|  |
| --- |
| Dokumentation |
| FE 70.919/2015 Anforderungen an städtische  Verkehrsnachfragemodelle  Vorlage Kalibrierungs- und Validierungsbericht | |
|  | |
| Stand: 18.11.2019 | |
| Friedrich, M.; Pestel, E.; Schiller, C.; Simon, R.; Heidl, U.; Pillat, J.: Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle. FE-Projekt 70.893/2014, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2019 | |

Inhaltsverzeichnis

[Vorbemerkung zur Nutzung der Vorlage des Kalibrierungs- und Validierungsberichts 4](#_Toc25581847)

[1 Vorbemerkungen zur Dokumentation 4](#_Toc25581848)

[1.1 Zielstellung der Dokumentation 4](#_Toc25581849)

[1.2 Aufbau der Dokumentation 4](#_Toc25581850)

[2 Vorbemerkungen zum Kalibrierungs- und Validierungsbericht 5](#_Toc25581851)

[2.1 Allgemeine Informationen 5](#_Toc25581852)

[2.2 Ausgangslage, Problemanalyse und Ziele 6](#_Toc25581853)

[2.3 Einsatzbereiche des Verkehrsnachfragemodells und gewünschte Modellergebnisse 6](#_Toc25581854)

[3 Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau des Verkehrsnachfragemodells 7](#_Toc25581855)

[4 Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung 7](#_Toc25581856)

[5 Überprüfen der Eingangsdaten 7](#_Toc25581857)

[5.1 Verkehrserhebungsdaten 7](#_Toc25581858)

[5.1.1 Daten aus Haushaltsbefragungen 7](#_Toc25581859)

[5.1.2 Daten zur Verkehrsstärke 7](#_Toc25581860)

[5.1.3 Daten zu Fahrzeiten 8](#_Toc25581861)

[5.2 Siedlungsstrukturdaten 8](#_Toc25581862)

[5.3 Verkehrsangebotsdaten 8](#_Toc25581863)

[6 Kalibrierung des Verkehrsmodells 9](#_Toc25581864)

[6.1 Kalibrierungsprozess 9](#_Toc25581865)

[6.2 Setzung / Schätzung von Modellparametern 9](#_Toc25581866)

[6.3 Korrekturverfahren 9](#_Toc25581867)

[7 Validierung 10](#_Toc25581868)

[7.1 Überprüfung der Modellparameter 10](#_Toc25581869)

[7.1.1 Parameter Verkehrsangebot 10](#_Toc25581870)

[7.1.2 Parameter Erzeugung 10](#_Toc25581871)

[7.1.3 Parameter Zielwahl 10](#_Toc25581872)

[7.1.4 Parameter Moduswahl 10](#_Toc25581873)

[7.1.5 Parameter Umlegung 10](#_Toc25581874)

[7.2 Überprüfung der Modellergebnisse 11](#_Toc25581875)

[7.2.1 Erzeugung 11](#_Toc25581876)

[7.2.2 Zielwahl 11](#_Toc25581877)

[7.2.3 Moduswahl 11](#_Toc25581878)

[7.2.4 Umlegung 11](#_Toc25581879)

[7.2.5 Korrekturverfahren 11](#_Toc25581880)

[7.3 Überprüfung des Modellverhaltens 12](#_Toc25581881)

[7.3.1 Sensitivitätstests 12](#_Toc25581882)

[7.3.2 Realitätstests 12](#_Toc25581883)

[7.3.3 Konsistenztests 12](#_Toc25581884)

[7.4 Abschließende Validierung 12](#_Toc25581885)

[8 Abschätzung der Prognosegenauigkeit 12](#_Toc25581886)

[9 Literaturverzeichnis 12](#_Toc25581887)

# Vorbemerkung zur Nutzung der Vorlage des Kalibrierungs- und Validierungsberichts

In der Vorlage sind Textbausteine und Tabellen enthalten, die direkt genutzt werden können und nicht verändert werden müssen.

*Im grau dargestellten Text werden die geforderten Inhalte des jeweiligen Kapitels beschrieben. Diese Texte müssen durch die konkreten Beschreibungen und Erläuterungen des jeweiligen städtischen Modellvorhabens ausgetauscht werden.*

# Vorbemerkungen zur Dokumentation

## Zielstellung der Dokumentation

Das Bereitstellen einer Dokumentation des Verkehrsnachfragemodells ist essentiell, um der Forderung nach Transparenz und Reproduzierbarkeit gerecht zu werden. Dieser Bericht hat zum Ziel, den Modellaufbau (inklusive aller Annahmen und Teilmodelle) derart zu dokumentieren, dass Modellierern, Modellanwendern und Ergebnisnutzern das Arbeiten mit dem Modell und seinen Ergebnissen adäquat ermöglicht wird. Dazu gehört auch, die Einsatzbereiche und die Einschränkungen des Modells klar zu benennen. Das Modellhandbuch wird für folgende Zielgruppen erstellt:

* Modellierer, d.h. Personen, die das Nachfragemodell verändern oder weiterentwickeln wollen bzw. das Modell in der Tiefe verstehen wollen.
* Modellanwender, d.h. Personen, die mit einem kalibrierten Modell arbeiten wollen.
* Ergebnisnutzer, d.h. Personen, die nur mit den Ergebnissen des Modells arbeiten, ohne das Modell vorliegen zu haben bzw. ohne Fachkenntnis im Bereich der Verkehrsmodellierung.

## Aufbau der Dokumentation

Die Gliederung der Dokumentation orientiert sich am Forschungsbericht „Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle“ (FE-Projekt 70.893/2014) [2].

Die Dokumentation des Verkehrsmodells umfasst:

* Ein separates Modellhandbuch:   
  Zunächst werden Metainformationen zu Zielstellung und Aufbau der Dokumentation sowie zu Ausgangslage, Problemanalyse, Zielen und Einsatzbereichen des Verkehrsnachfragemodells gegeben (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird der Aufbau des Verkehrsnachfragemodells erläutert, indem zunächst die Datengrundlagen und die wesentlichen Datenaufbereitungsschritte dargestellt und dann verwendete Methoden zum Aufbau des Nachfragemodells und des Angebotsmodells erläutert werden. Eine Zusammenfassung des Kalibrierungsprozesses sowie die Ergebnisse der Validierung erfolgen in Kapitel 4. Das etwaige Vorgehen zum Aufbau des Prognosefalls wird in Kapitel 5 näher beleuchtet. Der Umgang und die Handhabung des Modells werden in Kapitel 6 beschrieben. Existieren verschiedene Modellzustände bzw. Szenarien, werden diese in Kapitel 7 zusammenfassend dargestellt. Kapitel 8 gibt einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen des Modells und Kapitel 9 enthält eine zusammenfassende Modellanleitung für fachfremde Personen, die keinen Verkehrsmodellierungshintergrund aufweisen.
* Den vorliegenden Kalibrierungs- und Validierungsbericht:   
  Zunächst werden analog zum Modellhandbuch Metainformationen zu Zielstellung und Aufbau der Dokumentation sowie zu Ausgangslage, Problemanalyse, Zielen und Einsatzbereichen des Verkehrsnachfragemodells gegeben (Kapitel 2). Kapitel 3 beschreibt den Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau des Nachfragemodells. Die Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung des Modells erfolgt in Kapitel 4. Kapitel 5 umfasst die Überprüfung der Eingangsdaten zur Realisierung des Modellvorhabens. Die Kalibrierung des Modells wird in Kapitel 6 beschrieben, die Validierung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellvorhabens erfolgt in Kapitel 7. Aussagen zur Prognosefähigkeit werden in Kapitel 8 getroffen.

# Vorbemerkungen zum Kalibrierungs- und Validierungsbericht

Die Validierung umfasst alle Teilbereiche des Modellerstellungsprozesses (Aufbereitung der Eingangsdaten, Parameterbestimmung, Prüfung der Modellergebnisse und des Modellverhaltens). Neben der der Prüfung des Modellendergebnisses sollten auch die einzelnen Modellstufen geprüft werden, um eine Fehlerfortpflanzung über die Modellstufen hinweg zu minimieren. Wird ein Teilbereich nicht validiert, so ist dies mit einer Begründung in der Dokumentation zu vermerken. Diese Information ist für nachfolgende Modellnutzer wichtig, um einen Eindruck über die Validität des Modells zu erhalten.

Die Dokumentation enthält eine Auflistung aller Einflussvariablen der Nutzenfunktionen und stellt dar, in wieweit jede Einflussgröße das Modellergebnis beeinflusst. Der Einfluss der Variablen wird in Realitäts-, Sensitivitäts- und Konsistenztests simulativ quantifiziert. Die Ergebnisse dieser Tests sind im Validierungsteil der Dokumentation dargestellt. Gegebenenfalls können somit auch Bandbreiten der Nutzenfunktionsparameter abgeleitet werden.

## Allgemeine Informationen

Folgende Tabelle 2‑1 fasst die wichtigsten Metainformationen zum Verkehrsmodell zusammen.

|  |  |
| --- | --- |
| Information | Kurzbeschreibung / Ausprägung |
| Bezeichnung des Nachfragemodells (inkl. Versionsnummer) |  |
| Bezeichnung des Berichts (inkl. Versionsnummer) |  |
| Auftraggeber: Organisation + Adresse | *Kontaktadresse* |
| Auftraggeber: verantwortliche Personen | *Name, Telefonnummer, Email* |
| Auftraggeber: Kontaktpersonen | *Name, Telefonnummer, Email* |
| Finanzierende Institution | *Kontaktadresse* |
| Auftragnehmer: Organisation + Adresse | *Kontaktadresse* |
| Auftragnehmer: verantwortliche Personen | *Name, Telefonnummer, Email* |
| Auftragnehmer: Kontaktpersonen | *Name, Telefonnummer, Email* |
| Beauftragungsdatum |  |
| Fertigstellungsdatum |  |
| Abnahmedatum |  |
| Verwendete Software | *Bezeichnung Hersteller Version / Release, Kontaktadresse* |
| Hardwareanforderungen |  |
| Verfügbarkeit des Verkehrsnachfragemodells | *Nutzungsmöglichkeit, Rahmenbedingungen zur Weitergabe an Dritte* |

Tabelle 2‑1: Allgemeine Informationen zum Verkehrsnachfragemodell.

## Ausgangslage, Problemanalyse und Ziele

Dieser Teil der Dokumentation gibt dem Leser einen Einblick in den verkehrlichen Hintergrund des Untersuchungsraumes. Folgende Themen können hier aufgegriffen werden:

Aktuelle Fragestellungen im verkehrlichen Kontext des Planungsgebietes

*Tabellarische Darstellung möglich*

Bestehende relevante Verkehrsmodelle

*Tabellarische Darstellung möglich inkl. Einsatzbereiche und inwieweit Konsistenz bzw. Unterschiede bestehen.*

Notwendigkeit des zu erstellenden Verkehrsnachfragemodells

*Tabellarische Darstellung möglich*

Anforderungen und Funktionalitäten des Verkehrsnachfragemodells

*Tabellarische Darstellung möglich, inwiefern die Anforderungen durch vorhandene Funktionalitäten des Modells erfüllt werden. Hierbei sind auch jene Anforderungen zu kennzeichnen, die nicht oder nur teilweise erfüllt werden.*

## Einsatzbereiche des Verkehrsnachfragemodells und gewünschte Modellergebnisse

*Hier ist eine Liste der gewünschten Modellergebnisse aufzuführen bzw. aus dem Modellhandbuch zu übernehmen und eine Evaluation, in welcher Qualität diese Modellergebnisse bereitgestellt werden.*

# Qualitätssicherungsprozess beim Aufbau des Verkehrsnachfragemodells

*Der Qualitätssicherungsprozess beim Modellaufbau sollte mit seinen verschiedenen Phasen beschrieben werden. Beteiligte Institutionen / Projektpartner / Personen sollten namentlich benannt werden.*

# Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung

*Dieser Teil der Qualitätsprüfung wird ggf. von einer unabhängigen, dritten Partei durchgeführt, muss aber trotzdem ausreichend dokumentiert werden, d.h. es muss mindestens eine Prozessbeschreibung und eine Darstellung des Prüfungsergebnisses stattfinden.*

# Überprüfen der Eingangsdaten

*Ziel dieses Dokumentationsteils ist die Darstellung der Eingangsdatenqualität. Dabei sollte auf folgende Punkte eingegangen werden:*

* *Informationen zur Befragung / Erhebung / Datenbasis,*
* *ggf. Aussagen über die Datengrundlage, Grundgesamtheit und Stichprobenzusammensetzung,*
* *Darstellung von Auswertungsergebnissen,*
* *Informationen zur Qualität der Daten (Genauigkeit, Streuung, Aktualität).*

## Verkehrserhebungsdaten

### Daten aus Haushaltsbefragungen

*Es sind Aussagen bzgl. abgeleiteter Modellparameter (Mobilitätsraten, Häufigkeiten von Personengruppen, Kennwerte für die Validierung) zu treffen. Eine tabellarische Darstellung ist möglich.*

### Daten zur Verkehrsstärke

*Es sind Aussagen bzgl. erhobener Zählwerte zu treffen, ggf. differenziert nach Verkehrsmitteln. Eine tabellarische Darstellung ist möglich. Dabei sollten Konfidenzintervalle, Erhebungsjahr, Zahl der Erhebungstage, Erhebungszeitraum und erfasste Fahrzeug- bzw. Personenklassen für jede Zählstelle angegeben werden.*

### Daten zu Fahrzeiten

*Es sind Aussagen bzgl. Fahrzeiten (z.B. aus Erhebungen, von Datenanbietern oder aus Routensuchportalen) zu treffen, ggf. differenziert nach Verkehrsmitteln. Eine tabellarische Darstellung ist möglich.*

## Siedlungsstrukturdaten

*Folgende Kenngrößen der Siedlungsstruktur sollten überprüft werden:*

* *Siedlungsdichte (Einwohner bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellenebene,*
* *Arbeitsplatzdichte (Arbeitsplatzdichte bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Zellenebene,*
* *Verhältnis der Arbeitsplätze pro Einwohner und der Erwerbstätigen pro Arbeitsplatz auf Gemeindeebene,*
* *Verhältnis der Schüler pro Schulplätze auf Gemeindeebene,*
* *Vergleich der aggregierten Siedlungsstrukturdaten (Einwohner, Beschäftigte am Arbeitsplatz) auf Gemeindeebene mit Daten der statistischen Ämter,*
* *Stichprobenhafte Prüfung von Standortdaten, die als POI vorliegen.*

## Verkehrsangebotsdaten

*Auf der Ebene von Netzelementen sind die Ergebnisse folgender Tests darzulegen:*

* *Anzahl der Arme pro Knotenpunkt (z.B. maximal 5 Zufahrten pro Knotenpunkt),*
* *Vergleich der Netzlängen nach Straßenklasse und Vergleich mit Werten aus der amtlichen Statistik,*
* *Vergleich der mittleren Geschwindigkeit je Straßenklasse und Ortslage mit Erwartungswerten oder Messergebnissen,*
* *Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal ein Schienenhaltepunkt je Zelle).*

*Auf Relationsebene sollten Testergebnisse offengelegt werden:*

* *Vergleich der Kenngrößen (Reisezeiten, ggf. Fahrpreise) und der Fahrtrouten für ausgewählte Relationen mit Daten aus unabhängigen Quellen, z.B. einem Routenplanungsprogramm oder Floating Car Data,*
* *Berechnung und Überprüfung relationsbezogener Kenngrößen:*
* *Ist das Netz zusammenhängend, d.h. kann für jede Relation die Reisezeit berechnet werden,*
* *Luftliniengeschwindigkeit: Werte, die nach den Richtlinien für die integrierte Netzgestaltung (RIN [1]) als sehr gut oder sehr schlecht eingestuft werden, sollten überprüft werden,*
* *Umwegfaktor: Werte über 1,5 sollten überprüft werden,*
* *Reisezeitverhältnis ÖV / Pkw: dieser Wert sollte üblicherweise zwischen 0,5 (ÖV ist doppelt so schnell wie Pkw) und 5 liegen (ÖV ist 5-mal langsamer als der Pkw),*
* *Reisezeitverhältnis Hin- und Gegenrichtung: In der Normalverkehrszeit sollten beide Richtungen ähnliche Werte aufweisen,*
* *Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Fahrtzeit,*
* *Anteil der Anbindungszeiten (Zu- und Abgang) an der gesamten Reisezeit,*
* *die Netzbelastungen sollten bei einer Bestwegumlegung in beiden Richtungen ähnlich sein,*
* *die Netzbelastungen in einem unabhängigen Netzmodell (z.B. OpenStreetMap) sollten im Hauptstraßennetz ähnlich sein.*

# Kalibrierung des Verkehrsmodells

*Der Kalibrierungsprozess für jedes Teilmodell sollte grob skizziert werden. Die manuellen Eingriffe ins Modell (z.B. durch harte Randsummenbedingungen oder Matrixkorrekturen) müssen unbedingt dokumentiert werden und mit entsprechenden Modellberechnungen ohne diese Eingriffe verglichen werden.*

## Kalibrierungsprozess

*Der Kalibrierungsprozess für das Verkehrsangebotsmodell ist zu erläutern, z.B. iteratives Setzen der Anbindungen und deren Zeiten, iteratives Anpassen der Strecken- und Knotentypisierung.*

## Setzung / Schätzung von Modellparametern

*Das Setzen und Schätzen von Parametern und ggf. das Einführen von Matrizen, die den Widerstand verändern, ist zu erläutern.*

## Korrekturverfahren

*Das Vorgehen bei der Verwendung von Korrekturverfahren (z.B. Matrixkorrekturverfahren) ist zu erläutern.*

# Validierung

*Die Dokumentation der Validierungsergebnisse sollte, wenn nicht ohnehin im Kapitel zur Überprüfung der Eingangsdaten geschehen, auf die verwendeten Referenzdaten eingehen, sowie deren Güte darstellen.*

## Überprüfung der Modellparameter

*Die Modellparameter des Verkehrsangebots und aller Modellstufen sind zu prüfen und die Prüfungsergebnisse sind darzustellen. Sollte das Modell noch andere als die hier aufgeführten Entscheidungsstufen umfassen, sind diese als Kapitel entsprechend zu ergänzen.*

### Parameter Verkehrsangebot

*Die Parameter sollten hinsichtlich Plausibilität,* *Vorzeichen, Verhältnis und Wertebereich geprüft werden. Dies betrifft z.B. Parameter der CR-Funktionen, aber auch gesetzte Parameter auf Einzelobjektebene wie Komfortfaktoren für ÖV-Verkehrsmittel, Spitzenstundenfaktoren und Kapazitäten bei Strecken usw.*

### Parameter Erzeugung

*Die Parameter sollten hinsichtlich* *Vorzeichen, Verhältnis und Wertebereich geprüft werden. Parameter der Erzeugung sind beispielsweise die Erzeugungs- und Attraktionsraten, Anteile zum Bestimmen des Binnenverkehrsanteils in Bezug auf den Untersuchungsraum usw.*

### Parameter Zielwahl

*Die Parameter sollten hinsichtlich* *Vorzeichen, Verhältnis und Wertebereich geprüft werden. Parameter der Zielwahl sind z.B. Komponenten der Nutzenfunktion, verwendete Korrekturmatrizen bzw. Korrekturfaktoren, die für das Einhalten der Randsummenbedingungen bzw. das Erreichen der mittleren Reiseweiten entstehen.*

### Parameter Moduswahl

*Die Parameter sollten hinsichtlich* *Vorzeichen, Verhältnis und Wertebereich geprüft werden. Parameter der Moduswahl sind z.B. Komponenten der Nutzenfunktion, verwendete Korrekturmatrizen bzw. Korrekturfaktoren, die für das Einhalten der Modal-Split-Werte entstehen.*

### Parameter Umlegung

*Die Parameter die Widerstandsfunktion für die Routen- bzw. Verbindungssuche und für die Routenwahl sollten hinsichtlich* *Vorzeichen, Verhältnis und Wertebereich geprüft werden.*

## Überprüfung der Modellergebnisse

### Erzeugung

*Die Prüfungsergebnisse für Vergleiche der berechneten Anzahl der Wege mit Anzahl befragter Wege auf verschiedenen Aggregationsebenen sind darzustellen.*

### Zielwahl

*Die Prüfungsergebnisse für folgende Vergleiche auf verschiedenen Aggregationsebenen sind darzustellen:*

* *berechnete Reiseweiten- und Reisezeitverteilung vs. Reiseweiten- und Reisezeitverteilung aus Befragungen,*
* *berechnete mittlere Reiseweiten und Reisezeiten vs. mittleren Reiseweiten und Reisezeiten aus Befragungen.*

### Moduswahl

*Die Prüfungsergebnisse für Vergleiche der berechneten Modal-Split-Anteile mit Modal-Split-Anteilen aus Befragungen, differenziert nach Entfernungsklassen sind für verschiedene Aggregationsebenen darzustellen.*

### Umlegung

*Die Prüfungsergebnisse für Vergleiche der berechneten Verkehrsstärken mit erhobenen Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen oder an Screenlines sind darzustellen. Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch einen Polygonzug definiert wird. Alle Strecken, die durch den Polygonzug geschnitten werden, gehören zur Screenline, z.B. alle Brücken über einen Fluss. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.*

### Korrekturverfahren

*Im Zuge eines Matrixkorrekturverfahrens ist auszuweisen, wie groß der Einfluss der Korrektur ist. Dies beinhaltet Aussagen zur Größenordnung der Korrektur und Aussagen zur Ähnlichkeit der unkorrigierten und der korrigierten Matrizen. Die Auswertung sollte dabei wie folgt durchgeführt werden:*

* *für Matrizen des Verkehrsaufkommens (Nachfragematrizen) und Matrizen der Verkehrsleistung bzw. des Verkehrszeitaufwandes,*
* *getrennt für Planungsraum und Einflussraum sowie für alle relevanten Teilräume des Untersuchungsraumes (z.B. Landkreise),*
* *für alle Korrekturen sowie getrennt für positive und für negative Korrekturen.*

*Ergänzend erfolgt die Darstellung eines Differenzplots aus der Umlegung der Matrizen vor und nach der Korrektur.*

## Überprüfung des Modellverhaltens

### Sensitivitätstests

*Hier sollten die Ergebnisse der vorher definierten Sensitivitätstests dargestellt werden.*

### Realitätstests

*Hier sollten die Ergebnisse der vorher definierten Realitätstests dargestellt werden.*

### Konsistenztests

*Hier sollten die Ergebnisse der vorher definierten Konsistenztests dargestellt werden.*

## Abschließende Validierung

*Hier sollten die Ergebnisse einer Prüfung der Modellergebnisse mit einem bis zu diesem Zeitpunkt unbenutzten Datensatz dargestellt werden.*

# Abschätzung der Prognosegenauigkeit

*Die zu erwartende Fehlerspannbreite ist anzugeben. Zusätzlich kann eine Erläuterung des Aussagedetailgrades stattfinden, z.B. eine Einordnung der Modellgenauigkeit hinsichtlich verschiedener Einsatzbereiche des Modells oder Grenzen sinnvoller Modellanwendungen. Es sollte auch angegeben werden, auf welcher räumlichen Aggregationseinheit bzw. auf welcher Netzelementebene eine entsprechende Qualität zu erwarten ist.*

Literaturverzeichnis

[1] *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* (Hrsg.): Richtlinien für integrierte Netzgestaltung. RIN. FGSV R1 - Regelwerke. 121. ISBN: 3939715794. FGSV Verlag, Köln 2008

[2] *Friedrich, M.; Pestel, E.; Schiller, C.; Simon, R.; Heidl, U.; Pillat, J.*: Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle. FE-Projekt 70.893/2014, Entwurf. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2019