Entwicklung, welche technologisch die Möglichkeit bieten, das Angebot individueller Mobilität, um die dritte Dimension zu erweitern. Flugtaxiverkehre ermöglichen eine lärm- und emissionsarme, komfortable und zeitsparende Form der Individualmobilität, bei der Punkt-zu-Punkt Verbindungen im Vordergrund stehen. Insbesondere für die Anwendung im urbanen Raum stehen hierbei senkrecht startende und landende Fluggeräte (eVTOLs) im Fokus derzeitiger Forschungsprojekte. Nach derzeitig geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen ist für den Betrieb der eVTOLs eine ausgewiesene Start-/ und Landeinfrastruktur notwendig, welche auch als Vertiport bezeichnet wird. Aus diesem Grund ist ein flächendeckendes Netzwerk aus strategisch sinnvoll platzierten Vertiports an Bedarfsschwerpunkten eine Grundvoraussetzung zur Entwicklung dieser fortschrittlichen Mobilität. Durch das dezentrale Luftverkehrssystem in Deutschland bietet sich bereits eine Vielzahl an großen und kleineren ausgewiesenen Landeinfrastrukturen, die für ein solches Netzwerk genutzt werden könnten. Gleichzeitig müssen weitere Standorte entwickelt werden, um die Vorteile der neuen Mobilitätsform zu unterstützen. Diese sollten zum einen an aufkommensstarken und Zielgruppen-nahen Standorten platziert werden. Zum anderen kann die Konnektivität schlecht angebundener, ländlicher Regionen durch die Verortung eines Vertiports verbessert werden.

1.2 Ziel und Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts wird auf Ebene der Verwaltungsgemeinden in Deutschland (LAU) eine Methodik entwickelt, um den Bedarf an Vertiports innerhalb einer Zelle abzuschätzen. Die Methodik kann für die gesamte Bundesrepublik oder für einzelne Bundesländer angewendet werden. Sie ist zudem auf die Kreisebene (NUTS-3) übertragbar. Maßgeblich für die Übertragbarkeit auf andere Gebietstypen ist die Verfügbarkeit der relevanten Daten. Neben dem Vertiportbedarf kann die Methodik mit angepassten Inputdaten auch für andere Mobilitätsangebote verwendet werden.

Die Methodik identifiziert auf Grundlage ausgewählter Inputdaten diejenigen Zellen der gewählten Verwaltungsebene, die einen über- oder unterdurchschnittlichen Bedarf aufweisen. Die Methodik orientiert sich als Vergleichswert dabei stets an dem Durchschnitt der gewählten Grundgesamtheit (z. B. Nordrhein-Westfalen).

2 Methodik zur Bedarfsermittlung

2.1 Vorbereitende Arbeiten

Zur Anwendung der Methodik sind zunächst vorbereitende Arbeiten notwendig. Diese beziehen sich insbesondere auf die Recherche und das Nutzbarmachen der benötigten Informationen.

Als Grundlage der Methodik dient stets die Personenmatrix der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [1]. Diese liegt auf NUTS-3-Ebene vor und gibt eine Prognose der Personenverkehrsverflechtungen für das Jahr 2030. Eine Prognose für das Jahr 2040 befindet sich in Bearbeitung [2] und kann als Grundlage für die Bedarfsermittlung genutzt werden, sobald sie vorliegt. Um eine Bedarfsermittlung auf LAU-Ebene durchzuführen, müssen die NUTS-3 bezogenen Daten der Verflechtungsprognose zunächst auf die LAU-Ebene heruntergebrochen werden. Als Maß werden die Einwohner in der jeweiligen LAU-Zelle gewählt. Gemäß dem Anteil der Einwohner der LAU-Zelle an den Einwohnern der NUTS-3-Zelle werden die Wege aus/in die NUTS-3-Zelle auf die verschiedenen LAU-Zellen einer NUTS-3-Zelle verteilt (vgl. Formel (1)). Für kreisfreie Städte ist dieses Vorgehen nicht notwendig, da sich die NUTS-3- und die LAU-Zellen hier nicht unterscheiden.

$$Wege_{LAU} = \frac{EW_{LAU}}{EW_{NUTS3}} * Wege_{NUTS3} \quad (1)$$

mit
 EW Einwohner je Zelle

Anschließend werden die relevanten Merkmale zur Anpassung der Wegezanzahl gewählt. Die folgenden Kategorien werden dabei berücksichtigt:

- Sozioökonomische Merkmale der Zielgruppen
- Unternehmerische Merkmale
- Touristische Merkmale
- Standortbezogene Merkmale (Points-of-Interest)
- Anbindungsbezogene Merkmale (Zentrale Orte - ZO)

Dazu muss zunächst definiert werden, welche Zielgruppen durch das Mobilitätsangebot angesprochen und welche Use Cases abgedeckt werden sollen. Darauf basierend werden flächendeckend verfügbare Daten identifiziert, durch die die Zielgruppen und Use Cases abgebildet werden können. Beispiele für entsprechende Daten sowie ihre Verfügbarkeit innerhalb von Deutschland sind im Anhang in Tabelle 2 zusammengefasst. Für die sozioökonomischen, unternehmerischen und touristischen Merkmale sind Daten notwendig, die flächendeckend für jede der Zellen im Untersuchungsgebiet vorliegen. Sollten die Daten bereits auf der LAU-Ebene vorliegen, so können diese direkt für die Methodik verwendet werden. Sollten die Daten auf NUTS3-Ebene vorliegen, so werden diese

anhand eines relevanten Verteilungsmaßes, das auf LAU-Ebene vorliegen muss, heruntergebrochen. Als Verteilungsmaß eignen sich z. B. die Einwohner je LAU-Zelle oder die Fläche der LAU-Zelle. Das Vorgehen ist dabei identisch zu dem in Formel (1). Die Points-of-Interest unterscheiden sich ebenfalls je nach betrachtetem Use Case. So können z. B. multimodale Knotenpunkte, Messengelände oder Stadien als Points-of-Interest (POI) berücksichtigt werden. Diese werden standortgenau verortet und können entweder als Datenbank vorliegen und der jeweiligen LAU-Zelle zugeordnet oder händisch recherchiert und eingearbeitet werden. Die Zuordnung zu der jeweiligen LAU-Zelle kann bei georeferenzierten Daten mit Hilfe der Geoinformationssoftware QGIS automatisiert erfolgen. Für die anbindungsbezogenen Merkmale ist die Zuordnung aller LAU-Zellen im Untersuchungsgebiet in die Kategorien des Zentralen Orte Systems notwendig. Je nach Bundesland liegen diese entweder als Shape-Datei, Karte oder Liste im Landesentwicklungsplan vor.

Generell bietet es sich an, jeweils die aktuellen verfügbaren Daten zu nutzen. Es kann jedoch vorkommen, dass die Erhebungsjahre sich für verschiedene Merkmale unterscheiden. In der vorliegenden Methodik wird dem begegnet, indem nicht die absoluten Zahlen der Merkmale für die Abschätzung des Vertiportbedarfs genutzt werden, sondern aus den Daten der einzelnen Merkmale für jede LAU-Zelle Faktoren gebildet werden. Diese Faktoren bilden lediglich das Verhältnis zwischen der LAU-Zelle und dem gesamten Untersuchungsgebiet ab und werden deshalb im Weiteren mit den anderen Merkmalen unabhängig des Erhebungsjahres verglichen.

2.2 Anwendung

Nach der Recherche und Aufbereitung der relevanten Merkmale werden diese weiterverarbeitet. Dabei besteht die Methodik wie in Abbildung 1 dargestellt aus verschiedenen Ebenen.

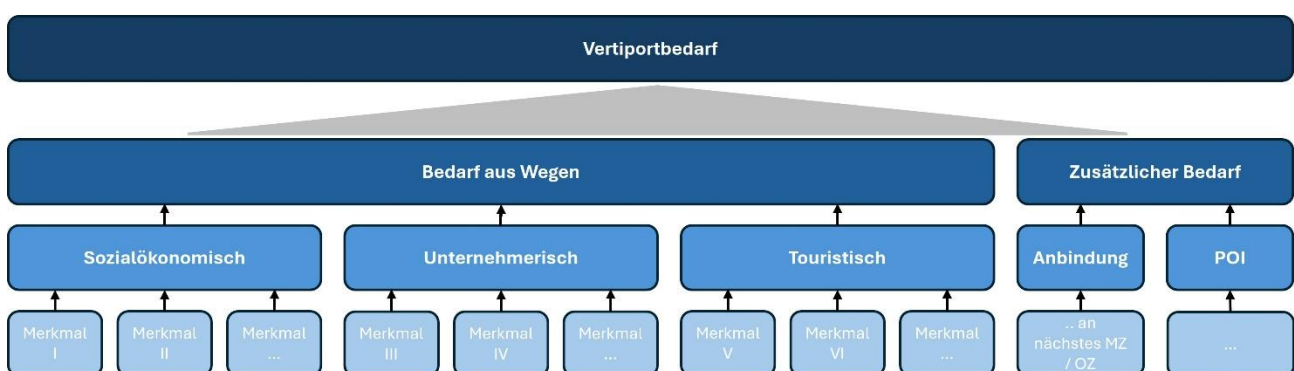


Abbildung 1: Methodischer Aufbau der Ermittlung des Vertiportsbedarfs

Der Vertiportbedarf ergibt sich aus Kombination des Ergebnisses aus der Wegeanzahl und einem potentiell zusätzlichen Bedarf durch eine ungenügende Anbindung an den nächsten Zentralen Ort oder einen relevanten POI gemäß Formel (2).

$$\begin{aligned} \text{Vertiportbedarf}_{LAU} \\ = \text{Bedarf aus Wegen}_{LAU} + \text{Bedarf durch ZO}_{LAU} + \text{Bedarf durch POI}_{LAU} + \end{aligned} \quad (2)$$

Bedarf aus Wegen

Die Ermittlung des Vertiportbedarfs ergibt sich gemäß Formel (3) aus den jährlichen Wegen, die potentiell mit dem Flugtaxi zurückgelegt werden.

$$\text{Bedarf aus Wegen}_{LAU} = \frac{\text{Wegebedarf}_{LAU}}{365} * \frac{1}{K * b} \quad (3)$$

mit

Wegebedarf_{LAU} Flugtaxi-Wegebedarf in der LAU-Zelle/a
 K Kapazität eines Vertiports / h [PAX/h]
 b Täg. Betriebsstunden des Vertiports [h]

Der jährliche Wegebedarf ergibt sich wiederum aus den drei Bedarfskategorien: sozioökonomische Merkmale der Zielgruppen, unternehmerische Merkmale sowie touristische Merkmale. Falls relevant können weitere Kategorien in die Betrachtung aufgenommen werden. Für die Ermittlung des Wegebedarfs pro Jahr wird gemäß Formel (4) vorgegangen.

$$\text{Wegebedarf}_{LAU} = \text{Wege}_{LAU} * U + \text{Wege}_{LAU} * U * \sum_{i=1}^m v_{LAU,i} * g_i \quad (4)$$

mit

Wege_{LAU} Wege in und aus der LAU-Zelle/a
 U Umsteigequote
 i Bedarfskategorien
 v_{LAU} Verteilungsfaktor der LAU-Zelle
 g_i Gewichtungsfaktor
 $\sum g_i = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}$

Der Verteilungsfaktor gibt somit an, in welcher Zelle des Untersuchungsgebiets ein überdurchschnittliches Aufkommen des Merkmals vorliegt. Er wird je Bedarfskategorie ermittelt. Typische Bedarfskategorien fassen sozioökonomische, unternehmerische und touristische Merkmale zusammen. Der Verteilungsfaktor der Zelle wird gemäß Formel (5) ermittelt.

$$v_{LAU,i} = \sum_{j=1}^n v_{LAU,ij} * f_{ij} \quad (5)$$

mit

v_{LAU} Verteilungsfaktor der LAU-Zelle

i Bedarfskategorie

j Merkmal

f_{ij} Gewichtungsfaktor

$$\sum f_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}$$

In jede der Bedarfskategorien gehen die jeweiligen Merkmale ein. Für die sozioökonomische Bedarfskategorie können das z. B. das Alter oder das Einkommen der Zielgruppe sein. Unternehmerische Merkmale können z. B. die Arbeitnehmer am Arbeitsort oder Niederlassungen mit mehr als 250 Beschäftigten sein. Für die Auswertung des touristischen Bedarfs eignen sich beispielsweise die Anzahl der touristischen Ankünfte in der jeweiligen Zelle. Eine Übersicht der im Projekt VertiNet verwendeten Merkmale ist im Anhang in Tabelle 2 zu finden. Die Merkmale werden abhängig von dem zu untersuchenden Use Case gewählt und ergänzt. Dabei gilt es zu beachten, dass für jede Zelle des Untersuchungsgebiets die Ausprägung des Merkmals vorliegen muss. Sollte das Merkmal in einer größeren räumlichen Ebene als notwendig vorliegen, werden die Informationen gemäß Formel (1) und mit der Wahl eines passenden Verteilungsmaßes auf die feinere räumliche Ebene heruntergebrochen. Es ist zu beachten, dass dabei immer eine Vereinfachung der Realität stattfindet. Der Verteilungsfaktor für das jeweilige Merkmal ergibt sich gemäß Formel (6).

$$v_{LAU,ij} = N_{UG} + \frac{\frac{a_{LAU,ij}}{\varnothing a_{Unt,ij}} - (1 - \max(|\frac{a_{LAU,ij}}{\varnothing a_{Unt,ij}} - 1|))}{\max(|\frac{a_{LAU,ij}}{\varnothing a_{Unt,ij}} - 1|) * 2} * |N_{UG} - N_{OG}| \quad (6)$$

mit

v_{LAU} Verteilungsfaktor der LAU-Zelle

i Bedarfskategorie

j Merkmal

N_{UG} Untergrenze des Normierungsbereichs

N_{OG} Obergrenze des Normierungsbereichs

$a_{LAU,ij}$ Ausprägung des Merkmals j in der LAU-Zelle

$\varnothing a_{Unt,ij}$ Durchschnitt aller Ausprägungen j im Untersuchungsgebiet

Die Normierung der Merkmale sorgt dafür, dass die Größenordnung der Merkmale vergleichbar sind und ihr Einfluss dadurch im Verhältnis zueinandersteht. Die Normierungsgrenzen werden abhängig davon gewählt, wie groß der Einfluss der Merkmale im Verhältnis zur Umsteigerate sein sollen. Je breiter die Normierungsgrenzen gewählt werden, desto größer wird der Verteilungsfaktor und damit auch der Einfluss der Merkmale.

Zur Anwendung der Methodik werden die Formeln nach Vorbereitung der benötigten Daten (vgl. Kapitel 2.1) in umgekehrter Reihenfolge (Formel (6) bis Formel (2)) angewendet.

Bedarf durch ZO

Die Anbindung an den nächsten Zentralen Ort wird auf Grundlage von Christallers Zentrale Orte Theorie [3] geprüft. Diese gibt an, wie groß die Reisezeit von einem Grundzentrum zu dem nächsten Mittelzentrum bzw. dem nächsten Oberzentrum, sowie von einem Mittelzentrum zu dem nächsten Oberzentrum sein darf (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Richtwerte für die Erreichbarkeit zentraler Orte gemäß der Richtlinie für integrierte Netzgestaltung (RIN) [4]

Anbindung an [Zentralen Ort]	Reisezeit mit dem Pkw (in Min.)
Nächstes Mittelzentrum	≤ 30
Nächstes Oberzentrum	≤ 60

Zur Überprüfung der Anbindung wird für jede LAU-Zelle zunächst der nach Einwohnern gewichtete Mittelpunkt ermittelt. Dies erfolgt anhand der Daten aus dem Zensus [5] und kann mit einem Geoinformationssystem (z. B. QGIS) automatisiert erfolgen. Für die Anbindung der Zellen wird anschließend die Reisezeit im leeren Netz zwischen den die gewichteten Mittelpunkten ermittelt und so geprüft, ob für die Grund- und Mittelzentren eine ausreichende Anbindung an den nächsten Zentralen Ort vorliegt. Die Reisezeiten können händisch ermittelt werden oder über eine API automatisiert abgerufen werden. Durch die Nutzung des leeren Netzes werden aufkommensbedingte Reisezeitenverlängerungen nicht berücksichtigt, sodass zum einen die Vergleichbarkeit unter den Zellen gewährleistet ist. Zum anderen werden diejenigen Zellen ermittelt, in denen selbst unter guten Bedingungen keine ausreichende Anbindung vorliegt und damit die Sicherung von Chancengerechtigkeit in den Teilräumen in angemessener Weise, wie im Raumordnungsgesetz §2 vorgeschrieben, nicht gewährleistet ist. Sollte keine ausreichende Anbindung für die jeweilige Zelle vorliegen, so wird mindestens ein Vertiport empfohlen, um diese zu gewährleisten. In der Berechnung des Vertiportbedarf wird entsprechend geprüft, ob aus dem Bedarf der Wege mindestens ein Vertiport hervorgeht. Sollte dies der Fall sein, wird für die Anbindung an die Zentralen Orte kein weiterer Vertiport hinzugefügt. Sollte in der Zelle kein Vertiport aufgrund der nachgefragten Wege ermittelt worden sein, so wird ein Vertiport zur Verbesserung der Anbindung hinzugefügt.

Bedarf durch POI

Für die POIs muss im Einzelfall geprüft werden, ob diese den Bedarf für einen zusätzlichen Vertiport erzeugen oder dieser in dem Bedarf aus den Wegen enthalten ist. Mögliche POIs können je nach Use Case für das Geschäftsmodell z. B. multimodale Knotenpunkte wie Flughäfen oder Bahnhöfe oder aufkommensstarke Orte, wie z. B. ein Sportstadion, eine touristische Attraktion oder ein großer Unternehmensstandort sein. Die Vertiports aus den POIs sollten also separat ausgewiesen werden und nur bei Bedarf direkt in den Vertiportbedarf eingehen. Zudem muss davon ausgegangen werden, dass der Verkehr zu und von POIs bereits in der Verkehrsprognose berücksichtigt ist und daher lediglich der durch ein UAM-Angebot entstehende zusätzliche Verkehr berücksichtigt werden sollte.

2.3 Ergebnisauswertung und -darstellung

Für die Interpretation der Ergebnisse ist vor allem die Wahl der Gewichtungen relevant. Je nach zu untersuchendem Use Case können einzelne Bedarfskategorien oder Merkmale durch entsprechende Gewichtungen hervorgehoben werden.

Die Ergebnisse der Methodik geben an, wie viele Vertiports innerhalb einer LAU-Zelle unter den berücksichtigten Annahmen empfohlen werden. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass jeder Vertiport im Tagesverlauf gleichmäßig und vollständig ausgelastet sein soll. Einflussgrößen, wie der Preis oder Akzeptanz der Bevölkerung spiegeln sich ausschließlich in der angenommenen Umsteigerate wider und werden nicht im Einzelnen untersucht. Ziel ist, diejenigen Zellen zu ermitteln, für die ein überdurchschnittlicher Bedarf im Gegensatz zum gesamten Untersuchungsgebiet besteht. Die konkrete Anzahl der ermittelten Vertiports stellt dabei eine Größenordnung dar und muss bei Bedarf für die einzelnen Zellen überprüft werden. Ebenso ist die Verortung der Vertiports innerhalb der Zelle nicht Bestandteil der Methodik und muss zusätzlich erfolgen.

Da die Ergebnisse für jede LAU-Zelle georeferenziert vorliegen, können die Ergebnisse über die Verknüpfung der IDs leicht in einer Geoinformationssoftware (z. B. QGIS) dargestellt werden. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für eine Ergebnisdarstellung mit QGIS.

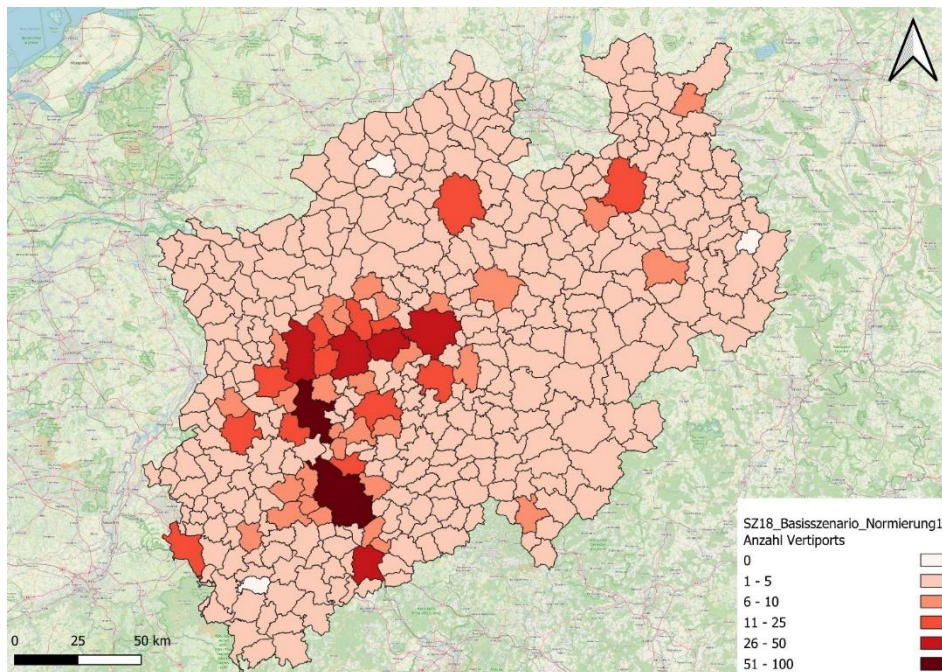


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse aus der Bedarfsermittlung (Projekt VertiNet)

2.4 Übertragbarkeit

Die entwickelte Methodik ist auf verschiedenen Ebenen auf andere Projekte und Anwendungsfälle als das Projekt VertiNet übertragbar.

Das Untersuchungsgebiet kann beliebig auf andere Räume angewendet werden, für die entsprechende Daten vorliegen. Dabei ist es möglich, auch kleinere oder größere Räume zu untersuchen und so beispielsweise eine Betrachtung für die gesamte Bundesrepublik durchzuführen.

Neben der räumlichen Übertragbarkeit ist auch eine zeitliche Übertragbarkeit möglich. Durch die Nutzung von Prognosewerten für kommende Jahre können Ergebnisse für das Zieljahr erstellt werden. Dabei gilt es zu beachten, für welche Jahre die einzelnen Merkmale vorliegen und dies bei der Interpretation ggf. zu berücksichtigen.

Auch eine inhaltliche Übertragbarkeit der Methodik auf andere Use Cases für den Flugtaxibetrieb oder andere Mobilitätslösungen ist möglich. Dafür müssen die untersuchten Merkmale sowie die Gewichtungsfaktoren entsprechend dem Ziel der Untersuchung angepasst werden.

3 Berücksichtigung bestehender Infrastruktur

3.1 Vorbereitende Arbeiten

Nach Ermittlung des Vertiportbedarfs (vgl. Kapitel 2) kann zusätzlich die im Untersuchungsgebiet bestehende Infrastruktur berücksichtigt werden. Dadurch wird der Vertiportbedarf in den Zellen, in der bereits eine überdurchschnittliche Anbindung an bestehende bodengebundene Verkehrsträger gegeben ist, nach unten bzw. in unterdurchschnittliche angebundenen Zellen nach oben korrigiert.

Als Vorbereitung für die Berücksichtigung ist zunächst eine Recherche der bestehenden Infrastruktur notwendig. Dabei können sowohl Zugangspunkte als auch Streckenlängen innerhalb der Zelle relevant sein. Je nach Betriebskonzept und dadurch entstehender Konkurrenz zwischen den Verkehrsträgern und -mittel sind unterschiedliche Kennzahlen notwendig. Die Kennzahlen müssen jeweils für die einzelnen Zellen im Untersuchungsgebiet vorliegen. Für die Herstellung der Vergleichbarkeit der Flächenabdeckung zwischen den Zellen wird die Anzahl der Zugangspunkte oder Streckenlänge für jede Zelle bezogen auf die Bodenfläche in der Zelle relevant.

Für den luftgebundenen Verkehr ist eine Recherche aller potenziell für den Flugtaxibetrieb nutzbarer Flugplätze je Zelle notwendig. Dabei kann in potentiell nutzbare Flugplätze und Flugplätze, die nur mit einer umfangreicheren Genehmigungsanpassung für den Flugtaxibetrieb genutzt werden könnten, unterschieden werden. Sonderlandeplätze sind nur einem bestimmten Nutzerkreis zugänglich und damit nicht betriebspflichtig. [6] Sie kommen damit nicht ohne neue Genehmigung für den kommerziellen Flugtaxibetrieb in Frage. Zusätzlich können Helikopterlandeplätze, die sich nicht auf privatem Gelände befinden oder für Rettungsflüge genutzt und freigehalten werden, für den Flugtaxibetrieb vorgesehen werden. Für nicht öffentliche Plätze kann im Einzelfall geprüft, ob eine Nutzung aufgrund genehmigungsrechtlicher sowie kapazitativer Beschränkungen unter Einverständnis des Eigentümers möglich ist. Dies sollte aufgrund des Rechercheaufwands erst bei Betrachtung einzelner Zellen stattfinden. Diese Plätze werden somit nicht in der Methodik berücksichtigt.

Für den schienengebundenen Verkehr sind insbesondere die Zugangspunkte zu berücksichtigen. Dabei muss je nach untersuchtem Betriebskonzept entschieden werden, ob alle Bahnhöfe oder etwa nur Fernbahnhöfe betrachtet werden. Für die Einbindung in die Methodik wird die Anzahl der jeweiligen Bahnhöfe für jede Zelle benötigt. Zusätzlich können bei Bedarf auch Streckenkilometer der Schiene innerhalb der Zelle einbezogen werden. Dabei muss beachtet werden, wofür die Strecken (Güter-, Regional oder Fernverkehr) genutzt werden und je nach Untersuchung die relevanten Strecken ermittelt werden.

Für den straßengebundenen Verkehr können unterschiedliche Straßenklassen berücksichtigt werden. Dabei können die Streckenlängen je Zelle einbezogen werden. Für Autobahnen und Bundesstraßen kann es zusätzlich relevant sein, die Dichte der Anschlussstellen innerhalb einer Zelle zu untersuchen. Dafür muss die Anzahl der Anschlussstellen vorliegen.

Beispiele für entsprechende Daten und Kennzahlen sowie ihre Verfügbarkeit innerhalb von Deutschland sind im Anhang in Tabelle 3 zusammengefasst.

3.2 Anwendung

Nach der Recherche und Aufbereitung der bestehenden Infrastrukturen werden diese weiterverarbeitet und der in Kapitel 2 ermittelte Vertiportbedarf angepasst. Dabei werden unterschiedliche Fälle und die Infrastrukturen auf verschiedene Weisen berücksichtigt. Abgängig von der Verfügbarkeit der Anbindung an die bodengebundenen Verkehrsträger (Straße und Schiene) wird der Vertiportbedarf nach oben oder unten korrigiert, da davon ausgegangen wird, dass die Verkehrsmittel für einige Nutzer als Substitute angesehen werden. Die Anzahl der Vertiports verändert sich im Ergebnis jedoch nur, wenn der Einfluss der bestehenden Infrastruktur groß genug ist. Werden innerhalb der Zelle nutzbare Flugplätze identifiziert, so wird die Anzahl der neu zubauenden Vertiports um die Anzahl der nutzbaren Flugplätze reduziert. Es wird davon ausgegangen, dass ein bestehender Flugplatz einen neu zu bauenden Vertiport ersetzt. Es wird dabei also lediglich die Zahl der neu zu bauenden Vertiports ersetzt. Der Gesamtbedarf verändert sich nicht, da bisher keine luftgebundenen Verkehrsmittel bestehen, die als Substitute für den Flugtaxiverkehr angesehen werden.

Fall 1 – Kein Vertiport vorgesehen, gute Anbindung an bestehende Infrastrukturen

Sollte in der Bedarfsermittlung kein Vertiport vorgesehen sein und gleichzeitig eine überdurchschnittliche Anbindung an bestehende Infrastrukturen innerhalb der Zelle vorliegen, so wird der Vertiportbedarf nicht angepasst und bleibt bei 0.

Fall 2 – Kein Vertiport vorgesehen, schlechte Anbindung an bestehende Infrastrukturen

Sollte in der Bedarfsermittlung kein Vertiport vorgesehen sein und gleichzeitig eine unterdurchschnittliche Anbindung an bestehende Infrastrukturen innerhalb der Zelle vorliegen, so wird gemäß Formel (7) vorgegangen. Sollte der Vertiportbedarf dabei negativ werden, wird er auf 0 gesetzt.

$$Vertiportbedarf_{LAU,Infra} = Vertiportbedarf_{LAU} - F_{LAU} + \sum_{k=1}^o h_k * v_{LAU,Infra,k} * (-1) \quad (7)$$

mit

$Vertiportbedarf_{LAU,Infra}$ Vertiportbedarf mit Infrastrukturberücksichtigung in der LAU-Zelle

$Vertiportbedarf_{LAU}$ aus Bedarfsermittlung

F_{LAU} Anzahl bestehender nutzbarer Flugplätze in der LAU-Zelle

k Bodengebundene Infrastrukturen

h_k Gewichtungsfaktor

$v_{LAU,Infra,k}$ Verteilungsfaktor bodengebundene Infrastruktur in der LAU-Zelle

$$\sum h_k = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, o\}$$

Fall 3 –Vertiport vorgesehen

Sollte in der Bedarfsermittlung mindestens ein Vertiport vorgesehen sein, so wird gemäß Formel (8) vorgegangen. Sollte der Vertiportbedarf dabei negativ werden, wird er auf 0 gesetzt.

$$\begin{aligned} Vertiportbedarf_{LAU,Infra} &= Vertiportbedarf_{LAU} - F_{LAU} \\ &+ \sum_{k=1}^o h_k * Vertiportbedarf_{LAU} * v_{LAU,Infra,k} * (-1) \end{aligned} \quad (8)$$

mit

$Vertiportbedarf_{LAU,Infra}$ Vertiportbedarf mit Infrastrukturberücksichtigung in der LAU-Zelle

$Vertiportbedarf_{LAU}$ aus Bedarfsermittlung

F_{LAU} Anzahl bestehender nutzbarer Flugplätze in der LAU-Zelle

k Bodengebundene Infrastrukturen

h_k Gewichtungsfaktor bodengebundene Infrastruktur

$v_{LAU,Infra,k}$ Verteilungsfaktor bodengebundene Infrastruktur in der LAU-Zelle

$$\sum h_k = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, o\}$$

Die Gewichtungsfaktoren h_k werden für jeden Verkehrsträger einzeln festgelegt und geben an, wie stark die bestehenden Bodeninfrastrukturen jeweils den Vertiportbedarf beeinflussen.

Der Verteilungsfaktor der bodengebunden Verkehrsträger $v_{LAU,Infra}$ lässt sich gemäß Formel (9) ermitteln. Der Aufbau der Formel orientiert sich dabei an der Formel (6) zur Ermittlung von dem Verteilungsfaktor v_{LAU} .

$$v_{LAU,Infra,k} = N_{Infra,UG} + \frac{\frac{a_{LAU,k}}{\varnothing a_{Unt,k}} - (1 - \max(|\frac{a_{LAU,k}}{\varnothing a_{Unt,k}} - 1|))}{\max(|\frac{a_{LAU,k}}{\varnothing a_{Unt,k}} - 1|) * 2} * |N_{Infra,UG} - N_{Infra,OG}| \quad (9)$$

mit

$v_{LAU,Infra,k}$	Verteilungsfaktor der LAU-Zelle
k	Bodengebundene Infrastrukturen
$N_{Infra,UG}$	Untergrenze des Normierungsbereichs für die Infrastrukturberücksichtigung
$N_{Infra,OG}$	Obergrenze des Normierungsbereichs für die Infrastrukturberücksichtigung
$a_{LAU,k}$	Ausprägung der Infrastruktur k in der LAU-Zelle
$\varnothing a_{Unt,k}$	Durchschnitt aller Ausprägungen k im Untersuchungsgebiet

Wie bei der Bedarfsermittlung (vgl. Kapitel 2) sorgt die Normierung dafür, dass die Größenordnung der Kennzahlen vergleichbar sind und ihr Einfluss dadurch im Verhältnis zueinandersteht. Die Normierungsgrenzen werden unabhängig von den in Kapitel 2 gewählten Grenzen ausgewählt. Je breiter die Normierungsgrenzen gewählt werden, desto größer wird der Verteilungsfaktor und damit auch der Einfluss der Kennzahlen.

Zur Anwendung der Methodik werden die Formeln nach Vorbereitung der benötigten Daten (vgl. Kapitel 3.12.1) in umgekehrter Reihenfolge (Formel (9) bis Formel (7)) angewendet.

3.3 Ergebnisauswertung und -darstellung

Für die Interpretation der Ergebnisse ist vor allem die Wahl der Gewichtungen relevant. Je nach zu untersuchendem Use Case können einzelne Verkehrsträger oder deren Kennzahlen hervorgehoben werden.

Die Ergebnisse der Methodik geben an, wie viele Vertiports innerhalb einer LAU-Zelle unter Berücksichtigung der bestehenden Infrastruktur empfohlen werden. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel für eine Ergebnisdarstellung mit QGIS.

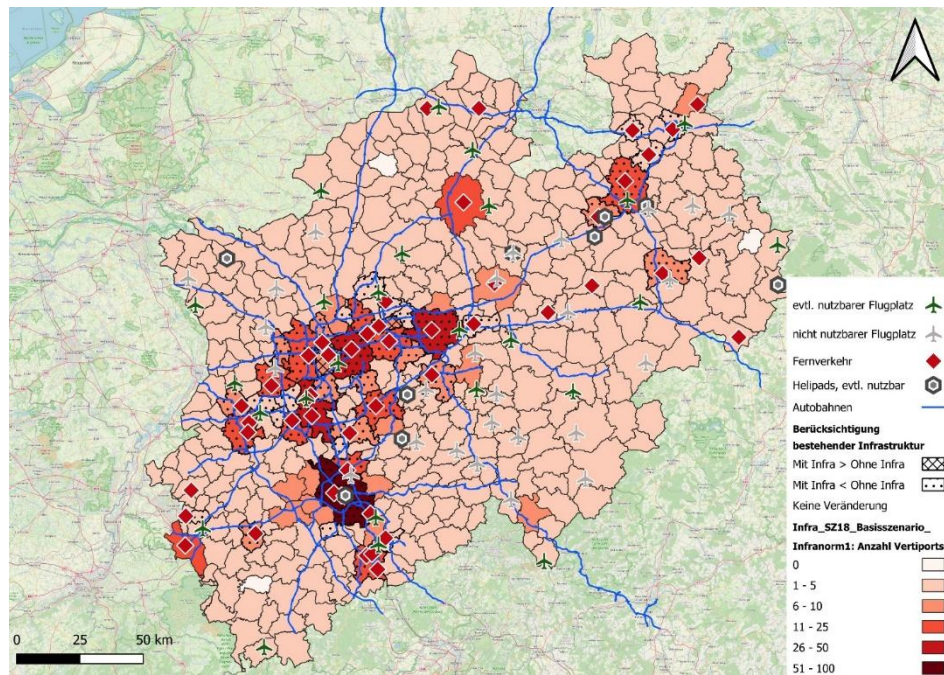


Abbildung 3: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse aus der Bedarfsermittlung unter Berücksichtigung bestehender Infrastrukturen (Projekt VertiNet)

4 Literaturverzeichnis

- [1] Intraplan Consult GmbH, BVU Beratergruppe Verkehr+ Umwelt GmbH, *Verkehrsverflechtungsprognose 2030*, BMVI, Hrsg., 2014.
- [2] BMDV, „Verkehrsprognose 2040,“ 2023. [Online]. Available: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsprognose-2040.html>. [Zugriff am 19.02.2024].
- [3] W. Christaller, *Die zentralen Orte in Süddeutschland*, Jena, 1933.
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, *Richtlinie für integrierte Netzgestaltung (RIN)*, Köln, 2008.
- [5] Zensus Datenbank, „Code: 1000A-1002,“ 09. Mai 2011. [Online]. Available: <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online/statistic/1000A/table/1000A-1002>. [Zugriff am 2024].
- [6] ADV, „Sonderflughafen/ Sonderlandeplatz,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.adv.aero/randomizer/sonderflughafen-sonderlandeplatz/>. [Zugriff am 30.04.2024].
- [7] Regionaldatenbank Deutschland, „Beherbergungsbetriebe, Schlafgelegenheiten, Gästeankünfte, Gästeübernachtungen (Tabelle 45412-01-03-4),“ 01. Januar 2022. [Online]. Available: <https://www.regionalstatistik.de/genesis//online?operation=table&code=45412-01-03-4&bypass=true&levelindex=1&levelid=1714461824069#abreadcrumb>. [Zugriff am 2024].
- [8] Regionaldatenbank Deutschland, „Eckzahlen zu den Pendelnden und der Bevölkerung am Wohn- bzw. Arbeitsort (Tabelle 19321-Z-01),“ 01. Januar 2023. [Online]. Available: <https://www.regionalstatistik.de/genesis//online?operation=table&code=19321-Z-01&bypass=true&levelindex=0&levelid=1714461579705#abreadcrumb>. [Zugriff am 2024].
- [9] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, „Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder - Einkommensverteilung,“ 17. Mai 2023. [Online]. Available: <https://www.statistikportal.de/de/vgrdl/ergebnisse-laenderebene/einkommen/ek#9563>. [Zugriff am 2024].
- [10] Statistisches Bundesamt, „Niederlassungen nach Beschäftigtengrößenklassen (Tabelle 52111-01-01-4),“ 2022. [Online]. Available:

- <https://www.regionalstatistik.de/genesis//online?operation=table&code=52111-01-01-4&bypass=true&levelindex=0&levelid=1692364577017#abreadcrumb>. [Zugriff am 2024].
- [11] Statistisches Bundesamt, „Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte am Arbeitsort (Tabelle 13111-0005),“ 2022. [Online]. Available: <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=13111-0005&bypass=true&levelindex=1&levelid=1714127234209#abreadcrumb>. [Zugriff am 2024].
- [12] Regionaldatenbank Deutschland, „Kraftfahrzeugbestand nach Kraftfahrzeugarten (Tabelle 46251-01-03-4),“ 01 Januar 2023. [Online]. Available: https://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=find&suchanweisung_language=de&query=Kraftfahrzeugbestand#abreadcrumb.
- [13] Regionaldatenbank Deutschland, „Bevölkerung nach Geschlecht/Nationalität und höchstem Schulabschluss (Tabelle 12111-09-01-4),“ 09 Mai 2011. [Online]. Available: https://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=find&suchanweisung_language=de&query=Bev%C3%B6lkerung+Schulabschluss#abreadcrumb.
- [14] Deutsche Bahn Station & Service AG, „Deutsche Bahn Haltestellen,“ Esri Deutschland, 01. 2020. [Online]. Available: https://arc-gis-hub-home-arcgishub.hub.arcgis.com/datasets/dda46d26a9a84bc3aa9dc75cc3a1eaae_0/explore?location=50.975827%2C10.524898%2C6.84. [Zugriff am 30.04.2024].
- [15] Informatik und Technik Nordrhein-Westfalen, „Straßennetz Landesbetrieb Straßenbau NRW,“ 2023. [Online]. Available: https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/transport_verkehr/strassennetz/. [Zugriff am 29.04.2024].

Anhang

Tabelle 2: Auswahl an in Deutschland verfügbaren und für das Projekt VertiNet genutzten Merkmalen

Verfügbare Daten	Verwendetes Merkmal	Quelle
Zentrale Orte	Funktion	Landesentwicklungspläne der Länder
Touristische Ankünfte	Touristische Ankünfte/ Bodenfläche	Regionaldatenbank Deutschland [7]
Pendelnde	Einpendelnde/ Beschäftigte am Arbeitsort Auspendelnde/ Beschäftigte am Wohnort	Regionaldatenbank Deutschland [8]
Bevölkerungszahlen	Anteil EW zwischen 15 und 64 Jahren an Gesamtbevölkerung	Zensus [5]
Primäreinkommen	Primäreinkommen	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder [9]
Niederlassungen nach Mitarbeiterzahlen	Niederlassungen > 250 Mitarbeiter/ Bodenfläche	Regionalstatistik (Statische Ämter des Bundes und der Länder) [10]
Sozialversicherungsbeschäftigte am Arbeitsort	Arbeitnehmer am Arbeitsort/ Bodenfläche	Regionalstatistik (Statische Ämter des Bundes und der Länder) [11]
Sozialversicherungsbeschäftigte am Wohnort	Erwerbstätigenquote ab 15 Jahren	Regionalstatistik (Statische Ämter des Bundes und der Länder) [11]
PKW-Bestand	PKW/ Einwohner	Regionaldatenbank Deutschland [12]
Schulabschluss	Anteil Hochschulreife an Einwohnern ab 15 Jahren	Regionaldatenbank Deutschland [13]
Verkehrswege	Verkehrswege von Bahn, MIV & O-ESPV	Verkehrsverflechtungsprognose 2030 [1]

Tabelle 3: Auswahl an in Deutschland verfügbaren und für das Projekt VertiNet genutzten Infrastrukturdaten

Verfügbare Daten	Verwendetes Merkmal	Quelle
Flugplätze	Räumliche Lage	Eigenständige Recherche
Helikopterlandeplätze	Räumliche Lage	Eigenständige Recherche
Fernbahnhöfe	Anzahl Fernbahnhöfe/Bodenfläche	DB Station & Service AG [14]
Autobahnanschlussstellen	Anzahl Autobahnanschlussstellen/ Bodenfläche	Landesbetrieb Straßenbau NRW [15]
Autobahnstreckenkilometer	Anzahl Autobahnstreckenkilometer/ Bodenfläche	Landesbetrieb Straßenbau NRW [15]