Klimaschutz-Szenario Baden-Württemberg 2030

Schlussbericht

München, Aachen, Freiburg, Essen
Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **I**

Abbildungsverzeichnis **V**

Tabellenverzeichnis **IX**

0. Einleitung **1**

0.1 Verkehrs- und umweltpolitische Ziele des Landes Baden-Württemberg 1

0.2 Derzeitige und künftige Verkehrsentwicklung 1

0.3 Zielsetzung 2

1. Vorgehenskonzept **4**

1.1 Ablauf der Verkehrsprognose 4

1.2 Rechenfälle 6

1.3 Festlegungen zum Untersuchungsgebiet und Abgrenzung zur Prognose des Bundes 7

2. Modellzusammenhänge und Modellannahmen **10**

2.1 Personenverkehr (Mikromodell) 10
2.1.1 Generelle Modellstruktur 10
2.1.2 Datengrundlagen für die Modellbildung 11
2.1.3 Verkehrserzeugung 12
2.1.4 Verkehrsverteilung (Zielwahl) 21
2.1.5 Modal-Split 27
2.1.6 Verkehrswiderstände 31
2.1.7 Ermittlung der Nachfragematrix 2010 40
2.1.8 Marginalmodell 43
2.1.9 Induzierter Verkehr 47

2.2 Güterverkehr (Mikromodell) 49
2.2.1 Generelle Vorgehensweise 49
2.2.2 Erstellen der Analysematrix "BW Analysefall 2010" 51
2.2.3 Abschätzung der zukünftigen Verkehrsnachfrage 51
2.2.4 Verkehrsmittelwahl 59
2.2.5 Rückkoppelung zur Verkehrsinfrastruktur 65

2.3 Makromodell 67

2.4 Umlegungsmodell MIV 73

2.5 Umlegungsmodell Schienenverkehr 83
2.5.1 Umlegungsmodell Schienenpersonenverkehr 83

2.5.2	Produktionssysteme	94
2.5.3	Wagenbildung	94
2.5.4	Zugbildung	98
2.5.5	Kapazitätsabhängige Netzumlegung	106
2.6	Umlegungsmodell Binnenschifffahrt	110
2.7	Erstellung Netzmodelle	124
2.7.1	Übersicht	124
2.7.2	Netzmodell Straße	124
2.7.3	Netzmodell Schiene	130
2.7.4	Wasserstraßennetz	142
2.8	Methodik der Ermittlung der CO_2-Emissionen	147
2.8.1	Gegenstand	147
2.8.2	Allgemeine und verkehrsträgerspezifische Definitionen	147
2.8.3	CO_2-Emissionsfaktoren	150
2.8.4	Berechnungsverfahren	153
3.	**Verkehrsentwicklung in Baden-Württemberg gemäss BVWP-Prognose**	**155**
3.1	Vorgehensweise	155
3.2	Rahmenbedingungen der BVWP-Prognose	156
3.2.1	Bereich "Strukturdaten"	157
3.2.2	Bereich "Infrastruktur und Verkehrsangebot"	169
3.2.3	Bereich "Kosten/Ordnungspolitik"	172
3.3	Ergebnisse Personenverkehr	176
3.4	Ergebnisse Güterverkehr	181
3.4.1	Gesamtergebnisse Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung je Verkehrsmittel	181
3.4.2	Entwicklung des Güterverkehrs nach Gütergruppen	183
3.4.3	Entwicklung des Güterverkehrs nach Hauptverkehrsbeziehungen	186
3.4.4	Entwicklung des Güterverkehrs nach Bundesländern	190
3.4.5	Entwicklung des Güterverkehrs in Baden Württemberg	192
3.4.6	Transportleistung durch Baden-Württemberg	195
3.5	Ergebnisse verkehrsbedingter CO_2-Ausstoß	197
3.5.1	Annahmen	197
3.5.2	Ergebnisse	202
4.	**Szenarienannahmen für das Klimaschutz-Szenario**	**207**
4.1	Erreichung der Verkehrs- und umweltpolitischen Ziele der Landesregierung bei der Verkehrsentwicklung gemäß BVWP-Prognose	207
4.2	Geänderte Annahmen im Bereich sozio-ökonomische Rahmenbedingungen	209
4.3	Annahmen im Bereich des Öffentlichen Verkehrs (Ziel: Stärkung des ÖV)	211
4.3.1	Geänderte Annahmen im Bereich Schienennetz (nur kleinere Änderungen gegenüber BMVP-Prognose)	211

4.3.2	Geänderte Annahmen im Bereich der Verkehrsangebote im Öffentlichen Personennahverkehr (ohne Eisenbahn, Ziel: Stärkung des ÖV)	217
4.3.3	Geänderte Annahmen im Bereich Fernlinienbus (Ziel: Aktualisierung der Prognose/Stärkung des ÖV)	218
4.3.4	Geänderte Annahmen im Bereich der Fahrpreise im Öffentlichen Verkehr	219
4.3.5	Geänderte Annahmen im Bereich der Transportpreise im Schienengüterverkehr (Ziel: Stärkung Schienengüterverkehr)	220
4.4	Geänderte Annahmen im Bereich Fahrradverkehr	220
4.5	Geänderte Annahmen im Bereich Luftverkehr	220
4.6	Geänderte Annahmen im Bereich Straßennetze (Ziel: Steuerung/Reduzierung des Straßenverkehrs)	221
4.6.1	Straßennetz (Ziel: Aktualisierung der BVWP-Annahmen)	221
4.6.2	Tempolimits (Ziel: Steuerung des MIV)	225
4.6.3	Parkkosten (Ziel: Steuerung des MIV in dicht besiedelten Gebieten, Verlagerung auf ÖV)	225
4.6.4	Veränderte Pkw-Nutzerkosten (Ziel: Reduzierung des MIV, Verlagerung auf ÖV)	225
4.6.5	Erhöhung der Lkw-Maut (Ziel: Reduzierung des Straßengüterverkehrs zugunsten der Schiene und Binnenschiff)	225
4.6.6	Erhöhung der Lkw-Transportkosten insgesamt	232
4.7	Geänderte Annahmen im Bereich des Pkw-Bestandes und der Besetzungsgrade	234
4.8	Geänderte Annahmen bei der Berechnung der CO_2-Emissionen	237
4.9	Zusammenfassung der im Klimaschutz-Szenario gemachten Annahmen	238
5.	**Ergebnisse**	**241**
5.1	Vorbemerkungen	241
5.2	Personenverkehr	241
5.3	Güterverkehr	252
5.3.1	Veränderung des Gesamtergebnisses nach Verkehrsträgern	254
5.3.2	Gründe für die geringe Veränderung des Marktanteils	257
5.3.3	Veränderung nach Gütergruppen	264
5.3.4	Veränderung nach Hauptverkehrsbeziehungen	266
5.3.5	Veränderung nach Bundesländern	269
5.3.6	Veränderung in Baden Württemberg	271
5.3.7	Veränderungen der Ergebnisse des Klimaschutz-Szenarios für BW bei einem Verzicht auf einen Ausbau des Neckars für die 135 m – Schifffahrt (Klimaschutz-Szenario 2030 Neckar)	276
5.4	Verkehrsumlegung und Auswirkungen auf die Infrastruktur	278
5.4.1	Schienenverkehr	278
5.4.2	Netzberechnung Straße	303
5.4.3	Gemeinsame Betrachtung der Straßen- und der Schieneninfrastruktur	327

5.5	Auswirkungen auf den CO_2-Ausstoß	331
6.	**Sensitivitätsrechnungen**	**334**
6.1	Aufgabenstellung	334
6.2	Sensitivitätsrechnungen zur Fahrzeugflotte: Klimaschutz durch Technik	335
6.2.1	Reduktion nur durch Anstieg der Zahl der elektrisch betriebenen Fahrzeuge	335
6.2.2	Reduktion nur durch Rückgang des Durchschnittsverbrauchs der Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor	337
6.2.3	Reduktion durch einen Mix der Effekte aus der Antriebsartenstruktur und dem Durchschnittsverbrauch	339
6.3	Sensitivitätsrechnungen zu den variablen Kosten: Klimaschutz durch Preise	343
6.3.1	Personenverkehr	343
6.3.2	Güterverkehr	345
ANLAGEN		**347**
A1.	**Generelle Vorgehensweise bei der Prognose und benutzte Dateninformationen**	**347**
A2	**Besondere Berücksichtigung von singulären Verkehrserzeugern**	**350**
A2.1	Binnenhäfen	352
A2.2	KV-Terminals	357
A2.3	Kraftwerke	359
A2.4	Raffineriestandorte	361
A2.5	Standorte der Automobilindustrie	365

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Struktur der Verkehrsprognose gemäß Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen (im Folgenden BVWP-Prognose genannt)	4
Abb. 1-2:	Ablauf der Verkehrsprognose für das Klimaschutz-Szenario 2030	5
Abb. 1-3:	Verkehrszelleneinteilung in Südwestdeutschland Mikroebene 2 aus der BVWP-Prognose	9
Abb. 2-1:	Struktur der Güterverkehrsprognose	50
Abb. 2-2:	Simulation der Verkehrsmittelwahl (Stated Preferences)	60
Abb. 2-3:	Hierarchische Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells	62
Abb. 2-4:	Anpassungsgüte der Prognosefunktion für die Verkehrsleistung des Individualverkehrs	70
Abb. 2-5:	Zusammenhang zwischen dem Luftverkehr und dem BIP Deutschlands	71
Abb. 2-6:	Gerasterte Einwohnerdichten (Quelle: BBSR) und Einspeisungspunkte ins Straßennetzmodell. Hier dargestellt nur das klassifizierte Straßennetz (A, B und L)	73
Abb. 2-7:	Aufgliederung der Verkehrsströme in Nah- und Fernverkehre	75
Abb. 2-8:	Ablaufschema zur Disaggregation der Mikro2-Verkehrsströme auf die Mikro3-Ebene	76
Abb. 2-9:	Ablauf zur Berechnung des Personennahverkehrs im MIV	78
Abb. 2-10:	Dynamisches Routensuchverfahren, Funktionsschema	81
Abb. 2-11:	Ermittlung der Nutzungswahrscheinlichkeiten	91
Abb. 2-12:	Einordnung der Netzumlegung des Schienengüterverkehrs in den Analyse- und Prognoseprozess	93
Abb. 2-13:	Transformation der Kosten für den Transport der Leerwagen	97
Abb. 2-14:	Kalibrierung der Leerwagenanteile	98
Abb. 2-15:	Phasen bei der Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems	100
Abb. 2-16:	Hierarchiestufen bei der Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems	102
Abb. 2-17:	Umlegung des Schienengüterverkehrs in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 für Baden-Württemberg	109
Abb. 2-18:	Zusammenhang zwischen wasserstandsbedingtem Auslastungsgrad und durchschnittlicher Tragfähigkeit der Flotte	122
Abb. 2-19:	Straßennetzmodell für die Bundesfernstraßenplanung NEMOBFStr	126
Abb. 2-20:	Ausschnitt aus dem Straßennetzmodell NEMOBFStr	127
Abb. 2-21:	Typologie der Streckencharakterisierung im Netzmodell für die Bundesfernstraßenplanung	128

Abb. 2-22:	Überarbeitungen im Straßennetzmodell NEMOBFStr	129
Abb. 2-23:	Auszug aus dem Prognose-Netzmodell 2030 für Baden-Württemberg	132
Abb. 2-24:	SPFV-Konzept gemäß der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario)	133
Abb. 2-25:	Abbildung des SPNV (ohne S-Bahn) in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - Regionalverkehr	134
Abb. 2-26:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Stuttgart/VVS	135
Abb. 2-27:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Rhein-Neckar	136
Abb. 2-28:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Karlsruhe/Heilbronn	137
Abb. 2-29:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - Breisgau-S-Bahn	138
Abb. 2-30:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - Ortenau-S-Bahn	139
Abb. 2-31:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - Regio-S-Bahn Basel/Hochrhein	140
Abb. 2-32:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - RSB Neckar-Alb	141
Abb. 2-33:	Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Zürich	142
Abb. 3-1:	Einwohnerentwicklung 2030 gegenüber 2010 nach Kreisen/ kreisfreien Städten	160
Abb. 3-2:	Reale Veränderung des BIP 2030 gegenüber 2010 nach Kreisen/kreisfreien Städten	163
Abb. 3-3:	Entwicklung des Pkw-Bestands 2030 gegenüber 2010 nach Stadt- und Landkreisen gemäß BVWP-Prognose	168
Abb. 3-4:	Grundlagen für die Annahmen zu den Nutzerkosten (Beispiel Pkw)	173
Abb. 3-5:	Übersicht über die BVWP-Prognose (Territorialleistung) für Deutschland und Baden-Württemberg im Vergleich	180
Abb. 3-6:	Wachstumsraten des Verkehrsaufkommens nach Hauptverkehrsbeziehungen und Verkehrsträgern (2010-2030) in % p.a.	189
Abb. 3-7:	Wachstumsraten der Verkehrsleistung nach Hauptverkehrsbeziehungen und Verkehrsträgern (2010-2030) in % p.a.	189
Abb. 4-1:	Berücksichtigung der Schienenverkehrsprojekte BW in das Prognosenetz BW	211
Abb. 4-2:	SPFV-Konzept gemäß BVWP-Prognosen	213

Abb. 4-3:	SPFV-Konzept gemäß BVWP-Prognosen - Ausschnitt Baden-Württemberg	214
Abb. 4-4:	Abbildung des SPNV (ohne S-Bahn) in Baden-Württemberg im Arbeitsszenario der Bundesverflechtungsprognose - Regionalverkehr	214
Abb. 4-5:	SPNV-Angebot Zielkonzept 2025 BW - Einteilung der Streckenabschnitte in Angebotsklassen	215
Abb. 4-6:	SPNV-Angebot Zielkonzept 2025 BW - Expresslinien	216
Abb. 4-7:	Unterstellte Regiobuslinien in Baden-Württemberg	217
Abb. 4-8:	Projekte des vordringlichen Bedarfs (VB) der BVWP 2003	222
Abb. 4-9:	Vom Land Baden-Württemberg für die Bewertung im Rahmen des BVWP 2015 insgesamt angemeldete Straßenbauprojekte (incl. aller Varianten)	223
Abb. 4-10:	Projekte des für die NKA im Rahmen der BVWP 2015 definierten Bezugsfalles	224
Abb. 5-1:	Schienengüterverkehr, der kapazitätsbedingt im Klimaschutz-Szenario2030 nicht umgesetzt ist	253
Abb. 5-2:	Veränderung der Modal-Split-Anteile im Güterverkehr	257
Abb. 5-3:	Transportkostenvergleich für einen Wechselbehälter im direkten Lkw-Transport und einem Transport per Schiene inkl. einem Vor- und Nachlauftransport von rd. 30 km	261
Abb. 5-4:	Veränderung der Marktanteile der verschiedenen Verkehrsträger für Binnenverkehr und grenzüberschreitende Verkehre	269
Abb. 5-5:	Umlegungsergebnisse SPFV Klimaschutz-Szenario	279
Abb. 5-6:	Umlegungsergebnisse SPFV, Differenz zum BVWP-Szenario	280
Abb. 5-7:	Umlegungsergebnisse SPNV, Klimaschutz-Szenario (ohne S-Bahn Stuttgart/Rhein-Neckar)	281
Abb. 5-8:	Umlegungsergebnisse SPNV, Differenz zum BVWP-Szenario (ohne S-Bahn Stuttgart/Rhein-Neckar)	282
Abb. 5-9:	Schienenauslastung in % im nördlichen Teil Baden-Württembergs im BVWP-Szenario 2030	286
Abb. 5-10:	Schienenauslastung in % im südlichen Teil Baden-Württembergs im BVWP-Szenario 2030	287
Abb. 5-11:	Belastungssituation im Schienengüterverkehr im Klimaschutz-Szenario 2030	288
Abb. 5-12:	Differenzbelastung im Schienengüterverkehr zwischen dem Klimaschutz-Szenario und dem BVWP-Szenario	289
Abb. 5-13:	Belastungs- und Auslastungssituation des Schienennetzes im nördlichen Teil Baden-Württembergs im Klimaschutz-Szenario 2030	290
Abb. 5-14:	Belastungs- und Auslastungssituation des Schienennetzes im südlichen Teil Baden-Württembergs im Klimaschutz-Szenario	291

Abb. 5-15: Streckenauslastung innerhalb Stuttgarts (6:00- 22:00 Uhr) in 2030 in beiden Szenarien 298
Abb. 5-16: Streckenauslastung im Raum südlich von Stuttgart (6:00- 22:00 Uhr) in 2030 in beiden Szenarien 299
Abb. 5-17: Streckenauslastung zwischen Karlsruhe und Stuttgart (6:00- 22:00 Uhr) in 2030 in beiden Szenarien 302
Abb. 5-18: Unterstellte Neu- und Ausbaumaßnahmen im Netzmodell des Klimaschutz-Szenarios 305
Abb. 5-19: Neu- und Ausbaumaßnahmen im Netzmodell des BVWP-Szenarios 306
Abb. 5-20: Belastung des Straßennetzes im BVWP-Szenario 2030 durch den Kfz-Verkehr an Werktagen 310
Abb. 5-21: Belastung des Straßennetzes im BVWP-Szenario 2030 durch den Lkw-Verkehr an Werktagen 311
Abb. 5-22: Belastung des Straßennetzes im Klimaschutz-Szenario 2030 durch den Kfz-Verkehr an Werktagen 312
Abb. 5-23: Belastung des Straßennetzes im Klimaschutz-Szenario 2030 durch den Lkw-Verkehr an Werktagen 313
Abb. 5-24: Differenzen der Kfz-Verkehrsbelastungen 2030 an Werktagen zwischen dem Klimaschutz- und dem BVWP-Szenario 314
Abb. 5-25: Differenzen der Lkw-Verkehrsbelastungen 2030 an Werktagen zwischen dem Klimaschutz- und dem BVWP-Szenario 315
Abb. 5-26: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes nach HBS 2012 im Netz 2010 an Werktagen 323
Abb. 5-27: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes nach HBS 2012 im Netz des Klimaschutz-Szenarios an Werktagen 324
Abb. 5-28: Qualitätsstufen des Verkehrsablaufes nach HBS 2012 im Netz des BVWP-Szenarios an Werktagen 325
Abb. 5-29: Auslastung Straßen- und Schieneninfrastruktur im BVWP-Szenario (Tagesdurchschnitt) 329
Abb. 5-30: Auslastung Straßen- und Schieneninfrastruktur im Klimaschutz-Szenario (Tagesdurchschnitt) 330
Abb. 6-1: Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen für die zentralen Größen für die CO_2-Emissionen 342
Abb. A-1: Standorte der Stahlindustrie 364

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Strukturdaten für die Verkehrserzeugung	13
Tab. 2-2:	Mobilitätsraten (Wege pro Einwohner) je Bundesland	14
Tab. 2-3:	Mobilitätswerte je Fahrtzweck und Altersgruppe differenziert nach sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)	15
Tab. 2-4:	Vergleich der Codierung der Hauptzwecke nach MiD 2008 (Zeilen) und nach Definition wie in Verkehr in Zahlen (Spalten) - hochgerechnete Wege (entnommen aus DIW: Methodenbericht VIZ 2010/2011)	17
Tab. 2-5:	Erzeugungsraten, Fahrten je Person und Jahr (nur Hinfahrten)	19
Tab. 2-6:	Elastizitäten der Mobilitätszunahme gegenüber der Zunahme vom BIP/Kopf und von der Pkw-Dichte	20
Tab. 2-7:	Verkehrsanziehende Strukturdaten für das Verteilungsmodell	21
Tab. 2-8:	Mobilitätswerte je Fahrtzweck und Altersgruppe differenziert nach sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)	23
Tab. 2-9:	Erzeugungsraten (Fahrten je Person und Jahr, nur Hinfahrten)	24
Tab. 2-10:	ÖV-Anteile in % (über alle Wege einschließlich nichtmotorisierter Verkehr) nach Fahrtzwecken und Altersgruppen abhängig vom sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)	28
Tab. 2-11:	ÖV-Anteile in % (über alle Wege, nur motorisierter Verkehr) nach Fahrtzwecken und Altersgruppen abhängig vom sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)	29
Tab. 2-12:	Splitgewichte je Fahrtzweck bzw. Untergruppe	31
Tab. 2-13:	Übersicht über die verwendeten empirischen Matrixelemente	41
Tab. 2-14:	Identifizierte Erklärungsfaktoren des Güterverkehrsaufkommens	55
Tab. 2-15:	Entwicklung des deutschen gesamtmodalen Binnenverkehrs zwischen 2010 und 2030 in 1.000 t	57
Tab. 2-16:	Verkehrsträgerbezogene Pünktlichkeitswerte in Prozent	64
Tab. 2-17:	Produktgruppenbezogene Verspätungsquoten (q_p) und durchschnittliche Verspätungen (v_p) im SPV-Netzmodell 2010	87
Tab. 2-18:	Produktgruppenbezogene Aufschlagsfaktoren auf die spezifischen Grundpreise	89
Tab. 2-19:	Maßgebende Parameter für das SPV-Tarifmodell[1)]	90
Tab. 2-20:	Einspeisungspunkte des Wasserstraßennetzmodells in Baden-Württemberg	111
Tab. 2-21:	Parameter der Hafenknoten des Wasserstraßennetzes	112
Tab. 2-22:	Parameter der Netzstrecken des Wasserstraßennetzes 2010/2030	113

Tab. 2-23: Für die Umlegung verwendete betriebswirtschaftliche Kostensätze der Motorschiffe bei Vollauslastung 114
Tab. 2-24: Trendfaktoren zur Entwicklung der durchschnittlichen Tragfähigkeit der eingesetzten Schiffsflotten im Zeitraum 2010 bis 2030 nach Wasserstraßengebieten 119
Tab. 2-25: Einspeisungspunkte des Wasserstraßennetzmodells in Baden-Württemberg 144
Tab. 2-26: Parameter der Netzstrecken des Wasserstraßennetzes 2010/2030 146
Tab. 2-27: Emissionsfaktoren für Kraftstoffe 151
Tab. 3-1: Entwicklung der demographischen Leitdaten in Deutschland gemäß BVWP Prognose (Kernszenario) 158
Tab. 3-2: Demographische Entwicklung nach Bundesländern (Einwohner in 1000) 159
Tab. 3-3: Gesamtwirtschaftliche Entwicklung in der BVWP-Prognose (ifo / HSU) 162
Tab. 3-4: Wirtschaftsentwicklung (ifo/HSU) für die BVWP-Prognose nach Bundesländern, z.Vgl. HWWI 2013 162
Tab. 3-5: Übersicht über die Annahmen zur energiewirtschaftlichen Entwicklung in der BVWP-Prognose (soweit verkehrsrelevant) 165
Tab. 3-6: Entwicklung des Pkw-Bestandes und der Pkw-Dichte in der BVWP-Prognose 167
Tab. 3-7: Zusammenfassung der unterstellten Veränderung der Nutzerkosten in der BVWP-Prognose 172
Tab. 3-8: Annahmen zum Lkw-Verkehr 174
Tab. 3-9: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zum Personenverkehrsaufkommen - Deutschland gesamt 176
Tab. 3-10: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zum Personenverkehrsaufkommen - Baden-Württemberg 177
Tab. 3-11: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zur Personenverkehrsleistung - Deutschland gesamt 178
Tab. 3-12: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zur Personenverkehrsleistung - Baden-Württemberg 179
Tab. 3-13: Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens nach Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose 181
Tab. 3-14: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose 182
Tab. 3-15: Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens nach NST2007 Gütergruppen und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (in Mio. t) 184
Tab. 3-16: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach NST2007 Gütergruppen und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (in Mrd. tkm) 185

Tab. 3-17: Entwicklung des Transportaufkommens nach Hauptverkehrsbeziehungen gemäß der BVWP-Prognose (in Mio. t) 187
Tab. 3-18: Entwicklung der Transportleistung nach Hauptverkehrsbeziehungen gemäß der BVWP-Prognose (in Mrd. tkm) 188
Tab. 3-19: Entwicklung des Güterverkehrs nach Bundesländern und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (Summe Versand und Empfang, in Mio. t) 190
Tab. 3-20: Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens in Baden-Württemberg nach Regierungsbezirken und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (in 1000 t) 193
Tab. 3-21: Entwicklung der Güterverkehrsleistung in Baden-Württemberg nach Regierungsbezirken und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (in Mio. tkm) 194
Tab. 3-22: Veränderung des Gesamtergebnisses für Baden-Württemberg (Aufkommen und Territorialleistung) nach Verkehrsträgern 196
Tab. 3-23: Pkw-Bestand nach Antriebsarten, Annahme der BVWP-Prognose sowie anderer Studien 199
Tab. 3-24: Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Fahrzeugarten in der BVWP-Prognose 200
Tab. 3-25: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Deutschland 203
Tab. 3-26: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Baden-Württemberg 205
Tab. 3-27: Entwicklung des Verkehrs und der CO_2-Emissionen in Baden-Württemberg 206
Tab. 4-1: Ziele der Landesregierung und gemäß BVWP-Prognose erwartete Entwicklung 207
Tab. 4-2: Vergleich der Bevölkerungsprognose 2030 der BVWP-Prognose mit der des Statistischen Landesamts 209
Tab. 4-3: Unterstellte Expressbus-Linien in der Metropolregion Stuttgart 218
Tab. 4-4: Lkw-Mautsätze mauterhebender europäischer Länder (Stand 2015) 226
Tab. 4-5: Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in gr./Lkw-km nach Lkw-Emissionsklassen (Stand 2013) 228
Tab. 4-6: Berechnung der Schadenskosten durch Luftverschmutzung in Mio. €/Jahr und in ct/Lkw-km im Jahr 2013 sowie Unterdeckung der Schadenskosten in den aktuell veranschlagten Maut-Sätzen 229
Tab. 4-7: Externe Kosten durch den CO_2 Ausstoß 230
Tab. 4-8: Veränderung der Annahmen zu den Lkw-Transportkosten 232
Tab. 4-9: Lkw-Kosten für eine Relation von ca. 200 km 233
Tab. 4-10: Beispiel Deutschland - Dänemark: Pkw-Fixkosten und Pkw/1000 Einwohner (Werte für 2012) 234

Tab. 4-11: Entwicklung Kraftstoffpreise und Pkw-Bestand in Deutschland 2002 - 2008 und 2008 - 2014 235
Tab. 4-12: Veränderung der Pkw-Dichte im Klimaschutz-Szenario gegenüber 2010 (Index 2010 = 100) 235
Tab. 4-13: Zusammenhang zwischen Besetzungsgrad und Verkehrsleistung 236
Tab. 4-14: Annahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Fahrzeugarten in der BVWP-Prognose 237
Tab. 4-15: Übersicht über die im Klimaschutz-Szenario veränderten Annahmen - Teil Personenverkehr 238
Tab. 4-16: Übersicht über die im Klimaschutz-Szenario veränderten Annahmen - Teil Güterverkehr 240
Tab. 4-17: Übersicht über die im Klimaschutz-Szenario veränderten Annahmen - Teil Annahmen zur Berechnung der CO_2-Emissionen 240
Tab. 5-1: Effekte der Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung und zum Fernbusverkehr 242
Tab. 5-2: Effekte der Annahmen zum Angebot des öffentlichen Verkehrs 243
Tab. 5-3: Effekte der Annahmen zu den Preisen des öffentlichen Verkehrs 244
Tab. 5-4: Effekte der Annahmen zum Fahrradverkehr 245
Tab. 5-5: Effekte der Annahmen zum Luftverkehr 246
Tab. 5-6: Effekte der Annahmen zum innerstädtischen Pkw-Verkehr 247
Tab. 5-7: Effekte der Annahmen zum Motorisierungsgrad 248
Tab. 5-8: Effekte der Annahmen zu den Kosten des Pkw-Verkehrs 249
Tab. 5-9: Effekte der Rückkoppelung mit den veränderten Widerständen 250
Tab. 5-10: Gesamtergebnis für den Personenverkehr im Klimaschutz-Szenario 251
Tab. 5-11: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Verkehrsträgern (in Mio. t) 254
Tab. 5-12: Veränderung der Verkehrsleistung nach Verkehrsträgern (in Mrd. tkm) 256
Tab. 5-13: Maximal möglicher Marktanteil von Bahn und Binnenschiff in den einzelnen Analysefällen 260
Tab. 5-14: Verlagerungspotenzial in relevanten Distanzklassen 262
Tab. 5-15: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Gütergruppen und Verkehrsträgern (in Mio. t) 265
Tab. 5-16: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Gütergruppen und Verkehrsträgern (in Mio. t) 266
Tab. 5-17: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Hauptverkehrsbeziehungen und Verkehrsträgern (in Mio. t) 267
Tab. 5-18: Veränderung der Transportleistung nach Hauptverkehrsbeziehungen und Verkehrsträgern (in Mrd. tkm) 268
Tab. 5-19: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Bundesländern (in Mio. t) 270

Tab. 5-20: Veränderung des Verkehrsaufkommens nach Regierungsbezirken (in 1000 t) 271
Tab. 5-21: Veränderung der Verkehrsleistung nach Regierungsbezirken (in 1000 t) 272
Tab. 5-22: Veränderung des kombinierten Verkehrs in 1.000 t 274
Tab. 5-23: Veränderung des Gesamtergebnisses für Baden-Württemberg (Aufkommen und Territorialleistung) nach Verkehrsträgern 275
Tab. 5-24: Veränderung des Gesamtergebnisses für Baden-Württemberg (Aufkommen und Territorialleistung) nach Verkehrsträgern im Szenario 276
Tab. 5-25: Annahmen für die Umlegungen für das BVWP-Szenario bzw. das Klimaschutz-Szenario 309
Tab. 5-26: Veränderung der Fahrleistungen (Kfz-km/Werktag) 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu 2010 318
Tab. 5-27: Veränderung der Fahrleistungen (Kfz-km/Werktag) 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zum BVWP-Szenario 318
Tab. 5-28: Veränderung der mittleren Fahrgeschwindigkeiten (km/h) 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu 2010 319
Tab. 5-29: Veränderung der mittleren Fahrgeschwindigkeiten (km/h) 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zum BVWP-Szenario 319
Tab. 5-30: Veränderung der Fahrzeiten 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu 2010 320
Tab. 5-31: Veränderung der Fahrzeiten 2030 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zum BVWP-Szenario 320
Tab. 5-32: Veränderung des Unfallrisikos (Unfallkosten an Werktagen) im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu 2010 321
Tab. 5-33: Veränderung des Unfallrisikos (Unfallkosten an Werktagen) im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zum BVWP-Szenario 321
Tab. 5-34: Veränderung der Straßenabschnittslängen mit Qualitätsstufe F nach HBS 2012 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zu 2010 326
Tab. 5-35: Veränderung der Straßenabschnittslängen mit Qualitätsstufe F nach HBS 2012 im Klimaschutz-Szenario im Vergleich zum BVWP-Szenario 326
Tab. 5-36: Entwicklung der CO_2-Emissionen im Klimaschutz-Szenario 332
Tab. 5-37: Entwicklung des Verkehrs und der CO_2-Emissionen im Klimaschutz-Szenario 333
Tab. 6-6: Lkw-Kosten für eine Relation von ca. 200 km im Szenario variable Kosten 345
Tab. 6-7: Veränderung des Gesamtergebnisses für Baden-Württemberg (Aufkommen und Territorialleistung) nach Verkehrsträgern im Szenario variable Kosten 346
Tab A-1: Wichtige Strukturdaten für Deutschland aus der Strukturdatenprognose 349

Tab A-2: Binnenschiffsumschlag 2010 in deutschen Kreisen (in 1.000 t) – die zwanzig aufkommenshöchsten Verkehrszellen 353
Tab A-3: Übersicht der 92 größten deutschen Binnenhäfen (Rücklauf) 357
Tab A-4: Entwicklung der installierten Steinkohle-Kraftwerkleistung bis 2030 nach Verkehrszellen 360
Tab A-5: Kapazitäten der Raffineriestandorte in Deutschland in 2010 (in 1.000 t) 361
Tab A-6: Versand an Mineralölprodukten in 2010 aus den Raffineriestandorten in 1.000 t 363
Tab A-7: Standorte der Pkw- und Fahrzeugteileproduktion 365

0. EINLEITUNG

0.1 Verkehrs- und umweltpolitische Ziele des Landes Baden-Württemberg

Aus klima- und umweltpolitischen Gründen hat die Landesregierung Baden-Württemberg beschlossen, den Verkehrssektor stärker bei der angestrebten Reduzierung der Emissionen klimaschädlicher Gase zu beteiligen und generell die Umweltbelastungen durch den Personen- und Güterverkehr zu reduzieren. Für Baden-Württemberg wurden dabei folgende Einzelziele für das Jahr 2030 definiert:

- **Verringerung des verkehrsbedingten CO_2 Ausstoßes um 40 %** gegenüber 1990, gleichbedeutend mit gegenüber 2010
- **Erhöhung des Radverkehrsanteils** auf **20 %** an allen Wegen in Baden-Württemberg (derzeit ca. 7 %)
- **Erhöhung des Fußgängeranteils** an den Wegen auf **30 %** (derzeit ca. 23 %)
- **Verdoppelung der Personenkilometer im Öffentlichen Verkehr** gegenüber 2004 (das heißt um rund 85 % gegenüber 2010)
- **Anstieg des Modal-Splits von Bahn und Binnenschiff** an der Transportleistung des Güterverkehrs um 10 Prozentpunkte gegenüber 2010 (27 %, Territorialleistung).

0.2 Derzeitige und künftige Verkehrsentwicklung

Zwar zeigen deutschlandweit die tatsächlichen Entwicklungen bei einem Teil der genannten Ziele in die angestrebte Richtung,

- der verkehrsbedingte CO_2-Ausstoß ist seit etwa der Jahrtausendwende rückläufig.[1]
- der Öffentliche Personenverkehr (ÖPV) und der Fahrradverkehr sind angestiegen und haben ihre Marktanteile erhöht (nicht jedoch der Fußgängerverkehr).[2]
- im Güterverkehr gilt dies für die Schiene, nicht jedoch für die Binnenschifffahrt[3]

1 Verkehr in Zahlen, Abschnitt B7, laufend
2 Verkehr in Zahlen, Abschnitt B5, laufend
3 Verkehr in Zahlen, Abschnitt B6, laufend

Doch ist dies zum Teil durch Faktoren hervorgerufen worden, die nicht ohne weiteres fortgeschrieben werden können, wie zum Beispiel ein stark angestiegener Ölpreis bis 2008 und eine vergleichsweise ungünstige gesamtwirtschaftliche Situation. Des Weiteren erfolgte die Entwicklung in einem weit geringeren Tempo als in den Landeszielen gefordert wird.

Auch die Erwartungen der künftigen Verkehrsentwicklung, hier maßgebend sind die Prognosen zur Bundesverkehrswegeplanung (BVWP 2015, "Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen")[4], im Folgenden BVWP-Prognose genannt, zeigen zwar einen ansteigenden Anteil des Öffentlichen Personenverkehrs (Busse und Bahnen) und des Fahrradverkehrs (nicht des Fußgängerverkehrs) und im Güterverkehr einen leicht zunehmenden Schienenanteil sowie rückläufige verkehrsbedingte CO_2-Emissionen, doch in einem deutlich geringeren Maße als für Baden-Württemberg gefordert:

- Rückgang der CO_2-Emissionen bundesweit um 22 %
- Anhebung des ÖPV um 13 %
- Anstieg des Anteils des Schienengüterverkehrs um 0,7 Prozentpunkte
- Anstieg des Anteils des Fahrradverkehrs am Verkehrsaufkommen um 0,3 Prozentpunkte auf 9,6 %

Andere Ziele des Landes, der Anstieg des Anteils an Fußwegen sowie im Güterverkehr der Binnenschifffahrt, werden zumindest bundesweit nicht erreicht.

Das heißt, um die Ziele des Landes zu erreichen, sind erhebliche Anstrengungen erforderlich und können unter den getroffenen Annahmen der "Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen" nicht erreicht werden.

0.3 Zielsetzung

Die vorerwähnte "Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen", hier das Kernszenario, dient nicht nur als "Vergleichsmaßstab" und lässt sich auch spezifisch für den Verkehr des Bundeslandes Baden-Württemberg auswerten. Mit dieser Prognose steht darüber hinaus ein

4 BVU / INTRAPLAN / IVV / Planco, Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Juni 2014

anerkanntes Instrument zur Verfügung, zusätzliche Szenarien zu berechnen, und zwar bezüglich aller relevanten Wirkungsbereiche

- demographische und ökonomische Leitdaten
- Verkehrsnetze und Verkehrsangebot
- Nutzerkosten und andere verkehrlichen Rahmenbedingungen

sowie

- aus der Verkehrsnachfrage resultierende Energieverbräuche und CO_2-Emissionen.

Derartige Wirkungen werden sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr für alle Verkehrsmittel ermittelt. Weil das Modell nach Verkehrsströmen differenziert ist, lassen sich sowohl deutschlandweite Berechnungen anstellen als auch die für Baden-Württemberg relevanten Verkehre herausfiltern.

Aufbauend auf diesen Verkehrsprognosen zum geplanten Bundesverkehrswegeplan sollen in dem vorliegenden Forschungsprojekt ermittelt werden,

- wie die genannten verkehrs- und umweltpolitischen Ziele des Landes-Baden-Württemberg in Einklang mit den prognostischen Erwartungen des Bundes stehen **(Aufbereitung der Daten des Bundes für Baden-Württemberg**) und
- was gegebenenfalls zu tun wäre bzw. welche Annahmen zu verändern wären, um die Ziele der Landesregierung zu erreichen (**Klimaschutz-Szenario**).

Das Forschungsprojekt besteht aus zwei Teilen:

- ein **P 1**, in dem die Rahmenbedingungen und die wissenschaftliche Vorgehensweise festgelegt bzw. koordiniert und qualitätsgesichert werden, und
- ein **P 2**, bei dem die quantitativen Ermittlungen mit Hilfe der für die BVWP-Arbeiten entwickelten Datengrundlagen und Verkehrsmodellen erfolgen.

Der vorliegende Schlussbericht bezieht sich auf die Arbeiten des P 2 und beschreibt gemäß Zeitplanung den Arbeitsfortschritt der zwei Hauptthemen:

(a) die Darstellung der **Modellzusammenhänge und Modellannahmen** (Kapitel 2)
(b) die Aufbereitung der Daten des Bundes für Baden-Württemberg (Kapitel 3)
(c) die **Szenarioannahmen** für das Klimaschutz-Szenario (Kapitel 4).
(d) die Ergebnisse des Klimaschutz-Szenarios (Kapitel 5).

Zuvor wird in Kapitel 1 das allgemeine **Vorgehenskonzept** dargestellt.

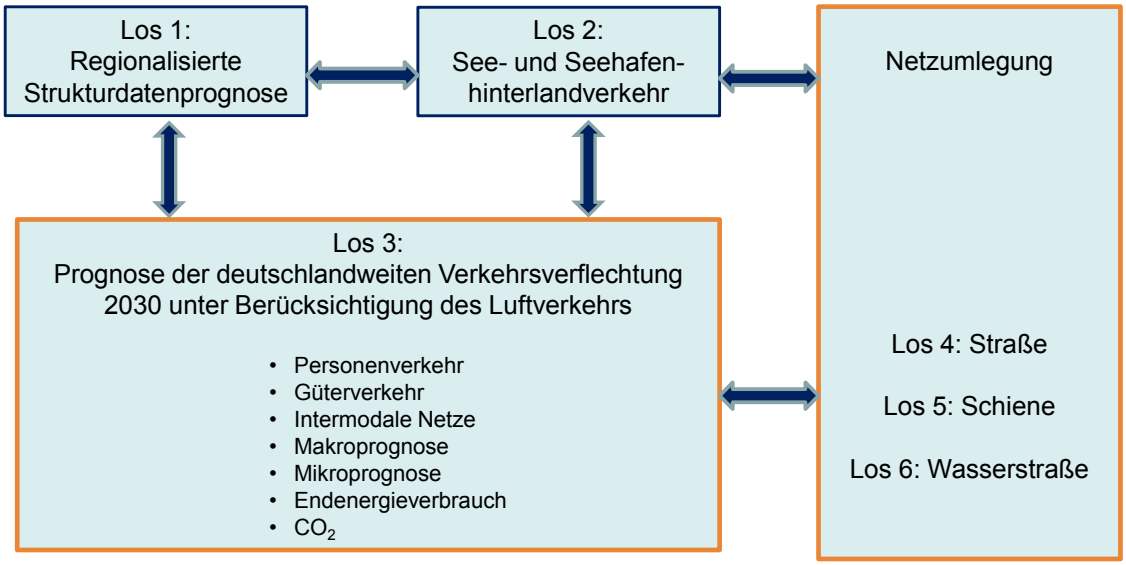
1. VORGEHENSKONZEPT

1.1 Ablauf der Verkehrsprognose

Das Vorgehen bei der Erstellung des Klimaschutz-Szenarios BW entspricht im Prinzip dem der BVWP-Prognose (Abb. 1-1), mit zwei Ausnahmen:

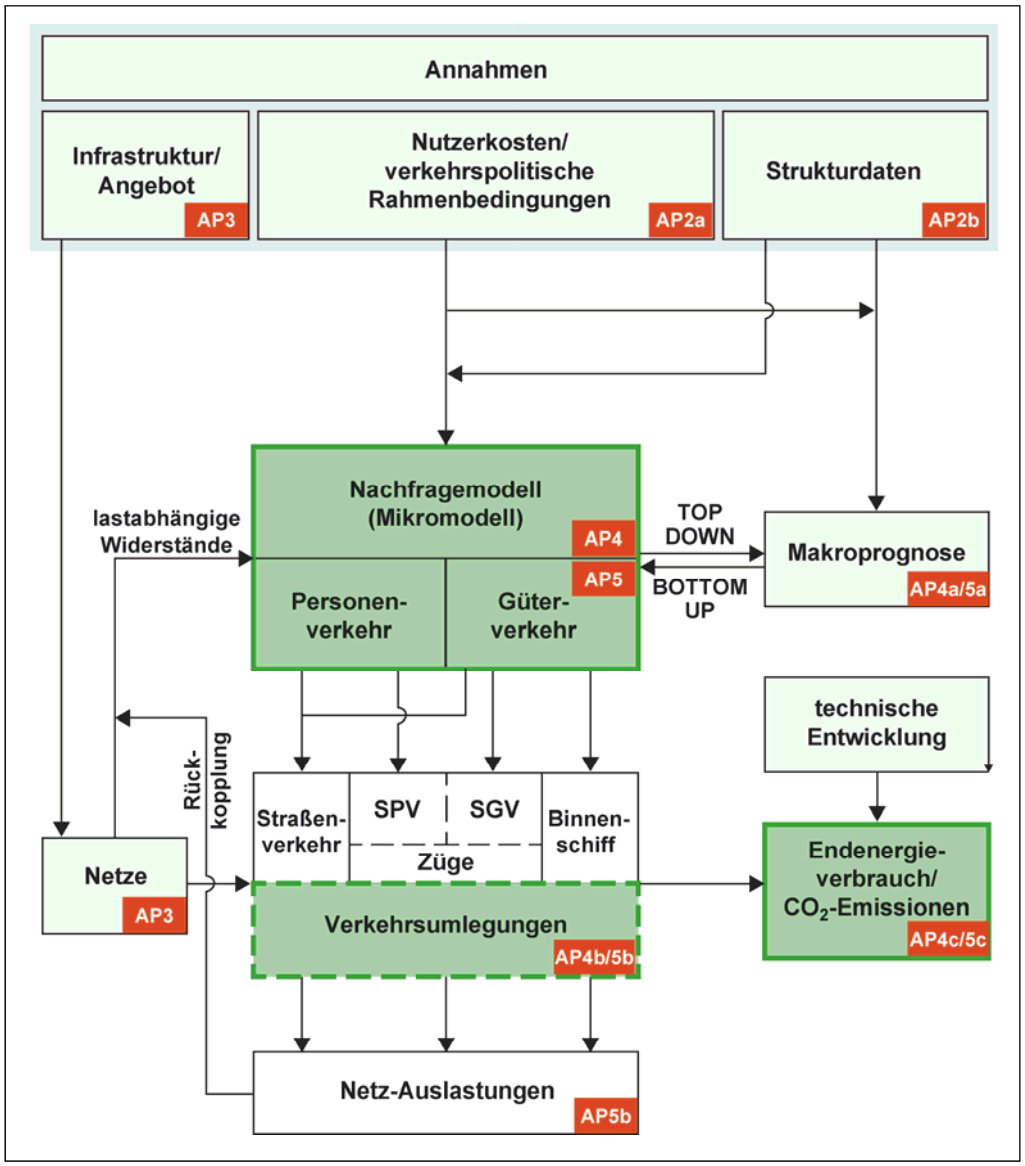
- Es gibt keine gesonderte Prognose wie in "Los 2" zum "**See- und Seehafenhinterlandverkehr**". Die Auswirkungen von geänderten Rahmenbedingungen in diesem Bereich wurden im Rahmen der dem "Los 3" entsprechenden Arbeiten im vorliegenden Forschungsprojekt durchgeführt.
- Die durch „Los 1“ in der BVWP-Prognose ermittelten Vorgaben zu **Soziodemographie**, **Sozioökonomie**, Außenhandel etc. wurden hier im Rahmen der Festlegung der Prognoseprämissen erbracht.

Abb. 1-1: Struktur der Verkehrsprognose gemäß Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen (im Folgenden BVWP-Prognose genannt)



In Abb. 1-2 ist das Vorgehen bei der Erstellung des Klimaschutz-Szenarios BW 2030, Teil P 2, schematisch gezeigt.

Abb. 1-2: Ablauf der Verkehrsprognose für das Klimaschutz-Szenario 2030



Demnach waren zunächst die **Annahmen** zu den drei hauptsächlichen Prognosetreibern festzulegen und aufzubereiten:

- zur **soziodemografischen** und **sozioökonomischen Entwicklung** in Baden-Württemberg und gegebenenfalls anderswo,
- zu den **Nutzerkosten** und den **verkehrspolitischen Rahmenbedingungen** sowie
- zur **Infrastruktur** und zum **Verkehrsangebot** aller Verkehrszweige.

Letzteres war in Form von **Netzmodellen** aufzubereiten, wobei auch intermodale Verknüpfungen berücksichtigt wurden. Aus diesen Netzmodellen wurden Angebotseigenschaften (Reise-

zeit, Reisekosten usw. je Quelle-Ziel-Relation) abgeleitet, die einen wesentlichen Input für die Verkehrsmodellierung bilden.

Die Verkehrsmodellierung mit Hilfe eines Mikromodells wurde unterstützt durch eine **Makroprognose**, die, auf aggregiertem Niveau, Langfristtrends zum Teil besser abbilden kann.

Im Mikromodell wurden wie bei der BVWP-Prognose **Quelle-Ziel-Matrizen** erzeugt, die sich für das Untersuchungsgebiet auswerten und aggregieren lassen. Die zunächst für den Personen- und Güterverkehr getrennt ermittelten Quelle-Ziel-Matrizen wurden zusammen auf die Netzmodelle Straße und Schiene **umgelegt**. Daraus wurden Streckenbelastungen ermittelt, die Auswirkungen auf die Angebotseigenschaften, insbesondere die Fahrzeiten haben. Daher war eine **Rückkopplung** zur Prognose (Mikromodell) erforderlich, weil Verkehrsleistungen und Modal-Split abhängig von den Angebotseigenschaften sind.

Die Verkehrsleistungen haben Auswirkungen auf den **Endenergieverbrauch** und den **CO_2-Ausstoß**, die in einem eigenen Arbeitspaket unter Berücksichtigung der technischen Entwicklung (Antriebsarten, Durchschnittsverbräuche) zu ermitteln waren.

1.2 Rechenfälle

Es wurden folgende Rechenfälle bearbeitet:

(1)	BW-Analysefall 2010	Entspricht der BVWP-Analyse 2010; die Daten wurden für BW aufbereitet.
(2)	BW-Bezugsfall 2030	Entspricht der BVWP-Prognose 2030, Kernszenario, und wurde auch als solcher Fall umbenannt, Aufbereitung für BW
(3)	Klimaschutz-Szenario BW 2030	Neuberechnung auf der Basis geänderter Rahmendaten (Sozioökonomie, Netze, verkehrspolitische Rahmenbedingungen) Aufbereitung für BW, aber zum Vergleich auch für D gesamt. Hier lag der Schwerpunkt der Arbeiten.

1.3 Festlegungen zum Untersuchungsgebiet und Abgrenzung zur Prognose des Bundes

Grundsätzlich wurden zwei **räumliche** Ebenen unterschieden:

Ebene BW (Hauptebene)	➔	alle Inputs (Strukturdaten, Netze/Verkehrsangebote, spezifische BW-Maßnahmen, usw.)
	➔	alle Ergebnisse territorial (P, Tonnen, Pkm/Tkm für Quell-/Ziel- und Binnenverkehr, regionale Ergebnisse, Verkehrsumlegungen, CO_2-Berechnungen)
Ebene D-gesamt (Vergleichsebene)	➔	Inputs, die deutschlandweit (oder darüber hinaus) Relevanz haben (z.B. Wirtschaftsentwicklung, Kostenentwicklung, Ölpreis)
	➔	Ergebnisse in vergleichbarer Aufbereitung wie die veröffentlichten Ergebnisse der BVWP-Prognose, keine bundesweiten Umlegungsergebnisse

Bei der räumlichen Gliederung des Untersuchungsgebietes erfolgte eine Dreifachgliederung:

- Für die **Nachfrageberechnungen des Güterverkehrs** wurde die Raumeinteilung in Stadt- und Landkreise verwendet (NUTS 3-Gliederung, hier als **Mikroebene 1** bezeichnet). Diese Einteilung genügt auch für die Umlegung des SGV, wenn zusätzliche "singuläre Verkehrserzeuger" (z.B. große Industrieanlagen, Kraftwerke usw.) berücksichtigt sind.
- Für die **Nachfrageberechnungen des Personenverkehrs** genügt aufgrund der großen Bedeutung von Nah- und Regionalverkehr die Mikroebene 1 nicht mehr. Hier wurde eine Zwischenebene erzeugt, die sog. **Mikroebene 2**. Dabei handelt es sich um eine Untergliederung der Stadt- und Landkreise nach raumstrukturellen, netztopologischen und statistischen (Verfügbarkeit von Strukturdaten) Gesichtspunkten. In Baden-Württemberg sind hier 206 Zonen unterschieden, die sich zu Landkreisen und kreisfreien Städten aggregieren lassen (Abb. 1-3). In den Zonen befinden sich ein bis mehrere Einspeisungspunkte des **Bahnnetzes**, große Bahnknoten, z.B. ICE-Halte, haben größere Einzugsgebiete. Auf diese Weise lassen sich Nah- und Regionalverkehre im SPV besser abbilden und dennoch auch die bundes- und landesweit wichtigen Fernverkehre noch in der hierfür notwendigen Aggregation (Problem der kleinen Zahlen!) modellieren. Die Mikroebene 2 ist auch für **Umlegung im SPNV** ausreichend, soweit - was hier nicht Gegenstand des Klimaschutz-Szenarios ist - nicht linien- und bahnhofsscharfe Belastungen, z.B. von S- oder Regionalbahn erforderlich sind. Auf jeden Fall lassen sich Kantenbelastungen und Streckenauslastungen angemessen genau prognostizieren.

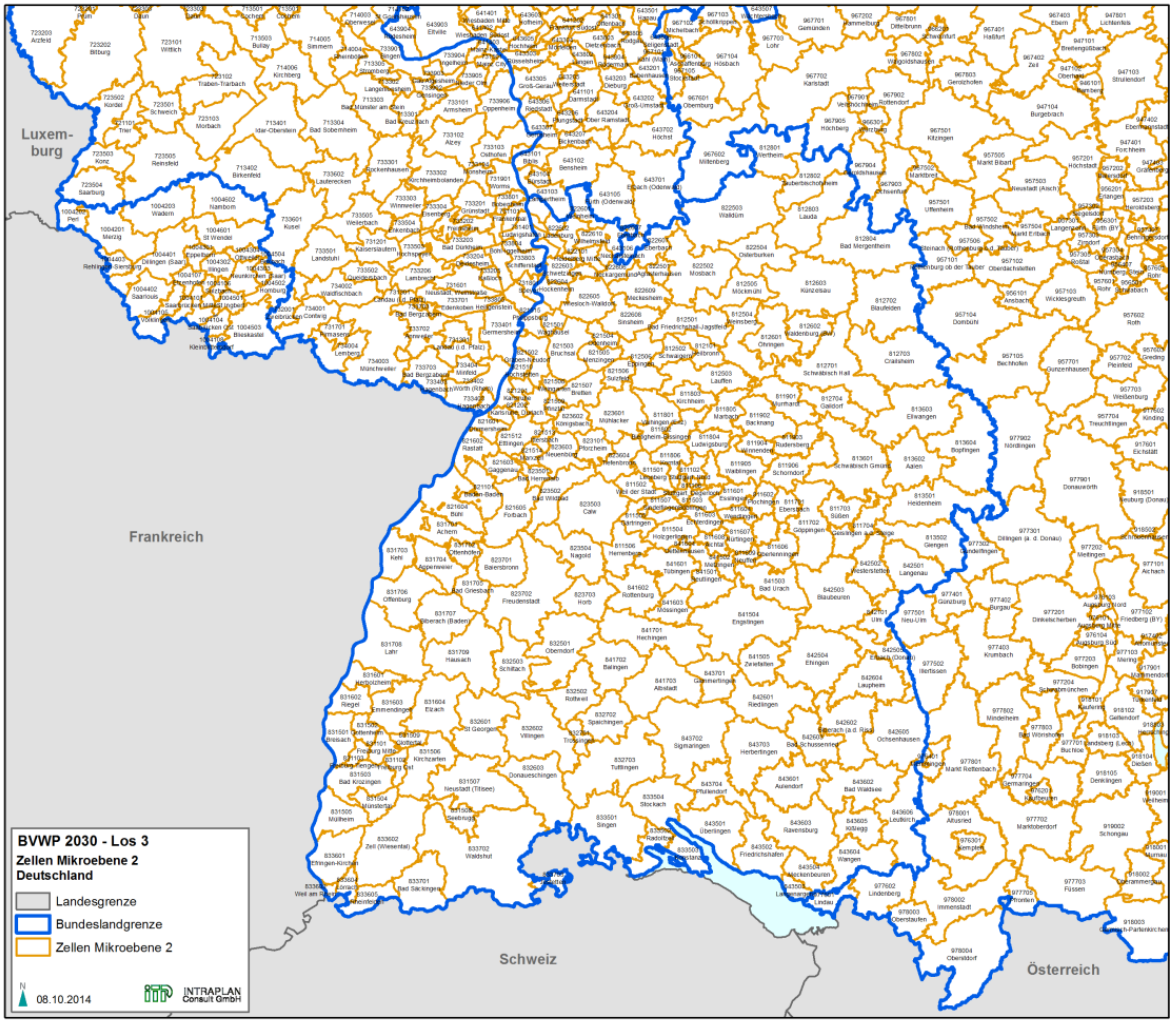
- Für die **Straßenumlegungen** genügt die Mikroebene 2 nicht. Die Daten sind räumlich zu disaggregieren, auf Tageswerte zu beziehen und in Fahrzeuge umzurechnen. Deswegen wird das räumliche Aggregat der **Mikroebene 3** verwendet. Hierzu wird für die Straßennetzberechnungen auf der Ebene der Bundesrepublik Deutschland ein Raumgliederungssystem genutzt, das auf einem vom BBSR entwickelten Raumraster (Rastermaß: 250 m) aufgebaut. Jedem Rasterfeld sind Informationen zur Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur zugeordnet, die mit entsprechenden Summenwerten der kommunalen Gebietskörperschaften abgeglichen sind. Die einzelnen Rasterfelder sind so genannten Einspeisungspunkten im Straßennetz zugeordnet. Das auf diese Weise entwickelte Raumanbindungssystem besteht aus ca. 50.000 Einspeisungspunkten in Deutschland, auf die jeweils Siedlungsbereiche (Rasterfelder) mit gemeinsamem Zugang zum Netz bezogen sind.

Im **Ausland** wird im Grenzgebiet zu Deutschland ebenfalls nach NUTS 3-Regionen differenziert. Mit zunehmender Entfernung wurde höher aggregiert (NUTS 2, NUTS 1 bzw. NUTS 0-Regionen).

Häfen und Flughäfen sind als eigene "Verkehrszellen" verschlüsselt. Sie stellen einerseits intermodale Verknüpfungspunkte, andererseits virtuelle "singuläre Verkehrserzeuger" dar. Überseeverkehr bzw. Langstreckenverkehr werden hier "eingespeist".

Differenzierte **Ergebnisdarstellungen** erfolgen nur bis zur Landesgrenze, im Einzelfall für ausgewählte, wichtige Beziehungen (z.B. Bahnstrecke nach Frankfurt) auch darüber hinaus. Ergebnisse für Gesamtdeutschland werden in aggregierter Form dargestellt. Sie dienen dem Vergleich zu den Ergebnissen der BVWP-Prognose.

Abb. 1-3: Verkehrszelleneinteilung in Südwestdeutschland Mikroebene 2 aus der BVWP-Prognose



2. MODELLZUSAMMENHÄNGE UND MODELLANNAHMEN

Nicht nur die generelle Vorgehensweise, sondern auch die eingesetzten Prognosemethoden werden aus der BVWP-Prognose entnommen. Die Verkehrsmodelle im Personen- und Güterverkehr werden im Folgenden kurz beschrieben.

Die Modelle im Güter- und Personenverkehr bilden die Auswirkungen folgender Bereiche von Einflussgrößen auf die Verkehrsnachfrage ab:

(a) soziodemografische und ökonomische **Strukturdaten** (im Personenverkehr einschließlich Pkw-Verfügbarkeit)

(b) **Verkehrsangebot**

(c) **verkehrspolitische Rahmenbedingungen** und **Nutzerkosten**

Dabei werden jeweils die Modell- bzw. Wirkungsbereiche abgebildet:

I Verkehrserzeugung/Entwicklung der Fahrten/Wege

II Zielwahl/Entwicklung der Verkehrsverflechtungen und Fahrtweiten

III Modal-Split/Wirkung auf die Verkehrsmittelwahl, im Personenverkehr einschl. nichtmotorisierter Verkehr

IV Verkehrsumlegung/Aufteilung auf die Verkehrswege/Verkehrsangebote

2.1 Personenverkehr (Mikromodell)

2.1.1 Generelle Modellstruktur

Zentrales Werkzeug zur Durchführung der Prognose ist ein Verkehrsnachfragemodell. Es besteht aus den Teilen

a) **Verkehrserzeugung** (Kapitel 2.1.3)

b) **Verkehrsverteilung** (Kapitel 2.1.4) und

c) **Verkehrsmittelwahl** (Kapitel 2.1.5)

Der vierte Teil eines "klassischen" Vierstufenmodells, die **Verkehrsumlegung** für den Straßen- und Schienenverkehr, ist weiter unten beschrieben. Die dort entwickelten **Netzmodelle** liefern auch die für das Verkehrsnachfragemodell erforderlichen **"Widerstände"**.

2.1.2 Datengrundlagen für die Modellbildung

Wichtigste Grundlage zur Abbildung des Verkehrsverhaltens und damit zur Modellbildung ist die Erhebung **"Mobilität in Deutschland" (MiD) 2008**[5]. Diese repräsentative Haushaltsbefragung mit großer Stichprobe (200.000 Fahrten bzw. Wege plus 36.000 Fernreisen) spiegelt das **Verkehrsverhalten der deutschen Wohnbevölkerung** wider, und zwar unter anderem

- die tatsächlich durchgeführten Fahrten bzw. Wege und Wegeketten
- nach Fahrtzwecken
- nach Verkehrsmitteln (einschl. nichtmotorisierter Verkehr)
- nach Fahrtdauer bzw. nach der Fahrtweite
- nach dem Zeitpunkt der Fahrt (Jahreszeit, Wochentag).

Die Stichprobe ist so gestaltet, dass sowohl räumliche (Regions- und Gemeindetypen) als auch soziodemographische Cluster gebildet werden können, so dass **geschichtete Analysen** nach

- Regionstypen (hier Typen von Verkehrszellen)
- Altersgruppen und Pkw-Verfügbarkeit

für die **Mobilitätskennziffern**

- Fahrtenhäufigkeit (pro Tag/Jahr) je Fahrtzweck
- Fahrtweitenverteilung je Fahrtzweck
- Modal-Split je Fahrtzweck

vorgenommen werden konnten. Diese Auswertungen sind eine der Grundlagen für die Modelle zur Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und den Modal-Split, die unten beschrieben werden.

Die Daten standen in Originärdaten (Erhebungsdatensätze) zur Verfügung. Sie umfassten neben einer Erhebung zum gesamten Verkehrsverhalten eine Unterstichprobe zum Fernverkehr (Reisen ab 100 km).

5 infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und Institut für Verkehrsforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Mobilität in Deutschland 2008, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Als **weitere Datengrundlage** zum Verkehrsverhalten standen folgende Quellen zur Verfügung:

- die MiD 2002[6] (Vorgängeruntersuchung zur MiD 2008, Originärdaten)
- das Deutsche Mobilitätspanel[7] zur Abbildung der Veränderung des Verkehrsverhaltens im Zeitverlauf (Grundauswertungen)
- die Fernverkehrserhebung Dateline (2001/2002, Originärdaten)
- die Reiseanalyse der Forschungsgemeinschaft Urlaub und Reisen (F.U.R., nur Grundauswertungen)

2.1.3 Verkehrserzeugung

Das Verkehrserzeugungsmodell dient dazu, das v**erkehrsmittelübergreifende Verkehrsaufkommen je Fahrtzweck und Verkehrszelle** zu ermitteln. Es hat folgende allgemeine Form:

(1) $V_{Qfz,h} = S_{Qfz,h} \cdot e_{fz,h}$

mit

$V_{Qfz,h}$ Verkehrsaufkommen in der Verkehrszelle Q im Fahrtzweck fz in der Personengruppe h,

$S_{Qfz,h}$ Strukturdatum (Anzahl Personen) in der Verkehrszelle Q im Fahrtzweck fz in der Personengruppe h

$e_{fz,h}$ Erzeugungsrate im Fahrtzweck fz in der Personengruppe h

Für die einzelnen Fahrtzwecke spielen unterschiedliche **Strukturdaten** ($S_{Qfz,h}$ siehe folgende Tabelle) als "Verkehrserzeuger" eine Rolle. Dabei werden auch **altersspezifisch unterschiedliche Mobilitätsraten** in den einzelnen Fahrtzwecken berücksichtigt (siehe hierzu Tab. 2-5).

6 infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH und DIW Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung: Mobilität in Deutschland 2002, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

7 Karlsruher Institut für Technologie: Das deutsche Mobilitätspanel

Tab. 2-1: Strukturdaten für die Verkehrserzeugung

Fahrtzweck		verkehrserzeugende Strukturdaten (Personengruppen)
1	Beruf	Erwerbstätige
2	Ausbildung	Kinder unter 10 Jahren; Altersgruppe 10 bis 17 Jahren, Altersgruppe 18 bis 24 Jahre (jeweils mit unterschiedlichen Mobilitätstraten)
3	Einkauf/Erledigung	Kinder unter 10 Jahren, Altersgruppe 10 bis 17 Jahre, 18 bis 24, 25 bis 44, 45 bis 64, 65 bis 74, 75 Jahre und älter (jeweils mit unterschiedlichen Mobilitätsraten)
4	Geschäft	Erwerbstätige
5	Urlaub	Altersgruppen wie Fahrtzweck 3 (jeweils mit unterschiedlichen Mobilitätsraten)
6	Privat[1)]	Altersgruppen wie Fahrtzweck 3 (jeweils mit unterschiedlichen Mobilitätsraten)[1)]

1) Zur Untergliederung siehe unten Tab. 2-5

Zusätzlich wird der **Einfluss des Einkommens und der Pkw-Verfügbarkeit** auf die Mobilität berücksichtigt:

(2) $V_{qfz,h} = S_{Qfz,h} \bullet e_{fz,h} \bullet g_{Qfz,h}$

mit

g Gewichtung in Abhängigkeit des Durchschnittseinkommens (hier: Verhältnis Durchschnittseinkommen der Verkehrszelle/Durchschnittseinkommen **Deutschland gesamt** im Jahr **2010**) und der Pkw-Verfügbarkeit (hier: Verhältnis Motorisierung Region/ Motorisierung **Deutschland** gesamt)[8]. Zu den Elastizitäten zwischen dem Mobilitätszuwachs und den genannten Verhältniszahlen siehe unten Tab. 2-6. Während es zwischen Analyse und Prognose je Personengruppe und Fahrtzweck konstant ist, variiert der Faktor g, weil sich das Durchschnittseinkommen und die Durchschnittsmotorisierung (Nenner) auf 2010, die entsprechenden regionalen Werte in der Prognose dagegen auf 2030 beziehen (übrige Parameter siehe oben).

Zwar zeigen die Auswertungen aus dem MiD auf den ersten Blick keinen Zusammenhang zwischen der Wirtschaftsleistung pro Kopf und der Mobilität auf, da für die wirtschaftsstarken Bundesländer keine höheren Mobilitätsraten gemessen wurden als für die wirtschaftsschwachen

8 Der Nenner bleibt auf dem Stand "Deutschland 2010", ist also eine Konstante. Dadurch ergibt sich zwischen 2030 und 2010 ein Zuwachs der Fahrtenzahl, wenn sich Einkommen und Motorisierung der Verkehrszellen gegenüber 2010 ändern.

Länder (Tab. 2-2). Offensichtlich wird der Einfluss der Wirtschaftskraft durch andere Effekte, z.B. aus der Siedlungsstruktur, überlagert.

Tab. 2-2: Mobilitätsraten (Wege pro Einwohner) je Bundesland

	R: Bundesland	MiD 2008 (W/Pud)
1	Schleswig-Holstein	3,59
2	Hamburg	3,23
3	Niedersachsen	3,51
4	Bremen	3,48
5	Nordrhein-Westfalen	3,53
6	Hessen	3,38
7	Rheinland-Pfalz	3,37
8	Baden-Württemberg	3,43
9	Bayern	3,39
10	Saarland	3,25
11	Berlin	3,33
12	Brandenburg	3,16
13	Mecklenburg-Vorpommern	3,40
14	Sachsen	3,29
15	Sachsen-Anhalt	3,63
16	Thüringen	3,35

Auswertungen im Detail zeigen jedoch einen klaren Zusammenhang unter anderem zwischen dem **"sozioökonomischen Status"**[9] sowie der **Pkw-Verfügbarkeit** einerseits und den personenspezifischen Mobilitätsraten andererseits (siehe Tab. 2-3). Folgendes geht daraus eindeutig hervor:

- Die **Mobilität** ist bei den **Rentnern/Pensionären** (Altersgruppe 65 - 74) in den in Frage kommenden Fahrtzwecken, das heißt ohne berufsbedingte Fahrten (Fahrtzweck Beruf, Geschäft) **höher als bei den anderen Altersgruppen**. Erst bei den "Hochbetagten" (ab 75 Jahre) ist sie deutlich niedriger als bei den anderen Altersgruppen.
- Es gibt einen **klaren Zusammenhang zwischen sozialem Status und Mobilität**: je höher der Status, desto höher die Mobilität
- Die Mobilität steigt auch mit zunehmender **Pkw-Verfügbarkeit**.

9 gemäß Definition von MiD Variablenübersicht Personendatensatz (Status abhängig von der Summe des Haushaltseinkommens sowie Anzahl und Alter der Haushaltsmitglieder)

Tab. 2-3: Mobilitätswerte je Fahrtzweck und Altersgruppe differenziert nach sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)

Mobilitätsraten (Fahrten/Tag)	Fahrtzweck	Sozioökonomischer Status[1)]						Pkw-Verfügbarkeit			
		sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	Insgesamt	Ständig	Teilweise	gar nicht	Insgesamt
	Beruf										
Insgesamt	**0,47**	0,29	0,38	0,45	0,54	0,57	**0,47**	0,58	0,48	0,37	**0,47**
Altersgruppen	**Ausbildung**										
0 - 9	**0,75**	0,69	0,74	0,79	0,75	0,71	**0,75**	-	-	-	**0,75**
10 - 17	**1,01**	0,91	0,99	1,02	1,05	1,05	**1,01**	-	-	-	**1,01**
18 - 24	**0,47**	0,45	0,51	0,48	0,45	0,47	**0,47**	0,40	0,62	0,66	**0,47**
Insgesamt	**0,21**	0,24	0,32	0,19	0,20	0,17	**0,21**	0,05	0,25	0,15	**0,21**
Altersgruppen	**Einkaufen/Erledigung**										
0 - 9	**0,35**	0,28	0,32	0,34	0,37	0,41	**0,35**	-	-	-	**0,35**
10 - 17	**0,64**	0,57	0,62	0,65	0,67	0,58	**0,64**	-	-	-	**0,64**
18 - 24	**0,95**	1,00	0,98	0,96	0,92	0,85	**0,95**	1,22	1,18	0,95	**0,95**
25 - 44	**1,52**	1,47	1,71	1,50	1,50	1,47	**1,52**	1,68	1,65	1,49	**1,52**
45 - 64	**1,55**	1,52	1,65	1,53	1,59	1,46	**1,55**	1,70	1,82	1,37	**1,55**
65 - 74	**1,87**	1,71	1,65	1,83	2,11	1,91	**1,87**	2,03	2,02	1,73	**1,87**
75 und älter	**1,45**	1,21	1,08	1,36	1,78	1,86	**1,45**	1,82	1,38	1,36	**1,45**
Insgesamt	**1,41**	1,31	1,33	1,41	1,46	1,42	**1,41**	1,71	1,52	1,38	**1,41**
	Geschäft										
Insgesamt	**0,23**	0,16	0,20	0,24	0,23	0,26	**0,23**	0,38	0,35	0,10	**0,23**
Altersgruppen	**Freizeit/Privat**										
0 - 9	**1,05**	0,84	1,00	1,10	1,08	1,06	**1,05**	-	-	-	**1,05**
10 - 17	**1,34**	1,19	1,25	1,38	1,34	1,54	**1,34**	-	-	-	**1,34**
18 - 24	**1,21**	1,20	1,21	1,14	1,22	1,55	**1,21**	1,32	1,40	1,16	**1,21**
25 - 44	**1,12**	0,99	1,16	1,01	1,18	1,34	**1,12**	1,19	1,22	1,12	**1,12**
45 - 64	**1,02**	0,97	0,91	0,97	1,08	1,13	**1,02**	1,09	0,99	0,87	**1,02**
65 - 74	**1,25**	1,01	1,16	1,22	1,42	1,44	**1,25**	1,35	1,62	0,95	**1,25**
75 und älter	**0,85**	0,78	0,62	0,83	0,94	1,17	**0,85**	1,05	1,20	0,62	**0,85**
Insgesamt	**1,11**	1,00	1,06	1,06	1,16	1,26	**1,11**	1,18	1,28	0,94	**1,11**
Insgesamt	**3,42**	**2,99**	**3,30**	**3,35**	**3,59**	**3,69**	**3,42**	**3,90**	**3,87**	**2,94**	**3,42**

1) gemäß Definition von MiD Variablenübersicht Personendatensatz (siehe Fußnote auf Seite zuvor)

Die gezeigten Gesamtwerte bilden die Erzeugungsrate e in Formel (1). Die Varianz bezüglich sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit wurde in einem Gewichtsfaktor ($g_{vz,h}$ in Formel (2)) umgerechnet, unter der Hypothese, dass der sozioökonomische Status in den Regionen mit dem Bruttoinlandsprodukt pro Kopf und die Pkw-Verfügbarkeit mit dem Pkw-Bestand je 1000 Einwohner korreliert.[10]

Mit der Verkehrserzeugung wird grundsätzlich der **Hinweg** betrachtet. Der **Rückweg** wird später in der Matrix durch "Spiegeln" der Verkehrsbeziehung ergänzt (eine Fahrt von q nach z wird gedoppelt durch eine Fahrt z nach q). Damit wird verhindert, dass Rückfahrten fälschlicherweise mit den Strukturdaten der Zielzelle "generiert" werden. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass **jeder Hinfahrt qz eine Rückfahrt mit spiegelbildlicher Relation zq entspricht**. Dies gilt weitgehend bei Fernreisen und auch für den größten Teil der Nahverkehrsfahrten. Bei Fahrten, die nicht "Hinwege" (z.B. von der Wohnung zum Arbeitsplatz) oder "Rückwege" (z.B. vom Arbeitsplatz zur Wohnung) darstellen wie z.B. Fahrten vom Arbeitsplatz zum Einkauf, gilt der Zweck der Quelle, in dem genannten Beispiel der Berufsverkehr. Dies entspricht der Definition gemäß DIW in "Verkehr in Zahlen".[11]

Erzeugt wird die Fahrt des genannten Beispiels im Erzeugungsmodell jedoch anhand der Einwohnerdaten. Diese Unschärfe wird ausgeglichen, indem die Verkehrserzeugungsraten noch nach Raumtypen (Ebene 2) differenziert werden. Zwar lässt sich aus MiD hier keine direkte Verbindung zu Raumtypen herstellen, doch ist der Anteil der gesamten Wege bekannt, der nicht von zuhause ausgeht (siehe Tab. 2-4).

10 Eine diesbezügliche Regressionsanalyse ergab eine Korrelation von 0,91.

11 Verkehr in Zahlen 2012/2013, S. 222ff, im Unterschied zur Definition gemäß MiD.

Tab. 2-4: Vergleich der Codierung der Hauptzwecke nach MiD 2008 (Zeilen) und nach Definition wie in Verkehr in Zahlen (Spalten) - hochgerechnete Wege (entnommen aus DIW: Methodenbericht VIZ 2010/2011)[12]

	Beruf	Aus-bildung	Ges. dienstl.	Begleitung	private Erledigung	Einkauf	Freizeit	Total
	Wege am Stichtag in 1 000 (ohne rbw*, ViZ-Zweckcodierung)							
Arbeit	38 027		3	1			826	38 857
Dienstlich	397	12	3 512				9	3 930
Ausbildung	30	16 545		4			168	16 749
Einkauf	1 729	204	66	654	1 693	54 153	74	58 573
Erledigung	734	181	19	681	32 829	4	86	34 535
Freizeit	1 278	638	63	1 819	891	948	85 144	90 779
Begleitung	464	167	9	21 385			202	22 227
keine Angabe							47	47
Total	42 659	17 747	3 671	24 544	35 413	55 106	86 557	265 697
ViZ : MiD in %	9,8	6,0	-6,6	10,4	2,5	-5,9	-4,7	

*) Regelmäßige berufliche Wege
Quellen: MiD 2008, Berechnungen des DIW Berlin.

Eine weitere Besonderheit stellen die Fahrten von **Übernachtungsgästen** vor Ort dar, die in den Befragungsdaten in der Regel nicht erfasst sind, weil die diese Fahrten durchführenden Personen aus anderen Regionen oder aus dem Ausland stammen.

Dieser regional durchaus bedeutsame Zusatzverkehr wurde auf der Basis der **Fremdenverkehrsstatistiken** je Region abgeschätzt. Und zwar wurde die Statistik der Gästeankünfte und Gästeübernachtungen der jeweiligen Statistischen Landesämter in Deutschland für alle deutschen Land- und Stadtkreise verwendet. Hier wurde eine "Erzeugungsrate" je Gästeübernachtung[13] geschätzt und mit dieser ein Zusatzaufkommen der betroffenen Regionen berechnet sowie dem Privatverkehr zugeordnet.

Ein in diese Kategorie "Fahrten von Übernachtungsgästen" fallendes Phänomen ist auch der Vor-Ort-Verkehr von **Wochenpendlern** am Arbeitsort. Die Fernpendler werden am Zielort als "zusätzliche Einwohner" bzw. Erwerbstätige definiert und entsprechende Fahrtenaufkommen

12 DIW: Methodenbericht VIZ 2010/2011: "Zur Bildung der Variablen Hauptwegezweck wurde den Rückwegen vom vorherigen Weg und den Wegen nach Hause der Zweck des zuvor genannten Weges zugeordnet" (infas, dlr 2010c, S.17). Bei der MiD 2002 wurden dagegen die Rückwege nach Hause nach der Hauptaktivität des Ausgangs codiert. Dies ist auch die Definition für Verkehr in Zahlen und entspricht der Empfehlung zu Kernelementen von Haushaltsbefragungen zum Verkehrsverhalten (BMVBW 2003). In dieser Abgrenzung ergeben sich höhere Wegezahlen für den Berufs- und Ausbildungsverkehr sowie mehr Begleitwege (siehe Tabelle).

13 Nach einer realistischen Hypothese entstehen bei mehr als einer Übernachtung vor Ort 2,5 Wege pro Tag und Person. Dies entspricht 1,25 Hinwegen pro Tag bzw. 456 pro Jahr. Bei einer Bettenauslastung von rund 40 % (laut Fremdenverkehrsstatistik) errechnen sich daraus (gerundet) die in Tab. 2-5 ausgewiesenen 200 Fahrten pro Bett.

erzeugt, wobei hier vereinfachend angenommen wird, dass diese Personenfahrten ausschließlich intrazonal stattfinden.

Aufgrund der Rückfahrten sowie der Fahrten von Gebietsfremden **korrelieren** die Quellverkehre der Matrix (hier einschließlich Binnenverkehre der Zonen) **nicht mit den Einwohnerzahlen**. So weisen insbesondere Großstädte mit hoher Einpendlerquote (z.B. Frankfurt am Main, aber auch Wolfsburg oder Ingolstadt) sowie Gebiete mit hoher Urlaubs- und Ausflugszielattraktivität (z.B. Rügen, Garmisch-Partenkirchen) überdurchschnittliche Quotienten "Quellverkehre je Einwohner" auf, was durch den hohen Anteil des Verkehrs von Ortsfremden liegt. Dagegen erscheint in Regionen mit hoher Auspendlerquote das Verhältnis "Wege je Einwohner" oft unterdurchschnittlich, weil dessen Bewohner ihre Mobilitätsbedürfnisse zum großen Teil anderswo befriedigen.

Bezogen auf die im Modell verwendeten Personengruppen und Fahrtzwecke wurden folgende **Mobilitätsraten** ermittelt (siehe Tab. 2-5) und in den Berechnungen operationalisiert. Durch Veränderungen bei der Altersstruktur und der Erwerbstätigkeit ergeben sich Struktureffekte, die auf die unterschiedlichen Mobilitätsraten je Fahrtzweck und Untergruppe zurückzuführen sind. Bei einer Veränderung der Anzahl der entsprechenden Strukturmerkmale (z.B. Anzahl der Einwohner einer bestimmten Altersgruppe) ändert sich das Fahrtenaufkommen in dem jeweiligen Segment bestehend aus Fahrtzwecken und Personengruppe proportional. Durch die unterschiedlichen Mobilitätsraten je Segment und Personengruppen führt z.B. ein Anstieg der Einwohnerzahl um 10 % nicht automatisch zu einem Anstieg des Verkehrsaufkommens in derselben Höhe, wenn sich der Anstieg nicht in allen Altersgruppen gleichmäßig vollzieht und auch die Erwerbstätigenzahl (sowie Übernachtungskapazitäten bei den Fahrten am Urlaubsort) im gleichen Maße erhöht.

Darüber hinaus erhöht sich die Mobilität im Prognosezeitraum durch steigende **Einkommen** sowie eine zunehmende **Pkw-Verfügbarkeit**. Die entsprechenden Elastizitäten (Mobilitätswachstum gegenüber dem Wachstum des BIP/Kopf und demjenigen der Pkw-Dichte) wurden heuristisch ermittelt und sind in Tab. 2-6 angegeben. Grundsätzlich besteht zwischen diesen beiden Einflussgrößen eine hohe Korrelation und somit auch eine hohe Interdependenz zwischen den Wirkungen auf die Mobilität. Dennoch hat es sich als in der Regel sinnvoll erwiesen, beide Größen heranzuziehen, weil sie sich nicht immer gleichläufig entwickeln. Dies gilt insbesondere für Jahre mit starken konjunkturellen (Ab- oder Aufschwung-) Bewegungen, wenn sich die Mobilität entsprechend den sinkenden bzw. überdurchschnittlich steigenden Konsumausgaben entwickelt, was durch die, grundsätzlich moderatere, Entwicklung des Pkw-Bestands nicht abgebildet wird.

Tab. 2-5: Erzeugungsraten, Fahrten je Person und Jahr (nur Hinfahrten)

Fahrtzweck	Ggf. Untergruppe	Strukturmerkmal (= Personengruppe)	Personen-fahrten/Jahr
Arbeit		Erwerbstätige am Wohnort	190
Ausbildung		Einwohner 0-9 Jahre	162
		Einwohner 10-17 Jahre	263
		Einwohner 18-24 Jahre	104
Einkauf / Erledigung		Einwohner 0-9 Jahre	52
		Einwohner 10-17 Jahre	98
		Einwohner 18-24 Jahre	143
		Einwohner 25-44 Jahre	230
		Einwohner 45-64 Jahre	235
		Einwohner 65-74 Jahre	282
		Einwohner 75+	219
Geschäft		Erwerbstätige am Wohnort	38
		Erwerbstätige am Arbeitsort	37
Urlaub		Einwohner 0-9 Jahre	0,65
		Einwohner 10-17 Jahre	0,9
		Einwohner 18-24 Jahre	1,15
		Einwohner 25-44 Jahre	1
		Einwohner 45-64 Jahre	1,1
		Einwohner 65-74 Jahre	1
		Einwohner 75+	0,4
Privat	Freizeit eintägig	Einwohner 0-9 Jahre	146
		Einwohner 10-17 Jahre	170
		Einwohner 18-24 Jahre	171
		Einwohner 25-44 Jahre	177
		Einwohner 45-64 Jahre	175
		Einwohner 65-74 Jahre	205
		Einwohner 75+	105
	Kurzreisen (2-4 Tage)	Einwohner 0-9 Jahre	0,7
		Einwohner 10-17 Jahre	1,2
		Einwohner 18-24 Jahre	1,5
		Einwohner 25-44 Jahre	1,3
		Einwohner 45-64 Jahre	1,6
		Einwohner 65-74 Jahre	1,4
		Einwohner 75+	0,5
	Verw./Bekanntenbesuch	Einwohner 0-9 Jahre	76
		Einwohner 10-17 Jahre	100
		Einwohner 18-24 Jahre	60
		Einwohner 25-44 Jahre	49
		Einwohner 45-64 Jahre	42
		Einwohner 65-74 Jahre	86
		Einwohner 75+	70
	Wochenpendler	Erwerbstätige am Wohnort	1,85
	Fahrten am Urlaubsort	Betten in Beherbergungsbetrieben	200

Tab. 2-6: Elastizitäten der Mobilitätszunahme gegenüber der Zunahme vom BIP/Kopf und von der Pkw-Dichte

Fahrtzweck	ggf. Untergruppe	Elastizität	
		Mobilität zu BIP	Mobilität zu Pkw-Dichte
Arbeit		0,02	0,02
Ausbildung		0,01	0,01
Einkauf/Erledigung		0,05	0,03
Geschäft		0,30	0
Urlaub		0,05	0,02
Privat	Freizeit eintägig	0,25	0,30
	Kurzreisen (2-4 Tage)	1,00	0,25
	Verw./Bekanntenbesuch	0,02	0,05
	Wochenpendler	0,65	0,15
	Fahrten am Urlaubsort	0,40	0,05

Dabei wirkt ersteres vor allem im Geschäftsreiseverkehr, bei den Wochenpendlern und im Freizeitverkehr (Tagesausflüge, Kurzreisen). Die Pkw-Dichte hat geringere Auswirkungen und führt vor allem zu einer Zunahme der Tagesausflüge und Kurzreisen. Bei dem erwarteten Zuwachs des Bruttosozialprodukts von 1,14 % p.a. (insgesamt ca. 25 % im Prognosezeitraum) und der Pkw-Dichte von insgesamt rund 10 % sind die dadurch ausgelösten Steigerungen bei der Mobilität allerdings gering. Sie kompensieren zum Teil den Struktureffekt durch den demographischen Wandel, so wie dies in der Vergangenheit schon der Fall war, da insbesondere bei älteren Personengruppen die Mobilität deutlich steigt.

2.1.4 Verkehrsverteilung (Zielwahl)

Die Verkehrsverteilung wird in der folgenden allgemeinen Form beschrieben:

$$R_{QZ} = V_Q \bullet \frac{S_Z \bullet W_{QZ}^{\alpha}}{\sum_Z S_Z \bullet W_{QZ}^{\alpha}} \quad (3)$$

mit

R_{QZ} Reisen zwischen Quelle und Ziel;

V_Q: Quellverkehr von Q (Hinfahrten),

S_Z maßgebliches Strukturmerkmal für die Zielwahl

W_{QZ} Widerstand zwischen Quelle und Ziel zur Raumüberwindung

α Widerstandsexponent

Dabei wird nach Fahrtzwecken und den oben genannten Personen- bzw. Altersgruppen unterschieden. Als maßgebliches **Strukturmerkmal für die Zielwahl** wird herangezogen:

Tab. 2-7: Verkehrsanziehende Strukturdaten für das Verteilungsmodell

Fahrtzweck		verkehrsanziehende Strukturdaten
1	Beruf	Erwerbstätige am Arbeitsort
2	Ausbildung	Einwohner und Erwerbstätige am Arbeitsort, Gewichtung mit Raumstrukturtypen[1)]
3	Einkauf/Erledigung	Einwohner und Erwerbstätige am Arbeitsort, Gewichtung mit Raumstrukturtypen[1)]
4	Geschäft	Erwerbstätige am Arbeitsort, Gewichtung mit Raumstrukturtypen[1)]
5	Urlaub	Beherbergungskapazitäten[2)]
6	Privat	Einwohner gesamt, Beherbergungskapazitäten

1) Erwerbstätige stehen aus Los 1 nur insgesamt und nicht nach Branchen zur Verfügung; durch die differenziert festgelegten Raumstrukturtypen (siehe oben) wird der Bedeutung der einzelnen Verkehrszellen als zentrale Orte Rechnung getragen, die für die Zielattraktivität dieser Fahrtzwecke von besonderer Bedeutung sind.

2) aus der Fremdenverkehrsstatistik

Die Strukturdaten je Verkehrszelle werden z.T. **gewichtet mit den Raumstrukturtypen**. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass z.B. Oberzentren eine höhere Attraktivität haben und daher z.B. mehr Geschäftsreisen pro Erwerbstätigen anziehen als ländliche Gebiete. So finden sich auch die höheren Lehranstalten vorwiegend in den Ober- und Mittelzentren. Dort gibt es auch mehr Einkaufs- und Freizeitmöglichkeiten. Daneben spielen die Gebiete mit hohem

Freizeitwert vor allem eine große Rolle beim Urlaubs- und Privatverkehr (Wochenendausflugsverkehr).

Bei der Verkehrsverteilung spielen nicht nur soziodemographische und raumstrukturelle Gründe eine Rolle, sondern auch **"Verkehrswiderstände"** (in der gezeigten Formel die Variable W, siehe unten, Kap. 2.1.6). Bei einer **empirischen Herleitung des Modells** bzw. dessen Gewichte (bzw. der ersten Stufe hierzu) bestand allerdings die Schwierigkeit, dass die Datensätze der hauptsächlichen empirischen Grundlage zum Verkehrsverhalten, der MiD (Wegedaten und Reisedaten), **nur Quellen, aber keine Ziele enthalten**, so dass sich keine Verknüpfung mit Widerstandsmatrizen herstellen ließen. Die Datensätze der MiD enthalten nur Entfernungsklassen. Deshalb kann hier in der ersten Stufe nur eine grobe Annäherung der Gravitation erfolgen, und zwar wurden die **Widerstandsexponenten α heuristisch ermittelt**. Dabei wird je Fahrtzweck und Personengruppe aus MiD die Entfernungsverteilung ermittelt und die Gravitationsfunktionen so angepasst, dass die Struktur der Entfernungsverteilung gemäß MiD möglichst genau getroffen wird. So kann je Fahrtzweck und Personengruppe aus MiD die mittlere Fahrtweite und damit in Verbindung mit der Erzeugung die Verkehrsleistung ermittelt werden. Diese stellt die maßgebliche **Kontrollgröße für die Zielwahlfunktionen** dar. Die Widerstandsexponenten bewegen sich in einer Größenordnung von - 2 (Urlaub) bis - 5 (Einkauf)[14]. Bei ersterem ist also der Widerstand zwischen Quelle und Ziel von geringerer Bedeutung als bei letzterem, wo der größte Teil der Fahrten im unmittelbaren Nahumfeld unternommen wird.

Analog zu Tab. 2-3 ist in Tab. 2-8 die mittlere Anzahl von Personenkilometern je Fahrtzweck und Personengruppe pro Tag dargestellt.

Noch deutlicher als bei der aufkommensspezifischen Mobilität (Fahrten bzw. Wege pro Person und Tag) ist bei der **leistungsspezifischen Mobilität** (in Personenkilometern, maßgeblich vor allem für die Verkehrsverteilung) **abhängig vom sozialen Status und von der Pkw-Verfügbarkeit**.

Diese Zahlen (hochgerechnet aufs Jahr) stellen die Zielgröße für die Verkehrsverteilung dar.

[14] Ein entsprechender Wert für Privat und Ausbildung liegt bei rund - 4, für Arbeit und Geschäft bei - 3 bis - 3,5

Tab. 2-8: Mobilitätswerte je Fahrtzweck und Altersgruppe differenziert nach sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)

Personenkilometer/Tag	Fahrtzweck	Sozioökonomischer Status (gemäß MiD)						Pkw-Verfügbarkeit			
		sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	Insgesamt	Ständig	teilweise	gar nicht	Insgesamt
	Beruf										
Insgesamt	**7,7**	3,1	5,5	7,3	9,2	11,3	**7,7**	9,8	6,2	3,9	**7,7**
Altersgruppen	**Ausbildung**										
0 - 9	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**				
10 - 17	**0,1**	**0,2**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,0**	**0,1**	0,2	0,3	0,1	**0,1**
18 - 24	**2,0**	**1,0**	**1,0**	**1,7**	**2,6**	**6,6**	**2,0**	3,0	1,9	1,9	**2,0**
Insgesamt	**4,3**	**1,8**	**2,6**	**3,9**	**5,2**	**7,2**	**4,3**	6,7	4,1	2,8	**4,3**
Altersgruppen	**Einkaufen/Erledigung**										
0 - 9	**9,1**	4,6	8,1	6,9	11,0	16,0	**9,1**	-	-	-	**9,1**
10 - 17	**4,4**	2,4	4,9	4,1	5,1	4,2	**4,4**	-	-	.	**4,4**
18 - 24	**8,2**	5,9	6,9	8,8	10,3	5,1	**8,2**	10,9	9,1	5,2	**8,2**
25 - 44	**9,0**	8,2	9,0	8,5	9,5	9,9	**9,0**	10,4	6,3	6,1	**9,0**
45 - 64	**9,6**	7,4	8,6	9,2	10,3	10,9	**9,6**	10,9	9,0	3,6	**9,6**
65 - 74	**9,1**	8,9	6,0	8,9	10,4	10,0	**9,1**	10,5	9,0	4,1	**9,1**
75 und älter	**4,8**	4,6	3,2	4,8	5,6	4,6	**4,8**	6,6	3,3	2,7	**4,8**
Insgesamt	**8,4**	6,6	7,3	7,9	9,4	10,0	**8,4**	10,3	7,1	4,3	**8,4**
	Geschäft										
Insgesamt	**3,3**	2,3	2,8	3,3	3,8	3,4	**3,3**	4,5	3,3	1,7	**3,3**
Altersgruppen	**Freizeit/Privat**										
0 - 9	**11,5**	14,0	9,5	12,5	11,3	10,0	**11,5**	-	-	-	**11,5**
10 - 17	**14,4**	12,0	10,6	12,6	14,9	33,7	**14,4**	-	-	-	**14,4**
18 - 24	**16,9**	25,4	14,6	14,6	15,3	22,5	**16,9**	20,4	17,9	12,4	**16,9**
25 - 44	**16,7**	13,4	14,2	12,8	20,0	24,0	**16,7**	18,4	18,2	6,7	**16,7**
45 - 64	**13,9**	11,4	12,1	11,3	15,1	21,2	**13,9**	14,0	11,1	9,1	**13,9**
65 - 74	**14,5**	8,9	10,1	13,7	18,0	23,9	**14,5**	14,8	15,5	9,5	**14,5**
75 und älter	**8,5**	4,2	1,8	8,7	10,9	16,3	**8,5**	11,1	20,4	3,8	**8,5**
Insgesamt	**14,4**	13,0	11,5	12,2	16,3	21,8	**14,4**	16,0	15,5	7,6	**14,4**
Insgesamt	**39,1**	**29,0**	**31,8**	**35,3**	**44,3**	**55,3**	**39,1**	**47,0**	**39,1**	**22,7**	**39,1**

1) gemäß Definition von MiD Variablenübersicht Personendatensatz

Das Ergebnis der Zielwahl wurde ferner durch einen Quelle-Ziel-Ausgleich soweit korrigiert, dass sich bei den Zielen in der Summe auch geeignete **Attraktionsquoten** ergeben. Hierzu wurde mit den folgenden Sollwerten gerechnet (siehe Tab. 2-9).

Tab. 2-9: Erzeugungsraten (Fahrten je Person und Jahr, nur Hinfahrten)

Fahrtzweck	ggf. Untergruppe	Strukturmerkmal	Personen-fahrten/ Jahr
Arbeit		Erwerbstätige am Arbeitsort	192
Ausbildung		Erwerbstätige	23
		Einwohner	11
Einkauf/Erledigung		Erwerbstätige	212
		Einwohner	106
Geschäft		Erwerbstätige am Arbeitsort	78
Urlaub		Betten in Beherbergungsbetrieben	11
Privat	Freizeit eintägig	Einwohner	170
		Betten in Beherbergungsbetrieben	350
	Kurzreisen (2-4 Tage)	Betten in Beherbergungsbetrieben	30
	Verw./Bekanntenbesuch	Einwohner	69
	Wochenpendler	Erwerbstätige am Arbeitsort	2,3
	Fahrten am Urlaubort	Betten in Beherbergungsbetrieben	200

Der Quelle-Ziel-Ausgleich erfolgt nach den Formeln (3A) und (3B).

(3A) $$R_{QZ}' = R_{QZ} \bullet z_{QZ}$$

(3B) $$z_{QZ} = \frac{z_z}{\sum_z R_{QZ}}$$

mit

R_{QZ} Reisen zwischen Quelle und Ziel nach Verteilung

R_{QZ}' Reisen zwischen Quelle und Ziel nach Zielausgleich

z_{QZ} Korrekturfaktor für die Quelle-Ziel-Relation

Z_z Zielverkehr gemäß Attraktivitätsberechnung (siehe Tab. 2-9)

Maßgeblich bleibt aber die Erzeugung, so dass ein erneuter Ausgleich erfolgt (siehe Formel (3C) und (3D)).

(3C) $$R_{QZ}'' = R_{QZ}' \bullet q_{QZ}$$

(3D) $$q_{QZ} = \frac{Q_i}{\sum_q R_{QZ}'}$$

mit

R_{QZ}'' Reisen zwischen Quelle und Ziel nach Quelle-Ziel-Ausgleich

q_{QZ} Korrekturfaktor für die Quelle-Ziel-Relation

Q_i Quellverkehr gemäß Erzeugung

Durch diesen Ausgleich wurde sichergestellt, dass auch die potentiellen Ziele "ausreichend genutzt" werden, was ohne diesen Schritt nicht automatisch garantiert ist.

Bei der Verkehrsverteilung gehen die unten in Kapitel 2.1.6 beschriebenen Verkehrswiderstände ein. Da dieser Arbeitsschritt noch vor der Modal-Split-Ermittlung erfolgt, stellt sich die Frage nach dem "maßgeblichen Widerstand". Hier wurde folgendermaßen vorgegangen:

Die Widerstände werden nicht mit dem jeweiligen Modal-Split-Verhältnis gewichtet, weil dies zu Verwerfungen führt (das langsame Verkehrsmittel verschlechtert weiter den Widerstand, obwohl es ja nur eine zusätzliche Alternative darstellt). Es zählt jeweils der günstigste Widerstand je Quelle-Ziel-Relation.
Weitere Verkehrsmittel gehen ein, wenn deren Widerstand nicht wesentlich größer ist als der der günstigsten Verkehrsmittel. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Vorhandensein mehrerer Verkehrsmittelalternativen einen Vorteil darstellt.
Hierfür wird ein funktionaler Zusammenhang in der folgenden allgemeinen Form (je Quelle-Ziel-Relation) hergestellt:

(3E) $$W' = w1 \bullet a$$

mit

W' für die Verteilung maßgeblicher Widerstand

w1 Widerstand mit den niedrigsten Generalisierten Kosten

a Abschlagsfaktor für zusätzliche (zweitbeste) Alternative, a ≤ 1

(3F) $$a = \left(\frac{w2}{w1 + w2 \bullet r} \right)^{\alpha} \bullet b$$

mit

w2 Verkehrsmittel mit den zweitniedrigsten Generalisierten Kosten

r Relevanzschwelle (0,2)

α Exponent (0,3)

b Abschlagsfaktor für drittbeste Alternative, b ≤ 1

(3G) $$b = \left(\frac{w3}{w2 + w3 \bullet r} \right)^{\beta} \bullet c$$

mit

w3 Verkehrsmittel mit den drittniedrigsten Generalisierten Kosten

β Exponent (0,2)

c Abschlagsfaktor für viertbeste Alternative, c ≤ 1

(3H) $$c = \left(\frac{w4}{w3 + w4 \bullet r} \right)^{\gamma}$$

mit

w4 Verkehrsmittel mit den viertniedrigsten Generalisierten Kosten

γ Exponent (0,1)

In der Prognose ergibt sich eine veränderte Zielwahl gegenüber der Analyse

(1) durch veränderte Strukturdaten

(2) durch veränderte Fahrzeiten und Nutzerkosten

(3) durch veränderte Zeitwerte (in der Prognose aufgrund des (realen) BIP-Zuwachses höher als in der Analyse), wodurch sich zusammen mit (2) die Generalisierten Kosten ändern.

Grundsätzlich liegt der Verteilung die Hypothese der konstanten Budgets an Generalisierten Kosten zugrunde. Bei steigenden Einkommen erhöht sich indirekt das Budget durch höhere

Zeitwerte. Gleichzeitig werden aufgrund höherer Zeitwerte schnellere Verkehrsmittel bevorzugt, was zur Folge hat, dass auch die Zeitbudgets sich nicht wesentlich ändern.

2.1.5 Modal-Split

Das Modal-Split-Modell wird als sog. **Box-Cox-Logit-Modell** ausgeführt:

(4) $$P_{vm} = \frac{e^{-\beta*((w_{vm})^{\gamma}-1)/\gamma}}{\sum_{vm} e^{-\beta*((w_{vm})^{\gamma}-1)/\gamma}}$$

mit

P_{vm} Anteil Verkehrsmittel vm von 1

e Eulersche Zahl

β, γ Splitgewichte je Fahrtzweck

w_{vm} verkehrsmittelspezifischer Widerstand (in Euro)

Eingangsgrößen für den Modellbaustein Modal-Split sind die **relationsbezogenen Widerstände** der konkurrierenden Verkehrsmittel MIV, SPV, ÖSPV, auf längeren Distanzen das Flugzeug, im Nahverkehr auch der Rad- und Fußgängerverkehr, die gemäß den unten in Kap. 2.1.6 dargestellten Regeln vereinheitlicht in **"Generalisierten Kosten"** umgerechnet wurden.

Auch für das Modal-Split-Modell lassen sich aus MiD **Kontrollgrößen für die Modellbildung** gewinnen. So zeigt sich zum Beispiel eine Abhängigkeit des ÖV-Anteils von sozioökonomischer Struktur und von der Pkw-Verfügbarkeit (siehe Tab. 2-10 und Tab. 2-11).

Tab. 2-10: ÖV-Anteile in % (über alle Wege einschließlich nichtmotorisierter Verkehr) nach Fahrtzwecken und Altersgruppen abhängig vom sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)

ÖV-Anteil am gesamten Aufkommen in %	Fahrtzweck	Sozioökonomischer Status (gemäß MiD)						Pkw-Verfügbarkeit			
		sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	Insgesamt	Ständig	teilweise	gar nicht	Insgesamt
	Beruf										
Insgesamt	**13,0**	19,1	14,9	12,4	12,6	11,5	**13,0**	**7,1**	**26,5**	**50,0**	**13,0**
Altersgruppen	**Ausbildung**										
0 - 9	**13,1**	18,9	12,0	14,4	11,1	12,1	**13,1**	-	-	-	**13,1**
10 - 17	**49,3**	56,6	46,8	50,2	48,7	45,0	**49,3**	46,0	52,7	57,1	**49,3**
18 - 24	**40,3**	52,7	36,0	42,0	38,9	23,9	**40,3**	23,5	61,9	52,5	**40,3**
Insgesamt	**34,5**	46,8	34,6	34,6	32,1	26,8	**34,5**	28,4	55,1	55,3	**34,5**
Altersgruppen	**Einkaufen/Erledigung**										
0 - 9	**2,6**	3,5	5,6	1,5	2,8	1,5	**2,6**	-	-	-	**2,6**
10 - 17	**9,2**	8,2	10,4	8,8	9,7	6,9	**9,2**	8,8	10,7	21,7	**9,2**
18 - 24	**8,3**	12,3	10,0	7,1	6,8	7,2	**8,3**	3,2	9,5	22,2	**8,3**
25 - 44	**4,4**	12,1	4,4	3,6	3,3	5,4	**4,4**	1,9	6,4	20,1	**4,4**
45 - 64	**3,9**	4,6	3,7	3,9	3,7	3,8	**3,9**	2,0	5,3	17,2	**3,9**
65 - 74	**6,4**	6,4	10,2	6,5	4,8	6,8	**6,4**	2,7	8,3	25,9	**6,4**
75 und älter	**12,2**	14,8	18,4	12,0	11,5	5,0	**12,2**	4,2	18,1	27,0	**12,2**
Insgesamt	**5,5**	8,7	6,9	5,3	4,7	4,6	**5,5**	2,4	8,1	22,2	**5,5**
	Geschäft										
Insgesamt	**8,0**	13,3	10,6	6,8	8,3	7,4	**8,0**	**5,2**	**12,0**	**32,6**	**8,0**
Altersgruppen	**Freizeit/Privat**										
0 - 9	**4,7**	4,5	5,1	3,9	4,5	7,6	**4,7**	-	-	-	**4,7**
10 - 17	**10,9**	13,6	10,3	11,3	9,6	11,3	**10,9**	7,1	16,1	22,3	**10,9**
18 - 24	**11,8**	16,6	12,0	11,5	9,4	13,0	**11,8**	5,9	15,3	30,1	**11,8**
25 - 44	**6,9**	13,7	10,6	4,7	6,6	6,4	**6,9**	3,8	9,4	27,4	**6,9**
45 - 64	**5,5**	6,2	10,5	4,6	5,0	5,8	**5,5**	3,6	6,1	22,6	**5,5**
65 - 74	**6,7**	4,4	7,6	6,2	7,6	9,3	**6,7**	3,7	6,8	24,4	**6,7**
75 und älter	**10,7**	2,9	6,2	13,4	9,7	14,1	**10,7**	5,9	16,0	22,4	**10,7**
Insgesamt	**7,4**	9,3	9,5	6,7	6,8	7,7	**7,4**	4,0	10,9	25,1	**7,4**
Insgesamt	**10,3**	**13,7**	**12,8**	**9,7**	**9,4**	**9,2**	**10,3**	**4,7**	**16,3**	**29,9**	**10,3**

Tab. 2-11: ÖV-Anteile in % (über alle Wege, nur motorisierter Verkehr) nach Fahrtzwecken und Altersgruppen abhängig vom sozialem Status und Pkw-Verfügbarkeit (eigene Auswertungen aus MiD)

ÖV-Anteil am mot. Aufkommen in %	Fahrtzweck	Sozioökonomischer Status (gemäß MiD)						Pkw-Verfügbarkeit			
		sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch	Insgesamt	Ständig	teilweise	gar nicht	Insgesamt
	Beruf										
Insgesamt	**15,5**	**25,3**	**18,7**	**15,0**	**14,9**	**13,2**	**15,5**	**8,1**	**37,1**	**84,0**	**15,5**
Altersgruppen	**Ausbildung**										
0 - 9	**23,9**	37,6	25,1	25,8	19,7	20,1	**23,9**	-	-	-	**23,9**
10 - 17	**77,2**	85,4	80,2	79,2	73,3	67,1	**77,2**	65,9	74,3	93,9	**77,2**
18 - 24	**53,1**	72,4	54,0	52,1	50,3	30,4	**53,1**	28,5	79,7	88,2	**53,1**
Insgesamt	**53,8**	71,9	59,6	53,6	49,1	39,6	**53,8**	35,0	75,9	91,6	**53,8**
Altersgruppen	**Einkaufen/Erledigung**										
0 - 9	**5,1**	**7,6**	**10,1**	**2,9**	**6,0**	**2,4**	**5,1**	-	-	-	**5,1**
10 - 17	**17,0**	**16,6**	**18,8**	**16,7**	**17,8**	**11,0**	**17,0**	15,4	21,4	69,0	**17,0**
18 - 24	**13,7**	**27,5**	**17,4**	**10,9**	**9,8**	**11,1**	**13,7**	4,7	17,7	68,5	**13,7**
25 - 44	**8,2**	**26,5**	**9,9**	**6,5**	**6,1**	**7,8**	**8,2**	3,4	13,3	71,2	**8,2**
45 - 64	**6,5**	**8,3**	**8,2**	**6,9**	**5,7**	**5,7**	**6,5**	3,2	9,5	78,6	**6,5**
65 - 74	**12,2**	**12,6**	**22,9**	**12,1**	**9,6**	**10,8**	**12,2**	4,7	18,0	87,6	**12,2**
75 und älter	**25,1**	**25,5**	**45,6**	**24,3**	**24,2**	**13,9**	**25,1**	7,8	34,2	90,8	**25,1**
Insgesamt	**9,9**	**17,4**	**14,0**	**9,6**	**8,3**	**7,3**	**9,9**	4,0	15,7	79,7	**9,9**
	Geschäft										
Insgesamt	**9,3**	**16,2**	**13,1**	**7,8**	**9,6**	**8,1**	**9,3**	**5,9**	**14,8**	**49,0**	**9,3**
Altersgruppen	**Freizeit/Privat**										
0 - 9	**9,2**	12,3	9,2	8,0	8,6	13,3	**9,2**	-	-	-	**9,2**
10 - 17	**22,3**	29,2	21,4	23,4	20,0	20,2	**22,3**	-	-	-	**22,3**
18 - 24	**19,3**	29,0	24,3	18,2	13,6	18,6	**19,3**	9,0	26,4	72,5	**19,3**
25 - 44	**12,7**	30,3	21,1	9,1	11,6	10,8	**12,7**	6,6	18,6	77,0	**12,7**
45 - 64	**10,9**	13,4	22,8	9,1	10,3	10,2	**10,9**	7,0	13,8	77,3	**10,9**
65 - 74	**13,8**	10,6	20,3	13,3	14,1	15,6	**13,8**	7,3	12,5	85,4	**13,8**
75 und älter	**22,9**	6,7	20,4	26,9	21,9	21,2	**22,9**	11,4	28,1	82,4	**22,9**
Insgesamt	**14,2**	20,8	20,2	13,1	12,6	12,9	**14,2**	7,5	21,4	77,3	**14,2**
Insgesamt	**39,1**	**29,0**	**31,8**	**35,3**	**44,3**	**55,3**	**39,1**	**47,0**	**39,1**	**22,7**	**39,1**

Leider sind in der MiD, wie erwähnt, aus Datenschutzgründen keine Ziele verschlüsselt, so dass die gezeigten Modal-Split-Werte nicht relationsbezogen ermittelt und den Angebotseigenschaften der Verkehrsmittel gegenübergestellt werden konnten. Damit ließen sich auf der Basis der MiD-Befragung keine Zusammenhangsanalysen zwischen Verkehrsangebot und Modal-Split durchführen.

Zur Bestimmung der Modal-Split-Gewichte in der gezeigten Formel (4) wurde deshalb folgendermaßen vorgegangen:

(a) Es erfolgte eine "Übersetzung" der Gewichte aus dem Vorgängermodell[15], da diese aus den damals vorliegenden Daten MiD 2002 und Dateline 2001/2002 (mit relationsbezogener Verschlüsselung) abgeleitet worden waren.
(b) Mit dem so angepassten Modell wurden unter Zugrundelegung der Verkehrswiderstände von 2004 die Verkehrsmittelanteile für die Analysematrix 2004 aus der Prognose 2025 der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen (PdVV 2025) ermittelt und mit der damaligen Matrix bzw. den Modal-Split-Zahlen verglichen.
(c) Die Gewichte wurden dann so verändert, dass die Verkehrsmittelanteile gemäß MiD in Eckwerten (Personenfahrten und Pkm) je Personengruppe auch tatsächlich getroffen wurden.
(d) Es erfolgte eine Kalibrierung, indem das Modell für die Gesamtmatrix (nach Zielwahl) angewendet und mit den Eckwerten gemäß "Verkehr in Zahlen" je Verkehrsmittel und Fahrtzwecke abgeglichen wurde. Dies erfolgte durch Anpassung der Splitgewichte.

Die so gewichteten Splitgewichte liegen je Fahrtzweck in einer Bandbreite von

- 1 bis 2 beim Koeffizienten β (erfahrungsgemäß höchste Werte, d.h. stärkste Reaktion auf Unterschiede bei den Widerständen im Geschäftsreiseverkehr, niedrigste beim Urlaubs- und Ausbildungsverkehr)
- 0,1 bis 0,2 beim Koeffizienten γ (auch hier höchste Werte beim Geschäftsreiseverkehr sowie bei Fernpendlern, niedrigste beim Ausbildungsverkehr).

[15] Anwendung für die PdVV 2025 (Intraplan Consult GmbH und BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung); dieses Modell ist auf der Grundlage der vormaligen Erhebung MiD (Nahverkehr) und Dateline (Fernverkehr) erstellt worden

Dabei reagiert der Koeffizient β auf

- **relative** Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln (Reisezeitverhältnis bzw. hier **Verhältnis** der Generalisierten Kosten)

und der Koeffizient γ auf

- **absolute** Unterschiede zwischen den Verkehrsmitteln (z.B. Reisezeitdifferenz bzw. hier **Differenz** bei den Generalisierten Kosten).

Durch die Kombination dieser beiden Koeffizienten, wie dies in dem verwendeten Modelltyp geschieht, lässt sich die Realität abbilden. In der Tat berücksichtigen Verkehrsmittelnutzer beide Faktoren (Kostenverhältnis, Kostendifferenz) in ihrer Verkehrsmittelwahl. Das Modell lässt sich damit gut gleichzeitig bzw. konsistent für Nah- und Fernverkehrsrelationen mit ihren unterschiedlichen Wertebereichen einsetzen. Die Koeffizienten für die einzelnen Fahrtwecke/Untergruppen sind in Tab. 2-12 angegeben.

Tab. 2-12: Splitgewichte je Fahrtzweck bzw. Untergruppe

Fahrtzweck	Ggf. Untergruppe	Splitgewichte	
		beta	gamma
Arbeit		1,7	0,13
Ausbildung		1,0	0,08
Einkauf/Erledigung		2,0	0,12
Geschäft		2,1	0,18
Urlaub		0,9	0,12
Privat	Freizeit eintägig	1,6	0,12
	Kurzreisen (2-4 Tage)	1,8	0,15
	Verw./Bekanntenbesuch	1,8	0,12
	Wochenpendler	1,8	0,18
	Fahrten am Urlaubsort	1,2	0,10

2.1.6 Verkehrswiderstände

Bei den Verkehrswiderständen, der Widerstandsmatrix, handelt es sich um Kenngrößen, die das Verkehrsangebot zwischen Quelle und Ziel beschreiben, also Entfernung, Fahrzeit, Fahrtkosten, im öffentlichen Verkehr Umsteigenotwendigkeiten, Bedienungshäufigkeiten, usw. ("Raumwiderstände").

Die Widerstände der konkurrierenden Verkehrsmittel MIV und ÖV wurden **je Quelle-Ziel-Relation** aus den Netzmodellen der Lose 4 und 5 bzw. dem intermodalen Gesamtnetz abgeleitet.

Dabei sind verkehrsmittelspezifisch folgende Unterscheidungen zu machen:

- Bei den Widerständen im Bahnverkehr erfolgt ein eng verzahntes Vorgehen. Die Netzattribute und daraus abgeleitete Widerstände, und zwar in Form der unten beschrieben "Generalisierten Kosten", die zur Nachfrageberechnung und zur Umlegung verwendet werden, sind identisch. Dabei sind auch die intermodalen Wege MIV - Bahn (Fernanbindungen) berücksichtigt.
- Beim MIV wird durch das Straßennetzmodell je Quelle-Ziel-Relation Fahrzeit und Entfernung zur Verfügung gestellt, und zwar für verkehrliche Lastzustände (1/12, 1/14, 1/16 der Tageslast pro Stunde). Diese Matrizen werden mit dem unten beschriebenen Verfahren in Generalisierte Kosten umgerechnet. Aus arbeitstechnischen Gründen ist es aber sinnvoll, parallel eigene, abgestimmte Streckennetzmodelle vorzuhalten, da für Prüf- und Kalibrierungszwecke z.T. Umlegungen (z.B. für Screenlines) erforderlich sind und die Beschränkung auf die drei genannten Lastfälle nicht ausreichend ist.
- Die Abbildung des Linienbus-Angebotes wird aus dem Streckennetzmodell abgeleitet (siehe unten).
- Die Widerstände im Luftverkehr werden unter Berücksichtigung der im Luftverkehr erforderlichen intermodalen Wegeketten bzw. Luftwiderstände erzeugt.

Die in unterschiedlichen Dimensionen vorliegenden Einflussgrößen wurden je Quelle-Ziel-Relation qz, Verkehrsmittel vm und Fahrtzweck fz nach der folgenden Formel in **"Generalisierte Kosten"** (**GK**, in Euro) umgerechnet.

(5) $GK = (t + DK + ER + ZV) \cdot VT + FP$

mit

t	Reisezeit
DK	Diskomfort
ER	Erschließung
ZV	Zuverlässigkeit/Pünktlichkeit
VT	Zeitwert (value of time)
FP	Fahrpreis bzw. Nutzerkosten

Davon setzt sich die **Reisezeit t** wie folgt zusammen:

(6) $t = (ti + ta + tz)$

mit

ti Fahrzeit vom Ersteinstieg bis Letztausstieg im Hauptverkehrsmittel

ta Anpassungszeit (Funktion aus der Bedienungshäufigkeit, bei den individuellen Verkehrsmitteln "Null")

tz Zugangszeit (Anbindungszeit ggf. intermodal)

Diese "physikalischen" Größen werden direkt aus den drei Netzmodellen Bahn, Luft und Straße ermittelt.

Der **Diskomfort (DK)** beschreibt bzw. bewertet die mehr oder minder bestehenden "Unannehmlichkeiten" der Reisen oder z.B. die Tatsache, ob man während der Fahrt arbeiten oder lesen kann u.a., und setzt sich als Gewichtung der Reisezeit aus folgenden Variablen zusammen:

(7) $DK = SZ \bullet t + UP + PZ$

mit

t Reisezeit (siehe oben)

SZ Systemfaktor (Maßgeblich ist der MIV mit "0", bei der Bahn werden die Systeme A (ICE), B (übriger SPFV), C (Nahverkehr) unterschieden). Die Werte schwanken zwischen - 0,15 (ICE) und 0,5 (Nahverkehrsbus)

UP Umsteigezuschlag (nicht im MIV)

PZ Pausenzeitzuschlag in Abhängigkeit von der Reisedauer (bei längeren Relationen im Fernreiseverkehr, insbesondere im MIV ab ca. 4 h), spiegelt auch Übernachtungsnotwendigkeit bei ganz langen internationalen Landverkehrsstrecken wider

(8) UP = U • py

mit

U Anzahl Umsteigevorgänge

py "Penalty" (Zuschlag) zusätzlich zur Zeit, weil Umsteigen mit Unbequemlichkeit verbunden ist (zwischen 10 und 30 Minuten Zeitäquivalent)

und

(9) PZ = (ti - h) • p

mit

ti Fahrzeit vom Ersteinstieg bis Letztausstieg im Hauptverkehrsmittel

h maximale Zeit in Minuten, bis zu der keine Pause angenommen wird (3 - 4 Stunden)

p Pausenfaktor

Mit dem **Erschließungsgrad ER** wird berücksichtigt, dass die regionale Erschließung durch die einzelnen Verkehrsmittel unterschiedlich ist. Diese Variable berücksichtigt zusätzlich zur "physikalischen" Größe "Anbindungszeit", dass die Nutzung der Verkehrsmittel mit deren **Verfügbarkeit** zusammenhängt. In Regionen fernab eines Fernbahnhofs sinkt z.B. deren Nutzung, unabhängig davon, ob z.B. durch intermodale Transportketten das Reiseziel genauso schnell erreichbar ist wie von einer im Bahnverkehr erschlossenen Region. Auch bei den Flughäfen lässt sich nachweisen, dass die Nutzung des Verkehrsmittels Luftverkehrs in zunehmender Entfernung vom Flughafen auch auf Relationen abnimmt, wo keine Landverkehrsmittel als Alternative zur Verfügung stehen. **Durch die Anbindungszeit allein lässt sich dieser empirische Befund nicht hinreichend abbilden**, so dass die meisten Fernverkehrsmodelle eine zu geringe Varianz des Modal-Splits in regionaler Hinsicht abbilden.

(10) ER = E • t

mit

t Reisezeit

E Erschließungsquotient je Verkehrsmittel und Erschließung der Verkehrszelle q und z

Die Erschließungsgewichte wurden in Abhängigkeit von der Erreichbarkeit/Erschließung der Region in den Verkehrsmitteln Bahn, ÖSPV, und Flugzeug je Region berechnet. Die Werte können in auf beiden Seiten schlecht erschlossenen Quelle-Ziel-Relationen bis zu einer Zunahme von 40 % der Reisezeit betragen.

Die Berücksichtigung der **Zuverlässigkeit ZV** bei der Berechnung des Kundennutzens ist ein Ziel des Projektes "Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung"[16]: Da die Ergebnisse bei der Modellbildung zur BMVI-Prognose noch nicht vorlagen und zu unplausiblen Ergebnissen führten, wurde statt dessen eine robuste, pauschale Berücksichtigung angenommen.

(11) $ZV = p_{SY} \cdot (1 + 1{,}5 \cdot U) \cdot v_{Sy}$

mit

p_{SY} Verspätungsquote (Bahn, Luft)

U Umsteigehäufigkeit

v_{Sy} durchschnittliche Verspätung je System

Die Verspätungsquoten wurden von der DB AG für die einzelnen Zugkategorien bzw. der ADV (Luftverkehr) zur Verfügung gestellt[17].

Im MIV wurden die **Stauwahrscheinlichkeit** (abgleitet aus der Differenz zwischen der Fahrzeit im unbelasteten gegenüber der im belasteten Netz) und Zuverlässigkeitsfunktionen berücksichtigt:

(12) $ZV = (t - tu) \cdot rf$

mit

t Reisezeit im belasteten Netz

tu Reisezeit im unbelasteten Netz

16 Intraplan Consult GmbH, Planco Consulting GmbH, TUBS GmbH: Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung, FE-Nr. 96007/2011, im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014

17 Die Verspätungsquoten für den Istzustand wurden je Zuggattung von der DB AG zur Verfügung gestellt (SPFV: 28 %, SPNV 10,4 %, S-Bahn 9,1 %). Bei der Luft stammen die Daten von der Pünktlichkeitsstatistik der ECAC (10 %, in der Prognose unverändert). Es wurde angenommen, dass die Werte bis 2030 auf 20 %, 7,5 %, 5 % absinken.

rf Reservezeitfaktor

Es handelt sich hier nur um eine relativ pauschale, dennoch robuste Berücksichtigung dieses Sachverhalts, um für die Prognose mögliche Steigerungen bei der Zuverlässigkeit/Pünktlichkeit abbilden zu können. Die Ergebnisse des hierzu durchgeführten Forschungsvorhabens[18] standen noch nicht zur Verfügung, werden aber voraussichtlich bei den Projektbewertungen berücksichtigt.

Der **Zeitwert VT** ist der Bewertungsmaßstab für die Umrechnung der Zeiteinheiten in Kosteneinheiten und wird nach Fahrtzwecken unterschieden. Abgestimmt mit dem vorerwähnten Forschungsprojekt "Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung" wird von den folgenden Werten, abhängig von der Reisezeit ausgegangen:[19]

- Geschäftsfahrten 20 - 75 €/h (letzterer Wert ab einer Reisezeit von 3 h)
- Privatfahrten 5 - 8 €/h (letzterer Wert ab einer Reisezeit von 1,5 h)
- Arbeitspendler 6 - 8 €/h (letzterer Wert ab einer Reisezeit von 1,5 h)
- Ausbildungspendler 1 - 3 €/h (letzterer Wert ab einer Reisezeit von 1 h)

Für die **Fahrpreise/Nutzerkosten FP** wurden je Verkehrsmittel und Fahrtzweck entfernungsabhängig und fahrtzweckspezifisch robuste Preismodelle entwickelt, die auf das oben genannte Forschungsprojekt abgestimmt sind. Dabei geht bei Bahn, Fernlinienbus und Luftverkehr auch eine Entfernungsdegression ein (Formel 13).

(13) FP = $(km^{dg} \cdot kp) \cdot SY + Z + An$

MM <= $(km^{dg} \cdot kp) \cdot SY + Z <= MX$

mit:

km Entfernung in km aus Netzmodell

dg Degression: Exponent < 1 auf km (bei der Bahn von 0,9, beim Luftverkehr 0,75, beim Bus 0,8)

[18] Erfassung des Indikators "Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs" im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung. Wird bei der Umlegung berücksichtigt.

[19] In der Prognose gemäß Steigerung des BIP/Einwohner in Deutschland erhöht.

kp Kilometerpreis in € (Bahn je Fahrtzweck 10 - 20 Ct/km, Bus 15 Ct/km, Luft 0,5 bis 1,1 €/km)

Z ggf. Zuschlag (z.B. IC-Zuschlag)

MX Maximalpreis in € je Verkehrsmittel und System sowie Fahrtzweck (z.B. 80 € Bahn privat, 1000 € Luft privat, 40 % Bus)

MM Minimalpreis in € je Verkehrsmittel und System sowie Fahrtzweck

An Anbindungskosten in €

SY Systemfaktor je Verkehrsmittel sowie System innerhalb des Verkehrsmodells (SPNV bei Zug und Bus, Netzgesellschaften, Low-Cost, Touristik beim Luftverkehr)

Dieses Tarifmodell ist zunächst anhand ausgewählter Preisbeispiele entwickelt und dann durch Hochrechnung der Gesamtmatrix und **Vergleich** des Gesamtwertes der so errechneten Einnahmen **mit den Geschäftsberichten** der DB AG und ausgewählten Luftverkehrsgesellschaften[20] geeicht worden.

Für den MIV wurden nur die variablen Kosten berücksichtigt, weil nur diese von den Nutzern als entscheidungsrelevant für die Fahrtentscheidung bzw. die Verkehrsmittelwahl angesehen werden. Die Preisformel lautet hier:

(14) $FP = (km \bullet bp + ap + Mt) / bs_{fz}$

mit:

FP Fahrpreise/Nutzerkosten

km Entfernung in km gemäß Straßennetzmodell

bp Kraftstoffkosten /km (0,1 - 0,12 €/Pkw-km, abhängig vom Fahrtzweck[21]

ap Parkkosten in Abhängigkeit von Raumstruktur am Ziel (0 - 5 €)

Mt ggf. Mautkosten z.B. für Auslandsstrecken, Fährlinien aus den Netzmodellen

bs_{fz} Besetzungsgrad abhängig vom Fahrtzweck

Während von den genannten Variablen die **Nutzerkosten** und **fahrzeitbezogenen Angebotseigenschaften** aus den Verkehrsnetzen und Erlösstatistiken relativ "hart" ermittelt werden können, sind die Größen Diskomfort (DK), Erschließungsgrad (ER) und Zuverlässigkeit (ZV) eher

20 Association of European Airlines (AEA): Summary of Traffic and Airline Results (S.T.A.R), jährlich

21 In der Regel sind Fahrzeuge im Geschäftsreiseverkehr größer und verbrauchen damit mehr Kraftstoff.

"weiche Variable", die aber notwendig sind, um die tatsächliche Varianz bei den Verkehrsmitteln einzubeziehen. Die Bewertung dieser Variablen erfolgte heuristisch.

Für den **Binnenverkehr der Verkehrszellen** wurden unabhängig von den Verkehrsnetzen die Widerstände geschätzt. Dies war erforderlich, weil eine **Modellierung des Gesamtverkehrs nicht ohne den Zellbinnenverkehr** erfolgen kann, in dem sogar, mit Ausnahme von Bahn, Reisebus/Fernlinienbus und Flugzeug, der größte Teil der Personenfahrten, insbesondere im ÖSPV und im nichtmotorisierten Verkehr stattfindet. Hier wurden anhand der Flächengröße der Verkehrszellen (und zwar der modellintern verfeinerten Verkehrszellen) durchschnittliche Entfernungen geschätzt.

(15) $d_{BV} = (\sqrt{AR/3{,}14})\text{^}vf$

$mind \leq d \leq maxd$

mit

d_{BV}	Entfernung im Binnenverkehr der Zellen
AR	Fläche der Zone in km^2
vf	verkehrsmittel- und fahrtzweckspezifischer Exponent (Wertebereich 0,3 bis 1)
mind	Mindestentfernung je Verkehrsmittel in km
maxd	Maximalentfernung je Verkehrsmittel in km

Indem nun für die relevanten Verkehrsmittel Durchschnittsgeschwindigkeiten festgelegt wurden, und zwar nach Raumstrukturtypen differenziert[22], konnten auf diese Weise Fahrzeiten je Verkehrsmittel und Fahrtzweck im Zellbinnenverkehr ermittelt werden, die mit den gleichen Kosten- und Wertansätzen (Fahrpreise, Zeitwerte) wie bei den Netzwiderständen belegt wurden.

Die so ermittelten Entfernungen für den Zellbinnenverkehr dienten auch zur Ermittlung der Verkehrsleistung, die aus den Netzwiderständen aufgrund des hohen Verkehrsanteils des Zellbinnenverkehrs nicht vollständig ermittelt werden kann. Durch diese Vorgehensweise, insbesondere der Berücksichtigung von Flächengröße und Raumstrukturen der Verkehrszellen, ist die Berechnung genauer als mit pauschalen, einheitlichen Entfernungen für den Zellbinnenverkehr. Es ließen sich damit auch Veränderungen zwischen Analyse und Prognose bestimmen, wenn z.B.

22 So ist die Durchschnittsgeschwindigkeit im MIV in Kernstädten niedriger als im ländlichen Raum. Im ÖSPV ist dies aufgrund von Schnellbahnen meist umgekehrt.

flächengroße ländliche Zellen stärkere Einwohnerrückgänge zu verzeichnen haben als kleinere städtische Regionen.

Eine weitere notwendige Ergänzung der Systematik der aus den Netzen ermittelten Widerstände stellte die **Behandlung von Nachbarrelationen** dar. Da die Widerstände zwischen Verkehrszellen anhand zentral gelegener Verkehrsknoten ermittelt werden, führt dies in der Regel zu zu großen durchschnittlichen Fahrtentfernungen bzw. Widerständen bei Nachbarrelationen, bei denen in der Praxis im Detail, das heißt innerhalb des Quelle-Ziel-Paars nähere Ziele stärker nachgefragt werden als entferntere Ziele. Die zu großen Widerstände führen zu einer deutlichen Unterschätzung des modellierten Verkehrs insbesondere beim MIV, beim Bus und beim Fahrradverkehr. Die Überschätzung der Durchschnittsentfernung bei solchen Relationen führt dann umgekehrt aber zu einer Überschätzung der berechneten Verkehrsleistung, wenn die Korrektur nur im Rahmen der Nachfrageberechnungen und nicht bei den Netzwiderständen selbst erfolgt. Daher wurden die Widerstände einschließlich Entfernungen der Nachbarrelationen je Verkehrsmittel pauschal abgemindert. Bei nicht benachbarten Relationen wurde keine Korrektur vorgenommen, denn bei entfernter gelegenen Quelle-Ziel-Paaren ist nicht mehr von einer Überschätzung der Verkehrswiderstände und Unterschätzung der Nachfrage auszugehen, einerseits wegen der dazu geringeren Varianz der Entfernungen bzw. Widerstände innerhalb eines Quelle-Ziel-Paares, andererseits, weil bei entfernteren Quelle-Ziel-Relationen in der Tat eher der zentrale Ort der Verkehrszelle, wo meist auch der Netzknoten liegt, als Ziel gewählt wird.

Für die **nicht direkt in den Netzmodellen erfassten Verkehrsmittel ÖSPV, Fahrrad- und Fußverkehr** (letzterer nur im Zellbinnenverkehr betrachtet) wurden die Widerstände aus den Straßennetzmodellen mit den oben beschriebenen Ergänzungen zum Zellbinnenverkehr und für Nachbarrelationen abgeleitet. Für den ÖSPV wurde dabei nach Raumstrukturtypen unterschieden, weil das Angebot im öffentlichen Personennahverkehr naturgemäß in den Städten viel größer ist als in ländlichen Gebieten und zudem in den Großstädten meist leistungsfähige und schnellere Verkehrsmittel (Stadtbahn, U-Bahn) zur Verfügung stehen.

Für den sich im Bearbeitungszeitraum dynamisch entwickelnden **Fernlinienbusverkehr** wurde ein eigenes Netzmodell aufgebaut, indem die bis Mitte 2013 bestehenden Angebote als Städtepaare mit Bedienungshäufigkeiten erfasst und mit den Straßenwiderständen verknüpft wurden. "Angebotslücken", d.h. noch nicht erschlossene Städtepaare wurden analysiert und manuell ergänzt sowie Netzverknüpfungen angenommen, die heute oft noch nicht existieren, weil die Busbetreiber bisher meist keine preislich und fahrplantechnisch abgestimmten betreiberüber-

greifende Angebote zur Verfügung stellen. Solche abgestimmten Angebote, das ist zu erwarten, wird es in 2030 stärker als bisher geben, wie die Busnetze in europäischen Ländern mit längerer "Fernbus-Tradition" zeigen (z.B. Vereinigtes Königreich, Schweden).

2.1.7 Ermittlung der Nachfragematrix 2010

Im Personenverkehr liegen aus der amtlichen Statistik oder aus sonstigen öffentlich zugänglichen Quellen **keine umfassenden Datengrundlagen** zur regionalen Struktur des Verkehrs vor.

Deshalb war die Verflechtungsmatrix für den Istzustand 2010 großenteils **auf der Basis von Modellrechnungen** zu bestimmen. Dazu diente das oben beschriebene Verkehrsmodell. Einziger Verkehrsträger, für den **die Verflechtungsmatrix** mehr oder weniger vollständig **empirisch** ermittelt werden konnte, ist der **Luftverkehr**. Gleichwohl gibt es darüber hinaus eine **Reihe von empirischen Daten, aus denen sich die Verkehrsverflechtungen für Teilbereiche oder auf aggregiertem Niveau direkt ermitteln lassen**. Diese Daten wurden bei der Ermittlung der Personenverkehrsverflechtungen direkt verwendet, das heißt, nicht nur in Auszügen zur Kalibrierung des Modells verwendet.

In der Tat wäre es **ohne die Einbeziehung empirischer Matrixelemente** ein **nahezu unmögliches Vorhaben, die komplexen Verkehrsstrukturen hinsichtlich der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen allein durch ein Verkehrsmodell**, auch wenn es noch so differenziert und wissenschaftlich abgesichert ist, **valide abzubilden**. Selbst im Nahverkehr, der deutlich mehr von regelmäßigen Verkehrsstrukturen und Verkehrsverflechtungsmustern geprägt ist als der Fernverkehr, sind für große Räume, wie z.B. Ballungsräume, Matrizen der Verkehrsverflechtungen, die allein auf Modellrechnungen beruhen, erfahrungsgemäß in der Regel höchst problematisch.

Um eine möglichst realistische Abbildung der Verkehrsverflechtungen in Deutschland zu erhalten, wurden daher die aus der Statistik oder aus Erhebungen vorhandenen Verflechtungsstrukturen ausgewertet und in die Verflechtungsmatrix eingearbeitet. In der Tat stehen aus unterschiedlichen Quellen abgesicherte Daten zu den räumlichen Verflechtungen zur Verfügung. Eine Liste der verwendeten Daten ist in der folgenden Tab. 2-13 gezeigt.

Diese Daten sind jedoch sehr heterogen und unterscheiden sich hinsichtlich räumlicher Feinheit, Verkehrsmittelbezug, Fahrtzweck und Vollständigkeit erheblich. Entsprechend hoch ist der Aufwand zur Aufbereitung, Umschlüsselung, Zuordnung und Einarbeitung in die Gesamtmatrix.

Tab. 2-13: Übersicht über die verwendeten empirischen Matrixelemente

Quelle/Datei (Jahr)		räumliche Struktur	Verkehrs-mittel	Fahrtzwecke	Vollständigkeit
1.	Pendlerdaten (BAA) (2010)	feinräumig, Quelle-Ziel	nein	ja (Arbeit)	nur sozialversicherungspflichtig Erwerbstätige
2.	Amtliche Fremdenverkehrsstatistik(2010)				
2.1	Gästeankünfte nach Regionen	NUTS 3 x Inland/Ausland	nein	eingeschränkt (touristisch + mehrtägig Geschäft)	gewerbliche Unterkünfte
2.2	Gästeankünfte nach Bundesländern	Bundesland x Inland/Länder (Ländergruppen im Ausland)	nein	eingeschränkt (touristisch + mehrtägig Geschäft)	gewerbliche Unterkünfte
2.3	Deutsche Touristen im Ausland (UNWTO-Statistik)	Land x Land	nein	eingeschränkt (touristisch + mehrtägig Geschäft)	gewerbliche Unterkünfte
2.4	Statistiken einzelner Nachbarländer (z.B. Österreich)	Bundesland/Region x Bundesland Deutschland	nein	eingeschränkt (touristisch + mehrtägig Geschäft)	gewerbliche Unterkünfte
2.5	Geschäftsreisemarkt Deutschland (Sonderauswertung Deutschland-Tourismus)	Land x Land	nein	ja (Geschäft) (dadurch überschlägliche Trennung Geschäft/ Urlaub bei den o.g. Quellen möglich	Übernachtungsgäste
3.	VDV-Statistik/ Verbundstatistik (2010)				
3.1	VDV-ÖSPV-Statistik	Bedienungsräume, meist kompatibel mit Verkehrszellen	ja (ÖSPV)	nein	größter Teil des ÖSPV-Linienverkehrs
3.2	Verbundstatistiken	Verkehrsverbünde	ja Bahn/ ÖSPV	nein	großer Teil des deutschen ÖPNV

Tab. 2-13: (Fortsetzung)

Quelle/Datei (Jahr)		räumliche Struktur	Verkehrs-mittel	Fahrtzwecke	Vollständigkeit
3.	VDV-Statistik/ Verbundstatistik (2010)				
3.1	VDV-ÖSPV-Statistik	Bedienungsräume, meist kompatibel mit Verkehrszellen	ja (ÖSPV)	nein	größter Teil des ÖSPV-Linienverkehrs
3.2	Verbundstatistiken	Verkehrsverbünde	ja Bahn/ ÖSPV	nein	großer Teil des deutschen ÖPNV
4.	Radverkehr (2008 MiD, ViZ)	Fahrradnutzung je Bundesland	ja (Rad)	nein	ja (Deutschland)
5.	Eisenbahn				
5.1	Internationaler Verkehr (amtlich 2010)	Deutschland x Länder im Ausland	ja (Bahn)	nein	Problem "gebrochene Verkehre" an Grenzbahnhöfe (z.B. Basel, Salzburg)
5.2	Bundesländermatrix (Stat. Bundesamt 2010)	Bundesland x Bundesland (+ Ausland insges.)	ja (Bahn)	nein	ja
5.2A	NUTS 2-Regionen 2010, interne Daten für 5.2 und 5.1 (Sonderauswertung Stat. Bundesamt)	NUTS 2/Ausland	ja (Bahn)	nein	Aufgrund begrenzter Stichprobe der Erhebung nur eingeschränkte Zuverlässigkeit der Einzelwerte
5.3	Querschnittszählungen	Grenzabschnitte	ja (Bahn)	nein	internationaler Verkehr nach Strecken
5.4	Matrix 2010 der DB AG auf Basis hochgerechneter Fahrscheinverkäufe	NUTS 3, Ausland nach Regionen	ja (Bahn)	ja (ähnlich wie BVWP)	Geschäftsdaten der DB AG, Nutzung durch spezielle Datenvereinbarung mit DB AG eingeschränkt
6.	Luftverkehr				
6.1.	Luftrelationsstatistik (Stat. Bundesamt)	Flughafen - Flughafen	ja (Flugzeug)	nein	komplett
6.2	Fluggastbefragungen (Flughäfen)	Flughafen - NUTS 3	ja (Flugzeug)	ja (Geschäft/Privat)	fast alle Flughäfen
7.	MiD (Matrixauswertungen 2008)	mindestens Bundesland x Deutschland/Ausland	ja (alle)	ja	Stichprobe (nur deutsche Wohnbevölkerung)

Der Ablauf bei der Berücksichtigung der empirischen Matrixelemente ist folgender:

(a) Die Daten wurden hinsichtlich der Verkehrseinheit (z.B. Personen -> Personenfahrten, Reisen -> Personenfahrten), des zeitlichen Bezugs (z.B. Tag -> Jahr, Jahr 2008 -> Jahr 2010), der Fahrtweiten und Verkehrsmitteldefinitionen mit der **Systematik der vorliegenden Prognose** harmonisiert, wozu Umschlüsselungen und zum Teil Hochrechnungen erforderlich sind.

(b) Es erfolgte eine **Aggregation der Modellmatrix auf die jeweilige Struktur des empirischen Datenbausteins,** und zwar nach **Raumeinheiten** (z.B. Zusammenfassung der Verkehrszellen zu Raumordnungsregionen beim Datenbaustein Schienenpersonenverkehr), **Fahrtzweck** (z.B. ist die VDV-Statistik zum ÖSPV nicht nach Fahrtzwecken unterschieden) und **Verkehrsmitteln** (so ist z.B. die Pendlerstatistik nicht nach Verkehrsmitteln differenziert).

(c) Die jeweiligen **Aggregate der Modellmatrix** werden nun auf die **"Sollwerte" des empirischen Matrixbausteins hochgerechnet.** Zum Beispiel sind aus der Fremdenverkehrsstatistik Urlaubsgäste je deutschem Bundesland in den einzelnen österreichischen Bundesländern bekannt. Die entsprechenden Matrixaggregate aus der Modellmatrix für den Fahrtzweck Urlaub wurde infolgedessen auf diese Werte hochgerechnet. **Innerhalb der Aggregate**, hier über alle Quelle-Ziel-Relationen zwischen deutschen Bundesländern und österreichischen Bundesländern und über alle Verkehrsmittel kommt dann der **gleiche Hochrechnungsfaktor zu Geltung**.

(d) Da die Matrixelemente sich "überschneiden können", z.B. VDV-Statistik zum Öffentlichen Personenverkehr (keine Fahrtzwecke, aber Verkehrsmittel bekannt), mit der Pendlerstatistik (keine Verkehrsmittel, aber Fahrtzweck bekannt) oder Luftverkehrsstatistik mit der Tourismusstatistik, erfolgte eine **Rückkoppelung**, so dass sichergestellt war, dass durch Überlagerung der Hochrechnungsfaktoren je Matrixbaustein gemäß (c)) die Sollwerte der einzelnen Aggregate der empirischen Matrixelemente weiterhin, soweit möglich, eingehalten werden.

2.1.8 Marginalmodell

Die Ermittlung der in den Planfallvarianten zu erwartenden Änderungen bezüglich der künftigen Verkehrsströme erfolgt mithilfe eines sogenannten Marginalmodells. Das heißt, dass das künftige Verkehrsaufkommen in einer Planfallvariante (Fp) in einer Quelle-Ziel-Relation (qz) im Rahmen einer Funktion (f) berechnet wird aus dem Verkehrsaufkommen des Bezugsfalls (Fb) und der prognostizierten Veränderung der Verkehrsströme auf dieser Relation durch die Planfallvariante (∆qz):

Fpqz = f(Fbqz, ∆qz)

Somit wird die mit dem Modell ermittelte Veränderung des Verkehrsaufkommens auf die Nachfrage des Bezugsfalles aufgesetzt, da es nicht ungewöhnlich ist, dass das modelltheoretische Fahrtenaufkommen von den tatsächlichen, in der Ausgangsmatrix Analyse empirisch ermittelten Zahlen abweicht.

Die Prognose der Veränderungen der Verkehrsströme durch die Planfallvarianten wird dabei je Quelle-Ziel-Relation getrennt nach Verkehrsmitteln und Fahrtzwecken berechnet:

Dies geschieht dabei in einem **eigenen Algorithmus**, der additive Elemente (einrechnen der **absoluten** Differenz zwischen den Modellmatrizen Planfall und Bezugsfall) und multiplikative Elemente (einrechnen der **Verhältnisse** zwischen den Modellmatrizen Planfall und Bezugsfall) verknüpft (je Verkehrsmittel und Fahrtzweck und Relation).

(a) $$F_{ep'} = F_{ea} \bullet \frac{F_{mp}}{F_{ma}}$$

(b) $$F_{ep''} = F_{ea} + F_{mp} - F_{ma}$$

(c) $$F_{ep'''} = \frac{F_{ep'} + F_{ep''}}{2}$$

mit:

F_{ep} Fahrten Prognose (empirisch)

F_{ea} Fahrten Analyse (empirisch)

F_{mp} Fahrten Prognose (modelliert)

F_{ma} Fahrten Analyse (modelliert)

Dem Marginalmodell ist in den vorliegenden Prognosen **eindeutig der Vorzug** zu geben, und zwar **sowohl im Güter- wie im Personenverkehr**. Dies kann **inhaltlich,** aber auch **technisch** begründet werden:

- Die Analysematrix basiert soweit möglich auf **empirischen Verflechtungsdaten** (siehe oben). Dies gilt vor allem für den Güterverkehr (z.B. auf der Basis einer validen Stichprobenbefragung hochgerechnete Verkehrsverflechtungen), aber auch für einen Teil des Perso-

nenverkehrs (z.B. nahezu vollständig erfasste Pendlerdaten der BAA, Verkehrsströme im Luftverkehr anhand der Relationsstatistik und von Fluggastbefragungen, Bahnmatrix auf der Basis von Fahrscheinverkäufen mit Quelle-Ziel-Bezug usw.). Diese Matrizen bzw. Teile hiervon entsprechen der Realität mehr als Modellmatrizen, die zwar mit der Realität abgeglichen (kalibriert) werden, was aber aus praktischen Gründen nur auf einer mehr oder weniger aggregierten Ebene erfolgen kann. F_{aqz} im Marginalmodell ist also in der Regel **valider als** F_{aqz} **im Direktmodell**, was natürlich auch Auswirkungen auf die Qualität der Prognose F_{pqz} hat. Hier stellt sich in der Tat die grundsätzliche Frage der Sinnhaftigkeit von Modellierungen des Analysezustandes. Ein **Verkehrsmodell** stellt immer eine **Vereinfachung des tatsächlichen Geschehens** dar. Der Einsatz macht Sinn, wenn der Aufwand zur vollständigen Erfassung des tatsächlichen Geschehens nicht im Verhältnis zum Ziel der Untersuchung steht. Bei Quelle-Ziel-Matrizen mit Hunderttausenden von Verkehrsverbindungen und Segmenten ist deshalb der Einsatz von Modellen fast immer unverzichtbar. Trägt die Modellierung aber dazu bei, das tatsächliche Geschehen vereinfacht abzubilden, **obwohl ein wesentlich genauerer Kenntnisstand empirisch vorhanden ist**, ist an dieser Stelle die Modellierung fragwürdig.

- Im Modell können **gewachsene Strukturen**, die z.T. durch administrative, kulturelle oder sprachliche Grenzen, durch besondere Handelsbeziehungen, konzerninterne Abläufe usw. verursacht sind, nur schwer anhand der gängigen und erfassbaren Variablen erklärt werden. Gerade im Fernverkehr und im internationalen Verkehr führen rein modellbasiert ermittelte Matrizen zum Teil zu grob unplausiblen Ergebnissen.
- Um valide Ergebnisse im Analyseprozess zu erhalten, ist beim Direktmodell ein **hoher Modellierungs- und Kalibrierungsaufwand** zu betreiben. Erfahrungsgemäß ist der Zeitaufwand für Datenbasen, die mit Direktmodellen erstellt werden, extrem hoch. Dies kann in einigen, auf Direktmodellen basierten städtischen Verkehrsmodellen festgestellt werden, die aufgrund des begrenzten räumlichen Umgriffs und des im Nahverkehr bestehenden hohen Grads an regelmäßigen Fahrten im Vergleich zur vorliegenden Bundesprognose (bzw. deren Analyse) der Verkehrsverflechtungen noch relativ einfach sind. Bei nationalen Prognosen einschließlich internationalem und Transitverkehr ist dieses Problem noch größer. Entsprechend haben sich in solchen Fällen die Bearbeitungszeiten, wenn Direktmodelle eingesetzt werden, verlängert.
- Ein durchgängiges Verkehrsmodell ist nur für die **Verkehrsnachfrage der deutschen Wohnbevölkerung** anwendbar. Für den Incoming-Verkehr und den Durchgangsverkehr sind andere Schätzansätze erforderlich, weil die Empirik (z.B. MiD) nur für die deutsche Wohnbevölkerung verfügbar ist (bzw. mit geringem Aufwand verfügbar gemacht werden kann) und die Gesamtheit des Verkehrs der jeweiligen Länder oder der jeweiligen Region

gar nicht modelliert werden kann bzw. dies faktisch ein gesamteuropäisches Modell erfordern würde. So interessiert z.B. das französische Verkehrsgeschehen nur, insoweit Deutschland berührt wird, also der Verkehr Frankreich - Deutschland und der Durchgangsverkehr durch Deutschland.

- Der Prozess der Erstellung der Analyse- und Prognosematrix umfasste A**bgleichs- und Rückkoppelungsschritte**. Diese sind mit einem Direktmodell gar nicht oder nur mit hohem Aufwand durchführbar, weil die Rückkoppelungen Korrekturen verschiedener Matrixelemente in unterschiedlichem Maße betreffen.

Dennoch waren **Direktmodelle** auch im vorliegenden Los 3 unabdingbar, aber nicht vollständig, sondern im gezielt **spezifischen Einsatz**:

- **Zur Ermittlung der Δ_{qz} waren Direktmodelle (siehe oben stehende Formel) erforderlic**h, die auch ausreichend zu kalibrieren waren. Das heißt, die Ergebnisse der betreffenden Modellrechnungen wurden soweit als möglich mit empirischen Verflechtungsmatrizen abgeglichen. Der systemimmanente "Fehler" (Residuen) von Modellen wirkte sich hier jedoch deutlich geringer aus als beim direkten Einsatz dieser Modelle im Prognoseprozess. Deshalb müssen diese mit den in den Direktmodellen erzeugten Nachfragematrizen zwar im Aggregat, aber nicht im Detail mit den maßgebenden Nachfragematrizen übereinstimmen.
- Direktmodelle wurden als **Startgröße zur Abbildung und iterativen Validierung** des deutschen Binnenverkehrs im Analysezustand 2010 sowohl für die Fern-, als auch für die Nahverkehrsrelationen eingesetzt. Insbesondere im Personenverkehr war ein Großteil des Verkehrs mangels empirischer Verflechtungsdaten nur mit Direktmodellen zu bestimmen. Dies gilt für einen Großteil des MIV und des ÖSPV.
- Dort, wo empirische Matrixelemente vorhanden sind, stehen sie nicht in den hier verwandten feinräumlichen und sachlichen Gliederungen zur Verfügung. Sie waren deshalb zu disaggregieren, und zwar mit Hilfe der Modellmatrix. Das heißt, hier dienten die Modelle zur Ermittlung von **"Aufteilungsschlüsseln"** gröberer empirischer Matrixelemente wie z.B. die räumlich hoch differenzierten Pendlerstatistiken, die aber nicht nach Verkehrsmitteln differenziert sind oder räumliche Disaggregierung der Matrizen des Schienenpersonenverkehrs.

Voraussetzung für einen sinnvollen Einsatz eines Marginalmodells ist eine gute Kalibrierung der Modellmatrizen nicht nur nach Eckwerten sondern auch hinsichtlich der aus den empirischen Matrixbausteinen bekannten Strukturen.

2.1.9 Induzierter Verkehr

Allgemein ist von "induziertem Verkehr" dann zu sprechen, wenn durch den **Bau oder Ausbau der Verkehrsinfrastruktur** oder durch Veränderung des Verkehrsangebotes einschließlich der Nutzerkosten **ein Verkehrszuwachs** stattfindet, **der ohne diese Maßnahme nicht stattgefunden hätte**[23]. Umgekehrt spricht man bei Verkehrsabnahmen durch Verschlechterung der Verkehrsangebote von **"negativ induziertem Verkehr"**. "Induzierter Verkehr" kann folgende Effekte umfassen:

Primäre Effekte:

a) zusätzliche Fahrten zu neuen Zielen

b) häufigere Fahrten zu bestehenden Zielen

c) näher gelegene Ziele werden durch ferner gelegene Ziele ersetzt

Sekundäre Effekte

d) Standorte (z.B. Arbeitsplätze, Produktionsstätten, Freizeiteinrichtungen) werden an besser erreichbare Plätze verlagert oder es werden an gut erreichbaren Orten neue Standorte geschaffen.

a) und b) bezeichnen den **induziertem Verkehr im engeren Sinne**: Es entstehen mehr bzw. neue Fahrten. Bei c) entstehen keine neuen Fahrten, aber die Fahrtweite verändert sich aufgrund **veränderter Zielwahl**. Bei d) ändern sich die räumlichen Nutzungsstrukturen mit der Folge veränderter Verkehrsstrukturen. Entsteht bei letzterem mehr Verkehr bzw. mehr Verkehrsleistung, spricht man von **"sekundär induziertem Verkehr".** Ursache für den induzierten Verkehr sind in der verkehrswissenschaftlichen Theorie sinkende Raumwiderstände, so dass die Überwindung des Raumes erleichtert wird.

Relevant für die Verkehrsmodellierung sind a) bis c). Die Berücksichtigung des sekundär induzierten Verkehrs (d)) **ist in den Verkehrsprognosen nicht vorgesehen**. Eine **Rückkopplung zwischen Infrastruktur- bzw. Angebotsveränderungen und Strukturdaten** (z.B. regionale Wirtschaft, Einwohnerentwicklung) **findet in der Verkehrsprognose 2030 also nicht statt**.

Im **Güterverkehr** wird **kein induzierter Verkehr** in der hier verwendeten Definition (primär induzierter Verkehr) betrachtet. Dass Standortentscheidungen und die Arbeitsteilung der Wirt-

[23] Umweltbundesamt: Texte 26/04: Determinanten der Verkehrsentstehung, Dez. 2005

schaft auch von der verkehrlichen Erreichbarkeit der Standorte abhängen und insofern durch Änderungen der Verkehrsverhältnisse beeinflusst werden, ist unstrittig. Doch handelt es sich hier um "sekundär induzierte" Effekte, die sich folglich in den Strukturdaten, also außerhalb der in Los 3 modellierbaren Effekte, widerspiegeln müssten.

Hier kommt folgender Ansatz zum Einsatz:

$$R_{ind} = \frac{GK_a - GK_p}{\max(GK_p;GK_a)} * \min(R_p;R_a) * AR$$

mit

R_{ind}	Induzierter Verkehr, je Verkehrsmittel, Fahrtzweck und Relation ij
GK_p	Generalisierte Kosten Prognose
GK_a	Generalisierte Kosten zum Analysezeitpunkt bzw. im vorausgehenden Prognoseschritt
R_p	Reisen Prognose
R_a	Reisen Analyse bzw. im vorausgehenden Prognoseschritt
AR	Anteil der generalisierten Kosten an den Gesamtkosten für die Reise (je Fahrtzweck unterschiedlich)

Veränderte Verkehrswiderstände (hier: generalisierte Kosten) im Prognosejahr gegenüber dem Basisjahr führen zu einem veränderten Fahrtenaufkommen.

Berücksichtigt wird dabei je Fahrtzweck ein geschätzter durchschnittlicher Anteil der generalisierten Kosten für die Reise an den gesamten Kosten der mit der Reise beabsichtigten Aktivität. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass zum Beispiel eine geringe Reisezeitverbesserung nicht unbedingt zu entsprechend mehr Urlaubsreisen führen wird, da die Urlaubsreise insgesamt wesentlich länger dauert als die Fahrt vom und zum Urlaubsort.

Ein häufig, auch außerhalb Baden-Württembergs, erwähntes **Beispiel** für induzierte Verkehre ist die Autobahn A 81 zwischen **Stuttgart und Singen**, durch die nach der vollständigen Inbetriebnahme im Jahr 1978 die Reisezeit spürbar verkürzt wurde. Nimmt man (fiktiv) einen Rückgang der generalisierten Kosten um 25 % und für AR im Fahrtzweck Kurzreisen einen Anteil von 20 % an, dann errechnet sich gemäß obiger Formel ein Anstieg der Kurzreisen um 5 %.

2.2 Güterverkehr (Mikromodell)

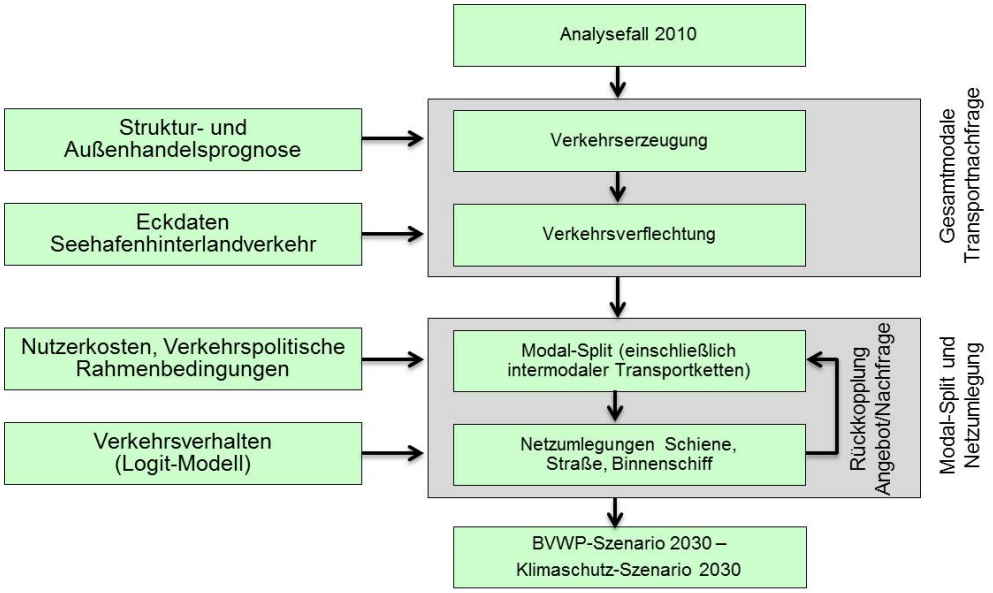
2.2.1 Generelle Vorgehensweise

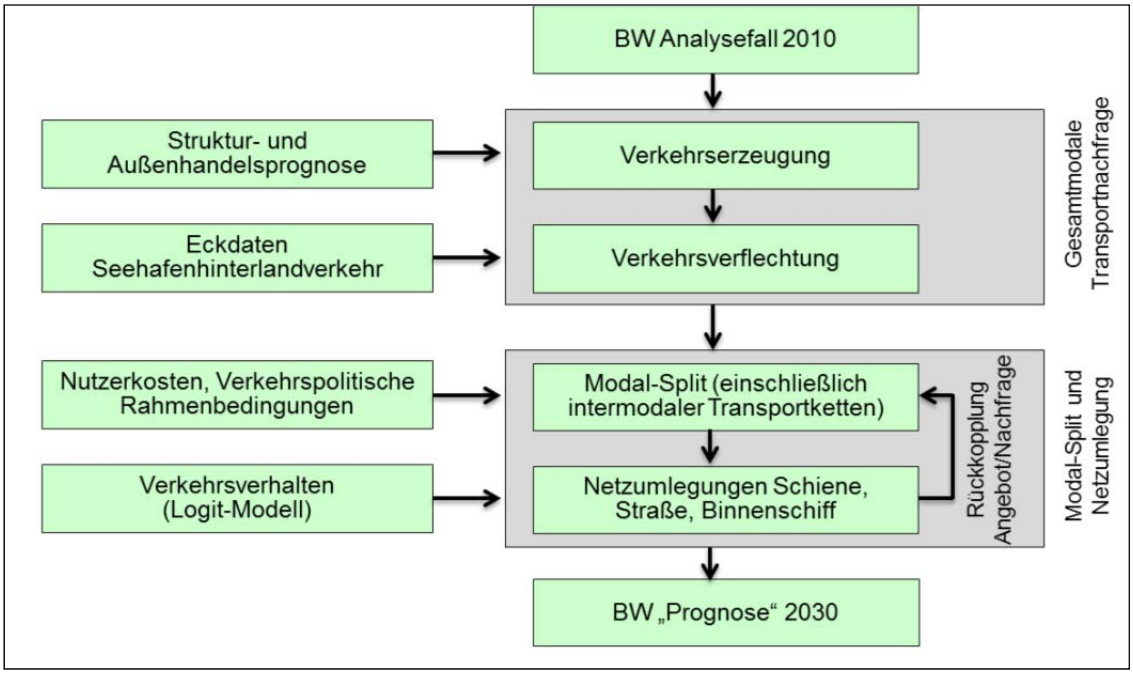
Das im Rahmen von Verkehrsverflechtungsprognosen eingesetzte Nachfragemodell für den Güterverkehr ist von TRIMODE (vormals BVU) entwickelt worden und berücksichtigt

- lokale und regionale Sondereinflüsse (Entwicklung von neuen Verkehren aufgrund Flächenentwicklungen, gesonderte Entwicklungen, wie z.B. durch Veränderungen des Energiemixes)
- Veränderungen wesentlicher Strukturdaten (z.B. Bevölkerung, BIP nach Branchen) für den Güterverkehr
- Entwicklungen des Außenhandels,
- des Seehafenhinterlandverkehrs und
- Rückkoppelungen mit der Infrastruktur (Engpässe).

Die generelle Vorgehensweise ist in Abb. 2-1 dargestellt.

Abb. 2-1: Struktur der Güterverkehrsprognose





Das Verkehrsnachfragemodell im Güterverkehr besteht aus den Teilen

a) Erstellen einer Analysematrix (hier für das Jahr 2010)

b) Verkehrserzeugung

c) Verkehrsverflechtung und

d) Verkehrsmittelwahl.

und wird als Marginalansatz auf einem vorher bestimmten Analysejahr angewendet.

2.2.2 Erstellen der Analysematrix "BW Analysefall 2010"

Anders als im Personenverkehr wird die Güterverkehrsmatrix des Analysejahres aufgrund des Vorhandenseins umfangreicher Istdaten, nicht modellhaft, sondern auf Basis statistischer Daten gewonnen. So liegen in Deutschland kreisspezifisch und im Ausland auf gröberer Ebene gütergruppenspezifische Verkehrsverflechtungsdaten für die Schiene und das Binnenschiff vor. Für die Straße liegen Verkehrsverflechtungen auf Länderebene und aus Datenschutzgründen gütergruppenspezifische Versand- und Empfangseckwerte auf Kreisbasis vor, welche die TRIMODE (vormals BVU) im Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 für das Jahr 2010 zu einer einheitlichen relations- und gütergruppenspezifischen Verkehrsverflechtungsmatrix verarbeitet hat. Deutsche Verkehre werden hierbei auf Kreisbasis dargestellt. Im Ausland sind die benachbarten Regionen ebenfalls auf Kreisbasis dargestellt, umso weiter weg die Auslandsregionen liegen, werden die Auslandsregionen auf NUTS 2 bzw. NUTS 1 Ebene aggregiert. Intermodale Transportketten im kombinierten Verkehr sind in dieser Matrix ebenfalls enthalten. Für die Gewinnung dieser intermodalen Ketten sind Informationen von allen KV-Terminals in Deutschland im Rahmen einer Befragung gesammelt worden.

Darüber hinaus ist aufgrund der unterschiedlichen Entwicklungstendenzen eine Abspaltung des Seehafenhinterlandverkehrs erfolgt, d.h. des Verkehrs, der direkt mit dem Umschlag in den bedeutenden Seehäfen verbunden ist.

Das Analysejahr liegt somit mit dem Datensatz des Jahres 2010 aus der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 vor, sodass dieses hier nicht neu aufgebaut werden muss und für den **BW Analysefall 2010** herangezogen wird. Diese Daten sind in der neuen NST2007 Gütergruppensystematik verfügbar.

2.2.3 Abschätzung der zukünftigen Verkehrsnachfrage

Das Güterverkehrsnachfragemodell von TRIMODE (vormals BVU) ermöglicht auf Basis von Strukturdatenveränderungen eine Abschätzung der Nachfrage in der Zukunft. Da das Modell im

Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 eingesetzt wurde, liegt es aktuell auch kalibriert vor.

Entscheidend für das Nachfragemodell ist bei der **Verkehrserzeugung** die Splittung der Güterverkehre in vier Segmente:

- **deutsche Binnenverkehre**: hierbei handelt es sich z.B. um Verkehre zwischen Stuttgart und Köln sowie zwischen Stuttgart und Mannheim
- **deutsche Außenhandelsverkehre**: Verkehre, die z.B. zwischen Baden-Württemberg und Frankreich durchgeführt werden (deutsche Ex- und Importe)
- **Transitverkehre durch Deutschland**: landseitige Verkehre zwischen Drittstaaten, die durch Deutschland führen, wie z.B. zwischen Frankreich und der Schweiz
- **Seehafenhinterlandverkehre**: Verkehr, der in Verbindung mit den Seehäfen steht, unabhängig davon, ob es deutscher Außenhandel oder Transitverkehr ist.

Durch die Übernahme der Güterverkehrsmatrizen des Analysejahres 2010 sowie des Prognosejahres 2030 aus der Verkehrsverflechtungsprognose ist diese Segmentierung sichergestellt. Intermodale Transportketten im kombinierten Verkehr sind in den Daten ebenfalls bereits berücksichtigt.

Im Rahmen der Prognose gibt es unterschiedliche Ansätze für den deutschen Binnenverkehr und für die anderen drei Segmente.

Prognose des deutschen Binnenverkehrs

Die Prognose der Versand- und Empfangsmengen der inländischen Verkehrszellen (**deutscher Binnenverkehr**) erfolgt auf Basis von gütergruppenspezifischen Wirkungszusammenhängen zwischen dem Versandaufkommen bzw. Empfangsaufkommen einerseits und verkehrserzeugenden bzw. verkehrsanziehenden Strukturdaten andererseits. Relevante Strukturdaten, die hierfür erforderlich sind, sind die Bevölkerung, die Erwerbstätigkeit, die reale Entwicklung des BIPs sowie die Entwicklung des BIPs nach Wirtschaftsbereichen. All die erforderlichen Daten werden im Rahmen dieser Studie bedarfsgerecht für Deutschland und im benachbarten Ausland auf Kreisbasis, im weiter entfernt liegenden Ausland auf gröberer Ebene, aufbereitet. Die Gütergruppendifferenzierung ergibt sich durch die Datenübernahme des Analysejahres aus der Verkehrsverflechtungsprognose.

Die Zusammenhänge zwischen den Strukturmerkmalen der Verkehrszellen und ihrem Verkehrsaufkommen werden mittels Regressionsfunktionen für das Analysejahr geschätzt. Sie sind

im Rahmen der Arbeiten zur BVWP 2015 entwickelt worden und können für die Zwecke dieser Studie ebenfalls genutzt werden.

Die Prognose der richtungsspezifischen Verkehrserzeugung (Empfangs- und Versandmengen) erfolgt modellbasiert mittels log-linearer Regressionen. Als abhängige Variablen fungieren in den Regressionen die gesamtmodalen Versand- und Empfangsmengen der Verkehrszellen (V/E) im Analysejahr. Über die Strukturdaten als unabhängige Variable wird dann versucht, diejenigen Strukturmerkmale zu identifizieren, welche je Gütergruppe verkehrserzeugend (Quellaufkommen) bzw. verkehrsanziehend (Zielaufkommen) wirken.

Funktional können die Wirkungszusammenhänge zwischen Versand-/Empfangsaufkommen und Strukturdaten wie folgt beschrieben werden:

$$V_{ig} = \alpha \bullet \prod_k (X_{ik})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)$$

$$E_{ig} = \alpha \bullet \prod_k (X_{ik})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)$$

mit:

i	Verkehrszelle
g	Gütergruppe (20 NST2007 Güterabteilungen)
V_{ig}	Versandaufkommen von Verkehrszelle i in der Gütergruppe g
E_{ig}	Empfangsaufkommen von Verkehrszelle i in der Gütergruppe g
X_{ik}	Verkehrserzeugende bzw. verkehrsanziehende Strukturmerkmale von Verkehrszelle i
Y_i	0/1-Variable zur Berücksichtigung von Niveauverschiebungen bei singulären Verkehrserzeugern, da sich bei solchen ein Teil des Transportaufkommens nicht aus der Wirtschaftsaktivität der Region, sondern lediglich aus der Funktion erklärt
α, βk, γ	Parameter der entwickelten Regressionsfunktionen

In Tab. 2-14 sind die in den Modellrechnungen als Erklärungsvariablen für das Verkehrsaufkommen definierten Strukturdaten dargestellt. Wie ersichtlich ist, werden im Modell sowohl Inputdaten der Soziodemographie als auch differenzierte Strukturdaten in Baden-Württemberg auf Kreisbasis berücksichtigt.

Wie bereits aufgeführt, erfolgt die Anwendung des Prognosenachfragemodells im Güterverkehr als Marginalansatz, d.h. durch Fortschreibung der Werte des vorliegenden Basis(Analyse)-

jahres 2010. Der Index A steht für die Werte des Analysejahres und der Index P für das Prognosejahr:

$$V_{ig}^{P} = V_{ig}^{A} \bullet \frac{\alpha \bullet \prod_{k} (X_{ik}^{P})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)}{\alpha \bullet \prod_{k} (X_{ik}^{A})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)} = V_{ig}^{A} \bullet \prod_{k} (\frac{X_{ik}^{P}}{X_{ik}^{A}})^{\beta_k}$$

$$E_{ig}^{P} = E_{ig}^{A} \bullet \frac{\alpha \bullet \prod_{k} (X_{ik}^{P})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)}{\alpha \bullet \prod_{k} (X_{ik}^{A})^{\beta_k} \bullet \exp(\gamma Y_i)} = E_{ig}^{A} \bullet \prod_{k} (\frac{X_{ik}^{P}}{X_{ik}^{A}})^{\beta_k}$$

Neben der modellmäßigen Verkehrserzeugung werden in den Verkehrszellen, in denen große singuläre Verkehrserzeuger und -verbraucher liegen, zusätzliche Informationen gesammelt und verarbeitet. Solche singulären Verkehrserzeuger sind Seehäfen, Flughäfen, große Binnenhäfen, KV-Terminals (auch in GVZ), Kraftwerke und große Industriestandorte (solche Industrieunternehmen sind z.B. Raffinerien (inkl. Mineralöl- und Chemische Verarbeitung), Eisen- und Stahlunternehmen sowie Automobilunternehmen). Bei den Kraftwerken werden nur Stein- und Braunkohlekraftwerke betrachtet. Aufgrund des überproportional hohen Verkehrsaufkommens, welches mit diesen Verkehrspunkten verbunden ist, wurden diese im Rahmen der Prognosearbeiten zur Verkehrsverflechtungsprognose analysiert und einer gesonderten Behandlung unterzogen. In den KV-Terminals und den öffentlichen Binnenhäfen sind im Rahmen der Arbeiten zur Verkehrsverflechtungsprognose umfangreiche Befragungen umgesetzt worden, darüber hinaus wurden aktuelle unternehmensspezifische Entwicklungen wie Unternehmensplanungen, Betriebsschließungen, Produktionsverlagerungen etc. aus einer kontinuierlichen Sichtung von Pressemeldungen erfasst. Eine ausführliche Darstellung zur Berücksichtigung der singulären Verkehrserzeuger findet sich in der Anlage.

Tab. 2-14: Identifizierte Erklärungsfaktoren des Güterverkehrsaufkommens

Gütergruppe		Quellaufkommen (verkehrserzeugend)	Zielaufkommen (verkehrsanziehend)
010	Land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse	BIP Landwirtschaft	BIP Nahrungs- und Genussmittel, BIP Landwirtschaft
021	Steinkohle	BIP Kohle, Steinkohleabbau	Dummy Steinkohlekraftwerk BIP Energie / Wasserversorgung
022	Braunkohle	Braunkohleabbau, BIP Kohle	Dummy Braunkohlekraftwerk, Bevölkerung
023	Erdöl und Erdgas	BIP Energie / Wasserversorgung, Dummy Raffinerie	Bevölkerung, Dummy Raffinerie
031	Erze	BIP Metalle	Binnenhafen, Dummy Stahlwerk
032	Düngemittel	BIP Landwirtschaft, BIP Erdöl / Erdgas	BIP Landwirtschaft
033	Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	BIP Bau, BIP Steine / Erden	BIP Bau, BIP Steine / Erden
040	Nahrungs- und Genussmittel	BIP Nahrungs- und Genussmittel	Bevölkerung, BIP Nahrungs- und Genussmittel
050	Textilien, Bekleidung, Leder, Lederwaren	BIP Produzierendes Gewerbe	BIP Gesamt, BIP Textilien
060	Holz und Kork, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse	BIP Holzwaren	BIP Holzwaren, Bevölkerung
071	Koks	BIP Kohle	BIP Kohle, BIP Kokerei / Mineralöl
072	Mineralölerzeugnisse	BIP Kokerei / Mineralöl, Dummy Raffinerie	Bevölkerung
080	Chemische Erzeugnisse	BIP Chemie	Bevölkerung, BIP Chemie
090	Sonstige Mineralerzeugnisse	BIP Bau, BIP Glas / Keramik	BIP Bau
100	Metalle und Halbzeug	BIP Metalle	BIP Metalle
110	Maschinen und Geräte, optische Erzeugnisse, Uhren	BIP Produzierendes Gewerbe	BIP Produzierendes Gewerbe
120	Fahrzeuge	BIP Produzierendes Gewerbe Dummy Fahrzeugproduktion	BIP Produzierendes Gewerbe
130	Möbel, Schmuck, Musikindustrie, Sport, Spiel	BIP Produzierendes Gewerbe	BIP Produzierendes Gewerbe
140	Sekundärrohstoffe, Abfälle	Bevölkerung, BIP Recycling	Bevölkerung, BIP Recycling
150	Post, Pakete	BIP Verkehr	BIP Verkehr
160	Geräte und Material für Güterbeförderung	Abhängig vom KV-Aufkommen	Abhängig vom KV-Aufkommen
170	Umzugsgut, sonstige nichtmarktbestimmte Güter	BIP Gesamt	BIP Gesamt
180	Sammelgut	BIP Gesamt	BIP Gesamt
190	Gutart unbekannt	BIP Gesamt	BIP Gesamt
200	Sonstige Güter a. n. g.	kein Modell; da kein Aufkommen	kein Modell; da kein Aufkommen

In der **Kalibrierung des Erzeugungsmodells** können die identifizierten Unternehmen als Eigenschaft der Verkehrszellen in die Regressionsgleichungen mit einfließen und somit die Modellgüte verbessern. Um den Einfluss im Inland abbilden zu können, wurden diese über **Dummy-Variablen** zu den Ausgangsdaten hinzugefügt. Die Dummy-Variablen (0/1) wurden je nach Vorkommen der folgenden Verkehrserzeuger in den entsprechenden Verkehrszellen für die Regressionen gesetzt und genutzt.

Nach erfolgter Verkehrsverteilung wurde für die Kreise, in denen solche singulären Verkehrserzeuger identifiziert wurden, die prognostizierte Entwicklung der Verkehrsvolumina auf Sinnhaftigkeit und Plausibilität gemäß den in der Strukturdatenprognose für die Branche dargestellten Entwicklungen sowie entsprechend der im Folgenden dargestellten Ansätze überprüft und ggfs. angepasst.

Die so abgeschätzte gesamtmodale Verkehrsmengenentwicklung wurde mit gütergruppenspezifischen Zeitreihen der Entwicklung der gesamtmodalen Verkehrsmenge zwischen 1997 und 2010 vergleichen und nach einem Langfristvergleich mit der Entwicklung der relevanten Strukturdaten abgestimmt.

Nach Durchführung dieser Schritte ergibt sich das in Tab. 2-15 dargestellte Wachstum desdeutschen Binnenverkehrs zwischen 2010 und 2030.

Tab. 2-15: Entwicklung des deutschen gesamtmodalen Binnenverkehrs zwischen 2010 und 2030 in 1.000 t

Gütergruppe		Aufkommen 2010	Aufkommen 2030	Wachstum 2010-2030 in %
010	Land- und forstwirtschaftliche Erzeugnisse	155.713	176.191	13,15
021	Steinkohle	29.188	12.832	-56,04
022	Braunkohle	12.451	7.693	-38,22
023	Erdöl und Erdgas	1.630	979	-39,94
031	Erze	15.826	16.594	4,86
032	Düngemittel	5.601	6.100	8,91
033	Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	867.640	899.438	3,66
040	Nahrungs- und Genussmittel	279.687	334.502	19,60
050	Textilien, Bekleidung, Leder, Lederwaren	10.600	13.749	29,71
060	Holz und Kork, Papier, Pappe, Druckerzeugnisse	112.220	132.245	17,84
071	Koks	10.243	3.040	-70,32
072	Mineralölerzeugnisse	128.104	106.200	-17,10
080	Chemische Erzeugnisse	136.162	153.328	12,61
090	Sonstige Mineralerzeugnisse	280.012	303.587	8,42
100	Metalle und Halbzeug	167.879	189.656	12,97
110	Maschinen und Geräte, optische Erzeugnisse, Uhren	47.932	58.853	22,78
120	Fahrzeuge	68.599	87.389	27,39
130	Möbel, Schmuck, Musikindustrie, Sport, Spiel	12.000	14.055	17,13
140	Sekundärrohstoffe, Abfälle	251.616	256.984	2,13
150	Post, Pakete	29.928	35.692	19,26
160	Geräte und Material für Güterbeförderung	68.553	86.373	25,99
170	Umzugsgut, sonstige nichtmarktbestimmte Güter	32.889	40.059	21,80
180	Sammelgut	83.946	104.727	24,75
190	Gutart unbekannt	46.115	67.635	46,67
200	Sonstige Güter a. n. g.	0	0	0

Nach Abschätzung des regionalisierten Versand- und Empfangsaufkommens der inländischen Verkehrszellen werden die **Verkehrsverflechtungen** gütergruppenspezifisch durch Anwendung eines Gravitationsmodells bestimmt.

Die Nachfrage auf einer Quelle-Ziel-Relation hängt dabei ab von

- dem Versandaufkommen der Quellverkehrszelle,
- dem Empfangsaufkommen der Zielverkehrszelle,
- sowie der Verbindungsqualität[24] zwischen Quell- und Zielverkehrszelle.

Die Summation über alle inländischen Verkehrszellen i liefert jeweils den gesamten Binnenverkehr in der Gütergruppe g, wobei für den Prognosehorizont (hier: 2030) die Summen aus Versand und Empfang nicht notwendigerweise übereinstimmen müssen. Da sich erfahrungsgemäß das Versandaufkommen besser prognostizieren lässt als das Empfangsaufkommen, wird das prognostizierte Versandaufkommen "festgehalten", das Empfangsaufkommen dient dann der Zielwahl im Verflechtungsmodell. Funktional kann das Gravitationsmodell damit wie folgt beschrieben werden:

$$T_{ijg} = V_{ig} \bullet E_{jg} \bullet \exp(\gamma_g N_{ijg}) \bullet \alpha_{ijg} \bullet \beta_{ig}$$

$$T_{ijg} = V_{ig} \bullet E_{jg} \bullet \exp(\gamma_g N_{ijg}) \bullet \alpha_{ijg} \bullet \beta_{jg}$$

mit:

i	Quellverkehrszelle
j	Zielverkehrszelle
g	Gütergruppe
T_{ijg}	Aufkommen von Zelle i nach Zelle j in der Gütergruppe g im Prognosejahr 2030
V_{ig}	Versandaufkommen von Verkehrszelle i in der Gütergruppe g im Prognosejahr 2030 (aus der Verkehrserzeugung)
Eig	Empfangsaufkommen von Verkehrszelle i in der Gütergruppe g im Prognosejahr 2030 (aus der Verkehrserzeugung)
N_{ijg}	Verbindungsqualität zwischen Quell- und Zielverkehrszelle
α_{ijg}	Parameter zur Anpassung des Modells an die Werte des Analysejahres 2010
β_{ig}, β_{jg}	Parameter zur Anpassung der Randsummen an V_{ig} bzw. E_{jg}
γ_g	Gütergruppen-spezifischer Parameter

Im ersten Fall wird das Versandaufkommen Vig, im zweiten Fall das Empfangsaufkommen Ejg "festgehalten". Die Parameter βig und βjg können wie folgt berechnet werden:

[24] Das Inverse der Verbindungsqualität stellt den (Raum-)Widerstand dar. Dieser ergibt sich aus der Summe der generierten Nutzen, die im Rahmen des Verkehrsmittelwahlmodelles ermittelt werden.

$$\beta_{ig} = \frac{1}{\sum_j E_{jg} \bullet \exp(\gamma_g N_{ijg}) \bullet \alpha_{ijg}}$$

$$\beta_{jg} = \frac{1}{\sum_i V_{ig} \bullet \exp(\gamma_g N_{ijg}) \bullet \alpha_{ijg}}$$

Es gilt dann gerade $\sum_j T_{ijg} = V_{ig}$ bzw. $\sum_i T_{ijg} = E_{jg}$.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt durch die Bestimmung der Parameter αijg derart, dass durch Einsetzen der Werte des Analysejahres 2010 (Versand- und Empfangsvolumina) gerade die Verkehrsverflechtungen des Analysejahres reproduziert werden[25]. Der gütergruppenspezifische Parameter γg beeinflusst die Sensitivität der Nachfrage auf Änderungen der Verbindungsqualität.

Prognose des deutschen Außenhandelsverkehrs, des Transitverkehrs und der Seehafenhinterlandverkehre

Bei den restlichen Verkehren handelt es sich um Außenhandelsverkehre. In Rahmen der hier zu erstellenden Arbeiten werden relations- und gütergruppenspezifische Wachstumsentwicklungen zwischen 2010 und 2030 herausgearbeitet, die direkt auf die Verkehrsmengen des Analysejahres 2010 bezogen werden können.

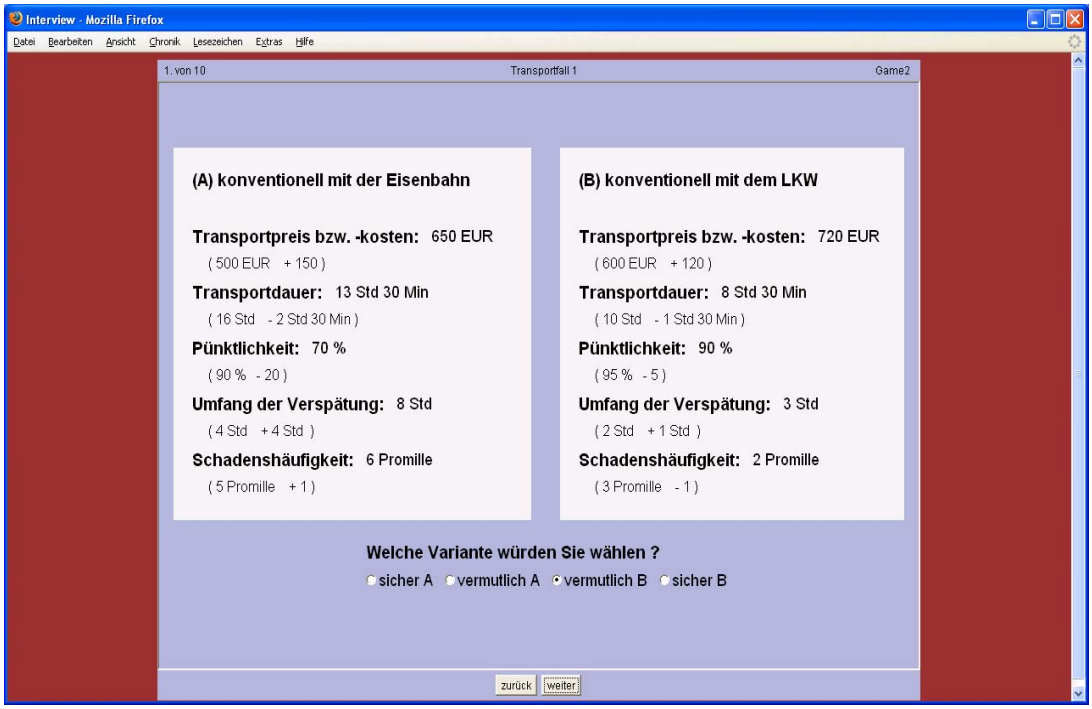
2.2.4 Verkehrsmittelwahl

Aufgabe der Simulation der **Verkehrsmittelwahl** ist sowohl die Abschätzung der modalen Reaktionen der Verlader auf sich ändernde Rahmenbedingungen im Verkehrsmarkt als auch die Aufteilung der ermittelten relations- und gütergruppenspezifischen gesamtmodalen Transportnachfrage (Verkehrsaufkommen aller Verkehrsträger) auf die einzelnen Transportalternativen (Verkehrsträger). Neben den unimodalen Verkehren mit Lkw, Bahn und Binnenschiff werden auch die intermodalen Transportketten als Transportalternativen behandelt.

25 Dieser Schritt ist bereits im Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose erfolgt.

Die Simulation der Verkehrsmittelwahl erfolgt durch Anwendung eines **disaggregierten**, d.h. auf Basis von Einzelentscheidungen kalibrierten **Verhaltensmodells**, das die Verkehrsmittelwahlentscheidungen der Verlader als Funktion der Angebotseigenschaften der Transportalternativen abbildet. Die Entwicklung eines solchen disaggregierten Verhaltensmodells (Modal-Split-Modell) wurde Anfang der 90er-Jahre begonnen, das Modell wurde seither ständig weiterentwickelt und die empirische Datenbasis aktualisiert. Das Modell basiert auf einer Vielzahl von computergestützten Interviews in Betrieben der Bundesrepublik Deutschland, wobei in jedem Interview zwei komplette Transportfälle (**Revealed Preferences**) und zusätzlich zu jedem tatsächlich durchgeführten Transportfall eine Reihe simulierter Verkehrsmittelwahlentscheidungen (**Stated Preferences**) abgefragt wurden Abb. 2-2 zeigt das Beispiel einer solchen Simulation, wie sie in der aktuellsten Befragung für ein unveröffentlichtes Projekt angewendet wurde. Die letzte Aktualisierung des Modells erfolgte in 2008/2009.[26]

Abb. 2-2: Simulation der Verkehrsmittelwahl (Stated Preferences)



26 Zwischenzeitlich liegt eine komplette Neuauflage des Verkehrsmittelwahlmodells im Güterverkehr vor (siehe BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH, TNS Infratest GmbH, IWW Karlsruhe, Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung, laufendes Forschungsvorhaben im Auftrag des BMVI, FE-Nr. 96.1002/2012, Vorläufiger Endbericht, Freiburg-München 2014). Da dies jedoch im Wesentlichen in den Verhaltensfunktionen von dem in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 benutzten abweicht, wird es hier nicht eingesetzt.

Bei dem Verkehrsmittelwahlmodell handelt es sich um ein **hierarchisches Logit-Modell**, das

- nach **zusammengefassten Gütergruppen segmentiert** ist (es werden fünf Segmente unterschieden 1) Landwirtschaftliche Erzeugnisse und Nahrungs- und Futtermittel, 2) Rohöl und Mineralölerzeugnisse, 3) Eisen, Stahl, Steine, Erden, Chemie, Kohle, Erze, 4) Halb-. und Fertigprodukte, Investitions- und Verbrauchsgüter, 5) Partiegrößen über 100 t)
- bei der Verkehrsmittelwahl **die Einflussgrößen**
  - Transportpreis(-kosten),
  - Transportzeit,
  - und **Pünktlichkeiten** berücksichtigt
- **nicht-lineare Transformationen der Einflussgrößen** Preise und Zeiten beinhaltet (Box-Cox-Transformation)[27].

Grundlage des Logit-Modells ist die Annahme, dass die Entscheider jeder möglichen Alternative einen bestimmten Nutzen beimessen und in der Entscheidungsfindung dann genau diejenige Alternative mit dem größten Nutzen gewählt wird. Für die Nutzen gilt dabei:

$$N_t = \alpha_t + \beta_1 x_{t,1} + \beta_2 x_{t,2} + ... + \beta_k x_{t,k} + \varepsilon_t$$

mit:

t	Transportalternative
N_t	Nutzen von Alternative t
α_t	Konstante für Alternative t (Alternative Specific Constant)
k	Anzahl der Angebotseigenschaften
$\beta_1, ..., \beta_k$	Gewichtungsparameter
$X_{t,1}, ..., x_{t,k}$	Angebotseigenschaften von Alternative t
ε_t	Fehlerterm (Zufallsvariable). Dieser misst den Einfluss individueller Besonderheiten und/oder nicht beobachteter bzw. nicht beobachtbarer Eigenschaften.

Der **Nutzen einer Alternative** berechnet sich also als Linearkombination von erklärenden Angebotseigenschaften zuzüglich einer Konstanten sowie einer zufälligen, nicht klar vorhersehbaren bzw. bestimmbaren Komponente. Unter der Annahme, dass die Zufallskomponenten ε_t unabhängig und identisch verteilt sind und diese Verteilung der sog. **Weibull-Verteilung** entspricht, ermittelt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit p_t von Alternative t dann wie folgt:

[27] Transportpreise und Transportzeiten werden wie folgt transformiert: $x \rightarrow (x^{\lambda} - 1)/\lambda$ $(0 \leq \lambda \leq 1)$. Durch die Box-Cox-Transformation kann auf eine Segmentierung des Modells nach Entfernungsklassen verzichtet werden.

$$p_t = \frac{\exp(N_t)}{\sum_s \exp(N_s)}$$

Aus dem Verhaltensmodell (Logit-Modell) können **direkte Elastizitäten** und **Kreuzelastizitäten** abgeleitet werden, welche die Reaktion der Transportnachfrage auf eine Veränderung der Angebotseigenschaften abbilden. Dabei gibt die direkte Elastizität ε_{tl} die zu erwartende prozentuale Änderung der Nachfrage des Transportmittels t an, falls sich - unter Beibehaltung aller übrigen Einflussgrößen - der Wert der Größe x_{tl} um 1% erhöht. Für das Logit-Modell gilt:

$$\varepsilon_{tl} = \beta_l \bullet x_{tl} \bullet (1 - p_t)$$

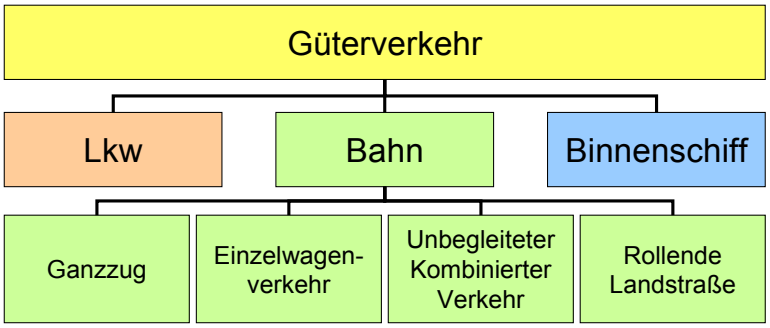
Die direkten Elastizitäten und damit die relativen Nachfragewirkungen sind also proportional zum Gewichtungsparameter β_l, der Höhe x_{tl} der Angebotseigenschaft sowie dem Marktanteil $(1-p_t)$ der übrigen Transportalternativen.

Das Logit-Modell hat darüber hinaus die Eigenschaft **konstanter Kreuzelastizitäten**, d.h. Nachfrageänderungen einer Alternative wirken sich stets proportional zu den bestehenden Marktanteilen auf die übrigen Alternativen aus. Diese Eigenschaft lässt sich durch die Formulierung hierarchischer Modelle (**Nested Logit**) vermeiden. Hierbei werden zusammengesetzte Alternativen eingeführt, die einen zusätzlichen Schätzparameter 0 < theta < 1 mit Nutzen

$$N = theta \bullet \log(\sum_t \exp(N_t))$$

erhalten. Die Kreuzelastizitäten sind innerhalb einer hierarchischen Gruppe nach wie vor identisch, Kreuzelastizitäten zu Alternativen außerhalb der hierarchischen Gruppe sind jedoch um den Faktor theta verringert. Die hierarchische Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells ist in Abb. 2-3 dargestellt.

Abb. 2-3: Hierarchische Struktur des Verkehrsmittelwahlmodells



Die im Modal-Split-Modell ermittelten Nutzen der Transportalternativen spielen insofern auch im Aufkommensmodell eine Rolle, als sie dort in der regionalen Verteilung im Gravitationsmodell in Form verallgemeinerter Nutzen enthalten sind. Auf diese Weise werden schon in der regionalen Verflechtung der Verkehrsströme Änderungen der Angebotseigenschaften mit berücksichtigt.

Berechnung des Modal-Splits

Die Berechnung des **Modal-Splits** erfolgt getrennt für **jede Quelle-Ziel-Relation** und **Gütergruppe** anhand der aus den Nutzen abgeleiteten Auswahlwahrscheinlichkeiten:

$$T_{ijgt} = T_{ijg} \bullet \frac{\exp(N_t)}{\sum_s \exp(N_s)}$$

mit:

i	Quellverkehrszelle
j	Zielverkehrszelle
g	Gütergruppe
t	Transportalternative
T_{ijgt}	Aufkommen von Zelle i nach Zelle j in der Gütergruppe g im Prognosejahr 2030 mit Transportalternative t
T_{ijg}	Gesamtmodales Transportaufkommen von Zelle i nach Zelle j in der Gütergruppe g im Prognosejahr 2030 (aus der Verkehrsverflechtung)
N_t, N_s	Nutzen von Transportalternative t bzw. s

Für die Berechnung des Modal-Splits sind zunächst alle möglichen Transportalternativen zu ermitteln. Dies beinhaltet sowohl **unimodale** als auch **intermodale Alternativen** und schließt im Vergleich zum Analysezustand 2010 auch neue Verkehre, z.B. neue Angebote im kombinierten Verkehr, mit ein.

Anschließend sind für jede Transportalternative die Angebotseigenschaften sowohl für 2010 als auch für 2030 zu berechnen.

- **Transportpreise Haus-Haus:**
  Die Haus-Haus Transportpreise (inklusive der Preise intermodaler Ketten) erfolgt auf Basis von aktualisierten Kostenmodellen. Wesentlicher Input sind die aus den Netzumlegungen Straße, Schiene und Binnenschiff resultierenden Transportweiten bzw. Kostenkomponenten (z.B. Trassenpreise). Ggf. sind, wie bei den intermodalen Transportketten, zusätzlich durchschnittliche Be- und Entladekosten zu berücksichtigen.

- **Transportzeiten Haus-Haus:**
  Wesentlicher Input sind die aus den Netzumlegungen Straße, Schiene und Binnenschiff resultierenden Transportzeiten. Ggf. sind wie z.B. bei intermodalen zusätzlich durchschnittliche Be- und Entladezeiten zu berücksichtigen.

- **Pünktlichkeiten:**
  Die **Pünktlichkeit** wird als relative Häufigkeit der Verkehre angesehen, die innerhalb der von den Verladern verlangten Zeitfenster inklusive Pufferzeiten ankommen. Die Pünktlichkeit wird in Prozent angegeben.

  Für das Verkehrsmittelwahlmodell werden folgende verkehrsträgerspezifische Werte für 2010 und 2030 angesetzt. Die Istwerte für das Jahr 2010 stammen aus Befragungen ab. Für die Prognose wurde nur für die Bahn eine Pünktlichkeitsverbesserung von 5 % angenommen; die Werte für Straße und Binnenschiff wurden konstant gehalten[28].

  Während bei der Binnenschifffahrt eine Unpünktlichkeit nur durch Havarien, Naturbedingungen (Unwetter, Trocken- und Hochwasserperioden) und kurzfristig auftretenden Ausfällen der Infrastruktur anfällt und somit vom Ausmaß der Infrastruktur unabhängig ist, ist die Annahme einer konstanten Pünktlichkeit bei der Straße durch den Umfang der geplanten Ausbaumaßnahmen gerechtfertigt.

Tab. 2-16: Verkehrsträgerbezogene Pünktlichkeitswerte in Prozent

Verkehrsträger/Jahr	2010	2030
Bahn konventionell	85 %	90 %
Bahn KV	90 %	95 %

[28] Straße und Binnenschifffahrt weisen bereits sehr hohe Pünktlichkeitswerte auf. Bei der Binnenschifffahrt ist eine Unpünktlichkeit aufgrund fehlender Überlastungen mit Ausnahme von Sondereinflüssen nicht beobachtbar. Angesichts der hohen Pufferzeiten die bei der Durchführung eines Straßentransportes berücksichtigt werden und der angenommenen Netzverbesserung im Prognosejahr ist eine Verschlechterung der Pünktlichkeitssituation im Prognosezustand nicht zu rechtfertigen.

Straße	97 %	97 %
Binnenschiff (konventionell und KV)	95 %	95 %

Die verkehrsträgerspezifischen Angebotseigenschaften werden durch Netzumlegung auf die Netzmodelle der Straße, Bahn und Binnenschiff ermittelt und in das Verkehrsmittelwahlmodell eingepflegt. Hierzu sind detaillierte Schnittstellen erarbeitet worden.

Bei intermodalen Transportalternativen sind die Angebotseigenschaften der Hauptläufe mit Bahn und Binnenschiff sowie der Vor- und Nachläufe mit dem Lkw zu kombinieren und um Umschlagszeiten sowie Umschlagskosten zu ergänzen.

Darüber hinaus wurde nach Erstellung der modalen Entwicklung die Prognose des Bahn- und Binnenschiffsverkehrsaufkommens mit der Entwicklung zwischen 2010 und 2011 bzw. teilweise 2012 abgestimmt.

2.2.5 Rückkoppelung zur Verkehrsinfrastruktur

Nach den oben dargestellten Schritten liegen für das Prognosejahr 2030 relations- und gütergruppenspezifische Aufkommens- und Transportleistungswerte nach Verkehrsträgern vor[29]. Anschließend findet eine Rückkoppelung zwischen Nachfrageermittlung und Verkehrsumlegung für die **Prognoseszenarien 2030** statt. Hierbei wird überprüft, ob die prognostizierten Verkehrsmengen von der angenommenen Verkehrsinfrastruktur bewältigt werden können bzw. zur Herstellung eines Gleichgewichts zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage.

Hierzu werden mit Hilfe der verkehrsträgerspezifischen Umlegungsmodelle **"initiale Widerstände"** (Fahrzeiten, Fahrtentfernung, Kosten) berechnet. Diese liegen bereits aus der Verkehrsverflechtungsprognose für das Analysejahr 2010 und für die Prognose 2030 vor. Die Nachfrageermittlung in den Szenarien erfolgt in einem ersten Schritt auf Basis der Widerstände aus der BVWP Verkehrsverflechtungsprognose 2030. Die im ersten Schritt so ermittelten **vorläufigen Prognosematrizen** werden gemeinsam (sowohl Personen- als auch Güterverkehr) auf die Netzmodelle der Szenarien umgelegt und dabei die **Verkehrsqualität lastabhängig neu ermittelt**. Daraus ergaben sich in vielen Fällen, d.h. auf vielen Quelle-Ziel-Relationen,

29 Für das Jahr 2010 liegen sie aus den Istdaten vor.

neue Widerstände, die sich von den "anfänglichen initialen Widerständen" unterscheiden. Mit diesen neuen Widerständen wird ein erneuter Prognoselauf durchgeführt, der eine andere Verkehrsmittelwahl bzw. ein anderes Verkehrsaufkommen auf den betroffenen Quelle-Ziel-Relationen ergibt. Durch gegebenenfalls mehrmaliges Wiederholen dieses Prozesses kann ein **Gleichgewicht zwischen Nachfragemodell und Umlegungsmodell bzw. den Restriktionen aus der Verkehrsinfrastruktur** hergestellt werden.

2.3 Makromodell

Die Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen ist eine **Prognose auf der Basis von Quelle-Ziel-Relationen**, die einzeln für den Istzustand 2010 erfasst und auf 2030 unter Berücksichtigung der feinräumigen Entwicklung der sozioökonomischen und soziodemographischen Daten an den Quellen und den Zielen und der Entwicklung der Verkehrsangebote sowie der Nutzerkosten zwischen den Quellen und den Zielen hochgerechnet wurden. Das **Prognoseergebnis ist eine Quelle-Ziel-Matrix**, die auch für weiterführende Arbeiten (Verkehrsumlegungen, Projektbewertungen) zur Verfügung steht. Durch Aggregation der einzelnen Quelle-Ziel-Verkehrsströme lassen sich Ergebnisse auch für den deutschen Verkehr insgesamt sowie für Baden-Württemberg ableiten. Das Vorgehen ist auch für das vorliegende Klimaschutz-Szenario geplant.

Zur Absicherung dieser aus einer Vielzahl von Einzeldaten bestehenden **"Mikroprognose"** wurde in der BVWP-Prognose zusätzlich eine **"Makroprognose"** erstellt.

Die **Makroprognose** wurde in der Aggregation der Bundesrepublik Deutschland ohne räumliche Differenzierung vorgenommen. Ihr Schwerpunkt liegt auf der differenzierten Analyse der maßgeblichen sozioökonomischen Einflussgrößen sowie des langjährigen bisherigen Verlaufs dieser Einflussgrößen, der Verkehrsentwicklung und des Zusammenhangs zwischen ihnen. Auch im vorliegenden Falle wird parallel zur Berechnung der Mikroprognose für das Klimaschutz-Szenario eine Makroprognose durchgeführt.

Für die Makroprognose des **Personenverkehrs** ist die **fahrtzweckspezifische Disaggregation** des Personenverkehrs ein unerlässliches Hilfsmittel. Dabei wird nach den Fahrtzwecken

- Beruf
- Ausbildung
- Geschäft
- Einkauf
- Privat und
- Urlaub

differenziert. Durch diese Disaggregation nach Fahrtzwecken wird der Personenverkehr in Gruppen zerlegt, die **homogener** sind als der Gesamtverkehr. Dadurch wiederum lassen sich die Einflüsse der demographischen und gesamtwirtschaftlichen **Leitdaten** (Einwohner, Erwerbstätige, Auszubildende) wesentlich **exakter quantifizieren** als bei einer Gesamtbetrachtung. So ist z.B. die Zahl der Erwerbstätigen für die Erklärung des gesamten Personenverkehrs

nicht signifikant, wohl aber für die des Berufsverkehrs. Auch die Effekte **anderer Einflussfaktoren** können in der fahrtzweckspezifischen Segmentierung genauer quantifiziert werden. So führt z.B. ein Kraftstoffpreisanstieg im Berufsverkehr lediglich zu modalen Verlagerungen, im Freizeitverkehr dagegen auch zu einem Rückgang des gesamtmodalen Verkehrs.

Zunächst wird pro Fahrtzweck das **gesamtmodale Aufkommen** prognostiziert. Dabei gehen **zunächst** die jeweiligen Nachfragepotentiale (Einwohner, Erwerbstätige, Auszubildende) und die gesamtwirtschaftlichen Einflussgrößen (in der Regel die verfügbaren Einkommen bzw. die privaten Konsumausgaben) ein. Konkret werden die Fahrtenhäufigkeiten, d.h. die Zahl der pro Person zurückgelegten Fahrten, zum einen über **Trendanalysen** und zum anderen über Regressionen mit den genannten **Einflussfaktoren** bestimmt. Die gesamtmodale **Leistung** wird über die Fahrtweiten der einzelnen Fahrtzwecke ermittelt.

Anschließend wird der (aufkommens- und leistungsbezogene) **Modal-Split** prognostiziert. Hier gehen die

- wirtschaftlichen (Einkommen),
- angebotsseitigen (Pkw-Bestand sowie ggfs., d.h. falls in der deutschlandweiten Nachfrage spürbare, Veränderungen der Angebots der anderen Verkehrsarten),
- preislichen (Nutzerkosten)
- und ggfs. administrativen (erneut soweit deutschlandweit spürbar, z.B. (fiktiv) eine Herabsetzung des Mindestalters für den Führerscheinerwerb)

Einflussfaktoren ein. Sie alle besitzen in den einzelnen Fahrtzwecken eine weit unterschiedlich große Bedeutung. Insbesondere für den Einfluss der angebotsseitigen und der administrativen Faktoren gilt allerdings, dass sie in der Mikroprognose präziser abgeschätzt werden können als in der Makroprognose. Ferner gehen hier auch die **Trendverläufe** des Modal Splits, d.h. die Ist-Entwicklung in der (jüngeren) Vergangenheit, ein. Aus alledem resultiert das, über die Fahrtzwecke aggregierte, Beförderungsaufkommen der einzelnen Verkehrsarten.

Zwischen ihm und dem gesamtmodalen Verkehr bestehen erhebliche **höhere Wechselbeziehungen** als im Güterverkehr. Z.B. beeinflusst der Pkw-Bestand nicht nur die Aufteilung zwischen den Verkehrsarten, sondern auch den Gesamtverkehr, denn zahlreiche Fahrten, insbesondere im Freizeit- und im Einkaufsverkehr, werden erst aufgrund der Verfügbarkeit eines Pkw durchgeführt. Umgekehrt führt ein spürbarer Anstieg des Kraftstoffpreises nicht nur zu einem veränderten Modal Split, sondern auch zu einer reduzierten Gesamtnachfrage, da die Fahrten zum größeren Teil nicht verlagert, sondern unterlassen werden. Deshalb ist (pro Fahrtzweck) nach der

Prognose der modalen Teilung ein **Rückkopplungsprozess** zur Prognose des Gesamtverkehrs vorzunehmen.

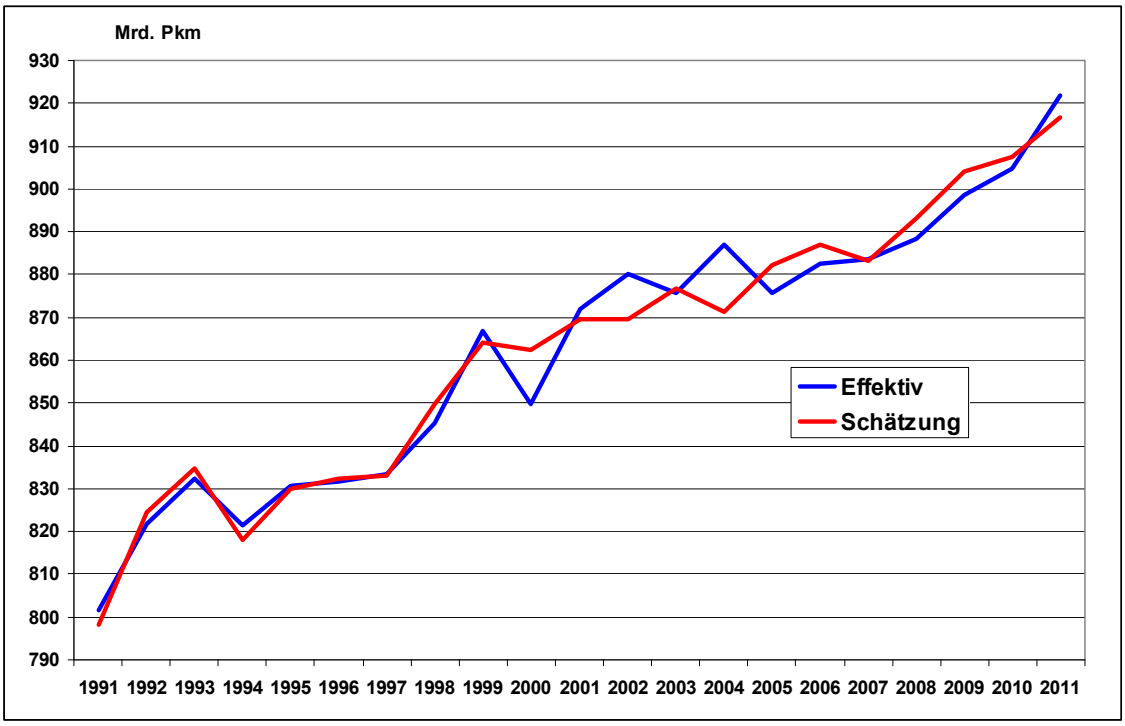
Die fahrtzweckspezifische Differenzierung ist zwar einerseits ein **unerlässliches Instrument** der Personenverkehrsprognose, aber andererseits **nicht hinreichend**. Denn in einigen Fällen lassen sich Einflussfaktoren der einzelnen Verkehrsarten **ohne** Disaggregation nach Fahrtzwecken prognostisch **besser** nutzen als mit dieser Differenzierung. Aus diesem Grund wird die Entwicklung in den einzelnen **Verkehrsarten** auch insgesamt, also **ohne** Differenzierung nach Fahrtzwecken, prognostiziert.

Dabei gehen folgende **Leitvariablen** ein:

- Individualverkehr: Pkw-Bestand, private Konsumausgaben, Kraftstoffpreis
- ÖSPV: Private Konsumausgaben, Erwerbstätige, Auszubildende
- Eisenbahnverkehr: Private Konsumausgaben bzw. BIP (Geschäftsverkehr, SPFV), Erwerbstätige, Auszubildende (jeweils SPNV)
- Luftverkehr: Private Konsumausgaben, BIP, Außenhandel Deutschlands, Preisvariable

Ein klassisches **Beispiel** für diese Ansätze bildet die **Verkehrsleistung des Individualverkehrs**. Deren wesentliche Bestimmungsgrößen bilden der Pkw-Bestand, die privaten Konsumausgaben und der (reale) Kraftstoffpreisindex. Da zwischen den beiden erstgenannten zwangsläufig eine hohe Interkorrelation vorliegt, erscheint es auf den ersten Blick als sinnvoll, nur eine der beiden zu verwenden. Dennoch hat es sich als in der Regel sinnvoll erwiesen, **beide Größen** heranzuziehen. Die statistische Korrelation wird insbesondere in Jahren mit starken konjunkturellen (Ab- oder Aufschwung-) Bewegungen erhöht, wenn sich die durchschnittliche Fahrleistung (pro Pkw) entsprechend den sinkenden bzw. überdurchschnittlich steigenden Konsumausgaben entwickelt, was allein durch die Entwicklung des Pkw-Bestands nicht abgebildet wird. Die beste Anpassung der so geschätzten mit der tatsächlichen Entwicklung zeigt sich in Abb. 2-4 (R-Quadrat: 0,983). Die dabei konkret verwendete Funktion ist eine multiple lineare Regression mit den Ist-Werten der Jahre 1991 bis 2011, die in den Jahren 2012/13 in der BVWP-Prognose verwendet wurde.

Abb. 2-4: Anpassungsgüte der Prognosefunktion für die Verkehrsleistung des Individualverkehrs

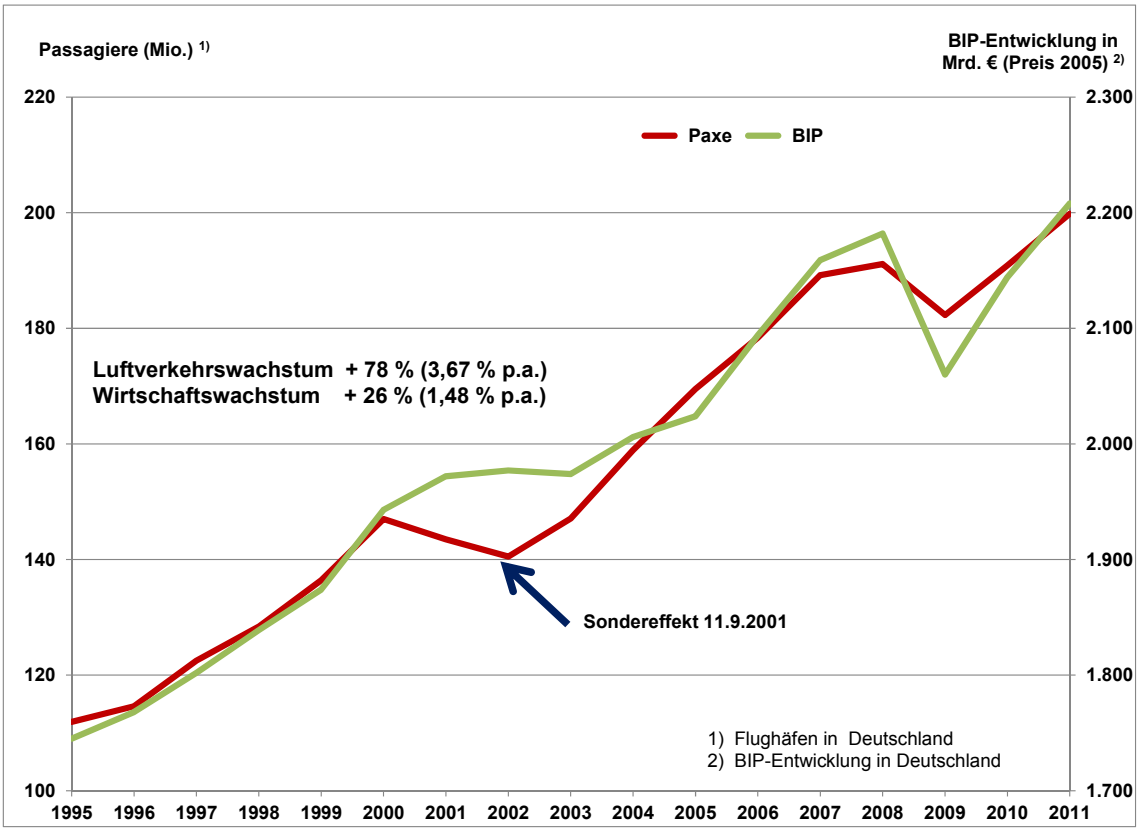


Die, dort ebenfalls sichtbaren, **Abweichungen** in den Jahren 2000, 2002 und 2004 sind zum Teil durch Sondereffekte, z.B. die Witterungseinflüsse, zu erklären. Zum Teil waren damals auch manche Veränderungen der Einflussfaktoren so stark ausgeprägt, dass ihr Effekt von der Schätzfunktion unterschätzt wurde, z.B. der Kraftstoffpreisanstieg des Jahres 2000 (nominal 19 %, real 17 %). Zu einem weiteren Teil sind die genannten Abweichungen auch als Zufallsfehler zu betrachten. Jedoch wurde in allen drei Fällen der tatsächliche Wert in jeweiligem Folgejahr, d.h. in 2001, 2003 und 2005, vom Schätzwert wieder mehr oder minder exakt getroffen. Deshalb und wegen der vorzüglichen Anpassung seit dem Jahr 2006 ist dies nach wie vor ein klassisches Beispiel für die Anwendung der genannten Prognoseansätze.

Generell werden bei derartigen Ansätzen in der Regel sowohl der **Stützbereich** als auch der **Funktionstyp** und die verwendeten **Einflussfaktoren** variiert, wobei sich die letztendliche Entscheidung vor allem auf die Stärke des Zusammenhangs in der (ggfs. jüngeren) Vergangenheit stützt. Die Kriterien zu deren Bestimmung sind zum einen die **statistischen Prüfmaße** der Regressionen, in erster Linie das R-Quadrat. Natürlich wird bei denjenigen Zielgrößen, die eine wesentliche Bedeutung für das Gesamtergebnis (eines Verkehrsträgers) besitzen, ein höherer Aufwand für die letztendliche Auswahl betrieben als bei weniger bedeutenden Größen.

Ein weiteres Beispiel bildet der **Luftverkehr**, der in einem hohen Ausmaß von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängt. Die Stärke des Zusammenhangs zwischen dem Fluggastaufkommen und dem BIP zeigt sich in Abb. 2-5 (R-Quadrat: 0,96). Nimmt man noch das Preisniveau hinzu, operationalisiert durch den Yield pro Pkm (RPK), erhöht sich das R-Quadrat sogar auf 0,99.

Abb. 2-5: Zusammenhang zwischen dem Luftverkehr und dem BIP Deutschlands



Derartige Ansätze sind einerseits als außerordentlich **robust** zu bezeichnen und haben sich in vielen Anwendungsfällen bewährt, weshalb die Ergebnisse als "erster Pflock" zu betrachten sind, von dem die später ermittelten exakten Endergebnisse nicht allzu sehr abweichen. Andererseits sind sie nicht hinreichend differenziert bzw. nicht in der Lage, weitere Einflüsse abzubilden. Deshalb werden sie mit weiteren Prognoseansätzen rückgekoppelt, nämlich mit der o.a. fahrtzweckspezifischen Prognose sowie mit weiteren Ansätzen, die hier nicht oder nur teilweise berücksichtigt werden können. So können Angebotseffekte wie z.B. die Inbetriebnahme von Hochgeschwindigkeitsstrecken oder die Wirkung des Luftverkehrs auf den Flughafenzubringerverkehr auf der Schiene u.v.m. besser über die (kleinräumige) Mikroprognose quantifiziert wer-

den. Einflüsse wie die Altersstrukturverschiebung in der demographischen Entwicklung können abgebildet werden, in dem die Mobilitätsraten des Basisjahrs konstant gehalten und auf die Altersgruppen des Jahres 2030 bezogen werden.

Die Makro- und die Mikroprognose werden zunächst **getrennt** voneinander durchgeführt, ihre Ergebnisse erst anschließend in einem iterativen **Abstimmungsprozess** miteinander abgeglichen. Durch dieses Vorgehen können die Stärken beider Ansätze genutzt und ihre Schwächen eliminiert werden. Zum Beispiel lassen sich in den Längsschnittanalysen, die der Makroprognose zugrunde liegen, vermeintliche Strukturbrüche[30] aufgrund z.B. der Weltwirtschaftskrise oder vermeintliche Nachfrageänderungen aufgrund eines gestiegenen Umweltbewusstseins analysieren, was in einer Querschnittsanalyse auf der Basis von Quelle-Ziel-Daten nicht möglich ist. Andererseits lassen sich nur durch letzteres Restriktionen für die künftige Verkehrsentwicklung, die aus **Angebotsänderungen oder aus der Kapazität der Verkehrsinfrastruktur** entstehen, in belastbarer Form ermitteln.

Somit bilden die Ergebnisse der Makroprognose keine hierarchische Vorgabe für die Mikroprognose, wie es einem **Top-down-Ansatz** entspricht, sondern erst die **Ergebnisse des Abstimmungsprozesses** zwischen Makro- und Mikroprognose ergeben das endgültige Prognoseergebnis. Es handelt sich also um eine **Kombination von Top-down- und Bottom-up-Ansätzen**. Eine mechanistische Vorgehensregel o.ä. zur Ausgestaltung dieses Abstimmungsprozesses bzw. zur Bestimmung der endgültigen Prognoseergebnisse ist nicht sinnvoll. Vielmehr hängt letztere von den konkreten Ergebnissen der Teilansätze ab: Letztendlich ist hier auch ein hohes Ausmaß von Expertenwissen in der Analyse und Prognose des Verkehrsgeschehens erforderlich.

Die Makroprognosen für das Klimaschutz-Szenario wurden auf der Ebene Deutschlands vorgenommen und auf Baden-Württemberg heruntergebrochen.

30 Natürlich kann die Frage, ob es sich tatsächlich um einen Strukturbruch handelt, erst mehrere Jahre nach dem auslösenden Ereignis beurteilt werden. Unmittelbar nach der Weltwirtschaftskrise, d.h. in den Jahren 2010 und auch 2011, wurde von Teilen der Fachwelt die Meinung vertreten, dass sich nunmehr viele bisher gültige Zusammenhänge auflösen würden. Mittlerweile, d.h. mit dem Abstand von mehr als fünf Jahren, kann dies als unzutreffend beurteilt werden.

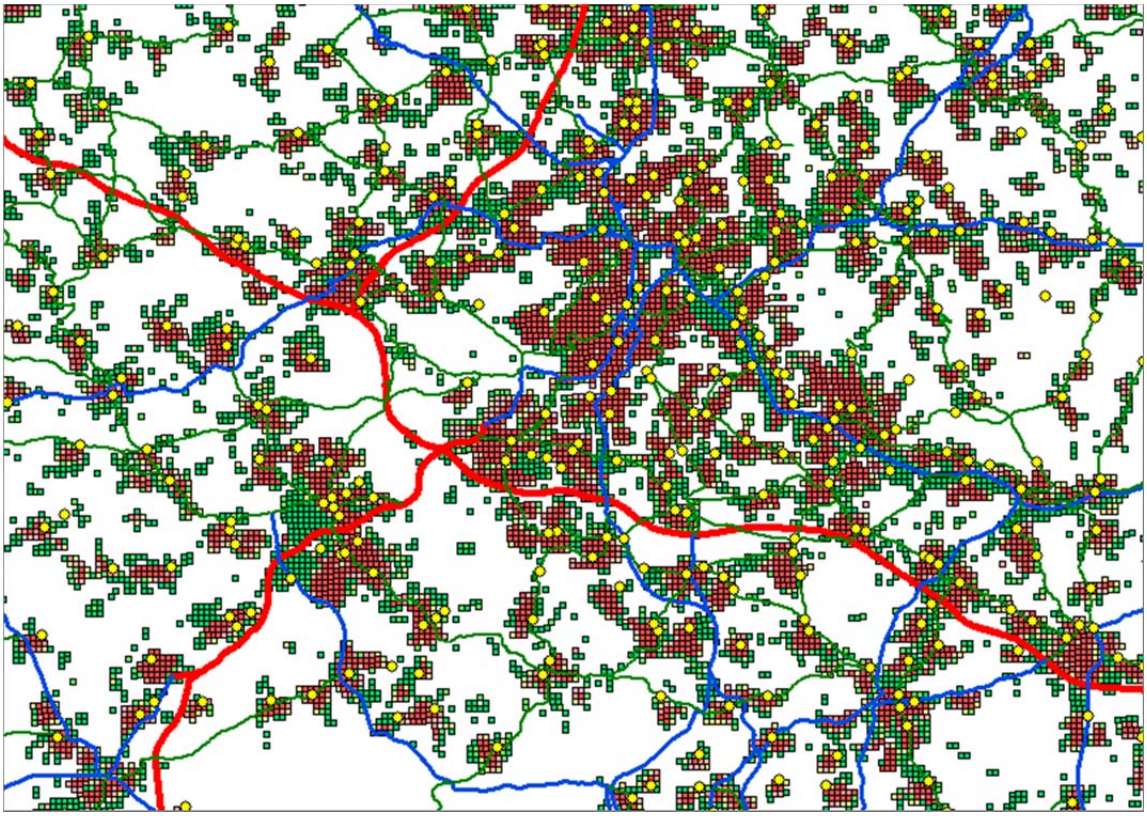
2.4 Umlegungsmodell MIV

Um differenzierte Aussagen über den Straßenverkehr zu ermöglichen und um Wirkungen aufzeigen zu können, die aufgrund von Maßnahmen des Klimaschutz-Szenarios entstehen, muss sowohl ein feinräumiges Anbindungssystem als auch ein entsprechendes Netzmodell erstellt werden. Auf dieser Basis sind dann aussagekräftige Nachfragesysteme und mittels deren Umlegung sachgerechte Belastungssysteme zu erarbeiten.

Die Ansätze zur **räumlichen Gliederung** für die Netzberechnungen Straße gehen von folgender Raumgliederung bundesweit aus:

- ca. 1,5 Mio. Rasterfelder mit einer Kantenlänge von je 250 m
- ca. 50.000 Einspeisepunkte, auf die die Rasterfelder bezogen werden.

Abb. 2-6: Gerasterte Einwohnerdichten (Quelle: BBSR) und Einspeisungspunkte ins Straßennetzmodell. Hier dargestellt nur das klassifizierte Straßennetz (A, B und L)



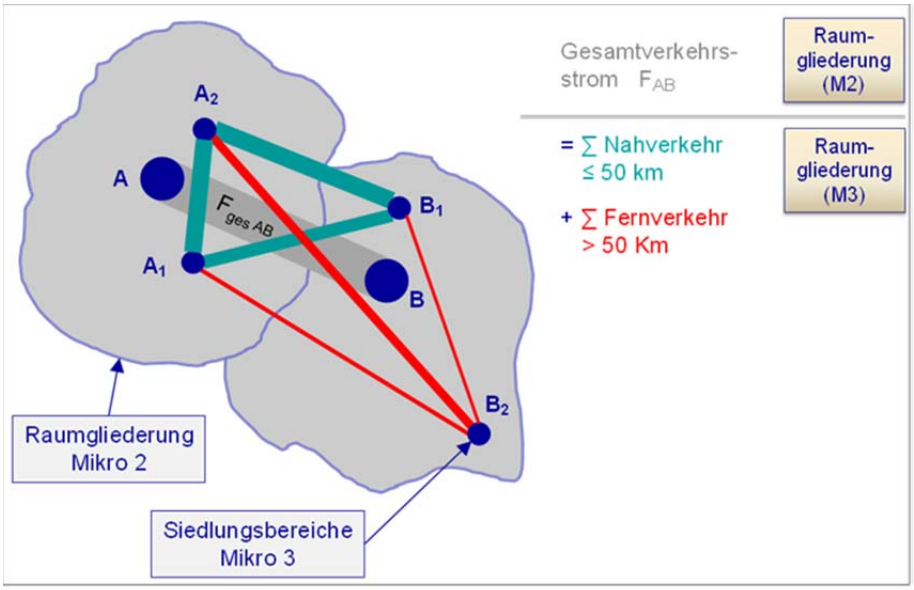
Einen Eindruck der Einspeisungspunkte vermittelt die Abb. 2-6.

Bei der Matrixgenerierung wird nach Fern- und Nahverkehr differenziert. Der mit > 50 km Fahrtweite abgegrenzte Fernverkehr wird zunächst für den Güterverkehr auf der räumlichen Mikro 1-Ebene (44 in Baden-Württemberg / ca. 500 Kreise und kreisfreie Städte insgesamt) und für den Personenverkehr auf der Mikro 2-Ebene (205 in Baden-Württemberg und ca. 1.700 zum Teil unterteilte Kreise und kreisfreie Städte insgesamt) generiert. Die Berechnung der Matrizen des Personenverkehrs für die Straßenverkehrssimulationen sieht vor, die auf der großräumigen Ebene (Mikro 2/ Mikro 1) ermittelten Verkehrsströme von Jahreswerten auf Werktagswerte umzurechnen, auf Gemeindebereiche (Mikro 3) zu disaggregieren und diese in Kfz-Fahrten umzurechnen.

Bei der Konzeption des Disaggregationsansatzes wurde davon ausgegangen, dass die weiter ausgreifenden Verkehrsströme sachgerecht auf der Raumebene Mikro 2 erarbeitet werden und die kleinräumigen Verkehrsströme (Mikro 3) sachgerecht nur auf der Anbindungsraumebene berechnet werden können. Daher sieht der gewählte Berechnungsansatz zunächst vor, die großräumigen Gesamtverkehrsströme in Nah- und Fernverkehre aufzugliedern. Der Fernverkehr ist durch Fahrtweiten von mehr als 50 km definiert.

Eine exakte Aufgliederung der großräumigen Verkehrsströme in Fern- und Nahverkehr ist nur auf der Grundlage einer feinräumigen Raumgliederung möglich. Bei der Generierung der Verkehrs-verflechtungen auf der räumlichen Basis Mikro 2 kann eine trennscharfe Differenzierung nach Nah- und Fernverkehr allein wegen der räumlichen Ausdehnung der Raumeinheiten nicht immer vorgenommen werden. Da die Mikro 2-Zellen zum Teil eine Ausdehnung von mehr 50 km haben, muss bereits bei den Mikro 2-Binnenverkehren nach Nah- und Fernverkehr unterschieden werden. Dies gilt verstärkt für Verkehrsströme zwischen benachbarten Zellen, die oftmals zum Teil dem Nah- und zum Teil dem Fernverkehr zuzuordnen sind. Das Schema in Abb. 2-7 verdeutlicht die geschilderte Situation.

Abb. 2-7: Aufgliederung der Verkehrsströme in Nah- und Fernverkehre

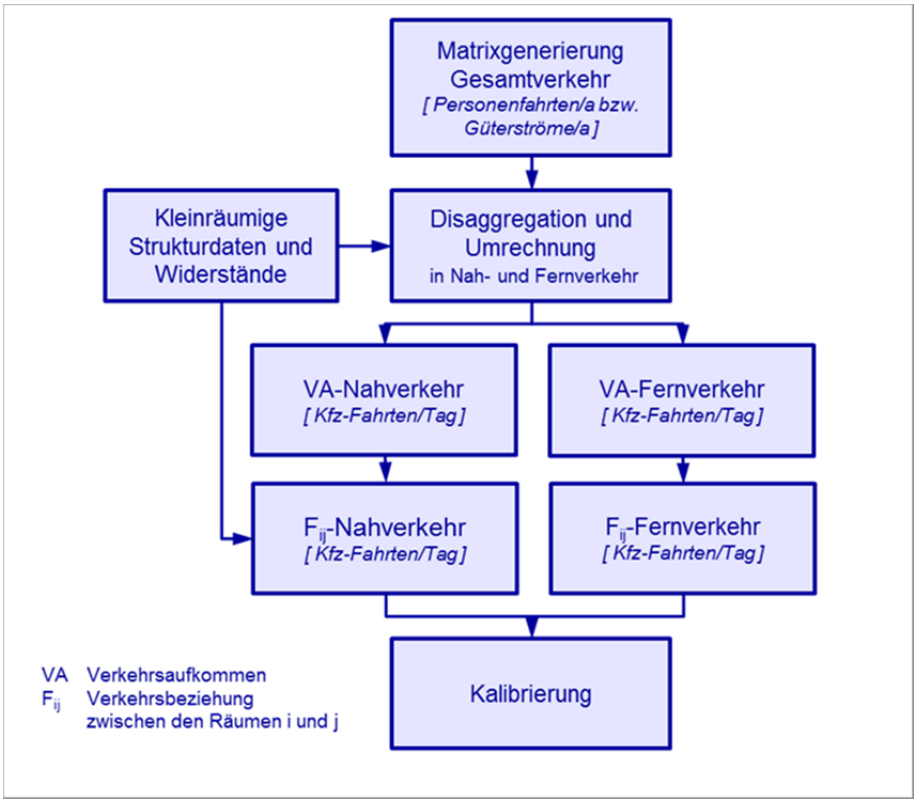


Nach der Aufgliederung der gesamten Verkehrsströme in Nah- und Fernverkehre erfolgt eine weitere räumliche Disaggregation:

- Die Verkehrsströme des Fernverkehrs werden von der Mikro 2-Ebene auf die Feinzellenebene mit Hilfe von Strukturgewichten und Widerständen verteilt.
- Die Verteilung der Verkehrsströme des Nahverkehrs erfolgt mit Hilfe eines integrierten Verkehrsmodells unter Nutzung feinräumiger Strukturdaten und Verkehrsangebote. Hierbei werden die Mikro 2-Zellen bezogenen Verkehrsaufkommenswerte der großräumigen Matrizen als Eckwerte berücksichtigt.

Der vorstehend skizzierte Berechnungsansatz ist im Ablaufschema der Abb. 2-8 dargestellt, das gleichermaßen für den Personennahverkehr wie für den Straßengüternahverkehr gilt.

Abb. 2-8: Ablaufschema zur Disaggregation der Mikro2-Verkehrsströme auf die Mikro3-Ebene



Diese Verflechtungsstruktur auf der Mikro 3-Ebene muss mit Hilfe von Aufkommensgewichten auf die noch feinere Struktur der Einspeisepunkte heruntergebrochen werden. Im Weiteren werden die Globalmatrizen, die in Jahreswerten als Personenfahrten oder als Tonnenrelation je Gütergruppe vorliegen, auf den durchschnittlichen Werktag und in einzelne Kfz-Fahrten umgerechnet.

Diese Umrechnung des jährlichen Personenverkehrs zum werktäglichen Verkehr erfolgt mit Hilfe jahreszeitlicher Fahrtenantrittspegel, die differenziert nach Fahrtzwecken, Fahrtweiten und Gebietskategorien vorliegen. Über reisezweckspezifische Pkw-Besetzungsgrade kann nun der personenbezogene Verkehr in Pkw-Fahrten umgerechnet werden.

Im Fernverkehr können die Pkw-Fahrten in den Quell- und Zellregionen entsprechend der Aufkommensgewichte verteilt werden.

Die Umrechnung von jährlichen Personenfahrten zu werktäglichen Pkw-Fahrten erfolgt im Nah- und Fernverkehr gleich. Zusätzlich bedarf es im Nahverkehr eines feinräumig ermittelten Verkehrsaufkommens, welches über die Aggregation auf Mikro 2-Ebene mit den Aufkommensgrößen der Globalprognose abgeglichen werden kann. Diese Nachfragegenerierung für den Nah-

verkehr stützt sich auf ein personengruppenspezifisches situationsorientiertes Verfahren ab, das von den Struktur- und Angebotsdaten sowie von den Lagekategorien (ländliche Bereiche, Ballungsrand, Ballungskern) der Mikro 2-Ebene ausgeht und diese mit deterministischen Verhaltensparametern, die aus der Mobilitätsforschung (MID[31], MOP[32], SrV[33]) bekannt sind, verknüpft. Die Berechnungen erfolgen in einem ersten Schritt für die Gesamtheit des motorisierten Verkehrs. Auf der Basis des multimodalen Netzmodells wird dann in einem zweiten Schritt – auch abhängig von den Erreichbarkeits- und Verbindungskategorien – eine Aufteilung nach öffentlichem und individuellem Verkehr vorgenommen.

Dieser generelle Modellansatz zur Berechnung des Personennahverkehrs kann mit folgenden Stichworten umrissen werden:

- 4-Stufen-Algorithmus
- 21 verhaltenshomogene Personengruppen
- Strukturdaten der kleinräumigen Siedlungs-/Anbindungsbereiche
- Intermodale Berechnungsansätze
- Quelle-Ziel-bezogene Fahrtzweckgruppen
- Nutzerkosten als Widerstandsgrößen.

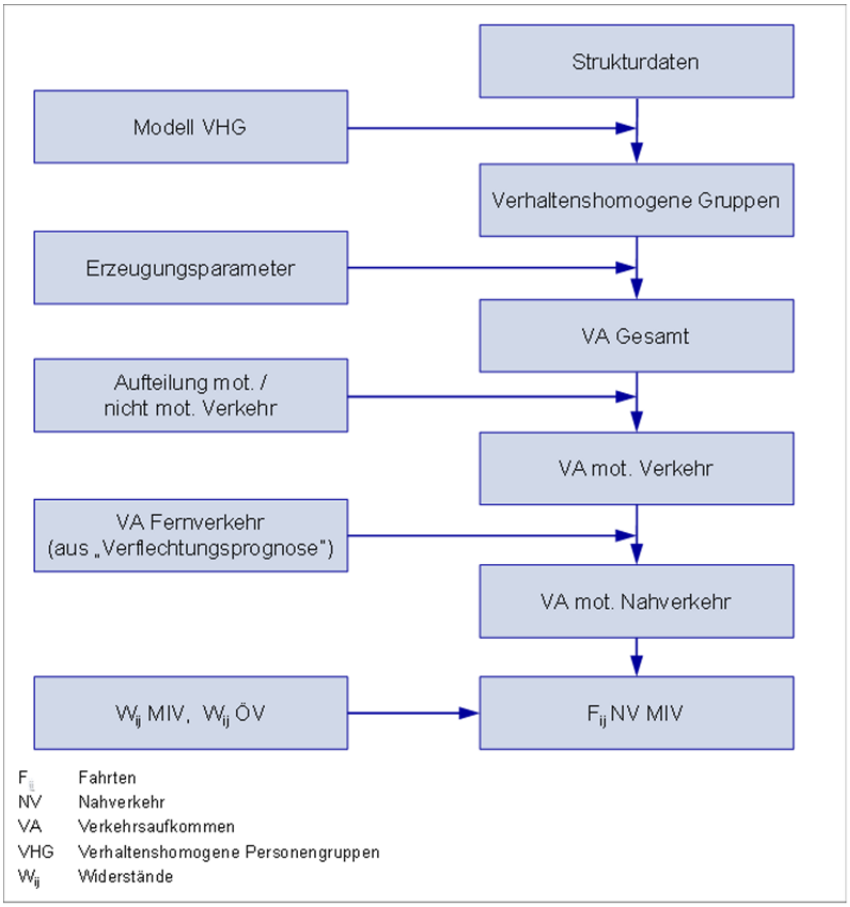
Die Berechnungen lassen sich in drei Hauptstufen zusammenfassen, die durch die Begriffe

- Erzeugung (Entscheidung über die Verkehrsteilnahme),
- Teilung (Entscheidung über die Verkehrsmittelwahl),
- Verteilung (Entscheidung über die Zielwahl)

gekennzeichnet sind. Die Stufen sind zum Teil durch Rückkoppelung miteinander verbunden, so dass zwischen den einzelnen Berechnungsschritten enge Zusammenhänge hergestellt werden. Den schematischen Ablauf der Berechnungen gibt Abb. 2-9 wieder.

31 MiD: infas, DLR: „Mobilität in Deutschland 2008“ im Auftrage des BMVBS (FE-Nr. 70.801/2006)
32 MOP: KIT, TNS Infratest: „Deutsches Mobilitätspanel“ im Auftrage des BMVI
33 SrV: TU Dresden: „System repräsentativer Verkehrsbefragungen Mobilität in Städten“

Abb. 2-9: Ablauf zur Berechnung des Personennahverkehrs im MIV



Die Umrechnung im Güterverkehr von der jährlichen Tonnagemenge in durchschnittliche, werktägliche Lkw-Fahrten erfolgt im ersten Ansatz über einen durchschnittlichen, werktäglichen Verkehrsmengenanteil am Jahresverkehr. Die Umrechnung des Tonnagestroms in die einzelne Lkw-Verkehrsrelation wird unter Berücksichtigung der Anteile des gewerblichem und des Werksfernverkehrs je Güterhauptgruppe und über ein nach Güterarten und Fahrtweiten unterscheidendes Lkw-Beladungs- und Leerfahrtenmodell ermittelt. Für die Verteilung des Lkw-Relation innerhalb der Quell- und Zielregion wird aus den Siedlungsstrukturinformationen ein Lkw-Verkehrsaufkommensgewicht generiert und die sachgerechte Verteilung innerhalb der Region über einen Gravitationsansatz gewährleistet. Das Umrechnungsverfahren entsprechen den im Rahmen der Arbeiten zum BVWP 2030 angewandten Verfahren[34].

[34] IVV: „Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie Netzumlegungen auf die Verkehrsträger; Los 4: Netzumlegungen Straßenverkehr", 2014 erstellt im Auftrage des BMVI

Zur Generierung des **kleinräumigen Wirtschaftsverkehrs** wird ein speziell für den kleinräumigen Güternahverkehr und Personen-Geschäftsverkehr entwickeltes Simulationsverfahren[35] angesetzt, das von den Struktur- und Angebotsdaten ausgehend für die einzelnen Verkehrssegmente Aufkommens- und Verflechtungswerte generiert.

Der Prozess der Nachfragebestimmung bezieht auch den **grenzüberschreitenden Verkehr** mit ein. Die Modellsimulation kann hierfür wegen fehlender Grundlagendaten nicht eingesetzt werden. Es muss ein Verfahren gewählt werden, das sich auf Erhebungen und Zusatzinformationen aus der Wirtschaftsstatistik abstützt. Mit Hilfe dieses Ansatzes wurde 2003 im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung ein vollständiger Verflechtungsdatensatz erarbeitet. Von diesem Datensatz wird bei der aktuellen Bearbeitung des Datensatzes für den grenzüberschreitenden Verkehr ausgegangen. Er wird mit Hilfe des Vergleichs der Informationen aus den Ausländer-Verkehrszählungen AVZ 2008 und AVZ 2003 zunächst auf den Zustand 2008 hochgerechnet und dann über Entwicklungsfaktoren auf die relevanten Zeiträume umgerechnet. Parallel hierzu werden die Statistiken des Kraftfahrtbundesamtes über den Güterverkehr ausgewertet und in den Hochrechnungsprozess einbezogen.

Die erarbeiteten und abgeglichenen feinräumigen Verkehrsverflechtungen des Straßenverkehrs werden zwar über die Einspeisepunkte des Raumanbindungssystems auf die relevanten Straßennetze aufgebracht. Hierbei wird unser **dynamisches Routensuch- und Umlegungsverfahren DRUM**[36] angewandt, das die zeitlichen Schwankungen der Verkehrsnachfrage innerhalb des Betrachtungszeitraumes und dabei die räumlich-zeitliche Überlagerung von Verkehrsströmen mit unterschiedlichen Startzeiten berücksichtigt.

Das dynamische Routensuch- und Umlegungsverfahren DRUM ist in der Lage, zeitliche Schwankungen der Verkehrsnachfrage innerhalb des Betrachtungszeitraumes und räumlich-zeitliche Zusammenhänge von Quelle-Ziel-Beziehungen mit unterschiedlicher Startzeit zu berücksichtigen. Damit werden bei der Routenwahlsimulation die voraussichtlichen Belastungszustände der Netzelemente zu dem Zeitpunkt betrachtet, zu dem das jeweilige Netzelement befahren wird. Dabei werden Alternativrouten pro Zeitschritt, die sich aufgrund unterschiedlicher Netzkenntnis und unterschiedlichen Schätzvermögens von Verkehrsteilnehmern einstellen, berücksichtigt.

35 Ingenieurgruppe IVV: „Kleinräumige Wirtschaftsverkehrsmodelle“ Im Auftrage des BMVBW (FE-Nr. 70.0689/2002)

36 Dirk Serwill: „DRUM – Modellkonzept zur Dynamischen Routensuche und Umlegung“ Bericht B43 der Reihe Stadt-Region-Land des ISB der RWTH Aachen, 1994

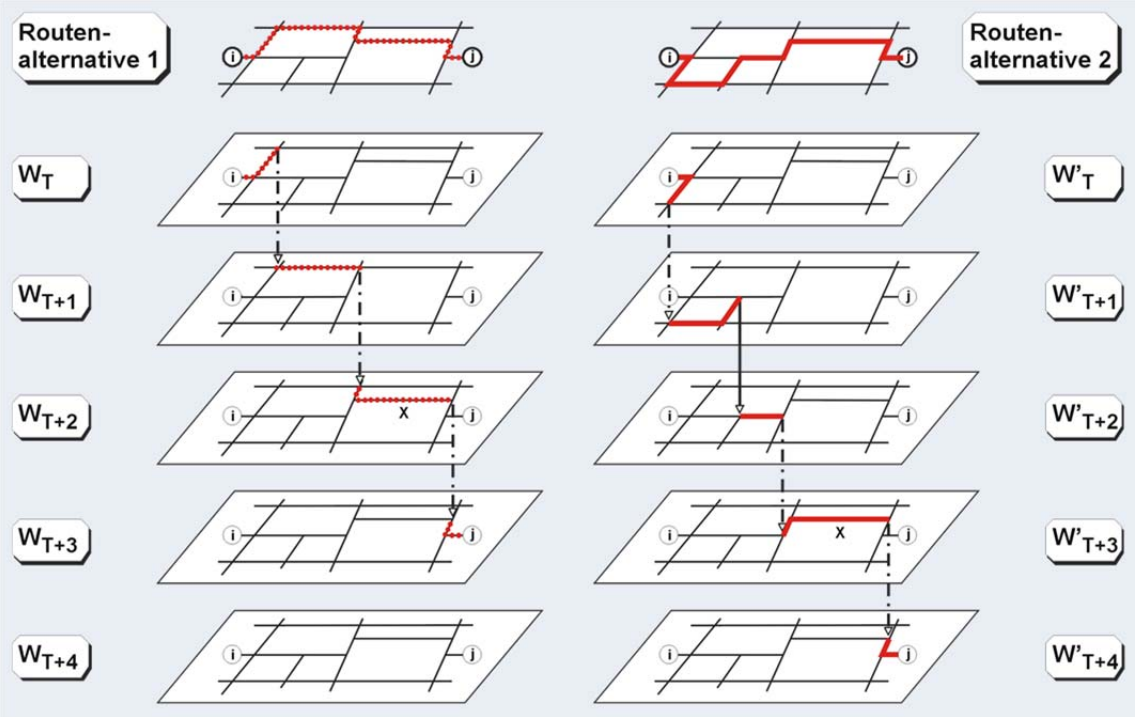
Bei der Simulation des Routenwahlverhaltens wird angenommen, dass die Kfz-Lenker keine vollständigen Kenntnisse der aktuellen Verkehrssituation im Netz besitzen. Vielmehr schätzt jeder Fahrer die seiner Routenwahl zu Grunde liegenden Widerstände im Netz subjektiv ein. Dieser Modellbereich entspricht generell einer Dynamisierung der statischen Routensuch- und Umlegungsverfahren.

Die Entwicklung von DRUM verlief unter der Maxime, zeitlich-räumliche Routen berechnen zu können, wobei in der Routensuche nicht die momentanen, sondern diejenigen Strecken- und Knotenwiderstände einbezogen werden sollen, die zum Zeitpunkt des Befahrens vorliegen. Bei einer solchen Vorgehensweise müssen Widerstände antizipiert werden, da sie sich erst aufgrund des Routenwahl- und Umlegungsprozesses ergeben; ein geschlossener Lösungsansatz ist nicht möglich.

Deshalb ist DRUM als iteratives Verfahren angelegt, bei dem zunächst in einem Rechengang für alle Fahrtbeziehungen des gesamten Betrachtungszeitraumes die dynamische Routensuche und Umlegung durchgeführt wird. Als Ergebnis liegen für jeden Zeitschritt – unterschiedliche – Strecken- und Knotenbelastungen vor (1. Iteration). Die daraus ableitbaren zeitvarianten Strecken- und Knotenwiderstände sind die Grundlage zur dynamischen Routensuche und Umlegung des nächsten Iterationsschrittes, bei dem wiederum für alle zeitschrittbezogenen Verkehrsmatrizen die Routen und somit neue Streckenbelastungen dynamisch ermittelt werden. Ausgangspunkt für die erste Iteration sind Widerstandsvorgaben, die entweder aus Verkehrserhebungen abgeleitet oder als Standardwerte z. B. mit Hilfe von Mengen-Geschwindigkeits-Kurven für jede Strecke bestimmt werden. Durch die iterative Vorgehensweise erfolgt im Modell eine Approximation der vorgegebenen Belastungen an die aus dem Verhalten vieler Verkehrsteilnehmer entstehenden, tatsächlichen Verkehrsbelastungen für alle Zeitschritte. Somit liegen in höheren Iterationsstufen des Verfahrens wirklichkeitsnahe Widerstände für alle zukünftigen Zeitschritte vor, die ein Fahrer beim Beginn einer Fahrt für die Abschätzung der Widerstände seines Fahrtweges heranzieht.

Bei der Routenwahlsimulation werden mögliche Umwege durch Reisezeit-Schwellen so begrenzt, dass die Simulation von Überlastungserscheinungen möglich und nicht generell durch Zulassung beliebig weiter Umwege ausgeschlossen wird. Die Ergebnisse der Netzberechnungen sind in sich konsistent und jederzeit rekonstruierbar. Eine Übersicht des Ablaufes beim Verfahren DRUM zeigt Abb. 2-10.

Abb. 2-10: Dynamisches Routensuchverfahren, Funktionsschema



Das dynamische Routensuch- und Umlegungssystem DRUM wurde und wird bei Netzberechnungen im Rahmen der Arbeiten zur Bundesverkehrswegeplanung (BVWP 2003/ 2015, Bedarfsplanprognose 2025) mit Erfolg eingesetzt.

Zusätzlich werden Widerstandsmatrizen auf der Mikro 2-Ebene für das deutschlandweite Straßennetz erstellt, die für Verteilungs- und Aufteilungsrechnungen im Rahmen der Globalprognose zur Verfügung gestellt werden.

Wegen des geschlossenen Vorgehens zwischen Nachfrageberechnungen und Umlegung, sowie wegen der enormen Datenfülle werden die auf Rasterfelder und Einspeisungspunkte bezogenen Verflechtungswerte im Berechnungsprozess simultan erzeugt, umgelegt und nicht weiter festgehalten. Die errechneten Werte je Beziehung werden unmittelbar im Prozess zu Verflechtungen auf der Mikro 2-Ebene aggregiert und abgespeichert, wobei jeweils notwendige inhaltliche Differenzierungen berücksichtigt werden. Die Belastungswerte werden - nach Kfz-Arten differenziert - je Streckenelement ausgewiesen.

Zur Erklärung der Datenfülle mag folgender Hinweis dienen: Bei 50.000 Einspeisepunkten entstehen theoretisch 2,5 Mrd. Verflechtungswerte. Wegen der im werktäglichen Verkehr nicht

belegten Relationen reduzieren sich zwar die Anzahl der Verflechtungswerte, allerdings ist wegen der zusätzlichen inhaltlichen Differenzierung jede Relation u.U. mehrfach besetzt, so dass final mehr als 5 Mrd. Informationen je Rechenfall entstehen.

Grundsätzlich wird bei den Nachfrageberechnungen und Umlegungen von dem bei der BVWP angewandten Verfahren ausgegangen. Änderungen würden zu einer Neuberechnung aller Ansätze führen und zudem neue Modellentwicklungen notwendig werden lassen. Darüber hinaus wäre in diesem Fall die Vergleichbarkeit der Ergebnisse des BW-Klimaschutz-Szenarios mit denen der BVWP 2015 zumindest deutlich erschwert.

Die Wirkungen des Klimaschutz-Szenarios Baden-Württemberg auf die Straßenverkehrsbelastungen fließen im Wesentlichen über die Globalprognose in den Netzberechnungsprozess ein. Darüber hinaus können ggf. szenariospezifische Rahmenbedingungen für den Straßenverkehr – wie z. B. Tempolimits, City-Maut, Lkw-Fahrverbote oder Ähnliches – in den Umlegungsprozess eingebracht werden.

Für die Fortschreibung des Nachfragemodells sind folgende Informationen erforderlich:

- Im Rahmen der BVWP angewandte Nachfragemodelle
- Im Rahmen der BVWP angewandte Umlegungsmodelle
- Maßnahmen zur Umsetzung des Klimaschutz-Szenarios
- Angaben zur angestrebten inhaltlichen Differenzierung der Nachfrage.

Die durchgeführten Arbeitsschritte der Straßenverkehrsprognose stellen sich wie folgt dar:

1. Aktivierung der im Rahmen der BVWP angewandten Nachfragemodelle.
2. Aktivierung der im Rahmen der BVWP angewandten Umlegungsmodelle.
3. Anpassung der Nachfrage- und Umlegungsmodelle hinsichtlich der Wirkungssensitivität, die aufgrund der Maßnahmen des Klimaschutz-Szenarios zu erwarten ist.
4. Anpassung der Nachfrage- und Umlegungsmodelle hinsichtlich der Erfassung spezifischer Werte zur Beurteilung der Wirkungen von Maßnahmen des Klimaschutz-Szenarios.
5. Ergänzung der Nachfrage- und Umlegungsmodelle um die Erfassung von Kenngröße zur Beurteilung der Berechnungs- und Ermittlungsqualitäten.

2.5 Umlegungsmodell Schienenverkehr

Die Umlegung des Schienenverkehrs erfolgt in folgenden Schritten:

- Umlegung des SPV in der Einheit Personenfahrten
- Abgleich zwischen SPV Nachfrage und unterstelltem SPV-Angebot
- Übergabe der SPV-Zugzahlen für die SGV-Umlegung
- Umlegung SGV unter Berücksichtigung der Kapazitätsbindung der Strecken durch den SPV
- Aufsummieren der Zugzahlen insgesamt je Teilstrecke

2.5.1 Umlegungsmodell Schienenpersonenverkehr

Das Routenwahl- und Umlegungsmodell für die Nachfrage des Schienenpersonenverkehrs (SPV) fügt sich in die Berechnung der SPV-Widerstände für die verkehrsmittelübergreifenden Nachfragemodelle ein. Die Grundelemente der Modellierung sind dabei

- **Mengengerüste** zur Abbildung der Einflussgrößen für die Nachfragemodellierung (z.B. Nutzerkosten, Reisezeiten, Umsteigehäufigkeiten, Bedienungshäufigkeiten, Zuverlässigkeit/ Pünktlichkeit) und
- **Wertgerüste** für die Zusammenfassung der in unterschiedlichen Dimensionen vorliegenden Einflussgrößen zu **generalisierten Kosten**. Das Gesamtverfahren beruht auf einer Konsistenz der Wertansätze zwischen Nachfrage- und Umlegungsmodell.

Grundlagen für die Umlegung der SPV-Nachfrage sind

- die Netzattribute für den SPV und
- die Nachfragematrizen für den SPV in der räumlichen Gliederung der Mikroebene 2

Die Umlegungen erfolgen getrennt nach den Fahrtzwecken beziehungsweise Fahrtzweckgruppen

- Ausbildung
- Geschäft und
- Sonstige Fahrtzwecke (Privat / Einkauf / Urlaub / Berufspendler).

Auf Basis der SPV-Netzattribute werden mit Hilfe des Routenwahl- und Umlegungsmodells je Relation und Fahrtzweck

- alle potentiellen Fahrmöglichkeiten ermittelt,
- die Angebotsqualität der ermittelten Routen bewertet,
- die Nutzerkosten für diese Routen ermittelt und

- jeder als relevant erkannten Route der jeweilige Anteil an der gesamten SPV-Nachfrage in der betreffenden Relation zugewiesen.

Die für die Routenwahl und den Routensplit maßgebenden generalisierten Kosten (GK) setzen sich aus Messgrößen für die Angebotsqualität und den Nutzerkosten zusammen.

$$GK = Aq + Nk$$

mit

Aq fahrtzweckspezifische generalisierte Kosten zur Beschreibung der Angebotsqualität einer Route

Nk fahrtzweckspezifische Nutzerkosten für die betreffende Route gemäß Tarifmodell

Die **Angebotsqualität** Aq einer Route wird ausgedrückt in generalisierten Kosten, die wie folgt berechnet werden:

$$Aq = (t + Zp + Zu + Zz + Ze) \bullet zw$$

mit

t Tür-zu-Tür Reisezeit

Zp Zeitäquivalent zur Berücksichtigung von Produktpräferenzen

Zu Zeitäquivalent zur Berücksichtigung des Diskomforts beim Umsteigen

Zz Zeitäquivalent zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit / Pünktlichkeit

Ze Zeitäquivalent zur Berücksichtigung der eingeschränkten Nutzbarkeit von Routen mit überlangen Reisezeiten

zw Zeitwert

Die **Tür-zu-Tür-Reisezeit** setzt sich wie folgt zusammen:

$$t = (tz + tw + tf + ta)$$

mit

tz Zugangszeit (Anbindungszeit)

tw Wartezeit beim Einsteigen

tf Fahrzeit vom Ersteinstieg bis zum Letztausstieg einschließlich Umsteigezeiten
ta Abgangszeit (Anbindungszeit)

Die Anbindungszeiten können sich auf intrazonale und/oder extrazonale Anbindungen beziehen.

Die Wartezeit beim Einsteigen tw wurde mit einheitlich 5 Minuten angenommen.

Unter tf wird die Fahrzeit vom Ersteinstieg in das SPV-System bis zum letzten Ausstieg aus dem SPV-System verstanden:

$$tf = t_{Teilweg\ 1} + t_{U1} + t_{Teilweg\ 2} + t_{U2} \ldots\ldots + t_{Teilweg\ n}$$

mit
tU Umsteigezeit

Die für die Routenwahl und den Modal-Split relevanten Komfort- und Imagekomponenten bezogen auf die verschiedenen Zuggattungen (Produkte) werden in Form von relativen Zu- bzw. Abschlägen auf die produktbezogenen Fahrzeiten berücksichtigt (Zeitäquivalente zur Berücksichtigung von Produktpräferenzen (Zp)). Diese werden wie folgt bestimmt:

$$Zp = t_{Teilweg\ 1} \bullet p_{p1} + t_{U1} + t_{Teilweg\ 2} \bullet pp2 \ldots\ldots + t_{Teilweg\ n} \bullet p_{p\ n}$$

mit
pp Produktpräferenzfaktor

Für die verschiedenen im SPV-Netzmodell definierten Produktgruppen wurden die folgenden Produktpräferenzfaktoren angenommen:

- A: Premiumprodukte des SPFV (z.B. ICE, TGV, Thalys) - 0,15
- B: Standardprodukte des SPFV (z.B. IC, EC) - 0,10
- C: SPNV-Regionalverkehr (z.B. RegionalExpress, RegionalBahn) - 0,05
- D: S-Bahn - 0,15
- E: ÖSPV (U-Bahnen, Stadtbahnen und Busse) + 0,05

Diese Produktpräferenzfaktoren stellen gleichzeitig eine Eichgröße für den SPV-internen Produktsplit dar und haben sich bei den bisherigen Berechnungen als zutreffend erwiesen.

Bei Umsteigevorgängen werden im SPV-Netzmodell neben dem Zeitaufwand zusätzlich die hiermit verbundenen Komforteinbußen ("Diskomfort") nach dem folgenden Ansatz berücksichtigt:

$$Zu = U \cdot zu$$

mit

U Anzahl Umsteigevorgänge auf der betreffenden Route

zu Zeitäquivalent je Umsteigevorgang

Die Zeitäquivalente je Umsteigevorgang (zu) wurden je Fahrtzweck wie folgt angenommen:

- Ausbildung: 10 Minuten
- Geschäft: 30 Minuten
- Sonstige Fahrtzwecke: 30 Minuten

Zur Abbildung der Einflussgröße Zuverlässigkeit / Pünktlichkeit sind im Umlegungsmodell SPV-Nachfrage globale Annahmen enthalten, bei denen nach Direktfahrten und Routen mit Umsteigevorgängen unterschieden wird (die Auswirkungen von Verspätungen sind bei Umsteigeverbindungen ungleich höher als bei Direktverbindungen).

Die Zeitäquivalente zur Berücksichtigung der Einflussgröße Zuverlässigkeit / Pünktlichkeit werden wie folgt berechnet:

$$Zz = q_p \cdot (1 + 1{,}5 \cdot U) \cdot v_p \cdot r$$

mit

q_p Verspätungsquote je Zuggattung (es gilt der Maximalwert über alle im Verlauf der betreffenden Route genutzten Zuggattungen)

U Umsteigehäufigkeit

vp durchschnittliche Verspätung je Zuggattung bei den verspäteten Zügen (es gilt der Maximalwert über alle im Verlauf der Verbindung genutzten Zuggattungen)

r Relevanzfaktor (fahrtzweckspezifisch)

Im Analysezustand 2010 wurde bei den verschiedenen Produktgruppen (Zuggattungsgruppen) von den in Tab. 2-17 zusammengestellten Verspätungsquoten und durchschnittlichen Verspätungen, die auf Angaben der DB AG beruhen, ausgegangen.

Tab. 2-17: Produktgruppenbezogene Verspätungsquoten (q_p) und durchschnittliche Verspätungen (v_p) im SPV-Netzmodell 2010

Produktgruppe	q_p	v_p in min.
A: Premiumprodukte des SPFV (z.B. ICE, TGV, Thalys)	0,28	15
B: Standardprodukte des SPFV (z.B. IC, EC)	0,28	15
C: SPNV-Regionalverkehr (z.B. RegionalExpress, RegionalBahn)	0,10	10
D: S-Bahn und Zweisystem	0,05	10
E: ÖSPV (nur die Linien, die für das SPV-Netzmodell relevant sind)	0,10	10

Quelle: DB AG

Verspätungen haben je nach Fahrtzweckgruppe eine unterschiedliche Relevanz für die Routenwahl und den Modal-Split. Dies wird durch die folgenden Relevanzfaktoren abgebildet:

- Ausbildung: 1,0
- Geschäft: 2,0
- Sonstige Fahrtzwecke: 1,0

Diese im SPV-Umlegungsmodell enthaltene relativ pauschale Berücksichtigung der Einflussgröße Zuverlässigkeit / Pünktlichkeit kann bei späteren Bewertungen im Rahmen des BVWP-Prozesses durch differenziertere knoten- bzw. streckenspezifische Annahmen zu Verspätungsquoten und durchschnittlichen Verspätungshöhen ersetzt werden.

Bahnreisen mit überlangen Reisezeiten weisen für den Fahrgast eine eingeschränkte Nutzungsmöglichkeit auf. Solche Einschränkungen bestehen insbesondere dahingehend, dass mit steigender Reisezeit eine tendenziell geringere Wahrscheinlichkeit besteht, das Reiseziel noch am Tag des Antritts der Reise zu der gewünschten Zeit oder überhaupt zu erreichen. Ein vormittäglicher Geschäftstermin kann vielfach nur durch Anreise am Vorabend wahrgenommen werden. Oder umgekehrt: Wenn z.B. ein Geschäftstermin bis zum späten Nachmittag dauert, ist es häufig nicht mehr möglich, die Rückreise am gleichen Tag zu beenden. Dies gilt in erster Linie für Geschäftstermine, aber auch bei Privatreisen bestehen großenteils derartige Restriktionen.

Bei Routen mit einer Tür-zur-Tür Reisezeit von mehr als 6 Stunden wird dies in Form des Zeitäquivalentes Ze nach dem folgenden Ansatz berücksichtigt:

$$Ze = (t - t_{max}) \cdot f$$

mit

t Tür-zur-Tür Reisezeit in Minuten

t_{max} 360 Minuten (maximale Reisezeit ohne Berücksichtigung eines Zeitäquivalentes Ze)

f Aufschlagsfaktor in Höhe von 0,5 auf die Teilreisezeit, die die maximale Reisezeit t_{max} überschreitet

Der **Zeitwert Zw** ist der Bewertungsmaßstab für die Umrechnung von Zeiteinheiten in Kosteneinheiten. Hierbei wird derzeit, wie auch schon in der BVWP-Prognose, von den folgenden fahrtzweckspezifischen Wertansätzen ausgegangen:

- Ausbildung bis zu[37] 3,00 €/Std.
- Geschäft bis zu 75,00 €/Std.
- Sonstige Fahrtzwecke bis zu 8,00 €/Std.

Die Einflussgröße **Bedienungshäufigkeit** wird bei der Ermittlung der für das Umlegungsmodell SPV-Nachfrage maßgebenden generalisierten Kosten nicht berücksichtigt. Unterschiedliche Bedienungshäufigkeiten bei den je Relation nutzbaren alternativen Routen werden innerhalb des Routensplit-Algorithmus berücksichtigt. Für den Modal-Split innerhalb des angewandten Nachfragemodells werden die für das SPV-Umlegungs-modell ermittelten generalisierten Kosten noch durch die Einflussgröße "Anpassungszeiten" ergänzt. Die Anpassungszeiten sind nicht Einflussgrößen für den Routensplit, sondern Ergebnis dieses Modellbausteins. Hierdurch wird abgebildet, in welchem Umfang individuelle zeitliche Realisierungswünsche von Ortsveränderungen an die bestehenden Abfahr-möglichkeiten angepasst werden müssen.

Die Ermittlung der **Nutzerkosten** erfolgt mit einem Tarifmodell unter Berücksichtigung einer Entfernungsdegression nach dem Ansatz

$$Nk = (d_{Teilweg1} \cdot s_{f,p1} + d_{Teilweg2} \cdot s_{f,p2.....} + d_{Teilweg\ n} \cdot s_{f,pn}) \cdot d^{dg} / d + Z + d_{an} \cdot s_{an/ab} + d_{ab} \cdot s_{an/ab}$$

[37] Die Werte gelten für Fernrelationen; für kürzere Entfernungen wurden niedrigere Werte verwendet.

mit

d Distanz zwischen dem Ausgangsbahnhof und dem Zielbahnhof (Hauptlauf) in km, bei Umsteigeverbindungen gilt:
$d = d_{Teilweg1} + d_{Teilweg2} \ldots\ldots + d_{Teilweg\ n}$

dg Degressionsexponent (fahrtzweckspezifisch)

$s_{f,p}$ spezifische Nutzerkosten im Hauptlauf auf dem Teilweg n in € je km in Abhängigkeit von der genutzten Produktgruppe (fahrtzweckspezifisch)

Z Zuschlag bei der Nutzung von Produkten des SPFV in € je Personenfahrt (fahrtzweckspezifisch)

d_{an} Distanz vom ursprünglichen Ausgangsort einer Reise bis zu dem auf der betreffenden Route genutzten Ausgangsbahnhof in km

d_{ab} Distanz von dem betreffenden Zielbahnhof bis zum endgültigen Zielort in km

s_{an} spezifische Nutzerkosten im Vor- bzw. Nachlauf zu den betreffenden SPV-Bahnhöfen (fahrtzweckspezifisch)

Die spezifischen Nutzerkosten $s_{f,p}$ setzen sich aus einem fahrtzweckspezifischen Grundpreis sf und, den in Tab. 2-18 dargestellten produktgruppenbezogenen Aufschlagsfaktoren f_p zusammen:

$$s_{f,p} = s_f \bullet f_p$$

Tab. 2-18: Produktgruppenbezogene Aufschlagsfaktoren auf die spezifischen Grundpreise

Produktgruppe	Aufschlagsfaktor f_p auf den Grundpreis
A: Premiumprodukte des SPFV (z.B. ICE, TGV, Thalys)	1,25
B: Standardprodukte des SPFV (z.B. IC, EC)	1,15
C: SPNV-Regionalverkehr (z.B. RegionalExpress, RegionalBahn)	1,0
D: S-Bahn und Zweisystem	1,0
E: ÖSPV (U-Bahnen, Stadtbahnen und Busse)	1,0

Für die je Route ermittelten Nutzerkosten bestehen in Anlehnung an das derzeitige Preissystem der DB AG Preisobergrenzen. Für die Größen Degressionsexponent (dg), SPFV-Zuschlag (Z), spezifische Nutzerkosten im Hauptlauf (sf), spezifische Nutzerkosten im Vor- bzw. Nachlauf

(san) und Preisobergrenze (Nkmax) wurden die in Tab. 2-19 zusammengestellten Annahmen getroffen.

Tab. 2-19: Maßgebende Parameter für das SPV-Tarifmodell[1)]

Fahrtzweck	d_g	Z (€)	s_f (€/km)	s_{an} (€/km)	Nk_{max}(€)
Ausbildung	0,95	2,00	0,08	0,04	70
Geschäft	0,95	8,00	0,18	0,45	120
Sonstige Fahrtzwecke	0,90	5,00	0,10	0,10	70

1) Legende s. S. 88

Innerhalb des BVWP-Prozesses ist aufgrund des Fehlens von flächendeckenden und konsistenten Ausgangsinformationen für den Prognosezustand 2030 keine fahrplangenaue Modellierung der Bedienungsangebote des SPV möglich und sinnvoll. Daher wurde für die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 aus den Erkenntnissen und Erfahrungen der fahrplangenauen Modellierung ein liniennetzbasiertes Modell weiterentwickelt. Bei diesem Ansatz bleiben die wesentlichen Vorteile der fahrplangenauen Modellierung insbesondere in Hinblick auf den Routensplit bei einem Mix aus schnellen und langsamen Verbindungen erhalten.

Mit Hilfe des Modellbausteins Routenwahl werden alle relevanten Fahrtmöglichkeiten für eine Quelle-Ziel-Relation ermittelt, welche zu einer Verbesserung des relationsspezifischen Widerstands beitragen. Dazu werden prinzipiell alle denkbaren Verknüpfungen zwischen den Linien gebildet und untereinander verglichen. Hierbei werden die Fahrtmöglichkeiten verworfen, die mit Sicherheit in keinem der maßgebenden Fahrtzwecke mit ihren verschiedenen Wertansätzen für die Beurteilung der Angebotseigenschaften zu einer Verbesserung des relationsspezifischen Widerstands beitragen können.

Dabei kommt ein zur Ermittlung des Routensplits analoges Verfahren zum Einsatz, in dem die Toleranzen für die Unterschiede der Fahrtwiderstände (generalisierte Kosten) abhängig sind von der Anzahl der gefundenen Wege je Relation. Ergebnis der Routenwahl ist eine Liste aller sinnvollen Fahrtmöglichkeiten je Relation.

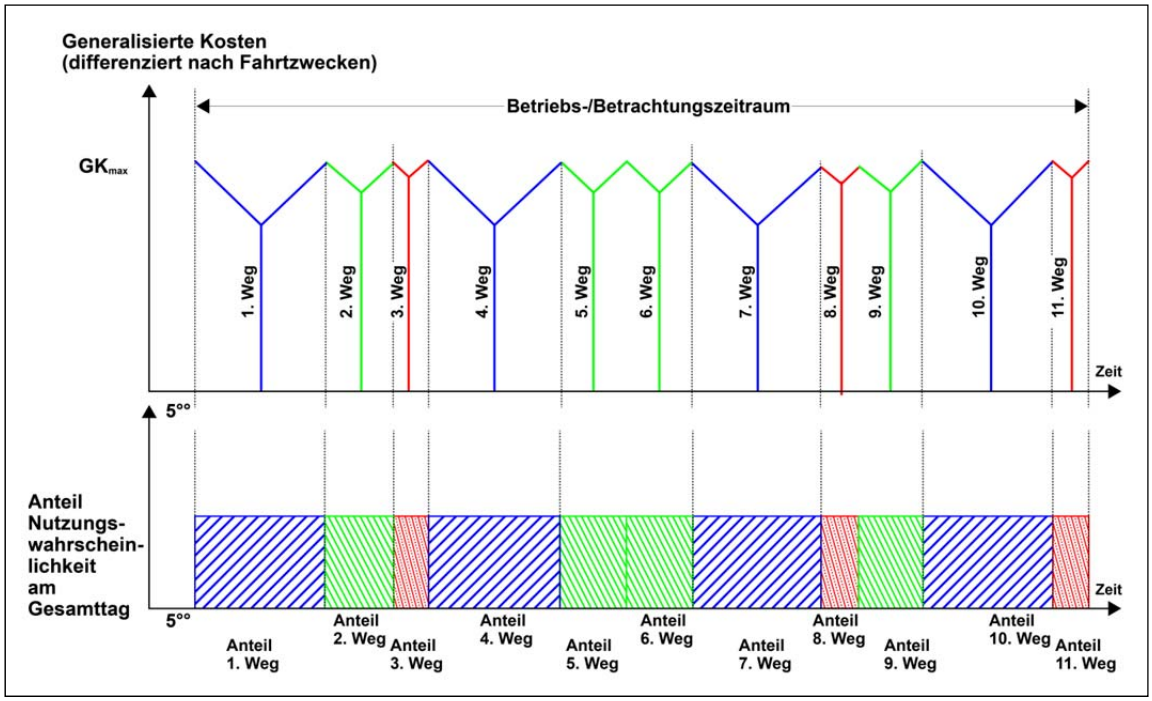
Der **Routensplit** wird generell fahrtzweckspezifisch ermittelt. Dabei werden die Angebotseigenschaften (Fahrzeit, Fahrpreis, Umsteigenotwendigkeit und Bedienhäufigkeiten) individuell gewichtet.

Da die Abfahrtszeit der Fahrtmöglichkeiten nicht bekannt ist, ist eine Berücksichtigung der Nachfrageganglinien nicht sinnvoll und es wird eine Gleichverteilung der Verkehrsnachfrage über den betrachteten Betriebszeitraum unterstellt. Unter der Annahme der konstanten Nachfrageganglinie ist die Nutzungswahrscheinlichkeit einer Fahrtmöglichkeit nur noch von der Angebotsqualität der einzelnen Fahrtmöglichkeiten und der Angebotsdichte abhängig. Es spielt also keine Rolle, zu welchem Zeitpunkt diese Zugfahrt durchgeführt wird.

Die Nutzungswahrscheinlichkeit der Zugverbindung wird aus einer Analogiebetrachtung zum fahrplangenauen Verfahren ermittelt. Es werden zu jeder gefundenen Fahrtmöglichkeit Bestwegzeitintervalle bestimmt, wobei nicht die Zeitlage der Zeitintervalle, sondern ausschließlich die Dauer der Zeitintervalle von Interesse ist. Bei der Bestimmung der Bestwegzeitintervalle je Relation wird eine optimale Konstellation der Abfahrtszeiten aus Sicht des Fahrgastes unterstellt.

Diese wird dann erreicht, wenn die Schnittpunkte der Generalisierten-Kosten-Linien (GK-Linien) aller benachbarten Fahrtmöglichkeiten im Zeit-Kosten-Diagramm immer auf dem gleichen Kostenniveau liegen (vgl. Abb. 2-11). Die Anordnung der einzelnen Fahrtmöglichkeiten spielt bei dieser Betrachtung dann keine Rolle mehr.

Abb. 2-11: Ermittlung der Nutzungswahrscheinlichkeiten



Mit jeder zusätzlichen relevanten Fahrtmöglichkeit sinkt das Kostenniveau des Schnittpunktes der GK-Linien (GKmax) und entsprechend die durchschnittlichen generalisierten Kosten der betrachteten Relation. Als relevant wird eine Fahrtmöglichkeit dann angesehen, wenn sie zur Minimierung der generalisierten Kosten der Relation beitragen kann. Dies ist dann der Fall, wenn der Widerstandswert dieser Fahrtmöglichkeit (ohne Anpassungszeit) niedriger ist als das maximale Kostenniveau der generalisierten Kosten (GKmax, s. oben).

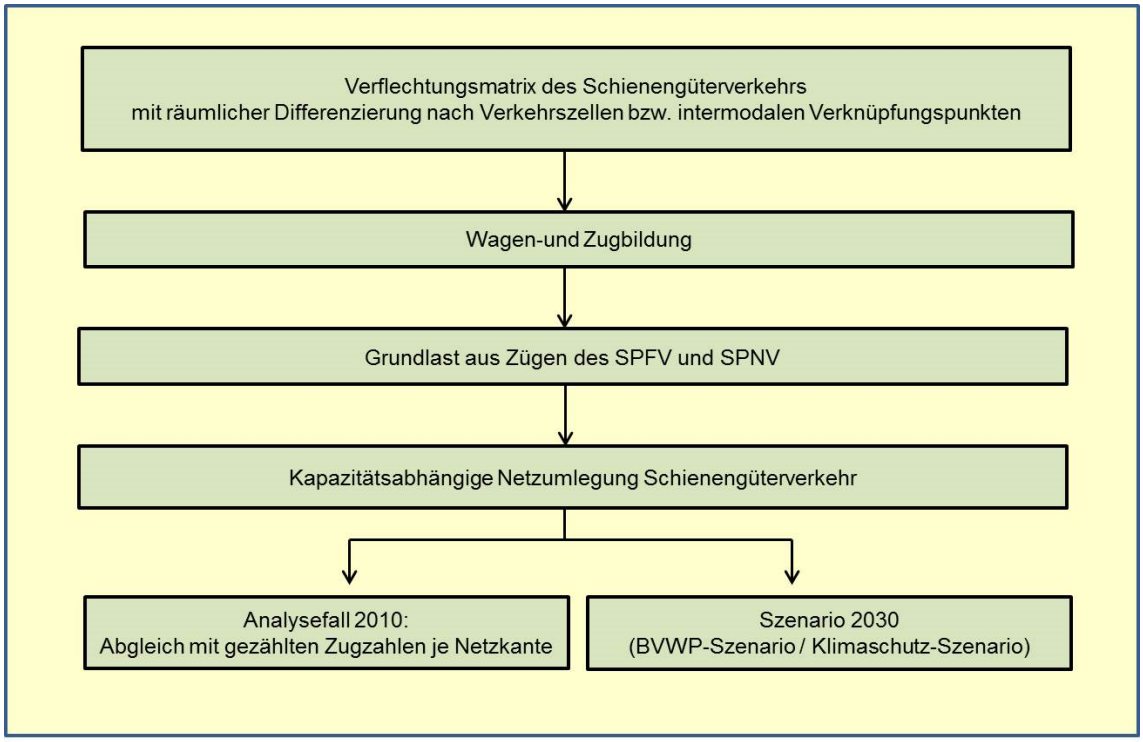
Die Annahme einer optimalen Verteilung der Fahrtmöglichkeiten führt tendenziell zu einer eher optimistischen Einschätzung der Angebotsqualität, die Annahme der konstanten Nachfrageganglinie dagegen zu einer eher ungünstigeren Einschätzung, da tendenziell zu Zeiten einer höheren Nachfrage die Angebotsdichte und damit die Angebotsqualität höher ist als zu Zeiten schwächerer Nachfrage.

Für die kapazitätsabhängige Netzumlegung des Schienengüterverkehrs wird das Verfahren der Wirtschaftlichen Zugführung (WiZug) genutzt, welches erstmals bei der Entwicklung des ersten gesamtdeutschen Bundesverkehrswegeplans (BVWP 1992) eingesetzt wurde. Es wurde seither ständig aktualisiert und methodisch erweitert. Neben den kapazitiven Leistungsfähigkeiten der Strecken werden bei der Wirtschaftlichen Zugführung auch die spezifischen Leistungsfähigkeiten der Knoten berücksichtigt.

Eingangsgröße für die Wirtschaftliche Zugführung sind die Verflechtungsmatrizen des Schienengüterverkehrs. Diese liegen entweder aus der Verkehrsverflechtungsprognose oder aus den Szenarienrechnungen vor. Die Verflechtungsmatrix enthält die aufbereiteten Transportmengen im Hauptlauf und im Zulauf zu See- und Binnenhäfen und ist räumlich nach den definierten Verkehrszellen (in Deutschland auf Kreisbasis, im Ausland teilweise auf stärker aggregierten Stufen) unterschieden.

Ausgangspunkt der Netzumlegung sind die aus dem Nachfragemodell aufbereiteten bzw. prognostizierten Transportmengen des Schienengüterverkehrs. Bei Verkehren, die Teil einer intermodalen Transportkette sind, werden auch die intermodalen Verknüpfungspunkte übergeben, so dass solche Verkehre konsistent direkt an den korrespondierenden Netzpunkten des Schienennetzes eingespeist werden können.

Abb. 2-12: Einordnung der Netzumlegung des Schienengüterverkehrs in den Analyse- und Prognoseprozess



Zunächst erfolgt die Wagen- und Zugbildung. Hierzu werden die Schienenverkehre in beladene Wagen umgerechnet und über ein Fahrzeugmodell die notwendigen Leerwagenbewegungen abgeschätzt. Anschließend erfolgt die Zugbildung, in der die Wagen zu Zügen zusammengestellt werden und ein Fahrplan für den Schienengüterverkehr erstellt wird. Dabei ist für den Einzelwagenverkehr und kombinierten Verkehr eine Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems durchzuführen.

Bei der Netzumlegung des Schienengüterverkehrs wird die Grundlast aus Zügen des SPFV und des SPNV berücksichtigt. Die Netzumlegung erfolgt kapazitätsabhängig, hierzu sind Leistungsfähigkeiten der Knoten und Strecken im Schienennetz zu attributieren. Über geeignete Modelle werden lastabhängige Wartezeiten in den Knoten und Strecken modelliert und in der Netzumlegung mit berücksichtigt.

Bei der Modellierung des Analysezustandes 2010 im Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 wurden die Umlegungsergebnisse mit den je Netzkante gezählten Zugzahlen abgeglichen. Die Modellierung des Prognosezustandes 2030 der Verkehrsverflechtungsprognose erfolgte in einem ersten Iterationsschritt auf Basis der Hypothese der Engpassfreiheit der Verkehrsinfrastruktur. Anhand der unter dieser Hypothese prognostizierten Zugzahlen erfolgte eine

Anpassung der Transportmengen des SGV an die im Teilnetz Schiene 2030 verfügbaren Trassenkapazitäten. Anschließend erfolgte eine Rückkoppelung zur Güterverkehrsmatrix der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen, bei der auch die Interdependenzen zur Netzumlegung im Straßenverkehr und in der Binnenschifffahrt berücksichtigt wurden. Hier ist zu klären, inwieweit die nicht vom SGV abfahrbaren Transportmengen im Straßengüterverkehr bzw. in der Binnenschifffahrt abwickelbar sind.

Die Umlegung in den zwei hier zu definierenden Szenarien wird der gleichen Vorgehensweise folgen.

2.5.2 Produktionssysteme

Aufgrund unterschiedlicher Produktionsregeln werden in der Simulation der Produktionsabläufe, d.h. der Wagen- und Zugbildung, grundsätzlich die Produktionssysteme

- Einzelwagenverkehr (EW),
- Ganzzugverkehr (GZ) in der Unterscheidung nach normalen Ganzzügen und schweren Ganzzügen,
- unbegleiteter kombinierter Verkehr (UKV) und
- Containerverkehr (maritimer KV)
- begleiteter kombinierter Verkehr (Rollende Landstraße, RoLa)

unterschieden. Sämtliche Parameter der Wagen- und Zugbildung, z.B. Angaben zu Musterwagen oder Zugbildungsregeln, können nach diesen Produktionssystemen differenziert werden.

Bei Bedarf können neue Produktionssysteme mit eigenen Produktionsregeln eingeführt werden. Dies betrifft z.B. die Annahme überlanger Güterzüge auf speziellen Relationen für den Prognosehorizont 2030.

2.5.3 Wagenbildung

Ausgangspunkt der Wagenbildung sind die für das Analysejahr 2010 aufbereiteten bzw. für das Prognosejahr 2030 in den unterschiedlichen Szenarien prognostizierten Transportmengen des Schienengüterverkehrs. Die Daten werden in folgender Differenzierung übergeben.

- Quell- und Zielzone (Seehäfen als eigene Verkehrszellen ausgewiesen)
- Gütergruppe (NST-2007, stellenweise verfeinert)

- Produktionssystem (WLV, GZ, UKV, KV, RoLa)
- Transportaufkommen in Tonnen (t)

Beim Produktionssystem GZ ist anhand der Gütergruppe zwischen normalen und schweren Ganzzügen zu unterscheiden. Schweren Ganzzügen sind die Gütergruppen "Kohle; rohes Erdöl und Erdgas" sowie "Erze" zugeordnet, normalen Ganzzügen alle anderen Gütergruppen.

Im ersten Schritt der Wagenbildung sind die zonalen Nachfragemengen auf die Ebene der Bedienpunkte (einschließlich Kbf, Ubf, Rbf/Drehscheibe) des Netzmodells abzubilden. Hierzu ist jede Verkehrszelle systemspezifisch an einen oder mehrere Einspeispunkte des Netzes angebunden. Über eine Bestwegsuche im Schienennetz kann dann für jede Quelle-Ziel-Relation und jedes Produktionssystem das Paar von Einspeispunkten ermittelt werden, welches die Transportzeit Quell-Zonenschwerpunkt → Quell-Einspeispunkt → Ziel-Einspeispunkt → Ziel-Zonenschwerpunkt minimiert.

Im zweiten Schritt sind die Nachfragemengen (Tonnen) in beladene Wagen umzurechnen. Dies erfolgt auf Basis von sog. Musterwagen, die je Produktionssystem und Gütergruppe vorzugeben sind und folgende Merkmale beinhalten:

- Mittlere Beladung (t)
- Eigengewicht (t)
- Länge (m)
- Anzahl Ladeeinheiten (nur für Produktionssystem UKV)

Über die mittlere Beladung und das Eigengewicht der Musterwagen lassen sich die Nachfragemengen direkt in beladene Wagen umrechnen.[38] Die Länge der Musterwagen sowie die Anzahl der Ladeeinheiten für den UKV ist zusätzlicher Input für die Zugbildung.

Im dritten und letzten Schritt der Wagenbildung werden über ein Fahrzeugmodell die notwendigen Leerwagenbewegungen abgeschätzt. Dabei gilt grundsätzlich die Regelung, dass Leerwagen in demjenigen Produktionssystem abgefahren werden, in dem sie produziert wurden. Eine Ausnahme hiervon bilden Wagen bestimmter Gütergruppen des Ganzzugverkehrs, diese nehmen am Leerwagenausgleich des Einzelwagenverkehrs teil und werden dort abgefahren.

[38] Dabei können auch Wagenfrequenzen kleiner Eins entstehen.

Beim Ganzzugverkehr – mit Ausnahme derjenigen Wagen, die am Leerwagenausgleich des EW teilnehmen - ergeben sich die Leerwagen direkt durch Spiegeln der beladenen Wagen, d.h. Ganzzüge fahren zunächst beladen vom Quell- zum Zielort und dann leer wieder zurück. Beim Einzelwagenverkehr und kombinierten Verkehr ist zu berücksichtigen, dass Leerwagen zu einem bestimmten Grade disponierbar und damit räumlich austauschbar sind. Falls also z.B. Leerwagen an einem bestimmten Bahnhof benötigt werden, können diese ggf. von einem "in der Nähe" liegenden Bahnhof angefordert werden, falls sie dort nicht mehr gebraucht werden. Insgesamt stellt sich somit die Aufgabe, die Leerwagenbewegungen so zu disponieren, dass ein möglichst wirtschaftliches (d.h. kostenminimales) Ergebnis erzielt wird. Berücksichtigt man die zusätzlichen Nebenbedingungen, dass keine Leerwagenquellen oder –senken auftreten, so lässt sich die Disposition der Leerwagenbewegungen als ein lineares Optimierungsproblem formulieren:

(Optimierungskriterium) Minimiere die Kosten K für den Transport der Leerwagen. Es gilt:

$$K = \sum_{i,j} k_{i,j} * l_{i,j}$$

(Nebenbedingung 1) Die Anzahl der Leerwagen ist größer gleich Null:

$$\forall i, j : l_{i,j} \geq 0$$

(Nebenbedingung 2) Es treten keine Leerwagenquellen oder –senken auf, d.h. je Leerwagenausgleichsbereich ist die Gesamtzahl der einfahrenden Wagen gleich der Gesamtzahl der ausfahrenden Wagen:

$$\forall i : \sum_{j} (b_{j,i} + l_{j,i}) = \sum_{j} (b_{i,j} + l_{i,j})$$

Dabei bezeichnet:

i, j	Index über die Leerwagenausgleichsbereiche (räumliche Aggregationsbereiche)
$b_{i,j}$	Anzahl der beladenen Wagen von Ausgleichsbereich i nach Ausgleichsbereich j
$l_{i,j}$	Anzahl der leeren Wagen von Ausgleichsbereich i nach Ausgleichsbereich j
K	Gesamtkosten für den Transport der Leerwagen
$k_{i,j}$	Kosten für den Transport eines Leerwagens von Ausgleichsbereich i nach Ausgleichsbereich j, über eine Bestwegumlegung im Schienennetz ermittelt

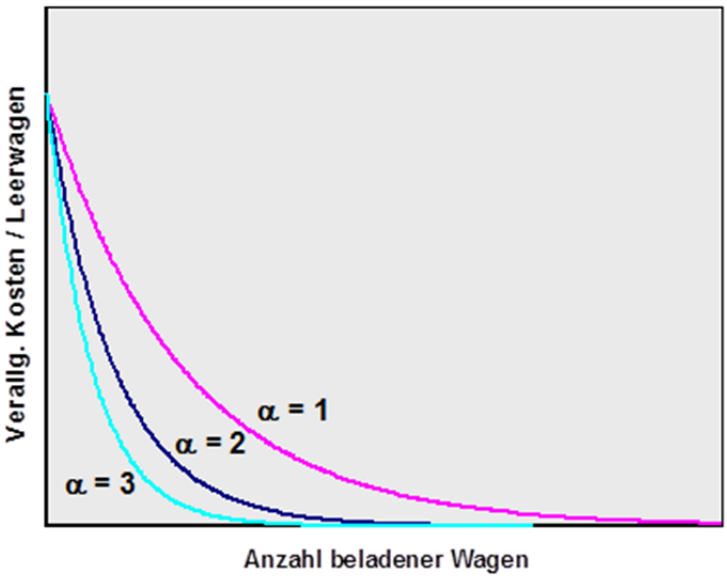
Die unbekannten Größen $l_{i,j}$ können nun mit bekannten Verfahren, z.B. dem Simplexalgorithmus, effizient bestimmt werden.

Bei den Kosten $k_{i,j}$ für den Transport der Leerwagen ist zu berücksichtigen, dass diese Kosten auch von der Anzahl der beladenen Wagen abhängen: Je mehr beladene Wagen und damit Züge verkehren, desto kostengünstiger ist es, Leerwagen durch Anhängen an die bestehenden Züge mit abzufahren. Die aus der Bestwegumlegung resultierenden Kosten werden deshalb wie folgt transformiert, α (≥ 0) stellt einen freien Parameter dar:

$$k_{i,j} \rightarrow k_{i,j} \bullet \exp(-\alpha \bullet b_{i,j})$$

Abb. 2-13 zeigt beispielhaft den Funktionsverlauf dieser Kostentransformation für Parameterwerte **α = 1, 2 und 3. Dabei wird deutlich, dass die Kosten für den Transport der Leerwagen mit** steigender Zahl der beladenen Wagen zurückgehen und der Funktionsverlauf durch den zusätzlichen Parameter α gesteuert (kalibriert) werden kann.

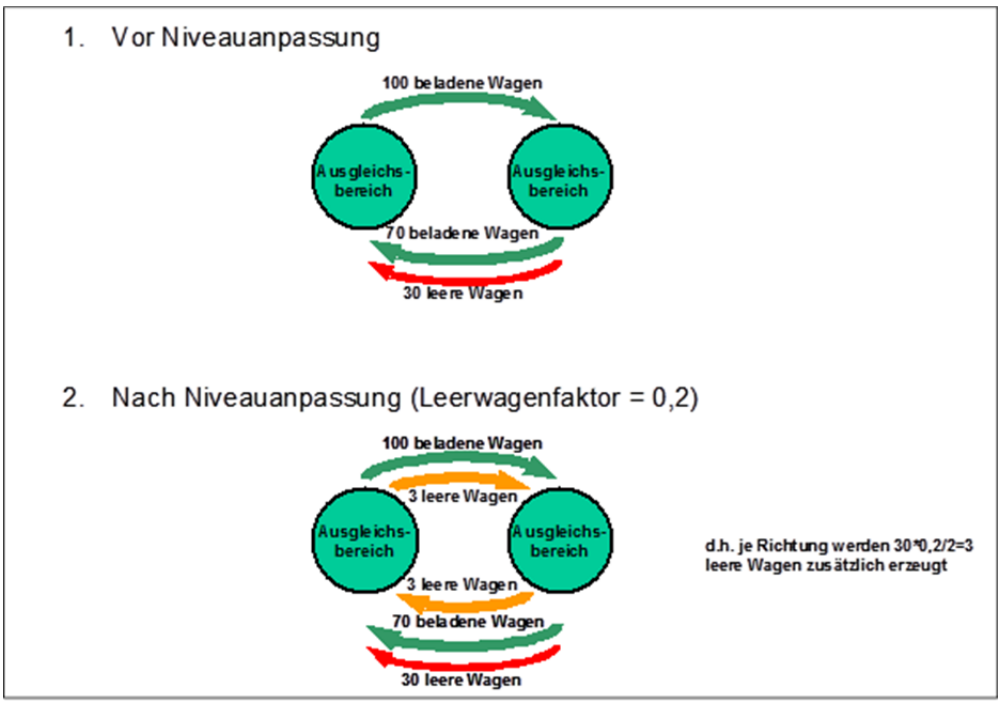
Abb. 2-13: Transformation der Kosten für den Transport der Leerwagen



Da in der Praxis aufgrund zeitlicher Schwankungen des Wagenmaterials, unzureichender Kenntnis, fehlerhafter Disposition etc. eine vollständige Optimierung der Leerwagenströme kaum möglich ist, führt die Leerwagenbildung in der Regel zu niedrigeren Leerwagenanteilen als in der Praxis beobachtet. Deshalb erfolgt im letzten Schritt der Wagenbildung die Kalibrierung der Leerwagenanteile durch system-spezifische Leerwagenfaktoren auf ein vorgegebenes

Niveau. Abb. 2-14 zeigt das Prinzip dieser Niveauanpassung. Ausgangspunkt sind 100 beladene Wagen in Hinrichtung und 70 beladene Wagen in Rückrichtung. Aus dem linearen Dispositionsproblem resultieren 30 leere Wagen in Rückrichtung, beide Richtungen sind somit mit 100 Wagen ausgeglichen. Bei einem Leerwagenfaktor von 0,2 werden 20% mehr Leerwagen erzeugt, also 30*0,2 gleich 6 Leerwagen. Diese werden auf beide Richtungen gleichmäßig verteilt, je Richtung entfallen also 3 zusätzliche Leerwagen.

Abb. 2-14: Kalibrierung der Leerwagenanteile



2.5.4 Zugbildung

Aufgabe der Zugbildung ist die Erstellung eines Fahrplans für den Schienengüterverkehr. Dabei sind zu berücksichtigen:

- Das geltende KV-/Rbf-Konzept (Standorte, Einzugsbereiche und Leistungsfähigkeiten der Zugbildungsanlagen)
- Produktionsregeln
- Restriktionen (z.B. maximale Zuglängen, die sich aus den nutzbaren Gleislängen der Zugbildungsanlagen ergeben)
- (Wunsch-)Abfahrtspegel der Verlader/Nachfrager

Da die Zugbildung ebenso wie die sich anschließende kapazitätsabhängige Netzumlegung auf Basis eines durchschnittlichen Werktages erfolgt, sind die aus der Wagenbildung resultierenden Jahresmengen zunächst auf Tageswerte umzurechnen. Hierzu ist die Zahl der Werktage je Produktionssystem festzulegen.

Zusätzlich zur Pegelung der Jahresmengen auf den Werktag ist eine Pegelung nach Tagesstunden und Tagesminuten notwendig. Dies erfolgt auf Basis von system-spezifischen Stundenpegeln (Wahrscheinlichkeit, dass die Wunschabfahrtszeit der Verlader/Nachfrager in der Tagesstunde liegt), für jeden Wagen wird dann auf Basis der Wahrscheinlichkeiten eine Tagesstunde ausgewählt. Die Tagespegel sind weiterhin nach Knotentypen differenziert und z.B. für Seehäfen und sonstige Einspeispunkte unterschiedlich hinterlegt. Innerhalb der Tagesstunden wird die Tagesminute zufällig bestimmt, diese stellt die Wunschabfahrtszeit der Wagen/ Nachfrage dar.

Ganzzüge fahren beladen direkt von Quelle zu Ziel und – falls die Leerwagen nicht am Leerwagenausgleich des Einzelwagenverkehrs teilnehmen – leer wieder zurück. Die Zugbildung ergibt sich deshalb relativ direkt aus der Anzahl der beladenen Wagen zwischen den Einspeispunkten im Netz und mittleren Auslastungen (bezogen auf Beladung und Länge) in der Differenzierung nach normalen und schweren Ganzzügen. Dabei können auch Zugfrequenzen kleiner Eins entstehen, solche Ganzzüge fahren dann nicht täglich. Ggf. werden Leerzüge in Gegenrichtung erzeugt. Die Abfahrtszeit der Ganzzüge ergibt sich aus den Stundenpegeln.

Beim Einzelwagenverkehr und kombinierten Verkehr stellt sich die Situation wesentlich komplexer dar, da Wagen dieser Produktionssysteme in der Regel mit mehr als einem Zug abgefahren werden und verschiedene Produktionsebenen unterschieden werden müssen:

- Rangierbahnhof/Drehscheibe (Rbf)
- Knotenpunktbahnhof (Kbf)
- Umstellbahnhof/KV-Terminal (Ubf)
- Bedienpunkt (BP)[39]

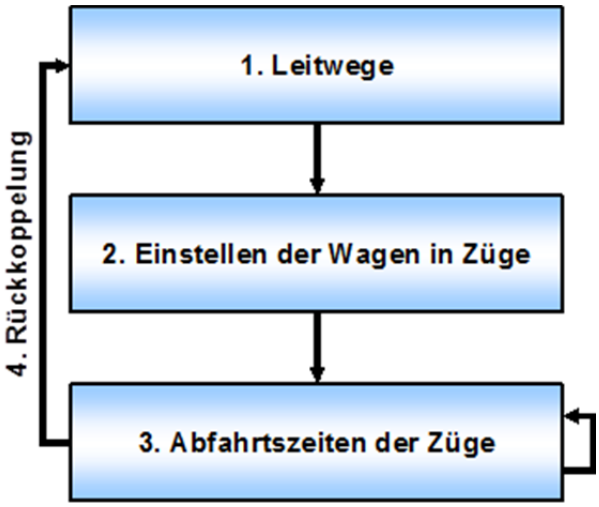
[39] Für den kombinierten Verkehr entfällt die Produktionsebene der Bedienpunkte, da kombinierte Verkehre direkt in den Ubf eingespeist werden.

Für die Produktionssysteme EW und KV ist deshalb das sog. flexible Knotenpunktsystem zu simulieren. Dieses kann gemäß Abb. 2-15 in insgesamt 4 Phasen gegliedert werden:

- Phase 1: Ermittlung der Leitwege
- Phase 2: Einstellen der Wagen in Züge
- Phase 3: Ermitteln der Abfahrtszeiten der Züge
- Phase 4: Rückkoppelung von Phase 3 in Phase 1 zur Optimierung der Leitwege

Innerhalb von Phase 3 findet ebenfalls eine Rückkoppelung zur Optimierung des Fahrplans statt.

Abb. 2-15: Phasen bei der Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems



Phase 1: Ermittlung der Leitwege

In der ersten Phase der Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems werden system- und relations-spezifisch die Leitwege ermittelt, d.h. die optimale Abfolge Quell-Bedienpunkt → Kbf → Rbf → Rbf → Kbf → Ziel-Bedienpunkt für den EW sowie Quell-Ubf → Drehscheibe → Drehscheibe → Ziel-Ubf für den KV. Damit wird für jeden Wagen festgelegt, in welchen Zugbildungsanlagen er – falls die Nachfrage nicht ausreicht, um den Wagen direkt abzufahren - umgestellt werden kann.

Die Ermittlung der Leitwege basiert auf Einzugsbereichen der Zugbildungsanlagen. Diese legen fest, welche Kbf von welchen Bedienpunkten und welche Rbf/Drehscheiben von welchen Kbf/Ubf angefahren werden können. In der Ermittlung der Leitwege wird über eine Bestwegsu-

che im unbelasteten Netz jedem Quelle-Ziel-Paar Bedienpunkt → Bedienpunkt bzw. Kbf/Ubf → Kbf/Ubf unter Berücksichtigung der Einzugsbereiche das optimale Paar Kbf → Kbf bzw. Rbf/Drehscheibe → Rbf/Drehscheibe bestimmt und als Teil des Leitweges angesetzt.

Phase 2: Einstellen der Wagen in Züge

Nach Ermittlung der Leitwege erfolgt das Einstellen der beladenen und leeren Wagen in Züge. Wie Abb. 2-16 zeigt, werden dabei insgesamt 5 Hierarchiestufen durchlaufen und 7 Zugtypen (Zugkennziffern) unterschieden:[40]

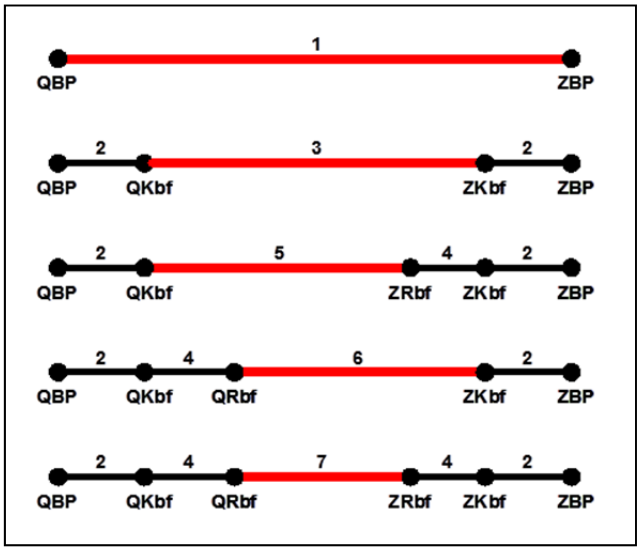
- 1 = direkter Zug zwischen Bedienpunkten
- 2 = CB (Cargo Bedienfahrt) zwischen Bedienpunkt und Kbf
- 3 = IRC (InterRegio Cargo) zwischen Kbf
- 4 = RC (Regio Cargo) zwischen Kbf und eigenem Rbf
- 5 = IRC (InterRegio Cargo) zwischen Kbf und fremdem Rbf
- 6 = IRC (InterRegio Cargo) zwischen fremdem Rbf und Kbf
- 7 = IRC (InterRegio Cargo) zwischen Rbf

Beim Durchlaufen der Hierarchiestufen wird beginnend bei der obersten Stufe (direkter Zug zwischen Bedienpunkten) für jede Relation, sofern die erforderlichen Mengen vorhanden sind, ein maßgeblicher bzw. mehrere maßgebliche Züge gebildet (Zugkennziffern 1, 3, 5-7). Dabei werden sowohl beladene Wagen als auch Leerwagen berücksichtigt. Durch die Zugbildungsregeln nicht abfahrbare Restmengen werden an die nächste Hierarchiestufe übertragen. Restmengen der letzten Stufe werden, falls ein Auffangsystem vorhanden ist, diesem zugeschlagen.[41] Andernfalls werden unterausgelastete Züge gebildet. Züge im Zu- und Ablauf der maßgeblichen Züge (Zugkennziffern 2, 4) werden ebenfalls immer (d.h. ggf. auch unterausgelastet) gebildet, so dass grundsätzlich die gesamte Nachfrage abgefahren wird.

40 Zur Vereinfachung der Terminologie beziehen wir uns nachfolgend auf den Einzelwagenverkehr. Beim kombinierten Verkehr entfällt die Produktionsebene der Bedienpunkte, Kbf ist durch Ubf und Rbf durch Drehscheibe zu ersetzen.

41 Falls Auffangsysteme definiert sind, müssen die Produktionssysteme in einer bestimmten Reihenfolge abgearbeitet werden.

Abb. 2-16: Hierarchiestufen bei der Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems



Maßgebliche Züge werden immer dann gebildet, wenn genügend Menge auf der jeweiligen Quelle-Ziel-Relation vorhanden ist. Zusätzlich sind bei allen Zügen, d.h. maßgebliche Züge und Züge im Zu- und Ablauf, Obergrenzen bezüglich Länge und Gewicht der Züge einzuhalten. Hierzu ist system-spezifisch jeder Zugkennziffer ein sog. Musterzug zugeordnet, der neben physikalischen Angaben des Zuges (Länge und Gewicht der Lok) die Zugbildungsregeln auf Basis von Maximal- und Minimalauslastungen jeweils für Länge und Gewicht des Zuges beinhaltet. Für jeden Musterzug sind also vorgegeben:

- Länge und Gewicht der Lok
- minimale und maximale Zuglänge
- minimales und maximales Zuggewicht

Zudem sind aus der Wagenbildung für jeden Wagen

- die Wagenlänge,
- das Eigengewicht und
- das Gewicht der Beladung

bekannt.

Damit ein maßgeblicher Zug gebildet werden kann, muss mindestens eine der folgenden beiden Kriterien erfüllt sein:

- Summe der Wagenlängen + Loklänge ≥ minimale Zuglänge
- Summe der Wagengewichte + Lokgewicht ≥ minimales Zuggewicht

Die Wagengewichte beinhalten dabei das Eigengewicht sowie das Gewicht der Ladung.

Die maximale Länge und das maximale Gewicht eines Zuges hängen zudem von der bedienten Bahnhof-Bahnhof-Relation und dem gewählten Laufweg (Bestweg) ab, der aus der vorgelagerten Ermittlung der Leitwege für jede Relation bekannt ist. Sie entsprechen dem Minimum aus

- der Maximallänge bzw. dem Maximalgewicht des Musterzugs,
- der zulässigen Maximallänge bzw. dem zulässigen Maximalgewicht auf den Strecken der gewählten Route,
- der maximalen Nutzlängen der Gleise bei Ausfahrt und Einfahrt des Zuges aus einer bzw. in eine Zugbildungsanlage.

Die Frequenz eines Zuges beträgt zunächst immer Eins; d.h. der gebildete Zug verkehrt - unabhängig von seiner Auslastung - täglich. Um auch nicht täglich verkehrende Züge modellieren zu können – dies gilt speziell für den kombinierten Verkehr – kann je Musterzug zusätzlich eine sog. Standardlänge vorgegeben werden. Für Züge mit geringerer Länge als der Standardlänge erfolgt dann eine Frequenzanpassung wie folgt:

Frequenz des Zuges = Länge des Zuges / Standardlänge

Bei einer Zuglänge, die z.B. nur halb so hoch ist wie die Standardlänge, wird die Frequenz des Zuges also auf den Wert 0,5 gesetzt und der Zug würde in diesem Fall nur jeden zweiten Tag verkehren.

Im letzten Schritt des Stufenprozesses zur Simulation des flexiblen Knotenpunktsystems sind die noch verbleibenden Restmengen – sofern kein Auffangsystem definiert ist - im "starren" Knotenpunktsystem zwischen den Rangierbahnhöfen/Drehscheiben abzufahren. Dabei werden für alle Rbf/Drehscheibe–Rbf/Drehscheibe-Relationen, bei denen die Wagenmenge das erforderliche Auslastungsminimum überschreitet, Direktzüge zwischen den Rangierbahnhöfen/Drehscheiben gebildet und die Wagen entsprechend in diese eingestellt. Aus diesen Direktverbindungen zwischen den Rangierbahnhöfen/Drehscheiben wird dann ein neues Netz mit den Streckeneigenschaften Entfernung, Fahrzeit und Frequenz gebildet. Anschließend erfolgt in diesem neuen Netz eine Bestwegsuche für all diejenigen Wagen, für die sich keine Direktverbindung gelohnt hat, solche Wagen werden also ein- oder mehrfach Fern-Fern umgestellt.[42] Eventuell muss das so gebildete Netz zwischen den Rangierbahnhöfen/Drehscheiben iterativ um neue Direktverbindungen ergänzt werden.

[42] Die maximal zulässige Anzahl von Fern-Fern-Umstellungen kann system-spezifisch vorgegeben werden.

Phase 3: Ermitteln der Abfahrtszeiten der Züge

Nach Einstellen der Wagen in die Züge werden die Abfahrtszeiten der Züge festgelegt. Dies erfolgt zunächst auf Basis der über die Stundenpegel festgelegten (Wunsch-)Abfahrtszeiten der Wagen. Da mit einem durchschnittlichen Werktag gerechnet wird, kann nicht einfach die zeitlich letzte Abfahrtszeit der Wagen als Abfahrtszeit der Züge gewählt werden. Stattdessen wird die Abfahrtszeit eines Zuges über ein Optimierungsverfahren jeweils minutenscharf so bestimmt, dass die Summe der Wartezeiten der Wagen auf Abfahrt – d.h. die Summe der Differenzen "Abfahrtszeit des Zuges" – "Wunschabfahrtszeit der Wagen" – minimiert wird. Ggf. müssen Wagen auf die Abfahrt am nächsten Tag warten. Zusätzlich wird eine fixe, lastunabhängige Einstellzeit der Wagen in die Züge berücksichtigt.

Bei Wagen, die in Zugbildungsanlagen zu neuen Zügen zusammengestellt werden, kann der Wagen erst dann wieder abgefahren werden, wenn er aus dem einfahrenden Zug ausgestellt und in den abfahrenden Zug eingestellt wurde. Für jeden Wagen ist deshalb die frühestmögliche Abfahrtszeit aus der Zugbildungsanlage zu ermitteln. Diese ergibt sich wie folgt:

Frühestmögliche Abfahrtszeit	=	Ankunftszeit des einfahrenden Zuges
	+	fixe, lastunabhängige Ausstellzeit des Wagens
	+	lastabhängige Umstellzeit des Wagens
	+	fixe, lastunabhängige Einstellzeit des Wagens

Die Abfahrtszeit des ausfahrenden Zuges ergibt sich dann, wie oben dargestellt, durch das Optimierungsverfahren zur Minimierung der Summe der Wartezeiten der Wagen.

Zur Bestimmung der lastabhängigen Umstellzeiten der Wagen sind je Zugbildungsanlage folgende Angaben notwendig:

- Rangierpause ja/nein, differenziert nach Stundengruppen
- Leistungsfähigkeit, differenziert nach Stundengruppen

Insgesamt werden fünf Stundengruppen unterschieden, diese sind flexibel definierbar. Die Leistungsfähigkeiten werden in der Einheit Wagen pro Stunde für Kbf/Rbf/Drehscheibe und der Einheit Ladeeinheiten pro Stunde für Ubf vorgegeben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein gewisser Anteil der Wagen aufgrund belegter Richtungs- bzw. Ausfahrgleise mehrfach über den Ablaufberg geschoben werden muss und auch innerhalb einer Stundengruppe Pausen stattfinden können. Beides reduziert die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Zugbildungsanlage.

Die Ermittlung der Umstellzeiten der Wagen erfolgt über ein vereinfachtes deterministisches Modell. Zunächst sind eventuelle Rangierpausen zu berücksichtigen, betroffene Wagen warten bis zum Ende der Rangierpause auf Behandlung. Anschließend werden die Wagen in der zeitlichen Reihenfolge ihres Eintreffens in der Zugbildungsanlage abgearbeitet. Überzählige Wagen, die in einer Tagesstunde aufgrund der begrenzten Leistungsfähigkeit des Ablaufberges nicht abgedrückt werden können, warten bis zum Anfang der nächsten Tagesstunde. Können sie dort wiederum nicht abgedrückt werden, warten sie bis zum Anfang der übernächsten Tagesstunde etc.

Da die auf diese Weise ermittelten Abfahrtszeiten der ausgehenden Züge auch die Ankunftszeiten der einfahrenden Züge und damit die stundengruppen-spezifische Belastung der Zugbildungsanlagen beeinflussen, findet eine Rückkoppelung innerhalb Phase 3 der Zugbildung statt: Die Abfahrtszeiten der Züge werden iterativ so lange angepasst, bis ein weitgehend stabiles und optimiertes Ergebnis vorliegt.

Phase 4: Rückkoppelung von Phase 3 in Phase 1 zur Optimierung der Leitwege

Da zu Beginn der Zugbildung die resultierenden Auslastungen der Zugbildungsanlagen noch nicht bekannt sind, werden die Leitwege in Phase 1 zunächst unter der Annahme unbegrenzter Kapazitäten ermittelt. Dies hat jedoch zur Folge, dass nach Zugbildung einzelne Zugbildungsanlagen deutlich überlastet sein können, obwohl andere "alternative" Zugbildungsanlagen noch freie Kapazitäten aufweisen.

Aus diesem Grunde findet in Phase 4 der Zugbildung eine Rückkoppelung in Phase 1 statt. Hierzu wird die Zugbildung mehrfach durchlaufen und in der Ermittlung der Leitwege jeweils je Zugbildungsanlage eine mittlere lastabhängige Umstellzeit der Wagen berücksichtigt. Die mittleren Umstellzeiten werden dabei in der ersten Iteration der Zugbildung auf Null gesetzt und dann am Ende von Phase 3 aus den Umstellzeiten der Wagen ermittelt. Ergebnis der Rückkoppelung ist, dass zuvor überlastete Zugbildungsanlagen in der nächsten Iteration – soweit möglich – gemieden werden und stattdessen alternative Zugbildungsanlagen angefahren werden, insgesamt also eine Optimierung des gesamten Produktionsprozesses erreicht wird.

2.5.5 Kapazitätsabhängige Netzumlegung

Die kapazitätsabhängige Netzumlegung des SGV erfolgt mit dem Verfahren der Wirtschaftlichen Zugführung (WiZug). Hier werden neben den Leistungsfähigkeiten der Strecken insbesondere auch die Leistungsfähigkeiten der Knoten mit berücksichtigt.

Ausgangspunkt der Wirtschaftlichen Zugführung ist das für jeden Fall bzw. Szenario aufgebaute Schienennetz sowie die Grundlast aus Personenfern- und Personennahverkehrszügen. Anschließend werden die in der Zugbildung gebildeten Güterzüge in einer definierten Reihenfolge Zug für Zug auf das Schienennetz umgelegt. Bewährt hat sich dabei ein zweistufiges Verfahren:

- Empirische Untersuchungen haben ergeben, dass das Schienennetz dann am besten ausgelastet wird, wenn zunächst die Zubringerzüge zwischen Bedienpunkt und Knotenpunktbahnhof sowie zwischen Knoten-/Umstellbahnhof und eigenem Rangierbahnhof/Drehscheibe und erst danach die sonstigen Züge umgelegt werden. Wegen der relativ geringen Laufweite und der räumlichen Lage der Zugbildungsanlagen stehen Zubringerzügen in der Regel keine oder nur geringfügige Umwegmöglichkeiten zur Verfügung. Durch die vorrangige Umlegung wird sichergestellt, dass die Zubringerzüge bei zunehmender Netzbelastung ihre optimalen Wege weitgehend beibehalten und nicht auf extrem weite Umleitungen geführt werden.
- Ansonsten erfolgt die Reihung und Umlegung der Züge absteigend nach der Zuglänge. Die Zuglänge dient dabei als einfach zu handhabendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines Zuges.

Die Umlegung selbst erfolgt für jeden Güterzug mittels einer Bestwegroutensuche im mit bereits umgelegten Zügen belasteten Schienennetz. Zu berücksichtigen sind dabei zunächst

- Fahrverbote auf Strecken (Von-Knoten → Nach-Knoten) und in Knoten (Von-Knoten → Über-Knoten → Nach-Knoten) sowie
- Strecken-spezifische maximale Zuglängen und Zuggewichte.

Unter den zulässigen Routen ist im Rahmen der Bestwegroutensuche jeweils diejenige Route R zu ermitteln, welche die generalisierten Kosten GK_R minimiert. Diese setzen sich aus Zeit- und Kostenkomponenten zusammen:

$$GK_R = t_R + \gamma\, TP_R$$

Dabei bezeichnet:

GK_R Generalisierte Kosten der Route R

t_R Fahrzeit des Zuges auf der Route R (in Minuten)

TP_R Summe der Trassenpreise auf der Route R (in Euro/Zug)

γ Gewichtung der Trassenpreise für die Routensuche

Während sich der Trassenpreis TP_R einfach durch Summation der an den Strecken der Route hinterlegten Trassenpreisen ergibt, sind bei der Fahrtzeit t_R verschiedene Zeitkomponenten einzubeziehen:

- Abbiegewiderstände (Von-Strecke → Nach-Strecke)
- Traktionswechselzeiten
- Streckenspezifische planmäßige Fahrzeiten, differenziert nach schnellen und langsamen Güterzügen
- Auf Strecken und in Knoten aufgrund beschränkter Kapazitäten entstehende lastabhängige Wartezeiten

Nach Ermittlung der Bestwegroute R werden entlang der Route die Kanten- und Knotenbelastungen angepasst und die in den Strecken und Knoten entstehenden lastabhängigen Wartezeiten für die Umlegung der nachfolgenden Züge neu berechnet. Die Netzumlegung erfolgt also immer unter Berücksichtigung der Netzbelastung bereits umgelegter GV-Züge sowie der Grundlast aus PV-Zügen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass bei zunehmender Netzbelastung und damit einhergehenden Engpässen Züge sukzessive auf Alternativrouten umgelegt werden und somit eine gleichmäßige und wirtschaftlich optimale Netzumlegung erzielt wird.

Berücksichtigung von Tageszeitscheiben

Die Aufgliederung der Netzbelastung nach Zeitscheiben erlaubt die Differenzierung der Netzbelastung nach Hauptverkehrszeiten, Nebenverkehrszeiten und Schwachlastzeiten im Tagesverlauf mit ihren sehr unterschiedlichen Mischungsverhältnissen und Leistungsfähigkeiten. So verkehrt der schnelle Personenfernverkehr weitgehend gleichmäßig in der Tagesbetriebszeit mit deutlicher Ausdünnung in der Nacht. Der Nahverkehr weist erhebliche Spitzen zur Berufsverkehrszeit, ebenfalls mit deutlich schwächerem Nachtverkehr auf. Langlaufende Güterzüge verkehren verstärkt nachts, der Sammel- und Verteilverkehr deckt sich jedoch zeitlich zum Teil mit Spitzen des Nahverkehrs. Die Kumulation dieser Effekte führt notwendigerweise zu deutlich unterschiedlichen Belastungslagen in einzelnen Zeitabschnitten sowohl in der quantitativen Höhe als auch in seiner qualitativen Zusammensetzung nach Fahrgeschwindigkeiten.

Im Verfahren der Wirtschaftlichen Zugführung wird deshalb nach fünf Zeitscheiben pro Tag differenziert. Diese sind so definiert, dass dadurch jeweils die bereits beschriebenen Hauptverkehrszeiten abgedeckt sind und jede Zeitscheibe dadurch einen eigenen Charakter hat:

- Zeitscheibe 1: 06.00 Uhr bis 09.00 Uhr
- Zeitscheibe 2: 09.00 Uhr bis 16.00 Uhr
- Zeitscheibe 3: 16.00 Uhr bis 19.00 Uhr
- Zeitscheibe 4: 19.00 Uhr bis 22:00 Uhr
- Zeitscheibe 5: 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr

Diese Zeitscheibendefinition entspricht den Anforderungen der Schall 03.

Da die Leistungsfähigkeiten der Strecken und Knoten insbesondere auch vom Mischungsverhältnis aus schnellen und langsamen Zügen abhängen, erfolgt die Modellierung des Leistungsverhaltens der Strecken und Knoten nach Zeitscheiben getrennt. Die Differenzierung nach Zeitscheiben erlaubt darüber hinaus das Sperren von Strecken für einzelne Zeitscheiben, so kann z.B. für den Güterverkehr eine Strecke tagsüber gesperrt und nur nachts geöffnet werden. Gleiches gilt für nach Zeitscheiben unterschiedliche Vorrangregelungen.

Modellierung des Leistungsverhaltens der Strecken

Die Modellierung des Leistungsverhaltens der Strecken erfolgt im Verfahren der Wirtschaftlichen Zugführung auf Basis eines vom Verkehrswissenschaftlichen Institut der RWTH Aachen (VIA) entwickelten analytischen Warteschlangenansatzes. Dieses in WiZug implementierte Verfahren ist insoweit zum Verfahren STRELE konsistent, als beide Verfahren die sogenannte Mindestzugfolgezeit z_{ij} als Parameter für die Bedienungszeit verwenden und die Ermittlung der außerplanmäßigen Wartezeiten (Verspätungen) mit der identischen Formel (STRELE-Formel nach Schwanhäußer) erfolgt. Das implementierte Verfahren zur Modellierung des Leistungsverhaltens der Strecken ist ausführlich in einem Methodenbuch[43] beschrieben.

Berücksichtigung von GV-Vorrangstrecken

Zur Berücksichtigung von GV-Vorrangstrecken wurde das Verfahren der Wirtschaftlichen Zugführung dahingehend erweitert, dass der Personenverkehr im Vorrangnetz Güterverkehr dann entweder nicht mehr oder nur mit harmonisierter Geschwindigkeit verkehren darf, wenn nur so

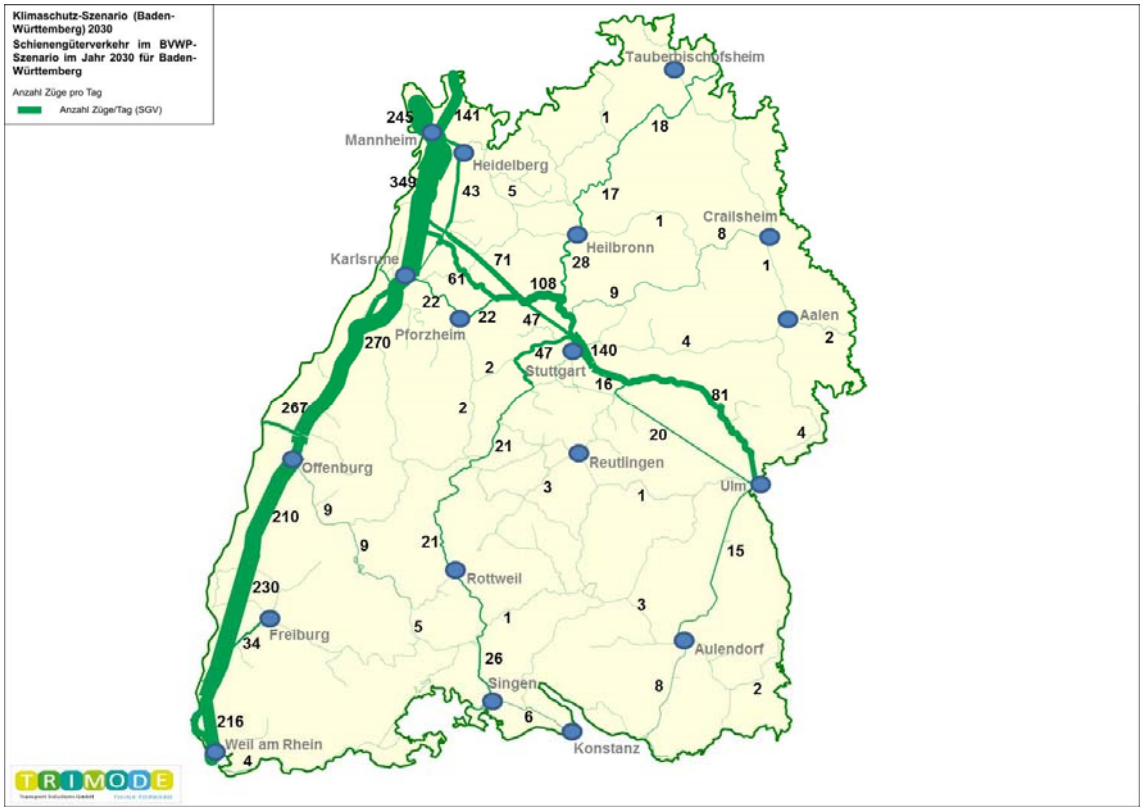
43 Verkehrswissenschaftliches Institut der RWTH Aachen (VIA), Weiterentwicklung der belastungsabhängigen Wartezeitfunktion der Strecken in WiZug, Methodenbuch, Aachen 2003.

Friktionen auf den Güterverkehr vermieden werden können. Technisch wird dies im Simulationsprozess so gelöst, dass Netzbelastungen durch Personenverkehrszüge auf GV-Vorrangstrecken für den Güterverkehr ignoriert werden und nach Ablauf des Simulationsprozesses eine Rückkopplung an das PV-Modell erfolgt, falls Personenverkehrszüge den Güterverkehr auf GV-Vorrangstrecken behindern. Im Rahmen der Simulation des Nachfrageverhaltens im Personenverkehr sind dann dort geeignete Maßnahmen zu ergreifen.

Die Definition der GV-Vorrangstrecken erfolgt über ein nach Zeitscheiben differenziertes Streckenattribut.

Das Ergebnis des Umlegungsprozesses im Schienengüterverkehr für die Prognose 2030 aus der Verkehrsverflechtungsprognose kann Abb. 2-17 entnommen werden.

Abb. 2-17: Umlegung des Schienengüterverkehrs in der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 für Baden-Württemberg



Im Ergebnis des Schienenumlegungsprozesses können folgende kantenspezifische Daten gewonnen werden:

- Transportmengen nach Relationen, Gütergruppen und Produktionssystemen
- Anzahl Personenzüge, differenziert nach 6 Modellzügen (3 Nah- und 3 Fernverkehrszügen), nach Zeitscheiben und Richtungen
- Anzahl Güterverkehrszüge nach Zeitscheiben und Richtungen
- Anzahl Wagen nach Zeitscheiben und Güterverkehrsrichtungen
- Kapazität und Auslastung der Strecke (auch nach Zeitscheiben)
- durchschnittliche Wartezeiten nach Personen- und Güterverkehrszügen (auch nach Zeitscheiben)
- Grenzwartezeit der Züge (nach Zeitscheiben).

Für alle umgelegten Züge können die Transportzeiten, die kapazitativen außerplanmäßigen Wartezeiten und die Transportkosten angegeben werden. Die hierüber gewonnenen Informationen gehen als Inputdaten in das Verkehrsmittelwahlmodell, und somit in das Nachfragemodell, über.

2.6 Umlegungsmodell Binnenschifffahrt

Das Umlegungsmodell Binnenschifffahrt basiert auf dem im Rahmen der Vorarbeiten zum BVWP 2015 erarbeiteten Wasserstraßennetzmodell. Dieses Netzmodell beinhaltet für den Analysefall des Jahres 2010 und den Bezugsfall 2030 alle für die Umlegungsrechnungen benötigten knoten- und streckenspezifischen Daten und Informationen.

Das Netz umfasst insgesamt rd. 1.200 inländische und ausländische Netzknoten. Hierbei ist zwischen Verbindungs- und Hafenknoten zu unterscheiden. Die erstgenannten, meist an Mündungen oder Abzweigungen gelegen, sind erforderlich, um alle Teilstrecken des Netzes zu verknüpfen; dort findet kein Umschlag statt. Die Hafenknoten binden hingegen als Einspeisungspunkte der Güterverkehrsmengen die BVWP-Verkehrszellen an das Wasserstraßennetz an. Ausgehend von der Systematik der Häfen und Umschlagstellen des Statistischen Bundesamtes wurden zur Bildung der Einspeisungspunkte Hafengruppen zusammengefasst, die jeweils im selben Kreis und am selben Wasserstraßenabschnitt liegen. Die Anzahl der Einspeisungspunkte eines Kreises wird somit durch die Anzahl der Wasserstraßenabschnitte determiniert, die diesen Kreis berühren. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Einspeisungspunkte in Baden-Württemberg.

Tab. 2-20: Einspeisungspunkte des Wasserstraßennetzmodells in Baden-Württemberg

Zelle	Zellenname	Knoten	Knotenname
8111	Stuttgart, Landeshauptstadt, Kreisfreie Stadt	316218000	HF Stuttgart
8116	Esslingen, Landkreis	316216000	HF Plochingen
8118	Ludwigsburg, Landkreis	316214000	HF Neckarweihingen Umschlagstelle
8121	Heilbronn, Kreisfreie Stadt	316108000	HF Heilbronn
8125	Heilbronn, Landkreis	316102000	HF Heidelberg Zementwerk
8128	Main-Tauber-Kreis	316118000	HF Wertheim
8212	Karlsruhe, Kreisfreie Stadt	315206000	HF Karlsruhe
8215	Karlsruhe, Landkreis	315212000	HF Rheinhausen
8216	Rastatt, Landkreis	315216000	HF Dow Chemical
8222	Mannheim, Kreisfreie Stadt	315110000	HF Mannheim
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	315116000	HF Obrigheim Kraftwerk
8226	Rhein-Neckar-Kreis	315108000	HF Ladenburg Umschlagstelle
8226	Rhein-Neckar-Kreis	315183000	HF Großer Hacken
8315	Breisgau-Hochschwarzwald, Landkreis	317102000	HF Breisach
8316	Emmendingen, Landkreis	317182000	HF Wyhl Kiesverladestelle
8317	Ortenaukreis	317108000	HF Kehl
8317	Ortenaukreis	317107000	HF Gerstheim Kraftwerk / Kiesverladung
8336	Lörrach, Landkreis	317304000	HF Weil

Die in- und ausländischen Knoten des Wasserstraßennetzes sind über ihren Namen, ihre Lage (Name und km der Wasserstraße) und die Knotennummer kodiert. Zusätzlich werden für alle Knoten die geografische Lage (in Gauß-Krüger-Koordinaten) sowie der Name der Verkehrszelle, in der der Knoten liegt, angegeben. Die folgende Tabelle zeigt die resultierende Liste der Datenfelder für die Hafenknoten:

Tab. 2-21: Parameter der Hafenknoten des Wasserstraßennetzes

Parameter	Beschreibung
ID	Knotennummer
Ort	Name des Ortes
WST	Name der Wasserstraße
Km	Lage des Knotens an der Wasserstraße (Wasserstraßenkilometrierung)
WST2	Name der zweiten Wasserstraße (optional)
Km2	Lage des Knotens an der zweiten Wasserstraße
WST3	Name der dritten Wasserstraße (optional)
Km3	Lage des Knotens an der dritten Wasserstraße
WST4	Name der vierten Wasserstraße (optional)
Km4	Lage des Knotens an der vierten Wasserstraße
GK_rechts	Rechtswert der Gauß-Krüger-Koordinate des Knotens
GK_hoch	Hochwert der Gauß-Krüger-Koordinate des Knotens
Art	HF (Hafen) oder VP (Verknüpfungspunkt)
Verkehrszelle	BVWP-Verkehrszelle, in der der Knoten liegt

Zu den im Netz erfassten Streckeninformationen gehören neben allgemeinen geographischen Daten auch Geschwindigkeiten, Art des Wasserweges, Schleusenanzahl sowie zugelassene Schiffsgrößen. Die Einordnung eines Streckenabschnittes in Bezug auf die Art des Wasserweges erfolgt für die Binnenwasserstraßen getrennt nach den Kategorien Kanal, geregelter Fluss oder staugeregelter Fluss. Durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeiten werden je nach Richtung für jeden Abschnitt vorgegeben.

Zur Festlegung zugelassener Schiffsgrößen je Streckenabschnitt wird zwischen Einzelfahrern und Schubverbänden differenziert. Die Eingrenzung erfolgt sowohl durch die Schiffslängen als auch durch die jeweilige Breite. Als ein weiterer kapazitätsbestimmender Faktor werden die Ablade- bzw. Fahrrinnentiefen für jeden Teilabschnitt des Netzes erfasst. Bei nicht staugeregelten Flüssen enthalten die Streckeninformationen zusätzlich einen Schlüssel, mit dessen Hilfe die in separaten Dateien erfassten Wasserstanddauerlinien zugewiesen werden.

Die folgende Tabelle zeigt die Liste der Streckenparameter des Netzmodells.

Tab. 2-22: Parameter der Netzstrecken des Wasserstraßennetzes 2010/2030

Parameter	Beschreibung
ID	Strecken-ID
WST	Name der Wasserstraße
von_Knoten	Nummer des Startknotens
von_km	Lage des Startknotens an der Wasserstraße (Kilometrierung)
von_Ort	Bezeichnung des Startknotens
bis_Knoten	Nummer des Endknotens
bis_km	Lage des Endknotens an der Wasserstraße (Kilometrierung)
bis_Ort	Bezeichnung des Endknotens
Laenge	Streckenlänge zwischen den Knoten in km
Art	Art des Wasserweges (Analysejahr) (K = Kanal; F = staugeregelter Fluss; R = nicht staugeregelter Fluss)
Schleusen	Anzahl der Schleusen (Analysejahr)
v_Tal	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromabwärts in km/h (Analysejahr)
v_Berg	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromaufwärts in km/h (Analysejahr)
Pegel	Codierung Zuordnung Pegeldaten im Jahreslauf (Analysejahr)
Abl_Tiefe	Abladetiefe (Analysejahr)
F_Tiefe	Fahrrinnentiefe (Analysejahr)
Verband_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Analysejahr)
Verband_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Analysejahr)
CO_Lagen	Anzahl der Containerlagen (Analysejahr)
B_Hoehe	Brückendurchfahrtshöhe (Analysejahr)
ECMT	Wasserstraßenklasse (Analysejahr)
E_lmax	Maximale Länge eines Einzelfahrers (Analysejahr)
V_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Analysejahr)
E_bmax	Maximale Breite eines Einzelfahrers (Analysejahr)
V_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Analysejahr)
max_EF_nr	Maximale Einzelfahrer-Klasse (Analysejahr)
max_SL_nr	Maximale Schubleichter-Klasse (Analysejahr)
Eichname	Name des zur Strecke gehörenden Eichpunktes
inner_d	Streckenanteil, der zum deutschen Binnenschifffahrtsnetz gehört (0 bis 1)
n30_Art	Art des Wasserweges (Prognosejahr)
n30_Schleusen	Anzahl der Schleusen (Prognosejahr)
n30_v_Tal	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromabwärts in km/h (Prognosejahr)
n30_v_Berg	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromaufwärts in km/h (Prognosejahr)
n30_Pegel	Codierung Zuordnung Pegeldaten im Jahreslauf (Prognosejahr)
n30_Abl_Tiefe	Abladetiefe (Prognosejahr)
n30_F_Tiefe	Fahrrinnentiefe (Prognosejahr)
n30_Verband_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_Verband_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_CO_Lagen	Anzahl der Containerlagen (Prognosejahr)
n30_B_Hoehe	Brückendurchfahrtshöhe (Prognosejahr)
n30_ECMT	Wasserstraßenklasse (Prognosejahr)
n30_E_lmax	Maximale Länge eines Einzelfahrers (Prognosejahr)
n30_V_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_E_bmax	Maximale Breite eines Einzelfahrers (Prognosejahr)
n30_V_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_max_EF_nr	Maximale Einzelfahrer-Klasse (Prognosejahr)
n30_max_SL_nr	Maximale Schubleichter-Klasse (Prognosejahr)

Soweit die Transportrouten aufgrund der Struktur des Wasserstraßennetzes nicht eindeutig vorgegeben sind, wird die Routenwahl in einem ersten Schritt anhand der betriebswirtschaftlichen Transportkosten der Schiffe simuliert. Die Berechnung der Transportkosten erfolgt hierbei unter Berücksichtigung der jeweils relationsspezifischen Abladeverhältnisse und Fahrzeiten getrennt nach Schiffsgrößenklassen. Es wird damit möglich, dass Schiffe einen Umweg gegenüber dem entfernungs- bzw. zeitkürzesten Weg in Anspruch nehmen, weil sie auf diesem durch günstigere Abladebedingungen kostengünstiger transportieren können.

Die für die Routensuche benötigten betriebswirtschaftlichen Kosten der Binnenschifffahrt liegen im Ergebnis der Vorarbeiten für den BVWP 2015 zum Preisstand des Jahres 2012 nach Schiffstypen und Größenklassen vor. Die folgende Tabelle dokumentiert die Kostensätze der Motorschiffe bei Vollauslastung getrennt nach Bereithaltungskosten (Vorhaltung und Personal je Tonnenstunde) und Betriebsführungskosten (Fortbewegungskosten je tkm).

Tab. 2-23: Für die Umlegung verwendete betriebswirtschaftliche Kostensätze der Motorschiffe bei Vollauslastung

Größenklasse TT	Bereithaltung (EUR je Tonnenstunde)	Fortbewegung (EUR je Tonnenkilometer)
0 - 400	0,2030	0,0171
401 - 650	0,1530	0,0086
651 - 900	0,1260	0,0057
901 - 1.000	0,1180	0,0047
1.001 - 1.500	0,1100	0,0041
1.501 - 2.000	0,0890	0,0031
2.001 - 2.500	0,0780	0,0029
2.501 - 3.000	0,0680	0,0024
> 3.000	0,0540	0,0021

Zur Bestimmung der kostenoptimalen Route für eine Klasse ergibt sich das Problem, dass die Kosten von der tatsächlich möglichen Beladung abhängen, die sich aber erst aus dem Gesamtpfad ergibt. Daher wird die Routensuche für den Nichtcontainerbereich für fünf verschiedene Abladetiefen von 120 cm bis 280 cm in Schritten von 40 cm durchgeführt. Kanten, die eine entsprechende Abladetiefe nicht ermöglichen, werden bei der Routensuche ggf. inaktiv gesetzt.

Im Containerbereich wird entsprechend mit vier verschiedenen Angaben (1 bis 4) zur Lagigkeit gerechnet. Kanten, auf denen eine Fahrt mit entsprechend vielen Containerlagen nicht möglich ist, werden ggf. inaktiv gesetzt.

Als Routensucher wird der Dijkstra-Algorithmus[44] verwendet, der in einem Suchlauf die optimalen Routen von einer Quelle zu allen Zielen bestimmt und gleichzeitig die zugehörigen Knotenfolgen bereitstellt.

Entlang der berechneten Routen werden für jede Klasse einer Relation die wasserstandbedingten Auslastungsgrade ermittelt. Dabei wird bei Fahrten über mehrere Strecken mit wechselnden Fahrwassertiefen jeweils die für die jeweilige Schiffsgrößenklasse ungünstigste Strecke als limitierend angenommen. Der wasserstandbedingte Auslastungsgrad Aw_t auf einer Route P an einem Tag t des Jahres wird wie folgt bestimmt:

$$Aw_t = \frac{\min(T_S, T_k, T_{Z,t} - C) - T_0}{T_S - T_0} \cdot 100\,\%$$

Dabei sind (alle Maßangaben in m):

T_S durchschnittlicher Tiefgang der Fahrzeuge bei voller Abladung

T_k Minimum der zugelassenen Abladetiefen auf allen Strecken der Route P mit konstanter Abladetiefe; sind in P keine solche Strecken enthalten, so wird $T_k = T_S$ gesetzt

$T_{Z,t}$ Fahrrinnentiefe der schlechtesten Wasserstraße mit nicht konstanter Abladetiefe

C benötigte Kielfreiheit (0,2 bis 0,4)

T_0 mittlere Leertauchung der Fahrzeuge

Als tatsächliche Betriebstage der Binnenschifffahrt werden alle Tage definiert, an denen der wasserstandbedingte Auslastungsgrad mindestens 20 % beträgt. Sei B die Menge dieser Tage. Der mittlere wasserstandbedingte Auslastungsgrad Aw_{eff} ergibt sich dann als:

$$Aw_{eff} = \frac{1}{|B|} \cdot \sum_{t \in B} Aw_t$$

44 S. Dijkstra E.W., A note on two problems in connexion with graphs, in: Numerische Mathematik 1 (1959), S. 269–271.

Sind in einer Route P nur Strecken mit konstanter Abladetiefe enthalten, so vereinfacht sich die obige Formel zu

$$Aw_{eff} = \frac{\min(T_S, T_k) - T_0}{T_S - T_0} \cdot 100\%$$

In einem weiteren Schritt werden die sich aus der Routenwahl ergebenden Belastungswerte an vorgegebenen Eichpunkten mit statistischen Angaben zum Aufkommen nach Fahrtrichtungen abgeglichen. Soweit sich aus diesem "Soll-Ist-Vergleich" signifikante Abweichungen an einzelnen Querschnitten ergeben, werden in einem mehrstufigen iterativen Verfahren die Modellergebnisse so weit wie möglich an die Zähldaten angepasst. Dies erfolgt über eine entsprechende Korrektur der Routenwahl für die jeweils relevanten Quell-Ziel-Relationen (sog. "Umleitungen"). Hierbei wird der "umleitungsbedingte" Anstieg der Transportkosten minimiert, d.h. es werden sukzessive zunächst jene Verkehre umgeleitet, die vergleichsweise geringe Transportkostenunterschiede für die Alternativrouten aufweisen.

Das Verfahren wird generell nur in dem Umfang durchgeführt, wie die Verbesserung der Ergebnisse an einem Querschnitt nicht zu einer Verschlechterung an einem anderen Eichpunkt führt.

Die Umlegungsrechnungen für die Binnenschifffahrt umfassen neben den Güterströmen auch die streckenspezifischen Flottenstrukturen. Die Flottenstrukturen geben an, mit welchem Schiffstyp (Motorschiffe, Schubleichter) und in welchen Schiffsgrößenklassen die Gütermengen transportiert werden. Die Bestimmung der Flottenstrukturen erfolgt hierbei grundsätzlich differenziert nach Transportrelationen. Die Abschätzung der regionalen Flottenstrukturen für das Jahr 2030 setzt hierbei auf nach Relationsgruppen differenzierten Modellergebnissen für das Analysejahr 2010 auf.

Für bereits in der Analysematrix 2010 existierende Relationen (unterschieden nach "vonZone - nachZone - GG - CO/NC") wird die (End-)Struktur aus der Umlegung 2010 als Startstruktur 2030 verwendet. Gibt es keine Datensätze mit Übereinstimmung "vonZone - nachZone - GG - CO/NC", so wird alternativ nach Sätzen gesucht, bei denen "vonZone - nachZone -CO/NC" übereinstimmen. Gibt es solche Datensätze, so wird das gewichtete Mittel der Flottenstruktur dieser Datensätze für die der "neuen" Relation verwendet.

Die verbleibenden "neuen" Relationen, für die noch keine Startstrukturen definiert sind, werden bei der Umlegung als letzte bearbeitet (in der Basisprognose betrifft dies etwa. 1,5 % der (Ha-

fen-)Relationen mit einer Bruttoladungsmenge von insgesamt knapp 1,5 Mio. t). Zu diesem Zeitpunkt stehen sowohl die Startstrukturen der vorher umgelegten Relationen als auch deren Pfade sowie der Pfad einer Bestwege-Umlegung (ohne Klassenrestriktionen) für die neue Relation fest. Aus den bereits umgelegten Relationen werden nun diejenigen ermittelt, deren Pfade dem Bestweg-Pfad der jeweiligen "neuen" Relation am besten entsprechen. Hierzu wird folgende Suchhierarchie abgearbeitet, bis mindestens eine "geeignete" Relation gefunden wird:

- Suchlevel 1:
  Start- und Zielknoten der "neuen" Relation sind im Pfad in der gleichen Reihenfolge enthalten, Containermerkmal stimmt überein; "geeignet" sind darunter alle Relationen mit der kürzesten Gesamtlänge von Teilstrecken vor bzw. nach Startknoten und Endknoten
- Suchlevel 2:
  Start- und Zielknoten der "neuen" Relation sind im Pfad in der gleichen Reihenfolge enthalten, Containermerkmal stimmt nicht überein; "geeignet" sind darunter alle Relationen mit der kürzesten Gesamtlänge von Teilstrecken vor bzw. nach Startknoten und Endknoten
- Suchlevel 3:
  Start- und Zielknoten der "neuen" Relation sind im Pfad in der umgekehrten Reihenfolge enthalten, Containermerkmal stimmt überein; "geeignet" sind darunter alle Relationen mit der kürzesten Gesamtlänge von Teilstrecken vor bzw. nach Startknoten und Endknoten
- Suchlevel 4:
  Start- und Zielknoten der "neuen" Relation sind im Pfad in der umgekehrten Reihenfolge enthalten, Containermerkmal stimmt nicht überein; "geeignet" sind darunter alle Relationen mit der kürzesten Gesamtlänge von Teilstrecken vor bzw. nach Startknoten und Endknoten
- Suchlevel 5:
  "geeignet" sind alle Relationen mit der größten Gesamtlänge der in beiden Pfaden gemeinsam enthaltenen Streckenteilen und der kürzesten Gesamtlänge von Teilstrecken außerhalb des parallelen Pfades.

Die Startstruktur der "neuen" Relation ergibt sich als gewichtetes Mittel der Startstrukturen der gefundenen "besten" Relationen.

Die Prognoserechnungen berücksichtigen in einem ersten Schritt die allgemeine Bestandsentwicklung der relevanten Binnenschiffsflotten bis zum Jahr 2030. Die Entwicklungstrends werden dabei anhand der durchschnittlichen Tragfähigkeit der jeweiligen Schiffsflotten getrennt für die Verflechtungen zwischen elf Wasserstraßengebieten aufbereitet. Formal lässt sich das Modell wie folgt beschreiben:

Gesucht wird eine Matrix von Entwicklungsfaktoren $X_{i,j}$ für die folgende Bedingungen erfüllt sind:

$$\sum_j V_{i,j} \cdot X_{i,j} = f_i \qquad \text{sowie}$$

$$\sum_i E_{i,j} \cdot X_{i,j} = f_j$$

Es bedeuten:

f_i	Entwicklungsfaktoren der mittl. Tragfähigkeiten in 11 Wasserstraßengebieten
$V_{i,j}$	Anteile der Zielgebiete j an den Tragfähigkeiten im Versand des Gebiets i
$E_{i,j}$	Anteile der Quellgebiete i an den Tragfähigkeiten im Empfang des Gebiets j

Schreibt man diese Vorgaben als Gleichungssystem der Form $A \cdot x = b$, so erhält man ein System mit 22 Gleichungen, aber 121 Variablen, welches in dieser Form unbestimmt ist. Ein Standardverfahren zur Lösung dieses Problems ist die Tikhonov-Regularisierung[45], die das Gleichungssystem um eine quadratische Matrix ergänzt (die Dimension entspricht dabei der Anzahl der Variablen, hier 121). Diese Tikhonov-Matrix T ist nur in der Diagonalen besetzt, in der Praxis setzt man sie meist als

$$T = \alpha \cdot I$$

Dabei ist *I* die Einheitsmatrix, α ein Regularisierungsparameter, der als kleiner positiver Wert gewählt wird. Im Standardverfahren der Tikhonov-Regularisierung wird nun der folgende Ausdruck minimiert (wobei der Vektor *t* nur Nullen enthält, hier aber wegen der in der Folge beschriebenen Anpassung mit aufgeführt wird):

$$\|A \cdot x - b\|^2 + \|T \cdot x - t\|^2$$

Im vorliegenden Anwendungsfall kann man zusätzlich annehmen, dass die Faktoren $X_{i,j}$ relativ stark von f_i und f_j abhängen. Außerdem ist plausibel, dass die Lösungswerte nur eine geringe Bandbreite haben. Dies wird im vorliegenden Fall genutzt, um den Vektor – anders als im Stan-

45 S. Tikhonov, A. N.; Arsenin, V. Y., Solutions of Ill-Posed Problems, New York 1977.

dardfall – mit dem Produkt aus dem Regularisierungsparameter *α* und dem geometrischen Mittel der jeweiligen Entwicklungsfaktoren aufzufüllen. Dies entspricht der Annahme

$$X_{i,j} \approx \sqrt{f_i \cdot f_j}$$

Wählt man nun den Regularisierungsparameter *α* geeignet und löst das lineare Ausgleichsproblem mit einem numerisch stabilen Verfahren (z.B. mit Householder-Transformationen)[46], so erhält man eine Lösung, die den Vorgaben weitgehend entspricht.

Die vorgegebenen Entwicklungsfaktoren f_i (Wachstum der mittleren Tragfähigkeit in den 11 Gebieten) liegen im Bereich von 1,024 (für die Elbe) bis 1,130 (für den Mittelrhein):

Als Ergebnis des beschriebenen Gleichungssystems erhält man Lösungselemente $X_{i,j}$ im Bereich von 1,0029 bis 1,1478. Der maximale Fehler (Abweichung vom Sollwert Zeile bzw. Spalte) ergibt sich zu 0,0022. Dabei liegen die Abweichungen vom "plausiblen" Wert (dem geometrischen Mittel der Entwicklungsfaktoren der zugehörigen Gebiete) bei etwa 3 Prozent.

Tab. 2-24: Trendfaktoren zur Entwicklung der durchschnittlichen Tragfähigkeit der eingesetzten Schiffsflotten im Zeitraum 2010 bis 2030 nach Wasserstraßengebieten

nach / von	Elbe	Main-Donau	MLK	Mosel	Neckar	Nordwesten	Osten	Niederrhein	Mittelrhein	Oberrhein	Weser
Elbe	1,015	1,049	1,003	1,030	1,040	1,050	1,039	1,052	1,076	1,042	1,024
Main-Donau	1,049	1,068	1,052	1,052	1,066	1,080	1,067	1,081	1,106	1,066	1,049
MLK	1,013	1,052	1,018	1,033	1,043	1,050	1,042	1,049	1,079	1,043	1,025
Mosel	1,031	1,055	1,033	1,032	1,047	1,059	1,047	1,035	1,083	1,042	1,031
Neckar	1,040	1,061	1,043	1,045	1,056	1,071	1,058	1,064	1,093	1,048	1,040
Nordwesten	1,055	1,080	1,056	1,060	1,070	1,085	1,073	1,094	1,109	1,072	1,056
Osten	1,040	1,065	1,036	1,047	1,057	1,067	1,065	1,069	1,094	1,059	1,040
Niederrhein	1,064	1,083	1,061	1,035	1,066	1,097	1,082	1,127	1,140	1,064	1,063
Mittelrhein	1,077	1,103	1,084	1,083	1,093	1,110	1,094	1,148	1,130	1,097	1,077
Oberrhein	1,043	1,063	1,044	1,048	1,045	1,072	1,060	1,065	1,098	1,052	1,042
Weser	1,024	1,049	1,022	1,030	1,040	1,046	1,041	1,060	1,076	1,042	1,015

Zur Umsetzung der ermittelten gebietsweisen Veränderungen auf die relationsspezifischen Flottenstrukturen wird wie folgt vorgegangen:

46 Vgl. Stoer J., Einführung in die numerische Mathematik I, Berlin; u.a. 1983.

Aus dem Umlegungsergebnis 2010 werden die Flottenstrukturen als Startstrukturen übertragen und die entsprechenden Schiffsanzahlen (beladene Schiffe) in den einzelnen Größenklassen ermittelt. Für alle 11x11 (Gebiets-)Relationen "von Gebiet – nach Gebiet" wird dann die Liste $L_{i,j}$ der (Hafen-)Relationen bestimmt, die zu der Gebietsrelation gehören. Aus den Summen der beladenen Schiffe $bel_{r,k}$ aller dieser Relationen nach Größenklassen ergibt sich die mittlere Tragfähigkeit $TF_{i,j,vor}$ auf der Gebietsrelation vor der Bestandsveränderung:

$$TF_{i,j,vor} = \frac{\sum_{r \in L_{i,j}} \sum_{k} bel_{r,k} \cdot TT_k}{\sum_{r \in L_{i,j}} \sum_{k} bel_{r,k}}$$

Eine Multiplikation mit den wie oben beschrieben ermittelten Faktoren $X_{i,j}$ ergibt die neue (Soll-) Tragfähigkeit $TF_{i,j,soll}$:

$$TF_{i,j,soll} = TF_{i,j,vor} \cdot X_{i,j}$$

Die Anteile der einzelnen Klassen werden nun so angepasst, dass sich diese neue mittlere Tragfähigkeit ergibt. Dabei werden nur die Klassen geändert, deren mittlere TT von der Vorgabe um mehr als ein vorgegebenes Minimum Δ (hier gewählt: 10%) abweicht (Motivation: Innerhalb einer Klasse gibt es ggf. auch ohnehin wegen der möglichen Bandbreite von Tragfähigkeiten Änderungen der mittleren Tragfähigkeit). Für die Anpassung der Anteile wird ein Veränderungsfaktor $vf_{i,j}$ im Intervall [0…1] iterativ so bestimmt, dass eine entsprechende Verschiebung von Schiffen aus den Größenklassen unterhalb 90% von $TF_{i,j,soll}$ in die Klassen oberhalb 110% von $TF_{i,j,soll}$ im Resultat möglichst genau den gewünschten Wert ergibt. Dieser Faktor wird aus Geschwindigkeitsgründen zunächst für die Gebietsrelationssummen der beladenen Schiffe bestimmt und im Anschluss daran auf (Hafen-)Relationsbasis.

$$\frac{\sum_{r \in L_{i,j}} \left[\sum_{k \in K_u} vf_{i,j} \cdot bel_{r,k} \cdot TT_k + \sum_{k \in K_o} vf'_{i,j} \cdot bel_{r,k} \cdot TT_k + \sum_{k \notin (K_u \cup K_o)} bel_{r,k} \cdot TT_k \right]}{\sum_{r \in L_{i,j}} \left[\sum_{k \in K_u} vf_{i,j} \cdot bel_{r,k} + \sum_{k \in K_o} vf'_{i,j} \cdot bel_{r,k} + \sum_{k \notin (K_u \cup K_o)} bel_{r,k} \right]} = TF_{i,j,soll}$$

Es bedeuten:

$vf_{i,j}$ Veränderungsfaktor für die Größenklassen $k \in K_u = \left\{ k \mid TT_k \leq (1-\Delta) \cdot TF_{i,j,soll} \right\}$

$vf'_{i,j}$ zugehöriger Faktor für die Größenklassen $k \in K_o = \left\{ k \mid TT_k \geq (1+\Delta) \cdot TF_{i,j,soll} \right\}$

Δ Mindestabweichung der Tragfähigkeit, hier gewählt: Δ = 10 %

Dabei wird jeweils der Veränderungsfaktor $vf'_{i,j}$ so bestimmt, dass die auf der Gebiets- bzw. Hafenrelation umzulegende Menge von den insgesamt resultierenden beladenen Schiffen transportiert werden kann.

Neben der allgemeinen Bestandsentwicklung werden zur Berechnung der Flottenstrukturen 2030 die durch Ausbaumaßnahmen am Wasserstraßennetz bis zum Prognosehorizont eintretenden Flotteninduzierungseffekte berücksichtigt. Als Basis hierfür wird ein für die BVWP entwickeltes Prognosemodell verwendet, das den Zusammenhang zwischen wasserstandsabhängig möglicher Auslastung des Einzelfahrers der Größenklasse 2.501 – 3.000 TT und der jeweiligen durchschnittlichen Tragfähigkeit der Flotten abbildet. Dabei gilt für die mittlere Tragfähigkeit der Flotte:

$$tt_{mittel} = a \cdot Aw_{mEF} + b$$

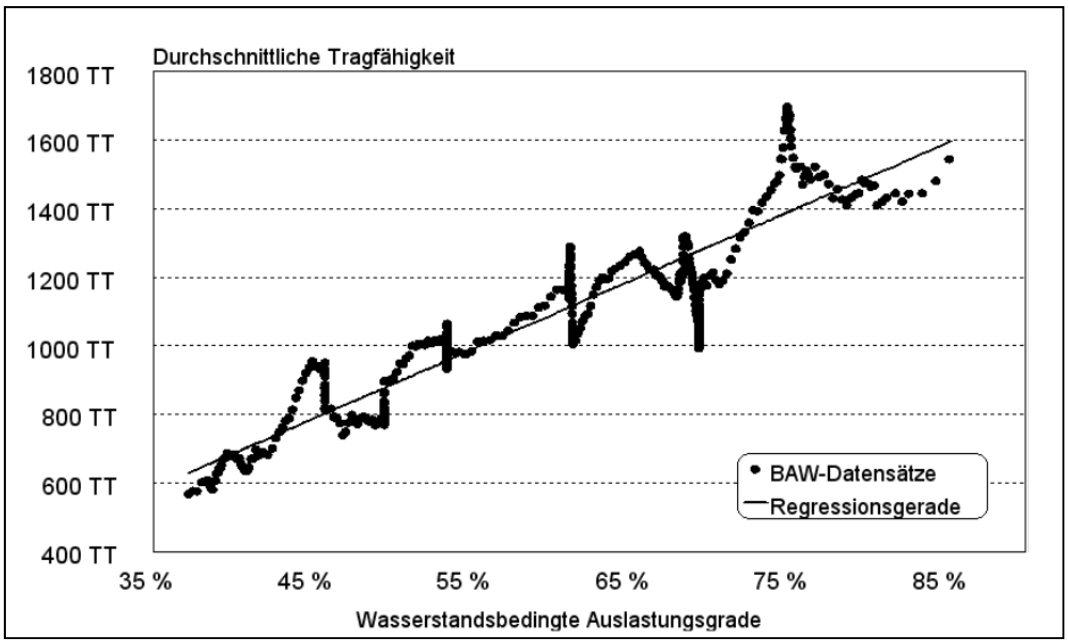
mit

Aw_{mEF} wasserstandsbedingter Auslastungsgrad des EF 2.501-3.000 TT (in %)

a Steigung der Regressionsgeraden (20,15)

b Achsenabschnitt der Regressionsgeraden (-122,12)

Abb. 2-18: Zusammenhang zwischen wasserstandsbedingtem Auslastungsgrad und durchschnittlicher Tragfähigkeit der Flotte



Zur Anwendung des Prognosemodells wird für jede Relation der Prognosematrix 2030 sowohl im Netz 2010 als auch im Netz 2030 der mittlere wasserstandbedingte Auslastungsgrad des maßgeblichen Einzelfahrers (Größenklasse 2.501-3.000 TT) bestimmt. Ist dieser Auslastungsgrad Aw_{mEF} im Netz 2030 größer als im Netz 2010, so wird unterstellt, dass eine Flotteninduktion stattfindet. Kann auf der jeweiligen Relation der maßgebliche Einzelfahrer wegen der Restriktionen des Netzes nicht fahren, so werden die entsprechenden Angaben des größtmöglichen Einzelfahrers k_{opt} für die Berechnung verwendet. Dazu wird dessen Auslastung wie folgt in eine theoretische Auslastung des maßgeblichen Einzelfahrers umgerechnet (über eine theoretische mittlere Abladetiefe T_{mittel}, die sich aus wasserstandsbedingtem Auslastungsgrad, Leertiefe und Volltauchtiefe ergibt):

$$T_{mittel,Netz} = Aw_{k_{opt},Netz} \cdot \left(T_{s,k_{opt}} - T_{0,k_{opt}}\right) + T_{0,k_{opt}}$$

$$Aw_{mEF,Netz} = \frac{\left(T_{mittel,Netz} - T_{0,mEF}\right)}{\left(T_{s,mEF} - T_{0,mEF}\right)}$$

Dabei gilt:

$T_{0,k}$ Leertauchtiefe der Größenklasse k

$T_{s,k}$ Volltauchtiefe der Größenklasse k

Aus den beiden Auslastungen für die verschiedenen Netzzustände wird eine mittlere (theoretische) Tragfähigkeit der Flotte in beiden Fällen ermittelt.

$$tt_{mittel,Netz} = a \cdot Aw_{mEF,Netz} + b$$

Aus der Veränderung der durchschnittlichen Tragfähigkeit wird in einem weiteren Schritt die Veränderung der Flottenstrukturen bestimmt. Dies geschieht mit Hilfe des statistisch abgeleiteten Zusammenhangs zwischen den Anteilen einzelner Schiffsgrößenklassen und der durchschnittlichen Tragfähigkeit der Flotte:

$$tt_{mittel,Netz} \Rightarrow RFA_{theor.,k,Netz}$$

Der statistische Zusammenhang gibt eine bundesdurchschnittliche Verteilung der Anteile einzelner Größenklassen bei bestimmten Tragfähigkeiten der Gesamtflotte wieder[47]. Bezogen auf einzelne Relationen können deutliche Unterschiede auftreten. Aus diesem Grunde werden für die Prognose der Flottenstrukturen die Veränderungen zwischen den im Modell erzeugten (theoretischen) Strukturen der Jahre 2010 und 2030 auf die Ausgangsstruktur der jeweiligen Relation im Jahr 2030 angewendet.

$$RFA_{neu,k} = RFA_{alt,k} + RFA_{theor.,k,2030} - RFA_{theor.,k,2010}$$

Dabei werden die neuen Flottenstrukturanteil $RFA_{neu,k}$ jeweils auf den Bereich 0 % bis 100 % begrenzt, ggf. werden im Anschluss die Flottenstrukturanteile auf eine Gesamtsumme von 100 % skaliert. Diese Berechnungen werden zunächst für die Summen aus Motorschiffen und Schubleichtern durchgeführt.

In einem zweiten Schritt werden die geänderten Flottenstrukturanteile auf Motorschiffe und Schubleichter verteilt. In Größenklassen, die schon vor der Flotteninduktion mit beiden Fahrzeugtypen besetzt waren, wird deren Aufteilung beibehalten. Ist eine Größenklasse in der entsprechenden Relation "neu", so wird die Aufteilung zwischen Einzelfahrern und Schubleichtern gemäß der mittleren Aufteilung aus den Daten aller Relationen, die die gleiche Kombination der Parameter "von Gebiet – nach Gebiet – CO/NC" haben, vorgenommen.

47 Vgl. BMVBS (Hrsg.): Bundesverkehrswegeplan 2003; Berlin 2005, Seite 219 ff.

2.7 Erstellung Netzmodelle

2.7.1 Übersicht

Für die BVWP-Prognosen wurde ein "intermodales Bundesnetz" bestehend aus den Teilen Straßennetz und Schienennetz konzipiert. Das Netz hat zwei Aufgaben:

(1) die Ermittlung der **Verkehrswiderstände** für die Nachfrageberechnungen
(2) die **Verkehrsumlegungen** zur Darstellung der künftigen Belastung der Verkehrs-netze

Letzteres hatte auch eine **rückkoppelnde Funktion**: Durch die Belastungen ändern sich die Widerstände in Abhängigkeit der Netzauslastungen, so dass eine Rückkoppelung stattfand.

Ein solches Vorgehen ist auch für das Klimaschutz-Szenario angezeigt:

- Reduktionen der Verkehrsbelastung der Straßennetze aufgrund der angedachten verkehrspolitischen Maßnahmen können zu einer Verbesserung der Verkehrswiderstände im Straßennetz führen mit der Folge einer veränderten Routenwahl und einem veränderten Modal-Split bzw. einer veränderten Zielwahl.
- Eine Veränderung des Modal-Splits zugunsten des SPV und SGV kann dort zu Überlastungen führen, so dass a) ggf. das Netz anzupassen ist, b) ggf. eine Rückverlagerung auf den Straßenverkehr stattfindet.

2.7.2 Netzmodell Straße

Die Grundlage bildet das Netzmodell für die Bundesfernstraßen (NEMOBFStr) der Bundesverkehrswegeplanung. Die Bereitstellung, Entwicklung und Erstellung von Netzmodellen ist Voraussetzung für die Modellierung der Nachfrage und Grundlage für die Ermittlung der Verkehrsmengen auf den relevanten Straßen. Zusätzlich wird das Netzmodell auch zum Nachweis der erreichten Qualität benötigt.

Das Netzmodell muss auf das jeweilige Untersuchungsziel ausgerichtet werden. Das betrifft den Zeithorizont, die Netzdichte, die Attributierung der Netzelemente und die Einspeisungspunkte für die Verkehrsnachfrage. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte sind folgende Straßennetzmodellzuschnitte bereitzustellen bzw. zu erarbeiten:

- Analysenetzmodell 2010
- Netzmodell für den BW-Bezugsfall 2030
- Netzmodell für das BW-Klimaschutz-Szenario 2030

Das Netzmodell für den Analysefall liegt aufgrund der BVWP-Bearbeitungen für das Bezugsjahr 2010 vor und kann als Basis für die Klimaschutz-Untersuchungen BW übernommen werden. Die Zustimmung zur Nutzung des NEMOBFStr durch das BMVI liegt vor. Im Netzmodell sind alle klassifizierten Straßen (A, B, L, K) und wichtige Gemeindestraßen enthalten. Allerdings liegen die Attributierungen für die Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen zum Teil nur in abstrahierter Form vor. Aus diesem Grunde wurde für die Nutzung bei der Klimaschutz-Untersuchungen BW eine Validierung dieser Informationen mit den SIB-Daten der Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg in notwendigem Umfang durchgeführt. Der notwendige Datenaustausch erfolgte.

Die Implementierung der zu ergänzenden Informationen wurde vorgenommen. Eine Übersicht des NEMOBFStr und der streckenbezogenen Attribute des Netzmodelles vermitteln die Darstellungen in Abb. 2-19 und Abb. 2-20. Die Beschreibung der Straßenquerschnitte erfolgte analog zur BVWP über die in Abb. 2-21 wiedergegebene Typologie.

Abb. 2-19: Straßennetzmodell für die Bundesfernstraßenplanung NEMOBFStr

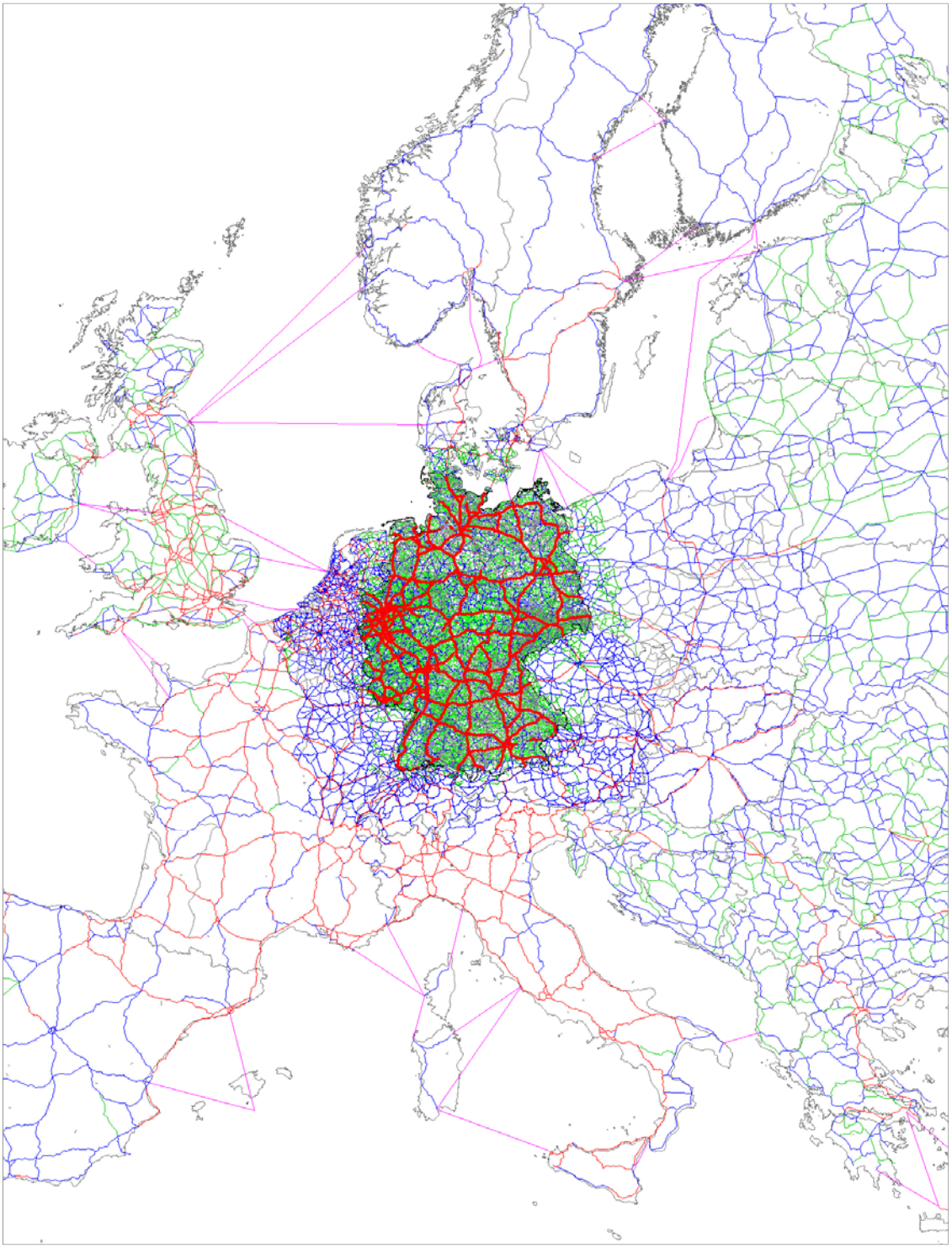


Abb. 2-20: Ausschnitt aus dem Straßennetzmodell NEMOBFStr

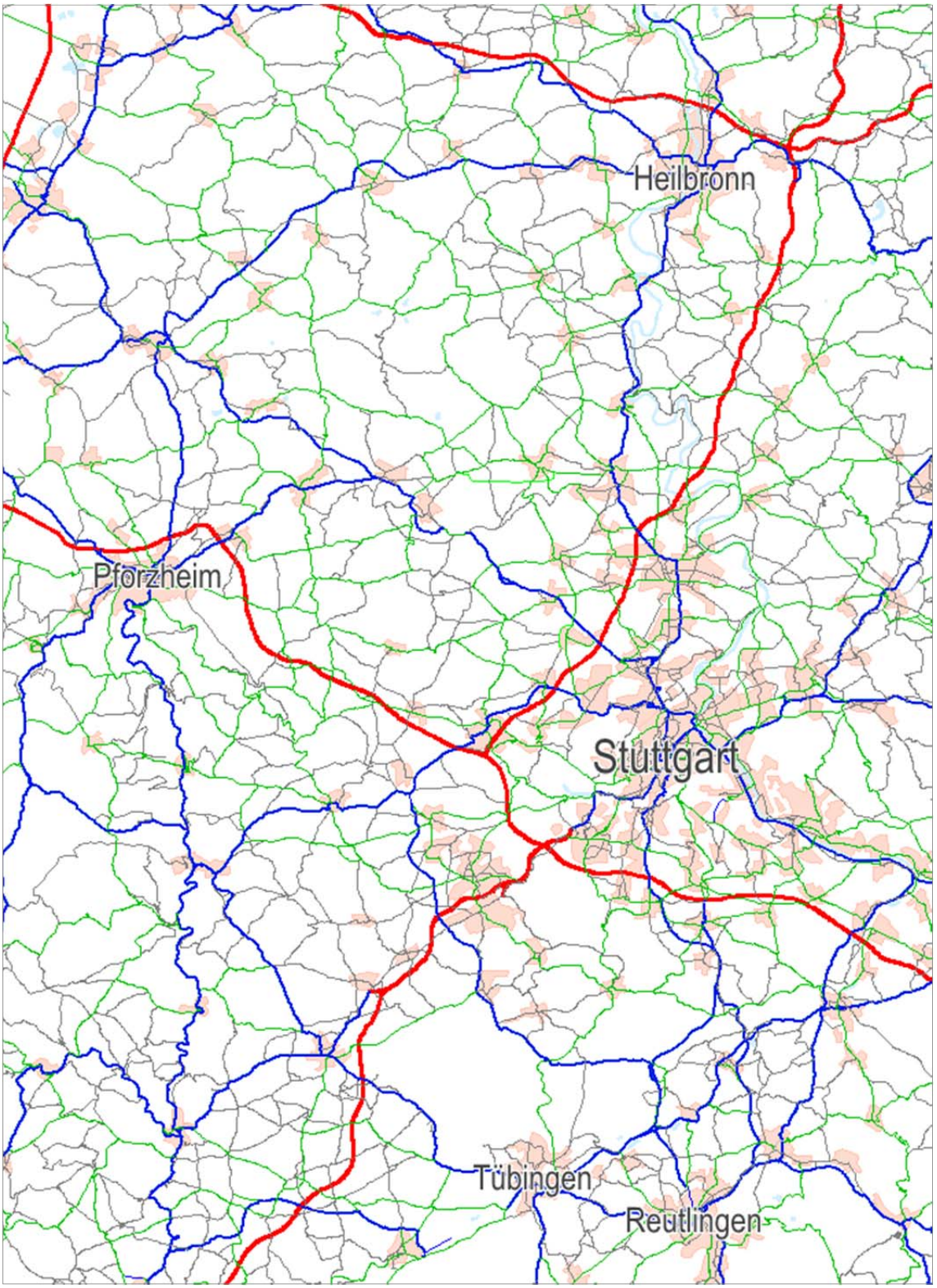
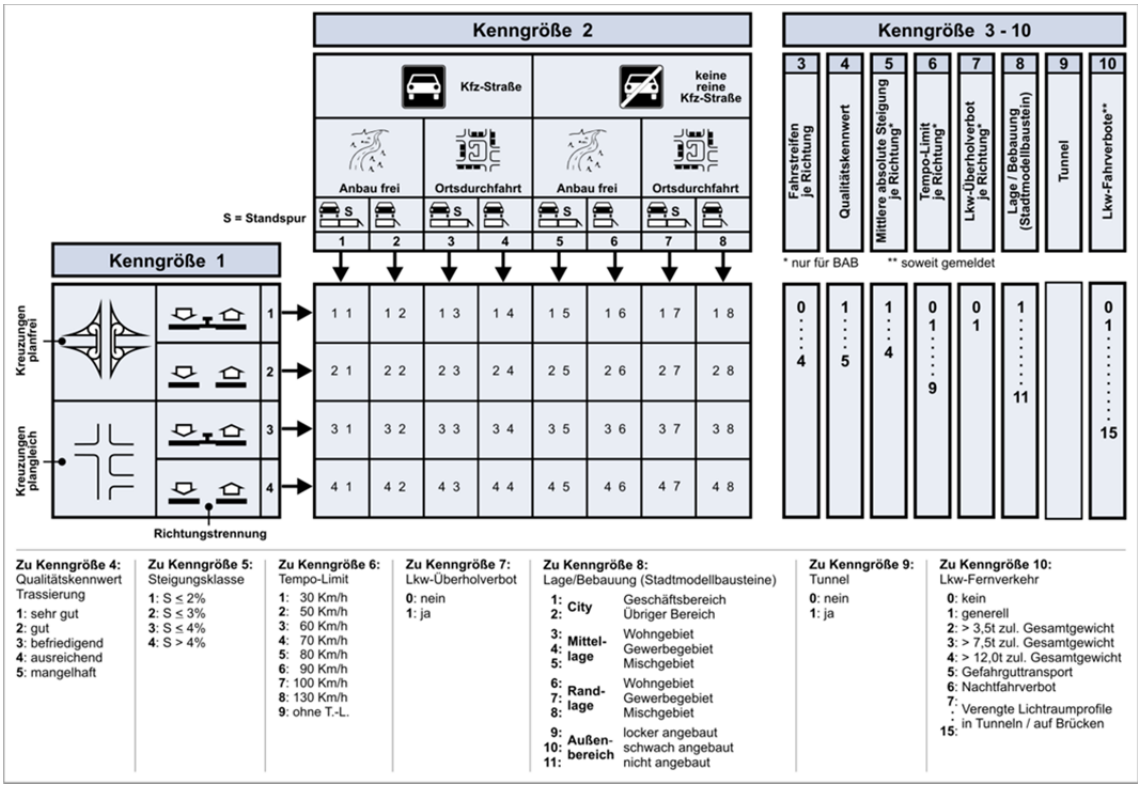


Abb. 2-21: Typologie der Streckencharakterisierung im Netzmodell für die Bundesfernstraßenplanung

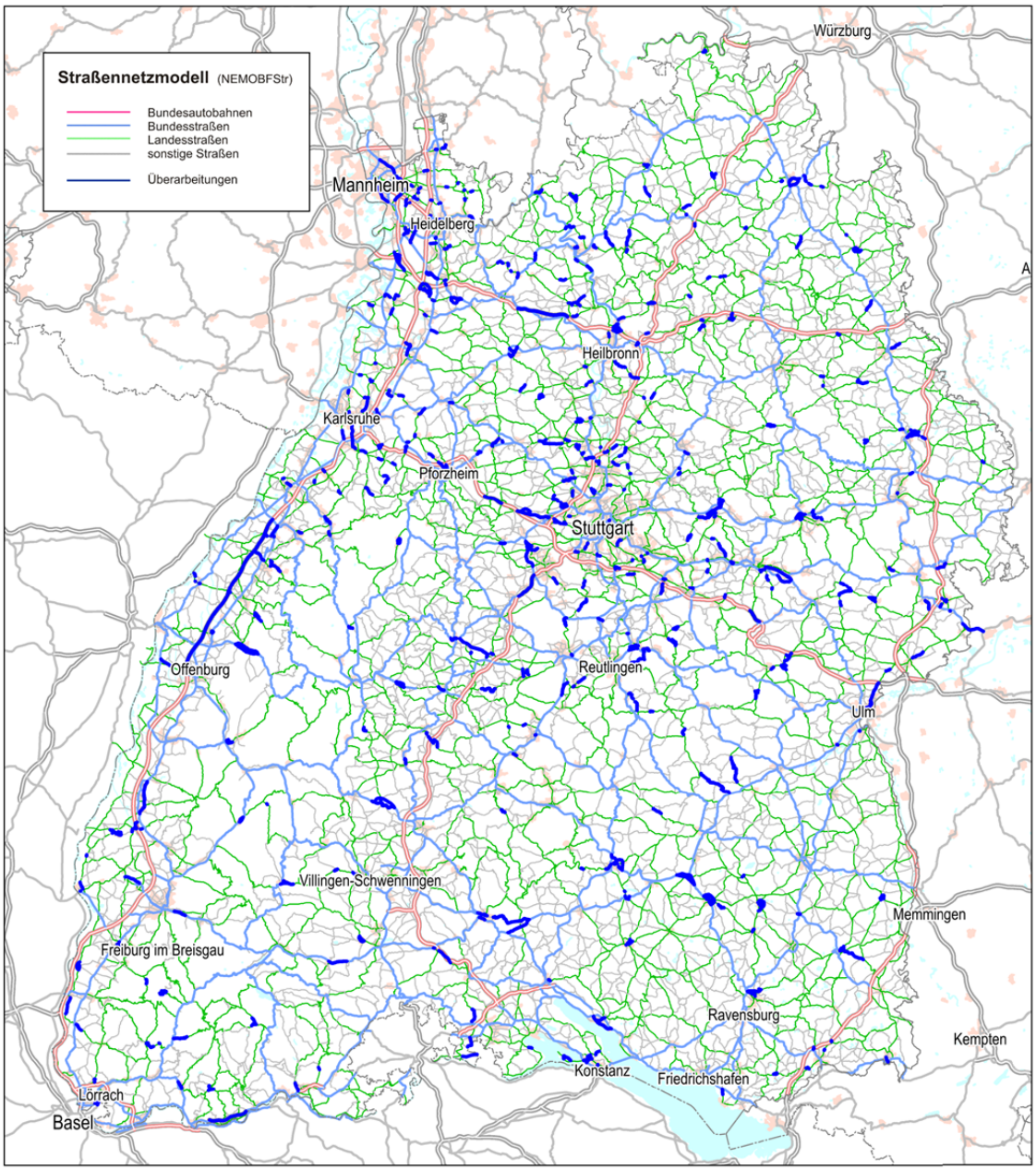


Für die durchgeführten Netzberechnungen auf der Ebene des Landes BW wurde das Landesstraßennetz Baden-Württemberg im Netzmodell des Bundes validiert und aktualisiert. Hierzu wurden die in der Landesstraßendatenbank BW enthaltenen Informationen mit den entsprechenden Attributen im NEMOBFStr abgeglichen und – bei Abweichungen – in das Bundesnetz implementiert. Hierbei wurden folgende Ergänzungen bzw. Korrekturen vorgenommen für Strecken des Landesstraßennetzes vorgenommen:

- Umwidmungen
- Zusätzliche bzw. entfallene Streckenabschnitte
- Zuordnungen von Strecken zu Ortsdurchfahrtstypen
- Zuordnungen von Strecken in Ortsdurchfahrten zu Langsamfahrbereichen
- Streifigkeiten

Zur Übersicht sind die insgesamt vorgenommenen Änderungen in der Abb. 2-22 kenntlich gemacht.

Abb. 2-22: Überarbeitungen im Straßennetzmodell NEMOBFStr



Über die Netzergänzungen hinaus muss für die Untersuchungen zum Klimaschutz-Szenario das Raumanbindungssystem hinsichtlich der Verkehrseinspeisungen überprüft und ggf. angepasst werden (siehe Kapitel 4).

Das Bezugsnetz für das Klimaschutz-Szenario BW wird aus den Arbeiten im Rahmen der Verflechtungsprognose 2030 des Bundes übernommen. Die für das Analysenetz vorgenommenen

Ergänzungen für das Landesstraßennetz werden dabei auch an das Bezugsfallnetz implementiert.

Für die Erstellung der relevanten Netzmodelle sind folgenden Basisdaten erforderlich:

- Straßennetzmodell für die Bundesfernstraßen (NEMOBFStr 2010 und 2030)
- Ergebnisse der verschiedenen Straßenverkehrszählungen 2010 (SVZ, AVZ, Dauerzählungen BAST) und aktuelle Statistiken
- Ergebnisse der Erfassung mautpflichtiger Lkw (Toll Collect)
- Raumanbindungssystem über ca. 1,5 Mio. Rasterfeldern (je mit Kantenlägen von 250m) und mit ca. 50.000 Einspeisepunkten
- Daten der Siedlungs- und Wirtschaftsstruktur (aus Mikro 2-Ebene der BVWP'15)
- Informationen zur Attributierung der Landesstraßen BW (Angaben aus BWSIB).
- Maßnahmen des BW-Klimaschutz-Szenarios 2030 (siehe Kap. 4))
- Ggf. Maßnahmen des BVWP 2015, die nicht in das BW-Klimaschutz-Szenario 2030 einbezogen werden sollen

2.7.3 Netzmodell Schiene

Auf Wunsch des Auftraggebers wurde das BVWP-Szenario für das Jahr 2030 aufgebaut, das analog zur Prognose 2030 alle Maßnahmen des Vordringlichen Bedarfs enthält. Hierauf aufbauend wurde das Netzmodell Klimaschutz-Szenario für das Jahr 2030 abgeleitet.

Um die geforderte Vergleichbarkeit mit den Arbeiten des Bundes zu erhalten, wurde für die Schiene auf den Netzgrundlagen aufgebaut, die im Rahmen der Prognoseberechnungen des Bundes von der TRIMODE (vormals) BVU aufgebaut wurden. Hier ist auf Basis des STREDA.X Netzes der DB Netz AG ein europaweites makroskopisches Netzmodell erstellt worden, welches aus rd. 22.100 Knoten und rd. 26.500 Kanten besteht. In Deutschland weist das Netzmodell 9.300 Knoten und rd. 11.000 Kanten auf.

In dem Netz sind (zumindest für Deutschland) parallele[48] lagerichtige Strecken enthalten. Das Netz verfügt kantenspezifisch über folgende Attribute.

[48] Hierbei handelt es sich um unterschiedliche Strecken mit gleichen Lagekoordinaten.

- Länge
- Streckenstandard
- Traktionsart
- Gleisanzahl
- Streckenklasse
- Streckenneigung
- Maximale Zuglänge
- Maximales Zuggewicht
- Maximale Sollgeschwindigkeit
- Netzbetreiber
- Lichtraumprofil
- Geometrie
- Verkehrsart
- Trassenpreis
- Maximale Blockabschnittslängen für gröbere
- Länge der Überholungsabstände

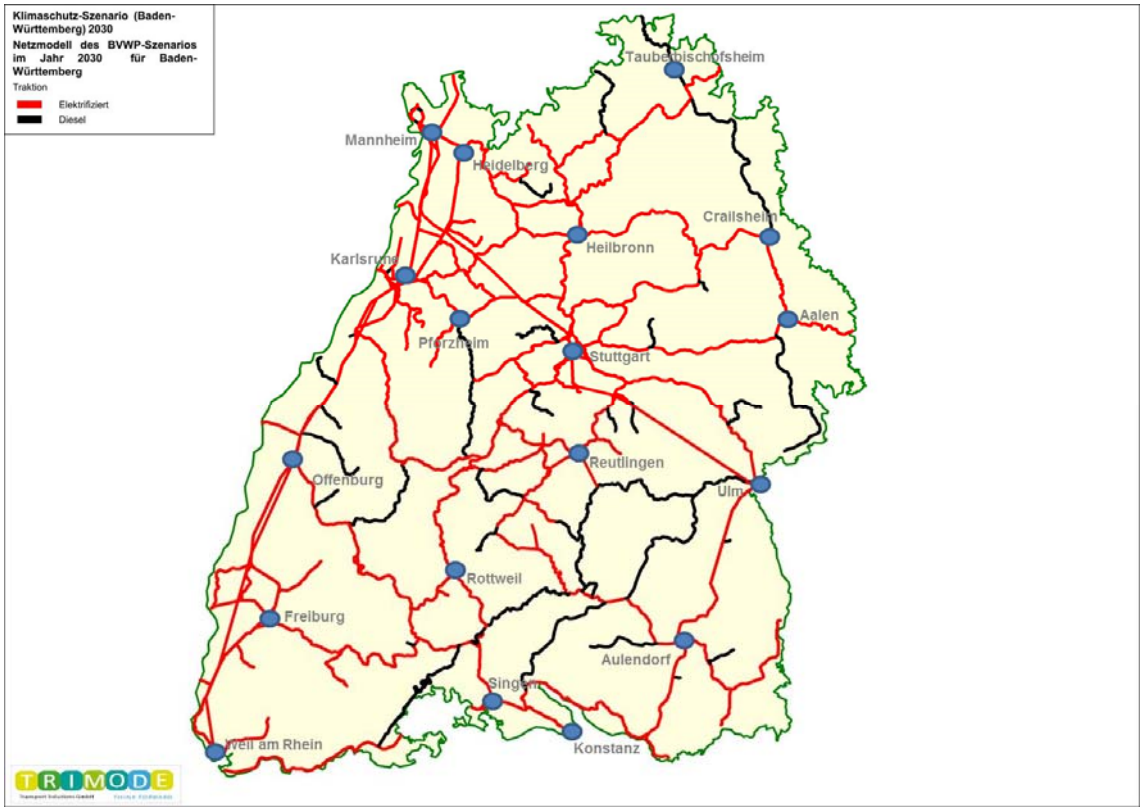
Darüber hinaus stehen für die einzelnen Kanten Attribute zur Verfügung, über die die Leistungsfähigkeit der Strecke berechnet werden kann (z.B. Stellwerkstechnik, installiertes Zugsicherungssystem, Streckengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Bedienungsprogramme, maximaler Überholungsgleisabstand sowie maximale Blockabschnittslänge). Die Ermittlung dieser Werte erfolgte nicht kantenspezifisch, sondern für gröbere Abschnitte und ist anschließend auf die Kanten übertragen worden. Diese Vorgehensweise ermöglicht die abschnittsweise Berechnung von Leistungsfähigkeiten.

Zwischenzeitlich können auch Bahnübergänge, Tunnel und Brücken auf dem jeweiligen Abschnitt erfasst werden. Für die Umlegung von Containerverkehren ist das KV-Profil der Strecken zusätzlich aufgenommen worden.

Um Fahrwege richtig abzubilden, sind in dem Netz 59.000 Widerstände aufgenommen, davon 27.500 in Deutschland. Das Netzmodell ist für das Basisjahr 2010 der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 sowie für das Prognosejahr 2030 vorhanden.

Die im Prognosenetz abgebildete Netzsituation für Baden-Württemberg ist der Abb. 2-23 zu entnehmen.

Abb. 2-23: Auszug aus dem Prognose-Netzmodell 2030 für Baden-Württemberg



Das im Rahmen der Verkehrsverflechtungsprognose 2030 aufgebaute Netzmodell ist ein makroskopisches Netzmodell, welches keine Spurpläne aufweist und teilweise Betriebsteile in größeren Knoten nicht enthält. In Baden-Württemberg sind davon 46 Knoten betroffen. Diese Betriebsteile können jedoch für Umlegungen im Rahmen des öffentlichen Nahverkehrs teilweise interessant sein, so dass diese in die Netzmodelle für das Jahr 2010 als auch für 2030 berücksichtigt wurden. Dieses um fehlende Betriebsteile "ergänzte" Netzmodell des Jahres 2030 wurde das Netzmodell des "BVWP-Szenarios" für das Jahr 2030.

Im **SPV** ist ein deutschlandweites Linienkonzept in Abstimmung mit der DB Netz AG (SPFV) und den Bundesländern (u.a. Baden-Württemberg) erarbeitet worden. Der Detaillierungsgrad geht aus den folgenden Abbildungen hervor.

Abb. 2-24: SPFV-Konzept gemäß der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario)

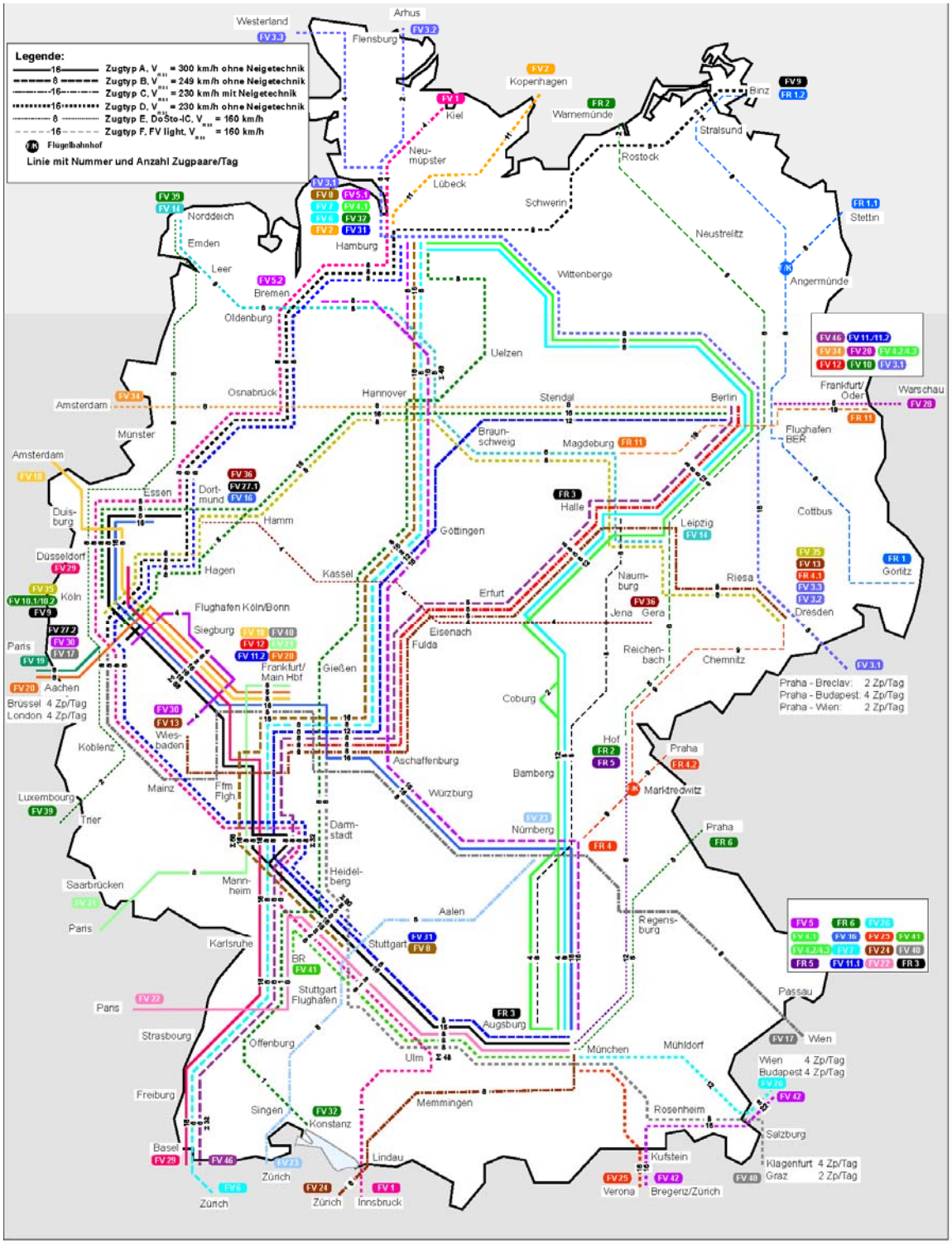


Abb. 2-25: Abbildung des SPNV (ohne S-Bahn) in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - Regionalverkehr

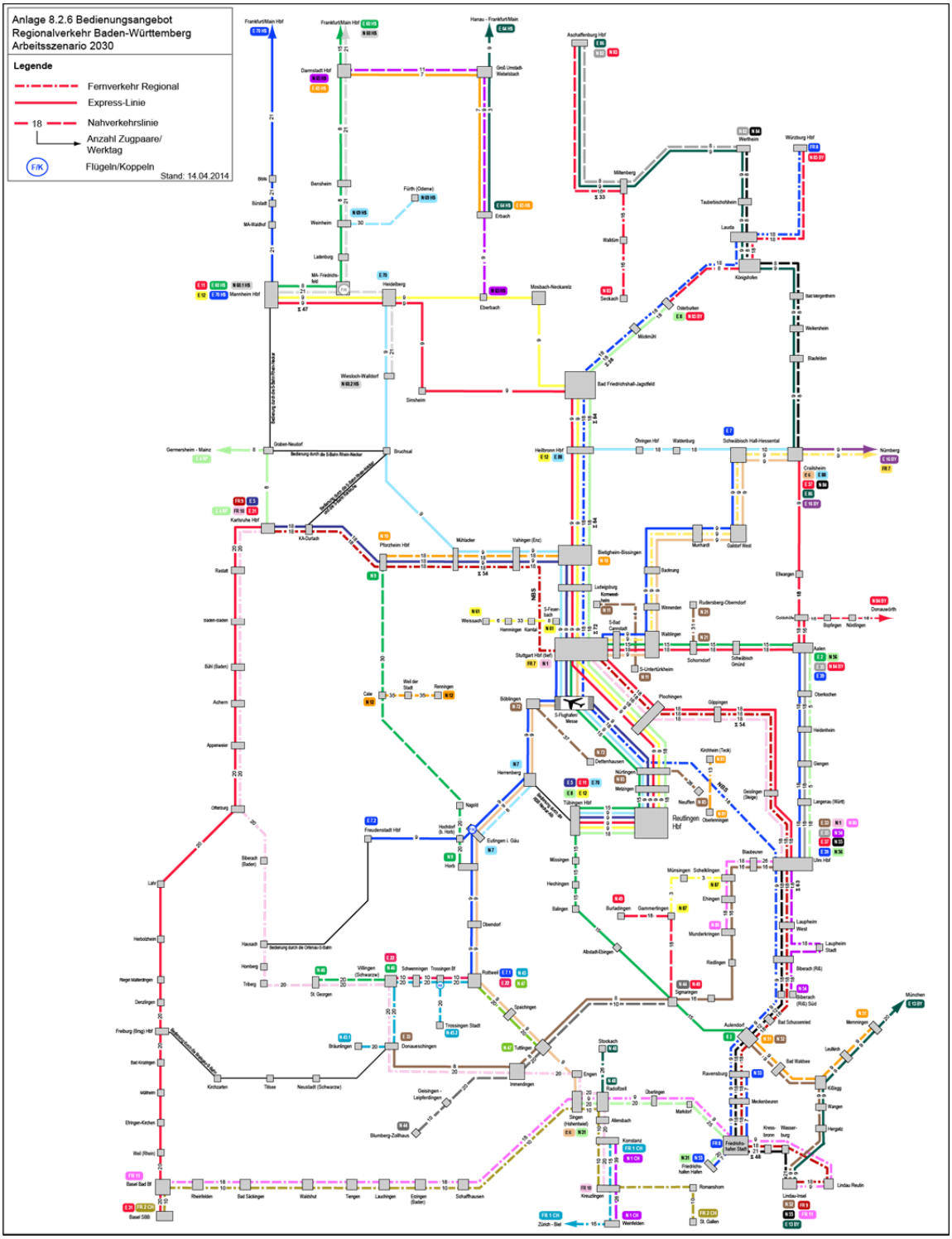


Abb. 2-26: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Stuttgart/VVS

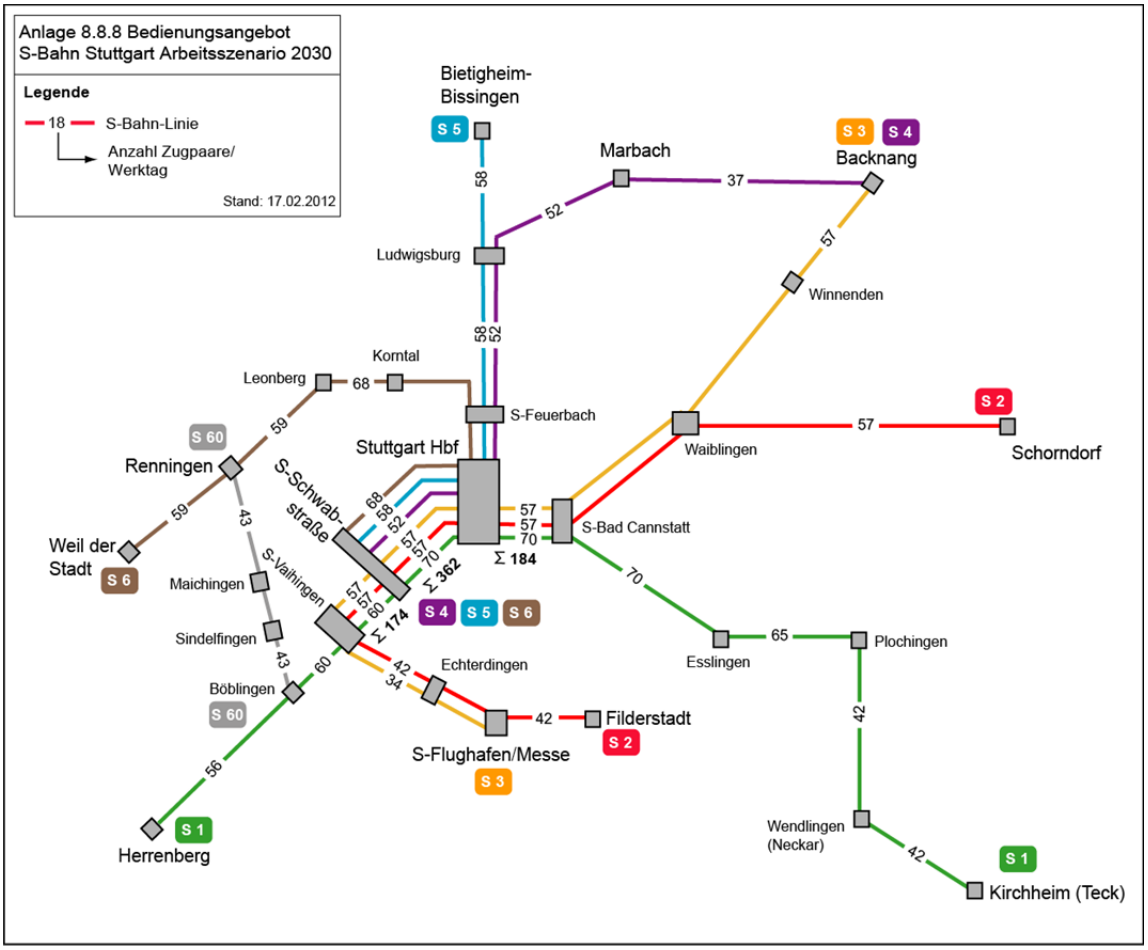


Abb. 2-27: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Rhein-Neckar

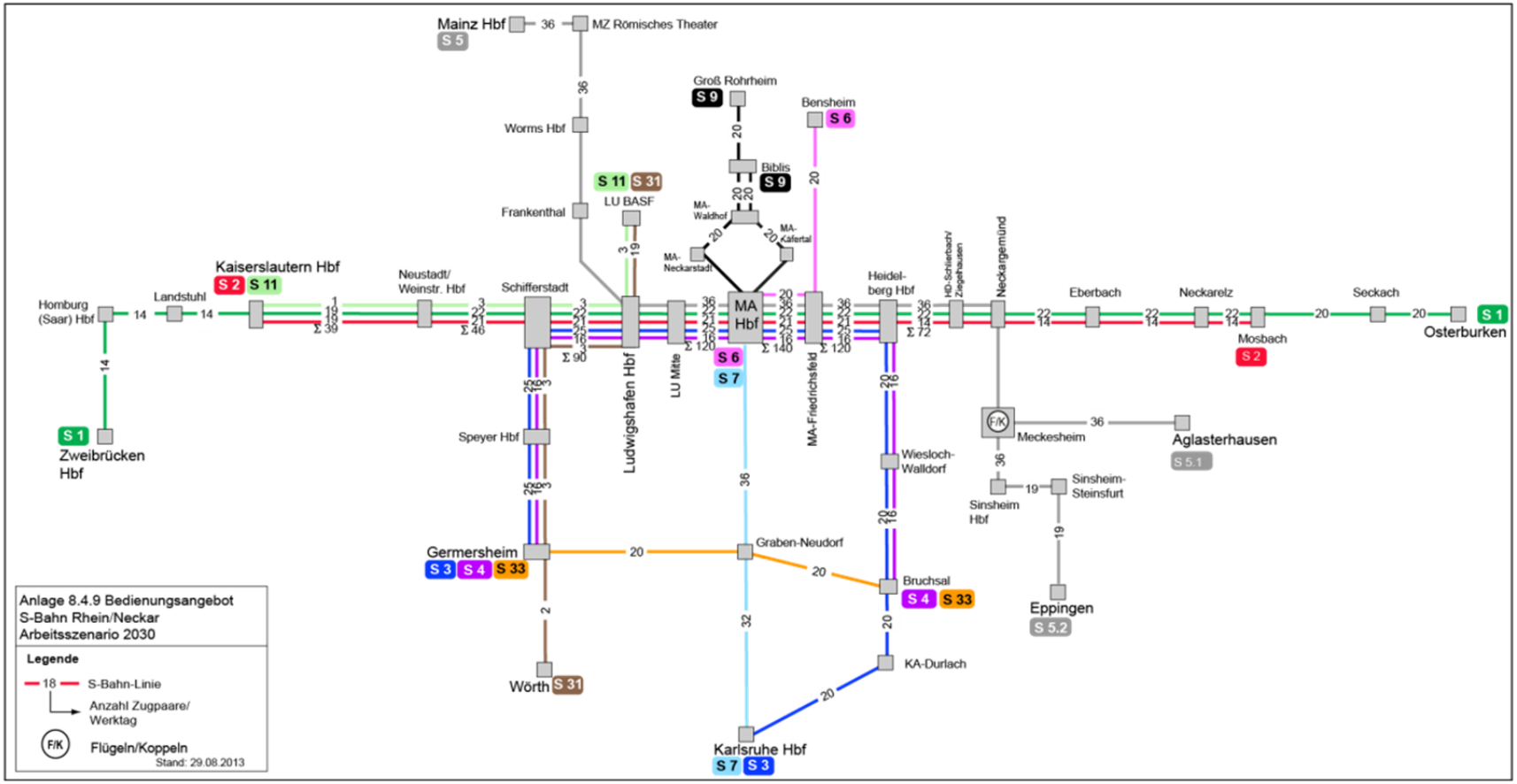


Abb. 2-28: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der BVWP-Prognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Karlsruhe/Heilbronn

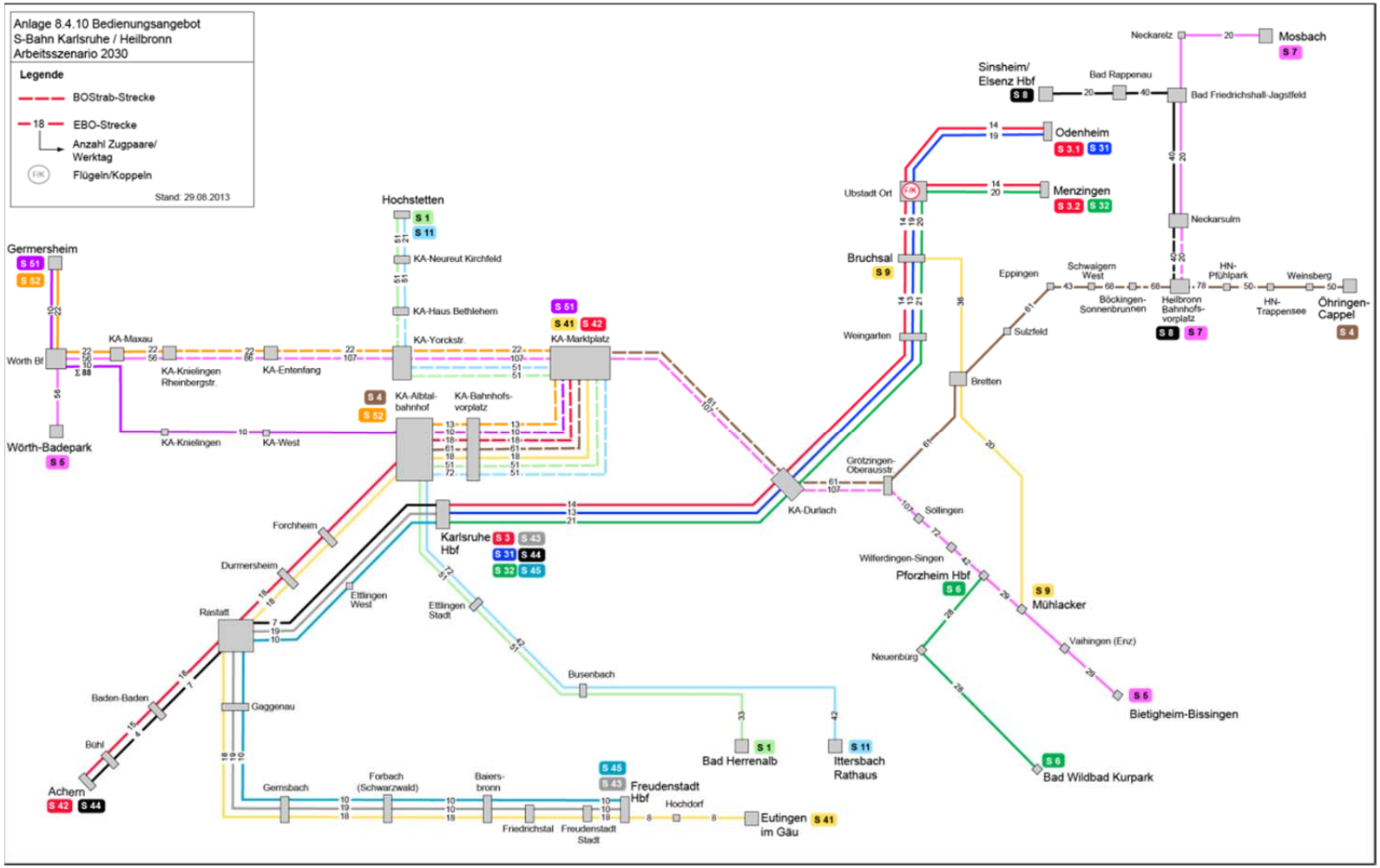


Abb. 2-29: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - Breisgau-S-Bahn

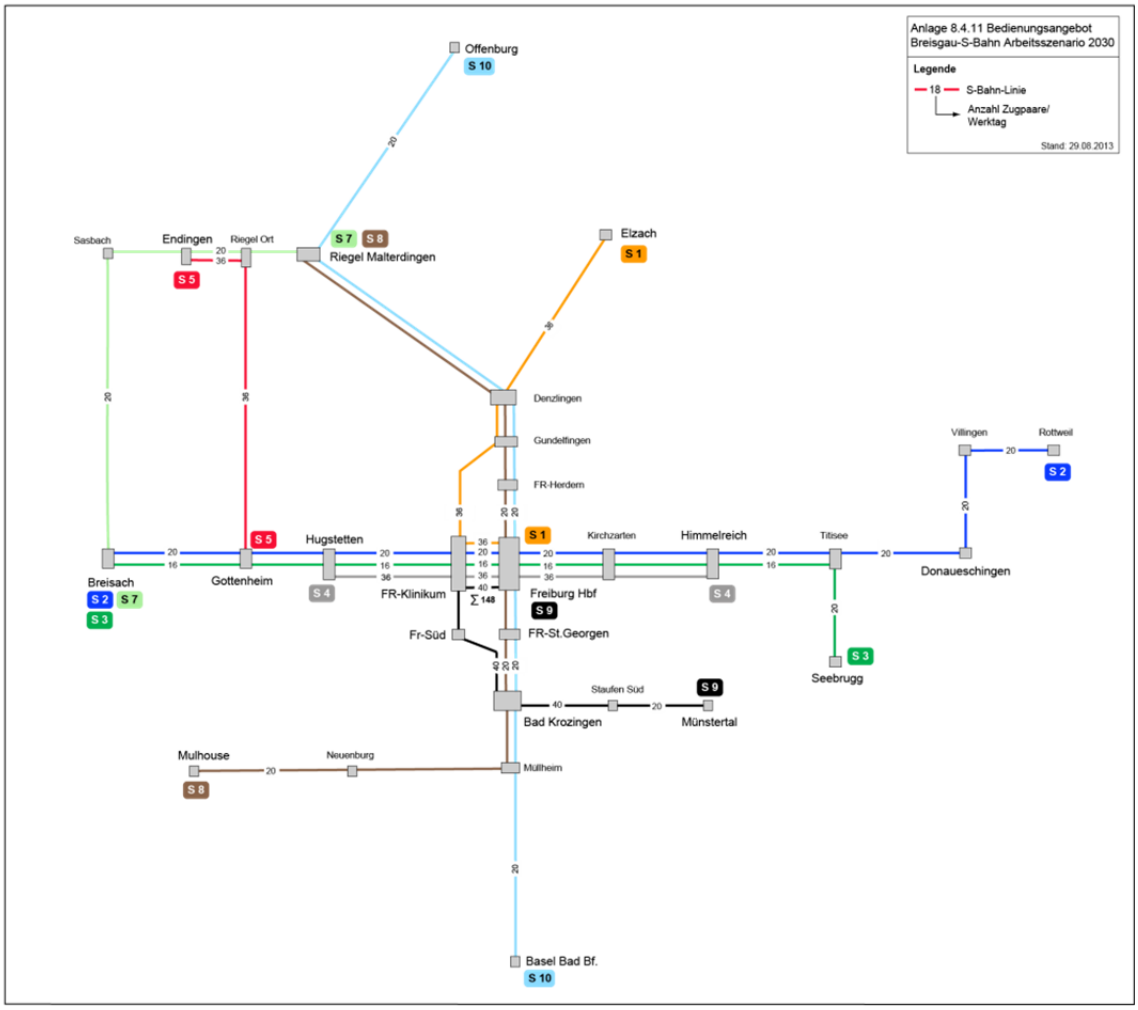


Abb. 2-30: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - Ortenau-S-Bahn

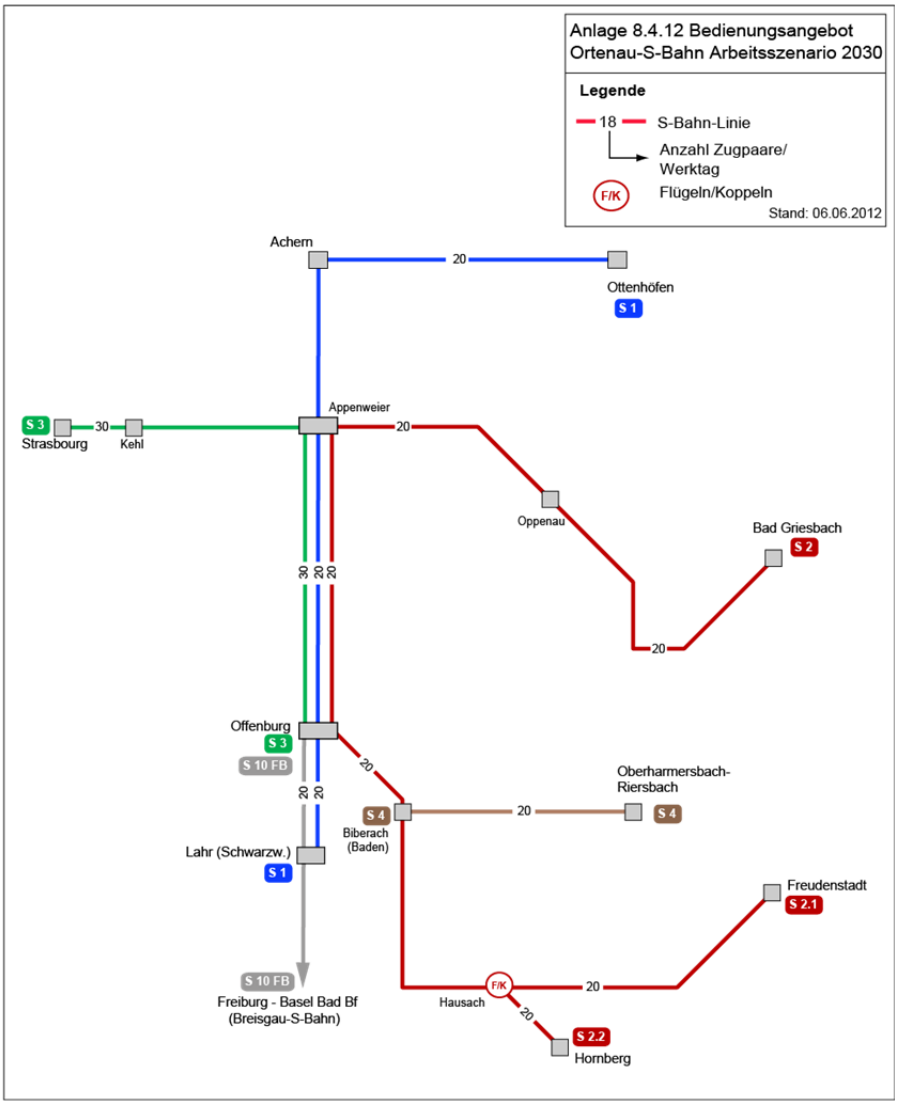


Abb. 2-31: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungs-prognose (Arbeitsszenario) - Regio-S-Bahn Basel/Hochrhein

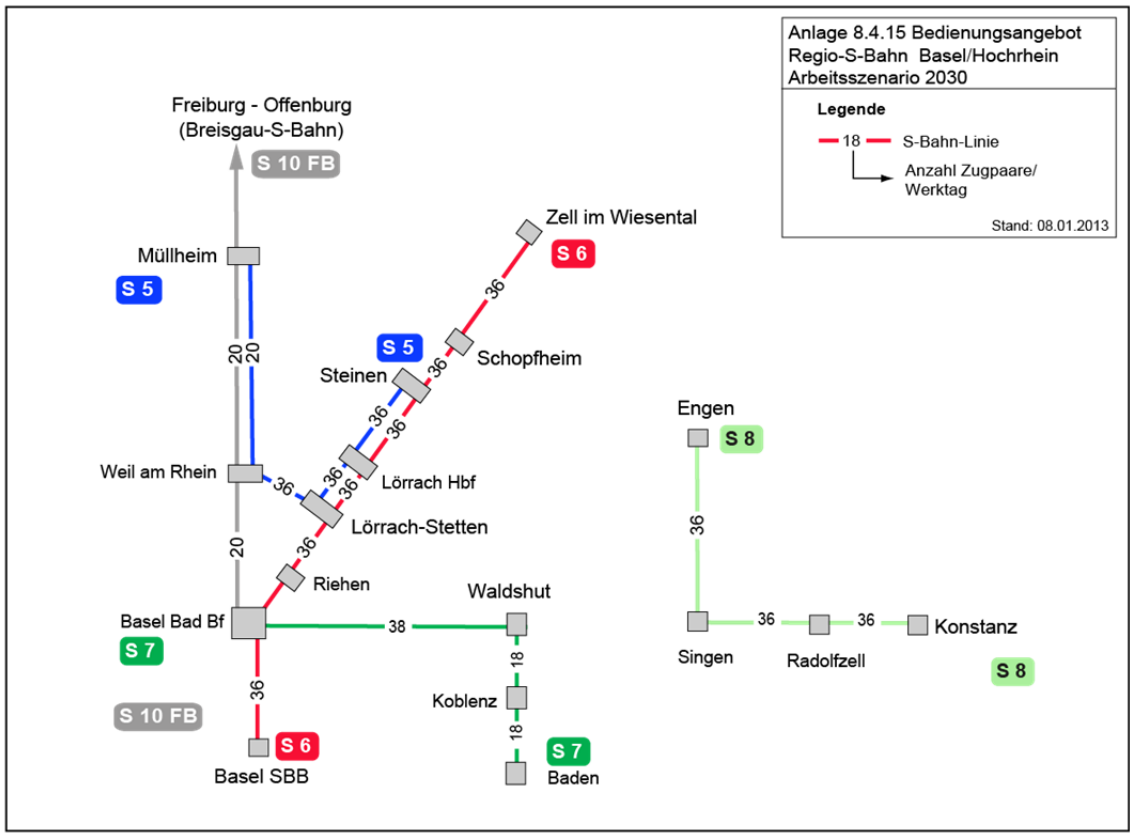


Abb. 2-32: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungs-prognose (Arbeitsszenario) - RSB Neckar-Alb

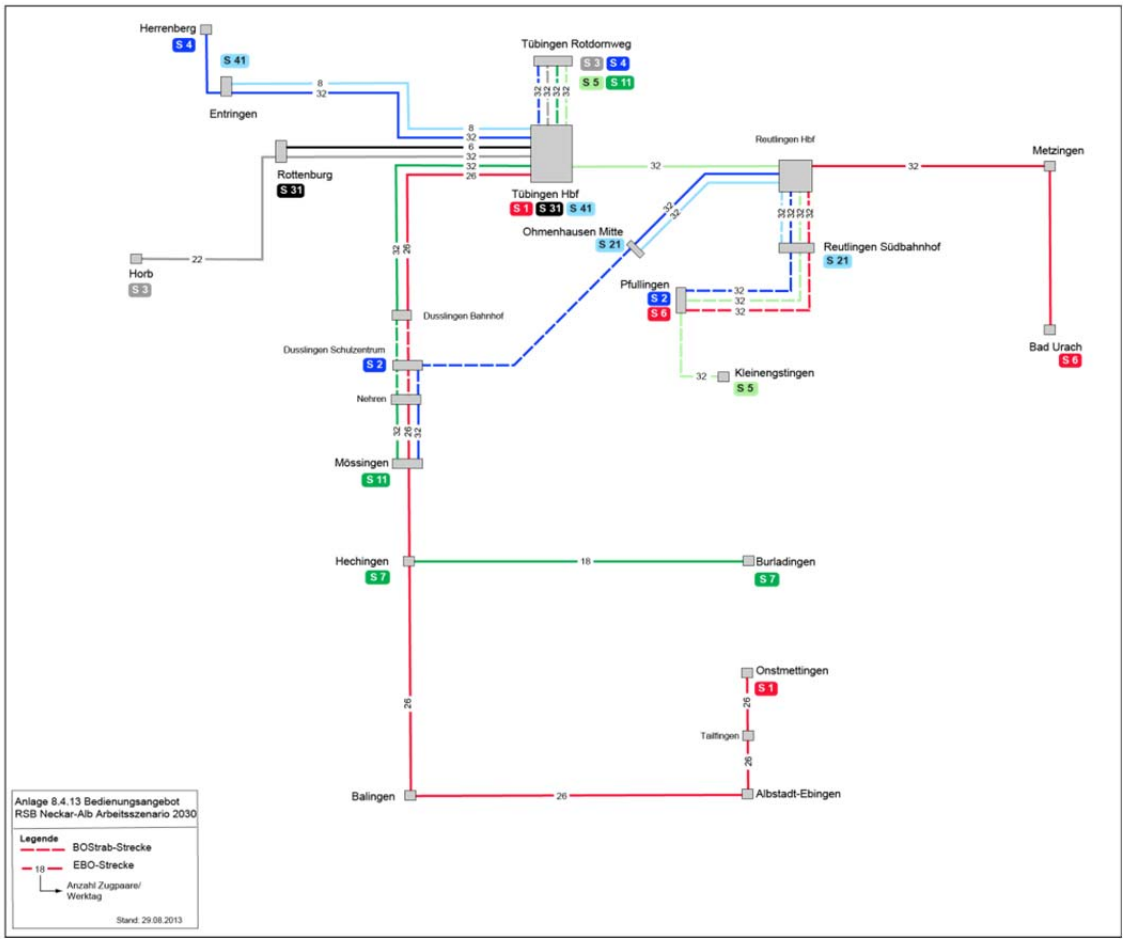
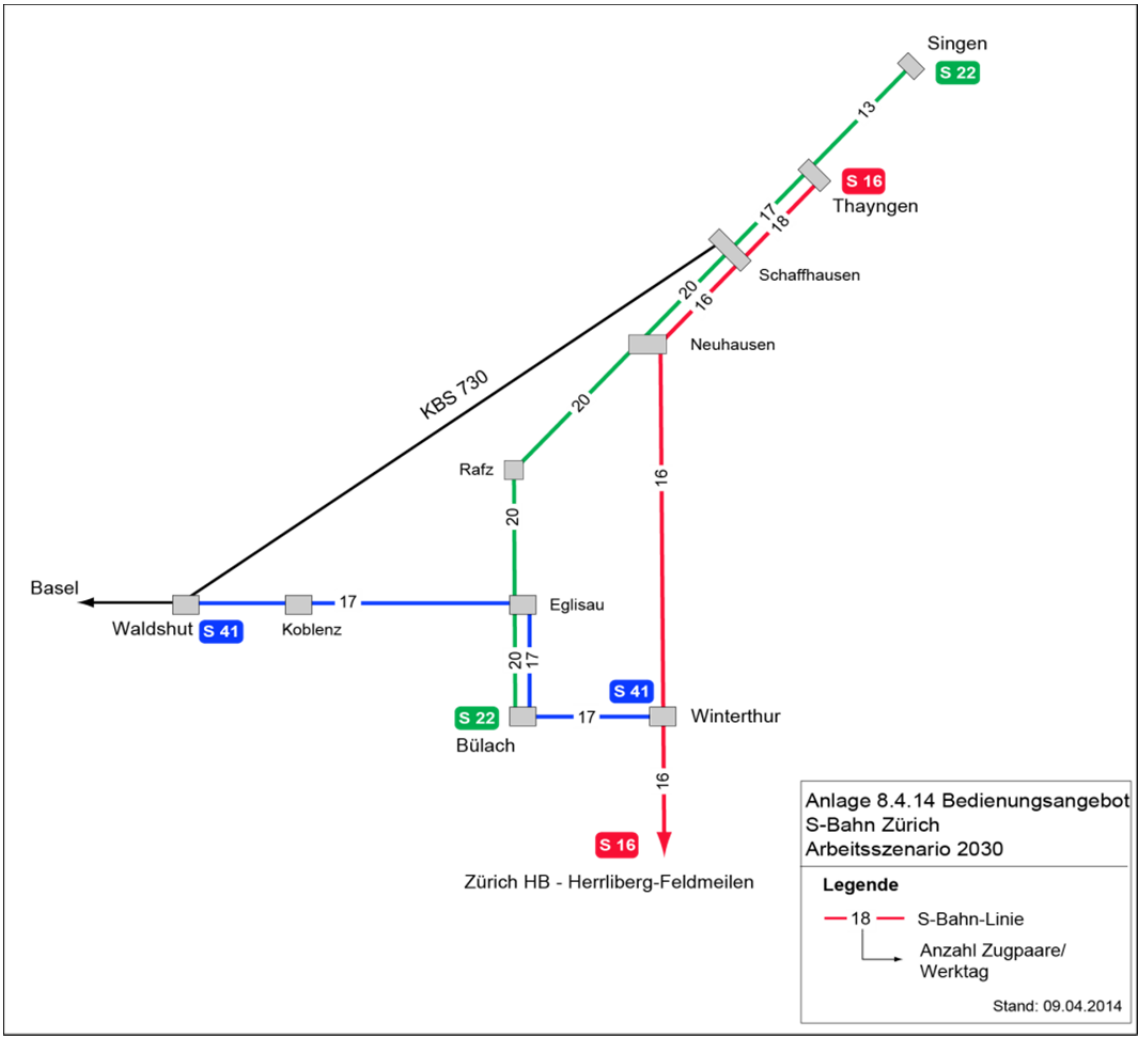


Abb. 2-33: Abbildung des SPNV in Baden-Württemberg in der Bundesverflechtungsprognose (Arbeitsszenario) - S-Bahn Zürich



2.7.4 Wasserstraßennetz

Ausgangspunkt der Arbeiten ist das im Rahmen von Los 6: Netzumlegung Wasserstraße der Verflechtungsprognose 2030 entwickelte und angewendete Wasserstraßennetzmodell. Dieses Netzmodell beinhaltet für den Ausbauzustand der Jahre 2010 und den Prognosefall 2030 alle für die Umlegungsrechnungen benötigten knoten- und streckenspezifischen Daten und Informationen.

Sowohl die raumbezogene Datenspeicherung als auch die grafische Modellierung des Wasserstraßennetzes erfolgt mit Hilfe der Geoinformationssoftware MapInfo. Für die Umlegung der

einzelnen Transportrelationen auf das Netz werden die geographischen Daten, Strecken und Knoteninformationen aus MapInfo in Form von Datensätzen exportiert und programmtechnisch weiterverarbeitet. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in einem eigens hierfür entwickelten nutzerorientierten grafischen Informationssystem.

Das Netz umfasst insgesamt rd. 1.200 inländische und ausländische Netzknoten. Hierbei ist zwischen Verbindungs- und Hafenknoten zu unterscheiden. Die erstgenannten, meist an Mündungen oder Abzweigungen gelegen, sind erforderlich, um alle Teilstrecken des Netzes zu verknüpfen; dort findet kein Umschlag statt. Die Hafenknoten binden hingegen als Einspeisungspunkte der Güterverkehrsmengen die BVWP-Verkehrszellen an das Wasserstraßennetz an. Ausgehend von der Systematik der Häfen und Umschlagstellen des Statistischen Bundesamtes wurden zur Bildung der Einspeisungspunkte Hafengruppen zusammengefasst, die jeweils im selben Kreis und am selben Wasserstraßenabschnitt liegen. Die Anzahl der Einspeisungspunkte eines Kreises wird somit durch die Anzahl der Wasserstraßenabschnitte determiniert, die diesen Kreis berühren. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gegenwärtigen Einspeisungspunkte in Baden-Württemberg.

Tab. 2-25: Einspeisungspunkte des Wasserstraßennetzmodells in Baden-Württemberg

Zelle	Zellenname	Knoten	Knotenname
8111	Stuttgart, Landeshauptstadt, Kreisfreie Stadt	316218000	HF Stuttgart
8116	Esslingen, Landkreis	316216000	HF Plochingen
8118	Ludwigsburg, Landkreis	316214000	HF Neckarweihingen Umschlagstelle
8121	Heilbronn, Kreisfreie Stadt	316108000	HF Heilbronn
8125	Heilbronn, Landkreis	316102000	HF Heidelberg Zementwerk
8128	Main-Tauber-Kreis	316118000	HF Wertheim
8212	Karlsruhe, Kreisfreie Stadt	315206000	HF Karlsruhe
8215	Karlsruhe, Landkreis	315212000	HF Rheinhausen
8216	Rastatt, Landkreis	315216000	HF Dow Chemical
8222	Mannheim, Universitätsstadt, Kreisfreie Stadt	315110000	HF Mannheim
8225	Neckar-Odenwald-Kreis	315116000	HF Obrigheim Kraftwerk
8226	Rhein-Neckar-Kreis	315108000	HF Ladenburg Umschlagstelle
8226	Rhein-Neckar-Kreis	315183000	HF Großer Hacken
8315	Breisgau-Hochschwarzwald, Landkreis	317102000	HF Breisach
8316	Emmendingen, Landkreis	317182000	HF Wyhl Kiesverladestelle
8317	Ortenaukreis	317108000	HF Kehl
8317	Ortenaukreis	317107000	HF Gerstheim Kraftwerk / Kiesverladestelle
8336	Lörrach, Landkreis	317304000	HF Weil

Neben den Verbindungs- und Hafenknoten sind in das Netz insgesamt 49 Zählstellen mit statistischen Daten zum Güter- und Schiffsaufkommen nach Fahrtrichtungen an diesen Querschnitten integriert. Über einen "Soll-Ist-Vergleich" dienen diese zur Eichung und Qualitätskontrolle der Umlegungsergebnisse. Die Zählstellen decken alle wichtigen Verzweigungspunkte des Wasserstraßennetzes ab.

Zu den im Netz erfassten Streckeninformationen gehören neben allgemeinen geographischen Daten auch Geschwindigkeiten, Art des Wasserweges, Schleusenanzahl sowie zugelassene Schiffsgrößen. Die Einordnung eines Streckenabschnittes in Bezug auf die Art des Wasserweges erfolgt für die Binnenwasserstraßen getrennt nach den Kategorien Kanal, geregelter Fluss oder staugeregelter Fluss. Durchschnittliche Schiffsgeschwindigkeiten werden je nach Richtung für jeden Abschnitt vorgegeben.

Zur Festlegung zugelassener Schiffsgrößen je Streckenabschnitt wird zwischen Einzelfahrern und Schubverbänden differenziert. Die Eingrenzung erfolgt sowohl durch die Schiffslängen als auch durch die jeweilige Breite. Als ein weiterer kapazitätsbestimmender Faktor werden die Ablade- bzw. Fahrrinnentiefen für jeden Teilabschnitt des Netzes erfasst. Bei nicht staugeregelten Flüssen enthalten die Streckeninformationen zusätzlich einen Schlüssel, mit dessen Hilfe die in separaten Dateien erfassten Wasserstanddauerlinien zugewiesen werden.

Die Streckeninformationen sind im Netz stets doppelt vorhanden: als getrennte Informationen für das Basisjahr (2010) und für das Prognosejahr (2030). Auf diese Weise bilden die hinterlegten Informationen die Veränderungen innerhalb des Wasserstraßennetzes ab.

Bei Strecken, an denen Zählstellen liegen, wird im Datenfeld "Eichname" der Name der Zählstelle erfasst. Für diese Strecken werden bei der späteren Umlegung u.a. Informationen zu den Transportmengen sowie den Flottenstrukturen tabellarisch ausgewiesen.

Tabelle 2-26 zeigt die Liste der Streckenparameter für das Netzmodell 2010/2030.

Der vorliegende Netzzustand Prognose 2030 BVWP wird dem Bezugsfall BW 2030 zugrunde gelegt. Hierauf aufbauend wird in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber der angepasste Netzfall "BW-Klimaschutz-Szenario 2030" entwickelt. Als Grundlage hierzu wurden vom Auftraggeber die für die Binnenschifffahrt bedeutendsten Parameter des Ausbauzustandes der Wasserstraßen:

- Maximal zulässige Schiffs- und Verbandsgrößen
- Fahrrinnen- bzw. Abladetiefen
- Brückendurchfahrtshöhen (relevant für die Containerschifffahrt)

bzw. deren Änderungen gegenüber dem Bezugsfall vorgegeben.

Tab. 2-26: Parameter der Netzstrecken des Wasserstraßennetzes 2010/2030

Parameter	Beschreibung
ID	Strecken-ID
WST	Name der Wasserstraße
von_Knoten	Nummer des Startknotens
von_km	Lage des Startknotens an der Wasserstraße (Kilometrierung)
von_Ort	Bezeichnung des Startknotens
bis_Knoten	Nummer des Endknotens
bis_km	Lage des Endknotens an der Wasserstraße (Kilometrierung)
bis_Ort	Bezeichnung des Endknotens
Laenge	Streckenlänge zwischen den Knoten in km
Art	Art des Wasserweges (Analysejahr) (K = Kanal; F = staugeregelter Fluss; R = nicht staugeregelter Fluss)
Schleusen	Anzahl der Schleusen (Analysejahr)
v_Tal	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromabwärts in km/h (Analysejahr)
v_Berg	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromaufwärts in km/h (Analysejahr)
Pegel	Codierung Zuordnung Pegeldaten im Jahreslauf (Analysejahr)
Abl_Tiefe	Abladetiefe (Analysejahr)
F_Tiefe	Fahrrinnentiefe (Analysejahr)
Verband_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Analysejahr)
Verband_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Analysejahr)
CO_Lagen	Anzahl der Containerlagen (Analysejahr)
B_Hoehe	Brückendurchfahrtshöhe (Analysejahr)
ECMT	Wasserstraßenklasse (Analysejahr)
E_lmax	Maximale Länge eines Einzelfahrers (Analysejahr)
V_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Analysejahr)
E_bmax	Maximale Breite eines Einzelfahrers (Analysejahr)
V_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Analysejahr)
max_EF_nr	Maximale Einzelfahrer-Klasse (Analysejahr)
max_SL_nr	Maximale Schubleichter-Klasse (Analysejahr)
Eichname	Name des zur Strecke gehörenden Eichpunktes
inner_d	Streckenanteil, der zum deutschen Binnenschifffahrtsnetz gehört (0 bis 1)
n30_Art	Art des Wasserweges (Prognosejahr)
n30_Schleusen	Anzahl der Schleusen (Prognosejahr)
n30_v_Tal	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromabwärts in km/h (Prognosejahr)
n30_v_Berg	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit stromaufwärts in km/h (Prognosejahr)
n30_Pegel	Codierung Zuordnung Pegeldaten im Jahreslauf (Prognosejahr)
n30_Abl_Tiefe	Abladetiefe (Prognosejahr)
n30_F_Tiefe	Fahrrinnentiefe (Prognosejahr)
n30_Verband_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_Verband_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_CO_Lagen	Anzahl der Containerlagen (Prognosejahr)
n30_B_Hoehe	Brückendurchfahrtshöhe (Prognosejahr)
n30_ECMT	Wasserstraßenklasse (Prognosejahr)
n30_E_lmax	Maximale Länge eines Einzelfahrers (Prognosejahr)
n30_V_lmax	Maximale Länge eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_E_bmax	Maximale Breite eines Einzelfahrers (Prognosejahr)
n30_V_bmax	Maximale Breite eines Schubverbandes (Prognosejahr)
n30_max_EF_nr	Maximale Einzelfahrer-Klasse (Prognosejahr)
n30_max_SL_nr	Maximale Schubleichter-Klasse (Prognosejahr)

2.8 Methodik der Ermittlung der CO_2-Emissionen

2.8.1 Gegenstand

In die Prognose der CO_2-Emissionen **einbezogen** werden die vier Verkehrsarten

- Straßenverkehr
- Schienenverkehr
- Luftverkehr
- und Binnenschifffahrt.

Der Ausstoß des **Seeverkehrs** wird **nicht** betrachtet, da er in den Emissionen des Verkehrs gemäß ihrer gängigen Definition nach dem IPCC-Prinzip[49] nicht enthalten ist. Der Ausstoß des **Luftverkehrs** und damit auch der des gesamten Verkehrssektors wird **sowohl** nach der international vereinbarten Definition des IPCC, auf die sich die Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland gemäß dem Kyoto-Protokoll beziehen und nach der nur der Luftverkehr **innerhalb Deutschlands** berücksichtigt wird, **als auch insgesamt** (nach dem Standortprinzip) dargestellt (vgl. auch Kapitel 2.8.2).

2.8.2 Allgemeine und verkehrsträgerspezifische Definitionen

Bei **allen** Emissionen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen

- den **direkten** Emissionen, die beim Verbrauch der Endenergie, d.h. bei der Verbrennung von Kraftstoffen im Motor bzw. im Triebwerk von Straßenfahrzeugen, dieselbetriebenen Schienenfahrzeugen, Flugzeugen und Binnenschiffen entstehen,
- und den **indirekten** Emissionen, die in der **Vorkette** vor dem Verbrauch der Endenergie, d.h. im Wesentlichen bei der Umwandlung von Primärenergie in Endenergie, d.h. von Rohöl in Kraftstoffe in den Raffinerien sowie der verschiedenen Primärenergieträger (Kohle, Gas, Öl etc.) in Strom in den Kraftwerken entstehen.

Die **gesamten** (aller Sektoren) Emissionen eines Stoffes werden sowohl in der **international vereinbarten** als auch in der **national üblichen** Definition – der Differenzierung des Energieverbrauchs folgend – in die vier Sektoren

[49] IPCC ist die Abkürzung für den "Intergovernmental Panel on Climate Change", von dem diese Definition entwickelt wurde.

- Kraftwerke,
- Industrie,
- Haushalte und Kleinverbraucher
- und Verkehr

unterschieden. Dabei wird der **gesamte** Ausstoß des **elektrisch** betriebenen Schienenverkehrs nicht dem Verkehrs-, sondern dem **Kraftwerkssektor** und die **indirekten** Emissionen der **Kraftstoffe** der Industrie, nämlich der **Mineralölverarbeitung**, zugeordnet.

Eine entsprechende Abgrenzung der CO_2-Emissionen des **Verkehrs**, also die Betrachtung **nur** der **direkten** Emissionen, ist somit **unvollständig** und in mancher Hinsicht auch **aussagelos**. Sie würden z.B. um zwei Drittel sinken, wenn der gesamte Pkw-Verkehr – ungeachtet der energetischen und emissionsspezifischen Effizienz – auf die Schiene verlagert werden würde, weil der dann entstehende Ausstoß den Kraftwerken zugerechnet werden würde. Deshalb sollte sich eine **verkehrsspezifische** Emissionsprognose immer auf die **gesamten**, d.h. die direkten und die indirekten, Emissionen beziehen. So wird auch in den Berechnungen des Instituts für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) im Rahmen des **TREMOD-Modells** vorgegangen.[50] Dennoch werden hier auch die **direkten** Emissionen dargestellt, weil sich die international vereinbarte Definition und somit auch das Monitoring der Verpflichtungen gemäß dem **Kyoto-Protokoll** darauf beziehen.

Der **Kraftstoffverbrauch**, der der Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Umweltbundesamts im Rahmen des Kyoto-Monitoring zu Grunde liegt, entspricht grundsätzlich dem (Inlands-) Absatz gemäß den **Energiebilanzen**. Die **Biokraftstoffe** (Ethanol, Biodiesel) werden im Kyoto-Monitoring nur nachrichtlich ausgewiesen, sind also in den so definierten Emissionen des Verkehrs **nicht enthalten**.[51] Somit führt ein steigender Anteil von Biokraftstoffen bei gleichem Gesamtverbrauch zu einem stärkeren Rückgang der CO_2-Emissionen in der Kyoto-Definition, als es der tatsächlichen Entwicklung entspricht.

Der Energieverbrauch des **Straßenverkehrs** wird in den Energiebilanzen auf der Basis des Inlandsabsatzes von Otto- und Dieselkraftstoff, soweit er auf den Straßenverkehr entfällt, berechnet. Er ist zwischen 1998 und 2003 deutlich stärker gesunken als der Verbrauch, und zwar

50 Vgl. IFEU, Aktualisierung "Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030" (TREMOD, Version 5.3) für die Emissionsberichterstattung 2013 (Berichtsperiode 1990-2011), Endbericht, Heidelberg 2012.

51 Vgl. z.B. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012, Dessau 2013, S. 207.

vor allem weil zunehmend Kraftstoffmengen, die in Deutschland verbraucht werden, **im Ausland getankt** wurden. Gemäß den Schätzungen des DIW nahm der Saldo von Im- und Exporten, d.h. die Differenz zwischen den von deutschen Fahrzeugen (im In- und Ausland) getankten und den in Deutschland abgesetzten Mengen, zwischen 1998 bis 2003 um 1,5 Mrd. l (Ottokraftstoff) bzw. 2,8 Mrd. l (Dieselkraftstoff) zu und lag 2003 bei 2,5 bzw. 2,7 Mrd. l.[52] Diese Entwicklung war zum größten Teil auf die grauen Im-/Exporte zurückzuführen, die sich in diesem Zeitraum von Exporten in Höhe von 0,350 Mrd. l (1998) auf Importe in Höhe von 3,3 Mrd. l (2003) drehten. Der Grund dafür lag in den zunehmenden Preisdifferenzen, die in Deutschland auf Grund der damaligen Einführung der sog. "Öko-Steuer" stärker stiegen als im Ausland. Dagegen werden im **TREMOD**-Modell die **effektiven** spezifischen Kraftstoffverbräuche herangezogen, die im Rahmen der Kraftstoffverbrauchsrückrechnung des **DIW** geschätzt werden.[53] Sie beinhalten auch die im Ausland getankten Mengen. Aus diesem Grund liegen die darauf basierenden CO_2-Emissionen des Straßenverkehrs des Jahres 2010 um rund 5 % **über** denen des Kyoto-Monitoring.

Der Energieverbrauch des **Schienenverkehrs** gemäß den Energiebilanzen enthält neben der Traktionsenergie auch den stationären Energieverbrauch, d.h. für ortsfeste Anlagen wie z.B. Bahnhöfe. Wie oben bereits erwähnt, werden im Kyoto-Monitoring die CO_2-Emissionen der elektrisch betriebenen Züge nicht berücksichtigt, sondern nur diejenigen der dieselbetriebenen.

Im **Luftverkehr** bildet der Inlandsabsatz von Kerosin und Flugbenzin den effektiven Verbrauch annähernd zutreffend ab und kann somit mit ihm gleichgesetzt werden. Die **CO_2-Emissionen** dieses Verkehrsträgers werden nach zwei Prinzipien dargestellt:

- Gemäß der international vereinbarten Definition, nach der auch das **Kyoto-Monitoring** erfolgt, wird nur der Binnenverkehr der einzelnen Länder, hier also der **innerdeutsche Verkehr** berücksichtigt, der (wachstumsdynamische) grenzüberschreitende Verkehr dagegen nicht. Hintergrund für diese, auf den ersten Blick unzureichende, Definition ist, dass bei internationalen Verkehren die Zuordnung zu einem Land nicht ohne weiteres klar ist (Land des Startflughafens, Nationalität der Reisenden etc.). Natürlich folgt aus dieser Definition, dass im Rahmen des Kyoto-Monitoring **große Teile** der Emissionen des weltweiten Luftverkehrs **nicht erfasst** werden.

---

52 Vgl. D. Kalinowska, J. Kloas, H. Kuhfeld, U. Kunert, Aktualisierung und Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle für die Fahrleistungen von Kraftfahrzeugen und für das Aufkommen und für die Verkehrsleistung im Personenverkehr (MIV), Berlin 2005, S. 72.

53 Vgl. zuletzt H. Engerer, U. Kunert: Benzin und Diesel dominieren weiterhin im Straßenverkehr: in: DIW-Wochenbericht 36/2015, S. 779 - 788.

- Nach dem **Standortprinzip** werden die Emissionen dem Land des jeweiligen **Startflughafens** zugeordnet, d.h. abgehende Flüge in Gänze Deutschland und ankommende Flüge komplett dem jeweiligen Herkunftsland, unabhängig von der Nationalität der Flugreisenden. Berücksichtigt wird grundsätzlich der Verkehr zwischen den deutschen Flughäfen und den entsprechenden Endzielflughäfen, wenngleich dies in der Praxis nicht immer möglich ist. In dieser Abgrenzung werden die Emissionen des weltweiten Luftverkehrs **vollständig** erfasst und hälftig den beiden beteiligten Ländern einer Verkehrsrelation zugeordnet.

Die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen der **Binnenschifffahrt** gemäß dem Kyoto-Monitoring beruht auf dem in den Energiebilanzen ausgewiesenen Kraftstoffverbrauch, der den **Inlandsablieferungen** von Dieselkraftstoff an die Binnenschifffahrt gemäß der amtlichen Mineralölstatistik des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle entspricht. Dort nicht erfasst sind die im **Ausland** gebunkerten Kraftstoffmengen. Sie sind aufgrund des hohen Anteils des grenzüberschreitenden Verkehrs sowie der Preisdifferenzen zwischen dem In- und Ausland, insbesondere in den Niederlanden, erheblich. Somit wird die absolute Höhe des Energieverbrauchs und damit der Emissionen der Binnenschifffahrt durch den Inlandsabsatz drastisch **unterschätzt**. Für den **effektiven Kraftstoffverbrauch** der Binnenschifffahrt wurden von IFEU Werte geschätzt, die mehr als doppelt so hoch liegen.[54]

In der Bilanzierung gemäß dem Kyoto-Monitoring sind auch die Emissionen des so genannten **"Übrigen Verkehrs"** enthalten. Dabei handelt es sich um den Ausstoß des bauwirtschaftlichen Verkehrs und von Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen.[55] Sie belaufen sich auf immerhin 4 Mio. t (2010), haben aber mit dem Verkehr im engeren Sinne nichts zu tun.

2.8.3 CO_2-Emissionsfaktoren

Für die CO_2-Emissionen der **Kraftstoffe** wurden die Emissionsfaktoren angesetzt, die seit 2004 sowohl vom Umweltbundesamt für das Monitoring der Treibhausgasemissionen gemäß dem **Kyoto-Protokoll** als auch vom Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (IFEU) im Rahmen des **TREMOD-Modells** verwendet werden. Sie werden dort jeweils bezogen auf den Energieinhalt dargestellt (kg CO_2 / GJ). Zur Bestimmung des "gängigeren" gewichtsbezogenen

54 Vgl. IFEU, TREMOD 5 – Version 5.3, Anhang: Materialien und Erläuterungen, Heidelberg 2012, S. 89.
55 Umweltbundesamt (2013), a.a.O., S. 222-225.

Emissionsfaktors (kg CO_2 pro kg Kraftstoff) sind erstere mit dem gewichtsbezogenen Energieinhalt ("Heizwert", MJ / kg Kraftstoff) zu multiplizieren. Die **direkten** CO_2-Emissionsfaktoren der einzelnen Kraftstoffarten sind in Tab. 2-27 für beide Bezugsgrößen dargestellt.[56] Diese Faktoren sind – abgesehen von Verfeinerungen bei ihrer Berechnung – im Zeitablauf konstant und wurden daher auch für das Jahr **2030** herangezogen. Hier sind auch die direkten Emissionsfaktoren für Biokraftstoffe (Ethanol, Biodiesel) dargestellt, wie sie in TREMOD verwendet, im Kyoto-Monitoring aber lediglich nachrichtlich ausgewiesen werden.

Tab. 2-27: Emissionsfaktoren für Kraftstoffe

	Heizwert	CO_2-Emissionsfaktor			
		Direkt		Vorkette	Gesamt
	(MJ/kg)	(kg/GJ)	(kg/kg)	(kg/kg)	(kg/kg)
Ottokraftstoff	43,543	72,000	3,135	0,618	3,753
Dieselkraftstoff	42,960	74,000	3,179	0,427	3,606
Kerosin	42,800	73,600	3,150	0,427	3,577
Ethanol[1)]	26,658	72,000	1,919	-0,118	1,802
Biodiesel[1)]	37,242	70,800	2,637	-0,906	1,731
Erdgas[2)]	45,969	65,000	2,988	0,377	3,365
Flüssiggas[2)]	46,500	56,000	2,604	0,325	2,929
1) Vorkette bezogen auf 2010 2) Vorkette eigene Schätzung					

Quelle: TREMOD

Für die indirekten CO_2-Emissionen aus der **Vorkette** wurden ebenfalls, soweit dort ausgewiesen, die Werte verwendet, die von IFEU für **TREMOD** berechnet worden sind (vgl. Tab. 2-27).[57] Bei **Biokraftstoffen** wird der Ausstoß bei der Verbrennung, wie bei allen anderen Kraftstoffarten, als direkte Emission definiert und die Aufnahme von CO_2 aus der Atmosphäre, die bei der Produktion dieser Kraftstoffe erfolgt, der Vorkette als negativer Wert zugeordnet. Konkretisiert wurde das von IFEU, indem der gesamte Emissionsfaktor (direkt + Vorkette) der Biokraftstoffe im Jahr 2008 auf 50 % desjenigen des mineralölbasierten Kraftstoffs festgesetzt wurde. Für

56 IFEU (2012), a.a.O., S. 12.
57 IFEU (2012), a.a.O., S. 13-14.

Ethanol belief er sich in diesem Jahr also auf 1,877 kg/kg (Ottokraftstoff: 3,753). Für **Erdgas** und **Flüssiggas** wurden in den Publikationen von IFEU keine indirekten Emissionsfaktoren ausgewiesen, weshalb sie von uns bereits in der BVWP-Prognose in Anlehnung an das Verhältnis zu den direkten Emissionen bei den anderen Kraftstoffen geschätzt wurden.

Für den **Prognosezeitraum** wurden die gesamten Emissionsfaktoren für **fossile** Kraftstoffe (Mineralöl und Erdgas) als **konstant** angenommen. Dies kann als unproblematisch angesehen werden, weil sich die Struktur von deren Bereitstellung nicht sonderlich verändern wird. Für **Biokraftstoffe** wurde von IFEU angenommen, dass das o.a. Verhältnis zu den konventionellen Kraftstoffen bis zum Jahr 2018 auf 40 % sinkt und zwar linear ab 2008. Daraus errechnen sich für das Jahr 2010 Werte von 48 % bzw. 1,802 kg/kg (vgl. Tab. 2-27) sowie für 2030 ein Faktor in Höhe von 1,501 kg/kg.

Der Emissionsfaktor für **Strom** ist grundsätzlich stark von der Struktur der eingesetzten Primärenergieträger abhängig. In der aktuellsten Version von **TREMOD** (5.3) wird für **Bahnstrom** und für das Jahr 2011 ein Faktor in Höhe von 163,7 kg/GJ ausgewiesen, was in der "gängigeren" Einheit 589 g/kWh bedeutet. Für die Entwicklung bis zum Jahr 2030 wurde eine **Konstanz** dieses Faktors angenommen. Szenarien, die die veränderte Struktur der Stromerzeugung abbilden, werden erst Bestandteil der nächsten TREMOD-Version sein.[58]

Für die Zwecke der **BVWP-Prognose** war vor allem die Annahme einer Konstanz zu ungenau. Zudem erschien es sinnvoll, nicht den Faktor für Bahnstrom, sondern vor allem für den Prognosezeitraum einen einheitlichen Faktor für alle elektrisch betriebenen Verkehre (auf Schienen und Straßen) zu verwenden. Er wiederum hat sich somit auf die **öffentliche Stromerzeugung** zu beziehen. Zwischen 1990 und 2012 ist der Emissionsfaktor gemäß einer aktuellen Berechnung des Umweltbundesamt von 744 auf 576 g/kWh zurückgegangen, wobei er im Jahr **2010** mit **546** g/kWh aus bekannten Gründen noch niedriger war als zuletzt.[59]

Für das Jahr **2030** wurden bereits zu Beginn des BVWP-Prozesses im Hinblick auf die Prognose der transportintensiven Kohle- und Mineralölwirtschaft belastbare Annahmen zur Struktur der deutschen Stromerzeugung im Jahr 2030 erarbeitet. Demnach sinken die Anteile der Kernenergie, der Stein- und der Braunkohle, während diejenigen der erneuerbaren Energien und von

58 IFEU (2012), a.a.O., S. 14.

59 Umweltbundesamt, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, Dessau-Roßlau 2013, S. 4.

Erdgas steigen.[60] Gewichtet mit den spezifischen Faktoren errechnet sich ein gesamter Emissionsfaktor in Höhe von **387** g/kWh,[61] der somit um **29 %** unter dem Wert von 2010 liegt.

2.8.4 Berechnungsverfahren

Den Ausgangspunkt für die Vorausschätzung der (deutschlandweiten) CO_2-Emissionen in der **BVWP-Prognose** bildeten bei allen Verkehrsarten die jeweiligen **Verkehrsleistungen**. Im **Straßen-** und im **Schienenverkehr** wurden daraus und aus Annahmen zur Entwicklung der Besetzungs- bzw. Auslastungsgrade die **Fahrleistungen** der jeweiligen Verkehrsmittel, d.h. der Kfz und der Züge, bestimmt. Dabei wurde im Straßenverkehr nach Fahrzeugarten (Pkw, Krafträder, Busse, Lkw etc.) und im Schienenverkehr nach Verkehrsarten (Personennah-, Personenfern-, Güterverkehr und schienengebundener ÖSPV) differenziert. Aus diesen Fahrleistungen wurden die entsprechenden **Energieverbräuche** (von Kraftstoffen bzw. Strom) abgeleitet. Dazu waren die jeweiligen **spezifischen** (fahrleistungsbezogenen) Energieverbräuche erforderlich (vgl. Kapitel 3.5.1). Auch hier wurde im Straßenverkehr nach Fahrzeugarten und im Schienenverkehr nach Verkehrsarten unterschieden. Beim **Luftverkehr** und bei der **Binnenschifffahrt** wurden spezifische Energieverbräuche verwendet, die direkt auf die **Verkehrsleistungen** bezogen waren. Somit erübrigte sich hier die Vorausschätzung der jeweiligen Betriebsleistungen. Aus den Energieverbräuchen wurden schließlich bei allen Verkehrsarten mit den o.a. Emissionsfaktoren die **CO_2-Emissionen** bestimmt.

Die vorliegende Prognose der CO_2-Emissionen in **Baden-Württemberg** sowohl im BVWP- als auch im Klimaschutz-Szenario basierte zunächst auf den **territorialen Verkehrsleistungen** innerhalb des Bundeslands. Auf diese Größen wurden pro Verkehrsart die verkehrsleistungsbezogenen Emissionen **Deutschlands** der Jahre 2010 bzw. 2030 gelegt. Dies impliziert also, dass die spezifischen Verbräuche und die Emissionsfaktoren in Baden-Württemberg gleich hoch sind wie im Bund. Mangels anderer Informationen ist hier kein anderes Vorgehen möglich.

Im Ergebnis wurden für das Jahr **2010** CO_2-Emissionen in Höhe von **19,04 Mio. t** (Kyoto-Definition) errechnet. Vom **Statistischen Landesamt** wurde für dieses Jahr ein Wert von **20,7**

---

60 BVU, ifo Institut, Gemeinsame Stellungnahme zu den Annahmen des BMWi-Berichtes „Energieszenarien 2011“, Freiburg/München 2012, S. 15.

61 Intraplan, Planco, TU Berlin, Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung, Entwurf des Endberichts, Essen/Berlin/München 2014, S. 133.

Mio. t ausgewiesen.[62] Damit wird also zumindest die Größenordnung unserer Berechnungen bestätigt. Die Abweichung in Höhe von 8 % kommt zum großen Teil dadurch zustande, dass unsere Berechnungen auf den Territorialleistungen basierten. Für die Verkehrsleistungen des Quell-/Zielverkehrs über die jeweiligen Gesamtentfernungen ergeben sich bei sonst gleichem Vorgehen Emissionen in Höhe von 20,3 Mio. t, die also nur noch um 2 % vom StaLA-Wert abweichen.

62 Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Energiebedingte Kohlendioxid (CO_2)-Emissionen (Quellenbilanz) in Baden-Württemberg seit 1975 nach Sektoren, http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/l1b01.asp

3. VERKEHRSENTWICKLUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG GEMÄSS BVWP-PROGNOSE

3.1 Vorgehensweise

Die BVWP-Prognose, hier das maßgebliche "Kernszenario"[63], berücksichtigt das gesamte Verkehrsgeschehen in Deutschland[64], differenziert nach Verkehrsmitteln, Verkehrssegmenten und Quelle-Ziel-Verkehrsströme. Durch letzteres lassen sich die Ergebnisse in Verbindung mit den Verkehrsnetzen auch für einzelne Regionen, z.B. für Baden-Württemberg, aufbereiten.

Hierzu sind jedoch einige Definitionen und Arbeitsschritte erforderlich, die im Folgenden beschrieben werden:

- Maßgeblich ist hier das **Territorialprinzip**: Es wird der Verkehr **auf dem Territorium von Baden-Württemberg** betrachtet, unabhängig davon, ob der Verkehr von Bürgen (oder Versendern/Empfängern) des Landes durchgeführt wird oder nicht. Es wird also betrachtet:
  - der Binnenverkehr im Bundesland (Quelle und Ziel der Fahrten liegen in Baden-Württemberg)
  - der Verkehr von Baden-Württemberg in andere Bundesländer oder Länder (Quelle der Fahrten liegt in Baden-Württemberg)
  - umgekehrt der Verkehr aus anderen Bundesländern oder Ländern nach Baden-Württemberg (Ziel der Fahrten liegt in Baden-Württemberg)
  - der Durchgangsverkehr durch Baden-Württemberg
- Insbesondere für Letzteres ist es erforderlich, die relevanten Verkehrsströme mit Hilfe von Routenwahlverfahren herauszufiltern.
- Für die Berechnung der Verkehrsleistung werden nur **diejenigen Streckenanteile** betrachtet, die **auf dem Territorium** des Bundeslandes zurückgelegt werden (**"Territorialleistung"**). Dies erfordert nicht nur ein Routensuchverfahren, sondern eine Abfrage im Modell, ob sich ein bestimmter Streckenabschnitt der Route im Bundesland befindet oder nicht.
- Komplizierter ist hier die Darstellung des Luftverkehrs: Zubringerverkehr zu den Flughäfen, auch zu den außerhalb Baden-Württembergs gelegenen wie z.B. Frankfurt Main, wird dem Landverkehr zugeordnet und behandelt wie die übrigen Landverkehre. Der auf Baden-

63 Daneben wurde in der BVWP-Prognose ein Szenario "höheres Wirtschaftswachstum" und "niedrigeres Wirtschaftswachstum" gerechnet, in denen, wie der Name sagt, nur das Wirtschaftswachstum als wichtigste Einflussgröße für das Verkehrswachstum variiert wurde.

64 Mit Ausnahme der Rohrfernleitungen.

Württemberg bezogene Flugverkehr wird mit den geschätzten Streckenanteilen über Baden-Württemberg hochgerechnet.[65] Der **Durchgangsverkehr** ("Überflieger") wird **nicht betrachtet**, so dass, anders als beim Landverkehr, beim Luftverkehr kein "Transitverkehr" berücksichtigt ist.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der BVWP-Prognose in der Aufbereitung für Baden-Württemberg dargestellt, und zwar differenziert nach:

- Personenverkehr (Kapitel 3.3)
- Güterverkehr (Kapitel 3.4)
- verkehrsbedingter CO_2-Ausstoß (Kapitel 3.5)

Dabei werden jeweils die "veröffentlichten"[66] bundesweiten Ergebnisse zu Vergleichszwecken vorangestellt. Weil die Verkehrsprognosen immer von den Prognoseprämissen abhängen, wird den Ergebniskapiteln noch ein Kapitel 3.2 "Rahmenbedingungen der Prognose" vorangestellt.

3.2 Rahmenbedingungen der BVWP-Prognose

Für die BVWP-Prognosen sind für alle wesentlichen prognosebestimmenden Faktoren detaillierte Festlegungen getroffen worden, und zwar zu den Bereichen:

(1) **Sozioökonomische** und **soziodemographische** Rahmenbedingungen ("Strukturdaten"),
(2) **Verkehrsinfrastruktur/Verkehrsnetze** ("Verkehrsangebot"),
(3) **Verkehrspolitische** Rahmenbedingungen und **Nutzer-/Transportkosten** ("Kosten und Verkehrspolitik") sowie
(4) **technische, energie- und umweltpolitische** Rahmenbedingungen ("Energiemix und Antriebsarten").

65 Wird im Modell zwar "exakt" ermittelt. Da aber die tatsächlich beflogenen Strecken allerdings unterschiedlich sein können, kann es sich hier nur um eine Schätzung handeln.

66 BVU / INTRAPLAN / IVV / Planco, Verkehrsverflechtungsprognose 2030 - Los 3: Erstellung der Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen unter Berücksichtigung des Luftverkehrs, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Juni 2014

Die wesentlichen Annahmen werden in diesem Unterkapitel zusammengefasst, wobei die speziellen Annahmen für die CO_2-Berechnungen erst im Zusammenhang mit Kapitel 3.5 dargestellt werden.

3.2.1 Bereich "Strukturdaten"

Im Bereich "Strukturdaten" sind folgende Variablen in den Verkehrsmodellen bzw. den Prognosen berücksichtigt:

- Einwohner nach Altersgruppen/Personengruppen je Raumeinheit
- Erwerbstätigkeit
- BIP je Raumeinheit insgesamt (Personenverkehr), nach Wirtschaftsbereichen (Güterverkehr)
- Außenhandel (Güterverkehr)
- Energiepolitische Leitvariablen (Menge Importkohle u.a.)
- Pkw-Bestand/-Verfügbarkeit
- Singuläre Verkehrserzeuger (große Industrieanlagen, Häfen, u.a.)

(1) Einwohner

Die Zahl der Einwohner und deren Struktur ist eine der zentralen Leitgrößen der Verkehrsentwicklung im Personenverkehr. Indirekt bestimmt sie auch andere Einflussgrößen wie die Wirtschaftsentwicklung (Arbeitskräftepotential). Unter sonst gleichen Rahmenbedingungen ist von einem Verhältnis des Verkehrsaufkommenszuwachses zum Bevölkerungswachstum (Elastizität) von etwa 1 auszugehen. Das heißt bei einem 5 prozentigen Bevölkerungswachstum ist von etwa 5 % mehr Wegen auszugehen. Umgekehrt bedeutet eine Bevölkerungsabnahme um 10 % etwa eine Verkehrsabnahme von 10 % (zu den Details und zu den Einschränkungen dieser Aussage siehe die Ausführungen bei der Modellbeschreibung in Kapitel. 2.1.3).

Die zentralen Annahmen bei den demographischen Leitdaten für Deutschland in der BVWP-Prognose (Kernszenario) sind in Tab. 3-1 gezeigt.

Tab. 3-1: Entwicklung der demographischen Leitdaten in Deutschland gemäß BVWP Prognose (Kernszenario)

	Mio.		2030/10 (%)	
	2010	2030	Insg.	p.a.
Einwohner[1)]	80,210	78,249	-2,4	-0,1
darunter im Alter von				
• 0 - 9	6,898	6,637	-3,8	-0,2
• 10 - 17	6,324	5,419	-14,3	-0,8
• 18 - 44	27,292	23,570	-13,6	-0,7
• 45 - 64	23,199	20,973	-9,6	-0,5
• 65 +	16,496	21,651	31,2	1,4
Schüler[2)]	11,078	9,496	-14,3	-0,8
• Primar	2,877	2,776	-3,5	-0,2
• Sekundar I	4,421	3,855	-12,8	-0,7
• Sekundar II	3,780	2,865	-24,2	-1,4
Erwerbspersonen[3)]	41,549	39,734	-4,4	-0,2

1) Auf Basis des Zensus 2011
2) An allgemeinbildenden Schulen gemäß BBSR, an berufsbildenden gemäß KMK (2011)
3) 2030 unter Berücksichtigung der Anhebung des Renteneintrittsalters

Quelle: Statistisches Bundesamt, BBSR, KMK

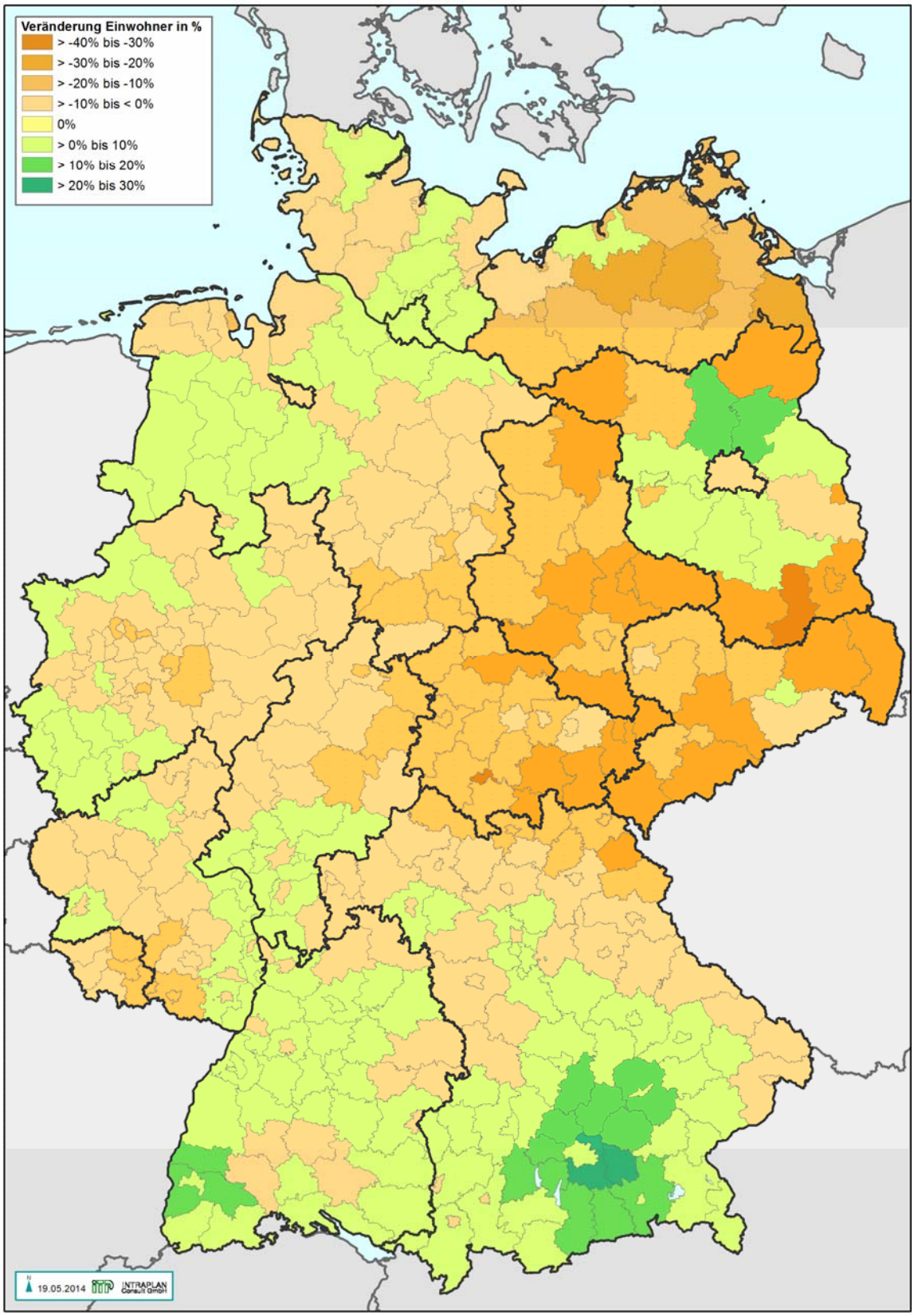
Demnach sinkt die Bevölkerung gemäß BVWP-Prognose von 2010 bis 2030 um knapp 2 Mio. Einwohner oder 2,4 % bei einer gleichzeitigen deutlichen Verschiebung hin zu älteren Bevölkerungsgruppen. Bei der für die Wirtschaftsentwicklung und die Verkehrsentwicklung besonders wichtigen Gruppe der Erwerbspersonen geht die Anzahl sogar um 4,4 % zurück.

Der bundesweite Bevölkerungsrückgang vollzieht sich allerdings nicht gleichmäßig. In **Baden-Württemberg** wird sogar noch von einer **Zunahme der Bevölkerung** um 3 % ausgegangen (Tab. 3-2 und Abb. 3-1), die Differenz zur bundesweiten Entwicklung (-2,4 %) liegt bei über 5 Prozentpunkten.

Tab. 3-2: Demographische Entwicklung nach Bundesländern (Einwohner in 1000)

Bundesland	2010	2030	Veränderung in %
Schleswig-Holstein	2.800	2.818	0,7
Hamburg	1.707	1.759	3,1
Bremen	543	535	-1,4
Niedersachsen	7.886	7.729	-2,0
Nordrhein-Westfalen	17.538	16.983	-3,2
Hessen	5.972	5.901	-1,2
Rheinland-Pfalz	3.990	3.940	-1,3
Saarland	1.000	910	-8,9
Baden-Württemberg	10.487	10.798	3,0
Bayern	12.398	12.719	2,6
Berlin	3.292	3.279	-0,4
Mecklenburg-Vorpommern	1.610	1.362	-15,4
Brandenburg	2.456	2.358	-4,0
Sachsen-Anhalt	2.287	1.825	-20,2
Thüringen	2.189	1.818	-16,9
Sachsen	4.057	3.513	-13,4
Summe Deutschland	**80.210**	**78.249**	**-2,4**

Abb. 3-1: Einwohnerentwicklung 2030 gegenüber 2010 nach Kreisen/ kreisfreien Städten



Daraus folgt, dass der **bundesweit dämpfende Einfluss der Bevölkerungsentwicklung** auf die Verkehrsentwicklung für **Baden-Württemberg nicht** zum Tragen kommt.

Erschwerend kommt hinzu, dass die **tatsächliche** Einwohnerzahl bis Ende 2014 bundesweit um 0,9 Mio. **über** dem Wert von 2010 lag, während bei BBSR, der Basis für die bei der BVWP-Prognose verwendeten Bevölkerungsprognose, ein Rückgang von -0,4 Mio. erwartet wurde. Dies entspricht einer **Differenz von 1,3 Mio.**

(2) Erwerbstätigkeit

Die Entwicklung der Erwerbstätigen am Arbeitsort hat Auswirkungen auf das Verkehrsaufkommen in den Fahrtzwecken Arbeit, Geschäft und bei den Fernpendlern, die ein Bestandteil des Privatverkehrs sind.

Im Kernszenario der BVWP-Prognose wurde hier für Deutschland eine Abnahme von 40,5 Mio. Erwerbstätigen im Jahr 2010 auf 39,0 Mio. in 2030 angenommen, was einem **Rückgang von 3,6 %** entspricht. Für **Baden-Württemberg** wurde analog zur Entwicklung der Einwohner eine **Zunahme** der Erwerbstätigen am Arbeitsort **von 3,0 %** prognostiziert, d.h. die Zahl der Erwerbstätigen wächst von 5,59 Mio. auf 5,76 Mio. in 2030.

(3) Entwicklung des Bruttoinlandproduktes

Die Entwicklung der Wirtschaft in **Deutschland** hat in erster Linie Auswirkungen auf den Güterverkehr, aber auch auf den Personenverkehr, bei letzterem vor allem auf die Fahrtweiten und auf den Fernverkehr, bei letzterem insbesondere auch auf den Luftverkehr. Die Elastizität, d.h. das Verhältnis Verkehrswachstum zum Wachstum der Wirtschaft beträgt bei letzterem 1,5 – 2.

In der BVWP-Prognose wurde für den Zeitraum 2010 bis 2030 ein Wachstum des Bruttoinlandsproduktes in Höhe von 1,14 % p.a. angenommen (siehe Tab. 3-3).

Tab. 3-3: Gesamtwirtschaftliche Entwicklung in der BVWP-Prognose (ifo / HSU)

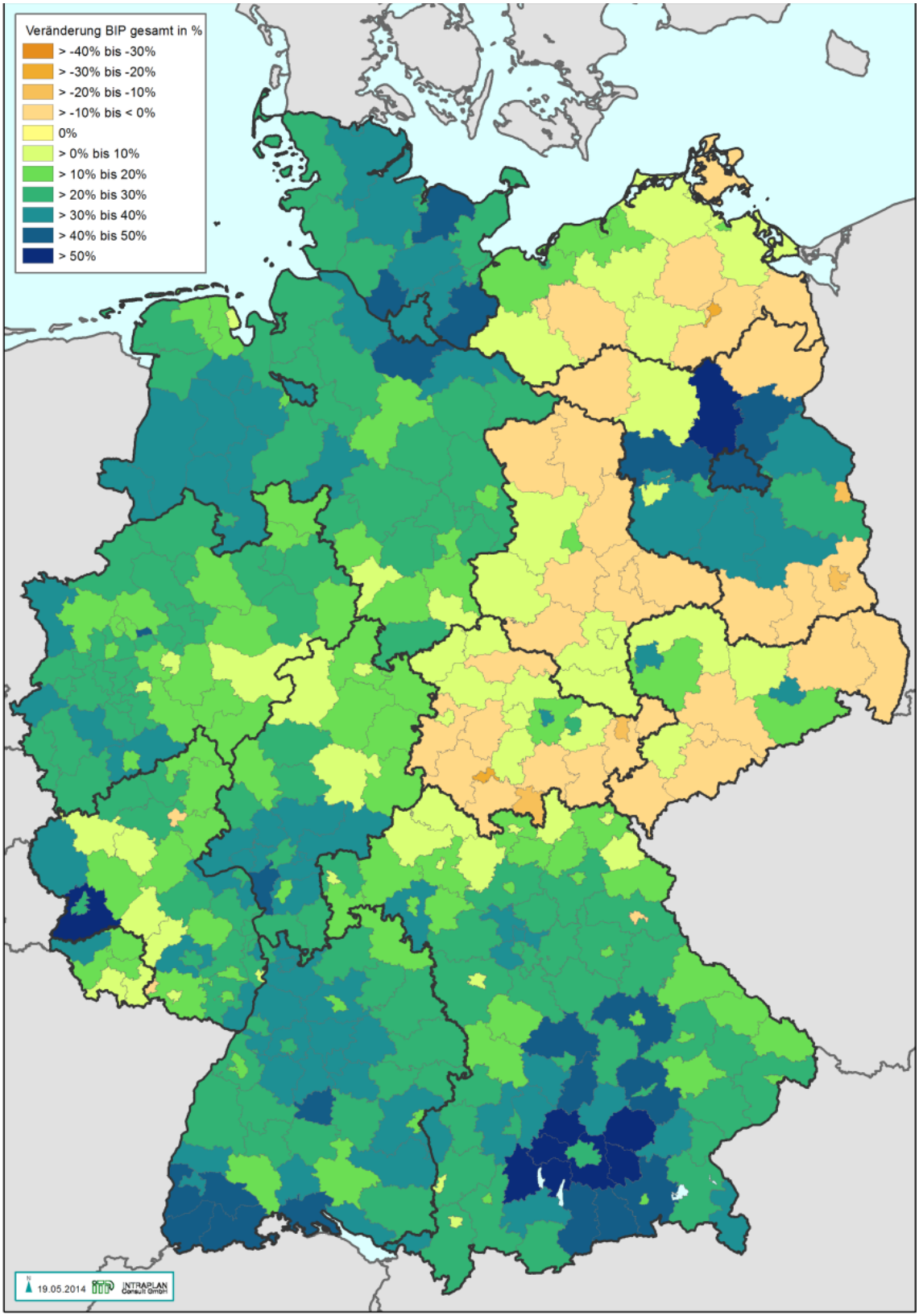
BIP-Wachstum	2010 – 2030 in % p.a.
Deutschland	1,14
Europa	1,38
Welt	2,25
Außenhandel Deutschland	
Exporte	3,63
Importe	3,99

Für **Baden-Württemberg** werden in der BVWP-Prognose mit 1,36 % p.a. deutlich überdurchschnittliche Wachstumsraten im Zeitraum 2010 bis 2030 erwartet (Tab. 3-4 und Abb. 3-2). Dies ist im Hinblick auf die Vergangenheit sowie hinsichtlich der noch zunehmenden Bevölkerung auch plausibel.

Tab. 3-4: Wirtschaftsentwicklung (ifo/HSU) für die BVWP-Prognose nach Bundesländern, z.Vgl. HWWI 2013

Bundesland	Entwicklung 2010 - 2030 in % p.a.	zum Vergleich HWWI 10/13
Schleswig-Holstein	1,39	0,9
Hamburg	1,64	1,7
Bremen	1,43	1,3
Niedersachsen	1,17	1,1
Nordrhein-Westfalen	1,06	0,9
Hessen	1,16	1,2
Rheinland-Pfalz	0,98	0,9
Saarland	0,55	1,0
Baden-Württemberg	1,36	1,5
Bayern	1,23	1,8
Berlin	1,76	0,9
Mecklenburg-Vorpommern	0,25	1,7
Brandenburg	0,92	1,9
Sachsen-Anhalt	0,07	1,9
Thüringen	0,09	2,0
Sachsen	0,54	1,8
Summe Deutschland	**1,14**	**1,3**

Abb. 3-2: Reale Veränderung des BIP 2030 gegenüber 2010 nach Kreisen/kreisfreien Städten



Für den grenzüberschreitenden und den Transitverkehr ist auch das **Wirtschaftswachstum im Ausland** von Bedeutung, wobei dies im Personenverkehr geringere Auswirkungen hat als im Güterverkehr. Im Kernszenario der BVWP-Prognose wurde hier für Europa ein durchschnittliches Wachstum von 1,38 % p.a. im Zeitraum 2010 bis 2030, und für die Welt ein durchschnittliches Wachstum von 2,25 % p.a. angenommen. Auch bei Europa liegen die internationalen Prognosen mit 1,6-1,8 % p.a. deutlich höher als in der BVWP-Prognose unterstellt (ifo/BVWP +1,38 % p.a.). Internationale Prognosen zur Weltwirtschaft liegen ausnahmslos bei mindestens 3 % p.a. (ifo/BVWP +2,3 % p.a.).

Im Güterverkehr spielt der **Außenhandel** Deutschlands für den grenzüberschreitenden und den Seehafen-Hinterlandverkehr eine große Rolle. In der BVWP-Prognose wurde hier ein Wachstum von 3,6 % p.a. für die deutschen Exporte und von 4,0 % p.a. für die deutschen Importe unterstellt.

(4) Energiewirtschaftliche Entwicklung

Die Annahmen zur energiewirtschaftlichen Entwicklung beeinflussen den Güterverkehr insbesondere bei Schiene und Binnenschifffahrt zu einem wesentlichen Teil. Im Rahmen der BVWP-Prognose sind dabei folgende Festlegungen für die Prognose getroffen worden:

Beim **Rohölpreis** wird ein Anstieg von durchschnittlich 79 US$ pro Barrel auf 120 $ (Preisstand 2010) erwartet.

Für den Zeitraum bis 2030 wird in Deutschland ein deutlicher **Rückgang des Primärenergieverbrauchs** um 21 % von 14.200 (2010) auf 11.060 (2030) PJoule erwartet. Der Primärenergieverbrauch von **Steinkohle sinkt um 28 %,** der von **Mineralöl um 24 %, Braunkohle sogar um 52 %. Positiv** entwickelt sich auch der **Anteil der regenerativen Energien**, der sich bis 2030 **fast verdreifacht**. In diesen Verbrauchszahlen sind auch die erforderlichen Rohstoffeinsätze in der Industrie berücksichtigt.

Durch die **Veränderung der Stromerzeugungsstruktur** und aus **Effizienzverbesserungen** bis 2030 resultiert ein um nahezu **11 % geringerer Primärenergieeinsatz**. Unter der Annahme, dass es in den Endverbrauchssektoren, also im Verkehr, bei der Raumheizung sowie in der Industrie, zu weiteren Effizienzverbesserungen kommt, ist ein zusätzlicher Rückgang des End- und des Primärenergieverbrauchs zu erwarten. Beispielsweise werden nur noch rund 30 % der

Wohnungen in Deutschland mit Öl beheizt, und dieser Anteil sinkt stetig. Neubauwohnungen werden zukünftig nur mit einem Anteil von 1,6 % mit Öl beheizt. Aufgrund all dieser Effekte wird ein Rückgang des Endenergieverbrauchs zwischen 2010 und 2030 um fast 17 % erwartet.

Insgesamt ergibt sich hierüber ein **Bruttostromverbrauch von 550 TWh** in Deutschland, der jedoch zu 7 % durch Importe gedeckt wird. Die deutsche Bruttostromerzeugung liegt in 2030 bei rd. 510 TWh.

Für die **Stromerzeugung aus Steinkohle** von 86 TWh im Jahr 2030 ist bei einer jährlichen Ausnutzungsdauer von gut 4.000 Stunden eine Kraftwerksleistung zwischen 20 GW und 22 GW erforderlich. Angesichts der aktuell absehbaren Verzögerungen beim Ausbau der Windkraft, insbesondere der offshore geplanten Anlagen, und der erforderlichen Anschluss- und Transportleitungen wurde hier unterstellt, dass zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit mindestens **20 GW an Steinkohlenkraftwerken** vorgehalten werden müssen. Es ist also davon auszugehen, dass ein beträchtlicher Teil der heute bestehenden Kohlekraftwerke auch 2030 noch am Netz sein wird. Außer den bis zum Jahr 2014 sich bereits in Planung befindenden Kraftwerken, mit einer Bruttoleistung von rd. 8 GW, werden **keine weiteren Kraftwerksneubauten** gebaut, da aufgrund der politischen Zielvorgaben Investoren das Risiko scheuen werden.

Eine Übersicht der energiewirtschaftlichen Annahmen in der BVWP-Prognose gibt Tab. 3-5.

Tab. 3-5: Übersicht über die Annahmen zur energiewirtschaftlichen Entwicklung in der BVWP-Prognose (soweit verkehrsrelevant)

	2010	2030	2030/10 (%)	
			Insg.	p.a.
Weltrohölpreis (USD/barrel, real)	79	120	51,9	2,1
Mineralölproduktenabsatz (Mio. t)	105,9	80,9	-23,6	-1,3
Rohstahlproduktion (Mio. t)	43,8	50,0	14,1	0,7
Steinkohlenabsatz (Mio. t)	60,2	46,5	-22,7	-1,3
- Kraftwerke	44,1	32,0	-27,4	-1,6
- Industrie	16,1	14,5	-9,8	-0,5
Steinkohleneinfuhr (Mio. t)	44,7	46,5	4,0	0,2

(5) Pkw-Bestand/Pkw-Dichte

Eine wichtige Variable für den Personenverkehr ist die Entwicklung des Pkw-Bestands bzw. der Pkw-Dichte, die in Pkw pro 1000 Einwohner ab 18 Jahre gemessen wird. Diese Variable hat Auswirkungen auf die Mobilität und den Modal-Split, wobei wegen der zunehmenden Zweit- oder Drittmotorisierung sowie wegen des vermehrten Car-Sharing diese Änderung in erster Linie für den Personennahverkehr relevant ist.

Der Pkw-Bestand stellt eine **zentrale Einflussgröße** des Individualverkehrs und – angesichts von dessen Anteil – auch des gesamten Personenverkehrs dar. Im Gegensatz zu den verkehrspolitischen Rahmenbedingungen, deren Entwicklung im Prognosezeitraum eher als Annahmen zu verstehen sind, besitzen die Ergebnisse für den Pkw-Bestand bereits den Charakter von vergleichsweise "harten" Prognosen.

Zwischen der Motorisierung und dem Personenverkehr besteht zwar ein starker inhaltlicher Zusammenhang; andererseits fungiert der Pkw-Bestand als **Input** für dessen Prognose. Deshalb wird er innerhalb der **Rahmenbedingungen** dargestellt, und hier wiederum an deren Ende, weil er auch von den anderen Rahmendaten abhängt. Dies gilt nicht nur für die sozio-demographischen und sozio-ökonomischen Strukturdaten, sondern zumindest im Prinzip auch für die verkehrspolitischen Prämissen. Würden z.B. die Nutzerkosten des Pkw-Verkehrs sehr restriktiv ausgestaltet werden, dann würde dies auch die Entwicklung der Motorisierung tangieren. Dies war jedoch bei der BVWP-Prognose nicht der Fall; vielmehr bewegten sich die Annahmen zu den Nutzerkosten in einem Wertebereich, der den Pkw-Bestand in einem unwesentlichen Ausmaß tangiert.

Beim **Pkw-Bestand** im gesamten Bundesgebiet wurde in der BVWP-Prognose ein Anstieg von 42,3 Mio. (2010) bzw. 43,4 Mio. (2012) auf 45,9 Mio**.** im Jahr 2030 prognostiziert (Tab. 3-6). Dies bedeutet einen Zuwachs um 8,5 % gegenüber 2010. 5 Prozentpunkte dieses Wachstums wurden in den ersten vier Jahren seit 2010 bereits realisiert. Die **Dichte** wird wegen der leicht sinkenden Zahl der Erwachsenen etwas stärker zunehmen (knapp 10 %), und zwar von 631 auf 694 Pkw pro 1000 Einwohner.

Tab. 3-6: Entwicklung des Pkw-Bestandes und der Pkw-Dichte in der BVWP-Prognose

	2010	2030	2030/10 (%)	
			Insg.	p.a.
Pkw-Bestand (Mio.)[1)]	42,302	45,909	8,5	0,4
Einwohner über 18 Jahre (Mio.)[2)]	66,988	66,194	-1,2	-0,1
Pkw-Dichte[3)]	631	694	9,8	0,5

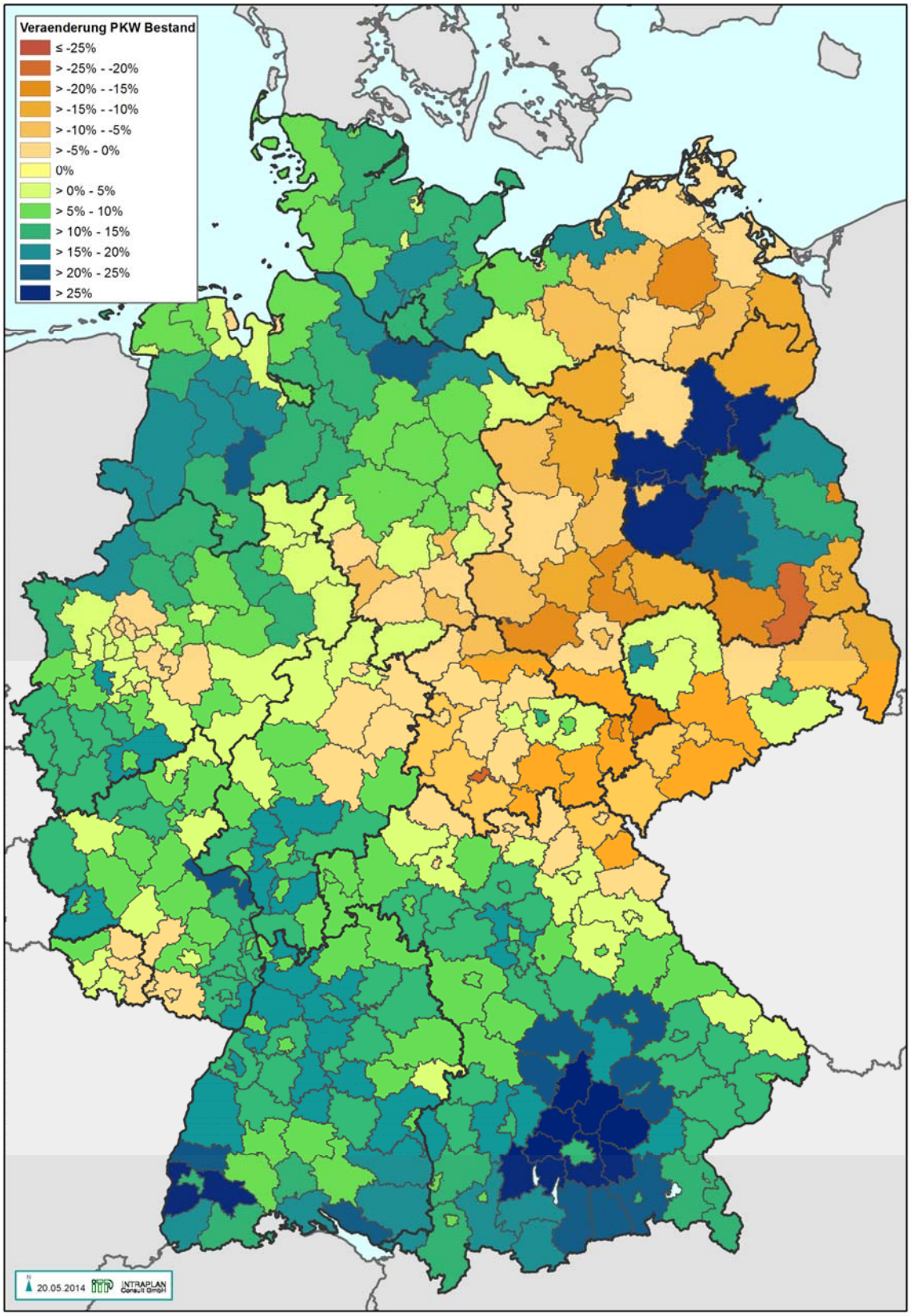
1) Zum 1. Januar des Folgejahrs, ohne vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge
2) Auf Basis des Zensus 2011
3) Bezogen auf 1000 Einwohner über 18 Jahre

Das regional unterschiedliche **Wachstum** des Pkw-Bestands ist in Abb. 3-3 gezeigt. Es hängt in erster Linie mit der jeweiligen Bevölkerungsentwicklung zusammen. Deshalb sind, wie schon oben bei der Gesamtentwicklung dargestellt, die Steigerungsraten im Süden Deutschlands höher als insbesondere im Nordosten Deutschlands außer Region Berlin.

In **Baden-Württemberg** erhöht sich die Zahl der Pkw von 5,7 Mio. auf 6,61 Mio. zwischen 2010 und 2030, was einem durchschnittlich jährlichen Wachstum von 0,7 % statt von 0,4 % bundesweit entspricht.

Bezogen auf die **Pkw-Dichte** entspricht dies einem Wachstum von 671 auf 731 Fahrzeuge pro 1000 Einwohner älter als 18 Jahre oder 0,8 % p.a. in Baden-Württemberg gegenüber 0,5 % bundesweit.

Abb. 3-3: Entwicklung des Pkw-Bestands 2030 gegenüber 2010 nach Stadt- und Landkreisen gemäß BVWP-Prognose



3.2.2 Bereich "Infrastruktur und Verkehrsangebot"

Die Infrastruktur und die Qualität des Verkehrsangebotes beeinflussen die Verkehrsnachfrage und den Modal-Split in hohem Maße. Die Gestaltung der Infrastruktur und des Verkehrsangebotes stellen einen wichtigen, wenn nicht sogar den wichtigsten Teil der Verkehrspolitik dar.

Die Annahmen der BVWP-Prognose bauen hier im Wesentlichen auf den Festlegungen des Bundesverkehrswegeplanes 2003 und der darauf aufbauenden Bedarfsplanüberprüfungen Straße und Schiene (2010) auf. Und zwar wurden zum Prognosehorizont 2030 alle Maßnahmen als realisiert unterstellt, die als "**Vordringlicher Bedarf" (VB)** festgelegt wurden, ergänzt bei der Straße um den sogenannten "**WB*",** also den Weiteren Bedarf mit Planungsrecht, und konkretisiert bei der Schiene um das "**Zielnetz"** aus der Bedarfsplanüberprüfung 2010.

Aus heutiger Sicht stellt diese Annahme eine **sehr optimistische Prämisse** dar, da die derzeit fließenden und in den Haushaltsplanungen vorgesehenen und absehbaren Finanzmittel bei weitem nicht ausreichen, das geplante Programm vollständig zu realisieren. Weil aber keine Möglichkeit bestand, im Einzelnen zu beurteilen, welche der zahlreichen Maßnahmen nun bis zum Jahr 2030 realisiert sind oder welche nicht oder nur zum Teil realisiert sein werden – dies hätte zum Teil eine Vorwegnahme der Ergebnisse des Bundesverkehrswegeplans 2015 bedeutet – bestand als Arbeitshypothese keine andere Möglichkeit, das genannte Infrastrukturprogramm vollständig in der BVWP-Prognose zu unterstellen.

(1) Annahmen zum Straßennetz

Im Bundesfernstraßennetz, dessen Änderung insbesondere aufgrund der Kapazitätssituation Auswirkungen auf Mobilität und Modal-Split hat, wurden in der BVWP-Prognose die Maßnahmen des Vordringlichen Bedarfs des BVWP 2003 sowie Maßnahmen des weiteren Bedarfs mit existierendem Baurecht WB* aufgenommen.

(2) Annahmen Schienenverkehr

Änderungen im Schienennetz ziehen Auswirkungen im Modal-Split im Personen-und im Güterverkehr nach sich, wobei diese Auswirkungen bei letzterem vor allem durch die Kapazitätssituation bedingt sind.

Für 2030 ist im Kernszenario das sog. Zielnetz aus der Bedarfsplanüberprüfung[67] unterstellt. Hinzu kommen noch mit den einzelnen Bundesländern jeweils abgestimmte Maßnahmen im Schienenpersonennahverkehr (SPNV). In diesem Netz sind bereits bedeutende Maßnahmen der Schieneninfrastruktur in Baden-Württemberg für 2030 in der BVWP-Prognose unterstellt:

- das Konzept Stuttgart 21 (vollständig d.h. mit Fernbahnhof Flughafen)
- die Neubaustrecke Stuttgart – Ulm
- der Ausbau der Rheinachse Karlsruhe – Offenburg – Basel
- die Neubaustrecke Mannheim – Frankfurt am Main (NBS Rhein Main - Rhein Neckar).
- punktueller Ausbau der Gäubahn Stuttgart - Singen

Das unterstellte **Angebot im Schienenpersonenfernverkehr**, d.h. die Zugkilometer der ICE- und sonstigen Fernzüge (IC/EC), erhöht sich im Kernszenario der BVWP-Prognose zwischen 2010 und 2030 um 12,5 % bei den Zugkilometern in diesem Zugsegment.

Das **Angebot im Schienenpersonennahverkehr** ist im Rahmen der BVWP-Prognose mit den einzelnen Bundesländern detailliert abgestimmt worden und beinhaltet deutliche Angebotssteigerungen (Erhöhung der Zug-km auf Deutschland bezogen +18 %, auf Baden-Württemberg bezogen +25 %).

(3) Sonstige Verkehrsmittel

Die Angebote im **ÖSPV**-Nahverkehr sind in der BVWP-Prognose nur pauschal berücksichtigt. Eine Änderung hierbei hat Auswirkungen auf den Modal-Split im Nahverkehr. Im Kernszenario ist gegenüber 2010 für das Jahr 2030 eine **pauschale Erhöhung der Geschwindigkeiten im Zellbinnenverkehr um 10 %** aufgrund von Stadtbahnausbauten und einer Optimierung des Busnetzes unterstellt.

Bezüglich des aufgrund der Deregulierung überproportional expandierenden **Fernlinienbus**verkehrs, der im Prognoseverfahren mit einem vereinfachten Liniennetzmodell abgebildet wurde, ist für das Kernszenario der BVWP-Prognose für 2030 das Mitte 2013 bestehende Angebot ergänzt um zukünftig denkbare Streckenerweiterungen und Frequenzerhöhungen unterstellt.

67 BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt und Intraplan Consult GmbH: Überprüfung des Bedarfsplans für die Bundesschienenwege, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Freiburg/München, 2010

Zusätzlich wurde eine verbesserte Umsteigemöglichkeit zwischen einzelnen Buslinien und zwischen unterschiedlichen Busbetreibern angenommen.

Der **Radverkehr** ist im Modell der BVWP-Prognose wie der ÖSPV-Nahverkehr nur pauschal berücksichtigt. In der BVWP-Prognose wurde aufgrund des unterstellten **Radwegebaus** und der zunehmenden Nutzung von **E-Bikes** die **Durchschnittsgeschwindigkeit im Radverkehr pauschal um 5 % erhöht**.

Die **Binnenschifffahrt** hat modellmäßig Auswirkungen auf den Modal-Split beim Transport von Massengütern. In der BVWP-Prognose sind im Kernszenario für 2030 die Maßnahmen des Vordringlichen Bedarfs gemäß dem BVWP 2003 unterstellt. Für Baden-Württemberg relevant ist hier der **Ausbau des Neckarabschnittes von Heidelberg bis Plochingen** für die Nutzung durch 135 m-Schiffe.

Im Kernszenario der BVWP-Prognose wurde im **Luftverkehr** für die deutschen Flughäfen eine bedarfsgerechte Angebotsentwicklung angenommen. Für den Flughafen Stuttgart bedeutet dies eine Ausweitung der angebotenen Linienflüge bis 2030 um 22 %, was auf eine erhöhte Bedienung bereits heute angeflogener Ziele zurückzuführen ist, aber auch auf eine Ausweitung der angebotenen Ziele um 6 %. Für den Flughafen Karlsruhe/Baden-Baden wird von einer Ausweitung der angebotenen Linienflüge bei unverändertem Zielangebot um 8 % ausgegangen. Für den Flughafen Friedrichshafen wird eine Ausweitung der angebotenen Flugziele um 11 % sowie eine Erhöhung der insgesamt angebotenen Linienflüge sogar um 36 % erwartet.

3.2.3 Bereich "Kosten/Ordnungspolitik"

Neben der Infrastrukturpolitik, die aufgrund der langen Realisierungszeiträume der Infrastruktur allerdings meist erst langfristig verkehrslenkend wirksam ist, ist der zweite Bereich, der durch die Verkehrspolitik beeinflusst werden kann, der Bereich der Kosten, hier vor allem Nutzerkosten sowie der Bereich zusätzlicher Steuerungsmaßnahmen. Die wesentlichen Annahmen zu den Nutzerkosten der BVWP-Prognose zeigt Tab. 3-7.

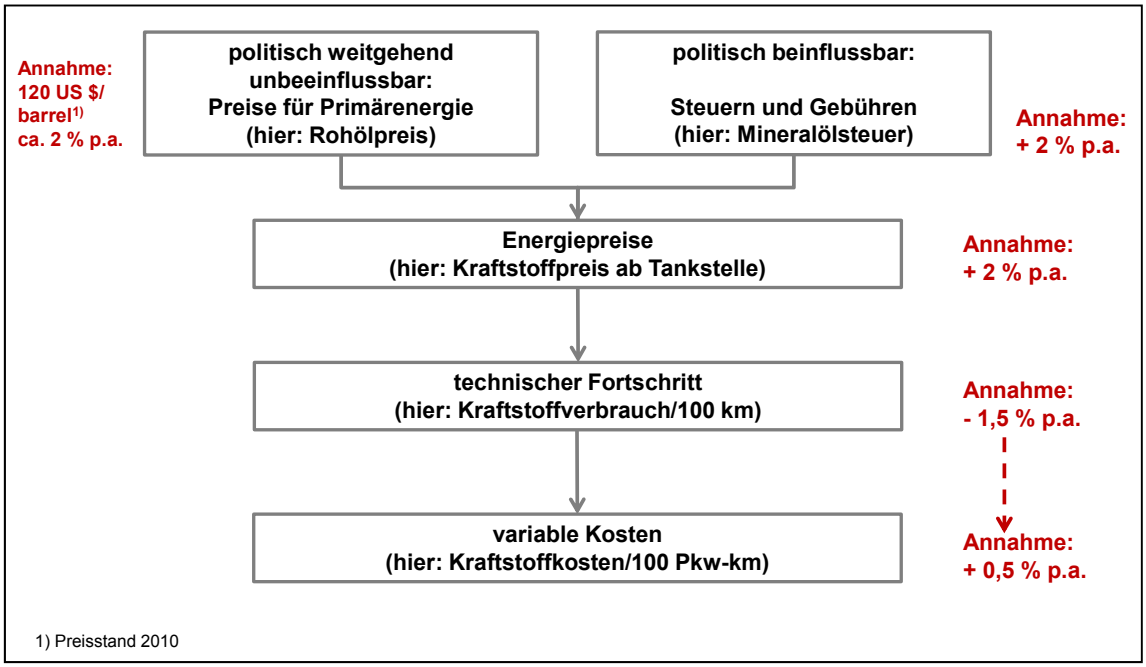
Tab. 3-7: Zusammenfassung der unterstellten Veränderung der Nutzerkosten in der BVWP-Prognose

	Reale Veränd. 2030/10 (% p.a.)	Kommentar
Personenverkehr		
Pkw-Verkehr	0,5	bis 2013 ca. 1,5 % p.a., 2014 sinkend
Öff. Straßenpersonenverkehr	1,0	
Schienenpersonennahverkehr	0,5	
Schienenpersonenfernverkehr	0,5	
Luftverkehr	0,0	Yields seit 2010 um mehr als 1 % p.a. gesunken, trotz Luftverkehrsteuer!)
Güterverkehr		
Lkw-Verkehr	0,0	entspricht Preisindex StaBu 2006 - 2012
Schienengüterverkehr	-0,5 (KV) / 0 (EW/GZ)	
Binnenschifffahrt	-0,6	

(1) Pkw-Verkehr

Die in Tab. 3-7 gezeigten Annahmen scheinen auf den ersten Blick recht "rudimentär" und auch wenig "gestaltend" zu sein. Am Beispiel des Pkw-Verkehrs ist aber zu erkennen, dass die Annahmen sehr wohl hergeleitet werden können und dass hier auch ein gewisses Maß an "Gestaltung" dahintersteckt. (siehe Abb. 3-4).

Abb. 3-4: Grundlagen für die Annahmen zu den Nutzerkosten (Beispiel Pkw)



Es ist also neben der oben genannten Annahme des Anstiegs des Rohölpreises um ca. 2 % p.a. und einer, auch durch stärkere Reglementierung des CO_2-Ausstoßes der Pkw durch EU-Vorgaben bewirkten Verbesserung der Energieeffizienz um 1,5 % p.a. eine **spürbare Erhöhung der Mineralölsteuer** um real 2 % p.a., d.h. **um ca. 50 %** gegenüber 2010 bzw. heute angenommen. Somit erhöhen sich die **gesamten Kraftstoffpreise**, wie die beiden Hauptkomponenten Rohölpreis und Mineralölsteuer, um ebenfalls **2 %** p.a.[68]

Bei den **Parkkosten** ist im Kernszenario der BVWP-Prognose eine Erhöhung pauschal um 50 % gegenüber 2010 unterstellt. Die Parkosten betreffen aber nur einen Teil des Verkehrs und wirken sich vor allem im Zielverkehr der größeren Städte und hier besonders in den Stadtzentren aus.

68 Dabei ist unterstellt, dass sich die übrigen, weit weniger bedeutenden Preiskomponenten, d.h. für Verarbeitung, Transport etc., im gleichen Ausmaß entwickeln.

(2) Lkw-Verkehr

Beim Straßengüterverkehr resultiert die Annahme konstanter Transportpreise in der BVWP Prognose auf den in Tab. 3-8 gezeigten Prämissen.

Tab. 3-8: Annahmen zum Lkw-Verkehr

	Reale Veränd. 2030/10 (% p.a.)	Anmerkung
Rohölpreis	2,1	2010: 79 USD/barrel / 2030: 120 USD/barrel
Mineralölsteuersatz[1)]	2,5	Bei höherem / niedrigerem Rohölpreis stärkerer / schwächerer Anstieg
➡ Kraftstoffpreis[1)]	2,0	Auch bei höherem / niedrigerem Rohölpreis
Spezifischer Verbrauch[1)]	-1,0	
➡ Kraftstoffkosten[1)]	1,0	
Kostensenkung durch Produktivitätsfortschritte	-1,0	Inkl. Effekt aus Kostendruck ausländischer Lkw
Lkw-Maut	0,0	
Transportkosten insg.	0,0	Impliziert weitere umweltpolitische Auflagen

[1)] Dieselkraftstoff

(3) Öffentlicher Personenverkehr

Die Fahrpreise im Öffentlichen Personenverkehr beeinflussen die Nachfrage spürbar. Je nach Situation gehen wir hier von einer Preiselastizität von -0,3 (ÖSPV-Nah) bis -1 (Fernlinienbus) aus.

Beim **Schienenpersonenverkehr (SPFV**) ist, wie aus der Übersichtstabelle oben hervorgeht, in der BVWP-Prognose von einem Anstieg der Preise um real 0,5 % ausgegangen worden. Dies entspricht auch etwa dem Zuwachs der Erlöse pro Personenkilometer der letzten Jahre (2004 bis 2010 real +0,7 % p.a., 2010 bis 2013 +0,7 % p.a.).

Anders als der eigenwirtschaftlich zu betreibende SPFV ist der **Schienenpersonennahverkehr (SPNV)** im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer. Hier ist in der BVWP-Prognose unter anderem aufgrund der Überlegung, dass die Regionalisierungsmittel stagnieren, von einem **leichten Preisanstieg von 0,5 % p.a.** ausgegangen worden.

Beim **Kommunalen Öffentlichen Personennahverkehr** entspricht die Annahme der BMVI-Prognose von einem mittleren Preisanstieg um real 1 % p.a. etwa der tatsächlichen Entwicklung: 2009 bis 2013 Anstieg um real 1,1 % p.a. Dahinter stecken auch die finanziellen Restriktionen gerade der Städte und Gemeinden.

Beim **Fernlinienbus** wurde in der BVWP-Prognose eine Konsolidierung erwartet mit einer durchschnittlichen Steigerung um 0,5 % p.a., allerdings ausgehend von einem sehr niedrigen Niveau.

(4) Schienengüterverkehr und Binnenschifffahrt

Beim **Einzelwagen- und Ganzzugverkehr** wurde in den BVWP-Prognosen eine Preiskonstanz angenommen, weil sich kostentreibende (Modernisierungsdruck, Trassenpreise) und kostensenkende (Produktivitätssteigerung) die Waage halten.

Beim Kombinierten Verkehr (**KV)** ist gemäß Entwicklung bei der BVWP-Prognose von einem leichten Transportpreisrückgang von 0,5 % p.a. ausgegangen worden, vor allem aufgrund von Rationalisierungs- und Mengeneffekten.

(5) Luftverkehr

Die Preisgestaltung im Luftverkehr entzieht sich weitgehend staatlichen Eingriffen. Die Einführung der Luftverkehrssteuer hat allerdings gezeigt dass gewisse regulierende Effekte erzielt werden konnten, allerdings auch durch Verlagerung von Verkehren zu ausländischen Flughäfen. Trotz Luftverkehrssteuer und hoher Treibstoffkosten hat sich der Luftverkehr aber im Mittel auch in den letzten Jahren deutlich verbilligt. Insofern ist die BVWP-Annahme real konstanter Preise im Luftverkehr schon ein "Trendbruch" gegenüber der Vergangenheit.

3.3 Ergebnisse Personenverkehr

Das Personen**verkehrsaufkommen** in **Deutschland** steigt gemäß BVWP-Prognose (Kernszenario) um 1,2 %, davon im motorisierten Verkehr um 3,8 % (siehe Tab. 3-9). Der stärkste relative Verkehrszuwachs findet dabei im Luftverkehr statt (+ 58,3 %), der mit durchschnittlich 2,3 % p.a. allerdings geringer zunimmt als in der Vergangenheit. Die (gesamtmodale) Mobilität wächst somit noch, obwohl die Einwohnerzahl nach den Rahmenbedingungen dieser Prognose um 2,5 % sinkt. Darin kommt vor allem der Anstieg der verfügbaren Einkommen und der Pkw-Verfügbarkeit zum Ausdruck.

Tab. 3-9: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zum Personenverkehrsaufkommen - Deutschland gesamt

	Absolute Werte		Modal-Split (%)		Veränd. 2030 : 2010
	2010	2030	2010	2030	insgesamt in %
Verkehrsaufkommen (Mio. Personen)					
			des motorisierten Verkehrs		
Motor. Individualverkehr	56.503	59.080	82,7	83,3	4,6
Eisenbahnverkehr	2.435	2.603	3,6	3,7	6,9
ÖSPV	9.280	9.068	13,6	12,8	-2,3
Luftverkehr	132	209	0,2	0,3	58,3
Summe Motoris. Verkehr	68.350	70.960	100	100,0	3,8
			des gesamten Verkehrs		
Summe Motoris. Verkehr	68.350	70.960	67,1	68,9	3,8
Fahrradverkehr	9.479	9.913	9,3	9,6	4,6
Fußwegverkehr	24.011	22.140	23,6	21,5	-7,8
Insgesamt	101.840	103.013	100	100,0	1,2

In **Baden-Württemberg** (siehe Tab. 3-10) steigt das Verkehrsaufkommen überproportional (+ 7,1 % gegenüber +1,2 % in Deutschland gesamt), was vor allem an der im Gegensatz zum Bund in Baden-Württemberg noch zunehmenden Bevölkerung bis 2030 sowie an der überproportionalen Wirtschaftsentwicklung liegt. Beim MIV, dem Verkehrsmittel mit dem höchsten Verkehrsanteil, steigt der Verkehr in Baden-Württemberg um 10,6 % gegenüber 4,6 % in Deutschland gesamt.

Tab. 3-10: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zum Personenverkehrsaufkommen - Baden-Württemberg

	Absolute Werte		Modal-Split (%)		Veränd. 2030 : 2010
	2010	2030	2010	2030	insgesamt in %
Verkehrsaufkommen (Mio. Personen)					
			des motorisierten Verkehrs		
Motor. Individualverkehr	8.468,9	9.365,2	85,2	85,8	10,6
Eisenbahnverkehr	334,8	388,5	3,4	3,6	16,0
ÖSPV	1.123,2	1.133,6	11,3	10,4	0,9
Luftverkehr	13,9	23,2	0,14	0,21	67,4
Summe Motoris. Verkehr	9.940,7	10.910,5	100,0	100,0	9,8
			des gesamten Verkehrs		
Summe Motoris. Verkehr	9.940,7	10.910,5	70,4	72,2	9,8
Fahrradverkehr	978,0	1.061,6	6,9	7,0	8,5
Fußwegverkehr	3.204,8	3.147,1	22,7	20,8	-1,8
Insgesamt	14.123,6	15.119,1	100,0	100,0	7,1

Wichtiger sind die Ergebnisse bezogen auf die **Verkehrsleistung**. Hier ist **deutschlandweit** mit einem Wachstum von 12,2 % bis 2030 zu rechnen (siehe Tab. 3-11). Neben dem stark steigenden Luftverkehr nimmt auch der Eisenbahnverkehr überproportional zu, vor allem aufgrund des unterstellten Ausbaus der Schienenwege und der unterstellten Angebotsverbesserungen im Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und Schienenpersonennahverkehr (SPNV). Der MIV entwickelt sich leicht unterdurchschnittlich. Beim ÖSPV kommt es trotz des erwarteten weiteren Anstiegs des Fernlinienbusverkehrs zu einer unterproportionalen Entwicklung, weil der Gelegenheitsverkehr ("Reisebus") stagniert und Teile des ÖPNV (Schülerverkehre) aufgrund der demographischen Entwicklung an Aufkommen verlieren.

Tab. 3-11: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zur Personenverkehrsleistung - Deutschland gesamt

	Absolute Werte		Modal-Split (%)		Veränd. 2030 : 2010
	2010	2030	2010	2030	insgesamt in %
Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)					
			des motorisierten Verkehrs		
Motor. Individualverkehr	902,4	991,8	80,8	78,6	9,9
Eisenbahnverkehr	84,0	100,1	7,5	7,9	19,2
ÖSPV	78,1	82,8	7,0	6,6	6,0
Luftverkehr	52,8	87,0	4,7	6,9	64,8
Summe Motoris. Verkehr	1.117,3	1.261,7	100,0	100,0	12,9
			des gesamten Verkehrs		
Summe Motoris. Verkehr	1.117,3	1.261,7	94,3	95,0	12,9
Fahrradverkehr	32,4	35,0	2,7	2,6	8,0
Fußwegverkehr	34,6	32,0	2,9	2,4	-7,5
Insgesamt	1.184,3	1.328,7	100,0	100,0	12,2

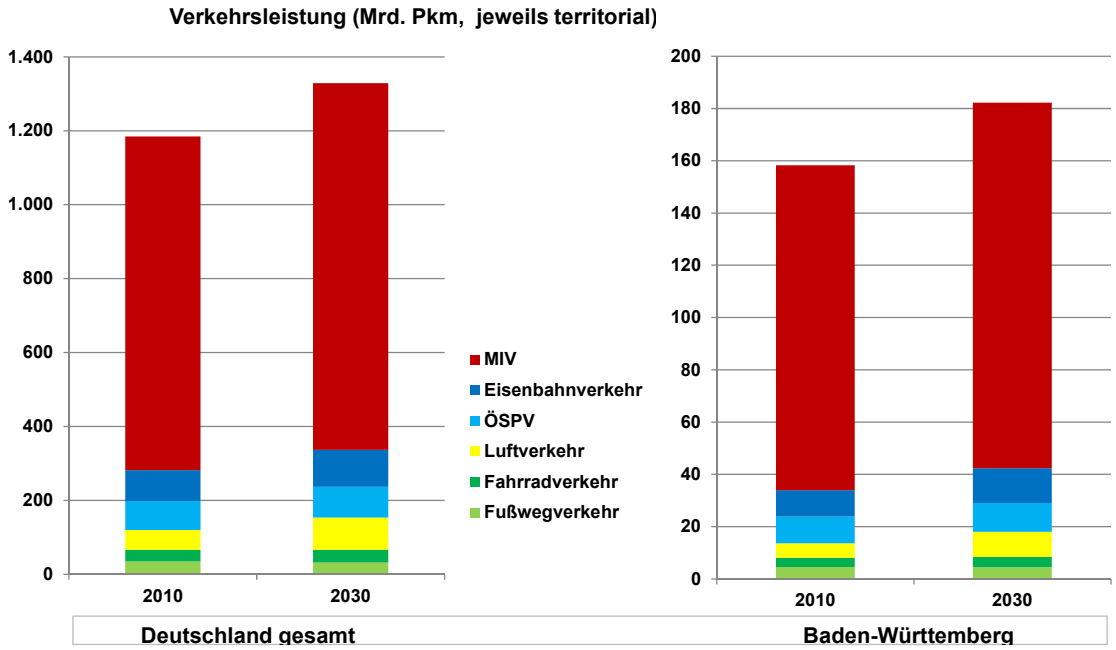
In **Baden-Württemberg** ist auch bei der Verkehrsleistung, wie bereits beim Aufkommen, eine überproportionale Entwicklung festzustellen, nämlich ein Wachstum um 15,1 % gegenüber 12,2 % im gesamten Bundesgebiet (siehe Tab. 3-12). Beim zahlenmäßig wichtigsten Verkehrsmittel, dem MIV, beträgt es in Baden-Württemberg 12,5 % gegenüber 9,9 % in Deutschland gesamt. Der MIV-Anteil am motorisierten Verkehr sinkt zwar in Baden-Württemberg um 2,3 Prozentpunkte, bleibt aber mit 80,5 % nach wie vor das dominierende Verkehrsmittel. Dessen Anteil ist und bleibt auch leicht höher als in Deutschland gesamt (78,6 %). Daneben fällt der stark zunehmende Eisenbahnverkehr auf (+ 31,5 %, in Deutschland gesamt + 19,2 %). Dies ist vor allem auf die Verkehrssteigerungen durch das Projekt Stuttgart 21 in Verbindung mit der Neubaustrecke Stuttgart - Ulm zurückzuführen. Dadurch wird nicht nur der Modal-Split bezogen auf die Region Stuttgart gestärkt, z.T. durch flankierende Angebotsausweitungen im Nahverkehr, sondern es werden mehr Verkehre durch Baden-Württemberg gelenkt (höherer Anteil des Verkehrs Raum München - Rhein Main/Rhein Ruhr geht heute über Nürnberg/Würzburg, künftig wird er über Stuttgart/Mannheim, also das Territorium Baden-Württembergs, umgelenkt).

Tab. 3-12: Ergebnisse der BVWP-Prognose (Kernszenario) zur Personenverkehrsleistung - Baden-Württemberg

	Absolute Werte		Modal-Split (%)		Veränd. 2030 : 2010
	2010	2030	2010	2030	insgesamt in %
Verkehrsleistung (Mrd. Pkm)					
			des motorisierten Verkehrs		
Motor. Individualverkehr	124,33	139,88	82,8	80,5	12,5
Eisenbahnverkehr	10,12	13,31	6,7	7,7	31,5
ÖSPV	10,20	10,92	6,8	6,3	7,0
Luftverkehr	5,54	9,66	3,69	5,6	74,4
Summe Motoris. Verkehr	150,19	173,77	100,0	100,0	15,7
			des gesamten Verkehrs		
Summe Motoris. Verkehr	150,19	173,77	94,9	95,4	15,7
Fahrradverkehr	3,47	3,88	2,2	2,1	11,8
Fußwegverkehr	4,62	4,55	2,9	2,5	-1,5
Insgesamt	158,28	182,20	100,0	100,0	15,1

Abb. 3-5 fasst das Ergebnis der BVWP-Prognose zum Personenverkehr zusammen. In Baden-Württemberg ist aufgrund der Rahmenbedingungen mit einem noch etwas stärkeren Verkehrswachstums als in Deutschland gesamt zu rechnen. Dies betrifft auch diejenigen Verkehrsmittel, deren spezifischer Energieverrauch und CO_2-Ausstoß relativ hoch ist. Die länderpolitischen Ziele zum Klimaschutz und zur Verkehrspolitik erfordern deshalb noch größere Anstrengungen als bei einer nur "durchschnittlichen" Verkehrsentwicklung.

Abb. 3-5: Übersicht über die BVWP-Prognose (Territorialleistung) für Deutschland und Baden-Württemberg im Vergleich



3.4 Ergebnisse Güterverkehr

3.4.1 Gesamtergebnisse Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung je Verkehrsmittel

Die Eckwerte der Güterverkehrsprognose 2030 für Deutschland sind in Tab. 3-13 und Tab. 3-14 dargestellt. Insgesamt steigt das **Transportaufkommen um 18 %** (von 3,7 Mrd. t auf 4,4 Mrd. t) und die inländische **Transportleistung** (auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland) **um 38 %**. Dies entspricht einem Anstieg von 607 auf 807 Mrd. tkm.

Tab. 3-13: Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens nach Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose

	2010		2030		Veränderung 2030/10	
	Mio. t	Anteil in %	Mio. t	Anteil in %	insgesamt in %	in % p.a.
Gesamtverkehr nach Verkehrsträgern						
Schiene	358,9	9,7%	443,7	10,2%	23,6%	1,1%
Straße	3.116,1	84,1%	3.639,1	83,5%	16,8%	0,8%
Binnenschiff	229,6	6,2%	275,6	6,3%	20,0%	0,9%
Summe	3.704,7	100,0%	4.358,4	100,0%	17,6%	0,8%
Kombinierte Verkehre						
Kombinierter Verkehr gesamt	96,9	100,0%	173,7	100,0%	79,3%	3,0%
davon Schiene	75,1	77,5%	136,1	78,4%	81,4%	3,0%
davon Binnenschiff	21,8	22,5%	37,6	21,6%	72,3%	2,8%

Sowohl im Schienen- als auch im Straßengüterverkehr wachsen die **Transportleistungen deutlich stärker** als das Transportaufkommen, so dass sich die Tendenz zu länger laufenden Transporten weiter fortsetzen wird. Im gesamten Güterfernverkehr wachsen die **mittleren Transportweiten um 17 %** von 164 Kilometer im Jahr 2010 auf 192 Kilometer im Jahr 2030.

Der **Straßengüterverkehr** wächst beim Transportaufkommen von knapp 3,1 Mrd. t im Jahr 2011 auf 3,6 Mrd. t im Jahr 2030, was einer Zunahme von 17 % entspricht. Die Verkehrsleistungen steigen um 39 % von 437 Mrd. tkm auf 607 Mrd. tkm. Von dem gesamten zusätzlichen Wachstum des Güterverkehrs aller Verkehrsträger von 2010 bis 2030 um 654 Mio. t und 230 Mrd. tkm entfallen damit **80 %** des zusätzlichen Transportaufkommens (+523 Mio. t) und **74 %** der zusätzlichen Transportleistungen (170 Mrd. tkm) auf den Straßengüterverkehr.

Tab. 3-14: Entwicklung der Güterverkehrsleistung nach Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose

	2010		2030		Veränderungen 2010-2030		Transportweite in km			
	Mrd. tkm	Anteil in %	Mrd. tkm	Anteil in %	insgesamt in %	in % p.a.	2010	2030	Veränderungen 2010-2030 insgesamt in %	Veränderungen 2010-2030 in % p.a.
Gesamtverkehr nach Verkehrsträgern										
Schiene	107,6	17,7%	153,7	18,4%	42,9%	1,8%	300	347	15,6%	0,7%
Straße	437,3	72,0%	607,4	72,5%	38,9%	1,7%	140	167	18,9%	0,9%
Binnenschiff	62,3	10,3%	76,5	9,1%	22,8%	1,0%	271	277	2,3%	0,1%
Summe	607,1	100,0%	837,6	100,0%	38,0%	1,6%	164	192	17,3%	0,8%
Kombinierte Verkehre										
kombinierter Verkehr	44,1	100,0%	76,2	100,0%	72,7%	2,8%	456	439	-3,7%	-0,2%
davon Schiene	38,0	86,2%	66,2	86,9%	74,1%	2,8%	507	486	-4,0%	-0,2%
davon Binnenschiff	6,1	13,8%	10,0	13,1%	63,8%	2,5%	280	266	-4,9%	-0,3%

Allerdings realisiert sowohl die **Schiene als auch das Binnenschiff** aufgrund der weiterhin überproportional zunehmenden KV-Verkehre, die eine Verlagerung von der Straße auf die beiden anderen Verkehrsträger bedingen, zukünftig ein deutlich **stärkeres Aufkommenswachstum als der Straßenverkehr**, sodass der Marktanteil der Straße beim Aufkommen im Prognosezeitraum von 84,1 % auf 83,5 % sinkt. Bei der Verkehrsleistung ist zwar ein deutlich stärkeres Wachstum gegenüber der Binnenschifffahrt zu erkennen, dafür jedoch ein leicht niedrigeres als im Schienengüterverkehr, so dass der Marktanteil an der Verkehrsleistung leicht von 72,0 % auf 72,5 % ansteigt.

Das Transportaufkommen der **Schiene** wächst bis 2030 gegenüber 2010 mit 24 % deutlich weniger als die Transportleistungen, für die aufgrund der wachsenden Transportentfernungen eine erhebliche Steigerung um insgesamt 43**%** prognostiziert wird. Der **Marktanteil der Bahn steigt** beim Aufkommen aufgrund dieses dynamischen Wachstums von 9,7 % im Jahr 2010 auf 10,2 % im Jahr 2030 und bei den Leistungen von knapp 17,7 % auf 18,4 %.

Diese gegenüber der Straße leicht günstigere Entwicklung bei der Bahn (aber auch beim Binnenschiff) ist auf die **Entwicklung des kombinierten Verkehrs** zurückzuführen. Der gesamte kombinierte Verkehr per Bahn und Binnenschiff wird um rd. 79 % auf Aufkommensbasis und 73 % auf Verkehrsleistungsbasis ansteigen und wird sich im Prognosezeitraum deutlich stärker entwickeln, als die nicht im kombinierten Verkehr abgewickelten Transportgüter (+8 %).

Innerhalb des kombinierten Verkehrs wird sich die **Schiene** mit einem Aufkommenswachstum von 82 % deutlich **günstiger entwickeln, als das Binnenschiff** (72 %). Bezogen auf den Schienengüterverkehr erhöht sich der Anteil des kombinierten Verkehrs beim Aufkommen von 21 % auf 31 % und bei der Leistung von 35 % auf 43 %, damit werden im Jahre 2030 ein **Drittel des Transportaufkommens** und fast die Hälfte der Transportleistung **der Bahn im kombinierten Verkehr** erbracht.

3.4.2 Entwicklung des Güterverkehrs nach Gütergruppen

In der Tab. 3-15 und Tab. 3-16 sind Güterverkehrsaufkommen und -leistung nach **Gütergruppen (NST2007) differenziert ausgewiesen.**

Am **stärksten** wachsen – auch über alle Verkehrsträger - die Gütergruppen 190 **"Gutart unbekannt"** (+2,6 % p.a.), 160 "Geräte und Material für Güterbeförderung" und 130 "Möbel" (beide mit 1,6 % p.a.), 50 "Textilien, Bekleidung", 170 "Sammelgut" (beide 1,5 % p.a.), 120 "Fahrzeuge", 110 "Maschinen und Ausrüstungen" und 40 "Nahrungs- und Futtermittel" (alle 1,3 % p.a.).

Der starke Anstieg in der **Gütergruppe 190** liegt darin begründet, dass hier insbesondere die **KV-Güter** erfasst sind. Hier sind die Erzeugnisse praktisch aller weiterführenden Produktionsstufen enthalten, sodass ihre Transportmengen und -leistungen unmittelbar von einer Steigerung der Zahl der Fertigungsstufen durch technischen Fortschritt und durch sinkende innerbetriebliche Fertigungstiefe profitieren.

Aufgrund der aktuellen **energiepolitischen Leitlinien** werden die Verkehrsmengen an **Koks** (-4,1 % p.a.), **Braunkohle** (-2,9 % p.a.), **Steinkohle** (-1,5 % p.a.) und **Mineralölerzeugnisse** (-0,5 % p.a.) **rückgängig** sein.

Tab. 3-15: Entwicklung des Güterverkehrsaufkommens nach NST2007 Gütergruppen und Verkehrsträgern gemäß der BVWP-Prognose (in Mio. t)

Gütergruppe	Schiene			Straße			Binnenschiff			Summe		
	2010	2030	WR in % p.a.	2010	2030	WR in % p.a.	2010	2030	WR in % p.a.	2010	2030	WR in % p.a.
Land- und forstwirtsch. Erzeugnisse	7,6	11,2	2,0%	184,6	232,2	1,2%	15,9	21,4	1,5%	208,1	264,9	1,2%
Steinkohle	30,4	14,4	-3,7%	3,8	0,2	-14,3%	32,2	34,4	0,3%	66,4	49,0	-1,5%
Braunkohle	9,1	4,9	-3,0%	3,6	2,9	-1,1%	1,5	0,0	-18,6%	14,1	7,8	-2,9%
Erdöl und Erdgas	0,5	0,3	-2,3%	1,2	0,9	-1,7%	0,8	0,7	-0,3%	2,5	1,9	-1,3%
Erze	20,4	21,2	0,2%	0,8	1,1	1,8%	27,8	36,6	1,4%	49,0	58,9	0,9%
Düngemittel	1,9	2,2	0,7%	4,1	4,4	0,3%	0,7	0,9	1,3%	6,7	7,5	0,5%
Steine und Erden	27,3	35,1	1,3%	862,3	893,5	0,2%	31,6	34,4	0,4%	921,2	962,9	0,2%
Nahrungs- und Genussmittel	2,1	4,0	3,3%	341,7	442,1	1,3%	11,5	13,4	0,8%	355,3	459,6	1,3%
Textilien, Bekleidung, Leder	0,0	0,5	15,0%	21,1	27,9	1,4%	0,1	0,1	4,4%	21,1	28,5	1,5%
Holzwaren, Papier, Papier, Druckerei	9,8	13,5	1,6%	166,4	207,2	1,1%	3,7	5,4	1,9%	179,9	226,2	1,2%
Koks	6,5	4,9	-1,4%	7,1	0,5	-12,5%	2,4	1,5	-2,2%	15,9	6,9	-4,1%
Mineralölerzeugnisse	38,0	39,5	0,2%	90,6	71,6	-1,2%	33,5	35,0	0,2%	162,0	146,2	-0,5%
Chemische Erzeugnisse etc.	29,9	38,5	1,3%	167,5	206,2	1,0%	21,4	26,6	1,1%	218,8	271,3	1,1%
Sonstige Mineralerzeugnisse	11,1	13,7	1,0%	322,1	375,6	0,8%	4,6	5,9	1,3%	337,8	395,3	0,8%
Metalle und Metallerzeugnisse	61,9	74,0	0,9%	174,0	223,8	1,3%	11,6	14,0	1,0%	247,5	311,9	1,2%
Maschinen und Ausrüstungen etc.	0,8	1,8	4,0%	76,0	97,3	1,2%	0,7	1,0	2,0%	77,5	100,2	1,3%
Fahrzeuge	9,5	14,5	2,1%	91,4	116,9	1,2%	0,9	0,9	0,5%	101,8	132,3	1,3%
Möbel, Schmuck, Musikinstrumente etc.	0,1	0,4	11,2%	20,9	28,0	1,5%	0,2	0,3	3,5%	21,1	28,7	1,6%
Sekundärrohstoffe, Abfälle	15,2	18,4	0,9%	254,0	267,8	0,3%	13,3	15,3	0,7%	282,5	301,5	0,3%
Post, Pakete	0,0	0,0		35,2	44,0	1,1%	0,0	0,0		35,2	44,0	1,1%
Geräte und Material für Güterbeförd.	3,6	7,4	3,7%	87,1	115,6	1,4%	1,8	3,6	3,6%	92,4	126,6	1,6%
Umzugsgut, sonst. nichtmarktb. Güter	0,1	0,1	3,7%	39,1	49,7	1,2%	0,0	0,0	3,3%	39,2	49,8	1,2%
Sammelgut	1,8	3,2	2,9%	114,8	154,5	1,5%	0,0	0,1		116,6	157,7	1,5%
Gutart unbekannt	71,2	119,8	2,6%	46,8	75,2	2,4%	13,9	23,8	2,7%	131,9	218,8	2,6%
Summe	358,9	443,7	1,1%	3.116,1	3.639,1	0,8%	229,6	275,6	0,9%	3.704,7	4.358,4	0,8%

Das **aufkommensmäßig höchste absolute Wachstum** wird insbesondere bei Nahrungs- und Futtermittel (+104 Mio. t), unbekannte Güter (+87 Mio. t), Metalle (+64 Mio. t), sonstige Mineralerzeugnisse (+58 Mio. t), Landwirtschaftliche Erzeugnisse (+57 Mio. t) und Chemische Erzeugnisse (+53 Mio. t) auftreten. Die Verkehre an Steinkohle (-17 Mio. t) und Mineralölerzeugnisse (-16 Mio. t) gehen am stärksten zurück.

Von den **Bergwerksschließungen** und den damit verbundenen **Rückgang der inländischen Kohlemengen** wird insbesondere die Bahn betroffen sein. Hier geht das Aufkommen um rd.