

EINNAHMEAUFTEILUNGSVERFAHREN

ÜBERREGIONALER WESTFALENTARIF

Anlage 5e.3 Beschreibung des Umlegungsverfahrens

Detlef Kamlah

PTV
Transport Consult GmbH
Stumpfstr. 1
76131 Karlsruhe

Karlsruhe, 11.05.2017

Version 2.2

Dokumentinformationen

Kurztitel	Verfahrensbeschreibung Umlegung
Auftraggeber:	
Auftrags-Nr.:	
Auftragnehmer:	PTV Transport Consult GmbH
Bearbeiter:	Detlef Kamlah
Erstellungsdatum:	19.09.2016 von PTV
zuletzt gespeichert:	17.05.2017 von PTV
Speicherort:	T:\OWL_Einnahmenaufteilung\Umlegung\Anlage_4e_Einnahmenaufteilungsverfahren_Westfalentarif_161010.docx

Versionen

Versionen	Stand	Sitzung	Änderung(en)
1.0	19.01.2016		Erstversion
2.0	09.12.2016		Einarbeitung der Rückmeldungen aus Vertragsprüfung
2.1	27.02.2017		Aktualisierung gemäß Rückmeldungen und aktueller Festlegungen
2.2	11.05.2017	AG Einnahmenaufteilung Nr. 38	Ergänzungen

Inhalt

1	Grundlagen	4
2	Modellaufbau	5
2.1	Verkehrszelleneinteilung	5
2.2	Anbindungen	6
2.3	Berechnung Linienlängen.....	6
2.4	Mindestumsteigezeiten.....	6
2.5	Tarifmodell.....	7
3	Umlegungsverfahren	8
4	Umlegungsparameter	9
4.1	Modellversion	9
4.2	Umlegungszeitraum.....	9
4.3	Ganglinie	9
4.4	Routensuche	10
4.5	Widerstandsberechnung, Eigenständigkeit.....	11
4.6	Aufteilungsmodell/ Wahlverfahren.....	12
4.7	Screenshots Umlegungsparameter	12
5	Ergebnisse.....	17
6	Anhang.....	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verkehrszelleneinteilung	5
Abbildung 2:	Ganglinie	10
Abbildung 3:	Verwendete Umlegungsparameter	16
Abbildung 4:	Beispiel Benutzeroberfläche Datenbank	17

1 Grundlagen

Für die Einnahmenaufteilung für den überregionalen WestfalenTarif werden für relationsbezogene Tickets die Ergebnisse einer Umlegung von Fahrgästen benutzt. Dabei basiert die Umlegung auf folgenden Grundsätzen:

- Relevant sind alle Relationen von einem Tarifgebiet zu einem anderen Tarifgebiet, in denen der überregionale WestfalenTarif zur Anwendung kommt. Dabei handelt es sich um Tarifräume überschreitende Relationen, die nicht durch etwaige Kragentarife abgedeckt sind. In der Umlegung wird je Relation jeweils eine Nachfrage von 1.000 Fahrgästen pro Tag hinterlegt und umgelegt.
- Jedes Tarifgebiet wird in der Regel durch eine zentrale Referenzhaltestelle vertreten. Diese Haltestelle kann mehrere Haltestellenbereiche oder Haltestellen in der Nähe umfassen, zwischen denen umgestiegen werden kann (z. B. ein Bahnhof und ein in der Nähe liegender ZOB). Die Haltestellenbereiche bzw. Haltestellen sind durch Fußwege verbunden.
- In Abhängigkeit der Linienanbindungen haben Tarifgebiete mehrere Referenzhaltestellen, die räumlich nicht zusammenliegen, aber für bestimmte überregionale westfälische Relationen eine wichtige Bedeutung haben. Die Referenzhaltestellen sind von den Tarifräumen festgelegt. Zusätzlich ist je Referenzhaltestelle bezogen auf das gesamte Tarifgebiet der Anteil des Aufkommens angegeben, der im Rahmen der Umlegung auf die jeweilige Referenzhaltestelle entfällt.
- Für die Umlegung wird ein komplettes Liniennetz inklusive Fahrplan über eine Datenschnittstelle aus dem Fahrplansystem DIVA übernommen. Dieses deckt die relevanten Verbindungen im gesamten Tarifgebiet des WestfalenTarifs vollständig ab. Es enthält sowohl SPNV-Linien als auch ÖSPV-Linien.
- Die übernommenen Daten sind auf Vollständigkeit zu prüfen. Wenn einzelne Linien fehlen, können sie vereinfacht von Hand mit systematisierten Fahrplänen wie z. B. Stundentakte von Betriebsbeginn bis Betriebsende nachgetragen werden. Wenn Haltestellenkoordinaten fehlen, sind diese manuell nachzuverorten.

Ziel der Umlegung ist es, je relevanter Tarifgebietsrelation einen nach Linien differenzierten Personenkilometer (PKm)-Schlüssel aus den umgelegten Personen zu bekommen. Relevant sind dabei nur Linien, die nicht als Zu- bzw. Abbringerlinien in den Start- bzw. Zieltarifgebieten gelten. Für die Umlegung sind die Daten des 3. Dienstags im Januar zu verwenden. Sofern Baustellen oder Sperrungen an diesem Tag zu wesentlichen Angebotsänderungen führen, kann alternativ für die betroffenen Linien ein repräsentativer Stichtag Mo-Fr an Schultagen verwendet werden.

2 Modellaufbau

2.1 Import Fahrplandaten

Die Fahrplandaten für das Untersuchungsgebiet können aus EFA/DIVA in mehreren Paketen über die DINO-Schnittstelle für einen repräsentativen Werktag exportiert werden. Hierbei ist zu gewährleisten, dass der Fahrplan vollständig, das heißt unter Berücksichtigung sämtlicher Abfahrts- und Ankunftszeiten bzw. sämtlicher Fahr- und Haltezeiten in das System importiert wird. Entsprechende Tests sind durchzuführen.

2.2 Verkehrszelleneinteilung

Für eine Umlegung benötigt man eine Verkehrszelleneinteilung. Die Verkehrszellen orientieren sich an den Gemarkungen der Gemeinde/Städte im Untersuchungsraum.

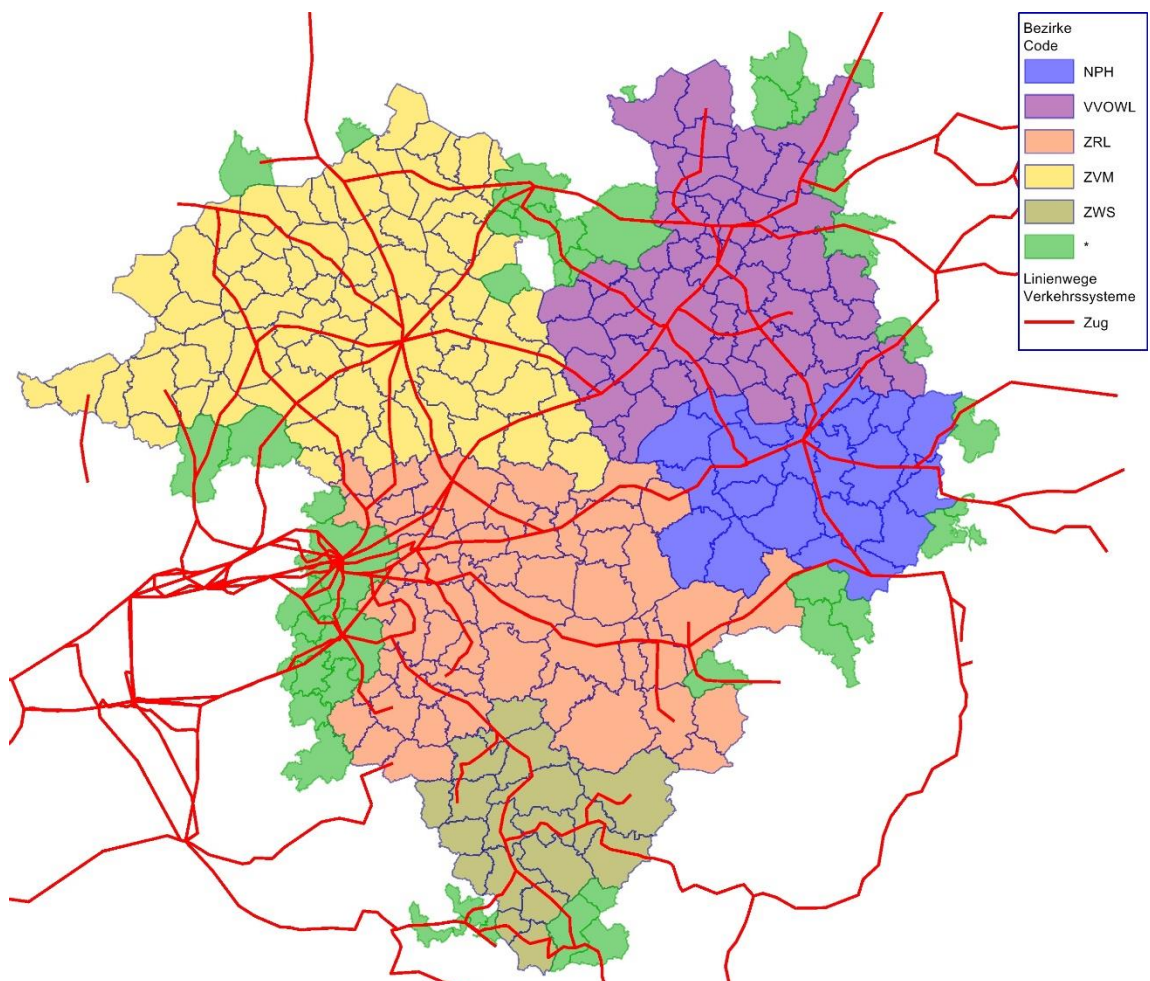


Abbildung 1: Verkehrszelleneinteilung

2.3 Anbindungen

Die Anbindungen wurden anhand der Vorgaben der Tabelle Referenzhaltestellen modelliert. Die vorgegebenen Anbindungsanteile wurden als absolute Anteile für die Quell- und Zielanbindungen hinterlegt. In Fällen mit fehlenden oder unrealistischen Anteilen wurden diese korrigiert. Es ist ein Protokoll der Fahrplandatenübernahme und der nachfolgenden Änderungen und Ergänzungen zu erstellen und beizufügen. Eine Liste der verwendeten Referenzhaltestellen sowie ihrer Anteile befindet sich in Anlage 5e.4 zum Einnahmeaufteilungsvertrag.

2.4 Lage der Haltestellen / Haltepunkte

Nach dem Import der Fahrplandaten sind die geografischen Lagen der Haltestellen und Haltepunkte zu prüfen und ggf. zu korrigieren. Falsche Lagen können bei der Nebenrechnung der Linienlängen zu fehlerhaften Linienlängen und damit zu fehlerhaften Pkm-Berechnungen führen.

2.5 Berechnung Linienlängen

Sofern die übernommenen Netz- und Fahrplandaten Entfernungen enthalten, werden diese auf Plausibilität geprüft und übernommen. Fehlende oder nicht plausible Entfernungen werden aus der Luftlinienlänge gewichtet mit einem Umwegfaktor von 1,2 ermittelt. Empfehlenswert ist eine Wertung als nicht plausibel, falls die übernommenen Längen zwischen Haltestellen kleiner als die Luftlinienlänge sind oder um mehr als Faktor 2 über der Luftlinienlänge liegen.

2.6 Mindestumsteigezeiten

Vor allem größere Haltestellen verfügen über mehrere Haltestellenbereiche. Somit erfolgt für Umsteigevorgänge eine differenzierte zeitliche Bewertung. Die Mindestumsteigezeit innerhalb eines Haltestellenbereichs beträgt 0 Minuten. Damit können z. B. Rendez-Vous Techniken (zeitgleiches Umsteigen zwischen Linien) abgebildet werden, die vor allem im Busverkehr ihre Anwendung finden. Die Mindestumsteigezeiten zwischen unterschiedlichen Haltestellenbereichen einer Haltestelle betragen:

- 0 Minuten innerhalb des Verkehrssystems Bus,
- 0 Minuten innerhalb des Verkehrssystems Tram,
- 3 Minuten innerhalb des Verkehrssystems SPNV und
- 3 Minuten zwischen verschiedenen Verkehrssystemen

Das bedeutet, ein Anschluss kann nur erreicht werden, wenn die Abfahrtszeit der Anschlussfahrt mindestens gleich der Ankunftszeit an der Haltestelle plus der Mindestumsteigezeit stattfindet.

Für sämtliche Haltestellen des Verkehrssystems SPNV sind für mögliche Umstiege alle Haltestellen im Umkreis von 300 Metern über Fußwege angebunden. Die zusätzliche Mindestumsteigezeit zwischen diesen Haltestellen berechnet sich aus der Länge des Fußwegs multipliziert mit dem Umwegfaktor von 1,2 dividiert durch die Gehgeschwindigkeit von 1,111 m/s (4 km/h). Damit ist zu erwarten, dass alle bestehenden Umsteigemöglichkeiten in der Umlegung nachgebildet werden können.

2.7 Tarifmodell

Zur Ermittlung der durchfahrenen Tarifgebiete eines Weges wird ein Tarifmodell abgebildet. Im Tarifmodell wird für jede Gemeinde/Stadt im Untersuchungsraum ein Tarifgebiet hinterlegt. Fahrpreise werden nicht vorgegeben: die Umlegungsrechnung erfolgte dadurch unabhängig von der Zahl der durchfahrenen Tarifgebiete.

3 Umlegungsverfahren

Als Software für die Verkehrsmodellierung und Verkehrsumlegung wird PTV Visum mit dem Softwarerelease Visum 15 verwendet. Bei einer längerfristigen Verwendung des Modells wird ein Update des Modells auf das jeweils aktuelle Release empfohlen (1x pro Jahr). Visum ermöglicht, dass auch in zukünftigen Versionen die in Visum 15 definierten Parameter verwendet werden können. Die Umlegungsergebnisse sind so auch in zukünftigen Versionen reproduzierbar.

Als Umlegungsverfahren wurde die fahrplanfeine Umlegung in PTV Visum verwendet. Das fahrplanfeine Verfahren ermittelt für jede Quelle-Ziel-Relation Verbindungen. Das Entscheidungsmodell für die Verbindungswahl bildet das tatsächliche Entscheidungsverhalten der Fahrgäste realistisch ab, da ein Fahrgast in der Regel über Informationen über das ÖV-Angebot verfügt (Verbindungssuche) und dann aus den angebotenen Verbindungen auswählt (Verbindungswahl).

Das Verfahren ermittelt bei der Verbindungssuche (Branch & Bound-Suche) alle geeigneten Verbindungen im gesamten Untersuchungszeitraum. Je Quellbezirk wird ein Suchbaum geeigneter Teilverbindungen generiert, in dem alle hinreichend guten Verbindungen ab diesem Quellbezirk gespeichert sind. So wird nicht nur die für eine Relation beste, sondern eine Vielzahl guter Verbindungen gefunden. Auf diese Weise ist eine sehr differenzierte Verteilung der Verkehrsnachfrage möglich. Über die Parameter des Suchwiderstands kann schon während der Suche auf differenzierte Weise Einfluss auf die Art der gefundenen Verbindungen genommen werden.

Die vom Suchverfahren ermittelten Verbindungen werden bei der Verbindungsvorauswahl anhand allgemeiner Kriterien noch einmal dahingehend untersucht, ob manche von ihnen qualitativ deutlich unterlegen sind und gelöscht werden können.

Bei der Verbindungswahl wird die Nachfrage auf die ermittelten Verbindungen aufgeteilt. Hierzu werden Verbindungswiderstände definiert, die sich aus der empfundenen Reisezeit, dem Fahrpreis sowie der Abweichung von der Wunschabfahrtszeit zusammensetzt. Diese Widerstände dienen den Aufteilungsmodellen als Eingabe für die Berechnung der Anteile der Verbindungen. Hierbei kann wahlweise die Eigenständigkeit der Verbindungen mit berücksichtigt werden.

Als Aufteilungsmodell wird ein Logit-Ansatz genutzt. Hierbei werden die Differenzen der Widerstände als Aufteilungsregel verwendet. Der Parameter β dient zur Abbildung der Empfindlichkeit der Fahrgäste gegenüber erhöhten Widerständen.

4 Umlegungsparameter

4.1 Modellversion

Die Berechnungen werden mit PTV Visum 15 (ServicePack 15.00-14) durchgeführt.

4.2 Umlegungszeitraum

Als Umlegungszeitraum (möglicher Start von Routen) wird ein vollständiger Werktag (00:00 – 24:00) unterstellt.

4.3 Ganglinie

Zur Berücksichtigung der zeitlichen Verteilung der Fahrwünsche wird eine Ganglinie hinterlegt.

Die Ganglinie ist aus den Erhebungsdaten der SPNV-Erhebungen 2010 von Eurobahn, DB Regio, Abellio (Erhebung durch PTV Transport Consult) sowie Nordwestbahn und Westfalenbahn (Erhebung durch GVS) abgeleitet, die für die Untersuchung zur Entwicklung des Einnahmenaufteilungsverfahrens zur Verfügung gestellt wurden.

Dabei wurden nur Datensätze verwendet, die

- der Tagart Mo-Fr zugeordnet sind und
- zukünftig den Westfalen-Tarif nutzen (Übernahme von Daten aus dem Tarifgutachten der Firma Intraplan).

Die verwendete Ganglinie berücksichtigt innerhalb des Umlegungszeitraums eine stundenfeine Verteilung basierend auf der Abfahrtszeit. Die folgende Abbildung zeigt die verwendete Ganglinie:

Ganglinie bearbeiten

Nummer: 1
Name: Standard

	VonTag	VonZeit	BisTag	BisZeit	Gewicht	Anteil	Summe Anteil
1	1	00:00:00	1	01:00:00	112.000	1%	1%
2	1	01:00:00	1	02:00:00	19.000	0%	1%
3	1	02:00:00	1	03:00:00	0.000	0%	1%
4	1	03:00:00	1	04:00:00	0.000	0%	1%
5	1	04:00:00	1	05:00:00	84.000	1%	2%
6	1	05:00:00	1	06:00:00	221.000	2%	4%
7	1	06:00:00	1	07:00:00	639.000	6%	11%
8	1	07:00:00	1	08:00:00	569.000	6%	16%
9	1	08:00:00	1	09:00:00	398.000	4%	20%
10	1	09:00:00	1	10:00:00	579.000	6%	26%
11	1	10:00:00	1	11:00:00	504.000	5%	31%
12	1	11:00:00	1	12:00:00	431.000	4%	36%
13	1	12:00:00	1	13:00:00	599.000	6%	42%
14	1	13:00:00	1	14:00:00	646.000	6%	48%
15	1	14:00:00	1	15:00:00	693.000	7%	55%
16	1	15:00:00	1	16:00:00	738.000	7%	62%
17	1	16:00:00	1	17:00:00	782.000	8%	70%
18	1	17:00:00	1	18:00:00	864.000	9%	79%
19	1	18:00:00	1	19:00:00	649.000	6%	85%
20	1	19:00:00	1	20:00:00	666.000	7%	92%
21	1	20:00:00	1	21:00:00	329.000	3%	95%
22	1	21:00:00	1	22:00:00	203.000	2%	97%
23	1	22:00:00	1	23:00:00	204.000	2%	99%
24	1	23:00:00	2	00:00:00	69.000	1%	100%

Einfügen Mehrere ... Löschen OK Abbrechen

Abbildung 2: Ganglinie

4.4 Routensuche

Die Parameter für den Suchwiderstand orientieren sich an den Parametern für den Widerstand (siehe Kapitel 0). Aufgrund der verfahrensbedingten geringeren Komplexität des Suchwiderstands gibt es gegenüber dem Widerstand Vereinfachungen. Die Parameter sind bis auf folgende Punkte identisch:

- Bei der Gewichtung der Beförderungszeit im Fahrzeug wird nur der relative Zuschlag, nicht aber der absolute Zuschlag berücksichtigt.
- Bei der Umsteigehäufigkeit wird der Zuschlag pro Umstieg, nicht aber der Umsteigezuschlag in Abhängigkeit von der Teilwegfahrzeit berücksichtigt

Verbindungen einer Relation werden gelöscht, wenn eine der nachfolgenden Bedingungen eintritt:

- Suchwiderstand $> 1,50 \cdot \text{minimaler Suchwiderstand} + 10$
- Reisezeit $> 1,50 \cdot \text{minimale Reisezeit} + 10 \text{ min}$
- Umsteigehäufigkeit $> \text{minimale Umsteigehäufigkeit} + 2$
und Reisezeit nicht minimal ($\rightarrow$ Suche)

Umsteigehäufigkeit > minimale Umsteigehäufigkeit + 1

und Reisezeit nicht minimal (→ Vorauswahl) Bei der Wege-Suche im Rahmen der Umlegung werden alle geeigneten Verbindungen ermittelt. Umsteigepunkte müssen und können dabei nicht festgelegt werden. Bei abschnittsweise parallel verlaufenden Linien werden alle Verbindungen gefunden, solange sie die oben genannten Kriterien erfüllen und solange sie nicht eindeutig schlechter als eine andere Verbindung (z.B. identische Abfahrt, spätere Ankunft) sind.

Bei mehreren alternativen Umsteigemöglichkeiten einer Verbindung (Umstieg zwischen zwei Linien mit mehreren gemeinsamen Halten) wird mit den gewählten Einstellungen die erstmögliche Haltestelle verwendet. Damit entstehen zwar bei Betrachtung nach Richtungen in Bezug auf die Aufteilung nach Linien ungleiche Verteilungen (Richtungsüberhänge), die sich aber für beide Richtungen insgesamt nivellieren.

Der Wechsel des Tages (00:00 Uhr) spielt bei der Umlegung keine Rolle: es wird ein repräsentativer Werktag abgebildet, auf den wiederum das Angebot des repräsentativen Werktags folgt.

4.5 Widerstandsberechnung, Eigenständigkeit

Zur Berechnung des Widerstands werden Koeffizienten verwendet, die aus den Vorgaben der Standardisierten Bewertung¹ abgeleitet wurden.

Die Standardisierte Bewertung ist eine volkswirtschaftliche Nutzen-Kosten-Untersuchung, die im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr konzipiert wurde. Sie ist bei Maßnahmen, deren Fahrweginvestitionen 25 Mio. € übersteigen, als eine Voraussetzung für die Förderung gemäß Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (GVFG) zwingend vorgeschrieben.

In der Standardisierten Bewertung sind Bestandteile und Koeffizienten des Widerstandes vorgegeben. Anhand dieser Vorgaben wird folgende Widerstandsberechnung abgeleitet:

- Zugangszeiten/Abgangszeiten: pauschal 0 min
Zu- und Abgangszeiten sind für die Einnahmeaufteilung nicht relevant, da pro Bezirk Anbindungen mit festgelegten Anteilen definiert werden.
- Beförderungszeit im Fahrzeug: gewichtet mit einem absoluten und einem relativen Zeitzuschlag abhängig von den Systemeigenschaften
In der Standardisierten Bewertung werden die Qualitäten des Fahrwegs (Spurführung, Mischverkehr) sowie der Fahrzeuge (Kriterien Fahrzeugausstattung) be-

¹ Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV, Version 2006; Erstellt von Intraplan Consult, München und VWI, Stuttgart im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen

rücksichtigt. Anhand dieser Vorgaben wurden zur Berücksichtigung des subjektiven Qualitätsunterschiedes Bus/Bahn („Schienenbonus“) folgende Zuschläge abgeleitet:

- Zug/Stadtbahn
 - absoluter Zuschlag: 0 min
 - relativer Zuschlag/ Gewichtung Fahrzeit: x 1,00
 - Stadtbus/Regionalbus
 - absoluter Zuschlag: 1,8 min
 - relativer Zuschlag/ Gewichtung Fahrzeit: x 1,18
- Zuschlag pro Umstieg: 8 min pro Umstieg +
Umsteigezuschlag in Abhängigkeit von der Teilwegfahrzeit:
(gesamte Fahrzeit – max. Teilwegfahrzeit) / 2
- Umsteigegezeiten/ Umsteigewartezeiten: Gewichtung mit Faktor 1,30

Die Eigenständigkeit von Verbindungen berücksichtigt die Wechselwirkungen bzgl. Fahrplanlagen (Startzeit) zwischen verschiedenen Verbindungen. Z.B. werden gleichwertige Fahrtmöglichkeiten 08:00, 08:02 und 08:30 nicht zu je 33% genutzt, sondern es wird bei der Aufteilung die Lage der Fahrten zueinander berücksichtigt. Details zum Verfahren werden im Anhang dokumentiert (siehe Kap. 7.10.6.2 Eigenständigkeit von Verbindungen).

4.6 Aufteilungsmodell/ Wahlverfahren

Zum Wahlverfahren werden in der Standardisierten Bewertung keine Vorgaben gemacht. Als Aufteilungsmodell wird ein Logit-Ansatz gewählt. Zur Eichung des Parameters β wurde eine vereinfachte Kalibrierung anhand der stärksten Relationen der Erhebung 2010 durchgeführt. Ein Wert von $\beta = 0,03$ bildet die Erhebungsdaten am besten ab.

4.7 Screenshots Umlegungsparameter

In den folgenden Abbildungen werden die verwendeten Parameter der fahrplanfeinen Umlegung dargestellt.

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis | Suche | Vorauswahl | Widerstand | Wahl | Kenngrößenmatrizen | Kapazitätsbeschränkung | Auslastungsabhängig

☒ Umlegung berechnen
☐ Kenngrößenmatrizen berechnen
☐ Verbindungsexport
☐ Kapazitätsbeschränkung verwenden

☒ Anbindungsanteile verwenden
☐ detaillierte Protokolldateien schreiben

Quellen: bis

Betrachtete Relationen:

Umlegungszeitraum

von	00:00:00	23.02.2016
bis	24:00:00	23.02.2016
Vorlauf	0min	
Nachlauf	24h	

Wege ermitteln aus

☒ Verbindungssuche
☐ gespeicherten Verbindungen für NSeg
☐ Datei

X ÖV
 Dateiname: ...
☐ Fahrpreise importieren

zeitabhängige Widerstandsberechnung

☐ Ganglinienintervalle feiner aufrastern
 maximale Intervalllänge:

OK Abbrechen

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis Suche Vorauswahl Widerstand Wahl Kenngrößenmatrizen Kapazitätsbeschränkung Auslastungsabhängig

Allgemein

☐ Nur aktive Fahrplanfahrabschnitte berücksichtigen

Max. Anzahl Umsteigevorgänge 10

Suchverfahren Branch & Bound-Suche

Suchwiderstand =

	Koeffizient	Attribut		
	1,00	Fahrzeit im Fzg	*	...Faktor_Suche
+	1,00	ÖV-Zusatz-Fahrzeit	*	1.0
+	1,00	Zugangszeit		
+	1,00	Abgangszeit		
+	1,00	Gehzeit		
+	1,00	Umsteigewartezeit		
+	8min	Umsteigehäufigkeit		

Vorfaktoren auf ERZ-Definition übertragen

Abschneideregeln

Eine Verbindung wird gelöscht, wenn:

SuchWid > 1,50 * minimaler SuchWid + 10,00

oder Reisezeit > 1,50 * minimale Reisezeit + 10min

oder Umsteigehäufigkeit > min Umsteigehäufigkeit + 2

Dominanz...

OK Abbrechen

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis Suche Vorauswahl Widerstand Wahl Kenngrößenmatrizen Kapazitätsbeschränkung Auslastungsabhängig

Bei Beziehungen, für die Verbindungen sowohl mit ÖV (Linien- oder Zusatz-VSys) als auch ohne ÖV (nur Zugang, Abgang, Fußwege) gefunden wurden:

Alle Verbindungen ohne ÖV löschen

☒ Verbindungen löschen, die vollständig im Vor- oder Nachlauf liegen

☐ Für abfahrtszeitbezogene NSeg Verbindungen löschen, die schon vor Beginn des Umlegungszeitraums abfahren

☐ Für ankunftszeitbezogene NSeg Verbindungen löschen, die erst nach Ende des Umlegungszeitraums ankommen

1. Eine Verbindung wird gelöscht, wenn

SuchWid > 1,50 * minimaler SuchWid + 10,00

SuchWid wird entsprechend den Suchparametern berechnet.

2. Für alle verbleibenden Verbindungen: Eine Verbindung wird gelöscht, wenn

Reisezeit > 1,50 * minimale Reisezeit + 10min

und Umsteigehäufigkeit nicht minimal

oder

Umsteigehäufigkeit > minimale Umsteigehäufigkeit + 1

und Reisezeit nicht minimal

3. ☐ Für alle verbleibenden Verbindungen: Eine Verbindung wird gelöscht, wenn

empf. Reisezeit ERZ > 1,50 * mittlere ERZ + 0min

OK Abbrechen

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis | Suche | Vorauswahl | Widerstand | Wahl | Kenngrößenmatrizen | Kapazitätsbeschränkung | Auslastungsabhängig

empf. Reisezeit ERZ =

	Koeffizient	Attribut		BoxCox	Lambda
	0,00	Fahrzeit im Fzg	* 1.0	☐	1,00
+	0,00	ÖV-Zusatz-Fahrzeit	* 1.0	☐	1,00
+	1,30	Zugangszeit		☐	1,00
+	1,30	Abgangszeit		☐	1,00
+	1,30	Gehzeit		☐	1,00
+	0,00	Startwartezeit	Parameter	☐	1,00
+	1,30	Umsteigewartezeit	Parameter	☐	1,00
+	8min	Umsteigehäufigkeit	* Formel	☐	1,00
+	0min	Anzahl Betreiberwechsel	Parameter	☐	1,00
+	1,00	Erweiterter Widerstand	* Formel	☐	1,00

DeltaT = Zeitabstand von gewünschter und tatsächlicher Abfahrts- bzw. Ankunftszeit
☒ Verbindungen mit DeltaT > 0 berücksichtigen, wenn Verb. mit DeltaT = 0 existiert

Widerstand =

	Koeffizient	Attribut		BoxCox	Lambda
	1,00	ERZ [min]		☐	1,00
+	0,00	Fahrpreis		☐	1,00
+	1,00	DeltaT(früh) [min]		☐	1,00
+	1,00	DeltaT(spät) [min]		☐	1,00

OK Abbrechen

Erweiterter Widerstand in der empfundenen Reisezeit

Zugangs-, Abgangs-, Gehzeiten

☐ = $0,1500 \cdot \text{Teilwegzeit}^2 + 0,9000 \cdot \text{Teilwegzeit}$

Fahrzeit im Fahrzeug

☒ = $1,0000 \cdot \text{tzuschlag_ab} [\text{min}] + (1 + 1,0000 \cdot \text{itzuschlag_re}) \cdot \text{Teilwegzeit}$

Fahrplanfahrtelement-Attribut nach Fahrzeit gewichtet

Umsteigezuschlag in Abhängigkeit der Teilwegfahrzeit

☒ = $(\text{gesamte Fahrzeit} - \text{max. Teilwegfahrzeit}) / 2$

Zuschlag für Ein-, Aus- und Umstiege

☐ Einstieg = $1,0000 \cdot \text{...ZWert 1} [\text{s}]$

Ausstieg = $1,0000 \cdot \text{...ZWert 1} [\text{s}]$

Umstieg = $\max \{ 1,0000 \cdot \text{...ZWert 1} [\text{s}] \text{ am Einstieg, } 1,0000 \cdot \text{...ZWert 1} [\text{s}] \text{ am Ausstieg } \}$

Zuschlag für jeden Zwischenhalt

☐ = 0min

OK Abbrechen

Parameter Umlegungsverfahren: Fahrplanfein

Basis | Suche | Vorauswahl | Widerstand | Wahl | Kenngrößenmatrizen | Kapazitätsbeschränkung | Auslastungsabhängig

Aufteilungsmodell: Logit

Nutzen $U = e^{-\beta R}$
 R = Widerstand einer Verbindung
 β = 0,0300

Eigenständigkeit
☒ Eigenständigkeit verwenden

maximales Zeitfenster: 1h

Einfluss von ERZ und Fahrpreis: 1,0000 (0 = kein, 1 = max. Einfluss)

Wirkung auf Verb. mit hoher Qualität: 0,3000

Wirkung auf Verb. mit geringer Qualität: 0,6000

OK Abbrechen

Abbildung 3: Verwendete Umlegungsparameter

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Umlegung (ÖV-Teilwege: Linie, Fahrtweite, Anteil Nachfrage, genutzte Tarifzonen) werden aus dem Verkehrsmodell exportiert und in eine MS Access-Datenbank integriert.

In der Datenbank wurde eine Benutzeroberfläche entwickelt, bei der der Anwender für eine gewünschte Relation das Quell- und das Ziel-Tarifgebiet sowie ggf. die durchfahrenen Tarifgebiete auswählen kann:

Pkm_Schlüssel

Quell-Tarifgebiet:

Ziel-Tarifgebiet:

via (durchfahrene Tarifgebiete):

Pkm Anteil je Linie für Relation:

Konzession	Linie	Tarifraum	Pkm_Anteil
Eurobahn	RB50	ZVM / ZRL	67,83%
Eurobahn	RB89	ZVM / HST / ZRL	16,75%
DB Regio NRW	RE11	ZRL	7,67%
DB Regio NRW	RE01	HST / ZRL	7,29%
DB Regio NRW	RE07	ZVM/ZRL	0,45%
Summe			100,00%

Pkm Anteil je Linie für Relation und ausgewählte via-Tarifgebiete:

Konzession	Linie	Tarifraum	Pkm_Anteil
Eurobahn	RB89	ZVM / HST / ZRL	52,08%
DB Regio NRW	RE11	ZRL	23,84%
DB Regio NRW	RE01	HST / ZRL	22,67%
DB Regio NRW	RE07	ZVM/ZRL	1,41%
Summe			100,00%

Abbildung 4: Beispiel Benutzeroberfläche Datenbank

Auf der linken Seite werden für die gewählte Relation die Pkm-Anteile je Linie angezeigt – unabhängig von den durchfahrenen Tarifgebieten. Auf der rechten Seite werden die Pkm-Anteile je Linie für die gewählte Relation sowie für die Auswahl der durchfahrenen Tarifgebiete angezeigt.

Die Datenbank wird den erlösverantwortlichen Partnern offen gelegt, damit diese die Möglichkeit haben, ihre Umlegungsergebnisse nachzuvollziehen.

6 Anhang

Im Folgenden ist ein Auszug aus dem Handbuch zu VISUM Version 15 zu dem benutzten Umlegungsverfahren dargestellt. Damit können die Berechnungsalgorithmen nachvollzogen werden. Kapitel mit direktem Bezug zum verwendeten Verfahren sind in der Überschrift mit dem Hinweis „(verfahrensrelevant)“ gekennzeichnet.

Die Kapitelangaben beziehen sich auf das VISUM-Handbuch.

7.1 Überblick über die ÖV-Umlegungsverfahren

Um Ortsveränderungen mit dem ÖV zu modellieren, bietet Visum drei Arten von ÖV-Umlegungsverfahren an, die sich durch die erforderlichen Eingangsdaten, durch die Genauigkeit der Ergebnisse und durch den Rechenaufwand unterscheiden.

- Das **verkehrssystemfeine Verfahren**, das auf einer ÖV-spezifischen Alles-oder-Nichts-Umlegung basiert, gibt einen Überblick über die Struktur der Verkehrsnachfrage. Es erfordert kein Liniennetz und eignet sich im Rahmen einer Grobplanung zur Ermittlung eines „Wunschliniennetzes“, bei dem die Fahrgäste ohne Beschränkungen durch Linienwege und Fahrpläne die für sie schnellste Route im Netz wählen (siehe „Verkehrssystemfeine Umlegung“ auf Seite 512).
- Das **taktfeine Verfahren** eignet sich für städtische Netze mit kurzen Fahrzeugfolgezeiten und für konzeptuelle Planungen mit langem Vorlauf, bei dem der exakte Fahrplan für die Untersuchungsperiode noch unbekannt ist. Das taktfeine Verfahren ermittelt die Umsteigewartezeit beim Linienwechsel aus den mittleren Fahrzeugfolgezeiten der Folgelinien. Bei Bedarf können Koordinierungen sowohl beim Umstieg zwischen Linien als auch zwischen den Fahrplänen mehrerer Linien auf gemeinsam bedienten Abschnitten berücksichtigt werden, dann gelten abweichend vorgegebene Umsteigewartezeiten. Der Verzicht auf den Fahrplan auf der Ebene einzelner Fahrten ermöglicht auch in großen Netzen kurze Rechenzeiten (siehe „Taktfeine Umlegung“ auf Seite 515).
- Das **fahrplanfeine Verfahren** sollte immer dann angewendet werden, wenn das ÖV-Angebot große Fahrzeugfolgezeiten aufweist und die Koordinierung des Fahrplans für Umsteigevorgänge wichtig ist. Es berücksichtigt den genauen Fahrplan und eignet sich daher insbesondere für die Nahverkehrsplanung im ländlichen Raum oder für Bahnnetze. Es existieren zwei Varianten, die sich nur im Verbindungssuchverfahren unterscheiden (siehe „Fahrplanfeine Umlegung“ auf Seite 541).

In großen Netzen lässt sich oft unterscheiden zwischen einem Hauptnetz, das in erster Linie untersucht werden soll, und einem nachgeordneten Netz, das Zubringerfunktionen zum Hauptnetz erfüllt. Beispiele sind überregionale Bahnnetze mit nachgeordneten regionalen oder städtischen Busnetzen, aber auch die Benutzung von Pkw oder Taxi für den Zu- oder Abgang. Für die Modellierung des nachgeordneten Netzes gibt es prinzipiell zwei Alternativen.

- Verkehrsbezirke, die nicht unmittelbar durch das Hauptnetz bedient werden, werden dennoch durch lange Anbindungen an Haltestellen des Hauptnetzes angebunden. Diese Alternative bürdet dem Planer bei der Auswahl und Attributierung der Anbindungen die Aufgabe auf, die Routenwahl im nachgeordneten Netz richtig einzuschätzen. Diese kann sich zudem bei Angebotsänderungen im Hauptnetz ändern.
- Mit Blick auf die Modellierungsgenauigkeit empfiehlt es sich stattdessen, auch das nachgeordnete Netz als ÖV-Angebot zu modellieren. Neben dem u.U. beträchtlichen Aufwand für die Beschaffung der Fahrplandaten wachsen hierbei Speicherbedarf und Rechenzeit für die Umlegung.

Besonders bei kurzen Fahrzeugfolgezeiten im nachgeordneten Netz explodiert die Zahl der Verbindungen.

Eine Kompromisslösung besteht darin, das Hauptnetz vollständig zu modellieren und hierauf takt- oder fahrplanfein umzulegen. Das nachgeordnete ÖV-Angebot wird dagegen nur in Form des befahrenen Streckennetzes modelliert und im Rahmen der takt-/fahrplanfeinen Umlegung wie im verkehrssystemfeinen Verfahren (Bestwegsuche) behandelt (vergleiche Abbildung 142).

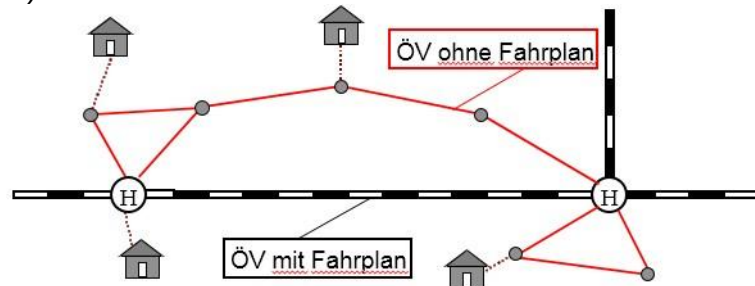


Abbildung 142: Unterschiedliche Modellierung von Hauptnetz und nachgeordnetem Netz

Für diese Modellierung werden die im nachgeordneten Netz befahrenen Strecken und Abbieger für Verkehrssysteme des besonderen Typs **ÖVZusatz** geöffnet und mit spezifischen Fahrzeiten für diese Verbindungen versehen. Falls ÖVZusatz-Verkehrssysteme nicht allen Nachfragesegmenten zur Verfügung stehen (zum Beispiel der Pkw für den P+R-Zugang), wird dies durch gezielte Aufnahme in die entsprechenden Modi ausgedrückt. So enthält beispielsweise der Modus zum Nachfragesegment **Erwerbstätige mit Pkw** das ÖVZusatz-Verkehrssystem **P+R**, nicht jedoch der Modus zum Nachfragesegment **Erwerbstätige ohne Pkw**. Die ÖV-Umlegungsverfahren werden hauptsächlich für folgende Anwendungsfälle eingesetzt.

- Zur Ermittlung von Belastungen, also Linienbelastungen, Streckenbelastungen, Ein-, Aus- und Umsteiger an Haltestellen.
- Zur Berechnung benutzerbezogener ÖV-Kenngrößen, zum Beispiel Reisezeit, Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit.
- Als Fahrplanauskunftssystem, das die Abfahrts- und Ankunftszeiten einzelner Verbindungen ausweist.

7.2 Beispielnetz für die ÖV-Umlegungsverfahren

Die unterschiedlichen Verfahren werden im Folgenden anhand eines Beispiels (Abbildung 143, Abbildung 144, Abbildung 145, Tabelle 148 und Tabelle 149) beschrieben. Für das ÖV-Angebot des Beispiels sollen die Verbindungen zwischen den Verkehrsbezirken A-Dorf und X-Stadt ermittelt werden.

Für das Beispiel gelten folgende Annahmen.

- Es wird kein Kalender verwendet.
- Zu- und Abgangszeiten werden nicht berücksichtigt, also auf 0 min gesetzt.
- Der Untersuchungszeitraum beginnt um 5:30 Uhr und endet um 7:30 Uhr.

Die Verkehrsnachfrage zwischen A-Dorf und X-Stadt beträgt im Untersuchungszeitraum 90 Fahrten (Tabellen \$ODMATRIX und \$MATRIXSINGLELISTITEM in der Nachfragedatendatei *PuT.dmd*).

- 33 % der Verkehrsnachfrage, das heißt 30 Fahrten, treten zwischen 5:30 und 6:30 Uhr auf, die restlichen 67 % beziehungsweise 60 Fahrten entfallen auf den Zeitraum zwischen 6:30 und 7:30 Uhr (Tabellen \$TIMESERIES und \$TIMESERIESITEM in der Nachfragedatendatei *PuT.dmd*).

Tabelle 148 enthält Beispieldaten der Datei *PuT.dmd*, die in Englisch ausgeliefert wird.

```
$VISION
* VisumInst
* 04/11/07
*
* Table: VERSION
$VERSION:VERSNR;FILETYPE;LANGUAGE;UNIT
4.000;Demand;ENG;KM
* Table: ODMATRIX
$ODMATRIX:NO;CODE;NAME;CONTENT;ROUND;NUMDECPLACES
1;C;Car;;0;0
2;H;H Veh;;0;0
3;P;PuT;;0;0
* Table: MATRIXSINGLELISTITEM
$MATRIXSINGLELISTITEM:MATRIXNO;FROMZONENO;TOZONENO;VALUE
1;100;200;2000.000
2;100;200;200.000
3;100;200;90.000
* Table: TIMESERIESDOMAINTYPE
$TIMESERIESDOMAINTYPE:NO;DESCRIPTION;UNITYSTRING;NUMDECPLACES;MAXVALUE;MINVALUE
1;Prozentuale Ganglinie;%;2;9999999999.000;0.000
2;Ganglinie von Matrixnummern;No;0;999999999.000;0.000
* Table: Time series
$TIMESERIES:NO;NAME;TYPENO;UNITX;NUMINTERVALS;LENGTHINTERVAL;USEVALUELIST;VALU
LISTTYPE;VALUEREFTYPE;DECSEPARATOR;VALUESEPARATOR
1;;1;86400;1;0;0;2;;
* Table: TIMESERIESITEM
$TIMESERIESITEM:TIMESERIESNO;STARTINTERVALINDEX;ENDINTERVALINDEX;VALUE
1;1;19800;0.000
1;19801;23400;33.000
1;23401;27000;67.000
* Table: Demand time series
$DEMANDTIMESERIES:NO;CODE;NAME;TIMESERIESNO
1;;;1
* Table: Demand description
$DEMANDDESCRIPTION:DSEGCODE;DEMANDTIMESERIESNO;MATRIXNO;STARTDAYINDEX;STARTTIME
C;0;1;1;00:00:00
H;0;2;1;00:00:00
P;1;3;1;00:00:00
```

Tabelle 148: Nachfragematrix und Verteilung des Fahrtenaufkommens für das Beispiel

Das Beispielnetz ist im Verzeichnis ... *Benutzer\Öffentlich\Öffentliche Dokumente\PTV Vision\PTV Visum 15\Example_net* gespeichert.

- Versionsdatei *Example.ver*
- Grafikparameter *PuT.gpa*
- Nachfragematrix und Aufkommensverteilung *PuT.dmd*
- Verfahrensparameter *PuT.par*

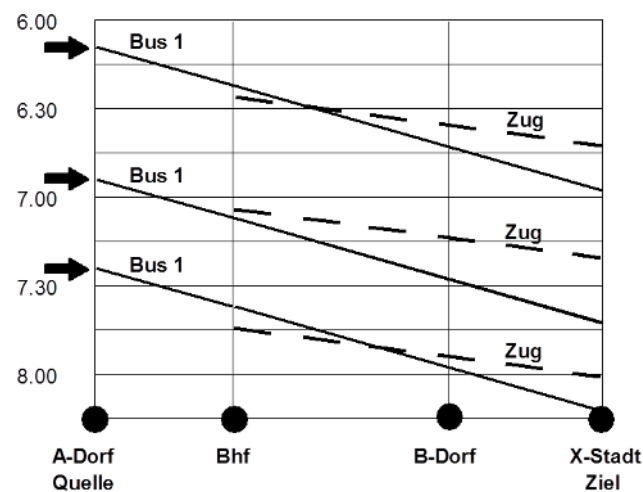


Abbildung 143: Fahrplan

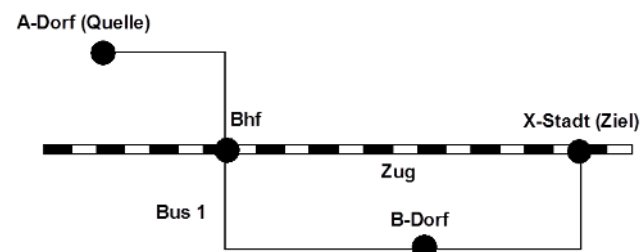


Abbildung 144: Linienplan

Fahrplan Bus 1				Fahrplan Zug			
A-Dorf	6.10	6.55	7.25	Bhf	6.25	7.05	7.45
Bhf	6.22	7.07	7.37	X-Stadt	6.41	7.21	8.01
B-Dorf	6.42	7.27	7.57				
X-Stadt	6.55	7.40	8.10				
Verbindungen							
ab 6.10 Uhr, an 6.55 Uhr, Beförderungszeit 45 Min., ohne umsteigen							
ab 6.10 Uhr, an 6.41 Uhr, Beförderungszeit 31 Min., einmal umsteigen							
ab 6.55 Uhr, an 7.40 Uhr, Beförderungszeit 45 Min., ohne umsteigen							
ab 7.25 Uhr, an 8.10 Uhr, Beförderungszeit 45 Min., ohne umsteigen							
ab 7.25 Uhr, an 8.01 Uhr, Beförderungszeit 36 Min., einmal umsteigen							

Tabelle 149: ÖV-Angebot des Beispiels mit den Verbindungen von A-Dorf nach X-Stadt

7.10 Fahrplanfeine Umlegung (verfahrensrelevant)

Ein Suchverfahren wird **fahrplanfein** genannt, wenn alle Fahrten der ÖV-Linien mit ihren genauen Abfahrts- und Ankunftszeiten berücksichtigt werden.

Fahrplanfeine Verfahren eignen sich zur Umlegung und zur Kenngrößenberechnung, wenn für das untersuchte ÖV-Angebot ein Liniennetzplan und ein detaillierter Fahrplan vorhanden sind. Sie berücksichtigen die Koordinierung des Fahrplans und garantieren auf diese Weise sehr genaue Ergebnisse bei der Kenngrößenberechnung.

Das fahrplanfeine Verfahren ermittelt für jede Quelle-Ziel-Relation Verbindungen und unterstellt bei der Suche, dass die Reisenden über Fahrplaninformation verfügen und ihren Zugangszeitpunkt passend zur Abfahrt der ersten ÖV-Linie wählen. Über einen Suchwiderstand kann der Benutzer schon während der Suche auf differenzierte Weise Einfluss auf die Art der gefundenen Verbindungen nehmen. Für die Verbindungssuche werden zwei Varianten (Branch & Bound-Suche und Kurzwegsuche) angeboten, die unterschiedliche Kompromisse zwischen Umfang der Alternativen einerseits und Speicher- und Rechenzeitbedarf andererseits darstellen.

Die vom Suchverfahren ermittelten Verbindungen werden bei der Verbindungsvorauswahl anhand allgemeiner Kriterien noch einmal dahingehend untersucht, ob manche von ihnen qualitativ deutlich unterlegen sind und gelöscht werden können.

Bei der Verbindungswahl wird die Nachfrage gemäß einem der oben genannten Modelle auf die verbleibenden Alternativen aufgeteilt. Wahlweise kann die Eigenständigkeit der Verbindungen mit berücksichtigt werden.

7.10.1 Beurteilung der fahrplanfeinen Umlegung (verfahrensrelevant)

Die fahrplanfeine Umlegung zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus.

- Das Verfahren ermittelt bei Branch & Bound-Suche (siehe „Verbindungssuche mit Branch and Bound“ auf Seite 542) alle geeigneten Verbindungen im gesamten Untersuchungszeitraum, dabei auch zu einem Abfahrzeitpunkt mehrere Verbindungen mit unterschiedlichem Widerstand (zum Beispiel zeit kürzeste und umsteigeminimale Verbindungen). Bei einkriterieller Kurzwegsuche (siehe „Verbindungssuche mit Kurzwegsuche“ auf Seite 546) wird pro Abfahrzeitpunkt stets nur eine Verbindung ermittelt, dafür ist der Speicher- und Rechenzeitbedarf geringer. Die Suche kann durch die Definition eines Suchwiderstands beeinflusst werden.
- Die Branch & Bound-Suche eignet sich für die Betrachtung eines Zeitraums, beispielsweise einen ganzen Tag oder mehrere Stunden (siehe „Verbindungssuche mit Branch and Bound“ auf Seite 542). Für die Suche zu einem bestimmten Zeitpunkt, zum Beispiel bei der grafischen Routensuche, ist die Kurzwegsuche vorzuziehen (siehe „Verbindungssuche mit Kurzwegsuche“ auf Seite 546).
- Die tatsächliche Umsteigewartezeit und somit die Koordinierung des Fahrplans wird berücksichtigt.

- Alle Kenngrößen im Untersuchungszeitraum sind berechenbar.
- Das Entscheidungsmodell für die Verbindungswahl (siehe „Verbindungswahl“ auf Seite 551) bildet das tatsächliche Entscheidungsverhalten der Fahrgäste realistisch ab, da ein Fahrgast in der Regel über Informationen über das ÖV-Angebot verfügt (Verbindungssuche) und dann aus den angebotenen Verbindungen auswählt (Verbindungswahl).

7.10.2 Zeitbezug der Nachfrage (verfahrensrelevant)

Für die fahrplanfeine Umlegung können für Nachfragesegmente sowohl auf die Abfahrts- als auch Ankunftszeit bezogene Ganglinien verwendet werden. Eine auf die Abfahrtszeit bezogene Ganglinie drückt die Wunschzeit der Nachfrage bezogen auf die Abfahrtszeit aus. Analog ist die Definition für die Ankunftszeit. Der Zeitbezug wird in der Nachfragebeschreibung dem Nachfragesegment zugeordnet. (siehe Benutzerhandbuch: Kap. 15.12.3.4, Seite 1159).

Durch den Zeitbezug können für die Betrachtung von Wegen bestimmter Nutzergruppen die Nebenbedingungen des Fahrtwunsches besser berücksichtigt werden. Der morgendliche Schülerverkehr ist ein typisches Beispiel für Fahrten, bei dem die Ankunftszeit durch den Schulbeginn fest vordefiniert ist, Schüler wählen deshalb ihre Verbindungen nach dem Ankunftszeitpunkt am Zielort aus.

Der Zeitbezug beeinflusst die zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung, als auch die Berechnung der Kenngrößen Anpassungszeit und erweiterte Anpassungszeit (siehe „Zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung“ auf Seite 550 und „Kenngrößen der Zeit“ auf Seite 497).

7.10.3 Verbindungssuche

Für die Verbindungssuche stehen zwei Varianten zur Verfügung: Branch & Bound und Kurzwegsuche.

7.10.3.1 Verbindungssuche mit Branch and Bound (verfahrensrelevant)

Je Quellbezirk wird ein Suchbaum geeigneter Teilverbindungen generiert, in dem alle hinreichend guten Verbindungen ab diesem Quellbezirk gespeichert sind. So wird nicht nur die für eine Relation beste, sondern eine Vielzahl guter Verbindungen gefunden. Auf diese Weise ist eine sehr differenzierte Verteilung der Verkehrsnachfrage möglich.

- Zur Bewertung der Qualität von Verbindungen wird ein Suchwiderstand verwendet. Der Suchwiderstand berechnet sich für alle im Laufe des Verfahrens gefundenen (Teil-)Verbindungen nach folgender Formel:

$$\begin{aligned} \text{SuchWID} = & \text{Fahrzeit im Fahrzeug} \cdot \text{FakFZimFzg} + \\ & \text{ÖV-Zusatz-Fahrzeit} \cdot \text{FakÖVZFz} + \\ & \text{Zugangszeit} \cdot \text{FakZuZ} + \\ & \text{Abgangszeit} \cdot \text{FakAbZ} + \\ & \text{Gehzeit} \cdot \text{FakGZ} + \\ & \text{Umsteigewartezeit} \cdot \text{FakUWZ} + \\ & \text{UH} \cdot \text{FakUH} + \end{aligned}$$

Verkehrssystem-Widerstand • FakV Sys-Wid +

Fahrplanfahrt-Widerstand • FakFPF-Wid

- Für die Fahrzeiten im Fahrzeug oder ÖV-Zusatz können weitere spezifische Faktoren aus Attributen der Fahrplanfahrtverläufe oder der Verkehrssysteme herangezogen werden.
- Neben den verschiedenen Zeitkomponenten und der Umsteigehäufigkeit gehen dabei unter *Verkehrssystem-Widerstand* nach Verkehrssystem differenzierte Zuschläge ein. So können Sie schon während der Suche einfache entfernungsabhängige Fahrpreise berücksichtigen. Das vollständige Visum-Tarifmodell wirkt erst in der Verbindungswahl. Dies ist jedoch keine Einschränkung, denn in der Suche ist eine näherungsweise Fahrpreisberechnung ausreichend, um zwischen sinnvollen und nicht sinnvollen Verbindungen zu unterscheiden.
- Außerdem fließt unter *Fahrplanfahrt-Widerstand* der fahrtspezifische Widerstand über zwei frei wählbare Fahrtverlaufs-Attribute als Summanden ein – ein Einsteigezuschlag und ein allgemeiner Komfort-Term. So können einzelne Fahrplanfahrten gegenüber anderen bevorzugt oder benachteiligt werden.
- (Teil-)Verbindungen zu einem Ziel- oder Zwischenknoten werden bewertet und mit allen anderen (Teil-)Verbindungen zum gleichen Punkt verglichen, um effizient zu entscheiden, welche Äste des Suchbaums fortgesetzt werden können („branch“) und welche abgeschnitten werden müssen („bound“) (siehe „Dominanz“ auf Seite 543 und „Bounding“ auf Seite 546).
- Für die Anzahl der in einer Verbindung auftretenden Umsteigevorgänge kann eine Obergrenze festgelegt werden.

Dominanz (verfahrensrelevant)

Paarweise Vergleiche sind wichtig, um nicht sinnvolle Verbindungen zu identifizieren.

Wenn eine Verbindung in keiner Hinsicht besser ist als eine andere Verbindung in gleicher Zeitlage, bezeichnet man sie als dominiert und verwirft sie. Das heißt im Detail:

Eine Verbindung c' dominiert eine Verbindung c , falls

- c' innerhalb des Zeitintervalls von c liegt
- $\text{AnzUmstiege}(c') \leq \text{AnzUmstiege}(c)$
- $\text{SuchWid}(c') \leq \text{SuchWid}(c)$
- und wenn
 - in mindestens einem der drei Kriterien echte Ungleichheit gilt
 - oder beide Verbindungen äquivalent sind

Für den Vergleich von zwei Verbindungen ohne definierte Zeitlage (d.h. ohne Teilwege vom Typ ÖV-Linie) wird die erste Regel in Fahrzeit ($c') \leq \text{Fahrzeit}(c)$) abgeändert.

Beispiel:

- Verbindung 1 dominiert Verbindung 2, da sie echt im Zeitintervall von Verbindung 2 enthalten ist und ihre anderen Kennzahlen gleich gut oder besser sind.
- Verbindung 1 dominiert jedoch nicht Verbindung 3, weil diese eine andere zeitliche Lage hat und damit trotz ihrer schlechteren Kennzahlen für Fahrgäste sinnvoll ist, die später abfahren wollen.
- Verbindung 1 dominiert ebenfalls nicht Verbindung 4, weil diese einen Umstieg weniger enthält und damit trotz ihrer langen Fahrzeit für manche Fahrgäste interessant ist.

Kriterium	Verbindung 1	Verbindung 2	Verbindung 3	Verbindung 4
Zeitliche Lage	6:00 - 7:00	6:00 - 7:10	6:10 - 7:20	5:30 - 7:20
Anzahl Umstiege	1	1	2	0
SuchWid	4 000	4 200	4 300	5 400
Dominanz	---	dominiert durch Verb. 1	---	---

Äquivalente Verbindungen (verfahrensrelevant)

Einen Sonderfall für die Dominanz stellen äquivalente Verbindungen dar. Zwei Verbindungen sind äquivalent, wenn sie sich lediglich in der Wahl der Umsteigehalte unterscheiden, ansonsten aber Gleichheit in Bezug auf die Abfahrtszeit und Reihenfolge der benutzten Fahrzeitprofile besteht.

Wird Dominanz zwischen äquivalenten Verbindungen erlaubt, dann verbleibt nur die Verbindung mit dem frühesten möglichen Umstieg aus einem Bündel äquivalenter Verbindungen. Wenn äquivalente Verbindungen zugelassen werden, kann eine große Menge fast identischer Verbindungen entstehen. Beachten Sie, dass Hierarchien innerhalb der Verbindungsmenge im Wahlmodell nicht berücksichtigt werden können. Durch Verwendung der Eigenständigkeit kann diese Tatsache in manchen Fällen kompensiert werden.

Hinweis: Eine Deaktivierung der Eigenständigkeit kann in Kombination mit äquivalenten Verbindungen zu unrealistischen Ergebnissen führen. Es wird daher dringend empfohlen, äquivalente Verbindungen nur mit der Option **Eigenständigkeit verwenden** zuzulassen.

Beispiel

Betrachtet wird das in der Abbildung 155 dargestellte Netz.

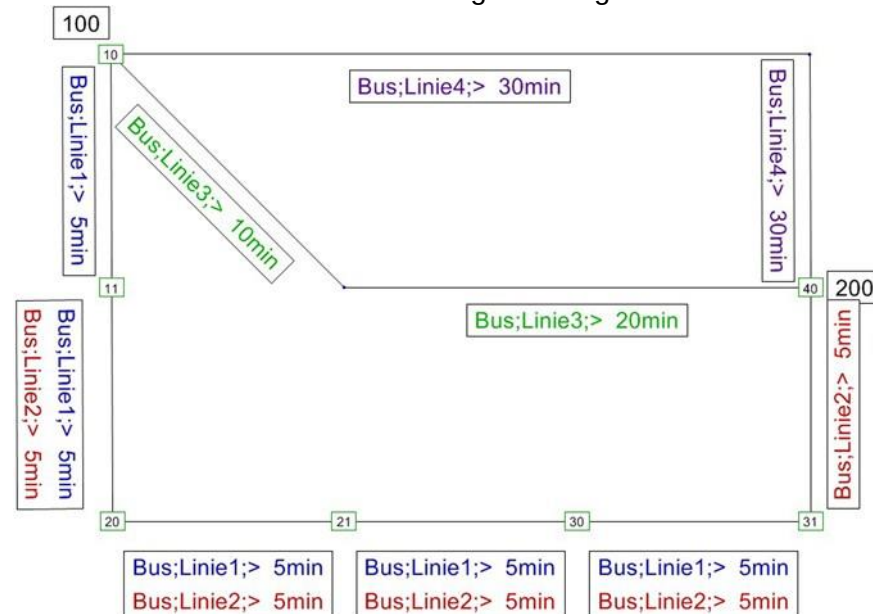


Abbildung 155: Beispiel äquivalente Verbindungen

Bei Nutzung der Linien 1 und 2 ergeben sich die folgenden äquivalenten Verbindungen:

Verbindung	Von-Fahrzeit-profil	Nach-Fahrzeit-profil	Umsteigehalte-punkt
A1	Bus, Linie 1 >, 1	Bus, Linie 2 >, 1	11
A2	Bus, Linie 1 >, 1	Bus, Linie 2 >, 1	20
A3	Bus, Linie 1 >, 1	Bus, Linie 2 >, 1	21
A4	Bus, Linie 1 >, 1	Bus, Linie 2 >, 1	30
A5	Bus, Linie 1 >, 1	Bus, Linie 2 >, 1	31

Wird Dominanz zwischen äquivalenten zugelassen, verbleibt nur die Verbindung A1 **Beispiel mit Eigenständigkeit:**

Verbindung	Teilweg(e)
A	Abfahrt 6:30 mit Linie 1 Umstieg in Linie 2 im Überlappungsbereich der Halte 11, 20, 21, 30 und 31 mit UWZ = 0 Ankunft 7:00
B	Abfahrt 6:35 mit Linie 3 Ankunft 7:05
C	Abfahrt 7:00 mit Linie 4 Ankunft 7:30

Ohne Eigenständigkeit:

Ohne äquivalente Verbindungen erhält jede der drei Verbindungen einen Anteil von 1/3, wenn die Widerstandsparameter so eingestellt sind, dass der Umstieg nicht bestraft wird.

Werden äquivalente Verbindungen zugelassen, entstehen aus Verbindung A (mit Umstieg an Halt 11) vier weitere Optionen A2 bis A5, die sich nur im Umsteigepunkt unterscheiden. Die Verbindungsmenge besteht jetzt aus sieben gleich guten Verbindungen und ohne Eigenständigkeit erhält jede Verbindung 1/7 der Nachfrage. Dieser Fall illustriert, dass ohne Eigenständigkeit unrealistische Ergebnisse beim Wahlmodell entstehen.

Mit Eigenständigkeit (verfahrensrelevant):

Mit Eigenständigkeit verschiebt sich in der Ausgangssituation einige Nachfrage auf Verbindung C, weil A1 und B eine sehr ähnliche zeitliche Lage haben. C erhält nun 47%, die beiden anderen teilen sich den Rest.

Werden äquivalente Verbindungen zugelassen, ändert sich der Anteil von C kaum, aber ein großer Teil der Nachfrage verschiebt sich von B nach A, weil sich A1 bis A5 nicht nur gegenseitig beeinflussen, sondern allesamt auch die Eigenständigkeit von B reduzieren. An diesem Fall wird deutlich, dass Sie mit Verwendung der Eigenständigkeit bessere Ergebnisse erzielen, er macht aber auch die Grenzen der Eigenständigkeit deutlich.

Eigenständigkeit ausgeschaltet		Eigenständigkeit eingeschaltet	
Äquivalente Verbindungen		Äquivalente Verbindungen	
nein	ja	nein	ja
33,3 %	71,4 %	26,5 %	41,8 %
33,3 %	14,3 %	26,5 %	10 %
33,3 %	14,3 %	47 %	48,2 %

Bounding (verfahrensrelevant)

Unabhängig von der zeitlichen Lage werden folgende Regeln angewendet, um Verbindungen auszuschließen, die in einem oder mehreren Kriterien zu stark vom Optimum abweichen:

Eine (Teil-)Verbindung wird gelöscht, falls

- Suchwiderstand der Verbindung > minimaler Suchwiderstand • Faktor + Konstante, oder
- Reisezeit der Verbindung > minimale Reisezeit • Faktor + Konstante, oder
- Umsteigehäufigkeit der Verbindung > minimale Umsteigehäufigkeit + Konstante.

Grundsätzlich werden dabei keine Verbindungen gelöscht, die in einer der drei Dimensionen selbst optimal sind – selbst wenn sie in einer anderen Dimension die Regel verletzen.

7.10.3.2 Verbindungssuche mit Kurzwegsuche

Diese Variante verwendet eine Bestwegsuche auf der Grundlage der Abfahrts- und Ankunftszeiten. Wird eine Bestwegsuche für einen Zeitpunkt

durchgeführt, erhält man die zu diesem Zeitpunkt beste Verbindung zwischen zwei Verkehrsbezirken. Für andere Zeitpunkte ergeben sich andere „beste“ Verbindungen, die sich in der Abfahrtszeit unterscheiden und gegebenenfalls auch andere ÖV-Linien und andere Umsteigehaltestellen benutzen. Um alle „besten“ Verbindungen innerhalb eines Untersuchungszeitraumes zu bestimmen, wird die Bestwegsuche mehrfach für alle möglichen Abfahrtszeitpunkte des Untersuchungszeitraumes durchgeführt.

Da in einigen Fällen zu einem Zeitpunkt mehrere Verbindungen möglich sind, erfordern diese Suchverfahren eine Definition der „besten Verbindung“. Diese Definition erfolgt in Visum über eine Widerstandsfunktion, die den Widerstand einer Verbindung für jeden Umsteigevorgang um einen Zuschlag erhöht. Ein niedriger Zuschlag bewirkt dann, dass zeit kürzeste Verbindungen bevorzugt werden, während ein hoher Zuschlag Verbindungen mit geringer Umsteigehäufigkeit den Vorrang gibt.

- Ermittlung aller möglichen Startzeitpunkte für Fahrten, die im Verkehrsbezirk i beginnen. Die Startzeitpunkte ergeben sich aus den Abfahrtszeiten der ÖV-Linien an den Haltestellen, die vom Bezirk i über eine Anbindung erreichbar sind.

Im Beispiel stimmen die Startzeitpunkte mit den Abfahrtszeiten der Buslinie 1 in A-Dorf (6.10, 6.55, 7.25) überein, da in A-Dorf nur eine Buslinie verkehrt und eine Zugangszeit von 0 Minuten angenommen wird.

Für jeden Startzeitpunkt wird einer der beiden folgenden Schritte ausgeführt.

- Entweder Durchführung einer einkriteriellen Bestwegsuche, die den zu diesem Zeitpunkt „besten“ Weg vom Verkehrsbezirk i zum Verkehrsbezirk j sucht. Das Suchverfahren erkennt den Weg mit dem geringsten Suchwiderstand als besten Weg. Der Suchwiderstand des Weges hat die Einheit Minuten und ist eine Linearkombination von Reisezeit und Umsteigehäufigkeit. Diese setzt sich aus folgenden Zeiten zusammen.

- Zugangszeit [min]
- Fahrzeit im Verkehrsmittel [min]
- Umsteigegezeit für Fußwege zwischen zwei Umsteigehaltestellen [min]
- Umsteigewartezeit [min]
- Abgangszeit [min]
- Umsteigehäufigkeit [-] • Umsteigezuschlag [min] (einstellbar)

Dieser hinsichtlich Suchwiderstand beste Weg stellt eine Verbindung dar, das heißt, die benutzte Linienfolge und die exakten Abfahrts- und Ankunftszeiten an Einstiegshaltestelle, Umsteigehaltestellen und Ausstiegshaltestelle sind bekannt.

- Oder Berechnung einer reisezeitminimalen Verbindung (so genannte bikriterielle Kurzwegsuche) für **jede** zulässige Umsteigehäufigkeit (das heißt für alle ganzzahligen Werte ≥ 0 und $\leq \text{max. Anzahl Umsteigevorgänge}$). Ergeben sich dabei für verschiedene Umsteigehäufigkeiten gleiche Reisezeiten, so wird nur die Verbindung mit der geringsten Umsteigehäufigkeit aufgehoben (Dominanz).

7.10.4 Verbindungsvorauswahl (verfahrensrelevant)

Die Verbindungsvorauswahl bewertet und vergleicht alle gefundenen Verbindungen. Dabei wird untersucht, ob eine Verbindung durch eine andere, günstigere Verbindung ersetzt und daher gelöscht werden kann. Nur die sinnvollen Verbindungen werden den Fahrgästen bei der Verbindungswahl zur Auswahl gestellt. Zur Identifizierung ungünstiger Verbindungen werden die folgenden Ausschlussregeln nacheinander angewandt.

- Suchwiderstand der Verbindung > minimaler Suchwiderstand • Faktor + Konstante
(ohne Einschränkung; nur Branch & Bound)
- Reisezeit der Verbindung > minimale Reisezeit • Faktor + Konstante
(sofern Verbindung nicht optimal hinsichtlich Umsteighäufigkeit)
- Umsteighäufigkeit der Verbindung > minimale UH + Konstante
(sofern Verbindung nicht optimal hinsichtlich Reisezeit)

Die Faktoren und Konstanten können vom Benutzer eingestellt werden.

Zusätzlich können Verbindungen, die entweder vollständig im Vor- und Nachlauf liegen, oder vor oder nach dem Umlegungszeitraum beginnen oder enden, gelöscht werden. Die letztgenannte Regel richtet sich nach dem Zeitbezug (siehe Benutzerhandbuch: Kap. 19.2.4.3 , Seite 2081).

7.10.5 Widerstand und Empfundene Reisezeit (ERZ) einer Verbindung (verfahrensrelevant)

Der Widerstand ist eine Linearkombination aus Empfundener Reisezeit (siehe „Empfundene Reisezeit“ auf Seite 548), Fahrpreis, $\Delta T(\text{früh})$ und $\Delta T(\text{spät})$. Dabei drücken $\Delta T(\text{früh})$ und $\Delta T(\text{spät})$ die zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung aus (siehe „Zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung“ auf Seite 550).

7.10.5.1 Empfundene Reisezeit (verfahrensrelevant)

ERZ [min] =

Fahrzeit im Fzg • *FakFZ* • (in)direktes Fahrtverlauf-Attribut
 + ÖV-Zusatz-Fahrzeit • *FakXZ* • (in)direktes VSys-Attribut
 + Zugangszeit • *FakZZ*
 + Abgangszeit • *FakAZ*
 + Gehzeit • *FakGZ*
 + Startwartezeit • *FakSZ*
 + Umsteigewartezeit • *FakUZ*
 + Umsteighäufigkeit • *FakUH*
 + Anzahl Betreiberwechsel • *FakOC*
 + Erweiterter Widerstand • *Faktor*

Anmerkungen

- ÖV-Zusatz-Fahrzeit

Die in ÖV-Zusatz-Verkehrssystemen verbrachte Fahrzeit geht als eigene Kenngröße in die ERZ ein und kann mit einem beliebigen Verkehrssystem-Attribut gewichtet werden. Sie wird auch als Kenngröße benötigt.

➤ Modellierung von Bonus und Malus

Um etwa bekannte Auslastungseffekte (zum Beispiel keine Sitzplatzgarantie) oder andere Aspekte (zum Beispiel Komfort) einer Linie zu modellieren, kann die Fahrzeit mit einem beliebigen Attribut des Fahrtverlaufs oder die ÖV-Zusatzfahrzeit mit einem Attribut des Verkehrssystems multipliziert werden.

➤ Umsteigehäufigkeit

In die Berechnung der Umsteigehäufigkeit fließen ÖV-Linie und ÖV-Zusatz gleichwertig ein. Besteht zwischen zwei Fahrten eine Durchbindung, wird der Wechsel zwischen diesen Fahrten nicht als Umsteigevorgang gewertet.

➤ Anzahl Betreiberwechsel

Betreiberwechsel können durch ÖV-Zusatz-Teilwege nicht anfallen.

Startwartezeit (verfahrensrelevant)

Die Startwartezeit SZ kann dabei aus der Bedienungshäufigkeit aller Verbindungen über folgende Formel berechnet werden.

$$SZ = A \cdot (\text{Umlegungszeitraum} / \text{Bedienungshäufigkeit})^E$$

➤ Mit $A = 0,5$ und $E = 1$ entspricht die Startwartezeit der halben mittleren Fahrzeugfolgezeit.

➤ Mit $A = 1,5$ und $E = 0,5$ ergibt sich eine Wurzelfunktion, die eine bessere Fahrplankenntnis des Fahrgastes bei niedriger Bedienungshäufigkeit unterstellt.

Die Startwartezeit ist für alle Verbindungen einer Quelle-Ziel-Beziehung gleich. Ihre Einbeziehung in die ERZ wirkt daher lediglich wie ein konstanter Zuschlag. Die Ausgabe der SZ in einer Kenngrößenmatrix kann dagegen für die Netzanalyse sinnvoll sein.

Umsteigewartezeit (verfahrensrelevant)

Die Umsteigewartezeit modelliert nahtlose Umstiege in der Zeit null oder etwas über null.

Die erweiterte Umsteigewartezeit modelliert, dass Umstiege nicht dann ideal sind, wenn sie in Zeit null (oder knapp darüber) ablaufen, sondern wenn sie sich im Bereich weniger Minuten bewegen. Auch viele Fahrplan-Auskunftssysteme bieten keine Verbindungen an, die „nahtlose“ Anschlüsse enthalten.

Mit der erweiterten Umsteigewartezeit hat der Anwender auch in Visum die Möglichkeit, zu knappe Umstiege zu bestrafen. Hierzu wird eine nichtlineare Funktion benutzt, die abhängig von der vom Benutzer eingestellten idealen Umsteigewartezeit eine gewichtete Wartezeit errechnet, die dann in die empfundene Reisezeit eingeht. Die erweiterte Umsteigewartezeit kann anstelle der normalen Umsteigewartezeit in die ERZ-Berechnung eingehen, aber auch als eigene Kenngröße herausgeschrieben werden.

Die verwendete Gewichtungsfunktion f hat folgende Gestalt.

➤ Als Argument erhält sie die tatsächliche Umsteigewartezeit t , also die Zeit, die zwischen Ankunft des Fahrgasts am Haltepunkt und der Abfahrt der Fahrplanfahrt vergeht.

➤ Die gewichtete Wartezeit $f(t)$ ist dann definiert als

➤ $(t - t_0)^n + c$, falls $t < t_1$, und

➤ $f(t) = t$, falls $t \geq t_1$.

t_1 und c ergeben sich aus den Randbedingungen $f(t) = t$ und $f'(t) = 1$, also aus der differenzierbaren Verknüpfung beider Funktionsteile an der Stelle t_1 .

- Entscheidend ist, dass t_0 die als ideal angesehene Umsteigewartezeit ist. Für die erweiterte Umsteigewartezeit darf diese Größe von der benötigten Gehzeit abhängen und ist deshalb folgendermaßen zu parametrisieren: Faktor mal Gehzeit plus Konstante

Durch die polynomiale Gestalt von f ist die gewichtete Wartezeit $f(t)$ genau an der Stelle $t = t_0$ am geringsten. Um t_0 herum steigt $f(t)$ symmetrisch an. Bei steigendem t nähert sich die Funktion $f(t)$ der linearen Asymptote t an.

Beispiel:

Standardmäßig ist $n = 2$ und $t_0 = 5$.

Aus diesen Parametern ergibt sich durch die Randbedingungen $f(t_1) = t_1$ und $f'(t_1) = 1$, dass $t_1 = 5.5$ und $c = 5.25$.

- Findet ein Umstieg in Zeit $t = 0$ statt, wird folgende Gewichtung errechnet, das heißt ein sehr hoher Strafterm: $f(0) = t_0^2 + c = 25 + 5.25 = 30.25$
- Bei einem Umstieg in Zeit $t = 3$ ergibt sich schon ein bedeutend günstigerer Wert: $f(3) = (3 - t_0)^2 + c = 2^2 + 5.25 = 9.25$
- Bei einem Umstieg in Zeit $t = 5$ wird das Optimum erreicht: $f(5) = (5 - t_0)^2 + c = 0^2 + 5.25 = 5.25$
- Steigt t weiter an, wird die Gewichtung wieder schlechter, zum Beispiel bei $t = 10$: $f(10) = (10 - t_0)^2 + c = 25 + 5.25 = 30.25$

0

7.10.5.2 Zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung (verfahrensrelevant)

Die zeitliche Nutzbarkeit wird beim fahrplanfeinen Verfahren für auf die Abfahrtszeit bezogene Nachfrage wie folgt modelliert.

- $\Delta T_i^{a, \text{früh}} =$ Zeit, die Verbindung i **früher** abfährt als für das Abfahrtszeitintervall a gewünscht ($\rightarrow$ Ganglinie); gleich null, falls i **innerhalb** von a oder **nach** a abfährt.

$$\Delta T_i^{\text{früh}} = \begin{cases} \text{Wunschabzeit} - \text{tatsAbfahrtszeit} & \text{falls tatsAbfahrtszeit} < \text{Wunschabzeit} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- $\Delta T_i^{a, \text{spät}} =$ Zeit, die Verbindung i **später** abfährt als für das Abfahrtszeitintervall a_i gewünscht ($\rightarrow$ Ganglinie); gleich null, falls i **innerhalb** von a oder **vor** a abfährt.

$$\Delta T^{\text{spät}} = \begin{cases} \text{tatsAbfahrtszeit} - \text{Wunschabfzeit} & \text{falls (tatsAbfahrtszeit} > \text{Wunschabfzeit)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

➤ $\Delta T_i^{\text{früh}} * Fak_{\Delta T_{\text{früh}}} + \Delta T_i^{\text{spät}} * Fak_{\Delta T_{\text{spät}}} = \text{zeitlicher Abstand von Verbindung } i \text{ und Intervall } a$. Der erste Faktor steuert die Verfrühungsempfindlichkeit, der zweite die Verspätungsempfindlichkeit.

Eine analoge Übertragung unter Nutzung des Ankunftszeitintervalls erfolgt bei Verwendung einer auf die Ankunftszeit bezogenen Ganglinie. Der zeitliche Abstand geht als weiterer Summand in die Definition des Widerstands ein, um geringere Nutzbarkeiten zu bestrafen.

Hinweis: Für Verbindungen ohne zeitliche Lage ist ΔT immer null.

Fahrpreis

Tabelle 174 zeigt ein Beispiel für die Berechnung von $\Delta T_{\text{früh}}$ und $\Delta T_{\text{spät}}$ wenn das Intervall der Wunschabfahrtszeit [6:00;7:00] ist.

Abfahrt	ΔT	$\Delta T_{\text{früh}}$	$\Delta T_{\text{spät}}$
5:30	30	30	0
6:00	0	0	0
6:40	0	0	0
7:00	0	0	0
7:10	10	0	10

Tabelle 174: Berechnung des zeitlichen Abstands bei auf die Abfahrtszeit bezogener Nachfrage

7.10.5.3 Fahrpreis

Wird eine zonenbasierte Fahrkartenart verwendet, werden ÖV-Zusatz-Teilwege ignoriert. Entfernungsabhängige Tarife werden analog zu ÖV-Linien-Verkehrssystemen ausgewertet, denn Tarifpunkte können auch für ÖV-Zusatz vergeben werden (siehe „Erlösberechnung nach dem Tarifmodell“ auf Seite 718).

7.10.6 Verbindungswahl (verfahrensrelevant)

Die Verbindungswahl verteilt die Fahrten einer Beziehung auf die ermittelten Verbindungen. Dazu werden Verbindungswiderstände berechnet, die die empfundene Reisezeit ERZ, den Fahrpreis FPreis und die zeitliche Nutzbarkeit einer Verbindung enthalten (siehe „Widerstand und Empfundene Reisezeit (ERZ) einer Verbindung“ auf Seite 548). Diese Widerstände dienen den Aufteilungsmodellen als Eingabe für die Berechnung der Anteile der Verbindungen an der Verkehrsnachfrage (siehe „Aufteilungsmodelle in der Umlegung“ auf Seite 378). Wahlweise kann auch die Eigenständigkeit

in die Aufteilungsregel mit eingehen (siehe „Eigenständigkeit von Verbindungen“ auf Seite 552).

7.10.6.1 Aufteilung der Fahrten auf die Verbindungen (verfahrensrelevant)

Der bei der Verbindungswahl verwendete Widerstand einer Verbindung i in einem Zeitintervall a berechnet sich folgendermaßen.

$$R_i^a = ERZ_i \cdot Fak_{ERZ} + FPreis_i \cdot Fak_{FPreis} + \Delta T_i^{a_{fruch}} \cdot Fak_{\Delta T_{fruch}} + \Delta T_i^{a_{spat}} \cdot Fak_{\Delta T_{spat}}$$

Jede der in den Widerstand eingehenden Kenngrößen kann optional **einzel**n Box-Cox-transformiert werden. Das hat keinen Einfluss auf das eigentliche Wahlmodell, das heißt, auch bei Verwendung der Box-Cox-Transformationen kann auf den Gesamtwiderstand weiter eine beliebige Nutzenfunktion angewandt werden.

Die Widerstandsberechnung bleibt also von der eigentlichen Verbindungswahl entkoppelt, das heißt, auch bei Anwendung der Box-Cox-Transformation muss nicht zwingend **Logit** eingesetzt werden, sondern es kann eine **beliebige** Nutzenfunktion gewählt werden.

Die Berechnung des Widerstands erfolgt wie folgt:

Für $i = 1, \dots, n$ seien x die verschiedenen Wegeattribute, wobei ohne Einschränkung die ersten m von ihnen Box-Cox-transformiert werden sollen (und zwar jeweils zum Parameter λ_i). β_i stehe für die zugehörigen Koeffizienten. Dann gilt

$$R_i = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot f_i(x_i) + \sum_{i=m+1}^n \beta_i \cdot x_i$$

wobei

$$f_i(x) = \begin{cases} x^{\lambda_i} - 1 & \lambda_i \neq 0 \\ \log x & \lambda_i = 0 \end{cases}$$

Durch Einsetzen dieses Widerstands in eines der Aufteilungsmodelle Kirchhoff, Logit, BoxCox oder Lohse (siehe „Aufteilungsmodelle in der Umlegung“ auf Seite 378) bestimmt Visum hieraus den Nutzen einer Verbindung in einem Zeitintervall und so schließlich ihren Anteil an der Nachfrage dieses Intervalls. Wahlweise kann auch die Eigenständigkeit in die Aufteilungsregel mit eingehen (siehe „Eigenständigkeit von Verbindungen“ auf Seite 552).

Der Anteil einer Verbindung i an der Gesamtnachfrage errechnet sich wie bisher folgendermaßen:

$$p_i = \frac{g(R_i)}{\sum_j g(R_j)}$$

Dabei ist g die gewählte (stets antitone) Nutzenfunktion, im Fall von **Logit** ist also $g(x) = e^{-bx}$.

Hinweise: Wie an der Definition erkennbar wird, muss bei Benutzung der Box-Cox-Transformation für x_i generell $x_i \geq 0$ gelten, im Fall $\lambda_i = 0$ sogar $x_i > 0$. Wird diese Regel zur Laufzeit verletzt, wird die Umlegung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

Durch Box-Cox-Transformation oder durch negative Koeffizienten kann R_i selbst negativ sein. In diesem Fall ist nur die Logit-Nutzenfunktion anwendbar, sonst wird die Umlegung mit einer Fehlermeldung abgebrochen.

7.10.6.2 Eigenständigkeit von Verbindungen (verfahrensrelevant)

Alle vorgestellten Aufteilungsmodelle (siehe „Aufteilungsmodelle in der Umlegung“ auf Seite 378) sind in ihrer herkömmlichen Formulierung nicht in der Lage, Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Verbindungen bei der fahrplanfeinen Umlegung zu berücksichtigen. Es kann allerdings von Nachteil sein, diesen Aspekt zu ignorieren. Um Wechselwirkungen zu modellieren, definiert man Funktionen w_i , welche die Wirkungen anderer Verbindungen auf eine Verbindung i beschreiben. Der Wertebereich von w_i ist das Intervall $[0,1]$. Besitzt j keinerlei Wirkung auf i , gilt $w_i(j) = 0$, bei völliger Übereinstimmung von i und j gilt $w_i(j) = 1$, das heißt es ist auch stets $w_i(j) = 1$.

Die folgenden Größen werden zur Berechnung von $w_i(j)$ herangezogen.

➤ die zeitliche Nähe beider Verbindungen im Hinblick auf Abfahrt und Ankunft

$$x_i(j) = \frac{|ABF_j - ABF_i| + |ANK_j - ANK_i|}{2}$$

➤ der Vorteil von i gegenüber j in der empfundenen Reisezeit $y(j) := ERZ_i - ERZ_j$

➤ der Vorteil von i gegenüber j im Fahrpreis $z(j) := FP_i - FP_j$

Damit sei w wie folgt definiert:

$$w_i(j) := \left(1 - \frac{x_i(j)}{s_x}\right)^+ \cdot \left(1 - c \cdot \min\left[1, \frac{s_z \cdot |y_i(j)| + s_y \cdot |z_i(j)|}{s_y \cdot s_z}\right]\right)$$

wobei

$$s_y := \begin{cases} s_y^+ & \text{falls } y_i(j) \geq 0 \\ s_y^- & \text{falls } y_i(j) < 0 \end{cases} \quad \text{und} \quad s_z := \begin{cases} s_z^+ & \text{falls } z_i(j) \geq 0 \\ s_z^- & \text{falls } z_i(j) < 0 \end{cases}$$

Die $s > 0$ sind interne Parameter zur Steuerung der Einflussbereiche der drei Größen. c ist eine Konstante, die die absolute Wirkung des zweiten Faktors kontrolliert und vom Benutzer innerhalb von $[0,1]$ vorgegeben wird. Der erste Faktor bildet die zeitliche Nähe von i und j ab. Bei Zeitgleichheit gilt $x_i(j) = 0$, so dass dieser Faktor insgesamt gleich 1 ist. Gilt für den zeitlichen Unterschied $x_i(j) \geq s_x$, so wird der Ausdruck dagegen null und es gilt auch $w_i(j) = 0$. Somit ist s_x der maximale zeitliche Abstand, bei dem eine Wirkung von j auf i möglich ist.

Der zweite Faktor liegt zwischen 1 (bei völliger Gleichheit im Sinne von $y(j) = 0$ und $z(j) = 0$) und $1 - c$ (bei großer Verschiedenheit von i und j). Analog

zu s_x ist s_y^+ beziehungsweise s_y^- der maximale Zeitvorteil oder Zeitnachteil von i , bei dem eine Wirkung von j möglich ist. Entsprechendes gilt für s_z hinsichtlich des Fahrpreises. Die Standardeinstellung ergibt eine Beziehung von $s_y^- = 2s_y^+$ und $s_z^- = 2s_z^+$. Durch diese Asymmetrie wird bei zwei zeitnahen Verbindungen die bessere begünstigt, da ihre Wirkung auf die schlechtere Alternative größer ist als umgekehrt. Grundsätzlich sollte deshalb immer $\text{EigKoeffQualitätHoch (EKQH)} < \text{EigKoeffQualitätGering (EKQG)}$ gewählt werden. Bei Verletzung dieser Regel erscheint eine Warnung zu Beginn der Umlegung (oder eine Fehlermeldung im Fenster). Insgesamt gilt Folgendes:

$s_x = \min(2 \cdot \text{mittlere Wartezeit eines zufällig zugehenden Fahrgasts zwischen der ersten und der letzten Abfahrt, maximales Zeitfenster})$

$s_y^+ = \text{EKQH} \cdot \text{durchschnittliche ERZ im gesamten Umlegungszeitraum}$

$s_y^- = \text{EKQG} \cdot \text{durchschnittliche ERZ im gesamten Umlegungszeitraum}$

$s_z^+ = \text{EKQH} \cdot \text{durchschnittlicher Fahrpreis im gesamten Umlegungszeitraum}$

$s_z^- = \text{EKQG} \cdot \text{durchschnittlicher Fahrpreis im gesamten Umlegungszeitraum}$

Hinweis: Es werden also nur die zeitliche Lage, die ERZ und der Fahrpreis verglichen, hingegen werden Verlaufsinfos nicht ausgewertet.

Liegen keine Fahrpreise vor (das heißt $FP_i = 0$ für alle i),
setzt man $s_z = 1$.

Nun wird das Attribut **Eigenständigkeit einer Verbindung** wie folgt definiert.

$$EIG_i := \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_i(j)} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1, j \neq i}^n w_i(j)} \quad 0$$

Dabei sei n die Anzahl aller Verbindungen.

Aufteilungsmodelle mit Eigenständigkeit (verfahrensrelevant)

Bei Verwendung der Eigenständigkeit im Rahmen der Verbindungswahl muss dieses Attribut in das Aufteilungsmodell integriert werden. In der obigen Fassung wurde je Zeitintervall a der Nutzen U_i^a einer Verbindung i berechnet und hieraus ihr prozentualer Anteil an der Nachfrage des Zeitintervalls bestimmt. Bei Verwendung der Eigenständigkeit tritt $U_i^a \cdot EIG$ an die Stelle

von U_i^a , das heißt, es gilt Folgendes:

$$p_i^a = \frac{U_i^a \cdot EIG_i}{\sum_{j=1}^n U_j^a \cdot EIG_j}$$

Durch diese lineare Abhängigkeit vom Eigenständigkeitsattribut ist gewährleistet, dass k zeitgleiche, identische Alternativen wie eine einzige Verbindung behandelt werden. Denn nach der Definition von *EIG* beträgt die Eigenständigkeit jeder dieser k Alternativen genau $1/k$ (wenn nicht noch weitere zeitnahe Verbindungen Einfluss nehmen). Dadurch ist die Summe ihrer Gewichte in der Aufteilungsformel gerade gleich dem Gewicht einer einzelnen, nicht vervielfachten Verbindung derselben Art.

Vergleich der Aufteilungsmodelle mit Eigenständigkeit

In Tabelle 176 bis Tabelle 180 werden die verschiedenen Aufteilungsmodelle jeweils mit und ohne Eigenständigkeit miteinander verglichen. Die Verfahrensparameter seien wie in Tabelle 1 gewählt.

Kirchhoff	$\beta = 4$
Logit	$\beta = 0,25$
Box-Cox	$\beta = 1$ und $\tau = 0,5$
Lohse	$\beta = 4$
ERZ-Formel	$ERZ = RZ + 2 \cdot UZ + 2 \cdot UH$
WID-Formel	$WID = ERZ + 4 \cdot \text{Fahrpreis}$
EIG-Parameter	$c = 1$

Tabelle 175: Verfahrensparameter für den Vergleich der Aufteilungsmodelle

Die zum jeweils vorangehenden Beispiel abgeänderten Verbindungsdaten sind in Tabelle 176 bis Tabelle 180 **fett** gedruckt. Alle Umlegungsanteile sind Prozentangaben.

Verbindungsdaten					Aufteilung ohne EIG				Aufteilung mit EIG			
Nr	Abf	Ank	ERZ	FP	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse
1	10	30	20	3,00	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
2	30	50	20	3,00	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
3	50	70	20	3,00	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3

Tabelle 176: Beispiel 1 – Ausgangssituation

Verbindungsdaten					Aufteilung ohne EIG				Aufteilung mit EIG			
Nr	Abf	Ank	ERZ	FP	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse
1	10	30	20	3,00	25	25	25	25	33,3	33,3	33,3	33,3
2	30	50	20	3,00	25	25	25	25	16,7	16,7	16,7	16,7
3	30	50	20	3,00	25	25	25	25	16,7	16,7	16,7	16,7
4	50	70	20	3,00	25	25	25	25	33,3	33,3	33,3	33,3

Tabelle 177: Beispiel 2 – zeitgleiches, identisches Verbindungspaar

Verbindungsdaten					Aufteilung ohne EIG				Aufteilung mit EIG			
Nr	Abf	Ank	ERZ	FP	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse
1	10	30	20	3,00	25	25	25	25	32,7	32,7	32,7	32,7
2	30	50	20	3,00	25	25	25	25	17,3	17,3	17,3	17,3
3	32	52	20	3,00	25	25	25	25	17,3	17,3	17,3	17,3
4	50	70	20	3,00	25	25	25	25	32,7	32,7	32,7	32,7

Tabelle 178: Beispiel 3 – zeitnahes, identisches Verbindungspaar

Verbindungsdaten					Aufteilung ohne EIG				Aufteilung mit EIG			
Nr	Abf	Ank	ERZ	FP	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse
1	10	30	20	3,00	25,9	26,7	26,2	25,1	31,9	32,6	32,2	31,2
2	30	50	20	3,00	25,9	26,7	26,2	25,1	20,2	20,7	20,4	19,8
3	32	47	20	3,30	22,3	19,8	21,3	24,6	16,0	14,1	15,2	17,8
4	50	70	20	3,00	25,9	26,7	26,2	25,1	31,9	32,6	32,2	31,2

Tabelle 179: Beispiel 4 – zeitnahes, ähnliches Verbindungspaar (Verbindung 3 jetzt mit Umstieg)

Verbindungsdaten					Aufteilung ohne EIG				Aufteilung mit EIG			
Nr	Abf	Ank	ERZ	FP	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse	Kirchhoff	Logit	BoxCox	Lohse
1	10	30	20	3,00	23,5	21,9	22,8	24,6	26,5	24,9	25,8	27,7
2	30	50	20	3,00	23,5	21,9	22,8	24,6	20,1	18,9	19,6	21,0
3	32	44	17	3,30	29,6	34,3	31,5	26,1	26,9	31,4	28,7	23,6
4	50	70	20	3,00	23,5	21,9	22,8	24,6	26,5	24,9	25,8	27,7

Tabelle 180: Beispiel 5 – zeitnahes, unterschiedliches Verbindungspaar

Die Tatsache, dass ohne Verwendung von Eigenständigkeit die Verbindungen 1, 2 und 4 **in allen Fällen gleich viele Fahrgäste** erhalten, macht deutlich, dass die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Alternativen hier besser berücksichtigt werden sollten. Man kann erkennen, dass dann mit allen Aufteilungsmodellen bessere Ergebnisse erzielt werden.

7.10.6.3 Beispiel für die Verbindungswahl

Die Wirkung der Verbindungswahl des fahrplanfeinen Verfahrens wird anhand der Ergebnisse einer Verbindungssuche mit 10 Minuten Umsteigezuschlag gezeigt. Es wird die Branch & Bound-Suche verwendet. Diese Suche liefert alle fünf Verbindungen, die in Tabelle 1 dargestellt sind. Eine einkriterielle Kurzwegsuche würde dagegen nur die Verbindungen 1, 3 und 5 finden, da sie jeweils den kleinsten Widerstand unter den Verbindungen ihres Abfahrtszeitpunkts besitzen. Der Widerstand (= empfundene Reisezeit) ergibt sich wie folgt aus der gewichteten Summe der Kenngrößen Fahrzeit (FZ), Umsteigewartezeit (UZ) und Umsteigehäufigkeit (UH).

Verb. <i>i</i>	ab	FZ_i	UZ_i	UH_i	$ERZ = FZ + UZ \cdot Fak + UH \cdot Fak$ $i \quad i \quad i \quad UZ \quad i \quad UH$
1	6:10	28 min	3 min	1	$28 + 3 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 36$
2	6:10	45 min	0 min	0	$45 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 2 = 45$
3	6:55	45 min	0 min	0	$45 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 2 = 45$
Verb. <i>i</i>	ab	FZ_i	UZ_i	UH_i	$ERZ = FZ + UZ \cdot Fak + UH \cdot Fak$ $i \quad i \quad i \quad UZ \quad i \quad UH$
4	7:25	28 min	8 min	1	$28 + 8 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 46$
5	7:25	45 min	0 min	0	$45 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 2 = 45$
$Fak_{UZ} = 2, Fak_{UH} = 2$					

Tabelle 181: Verbindungssuche-Ergebnis (Umsteigezuschlag 10 min, Parameterdatei TIMETAB1.PAR)

Tabelle 182 zeigt die Widerstände der Verbindungen. Da ΔT von der Wunschabfahrtszeit der Fahrgäste abhängt, ergeben sich für jeden Zeitraum des Fahrgastaufkommens andere Widerstände. So sind die Widerstände der ersten beiden Verbindungen im ersten Intervall geringer, die der letzten drei Verbindungen dagegen im zweiten Intervall. Die Widerstandsdefinition sei hier so gewählt, dass folgendes gilt:

$$R_i^a = ERZ \cdot 1.0 + \Delta T_{i1}^{afrueh} \cdot 1.0 + \Delta T_{i2}^{a spaet} \cdot 1.0$$

Verb. i	ab	ΔT_{i1} 5:30-6:30	ΔT_{i2} 6:30-7:30	R_i^1 5:30-6:30	R_i^2 6:30-7:30
1	6:10	0 min	20 min	36 + 0 = 36	36 + 20 = 56
2	6:10	0 min	20 min	45 + 0 = 45	45 + 20 = 65
3	6:55	25 min	0 min	45 + 25 = 70	45 + 0 = 45
4	7:25	55 min	0 min	46 + 55 = 101	46 + 0 = 46
5	7:25	55 min	0 min	45 + 55 = 100	45 + 0 = 45

Tabelle 182: Zeitliche Abstände ΔT und Widerstände R der Verbindungen für die untersuchten zwei Zeiträume des Fahrgastaufkommens

Mit einer Aufteilungsregel (hier Kirchhoff mit $\beta = 3$) berechnen sich dann aus den Widerständen die Anteile P_i^a , die auf die einzelnen Verbindungen entfallen. Die Eigenständigkeit wird hier nicht berücksichtigt. Wie in Tabelle 3 dargestellt, erhalten alle fünf Verbindungen Anteile an der Nachfrage beider Zeitintervalle.

Verb. i	ab	P_i^1 5:30-6:30	P_i^2 6:30-7:30	Fahrten M_i^1 5:30-6:30	Fahrten M_i^2 6:30-7:30	Σ Fahrten 5:30-7:30
1	6:10	57%	13%	$30 \cdot 0,57 = 17$	$60 \cdot 0,13 = 8$	25
2	6:10	30%	8%	$30 \cdot 0,30 = 9$	$60 \cdot 0,08 = 5$	14
3	6:55	7%	27%	$30 \cdot 0,07 = 2$	$60 \cdot 0,27 = 16$	18
4	7:25	3%	25%	$30 \cdot 0,03 = 1$	$60 \cdot 0,25 = 15$	16
5	7:25	3%	27%	$30 \cdot 0,03 = 1$	$60 \cdot 0,27 = 16$	17
S		100%	100%	30	60	90

Tabelle 183: Aufteilung der Fahrten auf die Verbindungen (Kirchhoff, $\beta = 3$)

Damit ergibt sich das in Abbildung 156 dargestellte Belastungsbild.

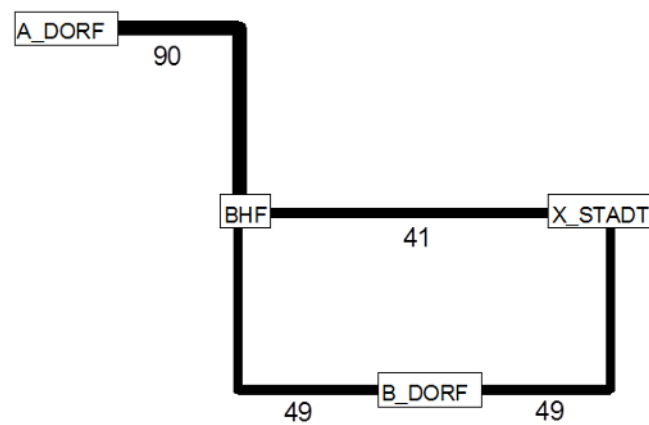


Abbildung 156: Netzbelastung bei fahrplanfeiner Umlegung (Parameterdatei *timetab1.par*)