

Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraft- stoffstrategie

**Abschlussbericht zur Studie „Elektrifizierungs-
varianten für das deutsche Schienennetz“**

**Teil I: „Rahmenbedingungen und Kosten einer
Komplettelektrifizierung des deutschen Schie-
nennetzes“**

**Teil II: „Kostenoptimierte weitergehende Elektri-
fizierung des Schienennetzes unter Einsatz von
Elektrifizierunginseln und hybriden Antrieben“**

Karlsruhe, 25. Juni 2021

PTV Planung Transport Verkehr AG

Prof. Dr. Christoph Walther

Silke Forkert

Phone: +49 721 9651 -164 /-7183

christoph.walther@ptvgroup.com

silke.forkert@ptvgroup.com

Technische Universität Berlin

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Carl-Roman Culemann

Phone: +49 30 314 -25150 /-24956

Markus.Hecht@Tu-Berlin.de

carl-roman.culemann@tu-berlin.de

Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Phone: +49 351 463 -36729

Arnd.Stephan@tu-dresden.de

Inhaltsverzeichnis

Vademecum	1
Teil I: Rahmenbedingungen und Kosten einer Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes.....	2
1 Einleitung und Überblick	3
1.1 <i>Ausgangslage und Ziel der Studie</i>	3
1.2 <i>Vorgehensweise der Studie</i>	4
1.3 <i>Arbeitspaket 1: Maßnahmenstrecken.....</i>	4
1.4 <i>Arbeitspaket 2: Rollmaterial</i>	5
1.5 <i>Arbeitspaket 3: Infrastruktur</i>	5
1.6 <i>Arbeitspaket 4: Kostenanalyse.....</i>	5
2 Netzaufbereitung und Maßnahmenstrecken	6
3 Rollmaterial.....	10
3.1 <i>Analyse der Ausgangslage 2010.....</i>	10
3.1.1 Fahrzeugbestand.....	10
3.1.2 Fahrleistung nach Diesel- und Elektrotraktion	12
3.1.3 Energieverbrauch	14
3.2 <i>Planfälle zur Ermittlung des Einflusses einer Komplettelektrifizierung.....</i>	17
3.2.1 Vergleich der Kostenparameter Diesel - Elektro	18
3.2.2 2010 – Basisfall	30
3.2.3 2010 – Planfall.....	33
3.2.4 2030 – Basisfall	39
3.2.5 2030 – Planfall.....	45
3.2.6 Zusammenfassung der Kosten der zwei Netzzustände.....	49
4 Infrastruktur.....	51
4.1 <i>Ausgangslage und Zielsetzung</i>	51
4.2 <i>Aufbau der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland.....</i>	52
4.2.1 Gesamtstruktur	52
4.2.2 Teilsysteme	53
4.3 <i>Bahnenergieversorgungsanlagen</i>	55
4.3.1 Netzaufbau	55
4.3.2 Zentrale frequenzvariable Bahnenergieversorgung	56
4.3.3 Dezentrale frequenzstarre Bahnenergieversorgung	57
4.3.4 Benötigtes Mengengerüst für die Bahnenergieversorgungsanlagen	58
4.4 <i>Oberleitungsanlagen.....</i>	60
4.4.1 Aufbau einer Oberleitungsanlage.....	60

4.4.2	Regelbauarten der Oberleitung	66
4.4.3	Masten	68
4.4.4	Mastfundamente und Mastgründungen	71
4.4.5	Oberleitungen für bestehende (bisher nicht elektrifizierte) Tunnel, Brücken und Ingenieurbauwerke	75
4.4.6	Streckenparameter und Streckenkategorisierung	77
4.4.7	Kilometerspezifisches Mengengerüst.....	81
4.4.8	Benötigtes Mengengerüst für die Oberleitungsanlagen	84
4.5	<i>Spezifische Kostensätze</i>	86
4.5.1	Bahnenergieversorgungsanlagen	86
4.5.2	Oberleitungsanlagen	87
4.5.3	Weitere Kosten	89
4.5.4	Zusammenfassung der Infrastrukturkosten.....	91
4.5.5	Laufende jährliche Betriebskosten	92
4.6	<i>Zuverlässigkeit der Prognose und Ausblick</i>	93
4.6.1	Fehlerbetrachtung	93
5	Kostenanalyse	96
5.1	<i>Gesamtkosten</i>	96
5.2	<i>Netzattribute aus der Visum-Datenbank</i>	96
5.3	<i>Berechnung der Betriebskosten</i>	99
5.3.1	Kapitaldienst des Schienenverkehrs	101
5.3.2	Unterhaltungskosten des Schienenverkehrs.....	102
5.3.3	Fahrpersonalkosten des Schienenverkehrs	103
5.3.4	Energieverbrauch des Schienenverkehrs	103
5.3.5	Abgasemissionen des Schienenverkehrs	106
5.3.6	Vermeidungskosten.....	109
Teil II:	Kostenoptimierte weitergehende Elektrifizierung des Schienennetzes unter Einsatz von Elektrifizierungsinselfn und hybriden Antrieben	111
6	Einleitung	112
6.1	<i>Ausgangslage und Ziel der Studie</i>	112
6.2	<i>Vorgehensweise der Studie</i>	113
6.3	<i>Arbeitspaket 1: Maßnahmenstrecken</i>	113
6.4	<i>Arbeitspaket 2: Rollmaterial</i>	113
6.5	<i>Arbeitspaket 3: Infrastruktur</i>	113
6.6	<i>Arbeitspaket 4: Kostenanalyse</i>	114
7	Netzaufbereitung und Maßnahmenstrecken	115
8	Rollmaterial	118
8.1	<i>Hybridfahrzeuge</i>	118

8.1.1	Vergleich der Kostenparameter.....	120
8.1.2	2030 – Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr.....	131
8.1.3	2030 – Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr.....	139
8.1.4	Zusammenfassung der Kosten der Hybrid-Netzzustände	145
9	Infrastruktur.....	149
9.1	<i>Einordnung der Untersuchung</i>	149
9.1.1	Projektziel	149
9.1.2	Arbeitsinhalte.....	150
9.2	<i>Methodik der Projektbearbeitung</i>	151
9.2.1	Datenbasis der vorhandenen Strecken	151
9.3	<i>Kriterien zur Definition der Teilelektrifizierung</i>	153
9.4	<i>Erläuterungen zur Kostenkalkulation</i>	155
9.5	<i>Berechnungsergebnisse zur Infrastruktur</i>	156
9.5.1	Streckenlängen und spezifische Kosten	156
9.5.2	Personenverkehr	158
9.6	<i>Varianten mit Güterverkehr</i>	159
9.7	<i>Gesamtübersicht der Investitionen</i>	160
9.8	<i>Laufende jährliche Betriebskosten</i>	161
9.9	<i>Darstellung in PTV Visum</i>	162
9.10	<i>Infrastrukturkosten der Teilelektrifizierung</i>	163
10	Kostenanalyse.....	165
10.1	<i>Energieverbrauch des Schienenverkehrs</i>	165
10.2	<i>Abgasemissionen des Schienenverkehrs</i>	168
10.3	<i>Vermeidungskosten</i>	170
11	Verifizierung der betrieblich-technischen Machbarkeit.....	172
11.1	<i>Untersuchungsziel</i>	172
11.2	<i>Einzelfälle</i>	172
11.2.1	Beispielstrecken und Betriebsvarianten	172
11.2.2	Fahrzeug- und Energiespeicherdaten	174
11.2.3	Betriebsstrategien der Energiespeicher	177
11.2.4	Infrastrukturvarianten.....	180
11.3	<i>Simulationsrechnungen</i>	181
11.3.1	Werkzeuge und Funktionsprinzip	181
11.3.2	Ergebnisse der Simulationen	184
11.4	<i>Ergebnisse</i>	186
12	Fazit	188
13	Literaturverzeichnis	191

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete	3
Abbildung 2: Netzzustände 2010 und 2030 mit jeweiligem Basis- und Planfall	4
Abbildung 3: Überblick über das in der Verflechtungsprognose 2030 enthaltene europäische Schienennetz	7
Abbildung 4: Überblick über das deutsche Schienennetz.....	7
Abbildung 5: Traktion der Streckenabschnitte	8
Abbildung 6: Anzahl der Gleise	8
Abbildung 7: Geclusterte Höhenlagen.....	9
Abbildung 8: n-Teiligkeit der Dieseltriebzüge der DB	12
Abbildung 9: Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs im DB Netz 2010	15
Abbildung 10: Entwicklung des Bahnstrompreises	20
Abbildung 11: Verbraucherpreise in Referenzprognose und Trendszenario 2011–2050	21
Abbildung 12: Vergleich der Zugkilometer je Tag auf nichtelektrifizierten Strecken.....	40
Abbildung 13: Vergleich der Zugkilometer je Tag 2010 zu 2030.....	40
Abbildung 14: Aufbau einer Oberleitung mit Einzelstützpunkten	61
Abbildung 15: Rohrschwenkausleger a) angelenkter Stützpunkt; b) umgelenkter Stützpunkt	62
Abbildung 16: Seitenansicht eines Hängers im Kettenwerk.....	63
Abbildung 17: Darstellung von Oberleitungseigenschaften und -elementen.....	63
Abbildung 18: Quer- und Längsprofil der Re 100 Oberleitung	66
Abbildung 19: Quer- und Längsprofil der Re 200 Oberleitung	68
Abbildung 20: Klassifizierung von Oberleitungsmasten in Anhängigkeit von deren Aufgaben und Funktionen	69
Abbildung 21: Winkel- und Flachmast im Profil	70
Abbildung 22: Schematische Darstellung von Betonfundamenten	72
Abbildung 23: Schematische Darstellung von Pfahl- und Rohrgründungen.....	74
Abbildung 24: Verteilung der ausgesuchten Referenzstrecken und -bahnhöfe in Deutschland	83
Abbildung 25: Visum Oberfläche.....	97
Abbildung 26: Netzattribute und Streckenberechnungen in Excel	97
Abbildung 27: Betriebskostenformel Schienenpersonenverkehr.....	100
Abbildung 28: Betriebskostenformel Schienengüterverkehr	101
Abbildung 29: Abnahme Energieverbrauch - Diesel.....	104
Abbildung 30: Zunahme Energieverbrauch - Elektro	105
Abbildung 31: Änderung gesamter Energieverbrauch	106

Abbildung 32: Abnahme CO ₂ -Emissionen (Diesel).....	107
Abbildung 33: Zunahme CO ₂ -Emissionen (Elektro).....	108
Abbildung 34: Änderung Abgasemissionen gesamt.....	109
Abbildung 35: Struktur der Arbeitspakete.....	112
Abbildung 36: Überblick über das europäische Schienennetz.....	115
Abbildung 37: Überblick über das deutsche Schienennetz.....	116
Abbildung 38: Die Traktion der Strecken.....	116
Abbildung 39: Anzahl der Gleise.....	117
Abbildung 40: Geclusterte Höhenlagen.....	117
Abbildung 41: Verlauf der elektrischen Energie in einem Batterietriebzug.....	118
Abbildung 42: Bombardier TALENT 3 Battery Train.....	118
Abbildung 43: Diesel-Elektro-Hybridfahrzeuge EuroDual der Firma Stadler.....	119
Abbildung 44: Spezifische Kosten für die gewählten Netzzustände.....	158
Abbildung 45: Gesamtinvestition der Infrastrukturanlagen für Komplett- und Teilelektrifizierung.....	161
Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung der Ladestationen (blaue Punkte) in PTV Visum.....	163
Abbildung 47: Abnahme Energieverbrauch Diesel.....	166
Abbildung 48: Zunahme Energieverbrauch Elektro.....	167
Abbildung 49: Änderung gesamter Energieverbrauch.....	167
Abbildung 50: Abnahme CO ₂ -Emissionen – Diesel.....	168
Abbildung 51: Zunahme CO ₂ -Emissionen – Elektro.....	169
Abbildung 52: Änderung Abgasemissionen (Mt/Jahr).....	170
Abbildung 53: Höhen- und Geschwindigkeitsprofil der RE-Strecke Flachland.....	173
Abbildung 54: Höhen- und Geschwindigkeitsprofil der RB-Strecke Mittelgebirge.....	174
Abbildung 55: Traktionsdiagramm BEMU für Oberleitungs- und Batteriebetrieb.....	176
Abbildung 56: Laderaten und Ladezeiten für Nachladung von 5 auf 90 % SoC.....	178
Abbildung 57: Laderaten und Ladezustände nach 10 min Ladezeit.....	178
Abbildung 58: Auswirkung der C-Raten auf die Traktionsleistung.....	179
Abbildung 59: Reichweiten in Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs.....	180
Abbildung 60: Fahrtafelbild RE-Strecke Flachland, Spitzfahrt.....	182
Abbildung 61: Fahrtafelbild RB-Strecke Mittelgebirge, energieoptimal.....	182
Abbildung 62: Elektrische Fahrzeugleistung RB-Strecke Mittelgebirge, Spitzfahrt mit 2C/ 3C.....	183
Abbildung 63: Batterieladezustand SoC RE-Strecke Flachland, Spitzfahrt mit 2C / 3C.....	184
Abbildung 64: Fahrzeiten und spez. Energiebedarfswerte RB-Strecke Mittelgebirge.....	185
Abbildung 65: Fahrzeiten und spez. Energiebedarfswerte RE-Strecke Flachland.....	186

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Bestandszahlen SPFV.....	10
Tabelle 2:	Bestandszahlen SPNV	11
Tabelle 3:	Bestandszahlen SGV 2010	12
Tabelle 4:	Elektrischer Energieverbrauch nach Sparte.....	16
Tabelle 5:	Dieselenergieverbrauch nach Sparte.....	16
Tabelle 6:	Rückspeisequoten und Anteil der rückspeisefähigen Fahrzeuge der DB.....	17
Tabelle 7:	Übersicht der betrachteten Netzzustände.....	18
Tabelle 8:	Bezugspreis und Rückspeisevergütung des Bahnstroms (2010).....	19
Tabelle 9:	Anteil des genutzten Tarifs nach Sparte	20
Tabelle 10:	Gemittelter Bezugspreis und Rückspeisevergütung je Sparte (2010)	21
Tabelle 11:	Gemittelter Bezugspreis und Rückspeisevergütung je Sparte (2030)	22
Tabelle 12:	SPFV - Spezifischer elektrischer Energieverbrauch	22
Tabelle 13:	SPNV - Aufteilung der Fahrleistung [Zug km] nach Triebfahrzeug.....	23
Tabelle 14:	SPNV - Spezifischer Energieverbrauch der Modellfahrzeuge.....	23
Tabelle 15:	SGV - Spezifischer elektrischer Energiebedarf	24
Tabelle 16:	Diesetriebwagen SPNV - Modellfahrzeugtypen	25
Tabelle 17:	Elektrotriebwagen SPNV - Modellfahrzeugtypen	26
Tabelle 18:	Modellfahrzeugtypen SPNV - Investitionskosten	26
Tabelle 19:	Modellfahrzeugtypen SPNV – Instandhaltungskosten	27
Tabelle 20:	Instandhaltungskostendaten der Lokomotiven der ÖBB	27
Tabelle 21:	Spezifische Instandhaltungskosten der Lokomotiven der ÖBB.....	28
Tabelle 22:	Instandhaltungskosten Lokomotiven gemäß BVWP	28
Tabelle 23:	Verfügbarkeit der Triebfahrzeuge der ÖBB.....	29
Tabelle 24:	Gesamtdieselskosten 2010	30
Tabelle 25:	SPNV - Diesetriebfahrzeuge 2010.....	31
Tabelle 26:	SPNV - Instandhaltungskosten nach Triebfahrzeugkategorie.....	32
Tabelle 27:	Kostenübersicht Basisfall 2010.....	33
Tabelle 28:	SPFV – Zusätzlicher Bruttoenergiebedarf (rechts).....	34
Tabelle 29:	SPFV - Nettoenergiebedarf	34
Tabelle 30:	SPFV – Energiekosten (ehemaliger Anteil Diesel).....	34
Tabelle 31:	SPNV - Nettoenergiebedarf.....	35
Tabelle 32:	SPNV – Energiekosten.....	35
Tabelle 33:	SGV - Bruttoenergiebedarf Elektrotraktion Basisfall 2010.....	36

Tabelle 34:	Bruttoenergiebedarf der zusätzlichen Elektrotraktion im Planfall 2010.....	36
Tabelle 35:	SGV - Energiekosten.....	36
Tabelle 36:	SPNV - Betrachteter Modellfahrzeugbestand	37
Tabelle 37:	Aufstellung der Instandhaltungskosten nach Modellfahrzeug	38
Tabelle 38:	Kostenübersicht Planfall 2010	39
Tabelle 39:	SPNV - Prognostizierter Triebfahrzeugbestand 2030	41
Tabelle 40:	Dieselennergieverbrauch im Basisfall 2030	42
Tabelle 41:	SPFV - Instandhaltungskosten	43
Tabelle 42:	SPNV - Investitionskosten	43
Tabelle 43:	SPNV - Instandhaltungskosten.....	44
Tabelle 44:	Kostenübersicht Basisfall 2030.....	44
Tabelle 45:	SPFV - Energiebedarf unterteilt in Lok und Triebzug.....	45
Tabelle 46:	SPFV – Energiekosten	46
Tabelle 47:	SPNV - Energiekosten.....	46
Tabelle 48:	SGV – Energiebedarf	46
Tabelle 49:	SGV - Energiekosten.....	46
Tabelle 50:	SPFV - Instandhaltungskosten	47
Tabelle 51:	SPNV - Investitionskosten	47
Tabelle 52:	SPNV – Instandhaltungskosten	47
Tabelle 53:	Kostenübersicht Planfall 2030	48
Tabelle 54:	Zusammenfassung Kosten der zwei Netzzustände	49
Tabelle 55:	Vergleich Annuitäten	49
Tabelle 56:	Vergleich Instandhaltungskosten.....	50
Tabelle 57:	Vergleich Energiekosten.....	50
Tabelle 58:	Mengengerüst für eine Komplettelektrifizierung benötigter zusätzlicher Bahnstromversorgungsanlagen.....	60
Tabelle 59:	Regelbauarten für Oberleitungen und deren Eigenschaften	66
Tabelle 60:	Angaben über Streckenlängen im nichtelektrifizierten deutschen Eisenbahnnetz 2010.....	80
Tabelle 61:	Technische Daten der Referenzstrecken [eigene Darstellung]	81
Tabelle 62:	Technische Daten der Referenzbahnhöfe	82
Tabelle 63:	Zusammenfassung der Mengenermittlung von Oberleitungselementen anhand von Referenzstrecken.....	84
Tabelle 64:	Referenzierte Verteilung unterschiedlicher Masttypen	84
Tabelle 65:	Voraussichtlich benötigte Anzahl von Oberleitungselementen für die Elektrifizierung des gesamtdeutschen Eisenbahnnetzes	85
Tabelle 66:	Voraussichtliche Kosten von Oberleitungselementen für die Elektrifizierung des gesamtdeutschen Eisenbahnnetzes für das Jahr 2010	88

Tabelle 67:	(Kilometer-)spezifische Kosten für die Errichtung von Oberleitungsanlagen im Streckennetz je Kategorie	89
Tabelle 68:	(kilometer-)spezifische Kosten für die Infrastrukturanlagen der Elektrifizierung in EUR/km.....	91
Tabelle 69:	Gesamtkosten für die Infrastrukturanlagen einer Komplettelektrifizierung in Mrd. EUR.....	92
Tabelle 70:	Laufende jährliche Betriebskosten für die Infrastruktur der Elektrifizierung.....	92
Tabelle 71:	Fahrzeugtypisierung SPV nach dem BVWP	98
Tabelle 72:	Fahrzeugtypisierung SGV nach der BVWP	99
Tabelle 73:	Änderung Kapitaldienst des SV und Vorhaltungskosten des SGV (T€/Jahr)	102
Tabelle 74:	Änderung Unterhaltungskosten (T€/Jahr).....	103
Tabelle 75:	Änderung Fahrpersonalkosten (T€/Jahr).....	103
Tabelle 76:	Abnahme Energieverbrauch – Diesel	104
Tabelle 77:	Zunahme Energieverbrauch – Elektro	104
Tabelle 78:	Änderung Energieverbrauch gesamt	105
Tabelle 79:	Abnahme CO ₂ -Emissionen (Diesel).....	106
Tabelle 80:	Zunahme CO ₂ -Emissionen (Elektro).....	107
Tabelle 81:	Änderung Abgasemissionen (Mt/Jahr).....	108
Tabelle 82:	Vermeidungskosten (€/tCO ₂).....	110
Tabelle 83:	SPFV - Spezifischer elektrischer Nettoenergiebedarf je Trassenkilometer.....	120
Tabelle 84:	SPFV - Spezifischer Diesel Energiebedarf je Trassenkilometer [Tr.-km]	120
Tabelle 85:	SPNV - Aufteilung der Fahrleistung [Zug-km] nach Triebfahrzeug.....	121
Tabelle 86:	Spez. Fahrzeugenergieverbrauch und Mehrgewicht durch Akku SPNV .	122
Tabelle 87:	SGV - Spezifischer Diesel Energiebedarf je tkm.....	122
Tabelle 88:	SGV - Spezifischer Energiebedarf je Trassenkilometer [Tr.-km]	123
Tabelle 89:	Spezifische Investitionskosten Hybrid-Lokomotiven	124
Tabelle 90:	SPFV Wagenzug – Modellfahrzeugtypen	125
Tabelle 91:	Modellfahrzeugtyp SPFV Wagenzug - spezifische Investitionskosten	125
Tabelle 92:	Vergleich Investitionskosten SPFV-Wagenzug zu Triebwagen.....	125
Tabelle 93:	Spezifische Investitionskosten BEMU.....	125
Tabelle 94:	Spezifische Investitionskosten Modellfahrzeugtyp Lok	126
Tabelle 95:	SPNV Wagenzug – Modellfahrzeugtypen.....	126
Tabelle 96:	Modellfahrzeugtyp Lok - Investitionskosten	127
Tabelle 97:	Wagenzug - Modellfahrzeugtyp im Vergleich.....	127
Tabelle 98:	Spezifische Instandhaltungskosten Hybrid Lokomotiven	128

Tabelle 99:	Modellfahrzeugtyp SPFV Wagenzug - spezifische Instandhaltungskosten.....	129
Tabelle 100:	Vergleich Instandhaltungskosten SPFV Wagenzug zu Triebwagen.....	129
Tabelle 101:	Instandhaltungskosten SPFV konventionell.....	129
Tabelle 102:	Zusätzliche Instandhaltungskosten Akku.....	130
Tabelle 103:	Spez. Instandhaltungskosten BEMU	130
Tabelle 104:	Modellfahrzeugtyp Lok - Instandhaltungskosten.....	131
Tabelle 105:	Spez. Instandhaltungskosten Modellfahrzeugtyp Lok.....	131
Tabelle 106:	Fahrleistung SPFV nach Traktionsart.....	132
Tabelle 107:	Fahrleistung SPNV nach Traktionsart.....	132
Tabelle 108:	Fahrleistung SGV nach Traktionsart.....	132
Tabelle 109:	Energiekosten Strom SPFV.....	133
Tabelle 110:	Energiekosten SPFV.....	133
Tabelle 111:	Energiekosten SPNV.....	133
Tabelle 112:	Energiekosten Strom SGV	134
Tabelle 113:	Energiekosten SGV.....	134
Tabelle 114:	Investitionskosten SPFV konventionell.....	134
Tabelle 115:	Investitionskosten SPFV-Hybrid	135
Tabelle 116:	Investitionskosten BEMU.....	135
Tabelle 117:	Investitionskosten Modellfahrzeugtyp Lok	136
Tabelle 118:	Investitionskosten Lokomotiven SGV	136
Tabelle 119:	Instandhaltungskosten SPFV konventionell.....	137
Tabelle 120:	Instandhaltungskosten SPF-Hybrid	137
Tabelle 121:	Instandhaltungskosten BEMU	138
Tabelle 122:	Instandhaltungskosten Modellfahrzeugtyp Lok	138
Tabelle 123:	Instandhaltungskosten Lokomotiven SGV	139
Tabelle 124:	Kostenübersicht Hybridnetz 2030.....	139
Tabelle 125:	Fahrleistung SPFV nach Traktionsart.....	140
Tabelle 126:	Fahrleistung SPNV nach Traktionsart.....	140
Tabelle 127:	Fahrleistung SGV nach Traktionsart.....	141
Tabelle 128:	Energiekosten Strom SPFV.....	141
Tabelle 129:	Energiekosten SPFV.....	141
Tabelle 130:	Energiekosten SPNV.....	142
Tabelle 131:	Energiekosten Strom SGV	142
Tabelle 132:	Investitionskosten Lokomotiven SGV	143
Tabelle 133:	Instandhaltungskosten SPFV-Hybrid.....	143
Tabelle 134:	Instandhaltungskosten BEMU	144

Tabelle 135:	Instandhaltungskosten SGV	144
Tabelle 136:	Kostenübersicht Hybridnetz mit Lückenschluss.....	145
Tabelle 137:	Zusammenfassung Netzzustände 2030 Studie I und Hybridnetze (Studie II).....	146
Tabelle 138:	Vergleich Annuitäten	146
Tabelle 139:	Vergleich Instandhaltungskosten der Netzzustände 2030 Studie I und II.....	147
Tabelle 140:	Vergleich Energiekosten der Netzzustände 2030 in Studie I und II.....	148
Tabelle 141:	Streckennummern der nicht in Betrieb befindlichen und nicht befahrenen Strecken im Jahr 2017.....	153
Tabelle 142:	Kilometerspezifische Kosten für die Elektrifizierung.....	157
Tabelle 143:	Gesamtinvestition für Elektrifizierung (in Mrd. EUR)	160
Tabelle 144:	Laufende jährliche Betriebskosten für die Infrastruktur der Elektrifizierung.....	161
Tabelle 145:	Abnahme Energieverbrauch Diesel	166
Tabelle 146:	Zunahme Energieverbrauch Elektro	166
Tabelle 147:	Änderung Energieverbrauch gesamt (PJ/Jahr).....	167
Tabelle 148:	Abnahme CO ₂ -Emissionen – Diesel	168
Tabelle 149:	Zunahme CO ₂ -Emissionen - Elektro.....	169
Tabelle 150:	Gesamte CO ₂ -Emissionen.....	169
Tabelle 151:	Vermeidungskosten (€/tCO ₂).....	171
Tabelle 152:	Wesentliche Fahrzeug- und Antriebsdaten (BEMU)	175
Tabelle 153:	Parameter zu den Fahrzeugbatterien (Beispiel NMC/LTO).....	177

Vademecum

Dieser Bericht veröffentlicht die Ergebnisse der Elektrifizierungsvarianten für das deutsche Schienennetz mit den Teilstudien „Rahmenbedingungen und Kosten einer Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes“ und „Kostenoptimierte weitergehende Elektrifizierung des Schienennetzes unter Einsatz von Elektrifizierungseinseln und hybriden Antrieben“.

Teil I bezieht sich auf die Machbarkeit der kompletten Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes und den damit verbundenen Investitionen in Infrastruktur und Rollmaterial. Darüber hinaus werden die relevanten CO₂-Emissionen berechnet und die dazu gehörenden Vermeidungskosten je eingesparter Tonne CO₂ ausgewiesen.

In Teil II dieses Berichtes stehen die Ergebnisse der Untersuchung, welche Investitionskosten in Infrastruktur und Rollmaterial aufgebracht werden müssen, um zwar nicht das gesamte Schienennetz zu elektrifizieren, jedoch Elektrifizierungseinseln und hybride Antriebstechniken einsetzen zu können. Auch in dieser Teilstudie wurden CO₂-Emissionen und die entsprechenden Vermeidungskosten je eingesparter Tonne CO₂ berechnet.

Teil I: Rahmenbedingungen und Kosten einer Komplettelekt-rifizierung des deutschen Schienennetzes

1 Einleitung und Überblick

1.1 Ausgangslage und Ziel der Studie

Im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) der Bundesregierung werden Maßnahmen und Möglichkeiten untersucht, die zu einer Dekarbonisierung des Verkehrssektors bis 2050 beitragen können. Hintergrund ist die europäische und bundespolitische Zielsetzung in der Klimapolitik, die Treibhausgas-Emissionen und den Energieverbrauch insgesamt zu senken. Eine mögliche Reduktion der CO₂-Emissionen wird in der Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes gesehen. Vor diesem Hintergrund wurde die Studie „Rahmenbedingungen und Kosten einer Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes“ durchgeführt. Konkret wurde der Frage nachgegangen, inwieweit es technisch machbar ist, das Schienennetz komplett zu elektrifizieren und welche Kosten in diesem Rahmen entstehen.

Ausgangspunkt war das „Schienennetz der Verflechtungsprognose 2030“ des Bundesverkehrswegeplans (BVWP), mit dessen Hilfe ein digitales Modell für die vorliegende Untersuchung erstellt werden konnte.

Da das Hauptaugenmerk der Studie auf der technischen Machbarkeit und dem möglichen Potential der Einsparungen im Bereich der Endenergie und des CO₂-Ausstoßes lag, wurden zwei verschiedene Netzzustände betrachtet. Der „**Analysezustand 2010**“ (unterteilt in einen Basis- und einen Planfall), und der „**Prognosezustand 2030**“ (ebenfalls in Basis- und Planfall unterteilt). Die Studie umfasst folgende vier Arbeitspakete und begann im November 2016.

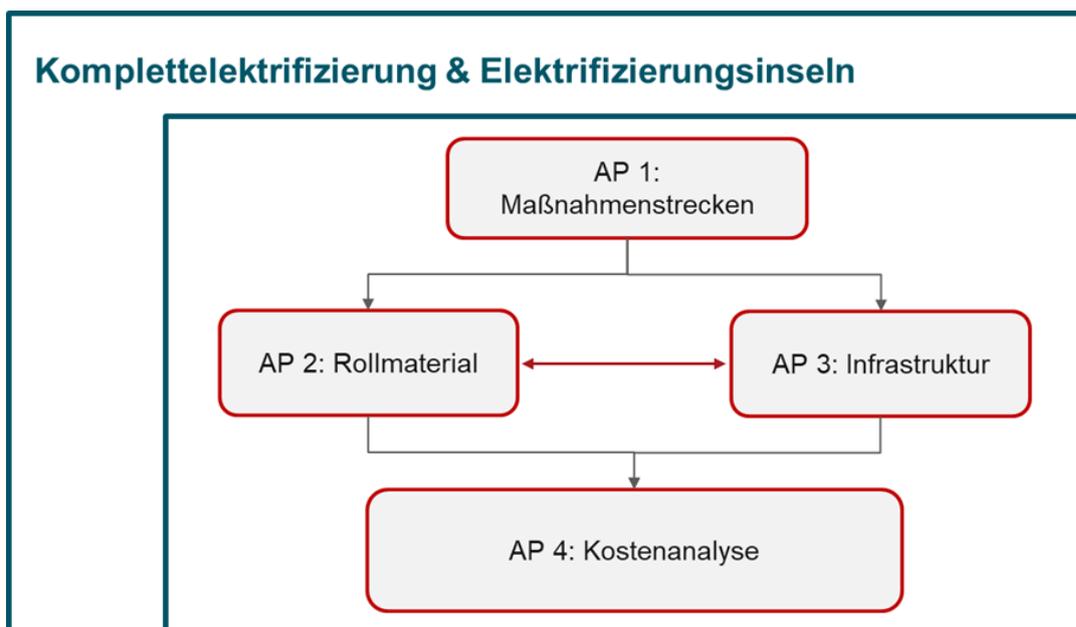


Abbildung 1: Struktur der Arbeitspakete

1.2 Vorgehensweise der Studie

Um valide Ergebnisse erzielen zu können, wurde in der Untersuchung von zwei Schienennetzuständen ausgegangen. Benannt wurden diese mit „**Analysezustand 2010**“ und „**Prognosezustand 2030**“.

Jedem dieser Netzustände wurden in einem nächsten Schritt ein Basisfall und ein Planfall zugeordnet. Der Basisfall steht für ein Schienennetz mit gemischter Traktion, der Planfall für ein komplett elektrifiziertes Schienennetz.

Analysezustand 2010		Prognosezustand 2030	
Basisfall 2010	Planfall 2010	Basisfall 2030	Planfall 2030
Diesel- und Elektrotraktion des Schienennetzes nach Datenlage	Theoretisch 100 % Elektrotraktion, alle Dieselstrecken werden elektrifiziert	Prognostizierte Diesel- und Elektrotraktion auf den Strecken	Theoretisch 100 % Komplettelektrifizierung des Streckennetzes

Abbildung 2: Netzustände 2010 und 2030 mit jeweiligem Basis- und Planfall

Danach wurden Rollmaterial- und Infrastrukturkosten für die verschiedenen Fälle der beiden Netzustände berechnet. Außerdem wurden CO₂-Emissionen und Vermeidungskosten je eingesparter Tonne CO₂ ausgewiesen. In einem zusätzlichen Validierungsschritt wurde mit der Berechnung der Betriebskosten, des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen dem Methodenhandbuch des Bundesverkehrswegeplans gefolgt.

1.3 Arbeitspaket 1: Maßnahmenstrecken

In **Arbeitspaket 1** erfolgten die Netzaufbereitung und das Festlegen auf die zu betrachtenden Maßnahmenstrecken. Das mit der Software PTV Visum aufbereitete digitale Schienennetzmodell beinhaltet alle Bahnhöfe und Strecken des Schienennetzes der Verflechtungsprognose 2030 des BVWP. Alle nicht elektrifizierten Strecken sind dabei nach ihren Charakteristika (zum Beispiel: Trassierung, Anzahl der Gleise, Modellfahrzeugtyp und gefahrene Zugkilometer) und ihrer Lage im Schienennetz erfasst.

Für den **Analysezustand 2010** wurden insgesamt 12.160 Knoten und 13.125 Strecken, für den **Prognosezustand 2030** insgesamt 12.763 Knoten und 13.891 Strecken eingelesen.

Die aus dem Schienennetz und der Visum-Datenbank gewonnenen Daten waren sowohl für den Projektpartner TU Berlin für die Berechnungen des Rollmaterials als auch den Projektpartner TU Dresden für ihre Berechnungen der Infrastrukturkosten notwendig.

Des Weiteren hat die PTV AG Höhenprofile als weiteres Netzattribut in dem Visum Schienennetz hinterlegt, da diese für Berechnungen der Infrastrukturkosten eine Rolle spielen.

Das Visum Schienenmodell kann nach den unterschiedlichen integrierten Netzattributen grafisch, aber auch tabellarisch gefiltert werden.

1.4 **Arbeitspaket 2: Rollmaterial**

Im **Arbeitspaket 2** wurde für die Analysesituation 2010 und das Prognosejahr 2030 das Rollmaterial für den zusätzlichen elektrifizierten Betrieb ermittelt. Dabei wurde berücksichtigt, dass Elektrotriebfahrzeuge geringere Instandhaltungskosten und -zeiten als Dieselfahrzeuge ausweisen. Dies bedeutet, dass auch die Werkstattreserve signifikant kleiner geplant werden kann. Ebenso geht in die Berechnungen die rekuperierte Nutzenergie bei Elektrotriebfahrzeugen ein. Die Anschaffungskosten und die Betriebskosten werden auf Jahresbasis (Annuitäten) dargestellt, um Kompatibilität mit den Annuitäten der Investitionskosten für die Infrastruktur und mit den jährlichen Zeiträumen der CO₂-Berechnung zu ermöglichen. Darüber hinaus wurde mit Hilfe von Statistiken und eigenen Untersuchungen der Verbrauch an Endenergie für die Komplettelektrifizierung per annum berechnet. Dabei wurden Dieseltraktionen unter Fahrdraht berücksichtigt, da etwa 30 % der Zugkilometer in Deutschland mit Diesel gefahren werden.

1.5 **Arbeitspaket 3: Infrastruktur**

In **Arbeitspaket 3** wurden nach umfangreicher Klassifizierung von Anlagenteilen normierte Kostensätze je Anlagenteil (z.B. Strommast, Hochspannungsleitung) ermittelt. Diese wurden auch nach Konfiguration der Strecken (eingleisig, mehrgleisig, Höhenlage) etc. differenziert und separat für Ingenieurbauwerke ermittelt. Damit konnten die Gesamtkosten für die gemäß Datenbank zu elektrifizierenden Netzteile in den Jahren 2010 und 2030 ermittelt werden. Zusätzlich wurden laufende jährliche Kosten für den Betrieb der Elektrifizierungsinfrastruktur (Instandhaltung von Fahrleitungs- und Bahnstromanlagen, Kosten für den Netzbetrieb etc.) ermittelt und die Investitionskosten annuisiert.

1.6 **Arbeitspaket 4: Kostenanalyse**

In **Arbeitspaket 4** wurde die Berechnung der Vermeidungskosten der Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes durchgeführt. Aufbauend auf der Datenbank des Schienennetzes wurden die Verkehrs- und Transportleistungen nach Zuggattungen und Streckentypen ermittelt, die die Ausgangswerte für die Berechnung des Endenergieverbrauchs und der CO₂-Emissionen gemäß der Methodik des Bewertungsverfahrens zur Bundesverkehrswegeplanung darstellen. Die genannte Methodik wurde inklusive der Betriebskostenrechnung implementiert und für die beiden Referenzjahre inklusive der beiden Betrachtungsfälle (Basisfall/Planfall) durchgerechnet. Da die Kostensätze für die CO₂-Emissionen in der BVWP-Methodik vorgegeben sind, können die (normierten) Vermeidungskosten nach Abschluss der Plausibilisierungsarbeiten rasch angegeben werden.

2 Netzaufbereitung und Maßnahmenstrecken

Nach der Bereitstellung des Schienennetzes der Verflechtungsprognose 2030 des BVWP konnte die PTV AG ein digitales Schienennetz mit der Software PTV Visum¹ modellieren. Dieses Schienennetz beinhaltet sowohl Daten zu dem Analysezustand 2010 als auch zu dem Prognosezustand 2030, so dass Strecken identifiziert werden können, die im Rahmen des BVWP 2030 zur Elektrifizierung vorgesehen sind. Des Weiteren können die Belastungsveränderungen in den Zügen zwischen 2010 und 2030 ermittelt werden, die für die Auslegung der Elektrifizierungsinfrastruktur benötigt wurden.

Das Planungssystem Visum wurde sowohl als Datenbank als auch als GIS-System für die Visualisierung der Schienennetze eingesetzt.

Bei der Übernahme der bereitgestellten Netzdaten wurden diese auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. Die „Haltestellen“ wurden im Netz als Knotenpunkte übernommen (X, Y-Koordinaten im Gauss-Krüger-Format), die „Eisenbahnstrecken“ als Strecken zwischen diesen Knoten gesetzt.

Weitere wichtige Attribute in den Netzen sind:

- Länge der Strecke (in km),
- Anzahl der Züge (pro Tag),
- Unterscheidung nach Traktionsart (Elektro- oder Dieseltraktion),
- Anzahl der Gleise (eingleisig oder mehrgleisig),
- verschiedene Geschwindigkeitsklassen (konventionelle Strecke, Neubau- oder Ausbaustrecke).

Als zusätzliches Attribut wurde die Höhenlage in das Netz integriert. Als Grundlage diente hier das Europäische Straßennetz, dem Höhenangaben algorithmisch übertragen und georeferenziert wurden. Notwendig war die Integration vor allem für die Berechnung der Infrastrukturkosten. Nach diesen umfangreichen Vorarbeiten können alle Netzattribute in Visum sowohl grafisch (mit Hilfe einer Filterfunktion) oder tabellarisch angezeigt werden, um einen schnellen und anschaulichen Überblick über die verschiedenen Netzattribute zu erhalten. Berücksichtigt wurden beide Netzzustände mit ihren jeweiligen Betrachtungsfällen (Basisfall/Planfall 2010 & Basisfall/Planfall 2030).

Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse der Anwendungen verschiedener Filter gezeigt.

Die Abbildung 3 zeigt das europäische Schienennetz (mit allen Strecken und Knoten), das in Visum erstellt wurde.

¹ Mit PTV Visum können Verkehrsanalysen, Verkehrsprognosen und eine GIS-orientierte Datenverwaltung durchgeführt werden. Die Software bildet alle Verkehrsteilnehmer und ihre Interaktion konsistent ab und kann für die Modellierung von Verkehrsnetzen und der Verkehrsnachfrage sowie zur Entwicklung von anspruchsvollen Verkehrsstrategien und -lösungen eingesetzt werden.

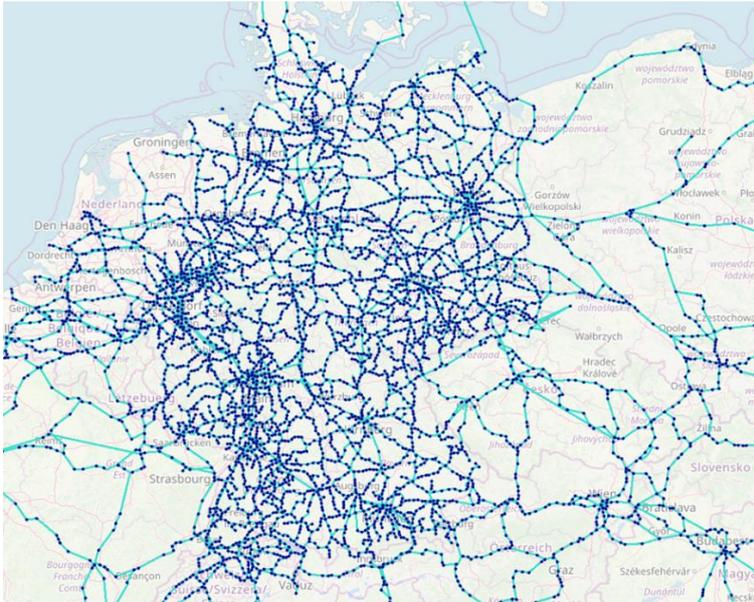


Abbildung 3: Überblick über das in der Verflechtungsprognose 2030 enthaltene europäische Schienennetz

Da die Studie das Elektrifizierungspotential für das deutsche Schienennetz untersucht, findet eine entsprechende territoriale Beschränkung statt.



Abbildung 4: Überblick über das deutsche Schienennetz

Ein weiteres Netzattribut ist die „Traktion“, die angibt, ob der jeweilige Streckenabschnitt elektrifiziert ist oder unter Dieseltraktion läuft.



Abbildung 5: Traktion der Streckenabschnitte

Das Netzattribut "Anzahl der Gleise" gibt an, wieviel Gleise (1, 2 oder 3) je Streckenabschnitt verfügbar sind.



Abbildung 6: Anzahl der Gleise

Die geclusterten Höhenlagen können auf den einzelnen Strecken unterschiedlich farblich in Visum illustriert werden.

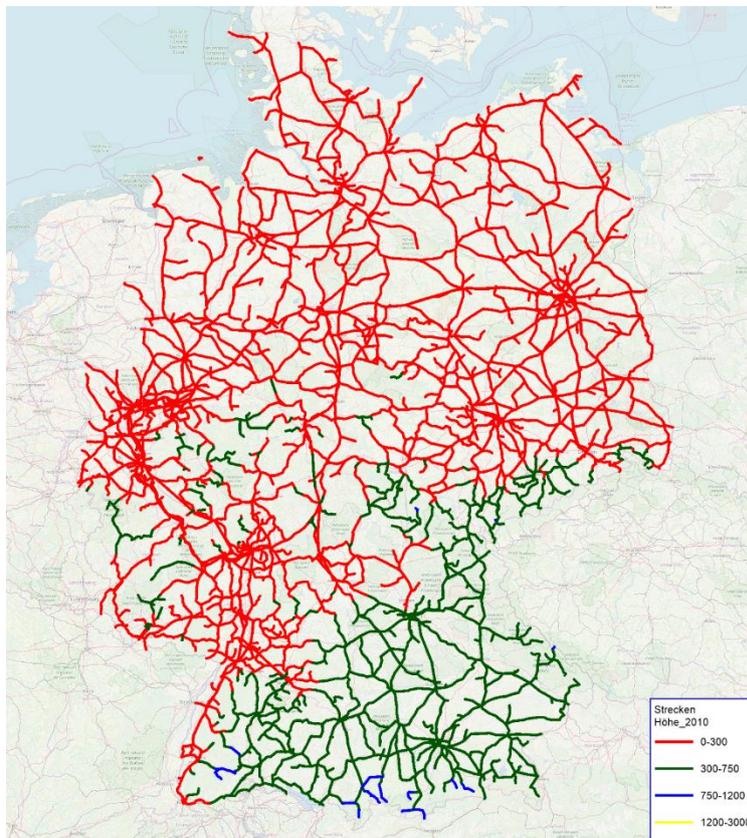


Abbildung 7: Geclusterte Höhenlagen

3 Rollmaterial

3.1 Analyse der Ausgangslage 2010

3.1.1 Fahrzeugbestand

Für das weitere Vorgehen wird zunächst der Fahrzeugbestand im Analysejahr (2010) betrachtet. In Hinblick auf die Traktionsart sind nicht angetriebene Wagen für die vergleichende Betrachtung in den Netzzuständen 2010 und 2030 nicht von Bedeutung. Es werden im Folgenden daher nur Triebfahrzeuge betrachtet. Bei der Betrachtung der Triebfahrzeuge kann in drei wesentliche Verkehrsarten unterschieden werden: Der Schienengüterverkehr (SGV), der Schienenpersonenfernverkehr (SPFV) und der Schienenpersonennahverkehr (SPNV).

3.1.1.1 Schienenpersonenfernverkehr

Im Personenfernverkehr besitzt die DB einen Anteil von über 99 %² am Rollmaterial. Daher wird für die Betrachtung der eingesetzten Fahrzeugarten auf die Zahlen der DB-Fahrzeuge des Fernverkehrs zurückgegriffen³.

DB Bahn Fernverkehr 2010	
Elektrische Lokomotiven	232
Diesel-Lokomotiven	49
Lokomotiven gesamt	281
Elektrische Triebzüge	233
Diesel-Triebzüge	19
Triebzüge gesamt	252

Tabelle 1: Bestandszahlen SPFV

Die Dieseltriebwagen erbrachten nur einen Anteil 0,3 % an den durch Triebzüge im SPFV erbrachten Zugkilometern⁴. Die ICE TD Triebwagen waren demnach nicht in relevanter Größenordnung im Einsatz, es ist daher nicht aussagekräftig dort den gesamten Fahrzeugbestand für das Referenzjahr 2010 für einen Vergleich zwischen Elektro und Dieseltraktion zu betrachten.

² mofair e.V. & Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V., „Wettbewerber-Report Eisenbahn 2015/2016“, 2015.

³ Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011“, Berlin, 2012.

⁴ PTV Planung Transport Verkehr AG, „Datengrundlage: Streckennetz und Anzahl der Züge zwischen den Knoten“, Karlsruhe.

3.1.1.2 Schienenpersonennahverkehr

Im Personennahverkehr werden sowohl Lokomotiven-bespannte Reisezüge als auch Triebwagenzüge eingesetzt.

Die für die weiteren Berechnungen zugrunde gelegten Triebfahrzeuganzahlen im SPNV sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Zusammenstellung basiert auf Zahlen der DB^{5,6}, des VDV⁷ sowie auf Berechnungen von Fahrzeuganzahlen der NE-Bahnen (Nichtbundeseigene Bahnen) auf Grundlage des erbrachten Anteils an der Gesamtverkehrsleistung⁸.

SPNV 2010	DB	NE	Gesamt
Elektrische Lokomotiven	1088	117	1205
Diesel-Lokomotiven	191	21	212
Lokomotiven gesamt	1279	138	1417
Elektrische Triebzüge	1946	666	2612
Diesel-Triebzüge	1490	510	2000
Triebzüge gesamt	3436	1176	4612
Triebfahrzeuge gesamt	4715	1314	6029

Tabelle 2: Bestandszahlen SPNV

Da im weiteren Verlauf der Untersuchung betrachtet werden soll, welchen Effekt die Umstellung der kompletten Flotte auf Elektrotraktion bewirkt, ist die Zusammensetzung der Dieselflotte von genauerem Interesse. Die Dieseltriebzüge sind typischerweise von geringerer Länge, da diese hauptsächlich auf nichtelektrifizierten Nebenstrecken eingesetzt werden. In folgender Abbildung ist die Verteilung des DB-Triebfahrzeugbestandes nach der Anzahl der Einzelwageneinheiten der Triebzüge dargestellt. Die Auswertung basiert auf dem Stationierungsverzeichnis der DB-Lokomotiven und Triebwagen für das Jahr 2010⁹. Von den 1490 Dieseltriebzügen der DB wurde im Jahr 2010 eine Anzahl von 1425 Triebzügen eingesetzt. Die anderen Züge wurden von der Ausbesserung zurückgestellt oder zur Ausmusterung abgestellt.

⁵ Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011,“ Berlin, 2012.

⁶ „Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2011,“ Elektrische Bahnen, 2011 Heft 1-2.

⁷ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2010,“ Köln, 2011.

⁸ mofair e.V. & Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V., „Wettbewerber-Report Eisenbahn 2015/2016,“ 2015.

⁹ Eisenbahn-Kurier-Aspekte 30, DB-Triebfahrzeuge 2010, Freiburg, 2010.

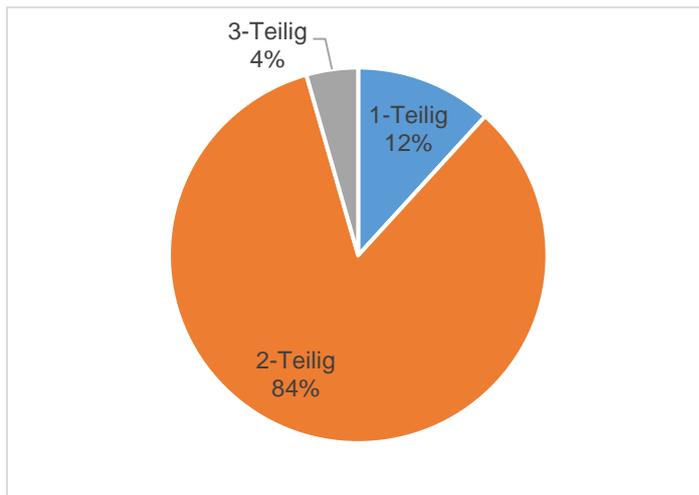


Abbildung 8: n-Teiligkeit der Dieseltriebzüge der DB

Es ist ersichtlich, dass der überwiegende Anteil der Triebzüge zweiteilig ist. Rund ein Zehntel ist eingliedrig und nur ein sehr kleiner Teil ist 3-teilig oder mehr als 3-teilig ausgeführt. Ein geringer Anteil der 3-teiligen Triebzüge wird durch Ergänzung eines Mittelwagens 4-teilig betrieben. Da jedoch darüber keine exakten Zahlen vorliegen und der Anteil der 3-teiligen Triebzüge ohnehin nur einen geringen Anteil an der Dieseltriebzugflotte besitzt, werden für die Betrachtungen vereinfacht diese Triebzüge den 3-Teiligen zugerechnet.

3.1.1.3 Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr kann der Fahrzeugbestand für 2010 der VDV Jahresstatistik 2010 entnommen werden. In folgender Tabelle ist der Bestand der Lokomotiven, unterteilt in E- und Diesel-Loks, jeweils insgesamt und bei den NE-Bahnen, dargestellt.

SGV	Öffentliche Bahnen	NE-Bahnen
E-Lokomotive	1396	92
Davon NE	198	92
Diesellokomotive	1400	205
Davon NE	654	205

Tabelle 3: Bestandszahlen SGV 2010

3.1.2 Fahrleistung nach Diesel- und Elektrotraktion

3.1.2.1 Schienenpersonenfernverkehr

Nach den Zahlen der PTV erfolgt ca. 1 % der Fahrleistung in Zugkilometern des Schienenpersonenfernverkehrs auf nicht elektrifizierten Strecken. Im Schienenpersonenfernverkehr

wurden 2010 98 % der Verkehrsleistung mit Elektrotraktion gefahren¹⁰. Der Anteil an Dieseltraktion ist somit sehr gering und die Hälfte der mit Diesel gefahrenen Strecke erfolgt unter Fahrdracht auf elektrifizierten Strecken.

3.1.2.2 Schienenpersonennahverkehr

Nach den zur Verfügung gestellten Daten der PTV erfolgen knapp 31 % der Zugkilometer im Schienenpersonennahverkehr auf Diesel Strecken. Nach aktuellen Zahlen des Jahres 2016 erfolgen 36 % der Zugkilometer mit Dieseltraktion im Schienenpersonennahverkehr¹¹. Dies bedeutet, dass rund 15 % der Zugkilometer der Dieselfahrzeuge auf elektrifizierten Strecken erfolgen. Nach einer Schätzung der SCI Verkehr GmbH aus dem Jahr 2012 erfolgen rund ein Drittel der Zugkilometer im SPNV mit Dieseltraktion¹².

Dieser Wert liegt in derselben Größenordnung wie die Auswertung aus dem Jahr 2016.

3.1.2.3 Schienengüterverkehr

Im Bezugsjahr 2012 wurden 7.696 Mio. tkm mit Dieseltraktion und 102.369 Mio. tkm mit Elektrotraktion zurückgelegt. Bezogen auf die Tonnenkilometer wird somit im Schienengüterverkehr etwa 7 % der Verkehrsleistung mit Dieseltraktion erbracht. Der Gesamtenergieverbrauch des Schienengüterverkehrs wird mit 15,5 GJ angegeben, wobei 22 % auf Dieseltraktion (ca. 90 Mio. Liter) und 78 % auf Elektrotraktion (ca. 12,3 PJ) entfallen¹³. Aus den bereitgestellten Daten der PTV¹⁴ (Züge je Streckenabschnitt) ergibt sich, dass 97 % aller Zugkilometer im Schienengüterverkehr auf elektrifizierten Strecken stattfinden. Unter Annahme, dass analog zur Verteilung der Tonnenkilometer in Diesel- und Elektrotraktion auch eine Verteilung der Zugkilometer angenommen werden kann, (das heißt, dass sowohl Züge mit Diesel- als auch Elektrotraktion im Mittel die gleiche Masse je Zug transportieren) bedeutet dies, dass rund 58 % aller Zugfahrten in Dieseltraktion im Schienengüterverkehr unter Fahrdracht erfolgen. Für das Jahr 2010 ließen sich keine exakten Zahlen finden, aus diesem Grund werden die Zahlen des Jahres 2012 herangezogen. Es ist unwahrscheinlich,

¹⁰ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, „Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs,“ 2011. [Online]. Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/?print>. [Zugriff am 07 2017].

¹¹ Bundesarbeitsgemeinschaft der Aufgabenträger des SPNV, Persönliche Auskunft aus einer Erhebung für das Jahr 2016.

¹² M. Leenen, A. Wolf, L. Neumann und A. Herbermann, „Fahrzeugfinanzierung in SPNV - Bewertung der Chancen und Risiken verschiedener Finanzierungslösungen aus Sicht von Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Finanzierungsanbieter im Auftrag der DB Regio AG,“ SCI Verkehr GmbH, Köln, 2012.

¹³ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, „Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs,“ 2011. [Online]. Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/?print>. [Zugriff am 07 2017].

¹⁴ PTV Planung Transport Verkehr AG, „Datengrundlage: Streckennetz und Anzahl der Züge zwischen den Knoten,“ Karlsruhe.

dass sich die Aufteilung der Verkehrsleistung zwischen Diesel- und Elektrotraktion innerhalb dieses kurzen Zeitraumes signifikant verändert hat.

3.1.3 Energieverbrauch

3.1.3.1 Gesamtenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch des Schienenverkehrs setzt sich aus dem Dieselkraftstoffverbrauch und dem Verbrauch der elektrischen Energie zusammen.

3.1.3.1.1 Betrachtung des Verbrauchs von elektrischer Energie

Nach Verkehr in Zahlen beträgt der Verbrauch an elektrischer Energie im Jahr 2010 für den gesamten Schienenverkehr in Deutschland 16,7 TWh¹⁵, dies entspricht 60,12 PJ. Nach Angaben der DB Netz werden 10,3 TWh (=37,2 PJ) als Traktionsenergie benötigt und 1,7 TWh (= 6,2 PJ) stationär verbraucht¹⁶. Die S-Bahnen in Hamburg und Berlin sind bei der Betrachtung mit enthalten. Als Differenz ergibt sich eine Energiemenge von 16,8 PJ, die durch andere Verkehre, welche nicht auf den Strecken der DB-Netz stattfinden, verursacht werden. Exemplarisch sind hier die Energieverbräuche des schienengebundenen Nahverkehrs in Berlin aus dem Jahr 2005 genannt: S-Bahnen: 1.584 TJ (bereits in der Betrachtung enthalten); Tram: 300 TJ; U-Bahn: 997 TJ¹⁷.

3.1.3.1.2 Verbrauch von Dieselkraftstoff

Für den Dieselkraftstoffverbrauch liegen keine Zahlen getrennt nach Zugverkehrsarten vor. Im Jahr 2010 wurden laut Verkehr in Zahlen¹⁸ 340.000 t Dieselkraftstoff verbraucht. Dies entspricht einer Energiemenge von 14,45 PJ (42,5 MJ/kg). Nach den Zahlen der DB Netz AG wurden jedoch 480,8 Mio. Liter umgesetzt¹⁹. Dies entspricht rund 17 PJ. (bei einer Dichte von 0,82 bis 0,86 kg/l zwischen 394.000 und 413.000 t beziehungsweise 16,7 bis 17,6 PJ.)

Da der Wert von 340.000 t direkt den in Deutschland angefallenen Verbrauch angibt, wird dieser Wert für die weiteren Berechnungen angenommen.

¹⁵ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verkehr in Zahlen 2014/2015,“ DVV Media Group GmbH, Hamburg, 2014.

¹⁶ Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011,“ Berlin, 2012.

¹⁷ „Verkehr in Berlin: Ausgabe 70-2008-09-18“.

¹⁸ Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verkehr in Zahlen 2014/2015,“ DVV Media Group GmbH, Hamburg, 2014.

¹⁹ Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011,“ Berlin, 2012.

3.1.3.2 Aufteilung des Energieverbrauchs nach Sparten

3.1.3.2.1 Elektrische Energie

Die Anteile der einzelnen Sparten am Gesamtverbrauch der elektrischen Traktionsenergie ist in folgender Abbildung dargestellt²⁰.

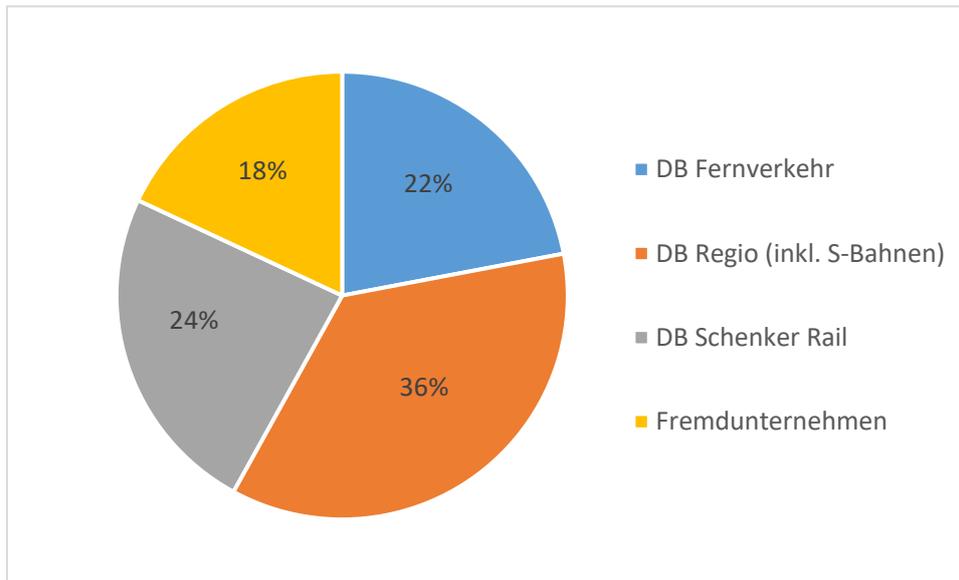


Abbildung 9: Aufteilung des elektrischen Energieverbrauchs im DB Netz 2010

Der Gesamtverbrauch der elektrischen Energie im Jahr 2014 ist mit 9,9 TWh²¹ etwas geringer als im Jahr 2010 mit 10,3 TWh²². Da derzeit keine genaueren Quellen für das Jahr 2010 vorliegen, wird für die nachfolgende Berechnung die Aufteilung aus dem Jahr 2014 auf die einzelnen Sparten auch für das Jahr 2010 angenommen.

In nachfolgender Tabelle sind die Energieverbräuche nach Sparten für die DB und NE-Bahnen dargestellt. Die Energieverbräuche der DB wurden unter Beibehaltung der prozentualen Aufteilung ermittelt. Für den SGV ist der Gesamtenergieverbrauch bekannt (Abschnitt 3.1.2.3). Somit können die übrigen Energieanteile berechnet werden.

²⁰ S. Großmann und U. Behmann, „Bahnenergiemessung und -rückspeisung bei den DB-Verkehrsunternehmen,“ Elektrische Bahnen, 2014 Heft 4.

²¹ S. Großmann und U. Behmann, „Bahnenergiemessung und -rückspeisung bei den DB-Verkehrsunternehmen,“ Elektrische Bahnen, 2014 Heft 4.

²² Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011,“ Berlin, 2012.

	Elektrischer Energieverbrauch [PJ]		
	DB	NE	Gesamt
SPFV	8,2	-	8,2
SPNV	13,4	3,3	16,7
SGV	8,9	3,4	12,3
Gesamt	30,5	6,7	37,2

Tabelle 4: Elektrischer Energieverbrauch nach Sparte

Im Schienenpersonennahverkehr wird rund 20 % der elektrischen Traktionsenergie durch die NE-Bahnen verbraucht. Im Jahr 2010 wurden 21,8 % der Betriebsleistung durch die NE-Bahnen im SPNV erbracht. Im Schienengüterverkehr wurde 28 % der elektrischen Traktionsenergie durch NE-Bahnen genutzt. Auch dies liegt in der Größenordnung des Marktanteils der NE-Bahnen im Güterverkehr im Jahr 2010 von ca. 25 % (bezogen auf die tkm)²³.

3.1.3.2.2 Diesel

In folgender Tabelle wird der statistische Dieselennergieverbrauch für das Jahr 2010 nach Sparten dargestellt. Die Darstellung basiert auf Angaben zum Gesamtdieselerverbrauch des Schienenverkehrs in Deutschland²⁴, Angaben zum Dieselerverbrauch des SGV, Angaben zur Verkehrsleistung des SPNV²⁵ und einer Abschätzung der Verbräuche der Rangierleistungen auf Basis des Dieselerverbrauch für Rangiertätigkeiten in Sachsen²⁶ und des Güterumschlags in Deutschland im Jahr 2010²⁷.

	Gesamt-Dieselennergieverbrauch [PJ]
SPFV	0,5
SPNV	9,3
SGV	3,1
Rangierleistung SGV	1,6
Gesamt	14,5

Tabelle 5: Dieselennergieverbrauch nach Sparte

Der ermittelte Gesamtdieselennergieverbrauch des Schienenpersonenverkehrs liegt somit im Jahr 2010 bei 9,8 PJ. Als Referenz zu diesem Wert ist der Dieselerverbrauch aus dem

²³ mofair e.V. & Netzwerk Europäischer Eisenbahnen e.V.: „Wettbewerber-Report Eisenbahn 2015/2016“, 2015.

²⁴ Deutsche Bahn AG, DB MOBILITY LOGISTICS AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011“, Berlin, 2012.

²⁵ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, „Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs“, 2011. [Online]: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servelet/is/342234/?print>. [Zugriff am 07 2017].

²⁶ Sachsen - Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, „Emission des Schienenverkehrs in Sachsen“, Bd. Heft 2/2012, 2012.

²⁷ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2010“, Köln, 2011.

Jahr 2006 bekannt²⁸. Dieser ist mit 289 Mio. Liter angegeben, was einer Energiemenge von 10 PJ entspricht. Die angegebenen Energiebedarfe erscheinen somit plausibel.

3.1.3.3 Rückspeisequoten

Moderne Elektrotriebfahrzeuge besitzen die Fähigkeit der Rekuperationsbremsung. Dabei wird der Fahrmotor als Generator genutzt und bei der Bremsung die kinetische Energie des Fahrzeuges in elektrische Energie umgewandelt. Diese lässt sich über die Oberleitung zurück in das Bahnstromnetz speisen. Dieseltriebfahrzeuge und ältere Elektrotriebfahrzeuge besitzen diese Eigenschaft nicht. Die Energie, die bei der Bremsung umgesetzt wird, ist dann nicht weiter nutzbar. Durch die Fähigkeit der Rekuperation kann der Nettoenergieverbrauch gesenkt werden. Bei der Betrachtung des Nettoenergieverbrauchs der Elektrotriebfahrzeuge muss demzufolge berücksichtigt werden, welcher Anteil der Flotte rückspeisefähig ist. Das Ziel sollte sein, dass der gesamte elektrische Triebfahrzeugbestand rückspeisefähig ist. In folgender Tabelle sind die Rückspeisequoten und der Anteil der rückspeisefähigen Fahrzeuge für die Jahre 2010 bis 2014 bei der Deutschen Bahn dargestellt²⁹.

	Fernverkehr		Regio		Schenker	
	Fahrzeuge rückspeisefähig [%]	Rückspeisequote [%]	Fahrzeuge rückspeisefähig [%]	Rückspeisequote [%]	Fahrzeuge rückspeisefähig [%]	Rückspeisequote [%]
2010	92,6	10,2	57,6	10,4	63,1	5,1
2011	93,0	10,4	60,0	11,5	63,3	5,0
2012	93,2	10,7	62,7	12,7	67,6	5,4
2013	93,6	10,8	65,3	14,0	71,3	5,7
2014	94,4	11,3	67,8	16,3	72,4	6,2

Tabelle 6: Rückspeisequoten und Anteil der rückspeisefähigen Fahrzeuge der DB

3.2 Planfälle zur Ermittlung des Einflusses einer Komplett-elektrifizierung

Zunächst wird für das Jahr 2010 und das Jahr 2030 ein Referenzzustand ermittelt. Für diese werden die Fahrzeugbeschaffungs-, Instandhaltungs- und Energiekosten für die mit Dieseltraktion erbrachte Fahrleistung ermittelt. Anschließend wird für diese beiden Betrachtungszeiträume jeweils ein Planzustand im Falle einer Komplettelektrifizierung des Streckennetzes ermittelt. Die Betrachtungen beschränken sich dabei auf die zuvor durch Dieseltraktion erbrachten Fahrleistungen.

²⁸ Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2006,“ Köln, 2007.

²⁹ Behmann, „Traktionsenergiebilanz mit Energierückspeisung im DB-Netz im Jahr 2014“, Elektrische Bahnen 2015 Heft 10.

	Diesel- zu Elektro	Rückspeisefähigkeit der E-Triebfahrzeuge
1 Basisfall 2010	Basisfall nach Datenlage	Basisfall nach Datenlage
2 Planfall 2010	100 % Elektrotraktion Dieseltriebfahrzeuge werden durch E-Triebfahrzeuge ersetzt	„Neu zu beschaffende“ Triebfahrzeuge 100 % rückspeisefähig,
3 Basisfall 2030	Prognose Fahrleistung Diesel-Triebfahrzeuge ausgehend von PTV Daten	Triebfahrzeuge 100 % rückspeisefähig
4 Planfall 2030	100 % Elektrotraktion	Triebfahrzeuge 100 % rückspeisefähig

Tabelle 7: Übersicht der betrachteten Netzzustände

Bei den Planfällen wird zunächst davon ausgegangen, dass die durch Dieseltraktion erbrachte Leistung 1:1 durch Elektrotraktion erbracht wird. Es findet somit keine Anpassung in den geleisteten Zugkilometern, der Art (Triebwagenzug, Lok bespannter Zug) und Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge statt. Da es sich jedoch um neu einzusetzende Fahrzeuge handelt, wird für diese der aktuelle Stand der Technik angenommen.

3.2.1 Vergleich der Kostenparameter Diesel - Elektro

Um die Beschaffungskosten und Instandhaltungskosten der Triebfahrzeuge für die verschiedenen Netzzustände bewerten zu können, müssen einheitliche Kostensätze für die Netzzustände angenommen werden. Bei der Betrachtung interessieren vor allem die relativen Kostenunterschiede zwischen den Netzzuständen. Die Kostenunterschiede werden durch die Umstellung der Dieseltriebfahrzeugflotte auf Elektrotriebwagen verursacht. Bei dem Vergleich der Kostenparameter muss somit die jeweilige Bestandsflotte der Elektrotriebfahrzeugflotte in dem jeweiligen Basisfall nicht näher betrachtet werden, da diese für den zugehörigen Planfall unverändert fortbesteht. Zur Aufstellung der Kosten müssen die Beschaffungskosten und Instandhaltungskosten der verwendeten Dieseltriebfahrzeuge und die Kosten äquivalenter Elektrotriebfahrzeuge betrachtet werden.

3.2.1.1 Energiekosten

Der Dieselpreis je Liter lag im Jahr 2010 im Durchschnitt bei 97,17 €/100l bei Abgabe an Großverbraucher³⁰. 47,04 €/100l entfallen davon auf die Energiesteuer. Die übrigen 50,08 €/100l entfallen auf den Rohöleinstandspreis und sonstige Preiskomponenten wie zum Beispiel den Raffinerieprozess. Der Dieselpreis ist direkt von dem Rohölpreis abhängig. Der Rohölpreis des OPEC-Korbs betrug im Jahr 2010 55 US \$/bbl. Für das Jahr 2030 wird ein Wert von 75 US \$/bbl prognostiziert (ohne Beachtung einer Inflationsrate). Dies

³⁰ Statistisches Bundesamt, „Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Juni 2017 -“, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.

entspricht einer Preissteigerung von 36 %. Unter der Annahme einer konstanten Energiesteuer ergibt sich ein Dieselpreis für das Jahr 2030 von 115,33 €/100l³¹. Zu beachten ist hierbei, dass die Schätzungen bezüglich der Preissteigerungen nach BMWi Studie je nach Grundlage Rohölpreis und Dieselpreis Verkehr zwischen 14 % und 37 % stark schwanken, was leichte Änderungen bei den Energiepreisen für den Planfall des Netzzustandes 2030 zur Folge haben kann.

Der Preis für den Energiebezug aus dem Bahnstromnetz ist tageszeitabhängig. Im Jahr 2010 waren drei Tarifbereiche definiert: Hochtarif (5:30 – 9:00 & 16:00 – 19:00 Uhr), Mitteltarif (9:00 – 16:00 & 19:00 – 22:00 Uhr) und Niedertarif (22:00 – 5:30 Uhr). In folgender Tabelle sind die jeweiligen Bezugspreise und die Vergütung für Rückspeisung für das Jahr 2010 zusammengefasst.^{32, 33}

	Hochtarif	Mitteltarif	Niedertarif
Bezugspreis [ct/kWh]	12,44	10,69	9,44
Vergütung für rückgespeisten Bahnstrom [ct/kWh]	5,50	5,0	4,35

Tabelle 8: Bezugspreis und Rückspeisevergütung des Bahnstroms (2010)

Ab dem Jahr 2013 wird nur noch in zwei Tarife, Hochtarif und Niedertarif, unterschieden. Die Preisanpassung soll kostenneutral für die DB Energie stattgefunden haben. Die Preisentwicklung von 2005 bis 2014 ist in folgender Abbildung dargestellt.

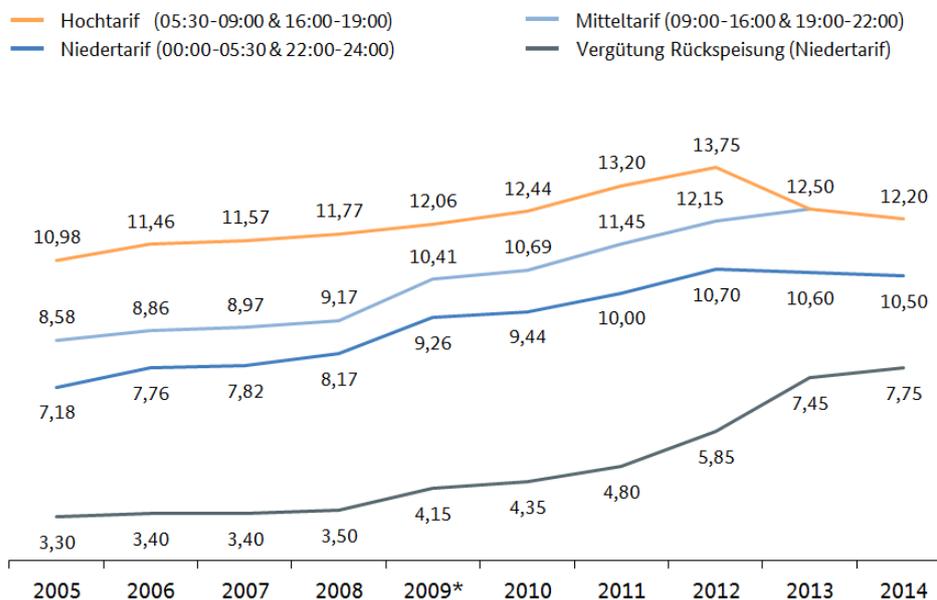
³¹ Der angenommene Dieselpreis ist mit Energiesteuer und ohne MwSt. versehen. Er weicht deshalb von dem im Methodenhandbuch des Bundesverkehrswegeplan angegebenen Dieselpreis von 0,74 (€/l) ab.

³² Bundesnetzagentur, „Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2013,“ Bonn, 2014.

³³ „Wie die Deutsche Bahn Wettbewerber beim Bahnstrom diskriminiert!“, mofair e.V., Netzwerk Privatbahnen-Vereinigung Europäischer Eisenbahngüterverkehrsunternehmen e.V., 2010.

Entwicklung der Bahnstrompreise (Vollversorgung)

von 2005 bis 2014; in Cent je kWh



* Preise nach Absenkung im März 2009 (vorher: 12,11 ct (HT), 10,46 ct (MT), 10,01 ct (NT))

Quelle: DB AG

Abbildung 10: Entwicklung des Bahnstrompreises³⁴

Für eine Berechnung bietet es sich an, einen gemittelten Bahnstrompreis zu nutzen. In folgender Tabelle sind die Anteile am bezogenen Hoch- und Niedertarif, basierend auf einer Schätzung der DB Energie GmbH, dargestellt. Ein Mitteltarif ist in dieser Schätzung nicht mehr enthalten.

	SPFV	SPNV	SGV
Anteil Hochtarif [%]	90	90	60
Anteil Niedertarif [%]	10	10	40

Tabelle 9: Anteil des genutzten Tarifs nach Sparte³⁵

Auf dieser Grundlage werden zunächst der Mitteltarif und der Hochtarif zu einem Ersatz-Hoch-Mittel-Tarif verrechnet. Analog zu der Preisumstellung 2012 wird der Hochtarif mit einem Einfluss von 22 % und der Mitteltarif mit einem Einfluss von 78 % auf den Mittelwert berücksichtigt. Für den Bezugspreis ergibt sich ein Preis von 11,07 ct/kWh, für die Vergütung des rückgespeisten Bahnstroms ergeben sich 5,11 ct/kWh.

³⁴ Bundesnetzagentur, „Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2013,“ Bonn, 2014.

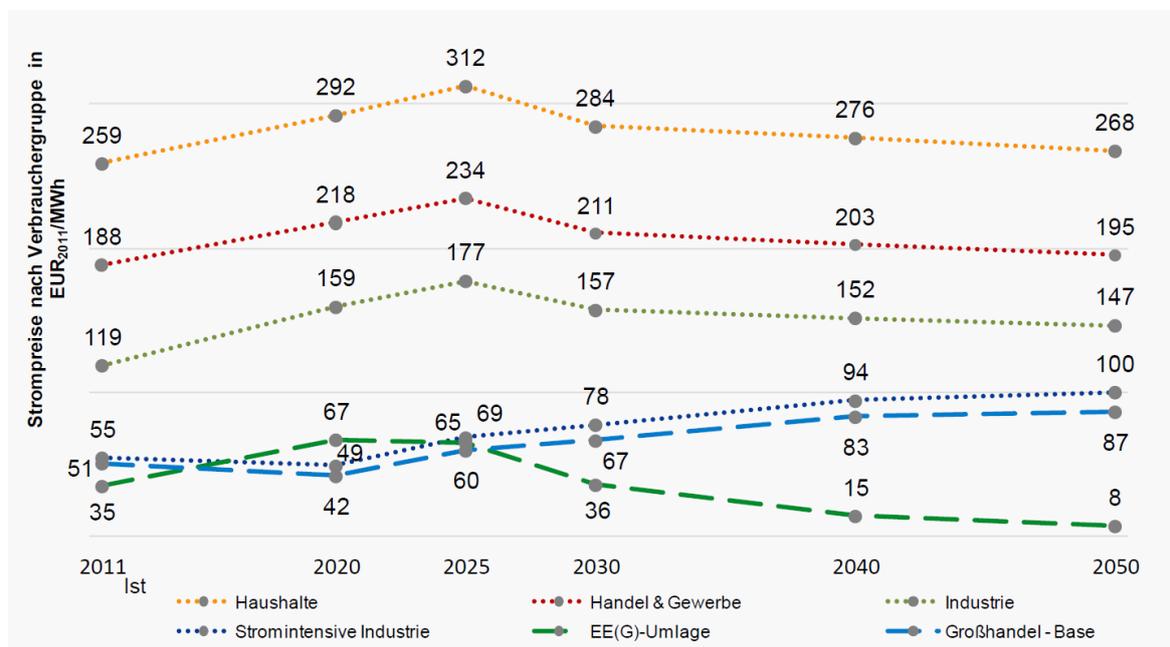
³⁵ Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

Ausgehend von den angesetzten Tarifen an der jeweiligen Verkehrsart wird ein gemittelter Bezugs- und Rückspeisepreis je Verkehrsart gebildet, dieser ist wie in Tabelle 10 zusammengefasst.

	SPFV	SPNV	SGV
Bezugspreis [ct/kWh]	10,91	10,91	10,42
Vergütung für rückgespeisten Bahnstrom [ct/kWh]	5,03	5,03	4,81

Tabelle 10: Gemittelter Bezugspreis und Rückspeisevergütung je Sparte (2010)

Schätzungen gehen von einer Steigerung des Großhandelspreises von im Jahr 2011 51 €/MWh auf 67 €/MWh im Jahr 2030 aus.³⁶ In Abbildung 11 sind die prognostizierten Strompreise für die Jahre 2011 bis 2050 enthalten.



Quelle Prognos/EWI/GWS 2014

Abbildung 11: Verbraucherpreise in Referenzprognose und Trendszenario 2011–2050³⁷

Dies bedeutet eine Steigerung um 16 Cent des Grundhandelspreises. Für eine erste Schätzung werden die weiteren Kostenparameter konstant gehalten, somit steigt der Strompreis für den Hoch als auch den Niedertarif um 16 Cent. Die Rückspeisevergütung lag bereits im Jahr 2014 bei ca. 74 %. Für das Jahr 2030 wird eine Rückspeisevergütung von 80 % bezogen auf den jeweiligen Bezugspreis angenommen. Die angesetzten Strompreise sind in Tabelle 11 enthalten.

³⁶ „Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose,“ Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.

³⁷ „Entwicklung der Energiemärkte – Energierferenzprognose,“ Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.

	SPFV	SPNV	SGV
Bezugspreis [ct/kWh]	11,07	11,07	10,58
Vergütung für rückgespeisten Bahnstrom [ct/kWh]	8,86	8,86	8,46

Tabelle 11: Gemittelter Bezugspreis und Rückspeisevergütung je Sparte (2030)

3.2.1.2 Spezifische Energieverbräuche

3.2.1.2.1 Schienenpersonenfernverkehr

Für den SPFV sind für das Jahr 2010 sowohl die mit E-Traktion gefahrenen Zugkilometer als auch die benötigte Energie bekannt. Daraus lässt sich eine mittlere spezifische Energie je Zugkilometer für alle SPFV Triebfahrzeuge ermitteln. Als Ausgangspunkt wird die Bruttoenergiemenge genutzt, da bei der Rückspeisequote erhebliche Unterschiede zwischen Triebwagenzügen und lokbespannten Zügen vorhanden sind.

Referenzwerte 2010 elektrische Traktion				
Gesamtnetto- bedarf [PJ]	Rückspei- sequote [%]	Bruttobe- darf [PJ]	Fahrleistung [Mio. Zug-km]	Spezifischer Bruttoenergie- bedarf [GJ/Zugkilometer]
8,2	10,2	9,13	133,8	0,0683

Tabelle 12: SPFV - Spezifischer elektrischer Energieverbrauch

Bei einem Ersatz der SPFV Dieseltriebfahrzeugflotte durch E-Triebfahrzeuge ist anzunehmen, dass ähnliche Fahrzeuge zu den bereits vorhandenen eingesetzt werden. Somit lässt sich der ermittelte spezifische Energiebedarf für die Netzzustände anwenden. Zur Ermittlung der Nettoenergiebedarfe werden die Rückspeisequoten auf Grundlage realer Rückspeisequoten wie folgt angenommen: Die Rückspeisequote für einen lokbespannten Zug im Schienenpersonenfernverkehr wird mit 9,3 % angenommen. Dies entspricht der Rückspeisequote der Baureihe 101 im Fernverkehrseinsatz im Jahr 2011 der DB. Für die Rückspeisequote der Triebzüge wird die im Betrieb erbrachte Rückspeisequote der Triebzüge BR 403 und 406 (ICE 3) als Referenz gewählt. Diese entspricht 17,4 % im Jahr 2011. Im Mittel ergibt sich daraus für den gesamten Fuhrpark des SPFV eine Rückspeisequote von 10,2 % zur Berechnung des Bruttoenergiebedarfs.

3.2.1.2.2 Schienenpersonennahverkehr

Für die Modellfahrzeuge des BVWP sind spezifische Energieverbräuche angegeben. Die Aufteilung der Fahrleistung nach Zugkilometern auf die einzelnen Modellfahrzeugzugattungen wird linear zu ihrer Anzahl angenommen und ist wie folgt dargestellt.

Fahrzeugbestand				
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]
1	235	NV 80D	10,62	25
2	1677	NV 130D	75,81	177
3	88	NV 180D	3,98	9
Lok	212	Lok	9,58	22

Tabelle 13: SPNV - Aufteilung der Fahrleistung [Zug km] nach Triebfahrzeug

In Tabelle 14 sind die spezifischen Energieverbräuche der zugrunde gelegten Modellfahrzeugtypen dargestellt.

Modellfahrzeuge Elektro			Modellfahrzeug Diesel		
Bezeichnung E-Triebfahrzeug	Spezifischer Energieverbrauch		Bezeichnung Diesel-Triebfahrzeug	Spezifischer Energieverbrauch	
	[kWh/ km]	[kWh/Fahr- zeug-Stunde]		[kWh/ km]	[kWh/Fahr- zeug-Stunde]
-	-	-	NV 80 D	4,8	86,8
NV 120 E SD	2,3	40	NV 130 D	6,3	115,7
NV 180 E SD	3	55	NV 180 D	7,7	144,6
Lok E + 4 Single- Deck-Wagen	7,7	90	Lok D + 4 Single- Deck-Wagen	16,4	154,2
Lok E + 4 DoSto- Wagen	9,8	115	Lok D + 4 DoSto- Wagen	21,2	192,8

Tabelle 14: SPNV - Spezifischer Energieverbrauch der Modellfahrzeuge

Unter Anwendung dieser spezifischen Energieverbräuche ergibt sich für das Jahr 2010 ein Diesel-Energieverbrauch für den SPNV von 8,0 PJ. Für den Einbezug des sonstigen Energieverbrauchs nach Stunden wurde eine übliche durchschnittliche Geschwindigkeit von 50 km/h für den Regionalbahneinsatz mit Dieseltraktion angesetzt. Beachtet werden muss, dass diese Annahmen von einem Fahrzeugbestand im Jahr 2030 ausgehen. Im Jahr 2010 weist der Fahrzeugbestand eine wesentlich ältere Altersstruktur auf. Für die angesetzten spezifischen Energieverbräuche wurde ein Einsparpotenzial von 15 % bei Lokbespannten Zügen mit Dieseltraktion und ein Einsparpotential von 10 % bei Triebwagenzügen gegenüber den Werten von 2010 angesetzt.³⁸ Die Abweichungen von rund 1,3 PJ lassen sich dadurch erklären. Nach Rückrechnung der Einsparpotenziale ergibt sich mit den angenommenen Fahrleistungen ein Gesamtverbrauch von 9,0 PJ. Dies trifft sehr gut den makroskopisch ermittelten durch Diesel aufgewendeten Energieverbrauch von 9,3 PJ im Jahr 2010. Die angenommenen spezifischen Energieverbrauchswerte und die dazugehörigen Fahrleistungen können somit als ausreichend präzise für die nachfolgenden Skalierungen angenommen werden.

³⁸ Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

3.2.1.2.3 Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr im Jahr 2010 sind sowohl die Transportleistungen in Tonnenkilometern als auch die benötigten Energiemengen bekannt. Ausgehend von dem Energieverbrauch je Tonnenkilometer bei elektrischer Traktion kann nun die benötigte Energie für die bisher durch Dieseltraktion erbrachte Transportleistung erfolgen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass alle „neu“ anzuschaffenden Lokomotiven, die den Anteil der Dieseltraktion übernehmen, als rückspeisefähig angenommen werden. Aus diesem Grund wird bei der Betrachtung der spezifische Bruttoenergiebedarf ermittelt und anschließend die jeweilige Rückspeiserate berücksichtigt.

Referenzwerte 2010 elektrische Traktion				Spezifischer Bruttoenergiebedarf	
Gesamtnetto- bedarf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Bruttobe- darf [PJ]	Fahrleistung [Mio. tkm]	[GJ/Mio. tkm]	[Wh/tkm]
12,3	5,1	13,0	102.369	126,61	35,17

Tabelle 15: SGV - Spezifischer elektrischer Energiebedarf

Die Rückspeisequote der neu zu beschaffenden Loks wird für die Betrachtungsfälle mit 8,8 % angenommen. Dieser Rückspeisewert entspricht den gemittelten Rückspeisequoten der Baureihen 152, 185, 189 unter realen Bedingungen im Betrieb bei DB Schenker Rail Deutschland im Jahr 2011.

3.2.1.3 Nutzungsdauer

Zur Berechnung der jährlichen Kosten muss eine Nutzungsdauer der Triebfahrzeuge festgesetzt werden. Für Diesellokomotiven wird eine Einsatzzeit von 30 Jahren angenommen, für Elektrolokomotiven eine Einsatzzeit von 40 Jahren³⁹. Für einen Elektrotriebwagen werden 30 Jahre und für einen Dieseltriebwagen im Nahverkehr 25 Jahre angesetzt⁴⁰. Für die Modelltriebzüge des BVWP im Fernverkehr wird unabhängig von der Traktionsart von einem Einsatzzeitraum von 30 Jahren ausgegangen. Zur Berechnung der jährlichen Annuität wird gemäß BVWP-Methodik ein Zinssatz von 1,70 % verwendet.

3.2.1.4 Beschaffung

Für die Beschaffungskosten kann auf die Einheitssätze des BVWP bei den Triebzügen und Lokomotiven zurückgegriffen werden. Für im Güter- und Personenfernverkehr eingesetzte Lokomotiven wird zwischen Ein-, Zwei- und Mehrsystemlokomotiven unterschieden. Ein-

³⁹ Bericht des Rechnungshofes, „Triebfahrzeugdisposition und Triebfahrzeugbeschaffungen,“ 2015.

⁴⁰ M. Leenen, A. Wolf, L. Neumann und A. Herbermann, „Fahrzeugfinanzierung im SPNV - Bewertung der Chancen und Risiken verschiedener Finanzierungslösungen aus Sicht von Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Finanzierungsanbieter im Auftrag der DB Regio AG,“ SCI Verkehr GmbH, Köln, 2012.

stromsystem- und Diesel-Lokomotiven werden dabei einheitlich mit einer Investitionssumme von 3,2 Mio. Euro angenommen. Zweistrom-Lokomotiven werden mit 3,5 Mio. Euro und Dreistrom-Lokomotiven mit 3,8 Mio. Euro angenommen⁴¹. Da bei den unterschiedlichen Verkehrsarten teilweise die gleichen Lokomotiven eingesetzt werden können, werden diese Kostensätze auch für die im SPNV eingesetzten Lokomotiven angewandt. Da die SPNV Triebfahrzeuge üblicherweise auf den regional gebundenen Verkehrsnetzen eingesetzt werden, werden diese für die weiteren Betrachtungen als Einstromfahrzeuge angenommen. Um die Flexibilität der Lokomotiven im SGV analog zu den eingesetzten Diesellokomotiven zu erhalten, werden für den SGV Dreistromsystemlokomotiven angenommen. Dieselbe Überlegung greift auch im SPFV, sodass hier ebenfalls Dreistromsystemlokomotiven verwendet werden. Als Referenzfahrzeug für den Triebwagen im SPFV wird der BVWP Modellfahrzeugtyp HGV C, ein Neigetechniktriebwagen mit 390 Sitzplätzen gewählt. Dieser kostet als Dieseltriebwagen 21 Mio. Euro, sein elektrisches Mehrstrom-Pendant 23,1 Mio. Euro.

Die Investitionskosten bei Triebfahrzeugen des Personennahverkehrs hängen stark von deren Größe ab. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1.2 festgestellt, werden bei den Dieseltriebzügen großteils 2-teilige Einheiten eingesetzt. 4-teilige Einheiten und längere werden nicht betrachtet. Zum herstellerneutralen Vergleich der Triebfahrzeuge werden im BVWP Modellfahrzeugtypen definiert. In folgender Tabelle sind die Modellfahrzeuge⁴² für 1- bis 3-teilige Diesel-Triebwagen enthalten.

Bezeichnung	Einzelwagen je Triebwagen	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Fahrzeuglänge [m]
NV 80D	1	80	45	28
NV 130D	2	130	70	41
NV 180D	3	180	95	54

Tabelle 16: Dieseltriebwagen SPNV - Modellfahrzeugtypen

Zusätzlich ist ein Dieseltriebwagen mit Neigetechnik definiert. Da zu diesem jedoch keine äquivalenten Elektrotriebwagen existieren und auch kein Modellfahrzeug als Elektrotriebwagen mit Neigetechnik im BVWP definiert wurde, werden diese nicht näher betrachtet. Etwaige Kostenunterschiede, die sich durch die Neigetechnik ergeben, werden somit nicht betrachtet bzw. als konstant bei der Umstellung von Diesel- zu Elektrotraktion angenommen. Hinzu kommt, dass die Neigetechnik aufgrund einiger technischer Probleme teilweise komplett bzw. für längere Zeiträume bei den entsprechenden Zügen abgestellt wurde.

⁴¹ Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

⁴² Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

Da bei den Planfällen bei dem Ersatz der Dieseltriebwagen durch Elektrotriebwagen äquivalente Triebwagengrößen gewählt werden, sind in der nächsten Tabelle nur 2- und 3-teilige einstöckige Nahverkehrstriebwagen mit Elektrotraktion abgebildet. Ein Elektrotriebwagen bestehend aus nur einer Einheit ist nicht definiert.

Bezeichnung	Einzelwagen je Triebwagen	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Fahrzeuglänge [m]
NV 120E SD	2	120	75	42
NV 180E SD	3	180	105	58

Tabelle 17: Elektrotriebwagen SPNV - Modellfahrzeugtypen

Für den nachfolgenden theoretischen Ersatz der Dieseltriebwagen durch Elektrotriebwagen wird angenommen, dass 1-teilige Dieseltriebwagen durch 2-teilige Elektrotriebwagen ersetzt werden. 2-teilige Dieseltriebwagen werden durch 2-teilige Elektrotriebwagen ersetzt. Analog dazu werden 3-teilige Dieseltriebwagen durch 3-teilige Elektrotriebwagen ersetzt.

In Tabelle 18 sind die Investitionskosten für die betrachteten Modellfahrzeugtypen zusammengefasst.

Dieseltraktion		Elektrotraktion	
Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
NV 80D	2,3	-	-
NV 130D	3,0	NV 120 E SD	3,6
NV 180D	3,7	NV 180 E SD	4,4

Tabelle 18: Modellfahrzeugtypen SPNV - Investitionskosten

3.2.1.5 Instandhaltungskosten

Die durchschnittlichen Instandhaltungskosten je km für die Triebzüge werden aus dem BVWP für das jeweilige Modellfahrzeug übernommen. Für den Dieseltriebzug im SPNV betragen diese 5,00 €/km und für den E-Triebzug 5,50 €/km. In Tabelle 19 sind die Instandhaltungskosten für die Diesel- und Elektrotriebwagen des SPNV zusammengefasst⁴³.

⁴³ Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

Dieseltraktion		Elektrotraktion	
Modellfahr- zeugtyp	Unterhaltungs-/ Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	Modellfahr- zeugtyp	Unterhaltungs-/ Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
NV 80D	0,65	-	-
NV 130D	0,85	NV 120 E SD	0,4
NV 180D	1,05	NV 180 E SD	0,6

Tabelle 19: Modellfahrzeugtypen SPNV – Instandhaltungskosten

Für die Instandhaltungskosten der Lokomotiven liegt als Datengrundlage ein Bericht des österreichischen Rechnungshofes⁴⁴ vor. In diesem erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Kosten für die Instandhaltung und die zugehörigen Laufleistungen der Lokomotiven. In Tabelle 20 ist die Datengrundlage für die Ermittlung der Instandhaltungskosten dargestellt.

	2009	2010	2011	2012	2013	(2014) nur Jan bis Jul
	Anzahl der Streckenloks					
E-Loks	732	715	715	705	702	697
Diesellok	215	204	204	204	148	150
	Instandhaltung [Mio. €]					
E-Loks	40,79	54,94	53,6	33,23	47,3	24,37
Diesellok	5,51	6,35	7,81	9,04	11,81	6,13
	Durchschnittliche Laufleistung [km]					
E-Loks	143.054	157.805	164.704	177.539	173.373	103.259
Diesellok	54.042	46.403	45.957	45.796	46.241	26.506

Tabelle 20: Instandhaltungskostendaten der Lokomotiven der ÖBB

In Tabelle 21 sind die jeweiligen Instandhaltungskosten je Lok und je Streckenkilometer aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Diesellokomotiven in Österreich eine geringere spezifische Fahrleistung erbringen. Somit sind die absoluten Instandhaltungskosten je Diesellok geringer. Bezogen auf die gefahrenen Streckenkilometer sind die Instandhaltungskosten je Streckenkilometer bei Dieseltraktion mit durchschnittlich 0,93 €/km deutlich höher gegenüber 0,40 €/km bei einer Elektrolokomotive.

⁴⁴ Bericht des Rechnungshofes, „Triebfahrzeugdisposition und Triebfahrzeugbeschaffungen,“ 2015.

	2009	2010	2011	2012	2013	(2014) nur Jan bis Jul
Durchschnittliche Instandhaltungskosten je Streckenlok [€]						
E-Loks	55.724	76.839	74.965	47.135	67.379	34.964
Diesellok	25.628	31.127	38.284	44.314	79.797	40.867
Durchschnittliche Instandhaltungskosten je Streckenlokkilometer [€]						
E-Loks	0,39	0,49	0,46	0,27	0,39	0,34
Diesellok	0,47	0,67	0,83	0,97	1,73	1,54

Tabelle 21: Spezifische Instandhaltungskosten der Lokomotiven der ÖBB

Im BVWP sind folgende Unterhaltungs- und Instandhaltungskosten für Lokomotiven angenommen:

Modellfahrzeugtyp	Unterhaltungs-/Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
Diesellok	1,20
Einstrom Elektrolok	0,60
Zweistrom Elektrolok	0,70
Dreistrom Elektrolok	0,80

Tabelle 22: Instandhaltungskosten Lokomotiven gemäß BVWP

Der absolute Kostenunterschied liegt hierbei zwischen 0,60 € und 0,40 €. Bei den ermittelten Instandhaltungskosten auf Grundlage einer realen Flottenstruktur ergibt sich ein gemittelter absoluter Kostenunterschied von 0,53 €, dies spiegelt den Mittelwert der obigen Kostenunterschiede wider. Da bei der weiteren Analyse hauptsächlich der Kostenunterschied zwischen Diesel- und Elektrotraktion im Fokus steht, ergeben beide Kostenansätze das gleiche Resultat. Im Rahmen der später stattfindenden vergleichenden Betrachtung mit Hybridfahrzeugen sind allerdings nicht ausschließlich Vergleiche zwischen lokbespannten Zügen und Triebwagen realisierbar, sondern auch untereinander erforderlich. Für die weiteren Berechnungen wird daher der Kostenansatz gemäß BVWP angewendet, um eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen allen Traktionsarten sicherzustellen.

3.2.1.6 Verfügbarkeit

Für die Anzahl der benötigten Triebfahrzeuge ist die Verfügbarkeit des jeweiligen Fahrzeuges zu berücksichtigen. Um eine Aussage der Vergleichbarkeit von Diesel- zu Elektrotriebfahrzeugen zu erhalten, ist in folgender Tabelle die Verfügbarkeit des Fahrzeugbestandes der ÖBB dargestellt.

	Verfügbarkeit [%]					
	2009	2010	2011	2012	2013	gemittelt
E-Loks	91,24	87,02	88,85	90,58	91,72	89,88
Diesellok	93,62	90,48	91,56	91,04	92,07	91,75
E-Triebwagen	90,70	89,30	90,70	93,20	93,70	91,52
Dieseltriebwagen	84,70	85,00	84,40	86,60	86,70	85,48

Tabelle 23: Verfügbarkeit der Triebfahrzeuge der ÖBB

Aus diesem Datensatz ergibt sich eine leicht geringere Verfügbarkeit von knapp 2 % der E-Loks gegenüber den Dieselloks. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Dieselloks eine signifikant geringere Laufleistung im Jahr erbrachten.

Die Dieseltriebwagen besitzen eine um ca. 6 % geringere Verfügbarkeit gegenüber den E-Triebwagen.

3.2.2 2010 – Basisfall

Dieser entspricht dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ist-Zustand im Jahr 2010. Wie in diesem Abschnitt erläutert, interessiert für den Vergleich der Netzzustände der Verkehrsanteil, der im jeweiligen Referenzfall mit Dieseltraktion erbracht wurde. An dieser Stelle werden daher die dabei fahrzeugseitig entstehenden Investitionskosten, Instandhaltungskosten und Energiekosten dargestellt. Neben der monetären Bewertung soll eine erste Abschätzung der CO₂-Emissionen erfolgen. Diese lässt sich aus dem jeweiligen Dieserverbrauch im Referenzfall ableiten.

3.2.2.1 Energiekosten

Der Dieselpreis je Liter lag im Jahr 2010 im Durchschnitt bei 97,17 €/100 l bei Abgabe an Großverbraucher⁴⁵. Der Heizwert von Diesel wird mit 34,7 MJ/Liter angenommen⁴⁶.

Nachfolgend sind die Dieseldkosten aufgestellt.

	Energiebedarf [PJ]	Dieserverbrauch [Mio. Liter]	Dieseldkosten [Mio. €]
SPFV	0,5	14	13,4
SPNV	9,0	259	251,2
SGV	3,1	90	87,9
Gesamt	12,6	363	352,5

Tabelle 24: Gesamtdieseldkosten 2010

3.2.2.2 Beschaffungskosten

3.2.2.2.1 Schienenpersonenfernverkehr

Die Bestandszahlen der Dieseltriebfahrzeuge im Fernverkehr unterteilen sich in 19 Dieseltriebwagen (ICE TD) und 49 Diesellokomotiven. Wie bereits in Abschnitt 3.1.1.1 aufgezeigt, erbrachten Dieseltriebwagen nur einen Anteil 0,3 % an den durch Triebzüge im SPFV erbrachten Zugkilometern⁴⁷. Die ICE TD Triebwagen waren demnach nicht in relevanter Größenordnung im Einsatz. Auf Basis derselben Daten legten Diesellokomotiven im SPFV im Jahr 2010 2,4 Mio. Zugkilometer zurück. Bei einem Bestand von 49 Fahrzeugen ergäbe sich eine Jahresfahrleistung von etwas über 48 Tsd. km pro Fahrzeug und Jahr. Auch dieser Wert ist unrealistisch niedrig. Auf Basis realistischer Fahrleistungen von 160 Tsd. km

⁴⁵ Statistisches Bundesamt, „Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Juni 2017 -“, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.

⁴⁶ J. Hoinkis, Chemie für Ingenieure, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

⁴⁷ PTV Planung Transport Verkehr AG, „Datengrundlage: Streckennetz und Anzahl der Züge zwischen den Knoten,“ Karlsruhe.

jährlich für Diesellokomotiven und 450 Tsd. km für Triebzüge werden für die zugrunde gelegte Fahrleistung zwei Dieseltriebwagen und 15 Diesellokomotiven benötigt. Bei einem Anschaffungspreis von 21 Mio. Euro je Triebwagen und 3,2 Mio. Euro je Lok betragen die Beschaffungskosten 90,0 Mio. Euro. Nach den in Abschnitt 3.2.1.3 festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich eine Annuität von 3,85 Mio. Euro.

3.2.2.2.2 Schienenpersonennahverkehr

In folgender Tabelle sind die Dieseltriebfahrzeuge des SPNV im Jahr 2010 zusammengefasst. Die Triebwagen werden dabei entsprechend den in Abschnitt 3.2.1.4 beschriebenen Modellfahrzeugtypen eingeteilt.

Fahrzeugbestand				Investitionskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrzeug [Mio. €]	Gesamt-Investitionskosten [Mio. €]
1	235	NV 80D	10,62	2,3	540,5
2	1677	NV 130D	75,81	3	5031
3	88	NV 180D	3,98	3,7	325,6
Lok	212	Lok	9,58	3,2	678,4

Tabelle 25: SPNV - Dieseltriebfahrzeuge 2010

Es ergeben sich für den Fahrzeugbestand Gesamtinvestitionskosten von rund 6,58 Mrd. Euro. Nach den in Abschnitt 3.2.1.3 festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich für die Beschaffung der Dieseltriebwagen eine Annuität von 291,5 Mio. Euro und für die Diesellokomotiven von 29,1 Mio. Euro. Die Annuität aller Dieseltriebfahrzeuge im SPNV beträgt 320,6 Mio. Euro.

3.2.2.2.3 Schienengüterverkehr

Im Schienengüterverkehr waren im Jahr 2010 rund die Hälfte aller Lokomotiven Dieselloks. Wie bereits in Abschnitt 3.1.2.3 aufgeführt, betrug die mit Dieseltraktion erbrachte Fahrleistung nur 7 % der gesamten Fahrleistung, bezogen auf Tonnenkilometer. Ein Großteil der Diesellokomotiven sind ältere Lokomotiven und im Rangierdienst tätig. Für einen Vergleich der Beschaffungskosten sollten nur aktiv genutzte Streckenlokomotiven herangezogen werden. Hier wird eine Abschätzung der benötigten Streckenlokomotiven auf Grundlage der erbrachten Transportleistung relativ zu den Elektrolokomotiven durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Anzahl von 105 benötigten Dieselstreckenlokomotiven. Bei angesetzten Beschaffungskosten von 3,2 Mio. Euro je Lok ergibt sich eine Gesamtsumme von 336 Mio. Euro. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren ergibt sich zur Triebfahrzeugbeschaffung eine Annuität von 14,4 Mio. Euro.

3.2.2.3 Instandhaltungskosten

3.2.2.3.1 Schienenpersonenfernverkehr

Für die angesetzten 2,9 Mio. Zugkilometer mit Dieseltraktion ergeben sich mit den in Abschnitt 3.2.1.5 ermittelten Instandhaltungskosten für die 15 Lokomotiven jährliche Instandhaltungskosten von 2,9 Mio. Euro und für die beiden Triebwagen von 2,4 Mio. Euro. Insgesamt fallen jährliche Instandhaltungskosten von 5,3 Mio. Euro an.

3.2.2.3.2 Schienenpersonennahverkehr

Für die gewählten Modellfahrzeugtypen sind die Instandhaltungskosten bereits in Abschnitt 3.2.1.5 aufgeführt. Die Gesamtzugkilometer im SPNV betragen 649 Mio. Zugkilometer im Jahr 2010. Davon entfallen 36 % auf Dieseltriebfahrzeuge. Die Aufteilung der Fahrleistung nach Zugkilometern auf die einzelnen Modellfahrzeugzugattungen wird linear zu ihrer Anzahl angenommen. Aus den jeweils gefahrenen Kilometern lassen sich die resultierenden Instandhaltungskosten ermitteln.

Fahrzeugbestand					Instandhaltungskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
1	235	NV 80D	10,62	25	0,65	16
2	1677	NV 130D	75,81	177	0,85	151
3	88	NV 180D	3,98	9	1,05	10
Lok	212	Lok	9,58	22	0,93	27

Tabelle 26: SPNV - Instandhaltungskosten nach Triebfahrzeugkategorie

Für die Dieseltriebfahrzeugflotte des SPNVs ergeben sich somit Instandhaltungskosten von jährlich 203,3 Mio. Euro.

3.2.2.3.3 Schienengüterverkehr

Die Instandhaltungsarbeiten an den Lokomotiven erfolgen typischerweise laufleistungsbezogen. Daher interessiert für die Berechnung der Instandhaltungskosten nicht die Transportleistung in Tonnenkilometern, sondern es müssen die erbrachten Trassenkilometer ermittelt werden. Auf Basis der gegebenen Zahlen werden 2010 jährlich 277,1 Mio. Zugkilometer im SGV gefahren, was unter der Annahme, dass 7 % der Transportleistung mit Dieseltraktion erbracht werden, auf 19,4 Mio. zurückgelegte Kilometer mit Diesellokomotiven führt. Mit den in Abschnitt 3.2.1.5 aufgeführten Instandhaltungskosten ergibt sich ein jährlicher Instandhaltungsaufwand für den SGV von 23,3 Mio. Euro.

3.2.2.4 Zusammenfassung

Nachfolgend sind die Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb der Triebfahrzeuge zur Erbringung der Fahrleistung in Dieseltraktion anfallen.

	Basisfall 2010
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	3,85
SPNV	320,57
SGV	14,39
gesamt	338,82
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	5,32
SPNV	203,33
SGV	23,28
gesamt	231,93
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	13,39
SPNV	251,19
SGV	87,93
gesamt	352,51
Gesamtkosten je Jahr	923,26 Mio. €

Tabelle 27: Kostenübersicht Basisfall 2010

3.2.3 2010 – Planfall

Der Planfall 2010 geht von einer Komplettelektrifizierung im Jahr 2010 aus. Sämtlicher Verkehr erfolgt mit Elektrotraktion.

3.2.3.1 Energieverbrauch nach Sparten

3.2.3.1.1 Schienenpersonenfernverkehr

Die Berechnung des benötigten elektrischen Energiebezugs zur Erbringung der Transportleistung des ursprünglichen Anteils der Dieseltraktion erfolgt auf Basis der in Abschnitt 3.2.1.2.1 hergeleiteten spezifischen Energieverbräuche. In folgender Tabelle ist der zusätzliche Bruttoenergiebedarf zur Erbringung der ehemaligen Dieselverkehrsleistung dargestellt.

Ehemaliger Anteil Elektro				Ehemaliger Anteil Diesel	
Anteil an Fahrleistung im SPFV [%]	Gesamt-Nettobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Bruttobedarf [PJ]	Anteil an Fahrleistung im SPFV [%]	(zusätzlicher) Bruttobedarf [PJ]
98	8,2	10,20	9,13	2	0,17

Tabelle 28: SPFV – Zusätzlicher Bruttoenergiebedarf (rechts)

Bei der Betrachtung der Rückspeiseenergie muss zwischen lokbespannten Zügen und Triebzügen unterschieden werden. Für Triebzüge fällt die Rückspeisequote höher aus als bei lokbespannten Zügen. Dies begründet sich in der Verteilung der Antriebsachsen über den Zug, wodurch eine höhere dynamische Bremskraft nutzbar ist. Bei lokbespannten Zügen ist die dynamische Bremskraft in Deutschland typischerweise auf 150 kN begrenzt. Um nur den Einfluss der geänderten Traktion zu erhalten, wird bei dem Planfall 2010 davon ausgegangen, dass lokbespannte Züge mit Dieseltraktion durch lokbespannte Züge mit Elektrotraktion ersetzt werden. Analog dazu werden Dieseltriebzüge durch Elektrotriebzüge ersetzt. Die Fahrleistung des SPFV mit lokbespannten Zügen zu Triebzügen wird den zur Verfügung gestellten PTV Daten an gefahrenen Zugkilometern der jeweiligen Fahrzeugtypen entnommen. Ausgehend von den in Abschnitt 3.2.1.2.1 angeführten Rückspeisequoten und der angenommenen Kilometerverteilung von 83 % Lok und 17 % Triebzug ist der resultierende Brutto- und Nettoenergieverbrauch wie folgt dargestellt.

Lok bespannt von ehemals Diesel			Triebzug von ehemals Diesel		
Bruttobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Nettobedarf [PJ]	Bruttobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Nettobedarf [PJ]
0,14	9,30	0,13	0,03	17,40	0,02

Tabelle 29: SPFV - Nettoenergiebedarf

Mit den in Abschnitt 3.2.1.1 angenommenen Bahnstromkosten ergeben sich Gesamtnettoenergiekosten von 4,87 Mio. Euro. Die Zusammensetzung der Kosten ist in folgender Tabelle dargestellt.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeiseenergie		Rückspeisung		Nettokosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,17	47,22	10,91	5,15	0,02	5,56	5,03	0,28	4,87

Tabelle 30: SPFV – Energiekosten (ehemaliger Anteil Diesel)

3.2.3.1.2 Schienenpersonennahverkehr

Rund zweidrittel des Dieserverbrauchs im Schienenverkehr erfolgte im SPNV. Folglich besitzt dieser den größten Einfluss bei den Energiekosten. Der Energieverbrauch richtet sich

stark nach den genutzten Fahrzeugen, der Auslastung und den befahrenen Strecken, Haltestellenabständen, etc. Die Berechnung des benötigten elektrischen Energiebedarfs, um die gesamte Verkehrsleistung des Schienenpersonennahverkehrs abzubilden, besitzt somit vielfältige Unsicherheiten.

Unter Nutzung der in Abschnitt 3.2.1.2.2 angeführten spezifischen Energieverbräuche ergibt sich ein Netto-Energiebedarf von 3,2 PJ.

Unter der Annahme, dass es sich bei den im Jahr 2010 beschafften Fahrzeugen ausschließlich um Neufahrzeuge handelt, kann der Wert von 3,2 PJ auch für das Jahr 2030 angenommen werden, da sich dieser Fahrzeugbestand dort weiterhin im Einsatz befinden wird. Unter Annahme der ermittelten durchschnittlichen Rückspeisequote sind die Brutto- und Nettoenergiemengen wie folgt dargestellt.

	Bezug [PJ]	Rückspeisung [PJ]	Nettobedarf [PJ]
Referenzwerte 2010	4,4	1,2	3,2

Tabelle 31: SPNV - Nettoenergiebedarf

Aufgrund der unterschiedlichen Vergütung bei Strombezug und Rückspeisung sind die resultierenden Kostenbestandteile wie folgt:

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise-energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio.€]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
4,4	1216,2	10,91	132,69	1,2	339,32	5,03	17,07	115,62

Tabelle 32: SPNV – Energiekosten

3.2.3.1.3 Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr im Jahr 2010 sind sowohl die Transportleistungen in Tonnenkilometer als auch die benötigten Energiemengen bekannt. Ausgehend von dem Energieverbrauch je Tonnenkilometer bei elektrischer Traktion kann nun die benötigte Energie für die bisher durch Dieseltraktion erbrachte Transportleistung erfolgen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass alle „neu“ anzuschaffenden Lokomotiven, die den Anteil der Dieseltraktion übernehmen, als rückspeisefähig angenommen werden. Aus diesem Grund wird bei der Betrachtung der Bruttoenergiebedarf zugrunde gelegt, und anschließend die Rückspeiserate berücksichtigt.

Gesamtnetto- bedarf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Brutto- bedarf [PJ]	Fahrleistung [Mio. tkm]	Spez. Bruttoenergie- bedarf [GJ/Mio. tkm]
12,3	5,1	13,0	102.369	126,61

Tabelle 33: SGV - Bruttoenergiebedarf Elektrotraktion Basisfall 2010

Bei einer Fahrleistung von 7696 Mio. tkm ergibt sich ein Bruttoenergiebedarf von rund 1 PJ. Die Rückspeisequote wird mit 8,8 % angenommen. Dieser Rückspeisewert entspricht den gemittelten Rückspeisequoten der Baureihen 152, 185, 189 unter realen Bedingungen im Betrieb bei DB Schenker Rail Deutschland im Jahr 2011. In folgender Tabelle sind die resultierenden Energieverbräuche zusammengefasst.

Gesamtnetto- bedarf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Brutto- bedarf [PJ]	Fahrleistung [Mio. tkm]	Spez. Bruttoenergie- bedarf [GJ/Mio. tkm]
0,9	8,8	1,0	7.696	126,61

Tabelle 34: Bruttoenergiebedarf der zusätzlichen Elektrotraktion im Planfall 2010

Der Energiebedarf der Dieseltraktion im Jahr 2010 lag bei 3,1 PJ. Der Bruttobedarf bei Elektrotraktion liegt mit 1,0 PJ bei 31 % des ursprünglichen Bruttobedarfs. Die Differenz kommt durch den geringeren Wirkungsgrad des Dieselmotors zu Stande. Moderne Dieselmotoren besitzen einen Wirkungsgrad von ca. 40 %. Im Teillastbereich ist der Wirkungsgrad jedoch erheblich schlechter. Somit stellen 31 % einen realistischen Wert dar.

Mit den in Abschnitt 3.2.1.1 angenommenen Bahnstromkosten ergeben sich Gesamtnettkosten von 27,61 Mio. Euro Energiekosten. Die Zusammensetzung der Kosten stellt sich folgendermaßen dar:

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
1,0	277,78	10,42	28,94	0,1	27,78	4,81	1,34	27,61

Tabelle 35: SGV - Energiekosten

3.2.3.2 Beschaffungskosten nach Sparten

3.2.3.2.1 Schienenpersonenfernverkehr

Die Dieselfahrzeuge werden durch vergleichbare Elektrofahrzeuge ersetzt, im Fall einer Diesellok durch eine Dreistrom-Elektrolok mit einem Anschaffungspreis von 3,8 Mio. Euro und im Fall eines Triebzuges durch einen vergleichbaren E-Triebzug, in diesem Fall dem BVWP Modellfahrzeugtyp HGV C. Als Elektromehrsystemfahrzeug wird dieser mit 23,1 Mio. Euro angesetzt. Die Beschaffungskosten für die 15 Lokomotiven betragen 57 Mio. Euro und für die zwei Triebzüge 46,2 Mio. Euro, in Summe 103,2 Mio. Euro. Nach

den in Abschnitt 3.2.1.3 festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich für die Fahrzeugbeschaffung im SPFV eine Annuität von 3,95 Mio. Euro.

3.2.3.2.2 Schienenpersonennahverkehr

Ausgehend von der in Abschnitt 3.2.2.2.2 ermittelten Anzahl der Diesel-Modellfahrzeuge sind in folgender Tabelle die Anzahl und Aufteilung der E- Triebfahrzeuge und die resultierenden Anschaffungskosten dargestellt.

Referenz-Fahrzeugbestand Diesel			Modellfahrzeug Elektro		Investitionskosten	
n-teilig	Anzahl	Verteilung [%]	n-teilig	Bezeichnung	Fahrzeug [Mio. €]	Gesamtinvestitionskosten [Mio. €]
1	235	10,62	2	NV 120 E SD	3,6	846,0
2	1677	75,81	2	NV 120 E SD	3,6	6037,2
3	88	3,98	3	NV 180 E SD	4,4	387,2
Lok	212	9,58	E-Lok	Lok	3,2	678,4

Tabelle 36: SPNV - Betrachteter Modellfahrzeugbestand

Es ergeben sich für den Fahrzeugbestand Gesamtinvestitionskosten von rund 7,95 Mrd. Euro. Nach den festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich zur Beschaffung der Elektrotriebwagen eine Annuität von 311,4 Mio. Euro und für die E-Lokomotiven von 23,5 Mio. Euro. Dies ergibt eine Gesamtannuität bei den Fahrzeugen des SPNV von 334,9 Mio. Euro.

3.2.3.2.3 Schienengüterverkehr

Es wurde bereits in Abschnitt 3.2.2.2.3 ein benötigter Triebfahrzeugbestand von 105 Lokomotiven ermittelt, um den Fahrleistungsanteil der Dieseltraktion im Jahr 2010 abzubilden. Bei angesetzten Beschaffungskosten von 3,8 Mio. Euro je Dreistrom-E-Lok ergibt sich eine Gesamtsumme von 399 Mio. Euro. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 40 Jahren ergibt sich eine Annuität von 13,83 Mio. Euro.

3.2.3.3 Instandhaltungskosten

3.2.3.3.1 Schienenpersonenfernverkehr

In Abschnitt 3.2.2.3.1 wurden 2,9 Mio. Zugkilometer als Referenzwert für die im SPFV mit Dieseltraktion im Jahr 2010 zurückgelegten Zugkilometer angesetzt. Mit den in Abschnitt 3.2.1.5 ermittelten Instandhaltungskosten für E-Lokomotiven ergeben sich jährliche Instandhaltungskosten von 1,9 Mio. Euro und für die Triebzüge bei 5,50 Euro pro km von 2,7 Mio. Euro. Es fallen demnach jährlich Instandhaltungskosten von 4,61 Mio. Euro an.

3.2.3.3.2 Schienenpersonennahverkehr

In folgender Tabelle sind die spezifischen und die gesamten Instandhaltungskosten für die Triebfahrzeuge des SPNV enthalten.

Referenz-Fahrzeugbestand Diesel			Modellfahrzeug Elektro		Instandhaltungskosten	
n-teilig	Anzahl	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	n-teilig	Bezeichnung	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
1	235	25	2	NV 120 E SD	0,4	10
2	1677	177	2	NV 120 E SD	0,4	71
3	88	9	3	NV 180 E SD	0,6	6
Lok	212	22	E-Lok	Lok	0,6	13

Tabelle 37: Aufstellung der Instandhaltungskosten nach Modellfahrzeug

Für die die Dieselfahrzeuge ersetzende Elektrotriebfahrzeugflotte des Schienenpersonennahverkehrs ergeben sich somit Instandhaltungskosten von jährlich 99,8 Mio. Euro.

3.2.3.3.3 Schienengüterverkehr

In Abschnitt 3.2.2.3.3 wurden 19,4 Mio. Zugkilometer als Referenzwert für die im SGV mit Dieseltraktion im Jahr 2010 zurückgelegt Zugkilometer angesetzt. Mit den in Abschnitt 3.2.1.5 ermittelten Instandhaltungskosten für E-Lokomotiven ergeben sich jährliche Instandhaltungskosten von 15,5 Mio. Euro.

3.2.3.4 Zusammenfassung

In Tabelle 38 sind alle Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb der E-Triebfahrzeuge zur Erbringung der Fahrleistung, die im Referenzjahr 2010 durch Dieseltraktion erbracht wurde, anfallen.

	Planfall 2010 - Komplett- elektrifizierung
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	3,95
SPNV	334,90
SGV	13,83
Gesamt	352,68
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	4,61
SPNV	99,79
SGV	15,52
Gesamt	119,92
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	4,87
SPNV	115,62
SGV	27,61
Gesamt	148,10
Gesamtkosten	620,70 Mio. €

Tabelle 38: Kostenübersicht Planfall 2010

Verglichen mit den ermittelten Gesamtkosten von 923,3 Mio. Euro der Dieseltraktionsleistung, werden für die Anschaffung und den Betrieb von Elektrotriebfahrzeugen insgesamt nur ca. zweidrittel an Geldern benötigt. Der hauptsächliche Kostenfaktor sind hierbei die bei Elektrotraktion wesentlich geringer ausfallenden Energiekosten.

3.2.4 2030 – Basisfall

3.2.4.1 Ermittlung des Diesel-Triebfahrzeugbestandes und der Fahrleistung

Der Dieseltriebfahrzeugbestand wird auf Basis der in Abschnitt 3.2.2.2 aufgeführten Bestandszahlen des Jahres 2010 ermittelt. Für das Jahr 2030 sowie für das Jahr 2010 liegen die prognostizierten Zugfahren je Tag auf den jeweiligen Streckenabschnitten untergliedert nach Zugkategorien vor. Wie bereits für das Jahr 2010 ist daraus nicht ersichtlich, welche Traktionsart die einzelnen Züge auf den elektrifizierten Streckenabschnitten besitzen. Die Triebfahrzeugzahlen werden daher auf Grundlage der gefahrenen Zugkilometer auf nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten errechnet. In folgender Abbildung sind die prognostizierten Zugkilometer je Tag auf nichtelektrifizierten Strecken im Jahr 2030 dem Referenzzustand aus dem Jahr 2010 gegenübergestellt.

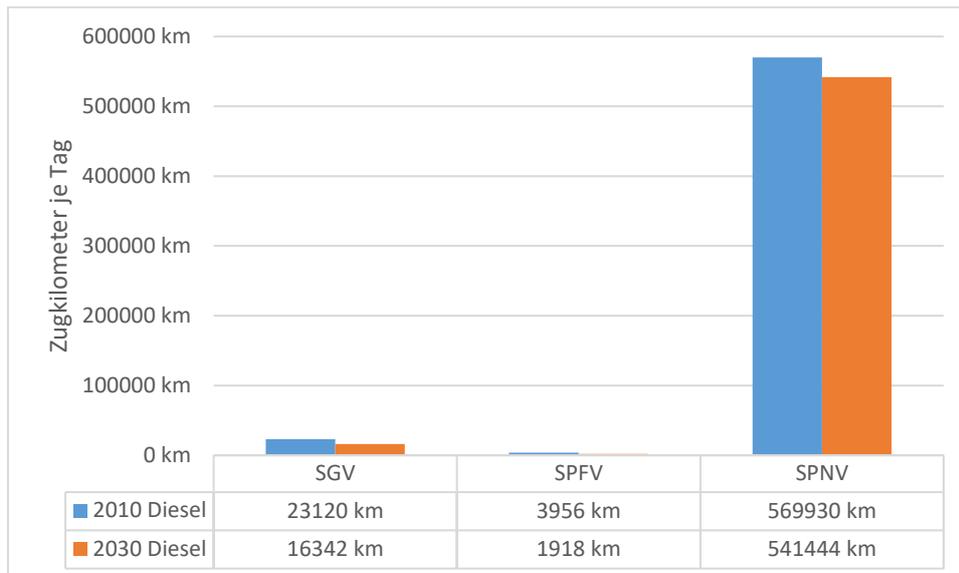


Abbildung 12: Vergleich der Zugkilometer je Tag auf nichtelektrifizierten Strecken

Es wird deutlich, dass der Großteil der Verkehre auf nichtelektrifizierten Strecken durch den SPNV erbracht wird. Insgesamt ist ein Rückgang der Gesamt-Zugkilometer auf nichtelektrifizierten Strecken zu beobachten. Die Fahrleistung beträgt 2030 im SPFV noch 49 %, im SPNV noch 95 % und im SGV noch 71 % des Wertes von 2010. Dies ist jedoch nicht in einem Rückgang der Schienenverkehre, sondern in dem höheren geplanten Elektrifizierungsgrad im Jahr 2030 gemäß BVWP begründet. In der nächsten Abbildung sind die prognostizierten Zugkilometer je Tag den Zugkilometern aus dem Jahr 2010 gegenübergestellt. Der generelle Zuwachs der Verkehrsleistung ist hier ersichtlich.

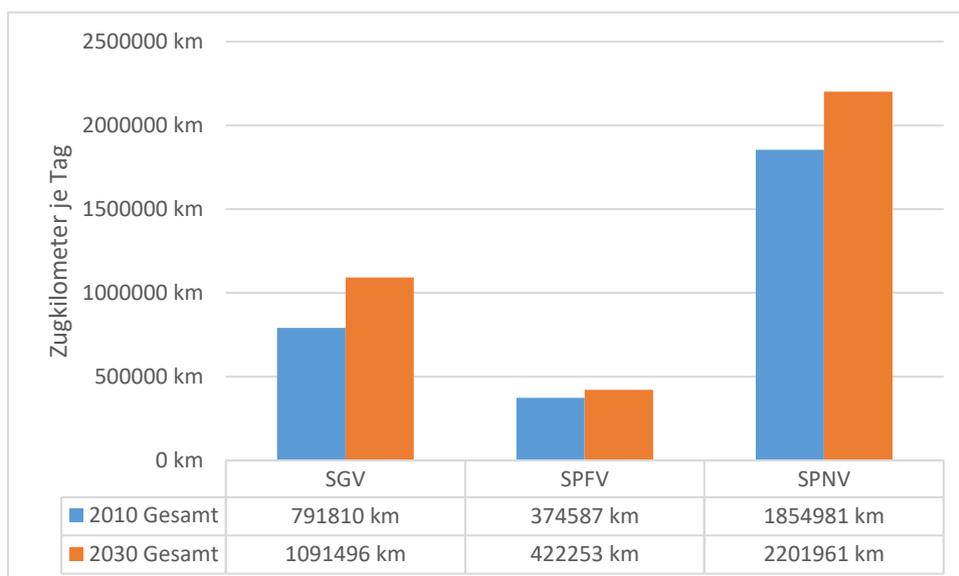


Abbildung 13: Vergleich der Zugkilometer je Tag 2010 zu 2030

3.2.4.1.1 Schienenpersonenfernverkehr

Im Schienenpersonenfernverkehr halbiert sich zwischen 2010 und 2030 die Fahrleistung, die auf nichtelektrifizierten Strecken erbracht wird. Wie in Abbildung 12 ersichtlich, ist ihr Einfluss an der gesamten mit Dieseltraktion erbrachten Fahrleistung sehr gering. Ihr Einfluss auf die Gesamtkosten ist somit auch als gering zu bewerten. Nach den vorliegenden Daten wird im Jahr 2030 im Gegensatz zu 2010, wo es lediglich 20 % sind, 72 % der Dieseltraktionsleistung im SPFV durch Triebzüge erbracht. Für die Fahrleistung der Triebzüge wird ein Wert von 1 Mio. Zugkilometern und für die durch Lokomotiven erbrachte Fahrleistung 0,4 Mio. Zugkilometer angenommen. Wie bereits im Jahr 2010 wird für Dieseltriebwagen eine Jahresfahrleistung von 0,45 Mio. Zugkilometern und für Diesellokomotiven von 160 Tsd. Zugkilometern zugrunde gelegt. Es werden somit drei Dieseltriebwagen und drei Lokomotiven für das Jahr 2030 benötigt.

3.2.4.1.2 Schienenpersonennahverkehr

Mangels genauerer Zahlen der Zusammenstellung der Dieseltriebfahrzeugflotte im Jahr 2030 wird auf die anteilige Aufteilung aus dem Jahr 2010 zurückgegriffen. Die Fahrleistung für das Einzelfahrzeug wird bei der Betrachtung konstant gehalten. Weiterhin wird der prozentuale Anteil der elektrifizierten Strecken auf den Dieselnetzen des SPNV konstant zum Jahr 2010 gehalten. Durch diesen Ansatz können direkt die Triebfahrzeugbestandszahlen und jeweiligen Fahrleistung aus den auf Dieselstrecken gefahrenen Zugkilometern ermittelt werden.

Referenz-Fahrzeugbestand- Diesel			Modellfahrzeug elektrisch	
n-teilig	Anzahl	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	n-Teilig	Bezeichnung
1	223	24	2	NV 120 E SD
2	1593	168	2	NV 120 E SD
3	84	9	3	NV 180 E SD
Lok	201	21	E-Lok	Lok

Tabelle 39: SPNV - Prognostizierter Triebfahrzeugbestand 2030

3.2.4.1.3 Schienengüterverkehr

Im Schienengüterverkehr gehen die Zugkilometer auf nichtelektrifizierten Strecken um 29 % gegenüber dem Jahr 2010 zurück. Bei einer linearen Betrachtung ergibt sich somit ein benötigter Dieseltriebfahrzeugbestand von 75 Diesellokomotiven. Diese Zahl ist jedoch mit einer hohen Unsicherheit behaftet, da weiterhin zu erwarten ist, dass die Diesellokomotiven auf elektrifizierten Strecken verkehren, wenn ein geringer Teil der gewählten Fahrstraße nicht elektrifiziert ist. Im betrachteten Referenzjahr wurden bereits mehr als die Hälfte aller Zugkilometer im SGV mit Dieseltraktion auf elektrifizierten Strecken durchgeführt.

Für das Referenzjahr 2010 wurde eine Laufleistung der Diesellokomotiven von 19,4 Mio. km angenommen. Bei gleicher Verteilung der Laufleistung einer Lok auf Diesel und elektrifizierten Strecken wie im Jahr 2010 ergibt sich 2030 eine Gesamtlauflistung der Diesellokomotiven von 13,7 Mio. km.

3.2.4.2 Energieverbrauch und -kosten

Der Dieserverbrauch wird entsprechend dem Verhältnis der gefahrenen Zugkilometer aus den Daten für das Jahr 2010 skaliert. Es ist davon auszugehen, dass der spezifische Energieverbrauch der Dieseltreibfahrzeuge im Jahr 2030 geringer ausfallen wird als im Referenzjahr 2010. Gründe hierfür sind Wirkungsgradverbesserungen am Antriebsstrang und Optimierungen der Zuglaufsteuerung. Die Verringerung des spezifischen Energiebedarfs wurde für den Zeitraum von 2002 bis 2020 für die Berechnungen der Emissionsdaten in TREMOD mit 10 % angenommen. Für den Zeitraum 2010 - 2030 finden sich Schätzungen, die für die Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs bei lokbespannten Zügen mit Dieseltraktion einen Wert von 15 % und für Triebzüge mit Dieseltraktion einen Wert von 10 % annehmen⁴⁸.

Für die Hochrechnung wird auf Basis dieser Annahmen einheitlich eine Verringerung des spezifischen Energiebedarfs von 10 % angenommen.

Zur Berechnung des Dieselvolumens aus dem angesetzten Energiebedarf wird der Heizwert von Diesel mit 34,7 MJ/Liter angenommen⁴⁹. Der Dieselpreis wird mit 115,33 €/100 l (vergleiche Abschnitt 3.2.1.1) angesetzt.

In der folgenden Tabelle sind die Dieserverbräuche und Dieselposten aufgestellt.

	Energiebedarf [PJ]	Dieserverbrauch [Mio. Liter]	Dieselposten [Mio. €]
SPFV	0,2	6	6,9
SPNV	7,7	221	254,9
SGV	2,0	58	66,4
Gesamt	9,9	285	328,2

Tabelle 40: Dieselpostenverbrauch im Basisfall 2030

⁴⁸ Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung,“ 19. März 2014.

⁴⁹ J. Hoinkis, Chemie für Ingenieure, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

3.2.4.3 Beschaffungs- und Instandhaltungskosten

3.2.4.3.1 Schienenpersonenfernverkehr

Die Diesellokomotiven werden einheitlich mit 3,2 Mio. Euro Investitionskosten angenommen. Als Referenzfahrzeug für den Triebwagen wird erneut der BVWP Modellfahrzeugtyp HGV C für 21,0 Mio. Euro je Dieselfahrzeug gewählt.

Es ergibt sich somit für die jeweils drei Fahrzeuge eine Annuität von 3,11 Mio. Euro.

Die anfallenden Instandhaltungskosten sind in folgender Tabelle aufgezeigt und betragen für den SPFV 5,5 Mio. Euro jährlich.

Fahrzeugbestand			Instandhaltungskosten	
Triebfahrzeug	Modellfahrzeug	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
Triebzug	HGV C	1,0	5,00	5,0
Lokomotive	Lok	0,4	1,20	0,5

Tabelle 41: SPFV - Instandhaltungskosten

3.2.4.3.2 Schienenpersonennahverkehr

In folgender Tabelle sind die Dieseltriebfahrzeuge des SPNV im Jahr 2030 zusammengefasst. Die Triebwagen werden dabei entsprechend den in Abschnitt 3.2.1.4 beschriebenen Modellfahrzeugtypen eingeteilt.

Fahrzeugbestand				Investitionskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrzeug [Mio. €]	Gesamtinvestitionskosten [Mio. €]
1	223	NV 80D	10,61	2,3	512,9
2	1593	NV 130D	75,82	3	4779
3	84	NV 180D	4,00	3,7	310,8
Lok	201	Lok	9,57	3,2	643,2

Tabelle 42: SPNV - Investitionskosten

Es ergeben sich für den Fahrzeugbestand Gesamtinvestitionskosten von rund 6,25 Mrd. Euro. Nach den in Abschnitt 3.2.1.3 festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich für die Beschaffung der Dieseltriebwagen eine Annuität von 277,0 Mio. Euro und für die Diesellokomotiven von 27,5 Mio. Euro. Die Annuität der Dieseltriebfahrzeuge im SPNV beträgt 304,5 Mio. Euro. In der folgenden Tabelle sind die anfallenden Instandhaltungskosten aufgezeigt und betragen für den SPFV 193,2 Mio. Euro jährlich.

Fahrzeugbestand					Instandhaltungskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
1	223	NV 80D	10,61	24	0,65	15,3
2	1593	NV 130D	75,82	168	0,85	143,1
3	84	NV 180D	4,00	9	1,05	9,3
Lok	201	Lok	9,57	21	1,20	25,5

Tabelle 43: SPNV - Instandhaltungskosten

3.2.4.3.3 Schienengüterverkehr

Im Schienengüterverkehr wurde in Abschnitt 3.2.4.1.3 eine Diesel-Streckenlok-Anzahl von 75 angenommen. Bei angesetzten Beschaffungskosten von 3,2 Mio. Euro je Lok ergibt sich eine Gesamtsumme von 240,0 Mio. Euro. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 30 Jahren ergibt sich für die Fahrzeugbeschaffung eine Annuität von 10,3 Mio. Euro und es fallen jährliche Instandhaltungskosten von 16,5 Mio. Euro an.

3.2.4.4 Zusammenfassung

In Tabelle 44 sind alle Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb der Triebfahrzeuge zur Erbringung der Fahrleistung, die im Referenzjahr 2030 durch Dieseltraktion erbracht wird, anfallen.

	Basisfall 2030
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	3,11
SPNV	304,51
SGV	10,28
gesamt	317,9
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	5,52
SPNV	193,16
SGV	16,45
gesamt	215,13
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	6,93
SPNV	254,91
SGV	66,39
gesamt	328,2
Gesamtkosten	861,27 Mio. €

Tabelle 44: Kostenübersicht Basisfall 2030

3.2.5 2030 – Planfall

Im Planfall 2030 wird von einer Komplettelektrifizierung im Jahr 2030 ausgegangen. Sämtlicher Verkehr erfolgt mit Elektrotraktion.

3.2.5.1 Energieverbrauch nach Sparten

Die Berechnung des benötigten elektrischen Energiebezugs zur Erbringung der Transportleistung, des ursprünglichen Anteils der Dieseltraktion, erfolgt ausgehend von dem für den Planfall 2010 ermittelten Energiebedarf.

Es erfolgt eine Skalierung des Energieverbrauchs ausgehend von der Fahrleistung. Diese Berechnungen werden analog zu der Vorgehensweise zur Berechnung des Energieverbrauchs für den Basisfall 2030 vorgenommen. Eine Verbesserung des spezifischen Energieverbrauchs gegenüber 2010 wird zunächst nicht angenommen.

3.2.5.1.1 Schienenpersonenfernverkehr

Der Bruttoenergiebedarf wird auf Grundlage der Werte des Jahres 2010 skaliert. Wie bereits bei dem Planfall 2010 in Abschnitt 3.2.3.1.1 geschehen, wird bei diesem Netzzustand davon ausgegangen, dass lokbespannte Züge mit Dieseltraktion durch lokbespannte Züge mit Elektrotraktion ersetzt werden. Analog dazu werden Dieseltriebzüge durch Elektrotriebzüge ersetzt. Die Rückspeisequoten entsprechen jenen bereits im Planfall 2010 verwendeten Werten, die veränderten Fahrleistungen im Jahr 2030 zu 2010 wurden in Abschnitt 3.2.4.1.1 beschrieben und kommen hier erneut zur Anwendung. In nachfolgender Tabelle ist der benötigte Bruttoenergiebedarf unterteilt in lokbespannte Züge und Triebzüge dargestellt. Ausgehend von den jeweiligen Rückspeisequoten ist der resultierende Nettoenergieverbrauch dargestellt. Anschließend werden die Energiekosten berechnet, siehe Tabelle 46.

Lokbespannt 28 % von ehem. Diesel			Triebzüge 72 % von ehem. Diesel			Gesamtbedarf
Brutto- bedarf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Netto- bedarf [PJ]	Brutto- bedarf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Netto- bedarf [PJ]	Gesamt- nettobedarf [PJ]
0,023	9,30	0,021	0,058	17,40	0,048	0,07

Tabelle 45: SPFV - Energiebedarf unterteilt in Lok und Triebzug

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,08	22,54	11,07	2,49	0,01	3,41	8,86	0,30	2,19

Tabelle 46: SPFV – Energiekosten

3.2.5.1.2 Schienenpersonennahverkehr

Der Energiebedarf wurde analog zu den in Abschnitt 3.2.3.1.2 ermittelten Energiebedarfen des Planfalls 2010 berechnet, die Kosten sind Tabelle 47 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio.€]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
4,16	1155,42	11,07	127,91	1,16	322,36	8,86	28,56	99,34

Tabelle 47: SPNV - Energiekosten

3.2.5.1.3 Schienengüterverkehr

Auch im SGV wird der Energiebedarf analog zu den in Abschnitt 3.2.3.1.3 ermittelten Energiebedarfen des Planfall 2 berechnet und die Energiekosten bestimmt.

Gesamtnettobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Bruttobedarf [PJ]
0,64	8,80	0,71

Tabelle 48: SGV – Energiebedarf

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio.€]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,71	196,34	10,58	20,77	0,06	17,28	8,46	1,46	19,31

Tabelle 49: SGV - Energiekosten

3.2.5.2 Beschaffungs- und Instandhaltungskosten

3.2.5.2.1 Schienenpersonenfernverkehr

Die E-Lokomotiven werden einheitlich mit 3,8 Mio. Euro Investitionskosten angenommen. Als Referenzfahrzeug für den Triebwagen wird wie bisher der BVWP Modellfahrzeugtyp HGV C gewählt. Als Elektromehrsystemfahrzeug wird dieser mit 23,1 Mio. Euro angesetzt. Die Beschaffungskosten für die drei Lokomotiven betragen 11,4 Mio. Euro und für

die drei Triebzüge 69,3 Mio. Euro. Es ergibt sich somit eine Annuität für die Fahrzeugbeschaffung im SPFV von 3,4 Mio. Euro. In folgender Tabelle sind die anfallenden Instandhaltungskosten aufgezeigt und betragen für den SPFV 5,9 Mio. Euro jährlich.

Fahrzeugbestand			Instandhaltungskosten	
Triebfahrzeug	Modellfahrzeug	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
Triebzug	HGV C	1,0	5,50	5,6
Lokomotive	Lok	0,4	0,80	0,3

Tabelle 50: SPFV - Instandhaltungskosten

3.2.5.2.2 Schienenpersonennahverkehr

In der folgenden Tabelle sind die Ersatzelektrofahrzeuge des SPNV im Jahr 2030 zusammengefasst. Die Triebwagen werden dabei entsprechend den in Abschnitt 3.2.1.4 beschriebenen Modellfahrzeugtypen eingeteilt.

Fahrzeugbestand				Investitionskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrzeug [Mio. €]	Gesamtinvestitionskosten [Mio. €]
1	223	NV 120 E SD	10,61	3,6	802,8
2	1593	NV 120 E SD	75,82	3,6	5734,8
3	84	NV 180 E SD	4,00	4,4	369,6
Lok	201	Lok	9,57	3,2	643,2

Tabelle 51: SPNV - Investitionskosten

Es ergeben sich für den Fahrzeugbestand Gesamtinvestitionskosten von rund 7,55 Mrd. Euro. Nach den in Abschnitt 3.2.1.3 festgelegten Nutzungsdauern ergibt sich für die Beschaffung der Triebwagen eine Annuität von 295,8 Mio. Euro und für die E-Lokomotiven von 22,3 Mio. Euro. Die Annuität der Dieselerersatz-Triebfahrzeuge im SPNV beträgt 318,1 Mio. Euro. In folgender Tabelle sind die anfallenden Instandhaltungskosten aufgezeigt und betragen für den SPFV 94,8 Mio. Euro jährlich.

Fahrzeugbestand					Instandhaltungskosten	
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]	[€/km]	Gesamt [Mio. €]
1	223	NV 120 E SD	10,61	24	0,4	9,4
2	1593	NV 120 E SD	75,82	168	0,4	67,3
3	84	NV 180 E SD	4,00	9	0,6	5,3
Lok	201	Lok	9,57	21	0,6	12,7

Tabelle 52: SPNV – Instandhaltungskosten

3.2.5.2.3 Schienengüterverkehr

Im Schienengüterverkehr wurde in Abschnitt 3.2.4.1.3 eine Streckenlok-Anzahl von 75 für die Dieseltraktionstransportleistung angenommen. Bei angesetzten Beschaffungskosten von 3,8 Mio. Euro je Mehrsystem E-Lok ergibt sich eine Gesamtsumme von 285,0 Mio. Euro. Bei einer angenommenen Nutzungsdauer von 40 Jahren ergeben sich zur Fahrzeugbeschaffung eine Annuität von 9,9 Mio. Euro und jährliche Instandhaltungskosten von 11 Mio. Euro.

3.2.5.3 Zusammenfassung

In Tabelle 53 sind alle Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb der Ersatz-E-Triebfahrzeuge zur Erbringung der Fahrleistung, die im Referenzjahr 2030 durch Dieseltraktion erbracht werden, anfallen.

	Planfall 2030 – Komplett- elektrifizierung
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	3,36
SPNV	318,12
SGV	9,88
gesamt	331,36
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	5,87
SPNV	94,81
SGV	10,97
gesamt	111,64
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	2,19
SPNV	99,34
SGV	19,31
gesamt	120,84
Gesamtkosten	563,85 Mio. €

Tabelle 53: Kostenübersicht Planfall 2030

3.2.6 Zusammenfassung der Kosten der zwei Netzzustände

Für die betrachteten Netzzustände ergibt sich bei einer Komplettelektrifizierung des Schienennetzes eine Kostenersparnis von ca. 303 Mio. Euro im Jahr 2010. Für das Jahr 2030 ergeben sich Kostenersparnisse von ca. 297 Mio. Euro.

Kosten pro Jahr in Mio. Euro	Basisfall 2010	Planfall 2010	Basisfall 2030	Planfall 2030
Annuität	338,82	352,68	317,90	331,36
Instandhaltung	231,93	119,92	215,13	111,64
Energie	352,51	148,10	328,23	120,84
gesamt	923,26	620,70	861,27	563,85

Tabelle 54: Zusammenfassung Kosten der zwei Netzzustände

Die genauere Aufteilung der Kosten ist in den folgenden Kapiteln dargestellt.

3.2.6.1 Annuitäten

Die Annuitäten für die Netzzustände sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Unter den gesetzten Randbedingungen sind hier leicht höhere Kosten zu erwarten. Die Elektrotriebfahrzeuge wurden tendenziell mit einem höheren Investitionspreis angesetzt, da diese jedoch eine längere Nutzungsdauer aufweisen, ergibt sich eine ähnliche jährliche Investitionssumme. Der Mehraufwand für Elektrofahrzeuge beträgt 13,86 Mio. Euro im Jahr 2010 und 13,46 Mio. Euro im Jahr 2030.

Annuitäten für Fahrzeugbeschaffung in Mio. Euro	Basisfall 2010	Planfall 2010	Basisfall 2030	Planfall 2030
SPFV	3,85	3,95	3,11	3,36
SPNV	320,57	334,90	304,51	318,12
SGV	14,39	13,83	10,28	9,88
gesamt	338,82	352,68	317,90	331,36

Tabelle 55: Vergleich Annuitäten

3.2.6.2 Instandhaltungskosten

Die Instandhaltungskosten für die Netzzustände sind nachfolgend dargestellt. Die äquivalente Elektrotriebfahrzeugflotte weist jeweils rund die Hälfte der Instandhaltungskosten der Dieseltriebfahrzeugflotte auf. Der größte Kostenanteil wird durch den SPNV verursacht, da in diesem die größte Anzahl an Dieseltriebfahrzeugen eingesetzt wird. Es ist mit Einsparungen von 112,01 Mio. Euro im Basisjahr 2010 und von 103,49 Mio. Euro im Jahr 2030 jährlich zu rechnen.

Instandhaltungskosten pro Jahr in Mio. Euro	Referenzfall 2010	Planfall 2010	Referenzfall 2030	Planfall 2030
SPFV	5,32	4,61	5,52	5,87
SPNV	203,33	99,79	193,16	94,81
SGV	23,28	15,52	16,45	10,97
gesamt	231,93	119,92	215,13	111,64

Tabelle 56: Vergleich Instandhaltungskosten

3.2.6.3 Energiekosten

Die Energiekosten für die Netzzustände sind in folgender Tabelle dargestellt. Die Energiekosten der Elektrotraktion betragen jeweils ca. 1/3 der Dieselmkosten. Die Energiekosten besitzen somit eine sehr große Beeinflussungsmöglichkeit der Gesamtkosten. Die jährliche Ersparnis beläuft sich auf 204,41 Mio. Euro im Jahr 2010 und 207,4 Mio. Euro im Jahr 2030.

Energiekosten pro Jahr in Mio. Euro	Referenzfall 2010	Plan Fall 2010	Referenzfall 2030	Plan Fall 2030
SPFV	13,39	4,87	6,93	2,19
SPNV	251,19	115,62	254,91	99,34
SGV	87,93	27,61	66,39	19,31
gesamt	352,51	148,10	328,23	120,84

Tabelle 57: Vergleich Energiekosten

4 Infrastruktur

4.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Auf Grundlage der zusammengestellten makroskopischen Streckendaten werden im Folgenden geeignete Ausstattungsoptionen sowie der streckenspezifische Aufwand für die zu untersuchende Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes ermittelt. Die Untersuchung umfasst die Oberleitungsanlagen einschließlich Rückstromführung und Erdung sowie die Anlagen der Bahnenergieversorgung (Unterwerke, Bahnstromleitungen, Umrichterwerke, Schaltposten usw.). Zusätzliche Kosten für notwendige Anpassungen an Ingenieurbauwerken und Sicherungstechnik für die Elektrifizierung sollen über spezifische Kostensätze berücksichtigt werden. Kosten für Trassierungsänderungen oder allfällige Reinvestitionen in Ober- und Unterbau der Eisenbahnstrecken werden methodisch ausgeklammert.

Basierend auf existierenden Methoden und Zahlenwerten werden die Gesamtkosten, die Zahlungsfolgen und die Annuitäten der infrastrukturseitig für eine Komplettelektrifizierung, benötigten Anlagen ermittelt. Die im Allgemeinen überschlägig für Elektrifizierungsprojekte angesetzten Mengengerüste und Kostensätze speziell für Oberleitungsanlagen erwiesen sich für ein Projekt dieser Größenordnung als nicht umfassend bzw. nicht detailliert genug. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden deshalb anhand bereits ausgeführter Ersterrichtungsprojekte von Oberleitungsanlagen die dafür benötigten Mengengerüste und die dazugehörigen realen Kosten recherchiert und in spezifische Kostensätze überführt. Für die Bahnenergieversorgungsanlagen liegen reale Kostensätze und zu hinterlegende Mengengerüste aus vorangegangenen Machbarkeitsstudien vor.⁵⁰ Durch geeignete überschlägige Berechnung des für eine Komplettelektrifizierung benötigten Anlagenbedarfs werden auch diese im Folgenden in spezifische Kostensätze umgerechnet.

In Abschnitt 4.2 werden die für die Bearbeitung der Aufgabe notwendigen technischen Grundlagen bezüglich des Aufbaus der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland beschrieben. Zunächst wird ein Überblick über die Gesamtstruktur skizziert, darauf aufbauend werden die untersuchungsrelevanten Teilsysteme ausführlicher betrachtet. Danach werden in Abschnitt 4.3 einleitend der Netzaufbau und dabei zu berücksichtigende Prinzipien sowie die Besonderheiten der zentralen bzw. dezentralen Bahnenergieversorgung beschrieben. Darauf aufbauend wird das für die Bahnenergieversorgung benötigte Mengengerüst basierend auf Kennwerten aus vorangegangenen Untersuchungen ermittelt. Im anschließenden Abschnitt 4.4 wird das Mengengerüst für die Oberleitungsanlage ermittelt. Dafür werden zunächst in den Abschnitten 4.4.1 bis 4.4.5 die Grundlagen erforderlicher Teilkomponenten beschrieben. Im anschließenden Abschnitt 4.4.6 wird das Streckennetz sinnvoll kategorisiert, da dies für das im Folgenden abzuleitende Mengengerüst essenziell ist. Auf Basis der

⁵⁰ Leibniz Universität Hannover, Technische Universität Dresden, & Technische Universität Clausthal, 2012

ermittelten Mengengerüste werden in Abschnitt 4.5 die Kosten der geplanten Komplettelektrifizierung des deutschen Streckennetzes sowie die Zahlungsfolgen und Annuitäten berechnet.

4.2 Aufbau der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland

4.2.1 Gesamtstruktur

Die in Deutschland verwendete und von der Landesfrequenz (50 Hz) abweichende Bahnstrom-Sonderfrequenz von 16,7 Hz ist durch historische Entwicklungen bedingt. Bereits 1912, also zu Beginn der Streckenelektrifizierung, entschied man sich für einen Netzbetrieb mit Sonderfrequenz, da sich so die elektrischen Triebfahrzeuge mit Einphasenwechselstrom-Kommutatorfahrmotoren ausstatten und sowohl technisch als auch wirtschaftlich vorteilhaft betreiben ließen. Obwohl diese Anforderung heute eher unbedeutend ist, hat sich die Sonderfrequenz insbesondere hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Energieeinkaufs, der Verfügbarkeit der Bahnstromversorgung, des Netzbetriebs, der Energieeffizienz im Fahrleitungsnetz sowie bahnbetrieblich bewährt.⁵¹

Zur Versorgung der elektrischen Eisenbahnstrecken in Deutschland betreibt die Deutsche Bahn AG ein eigenes Energieübertragungsnetz mit der Nennspannung 2AC 110kV 16,7 Hz. Dieses auch „Bahnstromnetz“ genannte Übertragungsnetz erstreckt sich über eine Trassenlänge von rund 7.800 km und versorgt aktuell rund 180 Bahnunterwerke. In das Bahnstromnetz speisen Kraftwerke mit 16,7-Hz-Einphasengeneratoren sowie zentrale Umformer- und Umrichterwerke verschiedener Energieversorgungsunternehmen ein.

Für den Netzbetrieb einschließlich aller Schalthandlungen, die Leistungsregelung und die Instandhaltung des Bahnstromnetzes sowie die Energieabrechnung ist das Konzernunternehmen DB Energie GmbH zuständig.

Aus dem 110-kV-Bahnstromnetz wird der überwiegende Teil der mit Nennspannung 1AC 15 kV 16,7 Hz elektrifizierten Eisenbahnstrecken über Einphasentransformatoren und einpolige Schaltanlagen eingespeist. In Netzbereichen, in denen das zentrale 2AC-110-kV-Übertragungsnetz aus historischen Gründen nicht vorhanden ist (vorrangig in Nordostdeutschland), werden die Fahrleitungsanlagen über rotierende Umformer oder leistungselektronische Umrichter mit Sonderfrequenz dezentral aus 50-Hz-Drehstromnetzen der Landesenergieversorgung gespeist. Die über Umformer dezentral gespeisten Strecken lassen sich wegen des starren Frequenzverhältnisses von 3:1 zum 50-Hz-Landesnetz nicht mit den zentral gespeisten Strecken zusammenschalten. Insofern existieren heute in Deutschland noch zwei getrennte Netzbereiche, deren Fahrleitungsanlagen intern jeweils vollständig elektrisch durchgekuppelt betrieben werden können.

⁵¹ Biesenack, 2006

4.2.2 Teilsysteme

4.2.2.1 Bahnenergieerzeugung

Die 16,7-Hz-Energieerzeuger sind weiträumig im gesamten Bahnstromnetz verteilt, wobei große Erzeugerleistungen vorrangig in Lastschwerpunkten konzentriert sind. Es gibt Grundlasterzeuger (hauptsächlich Laufwasser-, Kohle- und Kernkraft), Mittellasterzeuger (Dampfkraft-, Umformer- und Umrichterwerke) sowie Spitzenlasterzeuger (Umformer- und Umrichter- sowie Pumpspeicherwerke).

In Kraft- und Umformerwerken werden 16,7-Hz-Einphasen-Synchrongeneratoren eingesetzt. Dies sind Spezialmaschinen, welche nur in geringer Stückzahl angefertigt wurden und aufgrund ihres pulsierenden Drehmoments eine federnde Aufstellung erfordern. Aufgrund der Einphasigkeit ist die Ständerwicklung der Maschinen über den Umfang nur teilbewickelt. Daraus ergibt sich gegenüber Dreiphasenmaschinen eine geringere elektromagnetische Ausnutzung bzw. Leistungsdichte. Wegen dieser Spezifika und wegen des geringeren Teillastwirkungsgrades der Maschinen ist es heute wirtschaftlicher, die Bahnenergie mit dreiphasigen Maschinen der Landesversorgung zu erzeugen und anschließend über statische Umrichter in Einphasenenergie zu wandeln. Dies ist das für neu errichtete Bahnstromerzeuger vorzugsweise verwendete Technologiekonzept.

Mit Ausnahme zweier kleiner Wasserkraftwerke besitzt die DB Energie selbst keine eigenen Kraftwerke zur Erzeugung der Bahnenergie mit Sonderfrequenz. Der Energiebezug aus den 16,7-Hz-Kraftwerken anderer Kraftwerksbetreiber ist über langfristige Verträge abgesichert. Die Mehrzahl der zentralen Umformer- und dezentralen Umrichterwerke ist jedoch im Eigentum der DB Energie und wird von dieser betrieben.

Die zukünftig geplante weitere Umstellung der Bahnenergieerzeugung zugunsten höherer Anteile der Umrichter-Einspeisung sowohl in das 110-kV-Bahnstromnetz als auch in die 15-kV-Fahrleitungsanlagen bietet aus heutiger Sicht vor allem energiewirtschaftliche Vorteile, die in der hohen Regeldynamik sowie dem hohen Wirkungsgrad der Umrichter auch bei großer Lastdynamik und damit in größeren Freiheitsgraden bei der Wahl des Energiebezugs begründet sind. Zudem haben leistungselektronische Umrichter inzwischen deutlich geringere Lebenszykluskosten als rotierende Umformer, welche aus besagten Spezialmaschinen bestehen.⁵²

4.2.2.2 Bahnenergieübertragung

Der Leitungsaufbau des Bahnstromnetzes ist zweipolig mit entgegengesetzter Phasenlage, die Leiter-Erde-Nennspannung beträgt 55 kV pro Phase. Daraus ergibt sich für die Ener-

⁵² N.N.: Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2010. Elektrische Bahnen 109 (2011) Heft 1-2 S. 3-49

gieübertragung eine Leiter-Leiter-Nennspannung von 110 kV. Das Bahnstromnetz hat aktuell eine Trassenlänge von 7.785 km und ist landesweit – mit Ausnahme im Raum nordöstlich von Berlin – vorhanden. Das Netz wird landesweit durchgekuppelt und mit resonanzgeerdetem Sternpunkt betrieben, was die Löschfähigkeit und den Weiterbetrieb ohne Schalthandlungen bei flüchtigen einpoligen Erdschlüssen sichert. Der für die Löschfähigkeit zulässige maximale Erdschlussreststrom ist derzeit fast erreicht. Dies muss bei großräumigen Netzerweiterungen und der Installation von Kabelstrecken mit hoher kapazitiver Wirkung bedacht werden.

Mit dem weitgehend identisch aufgebauten 110-kV-Bahnstromnetz der Österreichischen Bundesbahnen besteht ein galvanischer Netzverbund über zwei Bahnstromleitungen. Mit dem 132 kV-Bahnstromnetz der Schweizerischen Bundesbahn gibt es ebenfalls zwei Netzkupplungen über Trenntransformatoren, da das Schweizer Netz mit starrer Sternpunktterdung betrieben wird.

Die Bahnstromleitungen führen in der Regel 2 Systeme ± 55 kV, d.h. 4 Einzelleiter bzw. Leiterbündel. In Lastschwerpunkten und bei Verzweigungen können bis zu 4 Systeme auf einem Mast mitgeführt werden. Die Beseilung richtet sich nach der Last auf den Leitungsabschnitten. Für Sonderbetriebsfälle sind für die Leitungen entsprechende Belastungsreserven berücksichtigt.

Der Netzbetrieb des 110-kV-Bahnstromnetzes wird von der Hauptschaltleitung der DB Energie in Frankfurt/M. geführt. Das gesamte Netz ist mit Fernwirktechnik ausgestattet.⁵³

4.2.2.3 Bahnenergieverteilung

Die Einspeisung der Oberleitungen des ca. 18.000 km langen elektrifizierten Streckennetzes erfolgt momentan über 183 Unterwerke. Diese sind hinsichtlich ihres Anschlusses an das 110-kV-Bahnstromnetz als Block-, Knotenunter- oder eingeschleiftes Unterwerk ausgeführt. Sie besitzen jeweils eine zweipolige 110-kV-Freiluftschaltanlage, in der Regel zwei einphasige Leistungstransformatoren 110/15 kV (meist 2x10 MVA oder 2x15 MVA) und eine sogenannte Normschaltanlage für die 15-kV-seitige Verteilung. Jedes 15-kV-Streckenabgangsfeld hat einen Leistungsschalter und eine Fahrleitungsschutzeinrichtung. Die Zuführung zu den Oberleitungsanlagen der Strecke erfolgt über Kabel oder kurze Freileitungen. Die Rückleiteranschlüsse an den Schienen werden ebenfalls über Kabel ins Unterwerk zurückgeführt.

⁵³ N.N.: Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2010. Elektrische Bahnen 109 (2011) Heft 1-2 S. 3-49

4.2.2.4 Bahnenergiezuführung

Die streckenseitige Energiezuführung zu den elektrischen Triebfahrzeugen wird über Kettenwerks oberleitungen realisiert. Die Oberleitungsanlagen gehören zum Zuständigkeitsbereich der DB Netz AG und es gelten bei der Planung, Errichtung und Instandhaltung sowohl das EBS-Regelzeichnungswerk als auch die Richtlinie 99701 der DB Netz AG.

Aus bahnbetrieblichen und schutztechnischen Gründen ist die Oberleitungsanlage in einzelne Speiseabschnitte unterteilt, die separat vom Unterwerk eingespeist und geschaltet werden können. Standardmäßig werden die Speiseabschnitte der Oberleitung zweiseitig von zwei benachbarten Unterwerken eingespeist. In der Mitte zwischen zwei benachbarten Unterwerken befindet sich in der Regel eine sogenannte Kuppelstelle, die im Fehlerfall eine Längstrennung zwischen den angrenzenden Speiseabschnitten ermöglicht. Die separate Versorgung der Speiseabschnitte dient vorrangig der Selektivität im Fehlerfall. Das gesamte Fahrleitungsnetz der DB Netz AG wird elektrisch durchgekuppelt betrieben. Dies hat im Vergleich zur 50-Hz-Bahnstromversorgung bahnbetriebliche und energetische Vorteile.

Zur Rückstromführung dienen die Fahrschienen und ggf. Rückleitungsseile, die zu den Fahrschienen parallelgeschaltet sind. Die gesamte Rückleitungsanlage ist aus Gründen des Berührschutzes gut leitend mit der Erde – vorrangig über die Mastfundamente der Oberleitungsanlage – verbunden. Ein Teil des Traktionsrückstromes fließt damit abschnittsweise immer durch die Erde.

4.3 Bahnenergieversorgungsanlagen

Für die Bahnenergieversorgungsanlagen liegen reale Kostensätze und zu hinterlegende Mengengerüste aus vorangegangenen Machbarkeitsstudien vor.⁵⁴ Durch geeignete, überschlägige Berechnung des für eine Komplettelektrifizierung benötigten Anlagenbedarfs wird im Folgenden das zu hinterlegende Mengengerüst bestimmt.

4.3.1 Netzaufbau

Wie bereits in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, wird der überwiegende Teil des elektrifizierten Eisenbahnnetzes zentral aus dem 110-kV-Bahnstromnetz über Einphasentransformatoren und einpolige Schaltanlagen eingespeist. Nordöstlich von Berlin existiert allerdings noch ein Netzbereich, in dem das zentrale 2 AC-110-kV-Übertragungsnetz nicht vorhanden ist und die Fahrleitungsanlagen über ältere rotierende Umformer sowie neue leistungselektronische Umrichtereinheiten dezentral aus dem 50-Hz-Landesnetz gespeist werden. Zentrales und dezentrales Netz können aufgrund unterschiedlicher Frequenztoleranzen nicht zusammengeschaltet werden. Da es sich in Deutschland als planungsrechtlich sehr schwierig her-

⁵⁴ Leibniz Universität Hannover, Technische Universität Dresden, & Technische Universität Clausthal, 2012

ausgestellt hat, neue, lange Bahnstromtrassen zu installieren, wird für die vorliegende Untersuchung davon ausgegangen, dass in Zukunft 80 % der neu erforderlichen Einspeisungen (sowohl in den zentralen, frequenzvariablen als auch in den dezentralen, frequenzstarken Netzbereich) über Umrichterwerke realisiert werden müssen und nur 20 % über Unterwerke aus dem Bahnstromnetz gespeist werden können. Nach vollständigem Ersatz der rotierenden Umformer durch Umrichter im heute dezentral gespeisten Netz kann zukünftig eine Zusammenschaltung der beiden Netzteile vorgenommen werden. Hierzu sind zwar noch Entwicklungsarbeiten zur Leistungsregelung der Umrichterwerke erforderlich, allerdings hat dies auf die in der vorliegenden Untersuchung angesetzte Anlagentechnik der Umrichter keinen Einfluss.

4.3.2 Zentrale frequenzvariable Bahnenergieversorgung

Das wesentliche Kennzeichen der zentralen Bahnenergieversorgung ist ein bahneigenes 16,7 Hz-Hochspannungsnetz, welches die einzelnen Energieerzeuger sowie die Unterwerke zur Streckenspeisung miteinander verbindet. Es ist zweipolig ausgeführt (Hin- und Rückleiter) und hat die Nennspannung 110 kV. Die korrekte Netzbezeichnung lautet deshalb 2AC 110 kV 16,7 Hz.

Die zentrale Bahnstromversorgung ist aktuell gekennzeichnet durch Kraftwerke mit bahnspezifischen Generatoren. Es lassen sich folgende Kraftwerkstypen unterscheiden:

- Wärmekraftwerk (Primärenergie: Stein- und Braunkohle, Gas) mit Dampfturbine und schnelldrehendem Einphasensynchrongenerator (Vollpolmaschine); z.B. sog. Bahnstromturbosatz mit 110 MW Nennleistung
- Wasserkraftwerk (Primärenergie: Wasser) mit verschiedenen Turbinentypen (drehzahlabhängig) und langsamdrehendem Einphasensynchrongenerator (Schenkelpolmaschine)

Energie kann außerdem über Netzkupplungen zwischen dem 50-Hz-Netz und dem 16,7 Hz-Netz bezogen werden. Rotierende zentrale Umformerwerke mit elektrisch-mechanischer Frequenzumformung sind Anlagen mit Asynchronmotor und Einphasensynchrongenerator auf einer gemeinsamen Welle. Die Kopplung beider Netze erfolgt frequenzelastisch (unter Ausnutzung des Schlupfes der Asynchronmaschine), so dass Frequenzschwankungen infolge Lastschwankungen nicht zwischen Landes- und Bahnstromnetz übertragen werden. Derartige Anlagen werden aufgrund ihrer Besonderheiten (Spezialmaschinen, Wartungsaufwand) sukzessive außer Betrieb genommen. Zentrale Umrichterwerke mit Leistungshalbleitern zur Frequenzumwandlung ersetzen bei gleicher Funktionalität zunehmend die rotierenden zentralen Umformerwerke sowie die Kraftwerke in der Energiebereitstellung.

Die Kupplung von zwei Netzen unterschiedlicher Frequenz bei gleichzeitigem Parallelbetrieb mit den o.g. Bahnenergieerzeugern erfordert spezielle Auslegungs- und Regelungskonzepte. Mit Hilfe eines Regelalgorithmus, der sogenannten Frequenz-Leistungs-Regelung, wird die Leistungsbereitstellung der Kraftwerke und Umformer-/ Umrichteranlagen in Abhängigkeit der momentan stochastisch verteilten Belastungsspitzen gestellt. Führungsgröße für die Leistungsregelung ist die Frequenz im Bahnnetz, die aufgrund der hohen Lastdynamik im Bereich zwischen -3 % bis +2 % um die Nennfrequenz von 16,7 Hz schwanken darf. Das zentrale Bahnstromnetz wird deshalb auch als frequenzvariables Bahnstromnetz bezeichnet.

Der Energietransport zu den Unterwerken ist überwiegend als Freileitungsnetz mit zwei Stromkreisen (d.h. vier Leiterbündel) in einer Mastebene ausgeführt. Die Unterwerke dienen der Energieverteilung auf die einzelnen elektrifizierten Streckenabschnitte. Der überwiegende Teil der Anlagen besteht aus zwei Hauptumspannern (110 kV / 15 kV) mit je 15 MVA Nennleistung.

Aufgrund der Probleme bei der Durchsetzbarkeit neuer 110-kV-Bahnstromleitungstrassen kann auch im zentralen, frequenzvariablen Bahnstromnetz über Umrichter direkt aus dem 50-Hz-Drehstromnetz in die Fahrleitungsanlagen eingespeist werden. Diese streckenseitigen Umrichter ohne Anschluss an das 110-kV-Bahnstromnetz sind dann gleichfalls in die Frequenz-Leistungsregelung der anderen zentralen Erzeuger eingebunden. Die hierfür genutzte Umrichter-Technologie unterscheidet sich grundsätzlich nicht von derjenigen, die im dezentralen Netz eingesetzt wird, so dass die Streckenumrichter für den hier untersuchten zukünftigen Netzausbau technologisch und kostenseitig nicht unterschieden werden müssen.

4.3.3 Dezentrale frequenzstarre Bahnenergieversorgung

Die dezentrale Streckeneinspeisung, wie sie seit den 1920er Jahren in Norwegen und Schweden oder später in der DDR umgesetzt wurde, basierte ursprünglich auf dem Einsatz rotierender Umformer, welche auf fahrbaren Wagen entlang der Strecke angeordnet wurden.⁵⁵ Die Maschinensätze (Drehstromsynchronmotor und Einphasensynchrongenerator) sind fest auf einer die Erregung tragenden Welle gekoppelt, wobei sich die Polpaarzahlen der beiden Maschinen im Verhältnis der beiden Frequenzen unterscheiden. Aufgrund der festen Kopplung beträgt die Frequenz auf Bahnseite immer genau ein Drittel der aktuellen Frequenz des Drehstromnetzes. Auf der Bahnseite kann dadurch im Gegensatz zur zentralen Bahnenergieversorgung keine vom Drehstromnetz unabhängige Frequenz-Leistungs-Regelung realisiert werden, weshalb sich dezentrales und zentrales Bahnnetz derzeit nicht zusammenschalten lassen. Die Leistungsaufteilung entlang der auch im dezentralen Netz durchgekuppelten Fahrleitungsanlage erfolgt über die Einstellung der Ausgangsspannung

⁵⁵ Bulund, A.: Aufbau eines 130-kV-Bahnenergienetzes in Schweden. Elektrische Bahnen 93 (1995) Heft 1-2 S. 38-42

der einzelnen Umformer (Regulierung der Erregung der Maschinensätze, hauptsächlich der Einphasenmaschine und somit über das Polradwinkelverhältnis der Maschinen).⁵⁶

Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger abschaltbarer Leistungshalbleiter ist seit den 1980er Jahren die Herstellung von statischen Umrichtern möglich und seit 1993 kommt diese Technologie zur Wandlung von Drehstrom in einphasigen Bahnstrom auch in Deutschland zum Einsatz. Da der Wirkungsgrad im Teillastbereich wesentlich höher und der Instandhaltungsaufwand sowie der Platzbedarf wesentlich geringer als beim Umformer sind, werden heutzutage keine Umformer mehr neu beschafft. Die Umrichter bieten zudem den Vorteil, dass die Frequenzübersetzung nicht mehr starr vorgegeben ist, sondern variabel eingestellt werden kann.

Überwiegend werden heute und zukünftig leistungselektronische Umrichter mit Nennleistungen von ca. 15 MW pro Block beschafft, bei denen die Drehstrom- und die Einphasenseite durch einen oder mehrere Gleichspannungszwischenkreise entkoppelt sind.

Der Anschluss der Umformer und Umrichter auf der 3 AC 50 Hz-Seite erfolgt hierzulande an die 110-kV-Ebene. Danach erfolgt eine Spannungstransformation auf etwa 3 ... 5 kV, so dass der Betrieb der Leistungshalbleiter möglich ist. Pro Umrichterwerk können je nach Streckenbelastung und Redundanzanforderungen mehrere Umrichterblöcke installiert werden, typisch sind dezentrale Umrichterwerke mit 2 bis 3 Umrichtern.

4.3.4 Benötigtes Mengengerüst für die Bahnenergieversorgungsanlagen

Wie bereits erwähnt, wird in der vorliegenden Untersuchung davon ausgegangen, dass in Zukunft 80 % der neuen Einspeisungen (sowohl ins zentrale als auch ins dezentrale Netz) über streckennahe Umrichterwerke realisiert werden müssen und nur 20 % über zentrale Unterwerke aus dem 110-kV-Bahnstromnetz eingespeist werden können.

Für die Umrichterspeisung wird pro Standort die Installation zweier Umrichtereinheiten mit jeweils 15 MW als Standardlösung angenommen. Bei Unterwerksspeisung werden ebenfalls Standard-Anlagen mit je zwei Hauptumspannern a 15 MVA und 15-kV-Normschaltanlage angesetzt.

Für ein Streckennetz der gegebenen Komplexität die genauen Standorte der notwendigen Streckeneinspeisungen über die Berechnung der Spannungsfälle und Kurzschlussströme zu bestimmen, ist im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich. Einerseits ist der Grad der Netzvermaschung so hoch, dass jeder Standort separat berechnet werden müsste und zum anderen kann nicht detailliert geplant werden, wo die zugehörigen

⁵⁶ Behmann, U.; Schütte, Th.: Umrichter in der 50-Hz-Bahnenergieversorgung - von Europa in die Welt. Elektrische Bahnen 110 (2012) Heft 5 S. 201-207

Bahnstrom- bzw. Netzanschlussstrassen verlaufen würden. Folgende Überlegungen lassen aber auf das zu erwartende Mengengerüst schließen:

- Bisher wird in das deutsche Fahrleitungsnetz mit ca. 185 zentralen Unterwerken und ca. 15 dezentralen Umformer-/Umrichterwerken Energie eingespeist. Es gibt also rund 200 Einspeisungen.
- Bisher sind ca. 19.622 km des Deutschen Streckennetzes elektrifiziert.
- Im Mittel gibt es also pro 100 km elektrifizierter Streckenlänge eine Einspeisung in das Fahrleitungsnetz.
- Berechnungen der technisch realisierbaren Speiselänge über den maximal zulässigen Spannungsfall und den minimal erforderlichen Kurzschlussstrom ergeben hingegen Speiselängen von nur 50 bis 70 km.
- Demnach ist in der o.g. Einspeisedichte die hohe Netzvermaschung der elektrifizierten Eisenbahnstrecken bereits berücksichtigt, wobei viele Unterwerke mehrere Strecken speisen.
- Davon ausgehend, dass auch mit den neu zu errichtenden Unterwerken in mehrere Streckenabschnitte Energie eingespeist werden können, kann unterstellt werden, dass die Netzvermaschung im noch zu elektrifizierenden Restnetz mindestens gleich hoch bleiben wird, so dass im Mittel mit einer neuen Einspeisung pro 100 km zu rechnen ist.
- Weiterhin ist bekannt, dass für die Versorgung der 183 Unterwerke aktuell 7.785 km Freileitung im 2 AC 110 kV 16,7 Hz-Netz betrieben werden.
- Die Länge der zukünftig benötigten Bahnstrom-Freileitungen kann somit näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$\circ \frac{7.785 \text{ km Freileitung}}{183 \text{ Uw}} = \frac{\text{benötigte Freileitung}}{\text{Anzahl neuer Uw im Szenario}}$$

- Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass für den Anschluss an das 3 AC 50 Hz-Landesnetz pro dezentralem Umrichterwerk durchschnittlich 3 km Drehstrom-Freileitung benötigt werden.
- Außerdem sind aus diesen Untersuchungen die Flächenbedarfe für Unterwerke und Umrichterwerke (bei der angenommenen 80 %/ 20 % Verteilung im Mittel 3.000 m² pro Standort) und für die 2 AC- bzw. 3 AC-Freileitungen (ca. 150 m²/km) bekannt.

Daraus ergibt sich das in folgender Tabelle zusammenfassend dargestellte Mengengerüst an Bahnstromanlagen für die Elektrifizierung des bisher nicht elektrifizierten Netzes.

Komponenten	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
Anzahl Uw [-]	37	31
Anzahl Urw [-]	148	124
Länge Bahnstrom-Leitungen	1.574 km	1.319 km
Länge 3AC-Anschlussleitungen	444 km	372 km
Flächenbedarf Bahnstromanlagen	857.700 m ²	718.650 m ²
Streckenlänge neuer OL-Anlagen	18.523 km	15.526 km

Tabelle 58: Mengengerüst für eine Komplettelektrifizierung benötigter zusätzlicher Bahnstromversorgungsanlagen

4.4 Oberleitungsanlagen

Wie in Abschnitt 4.2.2.4 beschrieben wird die Bahnenergiezuführung über Kettenwerks-oberleitungen realisiert. Die im Folgenden beschriebenen Oberleitungsbauweisen und -elemente orientieren sich an den rechtlichen und inhaltlichen Vorgaben des für Oberleitungen in Deutschland gültigen EBS-Zeichnungswerks und der DB-Konzernrichtlinie RL 99701.

4.4.1 Aufbau einer Oberleitungsanlage

In diesem Abschnitt wird der grobe Aufbau der Oberleitungsanlage beschrieben. Dabei soll auf alle Bauteile eingegangen werden, die für die Kostenermittlung relevant sind.

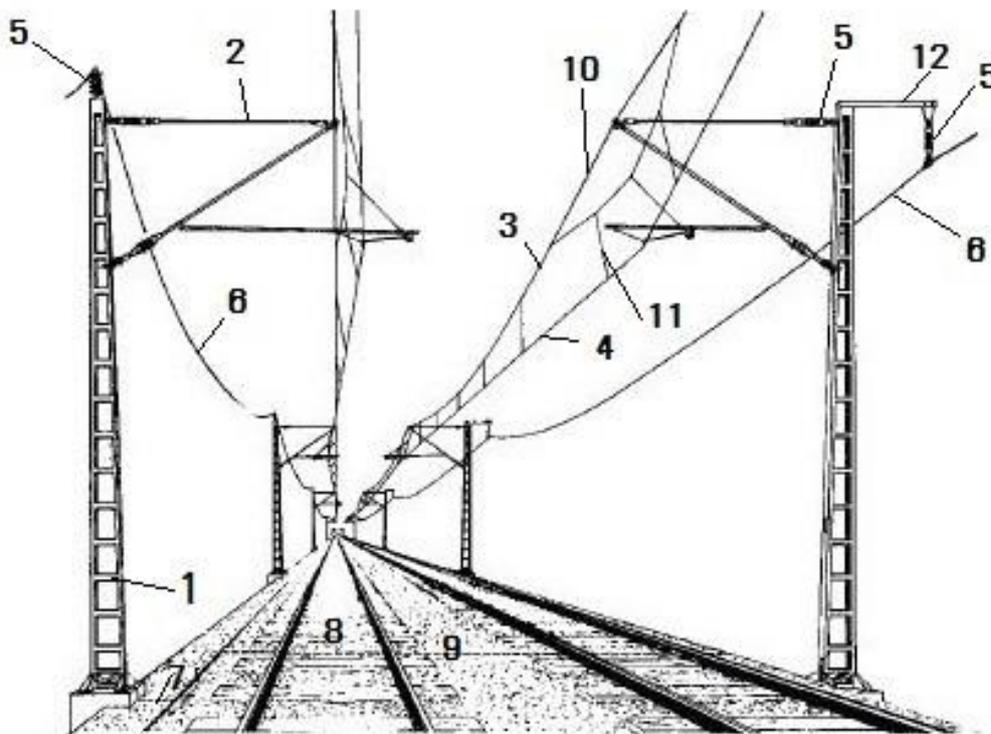


Abbildung 14: Aufbau einer Oberleitung mit Einzelstützpunkten⁵⁷

Ogleich es zahlreiche verschiedene Varianten von Oberleitungsanlagen gibt, bestehen die meisten aus folgenden Bauteilen: **Mast** (1); **Ausleger** (2); **Tragseil** (3); **Fahrdraht** (4); **Isolatoren** (5); **Bahnenergieleitung** (6); **Masterdung** (7); **Schienenverbinder** (8); **Gleisverbinder** (9); Rückleiterseil, im Falle einer isolierten Schiene; **Y-Beiseile**, in ausgewählten Bauweisen (10); **Hänger** (11); **Halterung** für Rückleiterseile (Wahlweise) und **Querträger**, als Halterung für die Bahnenergieleitung (12). Alle genannten Bauteile sind nummeriert in der Abbildung dargestellt.

Nicht abgebildet sind die Oberleitungselemente Masttrennschalter, Streckentrenner, Festpunkte, elektrische Verbindungen, Radspanner, Mastfundamente, Mehrgleisenausleger und Stromverbinder.

Die in der Abbildung dargestellte Anordnung der Oberleitungsanlage zeigt die Bauweise mit Einzelstützpunkten. Das Hauptmerkmal dieser Bauweise ist, dass sich Stützpunkte an Auslegern (Rohrschwenkausleger aus Aluminium) an Einzelmasten befinden. **Rohrschwenkausleger** bestehen neben dem Auslegerrohr aus einem Stützrohr, einem Diagonalrohr, einem Spitzenanker und einer Tragseildrehklemme (siehe folgende Abbildung)⁵⁸. Sie sind vollständig isoliert am Mast befestigt. In Parallelfeldern oder an Mittelmasten ist es üblich, dass mehrere Ausleger an einem Mast fixiert sind. Ebenso können einzelne Stützpunkte Ausleger für mehrere Gleise tragen (Mehrgleisenausleger).

⁵⁷ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

⁵⁸ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

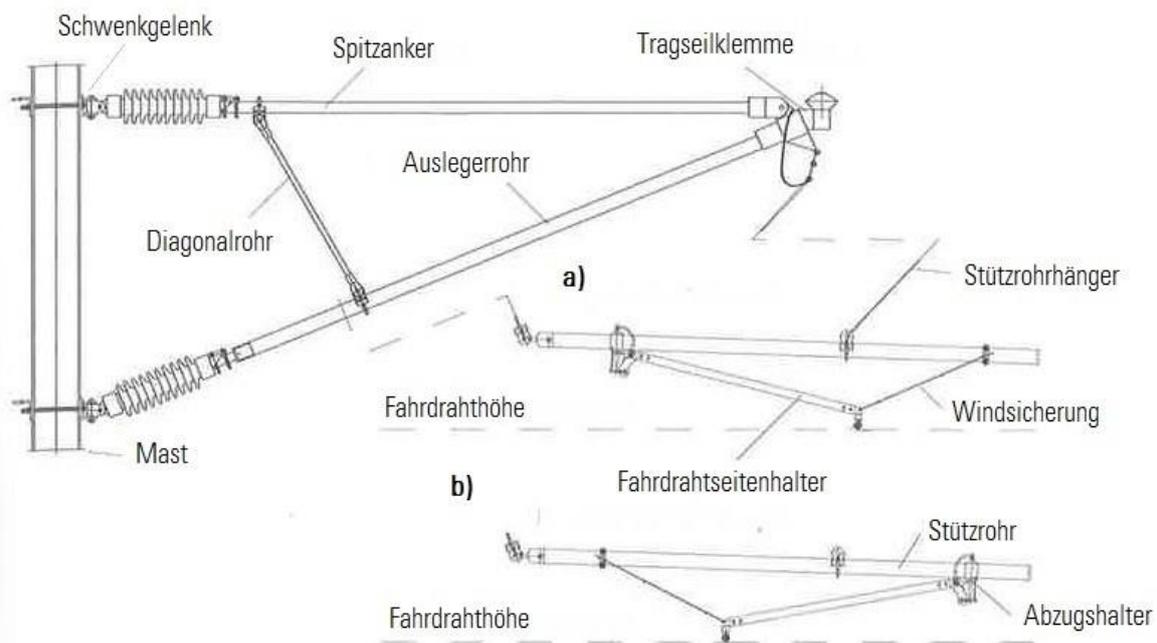


Abbildung 15: Rohrschwenkausleger a) angelenkter Stützpunkt; b) umgelenkter Stützpunkt⁵⁹

Der Begriff **Stützpunkt** steht als Synonym für die Konstruktion zur Fixierung der Oberleitung am Mast, am Bauwerk oder am Quertragwerk. Die Aufgabe des Stützpunktes ist es, die Seiten- und Höhenlage des Fahrdrahtes festzulegen⁶⁰. Stützpunkte bestehen in der Regel aus einem Stützrohr, an dem mittels Abzugshalter der Fahrdrathalter befestigt ist. Die Windsicherung und der Stützrohrhänger stabilisieren den Stützpunkt am Ausleger.

Laut DB RL 997 soll möglichst auf die Verwendung von Bogenabzügen verzichtet werden und die Bauweise mit Stützpunkten im elastischen Quertragwerk (Quertragwerk durch Richtseile) ist im Neubau von Oberleitungsanlagen nicht mehr zulässig. Sie werden aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Alternativ werden **Mehrgleisenausleger**, bestehend aus Auslegerrohr, Seilverankerung und Hängesäule, zur Überspannung von mehreren Gleisen verwendet.

Ein wichtiger Bestandteil der Oberleitungsanlage ist das Kettenwerk. Beim (Hoch-) **Kettenwerk** handelt es sich um eine spezielle Bauform der Oberleitung, die im Wesentlichen aus Tragseil (Bronze), Hängern und Fahrdraht (Kupfer oder Kupferlegierung) besteht. (siehe nächste Abbildung)

⁵⁹ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

⁶⁰ Resch, DB Richtlinie 997, Modul 997.0102, gültig ab 01.04.2015

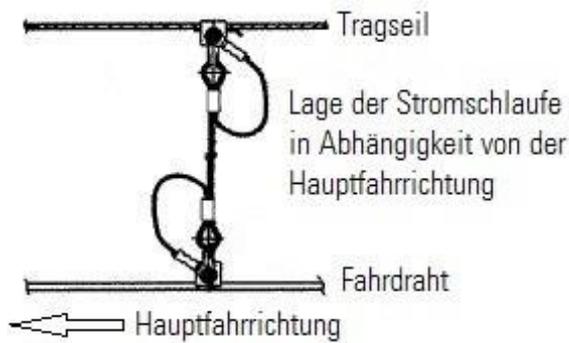


Abbildung 16: Seitenansicht eines Hängers im Kettenwerk⁶¹

Ein besonderer Vorteil von (Hoch-) Kettenwerken gegenüber anderer Bauformen der Oberleitung wie der Einfachoberleitung ist, dass mittels dieser Technik besonders große Längsspannweiten und Nachspannlängen ermöglicht werden können⁶².

Die Übergänge von Kettenwerken in der Oberleitung werden als Parallelfelder bezeichnet. Unter **Parallelfeldern** versteht man die drei- oder fünffeldrige Überlappung (ein Feld = Abstand zwischen zwei Stützpunkten) von Kettenwerken, bei dem ein Kettenwerk endet und ein weiteres beginnt⁶³. Als Parallelfeld wird dabei der gesamte Bereich zwischen der Verankerung des beginnenden und der Verankerung des endenden Fahrdrahtes bezeichnet. Kettenwerksendverankerungen können fest (feste Kettenwerksendverankerung) oder beweglich (über Radspanner) an Masten fixiert sein. Die folgende Abbildung zeigt die schematische Darstellung eines Parallelfeldes im Oberleitungslageplan. Für die elektrische Überbrückung der Kettenwerke werden in Parallelfeldern **elektrische Verbinder** eingesetzt. Sie bestehen aus Kupferseilen mit Stromklemmen.

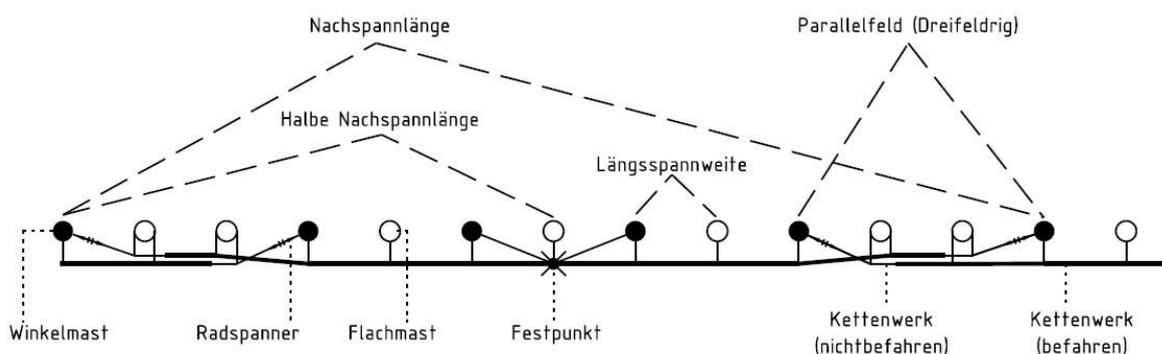


Abbildung 17: Darstellung von Oberleitungseigenschaften und -elementen

Unter **Nachspannlänge** versteht man den Abstand zwischen Beginn und Ende des Kettenwerkes (je nach Regelbauart 1200 m bis 1500 m). In der Regel sind Fahrdrahtanfang und

⁶¹ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

⁶² Meinel & Autorenkollektiv, 1988

⁶³ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

-ende beweglich via Radspanner an Masten befestigt. Etwa mittig befindet sich ein Festpunktanker, durch den das Kettenwerk am Stützpunkt mittels Ankerseilen fixiert wird. Den Abstand zwischen Festpunkt und beweglich abgespanntem Fahrdratende nennt man **halbe Nachspannlänge**⁶⁴. Die maximale halbe Nachspannlänge (zwischen 600 m und 750 m⁶⁵) ist relevant für die Planung der Oberleitung. Sie ist im Wesentlichen abhängig von der Regelbauart der Oberleitung, den Längsspannweiten einer Oberleitung und den Radien der Eisenbahnstrecke. Bei sehr kurzen Nachspannlängen, wie etwa bei Kettenwerken für Weichenverbindungen, kann auf den Festpunkt verzichtet werden. In dem Fall ist nur ein Ende des Kettenwerkes beweglich gelagert, während das andere Ende fest verankert ist.

Ein wichtiger Parameter der Oberleitungsplanung ist die **Längsspannweite** oder Spannweitenlänge. Sie beschreibt den Abstand zwischen zwei Stützpunkten. Die maximal zulässige Längsspannweite bei einer Streckengeschwindigkeit von bis zu 200 km/h beträgt 80 m. Sie wird in der Regel nur auf gerader, freier Strecke erreicht. Im Gleisbogen kann aufgrund der Zugkräfte des Kettenwerkes nur mit einem Teil der Längsspannweite geplant werden.⁶⁶

Verstärkerleitungen werden eingesetzt, um die übertragbare Leistung der Bahnenergieversorgung zu erhöhen⁶⁷. Sie verlaufen parallel zur Bahnstrecke und sind an den Masten der Oberleitung fixiert. Schalterleitungen (z.B. Schalterquerleitungen) sind elektrische Verbindungen zwischen Schaltern und der Oberleitung. Wenn Verstärkerleitungen vorhanden sind, werden zusätzlich zu den Schalterleitungen alle 1500 m Stromverbinder eingesetzt, um die Bahnenergieleitung mit dem Kettenwerk zu verbinden. Umgehungsleitungen kommen dann zum Einsatz, wenn Oberleitungsabschnitte, die nicht unmittelbar aneinandergrenzen, miteinander verbunden werden sollen. Für Speise- und Verstärkerleitung wird stets eine AL1-Leitung genutzt, für Stromverbinder und Schalterleitungen, bzw. Schalteranschlussleitungen, hingegen wird in der Regel ein Cu-ETP-Seil ohne PVC-Isolation verwendet.

Die Energieübertragung von der Bahnstromleitung auf das Kettenwerk wird durch fernbediente Schalter geregelt. **Schalter**, die auch als Oberleitungstrennschalter, Masttrennschalter oder Erdungsschalter bekannt sind, haben demnach zum einen die Aufgabe, den Kontakt zwischen Bahnenergieleitung und Kettenwerk herzustellen, um das Kettenwerk mit Bahnstrom zu speisen, und zum anderen, z.B. bei Störungen oder während Bauarbeiten, das Kettenwerk zu erden. Schalter sind meist an Bahnhöfen oder in Bahnhofsnähe auf

⁶⁴ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

⁶⁵ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

⁶⁶ Kramer, 01/2016

⁶⁷ Meinel & Autorenkollektiv, 1988

Mastköpfen angebracht, da sich dort in der Regel die Einspeisestellen befinden. Sie kommen weiterhin an Streckentrennungen, an Überleitstellen, an Streckenabzweigen und an Ladegleisen vor.

Um aktive – also stromleitende Oberleitungselemente, die bei ungestörtem Bahnbetrieb unter elektrischer Spannung stehen (außer der Fahrschiene) – und passive Teile der Oberleitung elektrisch voneinander zu trennen, werden **Isolatoren** eingesetzt. Sie bestehen aus Keramik, Glas oder Kunststoff und man findet sie unter anderem an Rohrschwenkauslegern, am Kettenwerksanfang und -ende, an Ankerseilen, an Querverbindungen und Stützpunkten von Quertragwerken sowie an Halterungen der Bahnenergieleitung, Schaltern und im Tragseil über Streckentrennern. Laut Technischer Mitteilung „Vogelschutzmaßnahmen an Oberleitungsanlagen“ sind an Seilverbindungen seit 2013 Isolatoren mit einer Mindestlänge von 60 cm oder kürzere, herkömmliche Modelle in doppelter Ausführung zu montieren⁶⁸.

Zur Stromrückführung des Bahnstromes zum Unterwerk, dienen in der Regel die Gleise. Aus sicherungstechnischen Gründen (Gleisstromkreise) kann es jedoch, vor allem in Bahnhöfen und in Bahnhofsnähe, zu Schienenisolationen kommen. In solchen Fällen und gelegentlich zur Verbesserung der Rückleitungsverhältnisse, werden Rückleiterseile (Al1-Seile) installiert, an welche alle übrigen Bahnerdungen, z.B. Mast- und Fundamenterdungen, angeschlossen sind. Rückleiterseile werden in der Regel oberirdisch mittels Rückleiterseilaufhängungen an Masten fixiert. Wenn Eisenbahnschienen zur Stromrückführung dienen, müssen im nicht durchgängig geschweißten Gleis Stromverbinder in Längsrichtung zur Überbrückung von Schienenstößen angebracht werden. Um die Impedanz der rückleitenden Schienen möglichst klein zu halten, werden in regelmäßigen Abständen (min. alle 1000 m) AL-Kabel als Schienen- und Gleisverbinder verbaut. Zur Vervollständigung der Bahnstromrückführung sowie zur Sicherheit von Personen als Schutz vor indirekter Berührung und um im Falle von Oberleitungsschäden Unfälle zu vermeiden, werden Masten, Mastbewehrungen, Mastfundamente und Fundamentbewehrungen sowie alle sich in Bahnnahe befindenden elektrisch leitfähigen Bauwerke (z.B. Schallschutzwände, Geländer, Bewehrungen in Brücken und Tunneln etc.) an die Rückleitung angeschlossen.⁶⁹

Es muss zusätzlich verhindert werden, dass Personen mit elektrisch leitenden Elementen der Oberleitungsanlage in direkten Kontakt kommen. Aus diesem Grund gibt es zum einen den Schutz durch Abstand und zum anderen den Schutz durch Hindernisse. Diese Schutzmaßnahmen müssen an allen für Personen zugänglichen Orten eingeplant werden. Ferner müssen Warnschilder und gegebenenfalls Kletterschutzmaßnahmen installiert werden. Hindernisse, Warnschilder und Kletterschutzvorrichtungen müssen in eine Kostenermittlung für den Neubau einer Oberleitungsanlage einbezogen werden.

⁶⁸ Rügner, G.; Resch, U.: TM: 1-2014-10551 I.NVT 4, gültig ab 08.07.2014

⁶⁹ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

4.4.2 Regelbauarten der Oberleitung

Wird der Neubau einer Oberleitung geplant, werden zunächst die Rahmenbedingungen untersucht, welche maßgebend für die Wahl der Regelbauart sind. Der Parameter, welcher entscheidend für die Wahl der Oberleitungsbauart ist, ist die Entwurfs- oder Streckengeschwindigkeit der zu elektrifizierenden Strecke. Für die deutschen 15-kV- Wechselstromstrecken unterscheidet man die Bauarten Re 100, Re 200, Re 200 mod, Re 250 und Re 330, die für den Neubau von Oberleitungsanlagen relevant und gültig sind. Die folgende Tabelle enthält eine Gesamtübersicht der genannten Regelbauweisen mit deren wichtigsten Charakteristika.

Regelbauart	V_{\max} [km/h]	n_{\max} [m]	a_{\min} [m]	a_{\max} [m]	Länge der Beiseile [m]	Ebs Zeichnung
Re 100	100	750	33	80		- 4 Ebs 01.04.10
Re 200	200	750	33	80	14 u. 18	4 Ebs 01.06.10
Re 200 mod.	230	750	53	80	18	4 Ebs 01.06.21
Re 250 mod.	280	600	29	65	14 o. 18	4 Ebs 01.07.10
Re 330	330	625	36	65	14 o. 18	4 Ebs 01.08.01

(n = halbe Nachspannlänge; a = Längsspannweite)

Tabelle 59: Regelbauarten für Oberleitungen und deren Eigenschaften⁷⁰

Da keine der in dieser Studie relevanten Strecken mit einer Streckengeschwindigkeit größer 160 km/h befahren werden darf, werden im Folgenden nur die Oberleitungsbauarten Re 100 und Re 200 berücksichtigt.

Regelbauart Re 100

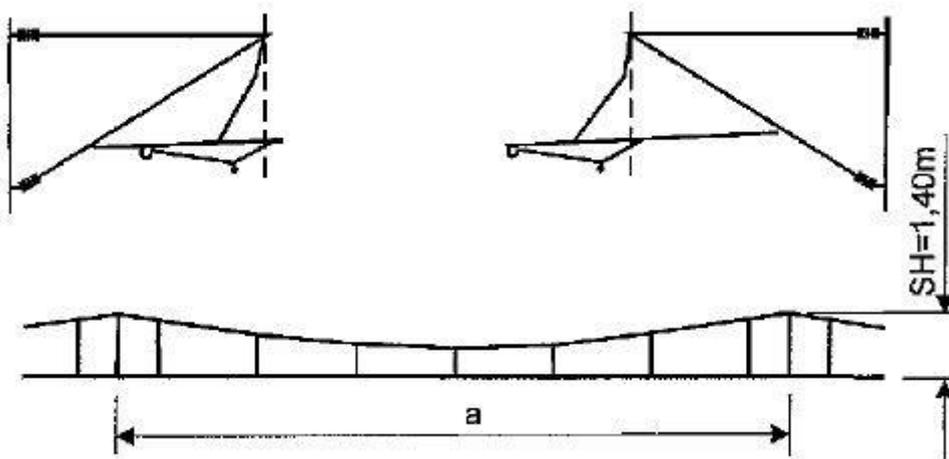


Abbildung 18: Quer- und Längsprofil der Re 100 Oberleitung

Die Re 100 ist eine Oberleitungsbauart, welche bei Eisenbahnstrecken mit niedriger Streckengeschwindigkeit Verwendung findet. Sie ist für Streckengeschwindigkeiten bis zu 100

⁷⁰ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

km/h und damit für langsam befahrene durchgängige Hauptgleise sowie für Neben- und Überholungsgleise zulässig.⁷¹ Es wird dabei nicht unterschieden, ob die Strecken von Güter- oder Personenzügen befahren werden. Die folgende Abbildung zeigt die technische Darstellung einer Re 100 Bauart mit Einzelstützpunkten im Quer- und Längsprofil.

Wie bei den meisten Regelbauarten von Oberleitungsanlagen sind Tragseil (Bz II 50) und Fahrdraht (Ri 100) bei Neubau mittels Radspannern oder festen Kettenwerksendverankerungen getrennt voneinander nachgespannt bzw. fixiert. Tragseil- und Fahrdrahtlängszugkraft betragen jeweils 10 kN. Die halbe Nachspannlänge beträgt maximal 750 m bei Längsspannweiten zwischen mindestens 33 m und höchstens 80 m. Bei der Bauweise mit Einzelstützpunkten werden Rohrschwenkausleger aus Aluminium verwendet. Die Systemhöhe des Kettenwerkes beträgt bei der Re 100 Bauweise nur 1,40 m auf der freien Strecke (1,80 m im Bahnhof), während sich der Fahrdraht im Regelfall bei 5,50 m Höhe über der Schienenoberkante befindet. Überlappungen an Streckentrennungen und Nachspannungen sind in der Regel dreifeldrig, doch lt. Ebs Zeichnungswerk sind auch fünffeldrige Überlappungen möglich (bei $r < 1000$ m). Eine Besonderheit bei Re 100 Bauweisen ist, dass das Tragseil des Kettenwerkes direkt am Seitenhalter des Stützpunktes befestigt wird und somit keine Beiseile verbaut werden.⁷²

Regelbauart Re 200

Die Re 200 ist eine Regelbauart für Oberleitungen auf Strecken, welche mit bis zu 200 km/h befahren werden. Sie wird ausschließlich für durchgehende Hauptgleise genutzt. Auch hier werden Fahrdraht (Ri 100) und Tragseil (Bz II 50) getrennt voneinander mit jeweils 10 kN Zugkraft nachgespannt. Ähnlich wie bei der Re 100 beträgt die zulässige halbe maximale Nachspannlänge 750 m bei Längsspannweiten zwischen 33 m und 80 m. Im Gegensatz zur Re 100 wird bei der Re 200 mit Vordurchhang des Kettenwerkes gerechnet. Außerdem ist das Tragseil nicht direkt am Stützpunkt befestigt. Es wird von Y-Beiseilen gehalten, welche mittels Tragseildrehklemmen an Aluminium- Rohrschwenkauslegern fixiert sind. Im Unterschied zu anderen Bauweisen mit Beiseilen sind bei der Re 200 die Y-Beiseile an den Stützpunkten 14 m (mit drei Hängern) oder 18 m (mit fünf Hängern) lang – siehe Abbildung 19. Auch bei der Re 200 gibt es drei- und fünffeldrige Parallelfelder, wobei fünffeldrige Überlappungen i.d.R. nur bei Gleisbogenradien bis zu 1000 m eingebaut werden. Die Systemhöhe der Re 200 beträgt 1,80 m.⁷³

⁷¹ Resch, DB Richtlinie 997, Modul 997.0102, gültig ab 01.04.2015

⁷² Kramer, 01/2016

⁷³ Resch, DB Richtlinie 997, Modul 997.0102, gültig ab 01.04.2015

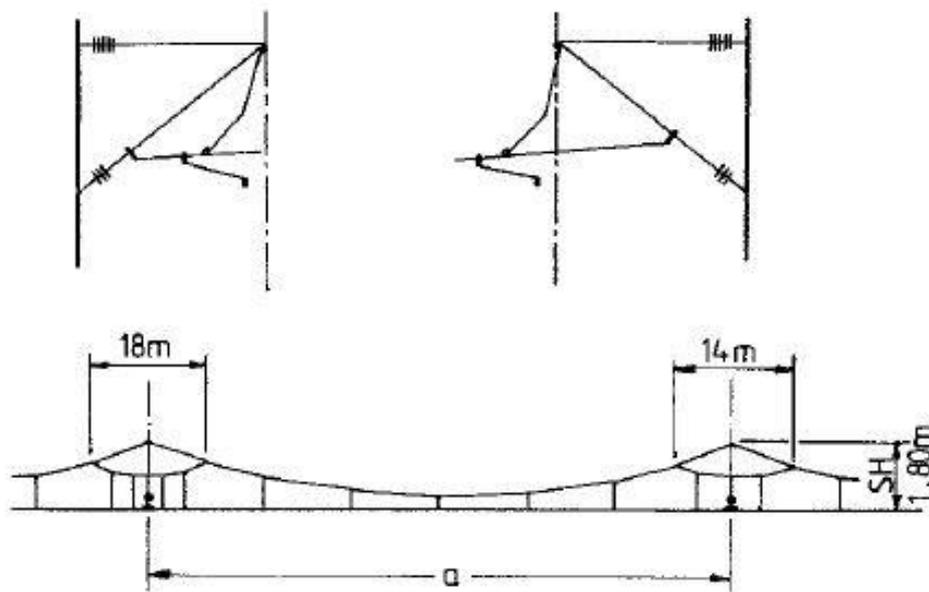


Abbildung 19: Quer- und Längsprofil der Re 200 Oberleitung⁷⁴

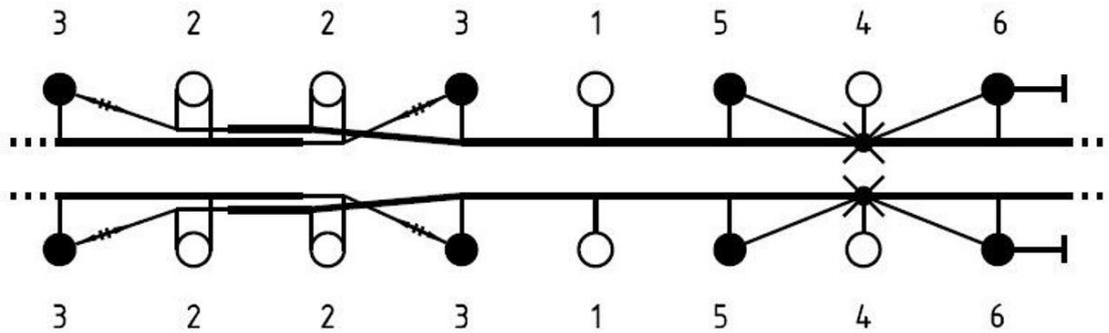
4.4.3 Masten

Oberleitungsmasten sind die Komponenten der Oberleitungsanlage, welche das Kettenwerk und alle anderen über dem Erdboden befindlichen Elemente der Oberleitung tragen. Sie sind zusammen mit den Fundamenten die wesentlichen kostenbestimmenden Bauteile einer Oberleitungsanlage.

Oberleitungsmasten können aus Stahl oder stahlbewehrtem Beton bestehen und werden unter anderem charakterisiert nach den verschiedenen Aufgaben, die sie erfüllen. Die folgende Abbildung zeigt verschiedene Masttypen klassifiziert nach deren Funktionen. Wie anhand der Abbildung zu erkennen ist, gehört es zu den Aufgaben von Masten Oberleitungen zu tragen, also diese in der gewünschten Position zu halten (Tragmast), Abspannvorrichtungen zu tragen (Abspannmast), multiple Ausleger zu tragen, um beispielsweise Parallelfelder abspannen zu können (Mittelmast) und um Festpunkte oder Festpunktanker zu halten (Festpunktmast und Festpunktankermast). Um Masten nicht überdimensionieren zu müssen, wenn die Kräfteinwirkungen auf sie besonders groß sind, gibt es die Möglichkeit der Mastverankerung.⁷⁵

⁷⁴ Kramer, 01/2016

⁷⁵ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008



(1 = Tragmast; 2 = Mittelmasten im Parallelfeld; 3 = Abspannmast; 4 = Festpunktmast; 5 = Festpunktankermast; 6 = Mast mit Mastanker)

Abbildung 20: Klassifizierung von Oberleitungsmasten in Anhängigkeit von deren Aufgaben und Funktionen

Die hohen Kräfte, denen Masten ausgesetzt, sind resultieren vertikal aus dem Eigengewicht des Mastes und allen Mastausstattungs-elementen (Schalter, Verstärkerleitung, Nachspannvorrichtungen, etc.) sowie horizontal aus Leiterzugkräften, welche besonders im Gleisbogen und an Abspann- und Ankermasten sehr hoch sind. Sie werden zusätzlich durch natürliche Gegebenheiten modifiziert. Dazu gehören Temperaturschwankungen (Längenänderung des Kettenwerkes), Windlasten und Eislasten. Außerdem müssen Ausnahmelasten und Lasten, die durch Errichtungs- und Instandhaltungsarbeiten anfallen, berücksichtigt werden. Es ist essenziell, dass Masten all diesen Lasten auf Dauer standhalten können. Aus diesem Grund wird vor dem Bau einer Oberleitungsanlage genau geprüft, welche Maststandorte entlang einer Strecke infrage kommen und welche Lasteinwirkungen auf jeden Mast zu erwarten sind, um die richtige Dimension und den richtigen Typ Mast ermitteln zu können. Grundsätzlich kategorisiert man dabei Masten nach Größe und Profil. Außerdem gibt es Unterschiede zwischen Masten bzgl. ihres Werkstoffes. Die in Deutschland üblicherweise verwendeten Werkstoffe für Oberleitungsmasten sind Stahl und Beton.⁷⁶

Die Haupttypen der **Stahlmasten** sind Winkel- und Flachmasten – siehe folgende Abbildung. Winkelmasten sind verhältnismäßig preisintensiv, weil sie aber eine lange Lebensdauer und hohe Stabilitäten vorweisen, werden sie vorzugsweise als Abspannmasten, Festpunktankermasten und als Träger für Quertragwerke eingesetzt. Aufgrund des vergleichsweise hohen Flächenverbrauches des Fundaments, sind sie als Mittelmast (im Sinne des Mastes in einer Mastgasse zwischen Gleisen) ungeeignet. In solchen Fällen wird auf sogenannte Rahmenflachmasten zurückgegriffen.

Eine in Deutschland etwas weniger verbreitete Art von Stahlmasten sind Masten aus H-Profilen (Doppel-T-Träger), welche auch unter dem Namen Peiner-Masten oder Stahlprofilmasten bekannt sind. Diese Masten sind einfach zu stationieren und erfordern nur geringe Bearbeitung. Sie sind jedoch im Verhältnis zu ihrer Tragfähigkeit recht schwer. Außerdem

⁷⁶ Freystein, Muncke, & Schollmeier, 2008

Grundsätzlich liegt es im Ermessen des Auftraggebers einer Oberleitungsanlage, ob sich für Stahl- oder Betonmasten entschieden wird. Beide Werkstoffe sind in Deutschland zulässig und werden beim Neubau von Oberleitungsanlagen eingesetzt. Während noch vor einigen Jahren in Deutschland Betonmasten präferiert wurden, da angenommen wurde, sie seien langlebiger, weil ihre Bewehrung aufgrund der Betonummantelung im Gegensatz zu Stahlmasten korrosionsbeständig ist, tendiert heutzutage eine Großzahl der Bauherren zur Verwendung von Stahlmasten. Denn es hat sich herausgestellt, dass Stahlmasten, wenn sie sachgemäß verzinkt und lackiert werden, ebenso korrosionsbeständig sind. Außerdem hat es in den vergangenen Jahren Unfälle durch Witterungsschäden an Betonmasten gegeben. Trotzdem ist die Nachfrage nach Betonmasten noch nicht gänzlich erloschen. Wie die Nachfrage sich in den nächsten Dekaden entwickeln wird, ist nicht abzusehen. Aus diesem Grund wird in dieser Untersuchung angenommen, dass etwa ein Viertel der neu zu bauenden Masten aus Beton und drei Viertel aus Stahl bestehen werden.

Grundsätzlich gilt, dass der Preis für Masten mit zunehmender Höhe (zwischen 7 und 14 m) steigt und sich die Anzahl der benötigten Masten aus Streckenlänge und Längsspannweite ergibt. Dabei gilt: Je bogenreicher eine Strecke ist, desto geringer sind die Längsspannweiten, womit die Anzahl benötigter Masten steigt. Auch im Weichenbereich und an Zwangspunkten kann sich die Anzahl der benötigten Masten erhöhen.

4.4.4 Mastfundamente und Mastgründungen

Mastfundamente sind Bauwerke, die zur Übertragung von Kräften in den Baugrund dienen. Sie liegen zu etwa zwei Drittel ihres Gesamtvolumens im Boden und kommen in verschiedenen Formen vor. Die wichtigsten Fundamenttypen sind Ortbetonfundamente, welche als Block, in gestufter Form oder als Sonderfundament vorkommen, Ramm- bzw. Bohrpfahlgründungen sowie Ramm- bzw. Bohrrohrgründungen und Felsfundamente. Für Betonfundamente muss der Erdboden großflächig ausgebaggert und mit Stützwänden versehen werden, ehe der Beton vergossen werden kann und anschließend über mehrere Tage verhärten muss. Für Bohrgründungen wird ein Loch in das Erdreich vorgebohrt. Anschließend werden Pfähle oder Rohre in das entstandene Bohrloch gelassen, welches mit Zementmörtel und Boden wieder aufgefüllt und verdichtet wird. Auch für Rammfundamente kann es sich anbieten den Erdboden vorzubohren (aufzulockern), ehe Gründungspfähle oder -Rohre in das Erdreich gerammt werden. Die Auswahl des Fundamenttyps sowie deren Dimensionierung werden bestimmt durch:

- die Art und Größe des zu tragenden Mastes (Betonmast, Winkelmast, Rahmenflachmast, etc.),
- die Art und Größe der zu erwartenden Belastung (Grenzlast),
- die vorherrschenden Baugrundverhältnisse (Tragfähigkeit und Festigkeit des Baugrundes),

- die geometrischen Bedingungen für die Einordnung in vorhandene Anlagen (Kabel, Erdbauwerke, etc.), die technologischen Einbaubedingungen.

Grundsätzlich besteht sowohl für Stahl- als auch für Betonmasten die Möglichkeit Ortbeton- und Rammfahlgründungen vorzunehmen. Für Stahlmasten ist jedoch darauf zu achten, dass im Ortbeton Ankerbolzen verbaut sind. Rammpfähle werden für Stahlmasten zudem mit einem Betonkopf versehen, welcher ebenfalls mit Ankerbolzen ausgestattet sein muss, während hohle Schleuderbetonmasten direkt auf dem Rammfahl befestigt werden können. Rammrohrgründungen sind sowohl für Stahl- als auch für Betonmasten möglich. Bei Betonmasten kann im Gegensatz zu Stahlmasten sogar auf eine Direktgründung zurückgegriffen werden.⁷⁸

Blockfundamente sind die einfacheren Formen der Ortbetonfundamente. Sie haben einen prismatischen Körper mit nahezu senkrechten Wänden. Sie können nur dann verbaut werden, wenn ausreichend Platz vorhanden ist. Ihr Volumen steigt mit zunehmenden zu tragenden Lasten sowie mit abnehmender Qualität des Baugrundes. Werden Blockfundamente für Stahlmasten gebaut, müssen Ankerbolzen am Stahlbewehrungskorb befestigt sein. Die linke Seite der folgenden Abbildung zeigt Blockfundamente in Böschungen.

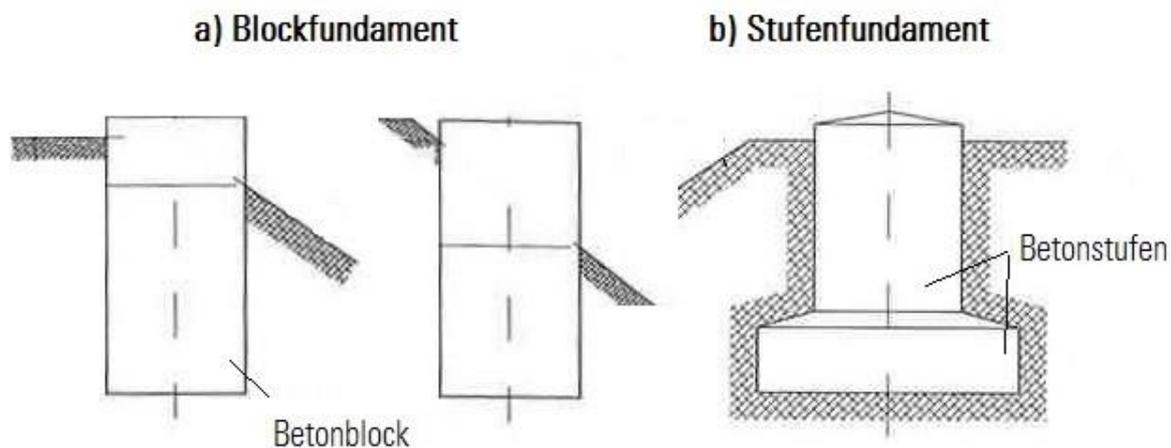


Abbildung 22: Schematische Darstellung von Betonfundamenten

Wenn der Baugrund eine zu niedrige Standfestigkeit vorweist und nicht gegen den gewachsenen Boden betoniert werden kann, greift man auf **Stufenfundamente** zurück. Sie bilden die aufwändigere Form der Ortbetonfundamente. Sie sind in der Lage, größeren äußeren Kräften standzuhalten und werden daher bevorzugt für Querfeldmasten, Abspannmasten und Festpunktankermasten genutzt. Ihren Namen tragen sie wegen des stufenförmig aufgebauten Betonkörpers, welcher in Abbildung 22 rechts dargestellt ist.

⁷⁸ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

Falls möglich wird bei der Planung und beim Bau von Fundamenten auf **Ramppfahlgründungen** zurückgegriffen. Da Rammpfahlgründungen nicht wie Ortbetonfundamente gebaggert, sondern in das Erdreich gerammt werden, ist ihr Flächenverbrauch selbst bei einer Dimensionierung für große Lasten vergleichsweise gering. Rammfundamente sind preislich günstiger als Ortbetonfundamente und bieten sich besonders für Standorte mit tiefliegenden, tragfähigen Bodenschichten an. Außerdem sind sie resistent gegenüber hohen Grundwasserständen und stören kaum an Bahndämmen. Für Stahlmasten müssen Rammpfahlgründungen mit einem Betonkopf inklusive Ankerbolzen ausgestattet sein. Als Ramm- bzw. Ankerpfahl werden in der Regel Doppel-T-Träger (einzeln, oder verbunden) oder Stahlpfähle aus Spundwandprofilen genutzt. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit Rohre (**Ramm- oder Bohrröhrgründung**) anstelle von Pfählen zu nutzen. Rohre sind zwar kostenintensiver als Pfähle, bieten sich aber besonders für Peiner- oder Betonmasten an. Die folgende Abbildung zeigt einige Beispiele von Rammpfahl- und Ramm- bzw. Bohrröhrgründungen für unterschiedliche Stahl- und Betonmasten im Profil. Zur Vereinfachung wird in dieser Untersuchung zwischen Rammpfahlgründungen für Flachmasten (kleine Fundamente) und Rammpfahlgründungen für Winkelmasten (große Fundamente) sowie Ramm- oder Bohrröhrgründungen für Beton- und Peinermasten unterschieden.⁷⁹

⁷⁹ Kießling, Puschmann, & Schmieder, 2014

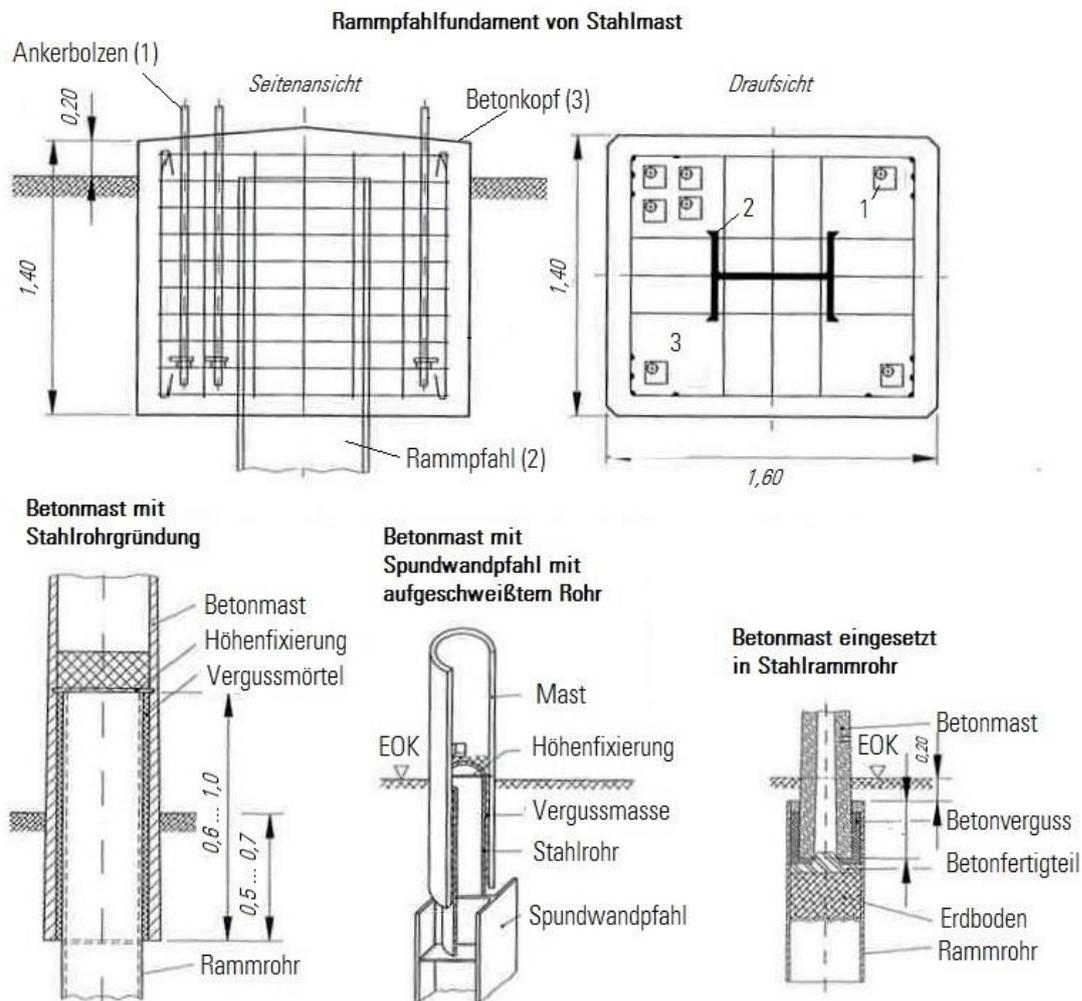


Abbildung 23: Schematische Darstellung von Pfahl- und Rohrgründungen

An Stellen, wo die zu bebauende Oberfläche aus Fels besteht, wird oft auf sogenannte **Felsfundamente** zurückgegriffen. Bei Felsfundamenten (Felsbohrgründungen) wird bei anstehendem Fels in die Steinoberfläche gebohrt. Anschließend werden die Bohrlöcher mit Ankerbolzen versehen und die Zwischenräume mit Zementmörtel verfüllt. Auch hier ist es nötig für Stahlmasten einen Betonkopf zu installieren.

Masten, die in Tunneln, auf Brücken oder auf anderen Ingenieurbauwerken installiert werden, bekommen keine Fundamentgründung. Für sie muss schon bei der Planung der Bauwerke eine Tragvorrichtung berücksichtigt werden.

Grundsätzlich können jegliche Gründungs- und Mastarten kombiniert werden. Es gibt jedoch klassische „Paarungen“ von Masten mit Fundamenten, die bevorzugt werden. Diese klassischen Paarungen werden zur Vereinfachung in der Mengenermittlung angenommen.

Dabei kommen für Winkel- und Flachmasten entweder Ortbeton- oder Rammpfahlfundamenten in Frage, während Stahlprofil- und Betonmasten ausschließlich als Einsetzmasten mit Ramm- oder Bohrröhrgründung betrachtet werden.⁸⁰

4.4.5 Oberleitungen für bestehende (bisher nicht elektrifizierte) Tunnel, Brücken und Ingenieurbauwerke

Tunnel stellen eine besondere Herausforderung für den Oberleitungsbau dar, vor allem wenn es sich um Bestandstunnel handelt, die bislang nicht mit einer Oberleitung ausgestattet sind. Der Grund für die Schwierigkeiten beim Bau von Oberleitungen in Tunneln ist, dass die lichte Höhe des Tunnels ausreichend groß für die Stromabnehmer der Triebfahrzeuge sein muss. Gleichzeitig darf die Fahrdrathöhe den Wert von 5050 mm nicht unterschreiten und der Mindestabstand von 150 mm zwischen Fahrdrath und Decke muss stets eingehalten werden. Wenn Eisenbahntunnel nicht elektrifiziert geplant werden, heißt das, dass möglicherweise nicht ausreichend Platz für Ausleger mit Stützpunkten und für die Einhaltung der Mindestabstände vorhanden ist. Dies würde darin resultieren, dass bautechnische Maßnahmen, wie Tunnelprofilerweiterungen oder Gleisabsenkungen anfielen. Weil solche Maßnahmen allerdings überaus teuer sind, gilt es eine günstigere Alternative für die Elektrifizierung von bestehenden Tunneln zu finden.

Solch eine Alternative bietet die **Deckenstromschiene**. Sie ist aufgrund ihrer geringen Systemhöhe besonders für Tunnel mit zu wenig Raum für Hochkettenoberleitungen geeignet.⁸¹ Grundbestandteile der Deckenstromschiene sind etwa 12 m lange stangengepresste Aluminiumhohlprofile, in denen am unteren Ende handelsüblicher Kupferrillenfahrdrath eingeklemmt wird. Die kontinuierliche Lagerung des Fahrdrathes bewirkt, dass dieser nicht abgespannt werden muss. Auf diese Weise kann auf raumintensive Abspannvorrichtungen verzichtet werden. Dabei wirken kaum vertikale Zugkräfte auf die Stützpunkte, sodass diese baulich vergleichsweise klein ausfallen. Ein weiterer Vorteil des nicht abgespannten Fahrdrathes ist, dass wegen des geringeren Bruchrisikos bis zu 40 % Fahrdrathverschleiß zulässig sind, was dessen Lebensdauer erhöht. Die Aluminiumhohlprofile werden durch Verbindungslaschen elektrisch verbunden. Alle acht bis zwölf Meter (je nach Geschwindigkeit) sind die Profile an Stützpunkten verankert. Um temperaturbedingte Volumenänderungen der Hohlprofile auszugleichen, werden alle 500 m etwa vier Meter lange Parallelfelder in der Deckenstromschiene angeordnet.⁸² Diese werden mit elektrischen Verbindungen überbrückt. Etwa in der Mitte der 500-Meter-Abschnitte befinden sich Festpunkte. Sollten Streckentrennungen im Tunnel anfallen, können ebenfalls Parallelfelder eingerichtet werden. Diese werden jedoch nicht elektrisch verbunden, sondern mittels Schalter voneinander ge-

⁸⁰ Meinel & Autorenkollektiv, 1988

⁸¹ Tessun, 2006

⁸² Tessun, 2006

trennt. Weil die Deckenstromschiene eine hohe Stromtragfähigkeit hat, kann auf den Gebrauch einer Verstärkerleitung verzichtet werden. Für die Erdung der Deckenstromschiene werden Erdungsklemmen benötigt. Nach Zustimmung des EBA kann jedoch auf Erdungen verzichtet werden, was eine enorme Aufwandsminderung zur Folge hat. Das ankommende Kettenwerk verläuft im Tunnel noch etwa 16 m parallel zur Deckenstromschiene und wird anschließend an der Tunneldecke fixiert (mit Verwendung eines Streckentrenners). Die Deckenstromschiene ragt ca. 1,5 m über ihren letzten bzw. ersten Stützpunkt in Richtung der offenen Strecke hervor. Stromschiene und Kettenwerk werden dabei elektrisch verbunden. Um die Elastizität des Kettenwerkes zusätzlich zu verringern, wird ab einer Längsspannweite von 35 m auf Y-Beiseile verzichtet und ab der Längsspannweite von 20 m wird der Fahrdraht mit einem angeklebten zweiten Fahrdraht versteift.

Da dieser Studie keine ausführliche Datengrundlage über die bestehenden Tunnel des nichtelektrifizierten Eisenbahnnetzes in Deutschland zugrunde liegt, soll vereinfacht angenommen werden, dass aufgrund der oben erläuterten Vorteile die zu betrachtenden Tunnel mit einer Deckenstromschiene ausgestattet werden können. Die Befahrgeschwindigkeit bis maximal 160 km/h wird durch vorhandene Technologien gewährleistet.

Eisenbahnbrücken und andere Ingenieurwerke sind für elektrifizierte Strecken bereits bei der Bauwerksplanung mit entsprechenden Vorrichtungen für Oberleitungsmasten vorzusehen. Eisenbahnbrücken von nicht elektrifizierten Strecken sind im Regelfall nicht für das Tragen von Oberleitungsmasten ausgestattet. Aus statischen Gründen und wegen des Platzmangels ist es daher schwierig, Eisenbahnbrücken des Bestandes nachträglich mit Oberleitungen auszustatten. Wenn Brücken wesentlich kürzer als die maximale Längsspannweite von 80 m sind, besteht in einigen Fällen die Möglichkeit, das Kettenwerk über die Brücke hinweg zu spannen, ohne Masten auf der Brücke errichten zu müssen. Sollte dies nicht möglich sein, kann eine Oberleitung an Brücken oder Ingenieurbauwerken mittels Anklammervorrichtungen oder ähnlichen speziellen Bauwerken befestigt werden. Für solche Ausnahmefälle gibt es jedoch keine standardisierte, zu präferierende Vorgehensweise. Jeder Fall einer nicht elektrifizierten Bahnstrecke auf Brücken sowie auf und an Ingenieurbauwerken müsste einzeln betrachtet und untersucht werden, um mögliche Kosten der nachträglichen Elektrifizierung ermitteln zu können. Gibt es keine Möglichkeiten der nachträglichen Elektrifizierung von Brücken und Ingenieurbauwerken, müssen diese unter Berücksichtigung von Maststandorten neu gebaut werden. Diese Variante soll jedoch möglichst vermieden werden, da sie sehr kostenintensiv ist. Gründungen für Masten werden auf Brücken nicht vorgesehen, dafür existieren auf dem Bauwerk installierte Vorrichtungen zur Mastbefestigung. Stahlmasten sind auf Brücken und Ingenieurbauwerken vorteilhaft, da sie sich gut mit Ankerbolzen befestigen lassen. In jedem Fall ist darauf zu achten, dass Stahlbrücken sowie Stahlbewehrungen in Betonbrücken an das Erdungssystem der Eisenbahnstrecke anzuschließen sind.

Vereinfacht soll für den Fortgang dieser Untersuchung angenommen werden, dass bestehende Brücken und Ingenieurbauwerke mit mastähnlichen Anklammervorrichtungen ausgestattet werden, die preislich mit regulärem Oberleitungsmasten zu vergleichen sind und deswegen keiner genaueren Betrachtung bedürfen.

Für den Fall, dass Brückenbauwerke neu gebaut oder angepasst werden müssen, da sie keinen Platz oder eine zu geringe Tragfähigkeit für Oberleitungsanlagen haben bzw. deren lichte Höhe zu gering für abgesenkte Hochketten sind, wird in Abschnitt 4.5.3 ein kilometer-spezifischer Kostenaufschlag durch Auswertung vorangegangener Untersuchungen hergeleitet.

4.4.6 Streckenparameter und Streckenkategorisierung

4.4.6.1 Einfluss der Streckenparameter auf die Mengen- und Bedarfsermittlung

In den vorangestellten Abschnitten wurde vorgestellt, wie Oberleitungs- und Schaltanlagen aufgebaut sind. Um die Kosten für den Neubau solcher Anlagen zu ermitteln, ist es nicht nur nötig zu wissen, welche Elemente und Bauteile zu berücksichtigen sind, sondern auch in welcher Häufigkeit diese vorkommen, wie sie angeordnet sind und unter welchen Bedingungen sie geplant und eingebaut werden.

Die Anzahl der Masten und Mastfundamente, die Länge des Kettenwerkes und somit auch die Anzahl der zum Kettenwerk gehörenden Elemente und alle Bauteile der Mastausstattung stehen im Wesentlichen in Abhängigkeit zur Länge der zu elektrifizierenden Strecke, dem Bogenverhalten der Strecken, der Gleisanzahl und der Regelbauart der Oberleitungsanlagen. Auf gerader, freier Strecke können Masten mit Ausstattungselementen, je nach Wunsch des Auftraggebers, in großen Abständen (bei maximaler Längsspannweite von bis zu 80 m) geplant und gebaut werden. Mit Zunahme der Anzahl von Bögen und mit Abnahme der Gleisradien verkürzt sich die potenzielle Längsspannweite, was zur Folge hat, dass in bogenreichen Strecken und in Strecken mit engen Gleisradien mehr Masten als auf gerader Strecke benötigt werden. Mit den Kettenwerken verhält es sich ähnlich. Auf geraden Strecken können Nachspannlängen von bis zu 1500 m voll ausgeschöpft werden, doch mit zunehmender Anzahl enger Streckenradien müssen Kettenwerke häufiger nachgespannt werden. Je mehr Überlappungen auf einer Strecke zustande kommen, desto länger wird demnach das benötigte Kettenwerk der Strecke.

Eingleisige Bahntrassen benötigen auf freier Strecke etwa die Hälfte der Oberleitungselemente gegenüber zweigleisigen Bahntrassen.

Für die Wahl des Kettenwerks ist die Betriebsgeschwindigkeit der zu befahrenden Strecke zu beachten. In dieser Untersuchung soll gelten: Wird eine Strecke mit bis zu 100 km/h

befahren, wird eine Oberleitungsanlage der Bauart Re 100 geplant, während sich bei Streckengeschwindigkeiten von 110 km/h bis einschließlich 160 km/h für die Re 200-Bauweise entschieden wird. Dieser Sachverhalt ist zwar wichtig für die Ermittlung der Material- und Baukosten des Kettenwerkes, doch da die Längsspannweiten und Nachspannlängen bei Re 100 und Re 200 identisch sind, hat er keinen Einfluss auf die Anzahl und Menge der Bauelemente. Da keine der noch nicht elektrifizierten deutschen Eisenbahnstrecken laut der zugrundeliegenden Datenbasis eine höhere Streckengeschwindigkeit als 160 km/h aufweist, sind alle Oberleitungsregelbauarten außer Re 100 und Re 200 nicht von Relevanz.

Ein weiteres Kriterium, welches vor allem auf die Wahl der Mastgründungen Einfluss hat, ist die Bodenbeschaffenheit. So hängen die Wahl und die Dimensionierung der Mastfundamente sowohl von der Bodenart als auch vom Bodenprofil ab. Grundsätzlich werden heutzutage Ramm- und Bohrfundamente bevorzugt, denn ihr Einbau ist besonders bei beengten Verhältnissen vorteilhaft.

In Bahnhöfen und Haltepunkten variiert die Menge benötigter Oberleitungselemente gegenüber der freien Strecke. Es sind oft mehr als zwei Gleise vorhanden, was die Anzahl benötigter Masten, Ausleger, etc. sowie die Länge des benötigten Kettenwerkes (z.B. Weichenkettenwerke) deutlich erhöht. Weiterhin befinden sich Energieversorgungselemente und Schaltanlagen sowie Vorrichtungen der Ortssteuereinrichtung (OSE) vorrangig im Bahnhofsbereich.

Tunnel, Brücken und Ingenieurbauwerke bedürfen einer differenzierten Betrachtung. Wie in Abschnitt 4.4.5 beschrieben wird, gibt es keine klassische Regellösung für die Errichtung von Oberleitungsanlagen auf Brücken und Ingenieurbauwerken. Die Kosten für alternative Lösungen zur Bespannung von Brücken und Ingenieurbauwerken (z.B. spezielle Anklammervorrichtungen) sind nicht zwangsläufig höher als die Kosten der Standardbauweise mit Masten und Fundamenten. Der Planungs- und Logistikaufwand steigt zwar, doch im Gegenzug sinken Materialkosten durch das Wegfallen des Fundamentes.

Die Errichtung von Deckenstromschienen als Standardlösung in Tunneln ist für die Kostenermittlung von Relevanz. Aus diesem Grund ist es nötig aufzuführen, welchen Tunnelanteil die bisher nichtelektrifizierten Bahnstrecken aufweisen. Obwohl es an Tunnelportalen einen Mehrbedarf an Masten gibt, wird aufgrund der reduzierten Anzahl an Masten im Bereich von Deckenstromschienen auf eine rechnerische Anpassung der Mastanzahl im Tunnelbereich verzichtet.

4.4.6.2 Ableitung geeigneter Streckenkategorien

Die in Abschnitt 4.4.5 erarbeiteten Streckendaten bilden die Grundlage für die Berechnung der Streckenelektrifizierung. Zu den verwertbaren Informationen gehören Streckennummer, Streckenlänge, Namen der Knotenpunkte, Angaben über die Traktionsart der Strecken

(Elektrisch, Diesel), Anzahl der Gleise (eingleisig oder zweigleisig), Höhe der zu befahrenden Geschwindigkeit und Höhenlage der Knotenpunkte. Des Weiteren sind die Strecken bezüglich ihrer Höhenlage kategorisiert. Die Untergliederung erfolgt in 0 - 300 m ü. NN, 300 - 750 m ü. NN, 750 - 1200 m ü. NN und 1200 - 3000 m ü. NN.

Die Daten geben nicht an, welche Gleisradien auf den einzelnen Streckenabschnitten zu erwarten sind. Aus diesem Grund wurde entschieden, dass anhand der Höhenangaben von Strecken und Knotenpunkten auf die Bogenläufigkeit der jeweiligen Eisenbahnstrecke rückgeschlossen wird. Anhaltspunkt dafür soll die deutschlandspezifische morphologische Untergliederung der Landschaft in Flachland, Mittelgebirge und (Hoch-) Gebirge sein.

Das Flachland, welches sich über den nördlichen Teil Deutschlands verbreitet, wird vertreten von der Kategorie 0 - 300 m. Das daran gen Süden anknüpfende Mittelgebirgsgebiet wird von der Kategorie 300 - 750 m repräsentiert. Die übrigen Kategorien 750 - 1200 m und 1200 - 3000 m werden aufgrund ihrer geringeren Streckenzahlen zur Kategorie Gebirge zusammengeführt, welche fast ausschließlich in den südlichsten Teilen der Republik zu finden ist. Der Ansatz hinter dieser Kategorisierung ist, anhand der Höhenlage auf den Verlauf der Radien von Eisenbahnstrecken zu schließen. Dabei gilt: Je höher die Elevation der Strecke, desto „gebirgiger“ ist das zu erwartende Gelände und je gebirgiger das Gelände, desto zahlreicher und enger sind die zu erwartenden Bogenradien. Es ist demnach zu erwarten, dass in den Kategorien Mittelgebirge und Gebirge eher bogenreichere Strecken zu finden sind als im Flachland. Daher wird angenommen, dass in den Kategorien der höheren Lagen mehr Masten (kürzere Längsspannweiten), vor allem mehr Winkelmasten und mehr Kettenwerk benötigt werden. Weiterhin wird erwartet, dass auch das Bodengefüge in Abhängigkeit von der nach Höhenlage gegliederten Landschaftsmorphologie steht. Die vermutete Verteilung der Fundamenttypen sollte demnach anhand der vorgestellten Kategorien differenzierbar sein.

Zur Ermittlung der benötigten Oberleitungsbauteile wurden die Längenangaben der Strecken benutzt. Es wurden unterschiedliche Kategorien gefiltert und ausgewertet. Da für diese Untersuchung lediglich der noch nicht elektrifizierte Teil des Eisenbahnnetzes von Bedeutung ist, wurden zunächst alle in der Datenbasis enthaltenen elektrifizierten Strecken ausgeblendet. Somit konnte für das Streckennetz von 2010 ermittelt werden, dass es zu diesem Zeitpunkt in Deutschland eine Gesamtlänge von 18.523,10 km nichtelektrifizierter Eisenbahnstrecken gab. Davon gehören 8.784,81 km zur Kategorie Flachland, 6.328,64 km gehören zum Mittelgebirge und 3.409,65 km zum Gebirge. Des Weiteren wurde herausgefunden, dass 15.967,50 km eingleisig und 2.555,60 km zweigleisig sind. 14.358,80 km können mit Re 100 ausgestattet werden und 4.164,30 km mit Re 200. Zusätzlich wurde ermittelt, dass etwa 148 km der Gesamtstrecke durch Tunnel führen.⁸³ Davon sind 32,23 km eingleisige und 57,77 km zweigleisige Tunnel. Die Verteilung und Untergliederung einzelner Streckenparameter anhand der Kategorien sind folgender Tabelle zu entnehmen. Anhand

⁸³ Brill, 2017

dieser Werte wird im Folgenden die Mengenbedarfsermittlung für die Elektrifizierung durchgeführt. Es ist darauf zu achten, dass für zweigleisige Strecken im Zuge der Bedarfsermittlung mit dem doppelten Wert gerechnet wird, um die gesamte Gleislänge und nicht die reine Streckenlänge zu berücksichtigen. Weiterhin ist festzuhalten, dass anhand der Streckengeschwindigkeiten auf die Regelbauart geschlossen wurde. So wurde allen Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von über 100 km/h (bis 160 km/h) eine Re 200 Oberleitung und allen Eisenbahnstrecken mit einer Geschwindigkeit bis einschließlich 100 km/h eine Re 100 Oberleitung zugeordnet.

Kategorie		Gleisanzahl und Kettenwerkstyp			
Höhenlage	Benennung	1 Gleis Re 100	1 Gleis Re 200	2 Gleise Re 100	2 Gleise Re 200
0 ... 300 m	Flachland	6755,2 (36,47 %)	1172,6 (6,33 %)	404,5 (2,18 %)	452,5 (2,44 %)
300 ... 750 m	Mittelgebirge	4328,9 (23,37 %)	901,8 (4,87 %)	522,0 (2,82 %)	575,9 (3,11 %)
> 750 m	Gebirge	2213,0 (11,95 %)	595,9 (3,22 %)	135,1 (0,73 %)	465,6 (2,51 %)
		[km]			

Tabelle 60: Angaben über Streckenlängen im nichtelektrifizierten deutschen Eisenbahnnetz 2010

Neben den höhenabhängigen Kategorien der freien Strecke wurde eine weitere Kategorie zur Mengenermittlung der Oberleitungselemente gebildet – die Kategorie „Bahnhöfe und Haltepunkte“. Da die zur Verfügung gestellten Daten keinerlei Auskunft über die Art der Bahnhofsanlage geben, ließ sich nicht ohne Weiteres ermitteln, wie viele nichtelektrifizierte Bahnhöfe im deutschen Streckennetz zu finden sind, geschweige denn wie groß diese sind (Gleisanzahl, Länge) oder wie groß der Anteil der nichtelektrifizierten Bahnhofsgleise im bereits elektrifizierten Streckennetz ist. Um dennoch eine Unterteilung zwischen freier Strecke und Bahnhof zu ermöglichen, wurde der Anteil der nichtelektrifizierten Strecken des deutschen Streckennetzes auf die Anzahl aller in Deutschland vorhandenen Bahnhöfe und Haltepunkte übertragen. Entsprechend den vorhandenen Streckendaten sind 48,56 % aller deutschen Eisenbahnstrecken nichtelektrifiziert. Bei 6.594 Bahnhöfen und Haltepunkten in Deutschland bedeutet das, dass etwa 3.200 Bahnhöfe und Haltepunkte in der Bundesrepublik noch nicht mit Oberleitungsanlagen ausgestattet sind.⁸⁴ Da zu diesen 3.200 Bahnhöfen und Haltepunkten keine Angaben über deren Größe vorliegen, werden sie als „Stückzahl“ mit einheitlichen Dimensionen betrachtet.

⁸⁴ DB AG, 2017

4.4.7 Kilometerspezifisches Mengengerüst

Zur Herleitung eines realitätsnahen kilometerspezifischen Mengengerüsts für die Oberleitung wurden an der Professur für Elektrische Bahnen vorliegende Unterlagen bereits abgeschlossener Elektrifizierungsprojekte aus den letzten 10 Jahren genutzt. Für jede Streckenkategorie (Flachland, Mittelgebirge, Gebirge) wurden daraus jeweils drei typische Referenzstrecken und für die Kategorie der Bahnhöfe und Haltepunkte fünf Referenzbahnhöfe ausgesucht, die benötigten Oberleitungselemente anhand von Bespannungsplänen und Stücklisten ausgezählt und anschließend auf einen Kilometer Strecke als spezifische Werte umgelegt. Aus den Angaben der einzelnen Strecken, die hinsichtlich der benötigten Mengen teilweise stark streuten, wurden schließlich Mittelwerte gebildet.

Die Kriterien zur Auswahl der Strecken waren: Vollständigkeit der Daten (Oberleitungsplan inklusive aller dazugehörigen Bauteile sowie Querprofile oder Masttafeln), Mindestlänge (ca. 5 km), freie Strecke und Oberleitungsbauart Re 100 oder Re 200. Außerdem wurde darauf geachtet, dass besonders in den Kategorien der höheren Lagen keine (bzw. kaum) Brücken, Ingenieurbauwerke oder Tunnel vorhanden waren, da diese die spezifischen Mengenangaben über benötigte Bauteile und Elemente verfälschen können. Die Referenzstrecken sind sowohl eingleisig als auch zweigleisig. Um dennoch einen einheitlich vergleichbaren Wert zu erhalten, wurde die Streckenlänge zweigleisiger Strecken mit dem Faktor zwei multipliziert. Auf diese Weise konnten die Werte für „Bauteile je Kilometer“ einheitlich ermittelt werden. Außerdem fanden die Auszählungen lediglich außerhalb von Bahnhöfen statt. Oberleitungselemente, welche durch Bahnhöfe oder Haltepunkte zusätzlich zum freien Streckenverlauf hinzukamen, wurden nicht gezählt.

Alle Referenzstrecken und deren wichtigste Parameter sind in folgender Tabelle aufgelistet, deren Lageverteilung in Deutschland ist durch die nächste Abbildung bildlich dargestellt.

Nr.	Kategorie	Streckennr.	von		bis		Streckenlänge [km]	Gleise [Stk]	Gleislänge [km]	Regelbauart
			Name, Ort	km	Name, Ort	km				
1	Flachland	1120	Lübeck	3,70	Reinsfeld	15,2	11,50	2	23,00	Re200
2	(0-300 m)	6403	Gnaudau	20,40	Calbe	26,8	6,40	2	12,80	Re 200
3		2542	Lindern	0,00	Heinsberg	12,2	12,20	1	12,20	Re 100
4	Mittelgebirge	5321	Triesdorf	36,30	Oberdachstetten	70,2	31,70	2	63,40	Re 200
5	(300-750 m)	6362	Plauen	117,20	Gutenfürst	152,6	35,40	2	70,80	Re 200
6		5010	Ebensfeld	16,50	Pobstzella	52,8	36,30	2	72,60	Re 200
7	Gebirge	5703	Traunstein	46,80	Bergen	53,6	6,80	2	13,60	Re 200
8	(> 750 m)	5741	Bischofswiesen	13,90	Berchtesgaden	18,3	4,40	1	4,40	Re 100
9		5504	GAP	101,00	Klais	112	11,00	1	11,00	Re 100

Tabelle 61: Technische Daten der Referenzstrecken [eigene Darstellung]

Die höhenlagenunabhängige Kategorie der Bahnhöfe und Haltepunkte unterschied sich bezüglich der Auszählung der Oberleitungselemente von der freien Strecke. Es wurden insgesamt fünf Referenzbahnhöfe gewählt. Die Kriterien zur Auswahl der Bahnhöfe gleichen denen der freien Strecken mit dem Zusatz, dass in den Referenzbahnhöfen keine Quertragwerke vorhanden sein durften. Elastische Quertragwerke sind für den Neubau nicht zulässig und bei der Auszählung würden sie den Durchschnittswert der Mastanzahl künstlich

verringern. Also mussten Referenzbahnhöfe gesucht werden, welche lediglich mit Einzelstützpunkten bestückt sind. Weiterhin war darauf zu achten, dass Bahnhöfe bzw. Haltepunkte in verschiedenen Größen vertreten sind. Dabei wurde angenommen, dass „große Bahnhöfe“ (z.B. Kategorie eins und zwei nach Bahnsteigkantenanzahl lt. Bahnhofskategorie von DB Station & Service) des deutschen Eisenbahnnetzes bereits elektrifiziert sind, weswegen sich bei der Suche nach Referenzbahnhöfen auf kleine bis mittelgroße Exemplare (Kategorien drei bis sechs) konzentriert wurde. Die letztendlich verwerteten Bahnhöfe und Haltepunkte sind in der folgenden Tabelle mit ihren jeweiligen Charakteristika zusammengeführt. Ihre Lage in Deutschland wird in der darauffolgenden Abbildung dargestellt.

Nr.	DS100 Bezeichnung	Name	Durchgehende Hauptgleise	Bahnhofsgleise	Regelbauart
10	LWO	Wolfen	2	3	Re 100 / Re 200
11	NLE	Lehrberg	2	3	Re 200
12	MKBN	Kaltenbrunn (Oberbayern)	1	2	Re 100
13	DSA	Bad Schandau	2	6	Re 100 / Re 200
14	DWR	Werdau	2	8	Re 100 / Re 200

Tabelle 62: Technische Daten der Referenzbahnhöfe

Aufgrund der fehlenden Informationen über die Anzahl und Größe nichtelektrifizierter Bahnhöfe und Haltepunkte wurden Bahnhöfe als Stückzahl betrachtet. Das bedeutet: es wurde ein Mittelwert aus allen Referenzbahnhöfen ermittelt, welcher nicht explizit in Gleisanzahl oder Gleislänge untergliedert wurde. Da angenommen wurde, dass die Mehrzahl der nichtelektrifizierten Bahnhöfe und Haltepunkte eher „klein“ ist, gehen drei von fünf Bahnhöfen mit einer Gleisanzahl kleiner als vier und nur zwei Bahnhöfe mit einer Gleiszahl größer als vier in die Berechnung des Mittelwertes für Oberbauelemente je Bahnhof ein.

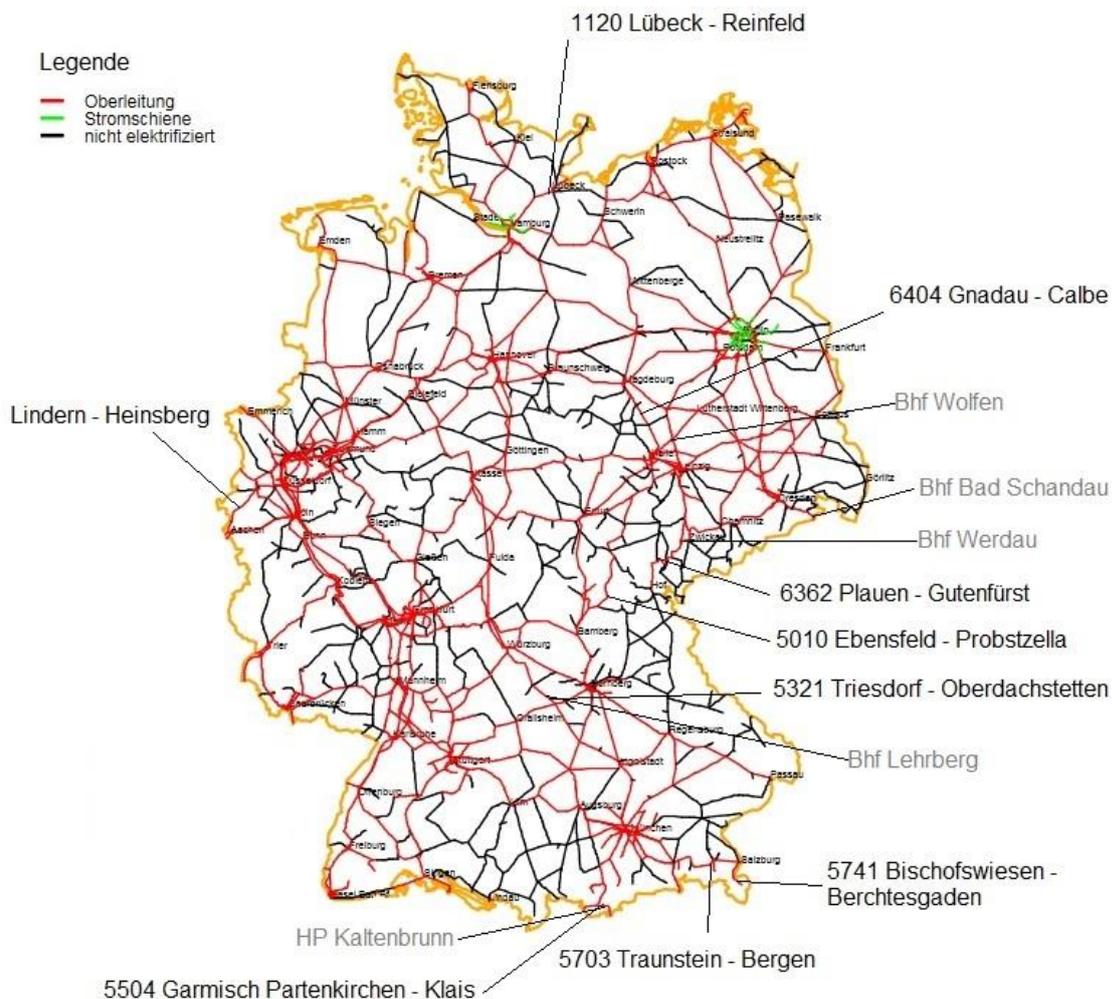


Abbildung 24: Verteilung der ausgesuchten Referenzstrecken und -bahnhöfe in Deutschland

In den aufgezählten Referenzstrecken und -bahnhöfen wurden alle Bauteile der Oberleitungsanlage gezählt und in den Kategorien Flachland, Mittelgebirge und Gebirge auf einen Kilometer Strecke umgelegt (nur freie Strecke), so dass herausgefunden werden konnte, wie viele Bauteile je Kategorie pro Streckenkilometer bzw. pro Bahnhof/Haltepunkt zu erwarten sind. Die Ergebnisse dieser Auszählung für die Oberleitungselemente können der folgenden Tabelle und für die Mastverteilung der übernächsten Tabelle entnommen werden. Da die Einzelwerte streckenabhängig streuen, sind zusätzlich zu den Mittelwerten (Erwartungswerten) auch die jeweiligen Streubereiche mit aufgeführt.

Oberleitungselemente	Flachland (0-300m)			Mittelgebirge (300-750m)			Gebirge (>750m)			Bahnhöfe / Haltepunkte		
	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max	Min	Ø	Max
KW Zusatz [%]	14,20	16,06	17,96	17,15	17,50	17,72	16,61	21,50	24,61	2,46	8,79	14,32
Festpunkte	0,78	0,88	0,96	0,96	0,99	1,03	0,66	1,08	1,59	1,00	5,20	11,00
Elektrische Verbinder	1,56	1,87	2,13	1,92	2,03	2,11	2,18	2,88	4,09	2,00	30,20	62,00
Isolatoren	4,69	5,50	6,07	5,76	6,04	6,20	6,03	7,92	11,36	14,00	77,60	140,00
Masten	13,44	15,94	18,03	17,13	18,16	18,79	19,12	22,13	26,36	19,00	92,80	182,00
Fundamente	13,44	15,94	18,03	17,13	18,16	18,79	19,12	22,13	26,36	19,00	92,80	182,00
Fundamentanker	0,00	0,05	0,16	0,13	0,58	1,45	0,00	0,76	2,27	0,00	0,20	1,00
Ausleger	15,08	17,88	20,16	19,29	20,22	20,85	21,99	25,18	30,45	19,00	162,60	291,00
Mehrgleisausleger	0,00	0,07	0,13	0,00	0,03	0,05	0,00	0,17	0,51	0,00	17,80	46,00
Radspanner	1,56	1,76	1,91	1,92	1,97	2,07	1,32	2,17	3,18	3,00	19,60	38,00
Feste Kettenwerksendverankerung	0,00	0,11	0,33	0,00	0,06	0,19	0,18	0,71	1,03	1,00	7,60	12,00
Schalter	0,13	0,47	0,82	0,35	0,49	0,59	0,23	0,41	0,64	2,00	11,20	17,00
Schalterquerleitung	0,00 (Minimum)			0,05 (Mittelwert)			0,16 (Maximum)			0,00	2,80	6,00
Streckentrenner	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	5,60	10,00
Masterdung	13,44	15,94	18,03	17,13	18,16	18,79	19,12	22,13	26,36	19,00	92,80	182,00
Schienenverbinder	1,00	5,15	7,74	1,00	5,46	8,36	1,00	1,33	2,00	0,00	22,60	69,00
Gleisverbinder	0,00	1,24	1,91	0,00	1,56	2,18	0,00	0,33	1,00	0,00	9,00	29,00

Tabelle 63: Zusammenfassung der Mengenermittlung von Oberleitungselementen anhand von Referenzstrecken

Kategorie	Kennwert	Tragmasten	Abspannmasten	Stahlprofilmasten	Einheit
Flachland	Minimum	66,82	17,27	0,00	%
	Mittelwert	69,38	24,97	5,66	%
	Maximum	71,54	30,23	15,91	%
Mittelgebirge	Minimum	72,28	18,40	0,00	%
	Mittelwert	76,01	23,08	0,91	%
	Maximum	79,11	27,72	2,49	%
Gebirge	Minimum	67,31	23,28	0,00	%
	Mittelwert	72,22	27,21	0,57	%
	Maximum	75,00	32,69	1,72	%
Bhf / Hp	Minimum	20,83	38,10	0,00	%
	Mittelwert	40,22	57,28	2,50	%
	Maximum	61,90	71,67	7,50	%

Tabelle 64: Referenzierte Verteilung unterschiedlicher Masttypen

Wie in Abschnitt 2.2.3 bereits erwähnt, werden sowohl Stahl- als auch Betonmasten als Träger von Einzelstützpunkten in Deutschland verwendet. Um herauszufinden, mit welchem Anteil die beiden Werkstoffgruppen vertreten sind, wurden alle Masten von allen Referenzstrecken und aus allen Kategorien bzgl. des Werkstoffs untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass von 5602 referenzierten Masten, 1427 aus Beton und 4175 aus Stahl sind. Das bedeutet, dass der Anteil von Betonmasten fast genau einem Viertel entspricht, während 75 % aller Masten Stahlmasten sind. Dieses Verhältnis der Werkstoffverteilung für Oberleitungsmasten wurde für den Neubau von Oberleitungsanlagen von Experten als realistisch eingeschätzt und kann somit bei der Ermittlung des letztlich benötigten Mengengerüsts Anwendung finden.

4.4.8 Benötigtes Mengengerüst für die Oberleitungsanlagen

Basierend auf dem in Abschnitt 4.4.7 ermittelten kilometerspezifischen Mengengerüst kann durch Multiplikation mit der jeweiligen Gleislänge unter Berücksichtigung der Streckenkategorie das benötigte Mengengerüst errechnet werden. Die folgende Tabelle, welche die Grundlage für die später durchgeführte Ermittlung der Kosten einer Komplett elektrifizierung

darstellt, fasst alle Erkenntnisse der Bedarfsermittlung zusammen. Sie zeigt, welche Bauteile, Elemente, Kabel und Seile mit welcher Häufigkeit im gesamtdeutschen nichtelektrifizierten Eisenbahnnetz für die Errichtung der Oberleitungsanlage erwartet werden.

Oberleitungselemente	Minimum	Mittelwert	Maximum	Einheit
Kettenwerk Re 100	25.697,22	46.234,47	64.172,73	km
Kettenwerk Re 200	6.559,12	6.679,72	6.771,25	km
Festpunkte	20.519,41	36.787,78	58.474,75	Stk
Elektrische Verbinder	44.480,85	141.292,28	251.050,57	Stk
Isolatoren	156.973,05	377.920,12	598.087,54	Stk
Masten	329.589,71	674.251,33	1.294.424,71	Stk
Fundamente	329.589,71	674.251,33	1.294.424,71	Stk
Fundamentanker	3.929,15	28.676,71	47.095,20	Stk
Ausleger	437.608,74	943.843,99	1.402.623,24	Stk
Mehrgleisausleger	0,00	58.540,38	150.873,19	Stk
Radspanner	44.238,81	103.015,57	168.149,50	Stk
Feste				
Kettenwerksendverankerung	3.929,15	28.676,71	47.095,20	Stk
Schalter	9.149,40	43.154,38	59.190,61	Stk
Schalterquerleitung	0,00	9.927,11	22.474,94	Stk
Streckentrenner	0,00	17.920,00	32.000,00	Stk
Masterdung	329.589,71	674.251,33	1.294.424,71	Stk
Schienenverbinder	21.078,70	167.911,84	365.532,35	Stk
Gleisverbinder	0,00	53.632,59	131.417,99	Stk

Tabelle 65: Voraussichtlich benötigte Anzahl von Oberleitungselementen für die Elektrifizierung des gesamtdeutschen Eisenbahnnetzes

Der **Mastbedarf** konnte auf Grundlage des zuvor beschriebenen kilometerspezifischen Mengengerüsts, der Daten der Mastverteilung (Anteil einzelner Masttypen), der Daten der Werkstoffverteilung von Masten und der Gleiskilometerlänge ermittelt werden. Die Berechnung wurde für alle Kategorien der freien Strecke durchgeführt. In der Kategorie „Bahnhöfe und Haltepunkte“ wurden keine kilometerspezifischen Werte, sondern absolut ermittelte Mastzahlen (Minimum, Mittelwert, Maximum) genutzt, welche mit der vorher ermittelten Anzahl zu erwartender Bahnhöfe multipliziert wurden.

In Abschnitt 4.4.4 wird ausgeführt, dass die Verteilung der **Fundamente** aufgrund von klassischen Paarungen zwischen Masten und Fundamenten von der Mastverteilung abhängig ist. Demnach wurden für Stahlmaste Ramppfahl- und Ortbetonfundamente vorgesehen, Beton- und Stahlprofilmasten wurden als Einsetzmaste mit Rammrohr- oder Bohrröhrgründungen ausgestattet.

Auch die Ermittlung des Bedarfes an Mastausstattungs-elementen, Erdungen und allgemeinen Bauteilen der Oberleitung basiert auf dem Ansatz der Multiplikation von Gleislänge und kilometerspezifisch benötigter Komponentenstückzahl und in Bahnhöfen auf absolut ermittelten Werten. U.a. wurden dabei benötigte Stückzahlen für Mastanker (-Fundamente), Radspanner, feste Kettenwerksendverankerungen, Schalter, Schalterquerleitungen, Stre-

ckentrenner, Stromverbinder, Festpunkte, elektrische Verbinder, Isolatoren, Mehrgleisausleger und Ausleger sowie die Erdungsbauteile Masterdung und Schienen- und Gleisverbinder ermittelt.

Zur Berechnung der Länge benötigten Kettenwerks in „Bahnhöfen und Haltepunkten“ wurde die Anzahl der Bahnhöfe und Haltepunkte (3.200 Stück) multipliziert mit den (in der „kilometerspezifischen Mengenermittlung“) ermittelten Stückzahlen der Oberleitungselemente und der ermittelten durchschnittlich benötigten Kettenwerkslänge in „Bahnhöfen und Haltepunkten“ von 5,11 km.

4.5 Spezifische Kostensätze

4.5.1 Bahnenergieversorgungsanlagen

Aus vorangegangenen Untersuchungen und weiteren der Professur für Elektrische Bahnen vorliegenden Unterlagen sind die Kostensätze für Infrastrukturanlagen der Bahnstromversorgung bekannt, so dass es für die Untersuchung keiner umfangreichen Herleitung dieser Werte bedurfte. Die originalen Werte stammen aus Planungs- und Bauprojekten, mit Blick auf die Vertraulichkeit konkreter Projektwerte werden hier wieder Mittelwerte als Richtgrößen verwendet. Im Folgenden wird die Zusammensetzung der Kostenanteile skizziert:

- Ein Unterwerk mit einer installierten Leistung von 2 x 15 MVA kann in den Primärtechnikanteil bestehend aus Umspannern, Leistungsschaltern, Trennern und in den Sekundärtechnikanteil bestehend aus Leittechnik, Schutzgeräten, mit folgenden Kostenanteilen unterteilt werden:
 - Primärtechnik: → ca. 2,5 Mio. €
 - Sekundärtechnik: → ca. 0,5 Mio. €
- Ein Umrichterwerk gleicher Leistungsklasse 2 x 15 MW kann in die Komponentenanteile Primärtechnik A – Umspanner, Leistungsschalter, Trenner, Primärtechnik B – Kühlung, Umrichtermodule, Steuereinrichtungen, und Sekundärtechnik – Leittechnik, Schutzgeräte, - untergliedert werden, für die folgende Kostenanteile ermittelt wurden:
 - Primärtechnik A+B: → ca. 18,5 Mio. €
 - Sekundärtechnik: → ca. 1,5 Mio. €
- Für die Anschlussleitungen der Bahnstromversorgungsanlagen konnten folgende Kostensätze recherchiert werden:
 - 2 AC-110-kV-Bahnstromleitungen: → ca. 300.000 €/km
 - 3 AC-110-kV-Freileitungen: → ca. 350.000 €/km

Verrechnet mit dem in Abschnitt 4.3.3 hergeleiteten Mengengerüst und unter der Annahme, dass sich der Zinssatz und die Teuerungsrate aufheben ergibt sich für das Streckennetz im Jahr **2010** ein streckenlängenspezifischer Kostensatz von **199.700 €/km** und für das im Jahr **2030** zu erwartende Streckennetz ein streckenlängenspezifischer Kostensatz von **199.590 €/km** für die Bahnstromanlagen.

4.5.2 Oberleitungsanlagen

Ausgehend von dem in Abschnitt 4.4 ermittelten Mengengerüst für eine Komplettelektrifizierung des deutschen Eisenbahnnetzes werden im Folgenden zunächst die kilometerspezifischen Kosten für die jeweilige Kategorie (Flachland, Mittelgebirge, Gebirge und Bhf./HP) berechnet und anschließend durch Multiplikation mit den zugehörigen Streckenlängen ein allgemeingültiger Kostensatz für das deutsche Streckennetz bestimmt. Damit sowohl Planungs- als auch Errichtungskosten Beachtung finden, wurde das Standardleistungsverzeichnis für Oberleitungsanlagen eines Anbieters/ Errichters von Fahrleitungssystemen genutzt und das ermittelte Mengengerüst in eine gegenüber diesem Kostenkatalog kompatible Form überführt. Neben Leistungs- bzw. Montage- und Lieferungskosten aller Oberleitungsbauteile werden im Standardleistungsverzeichnis alle relevanten Leistungspositionen unter anderem für Planung, Nebenarbeiten, Baustelleinrichtung, Regiearbeiten, besondere Leistungen und sonstige Leistungen berücksichtigt.

In der folgenden Tabelle sind die zu erwartenden Gesamtkosten für die benötigten Oberleitungsbauelemente für das Streckennetz von 2010 zusammenfassend dargestellt.

Oberleitungselemente und Leistungspositionen	Gesamtkosten in €		
	Minimum	Mittelwert	Maximum
Masten	738.014.176,03	1.496.717.673,61	2.860.428.855,55
Mastfundamente und Gründungsarbeiten	1.224.655.750,29	2.732.489.310,79	5.308.412.186,92
Ausleger und Zubehör	387.716.089,86	847.443.800,93	1.263.915.031,88
Mehrgleisenausleger und Zubehör	1.993.307.797,95	4.299.209.364,21	6.388.948.836,32
Bewegliche Kettenwerksabspannung mit Zubehör	167.100.352,11	394.179.724,13	645.821.392,57
Feste Kettenwerksendverankerung	1.824.976,22	13.319.485,06	21.874.331,55
Festpunkte	43.713.969,16	78.371.661,26	124.572.963,27
Kettenwerk Re 100	565.338,75	1.017.158,35	1.411.800,05
Kettenwerk Re 200	163.978,03	166.992,93	169.281,34
Elektrische Verbindungen	14.233.872,87	45.213.528,80	80.336.182,24
Isolatoren mit Zubehör	33.676.256,10	88.520.512,15	136.882.826,66
Erdung und Rückstromführung	71.356.217,93	143.844.454,16	242.732.817,05
Schalter und Zubehör	56.141.440,99	264.798.781,45	363.198.452,55
Schalterquerleitung	0,00	16.479.009,65	37.308.399,18
Deckenstromschiene	70.484.462,35	71.551.050,00	72.982.071,00
Planung	1.273.226.081,59	1.725.735.646,22	2.178.245.210,84
Sonstiges	4.235.361,13	33.499.813,77	88.385.785,71
Projektleitung	304.020.806,07	612.627.898,37	990.781.321,23
Baustelleneinrichtung	486.433.289,71	980.204.637,40	1.585.250.113,98
Gesamt	6.870.870.217,15	13.845.390.503,22	22.391.657.859,90

Tabelle 66: Voraussichtliche Kosten von Oberleitungselementen für die Elektrifizierung des gesamtdeutschen Eisenbahnnetzes für das Jahr 2010

Die Tabelle zeigt die Investitionssummen der Gesamtheit aller Bauteile. Die Oberleitungselemente, für die es multiple, untergliederte Leistungspositionen im Standardleistungsverzeichnis für Oberleitungsanlagen gibt, wurden zu Hauptgruppen zusammengefasst. Dies betrifft Masten, Mastfundamente, Ausleger, Mehrgleisenausleger, Kettenwerksendverankerungen, Mastanker und Schalter. Die Kosten wurden in Kooperation mit dem Errichter von Oberleitungsanlagen erarbeitet und bewertet. Sie enthalten Anteile von Leistung (bzw. Montage), Lieferung und allgemeinen Geschäftskosten. Bei diesen Schätzungen handelt es sich um Stückpreise, welche in Abhängigkeit von der Gesamtzahl der jeweiligen Leistungspositionen generiert wurden.

Die Leistungspositionen „Projektleitung“ und „Baustelleneinrichtung“ wurden nach der Summierung aller Leistungspositionen prozentual auf das Ergebnis aufgeschlagen. Auf diese Weise wurden die endgültigen Kosten für den Bau der Oberleitungsanlage im gesamtdeutschen nichtelektrifizierten Eisenbahnnetz ermittelt.

Anzahl Gleise	Bauart	Flachland	Mittelgebirge	Gebirge
eingleisig	Re 100	529.444	604.261	898.608
	Re 200	588.271	664.021	999.116
zweigleisig	Re 100	1.058.901	1.195.293	1.778.423
	Re 200	1.176.542	1.328.077	1.998.255

[€/km]

Tabelle 67: (Kilometer-)spezifische Kosten für die Errichtung von Oberleitungsanlagen im Streckennetz je Kategorie

Für die zuvor eingeführten Höhenkategorien ergeben sich die in der Tabelle aufgeführten spezifischen Kosten. Da rund 86 % der bisher nicht elektrifizierten Strecke eingleisig verläuft, ergibt sich der kilometerspezifische Kostenmittelwert für die Errichtung der Oberleitungsanlage zu rund **750.000 € pro Kilometer**. Darin enthalten sind bereits die Kosten für die Elektrifizierung von Bahnhöfen und Haltepunkten ebenso wie die kostenintensive Elektrifizierung von Weichen.

4.5.3 Weitere Kosten

Es wurde in dieser Untersuchung bereits mehrfach kritisch erwähnt, dass es bei der Errichtung einer Oberleitungsanlage auf bestehenden, nicht elektrifizierten Strecken zu enormen Kostenanstiegen durch Tunnel, Brücken und Ingenieurbauwerke kommen kann. Diese Mehrkosten werden umso größer, wenn bei den besagten Bauwerken im Bestand keine Möglichkeit der Unterbringung einer Oberleitungsanlage jeglicher Form besteht und diese abgerissen und neugebaut oder umgebaut werden müssen.

In der vorliegenden Untersuchung wird, wie in Abschnitt 4.4.5 erwähnt, davon ausgegangen, dass es prinzipiell möglich ist bestehende Tunnel durch Verwendung von Deckenstromschienen zu elektrifizieren. Für Eisenbahnbrücken, die keinen Platz oder eine zu geringe Tragfähigkeit für Oberleitungsanlagen haben und für kreuzende Straßenbrücken, deren lichte Höhe zu gering für abgesenkte Hochketten oder Deckenstromschienen ist wird im Folgenden ein Ansatz beschrieben, wie diese Kosten realistisch abgeschätzt werden können. Aus vorangegangenen Untersuchungen [Optimierungspotenziale von Elektrifizierungsprojekten] liegen der Professur für Elektrische Bahnen Unterlagen zu entstehenden Kosten bei Elektrifizierungsprojekten mit zahlreichen Straßen- und Fußgängerüberführungen vor, deren lichte Höhen zu niedrig waren, so dass Um- und Neubaumaßnahmen der Brücken erforderlich waren. Die Herstellung der lichten Höhe von Brückenbauwerken kann (allgemein) sowohl durch Bauarbeiten am Brückenbauwerk als auch am Gleis (Gleisabsenkung) erreicht werden. Bei den übrigen Kreuzungsbauwerken ist die lichte Höhe entweder

bereits von vornherein gewährleistet oder sie kann durch Maßnahmen, wie bspw. Kettenwerksabsenkungen erreicht werden. Überschlagsberechnungen aus vorliegenden Planungsprojekten ergaben, dass durchschnittlich mit Kosten je Streckenkilometer für Brückenanpassungen und –neubauten von 107.600 €/km gerechnet werden muss. Die beschriebenen Ergebnisse gelten lediglich für zweigleisige Strecken in der Kategorie Mittelgebirge mit einer Re 200 Oberleitung, da zur Auswertung keine weiteren Daten vorlagen. Es ist aber anzunehmen, dass Häufigkeit und Baukosten für Kreuzungsbauwerke nicht abhängig von Gleisanzahl, Oberleitungsbauart und Höhenkategorie sind, sondern von der Dichte des Verkehrsnetzes. Es kann folglich angenommen werden, dass die Mehrkosten durch Kreuzungsbauwerke für alle Kategorien zutreffend sind.

Ein weiterer Kostenfaktor sind eventuell durchzuführende Anpassungen an den Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik. Im Zuge einer Streckenelektrifizierung muss für die jeweilige Strecke separat mittels Beeinflussungsberechnungen festgestellt werden, ob es in Folge der über das Gleis rückgeleiteten Ströme zu induktiven Beeinflussungen der Signalkabel kommen kann. Ist dies der Fall, müssen die vorhandenen Kabel durch speziell geschirmte Kabel ersetzt werden. Aus der Praxis ist bekannt, dass dies bei eingleisigen Strecken häufiger vorkommt. Da rund 86 % des erarbeiteten Streckennetzes eingleisig sind, ist davon auszugehen, dass die Kabel relativ häufig ersetzt werden müssen. Zudem können Anlagen der Gleisfreimeldung (speziell Gleisstromkreise) betroffen sein, wofür Anpassungen an der Gleisisolierung und Erdung erforderlich werden. Dies betrifft oft auch die Erdungs- und Potenzialausgleichsanlagen der Stellwerke.

In welcher Größenordnung sich diese Kosten letztendlich bewegen werden, kann nicht allgemeingültig vorhergesagt werden, da die sicherungstechnische Streckenausrüstung sehr heterogen ist. Ebenso schwierig erscheint es, die exakten Kosten bspw. für Profilverformungen zu ermitteln. In Experteninterviews mit Kollegen der Professur für Verkehrssicherungstechnik an der TU Dresden wurde geschätzt, dass zusätzlich zu den bereits bestimmten Kosten von einem Mehraufwand von 100.000 €/km für die Anpassung der Leit- und Sicherungstechnik ausgegangen werden kann.

Schlussendlich bleibt methodisch anzumerken, dass in der vorliegenden Untersuchung davon ausgegangen wurde, dass im Zuge der durchzuführenden Elektrifizierung keine grundlegenden Anpassungen oder Umbauten an den Gleisanlagen (Trassierung) oder am Unterbau der betroffenen Eisenbahnstrecken durchzuführen sind. Derartige Kosten werden zwar oft in einen ursächlichen Zusammenhang mit Elektrifizierungsprojekten gebracht, ergeben sich aber meist aus Trassierungsveränderungen, Geschwindigkeitserhöhungen oder ohnehin notwendigen Ersatzinvestitionen in Unter- und Oberbau. Hierfür sind dann kilometrische Kostensätze zu veranschlagen, die nicht von der Komplexität und vom Infrastrukturaufwand der Elektrifizierung selbst abhängen. Aus der Erfahrung zurückliegender Projekte

können derartige Zusatzkosten vereinzelt beim bis zu Zweifachen der eigentlichen Elektrifizierungskosten liegen. Dies trifft aber nur zu, wenn umfangreiche Eingriffe in den Unter- und Oberbau vorgenommen werden.

4.5.4 Zusammenfassung der Infrastrukturkosten

In den folgenden zwei Tabellen sind die spezifischen und absoluten Kosten für die Infrastruktur, welche bei einer Komplettelektrifizierung des Deutschen Streckennetzes anfallen, zum Abschluss übersichtlich zusammengefasst. Dargestellt sind hier die zu erwartenden Kosten auf Basis der Erwartungswerte (Mittelwerte) der Recherche. Im Einzelfall können die Mengengerüste pro Strecke stärker streuen. Es wird aber davon ausgegangen, dass sich aufgrund der Vielzahl notwendiger Einzelprojekte für eine Komplettelektrifizierung die Streuung hinsichtlich der Gesamtkosten wieder herausmittelt.

Position	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
Durchschnittliche Kosten OL-Anlage	747.466	736.551
Bahnstromversorgung	199.700	199.590
Umbau Ingenieurbauwerke, LST-Anpassung, Profilfrei- machung, ...	207.600	199.920
Grunderwerb	4.627	4.629

Tabelle 68: (kilometer-)spezifische Kosten für die Infrastrukturanlagen der Elektrifizierung in EUR/km

Position	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
OL-Anlage	13,845⁸⁵	11,436
Bahnstromversorgung	3,699	3,098
darin:		
Unterwerke + Umrichterwerke	3,071	2,573
2 AC- und 3 AC-Versorgungsleitungen	0,628	0,525
Umbau Ingenieurbauwerke, LST-Anpassung, Profilvereinemachung, ...	3,845	3,106
Grunderwerb	0,086	0,070
Gesamtkosten	21,475	17,710

Tabelle 69: Gesamtkosten für die Infrastrukturanlagen einer Komplettelektrifizierung in Mrd. EUR

4.5.5 Laufende jährliche Betriebskosten

Zusätzlich zu den ermittelten Investitionen, die nach Festlegung eines Abschreibungs-Zeitraumes auch über (jährlich zu leistende) Annuitäten ausgedrückt werden können, wurden noch die laufenden jährlichen Kosten für den Betrieb und die Unterhaltung der Elektrifizierungsinfrastruktur (Oberleitung, Bahnstromversorgung) ermittelt. Im Allgemeinen wird hierbei für elektrotechnische Anlagen ein Satz von 2 % der Investitionssumme p.a. als Richtwert für das 1. Bezugsjahr angesetzt. Die in veröffentlichten Geschäftszahlen der DB Netz ausgewiesenen Kosten für die Instandhaltung speziell der Oberleitungsanlagen weisen allerdings – bezogen auf den unterstellten Neuwert der Anlagen – einen deutlich geringeren Satz für die jährlichen Kosten aus, der unterhalb von 0,5 % des Anlagenneuwertes p.a. liegt. Zur Abschätzung einer realistischen Größenordnung für die laufenden Anlagenkosten wurde deshalb bei der vorliegenden Untersuchung mit einem Satz von 1 % der Investitionssumme p.a. gerechnet.

Kostenanteil	Komplettelektrifizierung
Investition E-Anlagen in Mrd. EUR	17,284 ⁸⁶
Betriebskosten p.a. in Mio. EUR (1. Bezugsjahr)	173

Tabelle 70: Laufende jährliche Betriebskosten für die Infrastruktur der Elektrifizierung

⁸⁵ Mittelwert aus Tabelle 66

⁸⁶ Gesamtkosten aus Tabelle 69 vermindert um Grunderwerb und Planungskosten.

4.6 Zuverlässigkeit der Prognose und Ausblick

4.6.1 Fehlerbetrachtung

Ökonomische und ökologische Analysen zur Elektrifizierung von Eisenbahnstrecken werden stets für einzelne konkrete Strecken bzw. Streckenabschnitte durchgeführt. Die dafür erforderliche Mengen- und Kostenermittlung wird immer unter Berücksichtigung der spezifischen Strecken- und Betriebssituation vorgenommen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollten hingegen die infrastrukturseitigen Gesamtkosten für eine Komplettelektrifizierung des deutschen Eisenbahnnetzes qualifiziert abgeschätzt werden, ohne dass dafür detaillierte Planungen zur Mengenermittlung für alle derzeit noch nicht elektrifizierten Eisenbahnstrecken angestellt werden konnten.

Im Zuge der vorliegenden Untersuchung ist es gelungen, kilometerspezifische Kosten in bisher nicht verfügbarer Granularität zu erarbeiten, mit deren Hilfe die Kosten für die Komplettelektrifizierung des deutschen Streckennetzes realistisch prognostiziert werden können. Hervorzuheben ist, dass das ermittelte Mengengerüst für die Oberleitungsanlage, welches für die Kostenkalkulation benötigt wird, aus umfangreichen Projektdaten eines renommierten Errichters von Oberleitungsanlagen abgeleitet werden konnte.

Durch die gewählte Kategorisierung der Strecken in Flachlands-, Mittelgebirgs- und Gebirgsabschnitte konnte auf die in der Datengrundlage nicht enthaltene Bogenläufigkeit geschlossen werden und somit ein Planungswerkzeug zur Berechnung des benötigten Mengengerüsts geschaffen werden. Die Ergebnisse dieser Teiluntersuchung bestätigen, wie eingangs vermutet, die unterschiedlichen Mengenbedarfe. Demnach werden mit steigender Höhenlage einer Eisenbahnstrecke mehr Bauteile der Oberleitungsanlage je Kilometer benötigt.

Leider war es im Zuge der Untersuchung nicht möglich, genauere Angaben über Anzahl und Größe von Bahnhöfen und Haltepunkten, Tunneln, Eisenbahnbrücken, Ingenieurbauwerken und kreuzenden Hochbauwerken zu erhalten. Diese Faktoren erweisen sich in der Praxis häufig als bedeutende Kostentreiber. Auch für diese Problematik wurden Möglichkeiten erarbeitet, die fehlenden Informationen durch verschiedene logische Ansätze zu ersetzen (z.B. überschlägige Ermittlung der Anzahl an Bahnhöfen, Ansatz eines Modellbahnhofs, Ermittlung eines Kostenzuschlages für die Anpassung von Ingenieurbauwerken und kreuzenden Hochbauwerken, etc.). Die Genauigkeit dieser Annahmen lässt sich jedoch nicht ohne weiteren Aufwand bestätigen.

Außerdem ist anzumerken, dass die Auswahl der für die Mengen- und Kostenermittlung ausgewerteten Referenzstrecken - obgleich diese durchaus als repräsentativ einzuschätzen sind - nicht mit statistischer Sicherheit erfolgen konnte. Es wurde gezielt im Datenarchiv eines Anbieters von Oberleitungsserrichtungen nach Strecken gesucht, die den gesetzten Kriterien gerecht werden.

Des Weiteren wurden keine Positionen im Standardleistungsverzeichnis berücksichtigt, welche besondere oder außergewöhnliche Leistungen beschreiben, die im Rahmen der Studie nicht wissenschaftlich erhoben werden konnten, wie beispielsweise die Entsorgung von konterminiertem Boden. Es konnten keine exakten monetären Werte für Mehrkosten durch außergewöhnlichen Materialzuschlag bei Bauteilen (bzw. Leistungspositionen) der Oberleitungsanlage bestimmt werden. Kosten, die durch betriebliche Einschränkungen beim Bau von Oberleitungen entstehen (z.B. Zugverspätungen oder –ausfälle als Folge von Teil- oder Vollsperrungen in Sperrpausen) sowie Kosten für externe Bauüberwachung, Sicherheitsleistungen und landschaftspflegerische Maßnahmen konnten nicht detailliert erfasst werden, ebenso wenig wie entstehende Kosten für Kampfmittelsondierungen und -beseitigungen, Planfeststellungsverfahren und eventuell anstehende Zahlungen für Ausgleichsmaßnahmen (Naturschutz), Lärmschutzvorrichtungen und Bauwerke zur Steigerung der Ästhetik der Oberleitungsanlage. Diese Kosten wurden nach Diskussion mit diversen Experten überschlagen und als gesonderter Kostenpunkt in den Berechnungen berücksichtigt. Außerdem wurde eine jährliche Preissteigerung von ca. 2 % unterstellt. Es muss schließlich immer damit gerechnet werden, dass der hier ermittelte spezifische Kilometerspreis von Oberleitungs- und Energieversorgungsanlagen aufgrund von unvorhersehbaren Problemen und Einschränkungen steigen kann. Gleichfalls können sich die Kosten für Buntmetalle oder sogar die der Arbeit zu Grunde gelegten technischen Richtlinien im Untersuchungszeitraum ändern.

Die Ermittlung des Mengengerüsts für die Bahnenergieversorgungsanlagen konnte nicht in der gleichen Granularität durchgeführt werden wie für die Oberleitungsanlage. Ein Grund dafür sind die nicht pauschal vorhersehbaren Möglichkeiten bzw. Beschränkungen bei der Trassierung von Hochspannungsleitungen und der Gestaltung von Netzanschlüssen. Auch die Bestimmung der konkreten Standorte für die Anlagen der Energieeinspeisung (Unterwerke und Umrichterwerke) muss letztlich immer explizit durch exakte Berechnung von Qualitätskriterien (max. Betriebsströme, zulässige Spannungsfälle, Kurzschlussströme, und Berührspannungen) unterlegt werden. Weitere Berechnungen, wie beispielsweise zur Löschfähigkeit von flüchtigen einpoligen Erdschlüssen im 2AC 110 kV-Bahnstromnetz sind erforderlich. Da die Löschfähigkeit im derzeitigen Netzausbauzustand fast erreicht ist sind bei großräumigen Netzerweiterungen exaktere, im Rahmen dieser Studie nicht durchführbare Planungen und Berechnungen notwendig. Es gibt zahlreiche weitere Gründe, weshalb der Ansatz, für die Bahnenergieversorgungsanlagen ein ebenso granulares Mengengerüst wie für die Oberleitungsanlagen zu ermitteln, nur zu Scheingenauigkeiten führen würde. Stattdessen wurden für die Berechnung des erforderlichen Mengengerüsts und der zu hinterlegenden Kostensätze Werkzeuge der Professur Elektrische Bahnen genutzt, die in vorherigen Untersuchungen ausreichend genaue Ergebnisse geliefert haben.

Unter Berücksichtigung der aufgelisteten Einschränkungen lassen sich die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte dennoch als realistische Bausteine und Richtwerte für

die überschlägige Untersuchung der investiven wirtschaftlichen Auswirkungen von Streckenelektrifizierungen nutzen.

5 Kostenanalyse

Kapitel 5 konsolidiert die Kosten, mit denen zu rechnen ist, wenn eine Komplettelektrifizierung des gesamten deutschen Schienennetzes umgesetzt wird. Zusätzlich werden die Vermeidungskosten als Maß für die Wirksamkeit der Maßnahme ausgewiesen.

5.1 Gesamtkosten

Die Gesamtkosten setzen sich aus den Infrastrukturkosten, dem Rollmaterial und den Betriebskosten zusammen. Zur Eichung des Berechnungsmodells wurden zusätzlich die Betriebskosten auf Grundlage des Methodenhandbuches zum Bundesverkehrswegeplan 2030 berechnet.⁸⁷

Konkret bedeutet dies, dass:

- Betriebskosten für den SPNV, SPFV und SGV für die beiden Netzzustände 2010 und 2030 (mit jeweils Basis- und Planfall) berechnet wurden;
- Die BVWP-Methodik erstmalig für das gesamte Netz der Bundesrepublik durchgerechnet, beziehungsweise angewendet wurde, und so gezeigt werden konnte, wie valide die Methodik tatsächlich ist (überprüfbar vor allem im Basisfall des Netzzustandes 2010).

5.2 Netzattribute aus der Visum-Datenbank

Die Parameter zur Berechnung der Betriebskosten kommen ursprünglich aus dem Schienennetz der Verflechtungsprognose 2030 und der Datenbank des Visum Schienennetzes. Visum bildet das Schienennetz streckenfein ab, das heißt, für jede dieser Strecken sind mehrere Netzattribute bekannt:

- a. Länge der Strecke (in km)
- b. Anzahl der Gleise
- c. Traktion der Strecke (Elektro/Diesel)
- d. Gleislänge (km)
- e. Anzahl der Zugbewegungen eines definierten Modellfahrzeugtyps, die pro Tag über diese Strecke fahren
- f. Maximalgeschwindigkeit v_{\max} (in km/h)
- g. Durchschnittsgeschwindigkeit v_{durch} (in km/h)
- h. Reisezeit⁸⁸ (in h) je Fahrzeugtyp
- i. Fahrzeugeinsatzzeiten⁸⁹ (in Fz-St./Tag)

⁸⁷ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, Schlussbericht zum FE 97.358/2015, S. 175ff.

⁸⁸ Reisezeit=Streckenlänge/durchschnittliche Geschwindigkeit

⁸⁹ Fahrzeugeinsatzzeit=Anzahl der Zugbewegungen * Reisezeit

j. Betriebsleistungen⁹⁰ (in Zug-km/Jahr).

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die tabellarische Darstellung der Strecken in Visum:

Netz	Anzahl	VonKnotNr	NachKnotNr	Länge	ANZAHL_GLEISE_2010	ANZAHL_GLEISE_2030	Height_Mittelwert_2010	Höhe_2010	Height_Mittelwert_2030	Höhe_2030	DEU_2010	DEU_2030
Knoten	1	248353	248488	1,392km	2		37,02	0-300			0,00	0-300
Abbieger	2	248488	257983	5,272km	2		39,70	0-300			0,00	0-300
Bezirke	3	248354	248488	2,833km	1		32,91	0-300			0,00	0-300
Anbindungen	4	248350	248392	24,606km	1		9,36	0-300			0,00	0-300
Oberknoten	5	248336	248338	4,666km	1		22,13	0-300			0,00	0-300
Oberabbieger	6	248338	248339	4,701km	1		16,01	0-300			0,00	0-300
Oberbezirke	7	248339	248340	5,434km	1		20,54	0-300			0,00	0-300
Gebiete	8	248340	248357	11,352km	1		14,77	0-300			0,00	0-300
Beziehungen	9	248357	248371	8,278km	1		14,89	0-300			0,00	0-300
Oberbeziehungen	10	248371	248372	11,034km	1		26,77	0-300			0,00	0-300
IV-Wege	11	248372	248373	11,079km	1		34,29	0-300			0,00	0-300
POIs	12	248373	248342	8,056km	1		45,33	0-300			0,00	0-300
GIS-Objekte	13	248342	248354	9,016km	1		38,86	0-300			0,00	0-300
Screenlines	14	248311	248336	2,169km	1		16,31	0-300			0,00	0-300
Zahlstellen	15	248336	258982	10,010km	1		16,95	0-300			0,00	0-300
Detektoren	16	258982	248345	15,102km	1		13,75	0-300			0,00	0-300
Mautsysteme	17	248311	248491	2,194km	1		14,96	0-300			0,00	0-300
Sharing-Stationen	18	248491	40000021	2,602km	1		31,74	0-300			0,00	0-300
Haltepunkte	19	40000021	248334	4,197km	1		38,87	0-300			0,00	0-300
Hst.-Bereiche	20	248334	248333	5,628km	1		34,88	0-300			0,00	0-300
Haltestellen	21	248333	248330	10,403km	1		37,19	0-300			0,00	0-300
Systemrouten	22	248330	248328	5,534km	1		31,63	0-300			0,00	0-300
Linien	23	248328	248326	8,415km	2		26,15	0-300			0,00	0-300
Hintergründe	24	248326	248325	5,727km	2		31,41	0-300			0,00	0-300
Texte	25	248175	248459	1,256km	1		9,25	0-300			0,00	0-300
Polygone	26	248310	248336	2,593km	1		19,95	0-300			0,00	0-300
	27	258995	248311	2,511km	1		11,98	0-300			0,00	0-300
	28	248310	258995	1,883km	1		15,62	0-300			0,00	0-300
	29	258995	248491	0,726km	1		19,52	0-300			0,00	0-300
	30	248306	248343	13,061km	2		26,41	0-300			0,00	0-300
	31	248343	248345	15,611km	2		24,01	0-300			0,00	0-300
	32	248345	248346	3,868km	2		13,23	0-300			0,00	0-300
	33	248346	248347	11,293km	2		9,04	0-300			0,00	0-300
	34	248347	248348	12,413km	2		11,93	0-300			0,00	0-300

Abbildung 25: Visum Oberfläche

Zur Berechnung der Gesamt- und Vermeidungskosten wurde die Visum Datenbank nach Excel exportiert.

STRECKE	VONKNOTNR	NACHKNOTNR	LAENGE	HÖHE	VONKNOTENNAME_2010	NACHKNOTENNAME_2010	ANFAHRTSTREIFEN	KAPIV	VOIV	ANZAHL_GLEISE_2010	STRECKENLÄNGE_2010	TRAKTION_2010
1	248353	248488	1,392km		Flensburg Weiche	Flensburg Friedensweg	1	99999	50km/h	2	1,5	Elektrifiziert
2	248488	257983	5,272km		Flensburg Friedensweg	Flensburg Grenze	1	99999	50km/h	2	5,4	Elektrifiziert
3	248354	248488	2,833km		Flensburg	Flensburg Friedensweg	1	99999	50km/h	1	5,5	Elektrifiziert
4	248350	248392	24,606km	0-300	Jübek	Husum	1	99999	50km/h	1	25,7	Diesel
5	248336	248338	4,666km	0-300	Kiel-Hassee Cittipark	Suchsdorf	1	99999	50km/h	1	4,4	Diesel
6	248338	248339	4,701km	0-300	Suchsdorf	Neuwittenbek	1	99999	50km/h	1	6	Diesel
7	248339	248340	5,434km	0-300	Neuwittenbek	Gettorf	1	99999	50km/h	1	5,5	Diesel
8	248340	248357	11,352km	0-300	Gettorf	Eckernförde	1	99999	50km/h	1	12	Diesel
9	248357	248371	8,278km	0-300	Eckernförde	Rieseby	1	99999	50km/h	1	8,6	Diesel
10	248371	248372	11,034km	0-300	Rieseby	Süderbrarup	1	99999	50km/h	1	11,6	Diesel
11	248372	248373	11,079km	0-300	Süderbrarup	Sörup	1	99999	50km/h	1	11,2	Diesel
12	248373	248342	8,056km		Sörup	Husby	1	99999	50km/h	1	8,1	Diesel
13	248342	248354	9,016km		Husby	Flensburg	1	99999	50km/h	1	10	Diesel
14	248311	248336	2,169km	0-300	Kiel Hbf	Kiel-Hassee Cittipark	1	99999	50km/h	1	2,8	Diesel
15	248336	258982	10,010km	0-300	Kiel-Hassee Cittipark	Felde-Brandsbek	1	99999	50km/h	1	11	Diesel
16	258982	248345	15,102km	0-300	Felde-Brandsbek	Osterrönfeld	1	99999	50km/h	1	17,1	Diesel
17	248311	248491	2,194km	0-300	Kiel Hbf	Kiel Hbf (Ss)	1	99999	50km/h	1	2,5	Diesel
18	248491	40000021	2,602km	0-300	Kiel Hbf (Ss)	Kiel-Elmschenhagen	1	99999	50km/h	1	2,6	Diesel
19	40000021	248334	4,197km	0-300	Kiel-Elmschenhagen	Raisdorf	1	99999	50km/h	1	4,3	Diesel
20	248334	248333	5,628km	0-300	Raisdorf	Preetz	1	99999	50km/h	1	5,9	Diesel
21	248333	248330	10,403km	0-300	Preetz	Ascheberg (Holst)	1	99999	50km/h	1	11,3	Diesel
22	248330	248328	5,534km	0-300	Ascheberg (Holst)	Plön	1	99999	50km/h	1	6,4	Diesel
23	248328	248326	8,415km	0-300	Plön	Bad Malente-Gremsmühlen	1	99999	50km/h	2	9,3	Diesel
24	248326	248325	5,727km	0-300	Bad Malente-Gremsmühlen	Eutin	1	99999	50km/h	2	5,3	Diesel
25	248175	248459	1,256km	0-300	Neustadt (Holst) Gbf	Neustadt (Holst)	1	99999	50km/h	1	1,3	Diesel
26	248310	248336	2,593km	0-300	Meimersdorf	Kiel-Hassee Cittipark	1	99999	50km/h	1	5,5	Diesel
27	258995	248311	2,511km	0-300	Meimersdorf Ost	Kiel Hbf	1	99999	50km/h	1	2,6	Elektrifiziert
28	248310	258995	1,883km	0-300	Meimersdorf	Meimersdorf Ost	1	99999	50km/h	1	2	Elektrifiziert

Abbildung 26: Netzattribute und Streckenberechnungen in Excel

⁹⁰ Betriebsleistungen=Anzahl der Zugsbewegungen * Streckenlänge

Damit der Schienenverkehr im Modell abgebildet werden kann, wurden Modellfahrzeugtypen aus dem Methodenhandbuch des Bundesverkehrswegeplans hinterlegt, so dass die Kosten- und Wertansätze betreiberneutral dem Schienenverkehr zugeordnet werden können. Unterschieden wurde in Personen- und Güterverkehr.

	Fahrzeugtypen	BVWP- Bezeichnung	Traktionsart
Nahverkehr			
S-Bahn	S-Bahn Elektro	NV 180 E SD	Elektro
	S-Bahn Diesel	NV 130 D	Diesel
Regionalbahn (RB)	PNV Elektro	NV 180 E SD	Elektro
	PNV Diesel	NV 180 D	Diesel
Regionalexpress	EXPRESS Elektro	NV 180 E SD	Elektro
	EXPRESS Diesel	NV 180 D	Diesel
Fernverkehr			
Interregio-Express (IRE)	FV-ERSATZ Elektro	FV light E	Elektro
InterConnex	FV_LIGHT Elektro	FV light E	Elektro
	FV_LIGHT Diesel	FV light D	Diesel
Intercity, Eurocity	IC_EC Elektro	HGV C	Elektro
	IC_EC Diesel	FV light D	Diesel
Intercity-Express, TGV	ICE_TGV	HGV B-12	Elektro

Tabelle 71: Fahrzeugtypisierung SPV nach dem BVWP

Der Schienengüterverkehr wurde durch zwei Fahrzeugkategorien im Modell hinterlegt.

	Fahrzeugtypen	BVWP- Bezeichnung	Traktionsart
Güterverkehr langsam	GV_LANGSAM Elektro	Schüttgutwagen	Elektro
	GV_LANGSAM Diesel		Diesel
Güterverkehr schnell	GV_SCHNELL Elektro	Containertragwagen	Elektro
	GV_SCHNELL Diesel		Diesel

Tabelle 72: Fahrzeugtypisierung SGV nach der BVWP

5.3 Berechnung der Betriebskosten

Um das Berechnungsmodell nach dem Methodenhandbuch des Bundesverkehrswegeplan zu komplettieren wurden die Betriebskosten für den gesamten Schienenverkehr berechnet. Folgende Annahmen wurden dabei getroffen:

1. In dem Basisfall 2030 wurde bereits ein Rückgang des Dieserverbrauchs angenommen, die Reduktion richtet sich nach den prognostizierten Werten laut Methodenhandbuch des BVWP 2030.
2. Die im Netzmodell hinterlegten Daten werden alle pro Werktag angegeben, deshalb erfolgt eine Hochrechnung Werktag auf ein Jahr:⁹¹
 - a. Beim Schienenpersonenfernverkehr mit einem Faktor von 365 Tagen/Jahr;
 - b. Beim Schienenpersonennahverkehr mit einem Faktor von 348 Tagen/Jahr und
 - c. beim Schienengüterverkehr mit einem Faktor von 283 Tagen/Jahr⁹².
3. Aufgrund des mit der Geschwindigkeit zusammenhängenden steigenden Energieverbrauchs des Schienenpersonenfernverkehrs wurde nach Streckenkategorien differenziert:⁹³
 - a. **KS**: Konventionelle Strecke (entspricht einer maximalen Geschwindigkeit $v_{\max} \leq 160$ km/h);
 - b. **ABS**: Ausbaustrecke (mit $v_{\max} = 161-230$ km/h) und

⁹¹ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum BVWP 2030, S. 90, 91.

⁹² TTS TRIMODE Transport Solutions GmbH.

⁹³ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum BVWP 2030, S. 91.

c. **NBS**: Neubaustrecke (mit $v_{\max} > 230$ km/h).

4. Für den SGV wurde angenommen, dass 15% der Betriebsleistung mit „Dieseltraktion unter Fahrdrabt“ erfolgt. Das heißt, obwohl eine Oberleitung vorhanden ist, werden auf der Strecke weiterhin Dieselfahrzeuge eingesetzt.

Die Betriebskosten des Schienenpersonenverkehrs (SPNV und SPFV)⁹⁴ setzen sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Kapitaldienst;
- Unterhaltungskosten;
- Fahrpersonalkosten und
- Energiekosten.

$$\mathbf{BK}_{\text{SPV}} = (\mathbf{KD}_{\text{SPV}} + \mathbf{UK}_{\text{SPV}} + \mathbf{PK}_{\text{SPV}} + \mathbf{EK}_{\text{SPV}})$$

mit

BK_{SPV} Betriebskosten des SPV

KD_{SPV} Kapitaldienst für die SPV-Fahrzeuge in T€/Jahr

UK_{SPV} Unterhaltungskosten für die SPV-Fahrzeuge in T€/Jahr

PK_{SPV} Personalkosten für die SPV-Fahrzeuge in T€/Jahr

EK_{SPV} Energiekosten für die SPV-Fahrzeuge in T€/Jahr

Abbildung 27: Betriebskostenformel Schienenpersonenverkehr

Die Betriebskosten im Schienengüterverkehr setzen sich folgendermaßen zusammen⁹⁵:

- Vorhaltungskosten für die Güterwagen
- Kapitaldienst für die Lokomotiven
- Unterhaltungskosten für die Lokomotiven
- Personalkosten Triebfahrzeugführer
- Zugbereitstellungskosten
- Zugbildungskosten
- Energiekosten⁹⁶
- Traktionswechselkosten und
- Kosten des verkehrsträgerübergreifenden Güterumschlags.

⁹⁴ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum BVWP 2030, S. 176 (SPFV) und S. 185 (SPNV).

⁹⁵ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum BVWP 2030, S. 194.

⁹⁶ Dahl, A. et al.: Methodenhandbuch zum BVWP 2030, S. 199: Bei der Berechnung des Energieverbrauchs wurden abweichend zum Methodenhandbuch Formeln für die Kenngrößen spezifischer Energieverbrauch (Elektro und Diesel) benutzt. Die Formeln wurden von TTS TRIMODE Transport Solutions GmbH bereitgestellt. Sie lauten spezifischer Energieverbrauch (Elektro)= $1,2 \times \text{BZG}^{0,38}$ und spezifischer Energieverbrauch (Diesel)= $0,326 \times \text{BZG}^{0,38}$.

$$\mathbf{BK}_{\text{SGV}} = (\mathbf{VH}_{\text{SGV-Wagen}} + \mathbf{KD}_{\text{SGV-Loks}} + \mathbf{UK}_{\text{SGV-Loks}} + \mathbf{PK}_{\text{SGV}} + \mathbf{ZBE}_{\text{SGV}} + \mathbf{ZBI}_{\text{SGV}} + \mathbf{EK}_{\text{SGV}} + \mathbf{TWK} + \mathbf{GUK}_{\text{SGV}})$$

mit

BK_{SGV} Betriebskosten SGV

VH_{SGV-Wagen} Vorhaltungskosten für die SGV-Güterwagen in T€/Jahr

KD_{SGV-Lok} Kapitaldienst für die SGV-Lokomotiven in T€/Jahr

UK_{SGV-Lok} Unterhaltungskosten für die SGV-Lokomotiven in T€/Jahr

PK_{SGV} Personalkosten für die SGV-Triebfahrzeugführer in T€/Jahr

EK_{SGV} Energiekosten für den SGV in T€/Jahr

ZBE_{SGV} Zugbereitstellungskosten in T€/Jahr

ZBI_{SGV} Zugbildungskosten in T€/Jahr

TWK Traktionswechselkosten in T€/Jahr

GUK_{SGV} Kosten des verkehrsträgerübergreifenden Güterumschlages in T€/Jahr

Abbildung 28: Betriebskostenformel Schienengüterverkehr

In den folgenden Kapiteln werden signifikante Ergebnisse der Betriebskostenrechnungen ausgewiesen. Bei jeder Kenngröße gibt es jeweils für den Netzzustand 2010 und den Netzzustand 2030 ein vergleichendes Ergebnis zwischen dem Basis- und dem Planfall, damit eine Bewertung der Elektrifizierungsmaßnahme möglich wird. Das bedeutet, alle Ergebniswerte weisen Beträge auf, die entweder zu- oder abnehmend sind. Dabei steht das negative Vorzeichen für eine Reduktion des jeweiligen Wertes und das positive Vorzeichen für eine Zunahme der Kenngröße.

5.3.1 Kapitaldienst des Schienenverkehrs

Bei dem Kapitaldienst ist erkennbar, dass bezogen auf den Netzzustand 2010 eine Reduktion der Kapitaldienstkosten von **160.381,62 T€** pro Jahr bei den dieselbetriebenen Fahrzeugen erzielbar sind, wenn im Netzzustand 2010 bereits eine Komplettelektrifizierung des Schienennetzes durchgeführt worden wäre. Für den Netzzustand 2030 ist erkennbar, dass die Kapitaldienstkostenreduktion zwischen Basis- und Planfall geringer bei **146.678,80 T€** liegt. Da in den Planfällen die unter Dieseltraktion fahrenden Lokomotiven entfallen, ist verständlich, dass die Zunahme der Kosten für den Kapitaldienst der elektrisch betriebenen Lokomotiven erkennbar ist. So haben wir eine Kostenzunahme von **187.214,93 T€**, wenn alle Strecken des gesamten Schienennetzes unter Elektrotraktion laufen würden für den Netzzustand 2010, und eine Zunahme von **167.807,32 T€** für den Netzzustand 2030. Vergleicht man die gesamten Veränderungen, die eine Komplettelektrifizierung in den beiden

Netzzuständen bewirken würden, sieht man ein Plus von **26.833,32 T€** für 2010 und ein Plus von **21.128,52 T€** für 2030.

Abnahme Diesel	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	-136.657,16	-117.809,21
SPFV (T€)	-1.074,42	-1.299,20
SGV (T€)	-22.650,04	-27.570,38
gesamt (T€)	-160.381,62	-146.678,80

Zunahme Elektro⁹⁷	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	162.935,32	140.873,66
SPFV (T€)	3.590,07	1.750,41
SGV (T€)	20.689,55	25.183,26
gesamt (T€)	187.214,93	167.807,32

Gesamt	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	26.278,16	23.064,44
SPFV (T€)	2.515,65	451,20
SGV (T€)	-1.960,49	-2.387,12
gesamt (T€)	26.833,32	21.128,52

Tabelle 73: Änderung Kapitaldienst des SV und Vorhaltungskosten des SGV (T€/Jahr)

5.3.2 Unterhaltungskosten des Schienenverkehrs

Betrachtet man die nächste Größe der Betriebskosten, die Unterhaltungskosten⁹⁸, wird eine vergleichbare Auflistung erkennbar: die Elektrifizierung des Schienennetzes bewirkt in beiden Netzzuständen eine Reduktion der dieselbezogenen Unterhaltungskosten und eine Erhöhung der elektrobezogenen Unterhaltungskosten. In Summe gibt es hierbei jedoch eine Reduktion der gesamten Unterhaltungskosten (für beide Netzzustände).

Abnahme Diesel	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	-207.727,61	-179.257,89
SPFV (T€)	-2.979,20	-3.436,29
SGV (T€)	-47.008,57	-57.979,68
gesamt (T€)	-257.715,37	-240.673,86

⁹⁷ Diese Zunahme wird bei der Bereitstellung (Vorleistung) ausgewiesen.

⁹⁸ Vgl. Abbildung 27.

Zunahme Elektro	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	119.001,45	102.947,10
SPFV (T€)	8.083,85	4.352,25
SGV (T€)	27.421,67	33.821,48
gesamt (T€)	154.506,97	141.120,82

Gesamt	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	-88.726,15	-76.310,79
SPFV (T€)	5.104,66	915,96
SGV (T€)	-19.586,90	-24.158,20
gesamt (T€)	-103.208,40	-99.553,03

Tabelle 74: Änderung Unterhaltungskosten (T€/Jahr)

5.3.3 Fahrpersonalkosten des Schienenverkehrs

Die Fahrpersonalkosten haben in der Summe eine Erhöhung, wenn das Schienennetz komplett elektrifiziert werden würde (bei beiden Netzzuständen).

Abnahme Diesel	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	-248.301,58	-213.676,43
SPFV (T€)	-1.350,84	-805,21
SGV (T€)	-23.329,45	-28.406,28
gesamt (T€)	-272.981,86	-242.887,93

Zunahme Elektro	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	248.301,58	213.676,43
SPFV (T€)	1.879,52	900,10
SGV (T€)	23.329,45	28.406,28
gesamt (T€)	273.510,54	242.982,81

Gesamt	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (T€)	0,00	0,00
SPFV (T€)	528,68	94,89
SGV (T€)	0,00	0,00
gesamt (T€)	528,68	94,89

Tabelle 75: Änderung Fahrpersonalkosten (T€/Jahr)

5.3.4 Energieverbrauch des Schienenverkehrs

Betrachtet man die Veränderungen, die eine Elektrifizierung des gesamten Schienennetzes mit sich bringt, kann man bei beiden Netzzuständen eine deutliche Reduktion des dieselbezogenen Energieverbrauchs feststellen (-13,96 und -14,35 PJ).

Abnahme Diesel	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (PJ)	-7,23	-6,24
SPFV (PJ)	-0,04	-0,02
SGV (PJ)	-6,69	-8,09
gesamt (PJ)	-13,96	-14,35

Tabelle 76: Abnahme Energieverbrauch – Diesel

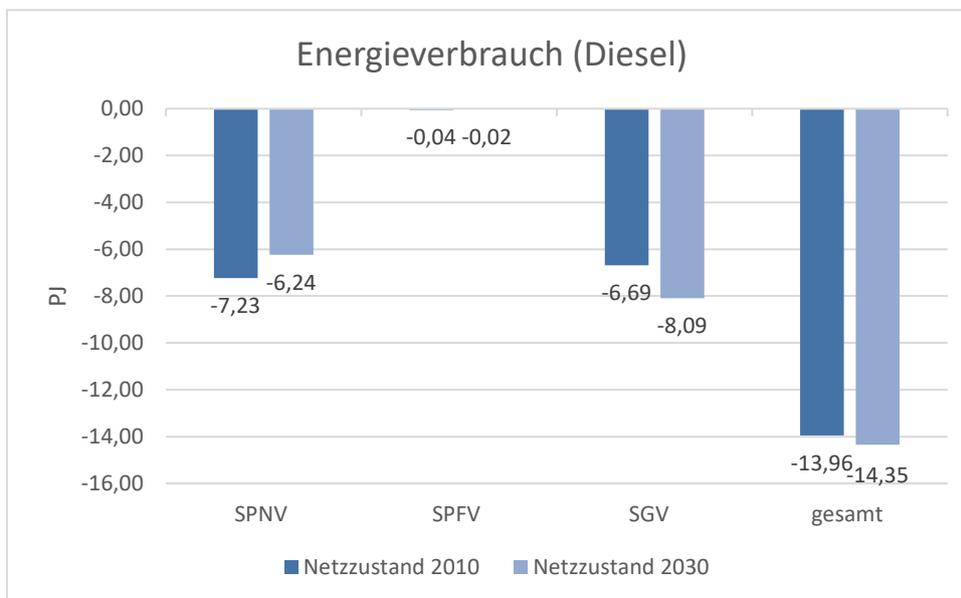


Abbildung 29: Abnahme Energieverbrauch - Diesel

Die Zunahme der Energieverbräuche durch verstärkten Einsatz von elektrisch betriebenen Fahrzeugen liegt nicht so hoch, wie die Reduktion der dieselbezogenen Fahrzeuge, so dass in Summe eine signifikante Reduktion des gesamten Energieverbrauchs bei einer Komplettelektrifizierung des Schienennetzes ausgewiesen werden kann.

Zunahme Elektro	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (PJ)	2,75	2,38
SPFV (PJ)	0,06	0,04
SGV (PJ)	2,51	3,03
gesamt (PJ)	5,32	5,45

Tabelle 77: Zunahme Energieverbrauch – Elektro

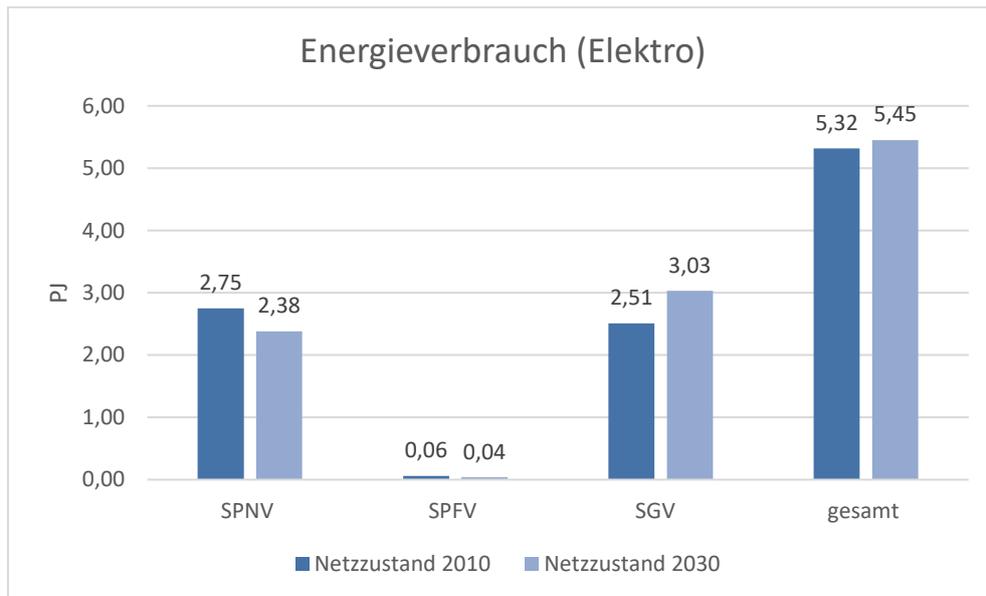


Abbildung 30: Zunahme Energieverbrauch - Elektro

Für das prognostizierte Jahr 2030 wäre durch eine komplette Elektrifizierung des gesamten Schienennetzes eine Reduktion von 9 PJ pro Jahr erzielbar.

Gesamt	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (PJ)	-4,47	-3,86
SPFV (PJ)	0,02	0,02
SGV (PJ)	-4,18	-5,06
gesamt (PJ)	-8,64	-8,90

Tabelle 78: Änderung Energieverbrauch gesamt

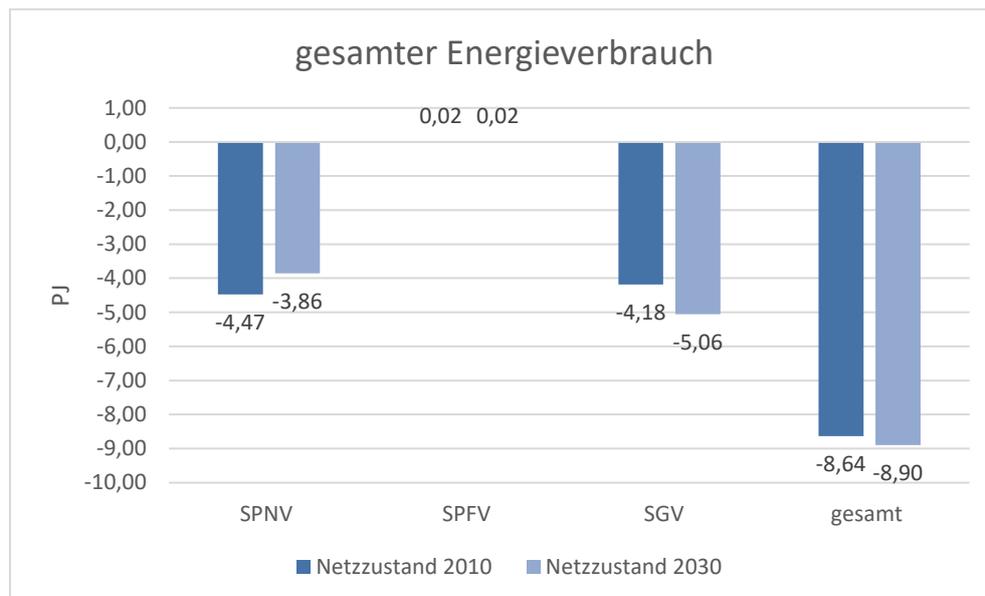


Abbildung 31: Änderung gesamter Energieverbrauch

5.3.5 Abgasemissionen des Schienenverkehrs

Mit dem Energieverbrauch lassen sich auch die damit verbundenen Abgasemissionen berechnen. Im besonderen Fokus stehen in diesem Zusammenhang die CO₂-Emissionen. Eine Komplettelektrifizierung würde für das prognostizierte Jahr 2030 eine Reduktion von 1,02 Mt mit sich bringen.

Betrachtet man die CO₂-Emissionen, die allein durch den Einsatz von dieselbetriebenen Zügen entstehen, erwirkt eine Komplettelektrifizierung des Schienennetzes eine Abnahme von 1,32 Mt CO₂⁹⁹ für das Jahr 2030.

Abnahme Diesel	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (Mt)	-0,66	-0,57
SPFV (Mt)	0,00	0,00
SGV (Mt)	-0,61	-0,74
Gesamt (Mt)	-1,28	-1,32

Tabelle 79: Abnahme CO₂-Emissionen (Diesel)

⁹⁹ Berechnung folgt 3,24 kg CO₂/L Diesel; Umrechnung Energieverbrauch_{Diesel}: 43,1 MJ/kg (Energieverbrauch in MJ/Liter); Dichte_{Diesel}: 0,82 kg/Liter

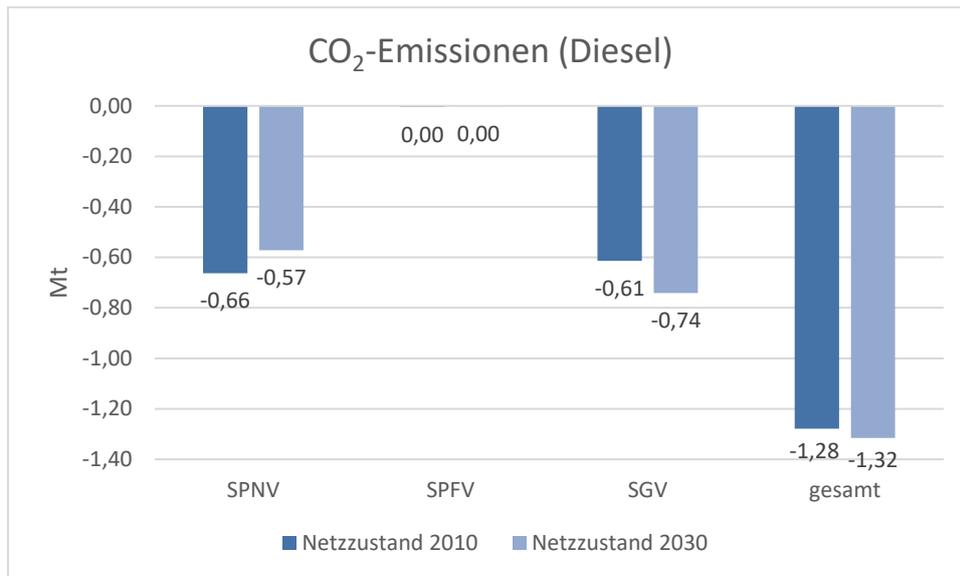


Abbildung 32: Abnahme CO₂-Emissionen (Diesel)

Durch den vermehrten Einsatz von elektrifizierten Zügen im Schienennetz entsteht eine marginale Zunahme von 0,29 Mt CO₂-Emissionen.¹⁰⁰

Zunahme Elektro	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
SPNV (Mt)	0,15	0,13
SPFV (Mt)	0,00	0,00
SGV (Mt)	0,13	0,16
Gesamt (Mt)	0,28	0,29

Tabelle 80: Zunahme CO₂-Emissionen (Elektro)

¹⁰⁰ Diese Zunahme wird bei der Bereitstellung (Vorleistung) ausgewiesen.

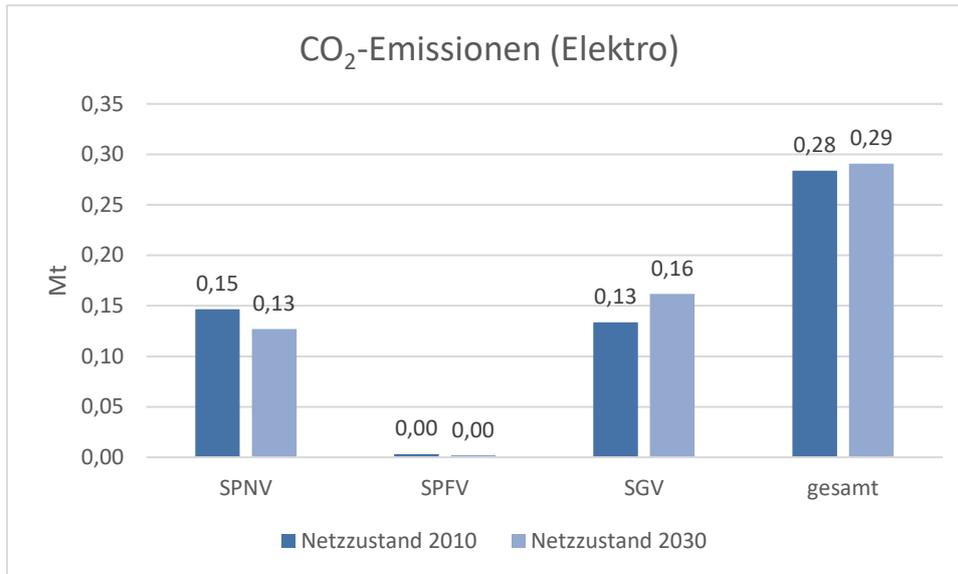


Abbildung 33: Zunahme CO₂-Emissionen (Elektro)

In Summe würde eine Komplettelektrifizierung für das prognostizierte Jahr 2030 eine Reduktion von 1,02 Mt mit sich bringen.

	Netzzustand 2010	Netzzustand 2030
gesamt		
SPNV (Mt)	-0,52	-0,44
SPFV (Mt)	0,00	0,00
SGV (Mt)	-0,48	-0,58
gesamt	-1,00	-1,02

Tabelle 81: Änderung Abgasemissionen (Mt/Jahr)

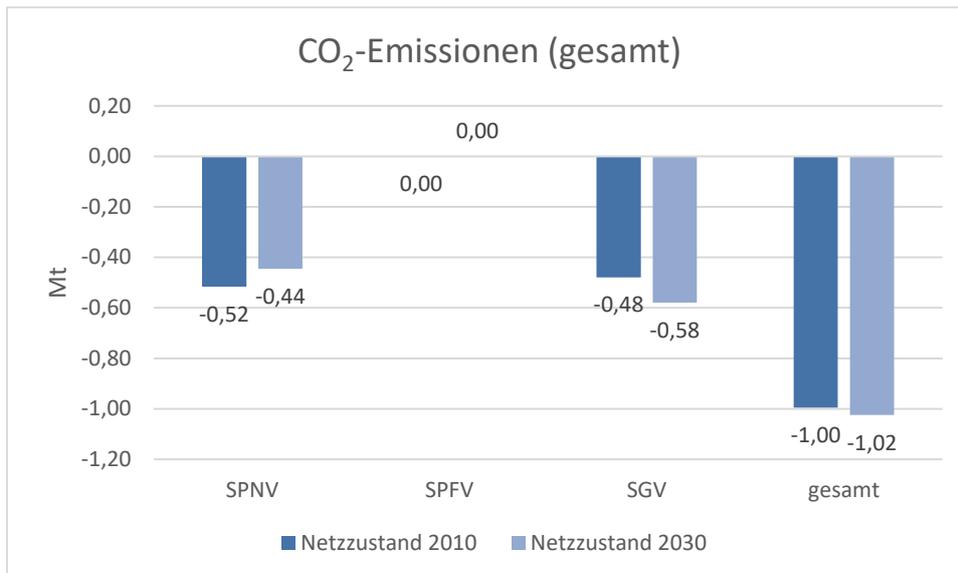


Abbildung 34: Änderung Abgasemissionen gesamt

5.3.6 Vermeidungskosten

Bei der Vermeidungskosten-Berechnung stellen wir den eingesparten CO₂-Emissionen die Aufwendungen für Infrastruktur und Rollmaterial gegenüber.

Die Vermeidungskosten je eingesparter Tonne CO₂ sind ein Maß für die Wirksamkeit der ergriffenen Maßnahme.

Zur vereinheitlichten Rechnung wurde mit den Infrastrukturinvestitionen und den Rollmaterialkosten der Projektpartner TU Berlin und TU Dresden gerechnet. Ergänzende Betriebskosten wurden nach der Methodik der BVWP berechnet. Der Kennwert Vermeidungskosten bezieht diese Investitionen auf eine vermiedene Tonne CO₂. Für eine durchschnittliche angenommene Nutzungsdauer von **35 Jahren** für das Rollmaterial, einer angenommenen Lebensdauer der Infrastruktur von **60 Jahren**, und einem angenommenen **Zinssatz** von **1,7%** bekommt man im Ergebnis Vermeidungskosten in Höhe von **464,13 €/tCO₂** für den Netzzustand 2010 und Vermeidungskosten in Höhe von **320,66 €/tCO₂** für den Netzzustand 2030.

		2010	2030	
Treibhausgasemissionen (WtW) Einsparung pro Jahr		Mt CO ₂ /a	-1,00	-1,02
Investitionskosten (Infrastruktur)		Mio. €	21.475,00	17.710,00
Lebensdauer		Jahre	60	60
Zinssatz BVWP			1,70%	1,70%
Annuität Infrastruktur		Mio. €/a	573,75	473,16
jährlicher Unterhalt Infrastruktur		Mio. €/a	214,75	177,10
Rollmaterial	Annuität Rollmaterial	Mio. €/a	13,86	13,46
	Instandhaltung	Mio. €/a	-112,01	-103,49
	Energie	Mio. €/a	-204,41	-207,39
weitere Betriebskosten	Personalkosten SV	Mio. €/a	0,53	0,09
	Vorhaltungskosten SGV	Mio. €/a	0,00	0,00
	Zugbereitstellungskosten SGV	Mio. €/a	0,00	0,00
	Zugbildungskosten SGV	Mio. €/a	0,00	0,00
	Traktionswechselkosten SGV	Mio. €/a	-24,34	-24,34
jährliche Vermeidungskosten		Mio. €/a	462,12	328,59
Vermeidungskosten je Tonne CO₂		€/tCO₂	464,13	320,66

Tabelle 82: Vermeidungskosten (€/tCO₂)

Zentral bedeutet dieses Ergebnis, dass ausgehend vom Netz „Bezugsfall Knoten 2030“ bei einer Komplettelektrifizierung des deutschen Schienenverkehrs **320,66 €** investiert werden müssen, damit eine Tonne CO₂-Emissionen eingespart werden kann.

Teil II: Kostenoptimierte weitergehende Elektrifizierung des Schienennetzes unter Einsatz von Elektrifizierungsinselfn und hybriden Antrieben

6 Einleitung

6.1 Ausgangslage und Ziel der Studie

Im Laufe der Studie I „Rahmenbedingungen und Kosten einer Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes“ wurden Überlegungen laut, wie sich statt einer kompletten Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes eine teilweise Elektrifizierung desselben unter Einsatz von hybriden Antriebstechnologien auf Kosten und CO₂-Emissionen auswirken würde. Aus diesem Grund wurde die im Folgenden beschriebene Studie II: „Kostenoptimierte weitergehende Elektrifizierung des Schienennetzes unter Einsatz von Elektrifizierungsinseln und hybriden Antrieben“ initiiert.

Initial wurde nicht mehr davon ausgegangen, dass das komplette deutsche Schienennetz bis 2030 zu elektrifizieren sei, sondern es wurde ausgehend von dem Schienennetz „Bezugsfall Knoten“ des BVWP 2030 untersucht, welche unter Dieseltraktion stehenden Schienenverkehrsstrecken sinnvollerweise darauf aufbauend zu elektrifizieren sind und welche Strecken durch hybride Antriebe genutzt werden können. Das heißt, in Studie II wird ein eigenständig entwickelter Netzzustand für das Jahr 2030 untersucht.

Die Struktur der Arbeitspakete ist für die beiden Studien I und II identisch:

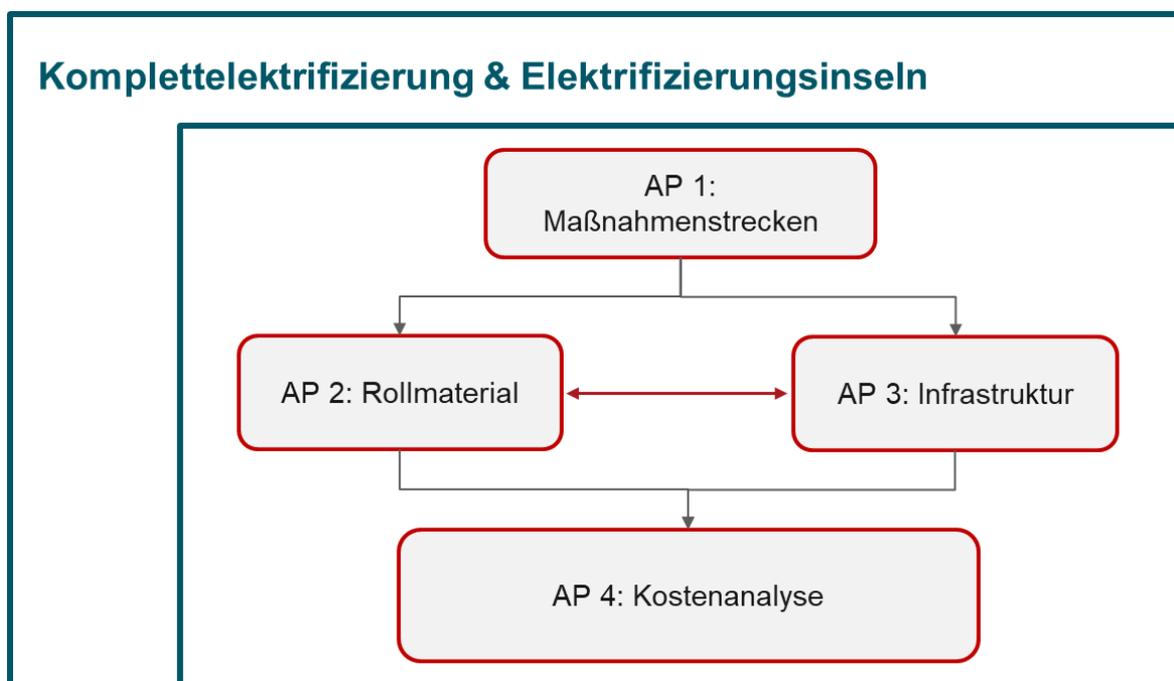


Abbildung 35: Struktur der Arbeitspakete

6.2 Vorgehensweise der Studie

Grundlage der Studie bildete das Schienennetz „Bezugsfall Knoten“ des BVWP 2030. Davon ausgehend wurde ein digitales Schienennetzmodell modelliert, das alle Strecken und Bahnhöfe des deutschen Schienennetzes abdeckt. Die folgenden Arbeitspakete sind analog zur Studie I angeordnet.

6.3 Arbeitspaket 1: Maßnahmenstrecken

In **Arbeitspaket 1** erfolgte wiederum die Netzaufbereitung. Das mit der Software PTV Visum erstellte digitale Schienennetzmodell basierte auf dem Schienennetz „Bezugsfall Knoten 2030“ des BVWP. Jede Strecke wurde nach ihren Charakteristika (zum Beispiel: Trassierung, Anzahl der Gleise, der Modellfahrzeugtyp und die gefahrenen Zugkilometer) und ihrer Lage im Schienennetz erfasst. Jeder Bahnhof wurde als Knoten in dem Modell durch eine eindeutige Angabe für x- und y-Koordinate festgelegt. Insgesamt wurden 26.333 Strecken und 22.769 Knoten für das europäische Schienennetz eingelesen. In Deutschland liegen davon 9.889 Knoten und 10.865 Strecken.

Zusätzlich wurden wiederum geclusterte Höhenlagen als weiteres Netzattribut im Visum Schienennetz hinterlegt, da diese für Berechnungen der Infrastrukturkosten eine Rolle spielten.

Das Visum Schienennetzmodell kann nach den unterschiedlichen integrierten Netzattributen grafisch, aber auch tabellarisch gefiltert werden.

6.4 Arbeitspaket 2: Rollmaterial

Im **Arbeitspaket 2** wurde analog zur Studie I zur Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes für das Prognosejahr 2030 das Rollmaterial für den zusätzlichen elektrifizierten Betrieb ermittelt. Ergänzend zu den bisherigen Varianten mit gemischter Traktion wurde an dieser Stelle untersucht, welchen Nutzen die Verwendung von Hybridfahrzeugen hat und wie hoch die dabei anfallenden Kosten voraussichtlich sein werden.

6.5 Arbeitspaket 3: Infrastruktur

In **Arbeitspaket 3** wurden die Effekte einer möglichen Teilelektrifizierung der heute noch mit Dieselfahrzeugen befahrenen deutschen Eisenbahnstrecken betrachtet. Hierzu wurde auf Basis eines perspektivischen Netzzustandes 2030 ein generisches Streckennetz mit zusätzlichen Elektrifizierungsabschnitten sowie Ladepunkten für den Betrieb von Oberleitungs-/ Batteriehybridfahrzeugen im Regionalverkehr entwickelt und monetär bewertet.

6.6 Arbeitspaket 4: Kostenanalyse

In **Arbeitspaket 4** wurde die Berechnung der Betriebs- und Vermeidungskosten einer Teil-elektrifizierung des deutschen Schienennetzes durchgeführt. Hierfür wurden analog zu den Berechnungen der Studie I Endenergieverbrauch und die CO₂-Emissionen gemäß der Methodik des Bewertungsverfahrens zur Bundesverkehrswegeplanung 2030 ermittelt.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen den beiden Studien ist nur bedingt möglich, da zwar die gleiche Methodik in den Berechnungen angewendet wurde, jedoch die Netzgrundlage des digitalen Schienennetzmodells vom Schienennetz der „Verflechtungsprognose 2030“ in Studie I auf das Schienennetz „Bezugsfall Knoten 2030“ auftragsgemäß in Studie II auftragsgemäß gewechselt hat.

7 Netzaufbereitung und Maßnahmenstrecken

Ausgangslage der vorliegenden Studie II ist das digitale Schienennetz „Bezugsfall Knoten 2030“ aus der Bundesverkehrswegeplanung 2030 zum Stand der Studienbearbeitung, das die Strecken der DB und der NE-Bahnen umfasst. Die PTV AG hat aus diesem Netz ein digitales modellierbares Schienennetz mit Hilfe der Software PTV Visum erstellt.

Bei Übernahme der bereitgestellten Netzdaten wurden diese auf Vollständigkeit und Plausibilität überprüft. Die „Haltestellen“ wurden im Netz als Knotenpunkte übernommen (X, Y-Koordinaten), die „Bahnstrecken“ als Streckenabschnitte zwischen den Knotenpunkten.

Weitere wichtige Attribute in dem Netz sind:

- Länge der Strecke (in km),
- Anzahl der Züge (pro Tag),
- Traktionsart (Elektro- oder Dieseltraktion),
- Anzahl der Gleise (ingleisig oder mehrgleisig),
- verschiedene Geschwindigkeitsklassen (konventionelle Strecke, Neubau- oder Ausbaustrecke).

Als zusätzliches Attribut wurde wieder die Höhenlage in das Netz integriert (vgl. Kapitel 2).

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die Filterfunktionen in Visum. Zunächst sieht man in der Abbildung 36 das gesamte europäische Schienennetz mit allen Strecken und Knoten.



Abbildung 36: Überblick über das europäische Schienennetz

Eine erste Filtermöglichkeit ist die ausschließliche Darstellung des deutschen Schienennetzes.



Abbildung 37: Überblick über das deutsche Schienennetz

Ein weiteres Netzattribut bildet die „Traktionsart“. Dieser Parameter gibt an, ob eine Strecke des Schienennetzes elektrifiziert ist oder ob sie unter Dieseltraktion läuft. In der Grafik können die Strecken unterschiedlich farbig angezeigt werden.

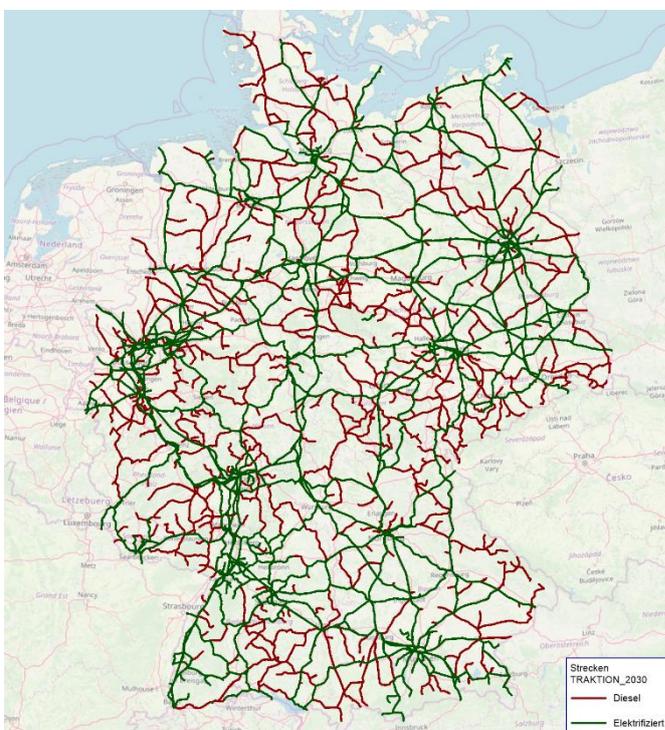


Abbildung 38: Die Traktion der Strecken

Zusätzlich kann die Anzahl der Gleise nach einer entsprechenden Filterung in der Datenbank angegeben werden.

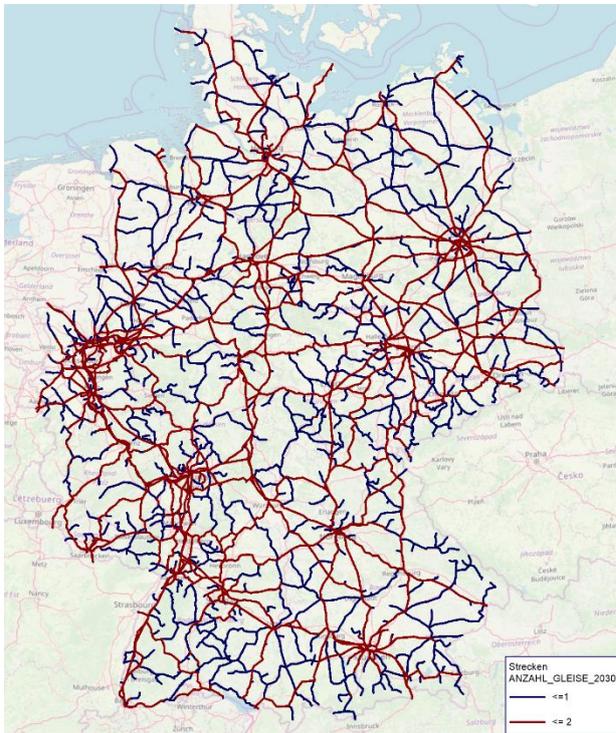


Abbildung 39: Anzahl der Gleise

Das Netzattribut Höhe zeigt die Höhenprofile aller Streckenabschnitte des Schienenmodells an.

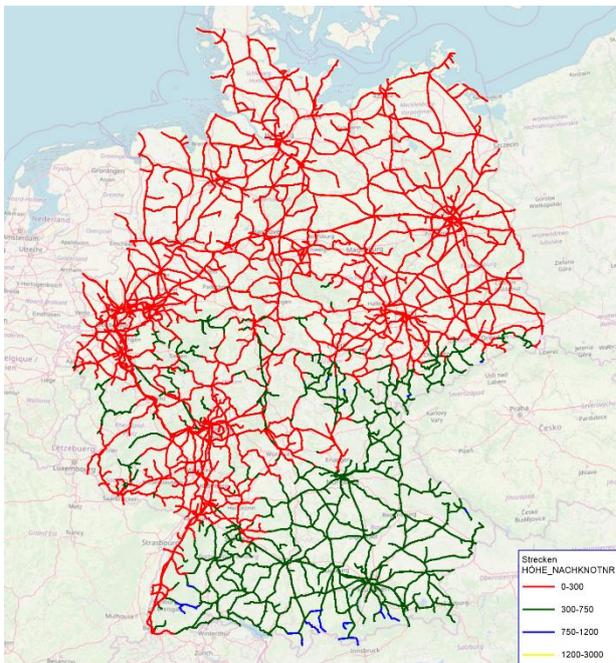


Abbildung 40: Geclusterte Höhenlagen

8 Rollmaterial

8.1 Hybridfahrzeuge

An dieser Stelle wird untersucht, welchen Nutzen die Verwendung von Hybridfahrzeugen hat und wie hoch die dabei anfallenden Kosten voraussichtlich sein werden. Die Dieseltriebfahrzeuge werden hierbei durch elektrische Triebfahrzeuge ersetzt, welche eine alternative, vom Fahrdraht unabhängige Energieversorgung bieten. Diese Triebfahrzeugkombination wird im Folgenden auch als Hybridtriebfahrzeug bezeichnet. Durch diese Ausgestaltung können derartige Fahrzeuge auf nicht elektrifizierten Strecken verkehren und es muss erheblich weniger Gleislänge elektrifiziert werden. Die Art der Hybridisierung richtet sich nach den Anforderungen des Streckenbetriebs. In dieser Untersuchung werden für Fahrzeuge im SPNV als Triebwagen sogenannte Batteriehybride angenommen.

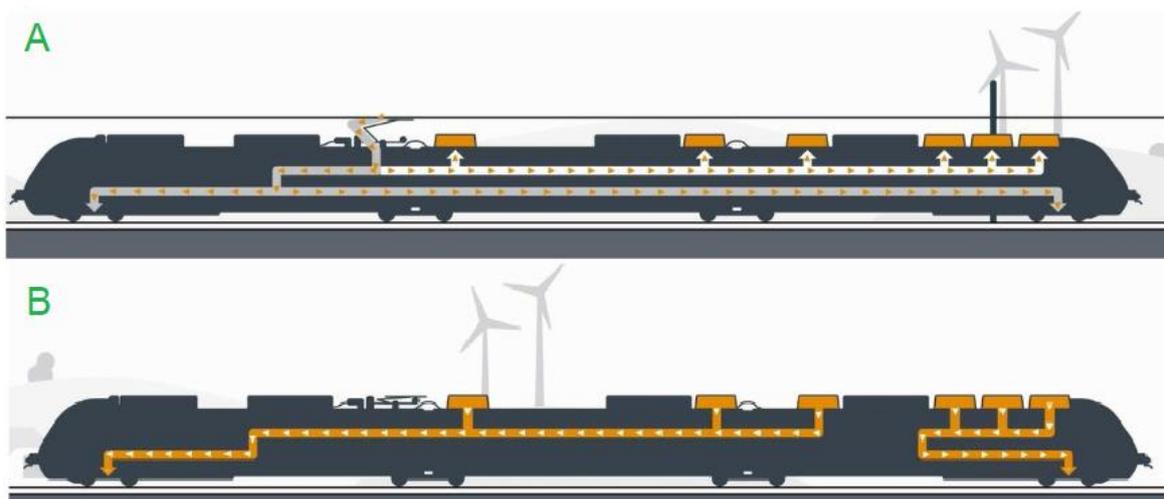


Abbildung 41: Verlauf der elektrischen Energie in einem Batterietriebzug

Das heißt, diese Fahrzeuge sind mit Batterien ausgestattet, die während der Fahrt auf elektrifizierten Streckenabschnitten geladen werden (Abbildung 41 A). Auf nicht elektrifizierten Streckenabschnitten speisen die geladenen Batterien dann den elektrischen Antriebsstrang des Fahrzeugs (Abbildung 41 B).



Abbildung 42: Bombardier TALENT 3 Battery Train¹⁰¹

Als Beispiel für einen solchen Batterietriebzug ist in Abbildung 42 der TALENT 3 der Firma Bombardier dargestellt. Bei diesem Zug sind die Batterien, welche die Energie auf nicht

¹⁰¹ VDB Verband der Bahnindustrie in Deutschland e.V., „Railway Transport 4.0 – Innovation within the railway industry for more climate protection and more customer quality“, Berlin, 2018

elektrifizierten Strecken bereitstellen, auf dem Dach platziert. Für die Triebfahrzeuge des Schienengüterverkehrs und Schienenpersonenfernverkehrs besitzen die derzeitigen elektrischen Energiespeicher noch keine ausreichenden Kapazitäten, um größere nicht elektrifizierte Strecken zu überbrücken. Die im Schienengüterverkehr eingesetzten Dieseltriebfahrzeuge legen jedoch den Großteil ihrer Laufleistung auf elektrifizierten Strecken zurück. Ein Fahranteil von 97 % auf elektrifizierten Strecken ist hierbei kein unüblicher Wert. Aufgrund von nicht elektrifizierten Teilstücken im Schienennetz oder nicht elektrifizierten Lade- und Anschlussgleisen ist jedoch die Nutzung eines rein elektrischen Triebfahrzeuges teilweise nicht möglich. Für den Schienengüterverkehr und Schienenpersonenfernverkehr bieten sich nach aktuellem Stand der Technik daher Diesel-Elektro-Hybridfahrzeuge an und werden als Hybridvariante im Rahmen dieser Studie angesetzt. Der flexible Einsatz dieser Fahrzeuge bleibt gewährleistet, wobei der Dieserverbrauch jedoch signifikant gesenkt werden kann. Ein Beispiel für eine Lok dieser Kategorie ist die EuroDUAL (Abbildung 43), welche für den Einsatz im SGV vorgesehen ist.

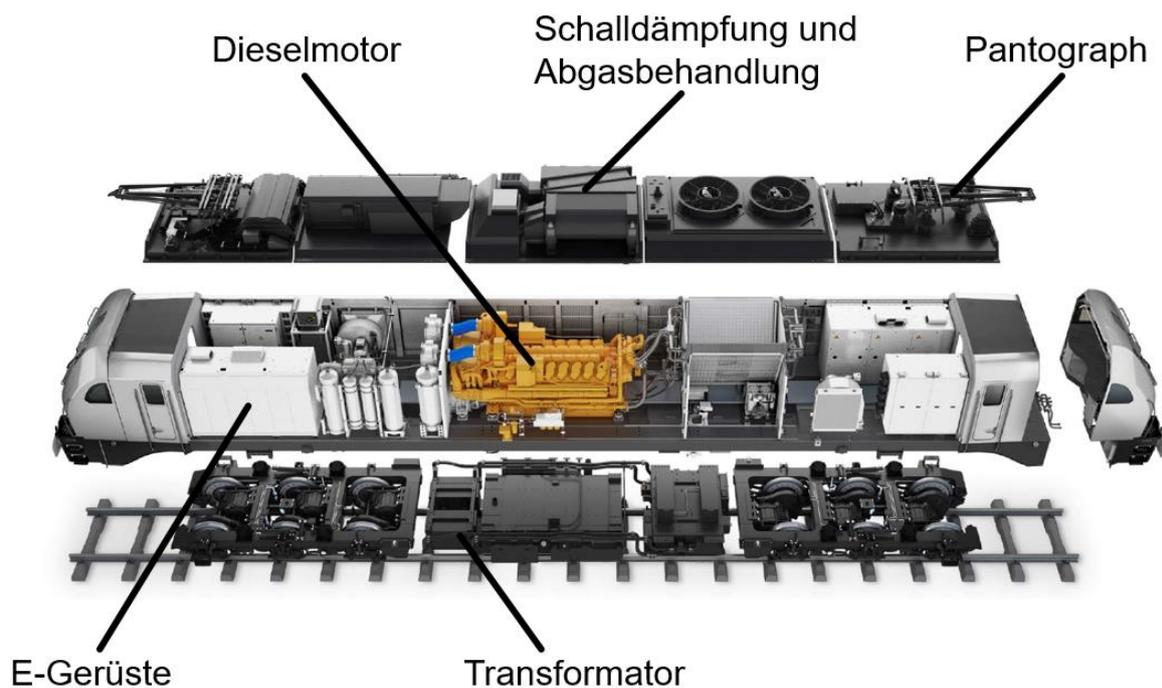


Abbildung 43: Diesel-Elektro-Hybridfahrzeuge EuroDual der Firma Stadler¹⁰²

¹⁰² Stadler, „EuroDual Lokomotive“, Langenthal, 2018

8.1.1 Vergleich der Kostenparameter

8.1.1.1 Spezifische Energieverbräuche

8.1.1.1.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs für den Schienenpersonenfernverkehr erfolgt auf Basis der bekannten Transportleistungen in Trassenkilometern und der dafür benötigten Energiemengen für Elektro- und Dieseltraktion im Jahr 2010. Die Werte sind Tabelle 83 für Elektrotraktion und Tabelle 84 für Dieseltraktion zu entnehmen. Die Rückspeisequote von 10,2 % setzt sich aus den niedrigeren Rückspeisequoten der lokbespannten Züge und den höheren Rückspeisequoten der Triebzüge zusammen. Da bei der Hybridvariante ausschließlich Hybrid-Lokomotiven mit Wagen und keine Triebzüge mehr zum Einsatz kommen, entspricht die Rückspeisequote der der konventionellen lokbespannten Züge mit 9,3 %, was in einem leicht höheren spezifischen Nettoenergiebedarf resultiert.

Referenzwerte 2010 elektrische Traktion				Spezifischer Nettoenergiebedarf	
Nettobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Bruttobedarf [PJ]	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	[GJ/Mio. Tr.km]	[kWh/Tr.km]
Konventionelle Traktion 2010					
8,2	10,2	9,1	133,84	61.268,77	17,02
Hybridlok-bespannter Wagenzug 2030					
8,3	9,3	9,1	133,84	61.882,82	17,19

Tabelle 83: SPFV - Spezifischer elektrischer Nettoenergiebedarf je Trassenkilometer

Referenzwerte 2010 Diesel Traktion				Spezifischer Bruttoenergiebedarf 2010	
Nettobedarf [PJ]	Rückspeisequote [%]	Bruttobedarf [PJ]	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	[GJ/Mio. Tr.km]	[kWh/Tr.km]
0,5	-	0,5	2,89	165.564,95	45,99

Tabelle 84: SPFV - Spezifischer Diesel Energiebedarf je Trassenkilometer [Tr.-km]

Die Berücksichtigung der prognostizierten Energieeffizienzverbesserung von 10 % bei Dieselmotoren führt auf einen spezifischen Bruttoenergiebedarf im SPFV bei Dieseltraktion von 41,39 kWh/Tr.km oder von 4,3 l/Tr.km im Jahr 2030.

8.1.1.1.2 Elektrotraktion Schienenpersonennahverkehr

Für die Modellfahrzeuge des BVWP-Bewertungsverfahrens wurden spezifische Energieverbräuche angenommen. Als Ausgangsbasis zur Bestimmung der Kosten der Batteriehybridfahrzeuge im SPNV dienen erneut die Anzahl der benötigten Triebfahrzeuge bei Dieseltraktion (s. Tabelle 85) und der Energieverbrauch der elektrischen Modellfahrzeuge nach BVWP. Die entsprechenden Werte wurden bereits für die vorherigen Netzzustände bestimmt und sind Tabelle 14 des Abschnittes 3.2.1.2.2 zu entnehmen. Die Aufteilung der

Fahrleistung nach Zugkilometern auf die einzelnen Modellfahrzeugzugattungen wird wie in den bisherigen Netzzuständen beibehalten, die jährliche Fahrleistung liegt analog zu dem Basis- und Planfall 2030 bei 221,96 Mio. Zug-km.

Fahrzeugbestand				
n-teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Fahrleistung [Mio. Zug-km/Jahr]
1	223	NV 80D	10,61	24
2	1.593	NV 130D	75,82	168
3	84	NV 180D	4,00	9
Lok	201	Lok	9,57	21

Tabelle 85: SPNV - Aufteilung der Fahrleistung [Zug-km] nach Triebfahrzeug

Der spezifische Energieverbrauch setzt sich zum einen aus der für die Traktion benötigten Energie und der zeitabhängigen, für den Fahrzeugbetrieb erforderlichen Energie zusammen. Für das Modellfahrzeug NV 120E SD beträgt der spezifische Energieverbrauch bei 50 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit beispielsweise 3,1 kWh/km. Wie bereits für die zwei Netzzustände 2010 und 2030 der Studie I wird erneut mit einer im Nahverkehr üblichen Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h gerechnet, um die Werte für die Hybridfahrzeuge zu bestimmen.

8.1.1.1.3 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Der Energiebedarf bei einem Oberleitungs-Batteriehybridzug wird im Vergleich zu einem reinen Oberleitungstriebzug höher ausfallen. Maßgeblich wird dies durch die höhere zu bewegende Masse (zusätzlicher Akku) und durch die zusätzlichen Energieverluste bei Zwischenspeicherung der Energie in Akkus verursacht. Die höhere Zugmasse wirkt sich in allen Betriebspunkten auf den Traktionsenergiebedarf aus. Die zusätzlichen Wandlungsverluste wirken sich jedoch nur auf den Energiebedarf in Phasen ohne Oberleitungsbetrieb aus. Hier muss jedoch auch die Auswirkung auf die Nebenverbraucher betrachtet werden, da diese einen teils erheblichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf haben.

In Tabelle 86 ist der Traktionsenergiebedarf für einen Batteriehybridzug dargestellt. Den Berechnungen liegt ein spezifisches Akkugewicht von 14 kg/kWh bis 18 kg/kWh zugrunde [vergl. VDE¹⁰³ und Bombardier¹⁰⁴]. Darin ist neben der Masse der Akkumulatoren auch das Gewicht der Gehäuse und der zusätzlichen Hilfsbetriebe berücksichtigt. Als zusätzliche Komponente sei hier vor allem die Klimatisierung der Batteriepacks erwähnt. Bei der Bemessung der Batteriekapazität muss weiterhin berücksichtigt werden, dass aus Gründen

¹⁰³ VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., „Batteriesysteme für Schienentriebzüge,“ Frankfurt, 2018.

¹⁰⁴ Bombardier Transportation, „Want a battery train? - Bombardier's TALENT 3 battery electric multiple unit.“ [Film], 2018. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?time_continue=60&v=xxZQeS__6sE. [Zugriff am 13 11 2018].

der Verlängerung der Lebensdauer der Akkus oft nicht die gesamte installierte Kapazität genutzt wird. Zusätzlich wird eine Reserve eingeplant, um auch bei leicht gealterten Batterien ausreichend Kapazität zur Verfügung zu haben. Hier wurde von einem Akkuausnutzungsgrad von 40 % ausgegangen. Dies entspricht einem Betrieb zwischen 30 % und 70 % State of Charge (SoC), wie er aktuell in E-Bussen üblich ist¹⁰⁵. Unter diesen Randbedingungen und einem Gesamtwirkungsgrad von 90 % für die Zwischenspeicherung der elektrischen Energie ergibt sich ein Akkugewicht von 5,4 t für den zweiteiligen Triebzug und 7,9 t für den dreiteiligen Triebzug.

Referenz Modellfahr- zeug	Spezifischer Fahrzeugenergieverbrauch bei 50 km/h (kWh/Fahrzeug-km)			Mehrgewicht durch Akku [t]
	Ausgang (kein Hybrid)	Oberleitungs-Batterie-Hybrid		
		Netzbetrieb	Akkubetrieb	
NV 120 E SD	3,1	3,3	3,6	5,4
NV 180 E SD	4,1	4,3	4,8	7,9

Tabelle 86: Spez. Fahrzeugenergieverbrauch und Mehrgewicht durch Akku SPNV

8.1.1.1.4 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr im Jahr 2010 sind sowohl die Transportleistungen in Tonnenkilometern als auch die benötigten Energiemengen für Elektro- und Dieseltraktion bekannt. Die jeweiligen Werte wurden für elektrische Traktion bereits im Planfall 2010 verwendet und sind Tabelle 34 des Abschnittes 3.2.3.1.3 zu entnehmen. Daraus resultiert ein spezifischer Bruttoenergiebedarf von 126,61 GJ/Mio. tkm bzw. 35,17 Wh/tkm und entsprechend bei einer Rückspeisequote von 8,8 % ein spezifischer Nettoenergiebedarf von 115,82 GJ/Mio. tkm bzw. 32,17 Wh/tkm für Elektrotraktion. Für Dieseltraktion beträgt der spezifische Bruttoenergiebedarf 402,81 GJ/Mio. tkm bzw. 111,89 Wh/tkm (s. Tabelle 87).

Referenzwerte 2010 Diesel Traktion				Spezifischer Bruttoenergie- bedarf 2010	
Nettobe- darf [PJ]	Rückspeise- quote [%]	Bruttobe- darf [PJ]	Fahrleistung [Mio. tkm]	[GJ/Mio. tkm]	[Wh/tkm]
3,1	-	3,1	7.696	402,81	111,89

Tabelle 87: SGV - Spezifischer Diesel Energiebedarf je tkm

Da für die Untersuchung Trassen- bzw. Zugkilometer ohne die zugehörige Beladung gegeben sind, wird der spezifische Energieverbrauch pro Trassenkilometer bestimmt. Mangels genauerer Angaben pro Zug wird hier ein Durchschnittswert je Zugkilometer gebildet. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 88 dargestellten spezifische Energieverbräuche.

¹⁰⁵ Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), Präsentation „Projekt "E-Bus Berlin"", in Allianz pro Schiene, Projekt "Fahr umweltbewusst!", Berlin, 2018.

Unter Berücksichtigung der angenommenen Verbesserung der Energieeffizienz von 10 % bei Dieselmotoren beträgt der spezifische Bruttoenergiebedarf im SGV bei Dieseltraktion 39,95 kWh/Tr.km oder 4,6 l/Tr.km im Jahr 2030.

Spez. Bruttoenergiebedarf Dieseltraktion		Spez. Nettoenergiebedarf E-Traktion	
Wh/tkm	kWh/Tr.km	Wh/tkm	kWh/Tr.km
2010 (Diesel: Keine Verbesserung; Elektro: 5,5 % Rückspeisung)			
111,89	44,39	33,38	13,24
2030 (Diesel: 10 % Verbesserung; Elektro: 8,8 % Rückspeisung)			
100,70	39,95	32,17	12,76

Tabelle 88: SGV - Spezifischer Energiebedarf je Trassenkilometer [Tr.-km]

8.1.1.2 Nutzungsdauer

Zur Berechnung der jährlichen Kosten muss eine Nutzungsdauer der Triebfahrzeuge festgesetzt werden. Für die konventionellen Fahrzeuge wird die jeweilige Nutzungsdauer beibehalten, diese ist Abschnitt 3.2.1.3 zu entnehmen. Dort wurde für Diesellokomotiven eine Einsatzzeit von 30 Jahren und für Elektrolokomotiven eine Einsatzzeit von 40 Jahren angenommen. Für einen Elektrotriebwagen wurden 30 Jahre und für einen Dieseltriebwagen 25 Jahre angesetzt. Ein Batteriehybrid-Triebwagen ist in seinem Grundaufbau einem Elektrotriebwagen sehr ähnlich und in den aktuellen Prototypen von diesem abgeleitet. Zusätzlich besitzt er einen oder mehrere Akkupacks und eine Klimatisierung der Akkus. Diese können jedoch sinnvoller Weise separat getauscht werden, da sie eine geringere Lebenserwartung als der Triebwagen besitzen. Der Tausch der Akkupacks ist in den Instandhaltungskosten berücksichtigt. Für einen Batterietriebwagen wird daher eine Einsatzzeit von 30 Jahren analog zu einem elektrischen Triebwagen prognostiziert.

Die angesetzte Nutzungsdauer bei Dieselhybrid-Lokomotiven beträgt analog zu elektrischen Lokomotiven 40 Jahre, da auch diese technisch eher mit einer elektrischen Lokomotive als einer Diesellokomotive verwandt sind. Für die vergleichende Betrachtung bei einer Umstellung müssen auch die Kosten der Wagen bei lokbespannten Zügen mitberücksichtigt werden. Dies ergibt sich aus dem Umstand, dass bei einer Umstellung auf Hybridfahrzeuge die Zugkategorien teilweise nicht identisch übertragbar sind. So wird im SPNV sämtlicher Hybridverkehr in der vorliegenden Studie durch Triebfahrzeuge abgebildet. Dadurch entfallen Reisezugwagen für den ursprünglichen Dieserverkehr. Die Wagen werden unabhängig von der Traktionsart und der Verkehrsart, also sowohl für SPNV als auch SPfV, und ebenso unabhängig davon, ob von konventioneller- oder Hybridlok gezogen, gemäß BVWP-Methodik mit einem Einsatzzeitraum von 30 Jahren angesetzt.

8.1.1.3 Beschaffungskosten

8.1.1.3.1 Diesel- und Elektrofahrzeuge

Für die Beschaffungskosten kann auf die Einheitssätze der BVWP-Methodik bei den Triebzügen und Lokomotiven zurückgegriffen werden. Die jeweiligen Kostensätze für konventionelle Fahrzeuge wurden bereits für die Netzzustände 2010 und 2030 in Studie I verwendet und sind Abschnitt 3.2.1.4 zu entnehmen.

8.1.1.3.2 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Für die Beschaffungskosten des Hybridfahrzeuges wird erneut die Annahme getroffen, dass derartige Fahrzeuge etwa ein Drittel teurer als gewöhnliche Fahrzeuge sind. Tabelle 89 gibt eine Übersicht über die spezifischen Investitionskosten von Lokomotiven.

Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	
	Konventionell	Hybrid
Diesellok	3,2	-
Einstrom Elektrolok	3,2	4,3
Zweistrom Elektrolok	3,5	4,7
Dreistrom Elektrolok	3,8	5,1

Tabelle 89: Spezifische Investitionskosten Hybrid-Lokomotiven

Um eine möglichst hohe Interoperabilität zu gewährleisten, wie sie bei Diesellokomotiven gegeben ist, wird als Basis für eine Hybridisierung die Dreistrom-Elektrolok der BVWP-Methodik verwendet, was Investitionskosten von 5,1 Mio. Euro je Fahrzeug zur Folge hat. Während beim SPNV keine geeigneten Batteriehybrid-Lokomotiven zur Verfügung stehen und der Vergleich deshalb nur unter Berücksichtigung der Wagen erfolgen kann, fehlen beim SPfV geeignete Hybrid-Hochgeschwindigkeitstriebzüge, um die konventionellen Fernzüge zu ersetzen. Daher muss erneut eine Betrachtung mit kompletten Wagenzügen erfolgen, die reine Differenzbetrachtung bei Triebfahrzeugen reicht nicht aus.

Auch für den SPfV sieht der BVWP-Methodik Standardkompositionen inklusive Anschaffungs- und Instandhaltungskostensätzen für einen lokbespannten Wagenzug vor. In Frage kommt der Modellfahrzeugtyp „FV DoSto“. Die doppelstöckige Konfiguration setzt sich dabei aus einer Lokomotive, einem Steuerwagen und vier Mittelwagen zu einem Fünfswagenzug mit den in Tabelle 90 aufgeführten Parametern und in Tabelle 91 dargestellten spezifischen Kosten zusammen. Die Beschaffungskosten des Hybridzuges entsprechen dabei jenen der elektrischen Variante zuzüglich der um 1,3 Mio. Euro höheren Kosten der Hybridlokomotive gegenüber der elektrischen Lokomotive.

Bezeichnung	Anzahl Fahrzeuge in Wagenzug	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Fahrzeuglänge [m]
Lokbespannter Wagenzug FV	6	470	380	150

Tabelle 90: SPFV Wagenzug – Modellfahrzeugtypen

Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
Diesel- / Dreistrom E-Lok / Dreistrom H-Lok	3,2 D / 3,8 E / 5,1 H
Steuerwagen 2. Klasse	2,6
Mittelwagen 1. oder 2. Klasse	1,9
Lokbespannter Wagenzug	13,4 D / 14,7 E / 16,0 H

Tabelle 91: Modellfahrzeugtyp SPFV Wagenzug - spezifische Investitionskosten

Der lokbespannte Wagenzug liegt unabhängig von der Traktionsart bei den spezifischen Beschaffungskosten deutlich unter dem Wert des konventionellen Triebwagens Modellfahrzeugtyp HGV C. Gleichzeitig würde die Sitzplatzkapazität erhöht und die Höchstgeschwindigkeit aufgrund fehlender Neigetechnik verringert werden (s. Tabelle 92).

Bezeichnung	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
HGV C	230	390	400	21 D / 23,1 E
Lokbespannter Wagenzug FV	160	470	380	13,4 D / 14,7 E

Tabelle 92: Vergleich Investitionskosten SPFV-Wagenzug zu Triebwagen

8.1.1.3.3 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Als Basis für die Beschaffungskosten der Batteriehybrid-Triebzüge wird angenommen, dass diese Mehrkosten von etwa einem Drittel gegenüber reinen E-Triebwagen mit sich bringen. Dies deckt sich mit den Annahmen der BEG Studie der technischen Universität Dresden¹⁰⁶ und führt zu den in nachfolgender Tabelle 93 dargestellten Investitionskosten je Fahrzeug.

Elektrotraktion		Batteriehybrid	
Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
NV 120 E SD	3,6	NV 120 BEMU	4,68
NV 180 E SD	4,4	NV 180 BEMU	5,72
Lok	3,2	Nicht verfügbar	-

Tabelle 93: Spezifische Investitionskosten BEMU

Wie der Tabelle 93 zu entnehmen ist, ist derzeit keine entsprechende Hybridlokomotive am Markt verfügbar. Daher wird der lokbespannte Zug durch zwei NV 180 BEMU Fahrzeuge ersetzt. Dies führt dazu, dass im Vergleich zum bisher verwendeten Modellfahrzeugtyp Lok

¹⁰⁶ A. Müller, „Technische und wirtschaftliche Bewertung alternativer Antriebskonzepte,“ Technische Universität Dresden, Dresden, 2017.

bei Elektrotraktion die Investitionskosten der NV 180 BEMU Doppeltraktion etwa 3,6-Fach so hoch ausfallen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass bei den bisherigen Netzzuständen die Kosten der Wagen völlig außer Acht gelassen wurden, da sich deren Kostenparameter nicht unterscheiden, egal ob diese von einer Diesel- oder E-Lokomotive gezogen werden.

Ein Kostenvergleich ist an dieser Stelle jedoch nur möglich, wenn auch bei den beiden konventionellen Antriebsarten entweder die lokbespannten Züge durch entsprechende Triebwagen ersetzt werden oder neben der Lokomotive auch die Kosten des Wagenzuges in die Kostenkalkulation einbezogen werden. Daher wird an dieser Stelle für den Modellfahrzeugtyp Lok die reine Lokomotive ohne Wagen durch das Modellfahrzeug „Lokbespannter Wagenzug“ ersetzt. Die Kosten der unterschiedlichen Varianten für den Modellfahrzeugtyp Lok sind in Tabelle 94 dargestellt.

Je Fahrzeug		Modellfahrzeugtyp Lok	
Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
NV 180D	3,7	2 * NV 180D	7,4
NV 180 E SD	4,4	2 * NV 180 E SD	8,8
NV 180 BEMU	5,72	2 * NV 180 BEMU	11,44
Lok (ohne Wagen)	3,2	Lokbespannter Wagenzug	8,3

Tabelle 94: Spezifische Investitionskosten Modellfahrzeugtyp Lok

Für einen lokbespannten Wagenzug sieht die BVWP-Methodik Standardkompositionen inklusive Anschaffungs- und Instandhaltungskostensätzen vor. Die hier verwendete einstöckige Variante setzt sich dabei aus einer Lokomotive, einem Steuerwagen, einem Mittelwagen 1./2. Klasse und zwei Mittelwagen 2.Klasse zu einem Vierwagenzug mit den in Tabelle 95 aufgeführten Parametern und in Tabelle 96 dargestellten spezifischen Kosten zusammen.

Bezeichnung	Anzahl Fahrzeuge in Wagenzug	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Fahrzeuginnenlänge [m]
Lok	1		85	18,9
Steuerwagen 2. Klasse	1	65	36	26,4
Mittelwagen 1./2. Klasse	1	75	35	26,4
Mittelwagen 2. Klasse	2	85	35	26,4
Lokbespannter Wagenzug	5	310	226	124,5

Tabelle 95: SPNV Wagenzug – Modellfahrzeugtypen

Modellfahrzeugtyp	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]
Diesel- oder Einstrom-E-Lok	3,2
Steuerwagen 2. Klasse	1,7
Mittelwagen 1./2. Klasse	1,2
Mittelwagen 2. Klasse	1,1
Lokbespannter Wagenzug	8,3

Tabelle 96: Modellfahrzeugtyp Lok - Investitionskosten

Der lokbespannte Wagenzug liegt bei den spezifischen Beschaffungskosten zwischen der Variante mit zwei Diesel- und zwei Elektrotriebwagen, die Variante mit zwei BEMU Triebwagen kostet etwa das 1,4-fache des (konventionellen) Wagenzuges bei identischem Gewicht (s. Tabelle 97). Der bisher angenommene Mehrkostenfaktor für Hybridfahrzeuge gilt demnach in etwa auch für den Modellfahrzeugtyp Lok. Anzumerken ist noch, dass durch eine Umstellung auf zwei Triebwagen die Sitzplatzkapazität um 50 auf 360 erhöht wird.

Bezeichnung	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Fahrzeuglänge [m]
Lokbespannter Wagenzug	8,3	310	226	124,5
2 * NV 180 D	7,2	360	190	108
2 * NV 180E SD	8,8	360	210	116
2 * NV 180 BEMU	11,44	360	226	116

Tabelle 97: Wagenzug - Modellfahrzeugtyp im Vergleich

8.1.1.3.4 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr werden dieselben Hybrid-Lokomotiven wie für den SPFV verwendet, die Investitionskosten belaufen sich gemäß Tabelle 89 auf 5,1 Mio. Euro je Fahrzeug.

8.1.1.4 Instandhaltungskosten

8.1.1.4.1 Diesel- und Elektrofahrzeuge

Die durchschnittlichen Instandhaltungskosten je km für die konventionellen Fahrzeuge wurden ebenso wie die Investitionskosten der BVWP-Methodik entnommen, daher bereits für die Netzzustände 2010 und 2030 der Studie I verwendet und sind in Abschnitt 3.2.1.5 dargestellt.

8.1.1.4.2 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Für die Dieselhybrid-Lokomotiven sind weder in der BVWP-Methodik Pauschalen für Instandhaltungskosten angegeben noch liegen bisher Erfahrungswerte aus dem laufenden Betrieb vor, wie es bei der ÖBB-Auswertung für konventionelle Fahrzeuge der Fall war. Daher müssen die Werte geschätzt werden. Dies erfolgt jeweils getrennt für den elektrischen- und den Dieselbetrieb. Dabei wird davon ausgegangen, dass immer, wenn eine

Fahrleitung vorhanden ist, elektrisch gefahren wird und der Dieselmotor nur zum Einsatz kommt, wenn dies nicht der Fall ist. Aufgrund der höheren Komplexität des Hybridfahrzeuges im Vergleich zum konventionellen Äquivalent werden die Kosten bei beiden Betriebsmodi höher als bei nicht Hybridfahrzeugen liegen. Bei elektrischem Betrieb kommt hinzu, dass, selbst wenn die Lokomotive nur elektrisch betrieben wird, die Wartung der Dieselmotorkomponenten häufig zeitabhängig ist und diese daher auch ohne Nutzung einer gewissen Wartung bedürfen. Daher werden die Kilometerkosten für die Wartung im Vergleich zur E-Lok 10 % höher angesetzt. Beim Dieselmotorbetrieb ist zu erwarten, dass dieser beim Hybridfahrzeug vor allem für langsame Fahrten und zum Rangieren genutzt wird, da die Streckenfahrten, im Gegensatz zu konventionellen Diesellokomotiven, elektrisch stattfinden. Somit steigt das Verhältnis von Betriebsstunden zu gefahrenen Kilometern und die zeitabhängigen Wartungskosten verteilen sich auf weniger zurückgelegte Kilometer, was höhere Kilometerkosten zur Folge hat. Angenommen werden 20 % höhere Kosten gegenüber einer Diesellokomotive. Die verwendeten Werte sind Tabelle 98 zu entnehmen.

Modellfahrzeugtyp	Unterhaltungs-/Instandhaltungskosten (€/Fahrzeug-km)			
	nach BVWP	Nach ÖBB	Hybrid (auf Basis BVWP)	
			E-Betrieb	D-Betrieb
Diesellok	1,20	0,93	-	1,44
Einstrom Elektrolok	0,60	0,40	0,66	-
Zweistrom Elektrolok	0,70	0,40	0,77	-
Dreistrom Elektrolok	0,80	0,40	0,88	-

Tabelle 98: Spezifische Instandhaltungskosten Hybrid Lokomotiven

Hinzu kommen die Kosten für die Wagen, welche der BVWP-Methodik für die Standardkompositionen, hier also für den kompletten Wagenzug, entnommen werden können. Da dort allerdings keine Hybridfahrzeuge vorhanden sind, werden, wie bereits bei den Investitionskosten geschehen, die konventionellen Modellfahrzeuge für lokbespannte Wagenzüge verwendet und lediglich die Mehrkosten der Hybridlokomotive gegenüber den konventionellen Lokomotiven aufgeschlagen. Die Berücksichtigung der Wagen ist analog des Nahverkehrs notwendig, da - im Gegensatz zu den Fällen ohne Hybrid - keine reine Differenzbetrachtung der Instandhaltungskosten zwischen den unterschiedlichen Traktionsarten bei identischen Fahrzeugtypen (Lokomotiven) erfolgen kann. Vielmehr muss erneut der Vergleich mit unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Triebwagen und Lokomotiven) erfolgen. Die spezifischen Instandhaltungskosten sind in Tabelle 99 aufgeführt.

Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
Diesel- / Dreistrom E-Lok	1,20 D / 0,80 E
Lokbespannter Wagenzug konventionell	3,60 D / 3,70 E
Mehrkosten Hybridlok bei D- / E-Betrieb	0,24 / 0,08
Dreistrom Hybrid-Lok bei D- / E-Betrieb	1,44 HD / 0,88 HE
Lokbespannter Wagenzug Hybrid bei D- / E-Betrieb	3,84 HD / 3,78 HE

Tabelle 99: Modellfahrzeugtyp SPFV Wagenzug - spezifische Instandhaltungskosten

Wie schon bei den bei den spezifischen Beschaffungskosten liegt der lokbespannte Wagenzug deutlich unter dem Wert des konventionellen Triebwagens (Modellfahrzeugtyp HGVC), somit fallen die Kosten aufgrund des zwangsweisen Verzichts auf die Triebwagen entsprechend niedriger aus (s. Tabelle 100).

Bezeichnung	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Sitzplätze	Dienstmasse [t]	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
HGV C	230	390	400	5,0 D / 5,5 E
Lokbespannter Wagenzug FV	160	470	380	3,6 D / 3,7 E

Tabelle 100: Vergleich Instandhaltungskosten SPFV Wagenzug zu Triebwagen

Die Fahrleistung wird konventionell durch jeweils drei Triebwagen oder lokbespannte Wagenzüge erbracht, die Kosten sind Tabelle 101 zu entnehmen.

Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anzahl	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	Instandhaltungskosten [Mio. €]
Wagenzug mit Dreistrom E-Lok	0,4	3	3,7	1,4
Triebwagen HGVC Elektro	1,0	3	5,5	5,6
Summe Elektro	1,4	6		7,0
Wagenzug mit Diesellok	0,4	3	3,6	1,4
Triebwagen HGVC Diesel	1,0	3	5,0	5,0
Summe Diesel	1,4	6		6,5

Tabelle 101: Instandhaltungskosten SPFV konventionell

8.1.1.4.3 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Die Batteriehybrid-Triebzüge sind in ihrem wesentlichen Aufbau mit dem von reinen E-Triebzügen identisch. Daher werden die Instandhaltungskosten von diesen abgeleitet. Als zusätzlicher Kostentreiber tritt jedoch die Batterie auf, da diese eine begrenzte Lebensdauer hat und somit in größeren Zeitabständen gewechselt werden muss. Umfangreiche Langzeiterfahrungen liegen hier jedoch noch nicht vor, sie werden aber sicher stark vom verwendeten Zelltyp und der Beanspruchung abhängig sein. Bombardier gibt für ihren Bat-

terietriebzug eine Lebensdauer der Batterien zwischen 5 und 8 Jahren an¹⁰⁷. Für diese Studie wird eine Lebensdauer von 6 Jahren angesetzt. Dies wird damit begründet, dass im Untersuchungszustand des Netzes ein recht großer Anteil der Fahrleistung im Batteriemodus erfolgen muss. Gleichzeitig ist die für die Fahrleistung zur Verfügung stehende Triebfahrzeuganzahl recht hoch, da diese von dem Dieseltriebfahrzeugbestand abgeleitet wurde. Um den Unterschied in den Betriebsarten deutlich zu machen, werden die Kosten für den Batterietausch nur auf die Fahrleistung im Batteriebetrieb angerechnet.

Die resultierenden Instandhaltungskosten sind in nachfolgender Tabelle 102 dargestellt.

Modellfahrzeugtyp	NV 120 BEMU	NV 180 BEMU
Installierte Akkukapazität [kWh]	300	440
Kosten pro kWh Akkukapazität [€]	1000	1000
Reinvestitionskosten Akku [€]	300.000	440.000
Akkutausch nach x Jahren [a]	6	6
Reinvestitionskosten Akku pro Jahr [€]	50.000	73.333
Laufleistung Fahrzeug pro Jahr [km]	160.000	160.000
Laufleistung im Akkubetrieb pro Jahr [km]	65.700	65.700
Akkukosten pro km [€/km]	0,761	1,116

Tabelle 102: Zusätzliche Instandhaltungskosten Akku

Die spezifischen Instandhaltungskosten der Hybridfahrzeuge sind dann:

Elektrotraktion		Batteriehybrid		
Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	
			Akku	Netz
NV 120 E SD	0,40	NV 120 BEMU	1,16	0,40
NV 180 E SD	0,60	NV 180 BEMU	1,72	0,60
Lokbespannter Wagenzug	1,65	2 * NV 180 BEMU	3,43	1,20

Tabelle 103: Spez. Instandhaltungskosten BEMU

Auch an dieser Stelle erfolgt ein besonderer, vergleichender Blick auf den Modellfahrzeugtyp „Lok“. Die spezifischen Instandhaltungskosten des Wagenzuges setzen sich aus den Kosten der Lokomotive und der Wagen zusammen, dargestellt in Tabelle 104.

¹⁰⁷ Bombardier Transportation, „Want a battery train? - Bombardier's TALENT 3 battery electric multiple unit.“ [Film], 2018. [Online]. Verfügbar: https://www.youtube.com/watch?time_continue=60&v=xxZQeS__6sE. [Zugriff am 13 11 2018].

Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
Diesel- / Einstrom E-Lok	1,20 D / 0,6 E
Steuerwagen 2. Klasse	0,3
Mittelwagen 1./2. Klasse	0,25
Mittelwagen 2. Klasse	0,25
Lokbespannter Wagenzug	2,25 D / 1,65 E

Tabelle 104: Modellfahrzeugtyp Lok - Instandhaltungskosten

Die Kosten von Triebwagen und lokbespannter Traktion im Vergleich liefert Tabelle 105.

Je Fahrzeug		Modellfahrzeugtyp Lok	
Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	Modellfahrzeugtyp	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]
NV 180D	1,05	2 * NV 180D	2,1
NV 180 E SD	0,6	2 * NV 180 E SD	1,2
NV 180 BEMU	1,72 Akku 0,60 Netz	2 * NV 180 BEMU	3,43 Akku 1,20 Netz
Diesellok (ohne Wagen)	1,20	Lokbespannter Wagenzug D	2,25
Einstrom E-Lok (ohne Wagen)	0,6	Lokbespannter Wagenzug E	1,65

Tabelle 105: Spez. Instandhaltungskosten Modellfahrzeugtyp Lok

8.1.1.4.4 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Für den Schienengüterverkehr werden dieselben Hybrid-Lokomotiven wie für den SPFV verwendet. Die spezifischen Instandhaltungskosten sind somit identisch und betragen 0,88 €/km bei Stromnetz- bzw. 1,44 €/km bei Dieselbetrieb (s. Tabelle 98).

8.1.2 2030 – Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr

8.1.2.1 Fahrleistung

Die Fahrleistung der drei Sparten Schienenpersonennahverkehr, Schienenpersonenfernverkehr und Schienengüterverkehr wird auf Basis der durch die PTV bereitgestellten Daten bestimmt (Schienennetze 2010 und 2030 „Bezugsfall Knoten“ mit Zugzahlen nach Zugkategorien, Traktionsart und Streckenlängen).

8.1.2.1.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Im Jahr 2030 beträgt die im SPFV zurückgelegte Fahrleistung mit Dieselfahrzeugen 1,4 Mio. Zugkilometer, wobei 0,7 Mio. km auf bereits elektrifizierten Strecken stattfinden. Hinzu kommen 0,4 Mio. km, die bis 2030 im Rahmen einer Inselelektrifizierung nahelektrifiziert werden. Die Rückspeisequote beträgt dann wie bei rein elektrischen Lokomotiven im SPFV angenommen 9,3 %. Die übrigen 0,3 Mio. km werden mittels Dieselmotor zurückgelegt. Tabelle 106 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung nochmals.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Zug-km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	0,700	50,00
Zusätzliche Inselelektrifizierung	0,395	28,21
Summe elektrifiziert	1,095	78,21
Nicht elektrifiziert (Dieselbetrieb)	0,305	21,79

Tabelle 106: Fahrleistung SPFV nach Traktionsart

8.1.2.1.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Im Jahr 2030 beträgt die im SPNV zurückgelegte Fahrleistung mit Dieselfahrzeugen 221,96 Mio. Zugkilometer, wobei 32,46 Mio. km auf bereits elektrifizierten Strecken stattfinden. Hinzu kommen 38,13 Mio. km, die bis 2030 im Rahmen einer Inselelektrifizierung nahelektrifiziert werden. Die übrigen 151,37 Mio. km werden mittels Akkubetrieb zurückgelegt, was insofern wichtig ist, da sich die spezifischen Kosten pro Kilometer bei Akku- und bei Oberleitungsbetrieb unterscheiden und Rückspeisung ins Netz nur bei vorhandener Oberleitung möglich ist. Tabelle 107 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung nochmals.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Zug-km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	32,46	14,62
Zusätzliche Inselelektrifizierung	38,13	17,18
Summe elektrifiziert	70,59	31,80
Nicht elektrifiziert (Akkubetrieb)	151,37	68,20

Tabelle 107: Fahrleistung SPNV nach Traktionsart

8.1.2.1.3 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Im Jahr 2030 beträgt die im SGV zurückgelegte Fahrleistung mit Dieselfahrzeugen 13,71 Mio. Zugkilometer, wobei 7,99 Mio. km auf bereits elektrifizierten Strecken stattfinden. Hinzu kommen 0,93 Mio. km, die bis 2030 im Rahmen einer Inselelektrifizierung nahelektrifiziert werden. Die übrigen 4,79 Mio. km werden mittels Dieselmotor zurückgelegt, was insofern wichtig ist, da sich die spezifischen Kosten pro Kilometer bei Diesel- und bei Oberleitungsbetrieb unterscheiden und Rückspeisung ins Netz nur bei vorhandener Oberleitung möglich ist. Tabelle 108 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung nochmals.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	7,99	58,29
Zusätzliche Inselelektrifizierung	0,93	6,76
Summe elektrifiziert	8,92	65,05
Nicht elektrifiziert (Dieselbetrieb)	4,79	34,95

Tabelle 108: Fahrleistung SGV nach Traktionsart

8.1.2.2 Energiekosten

8.1.2.2.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Die Berechnung des Energieverbrauchs und der Energiekosten im SPFV erfolgt anhand der in Abschnitt 8.1.1.1.1 ermittelten spezifischen Energieverbräuche und den durch die PTV bereitgestellten Daten zur Fahrleistung (s.o.). Bei Oberleitungsbetrieb beträgt die Rückspeisequote, wie bei rein elektrischen Lokomotiven angenommen, 9,3 %.

Der Energiebedarf und die resultierenden Stromkosten sind Tabelle 109 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Nettokos- ten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,07	20,76	11,07	2,30	0,01	1,93	8,86	0,17	2,13

Tabelle 109: Energiekosten Strom SPFV

Hinzu kommen die Kosten für Dieselkraftstoff, welcher wie bisher mit einem Preis von 115,33 Euro je 100 Liter angenommen wird, was zu den folgenden, in Tabelle 110 aufgelisteten Energiekosten führt. Hierbei ist eine prognostizierte Kraftstoffverbrauchsreduktion in Höhe von 10 % bereits enthalten.

Kosten Strom [Mio. €]	Kosten Diesel [Mio. €]	Kosten gesamt [Mio. €]
2,13	1,51	3,64

Tabelle 110: Energiekosten SPFV

8.1.2.2.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Anhand der in Abschnitt 8.1.1.1.3 ermittelten spezifischen Energieverbräuche und der durch die PTV bereitgestellten Daten zur Fahrleistung (s.o.) werden der Energieverbrauch und die Energiekosten berechnet. Die Rückspeisequote beträgt bei vorhandener Oberleitung, wie bei rein elektrischen Triebwagen angenommen, 29 %. Der Energiebedarf und die resultierenden Kosten sind Tabelle 111 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
3,68	1.023,25	11,07	113,27	0,40	110,24	8,86	9,77	103,51

Tabelle 111: Energiekosten SPNV

8.1.2.2.3 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Die Vorgehensweise zur Berechnung von Energieverbrauch- und Kosten entspricht der bei SPNV und SPFV, die zugrunde gelegten spezifischen Energieverbräuche sind in Abschnitt 8.1.1.1.4 aufgeführt. Bei Oberleitungsbetrieb beträgt die Rückspeisequote, wie bei rein elektrischen Lokomotiven angenommen, 8,8 %.

Der Energiebedarf und die resultierenden Stromkosten sind Tabelle 112 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise- energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,45	124,82	10,58	13,21	0,04	10,98	8,46	0,96	12,28

Tabelle 112: Energiekosten Strom SGV

Hinzu kommen die Kosten für Dieselkraftstoff, welcher, wie bereits zuvor für das Jahr 2030, mit einem Preis von 115,33 Euro je 100 Liter angenommen wird, was zu folgenden, in Tabelle 113 aufgelisteten Energiekosten führt. Die prognostizierte Kraftstoffverbrauchsreduktion in Höhe von 10 % ist wiederum bereits berücksichtigt.

Kosten Strom [Mio. €]	Kosten Diesel [Mio. €]	Kosten gesamt [Mio. €]
12,28	22,91	35,19

Tabelle 113: Energiekosten SGV

8.1.2.3 Beschaffungskosten

8.1.2.3.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Die Fahrleistung wird konventionell durch jeweils drei Triebwagen oder lokbespannte Waggenszüge erbracht, die Kosten sind Tabelle 114 zu entnehmen.

Fahrzeugbestand					
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	An- zahl	Preis je Fahr- zeug [Mio. €]	Investitionskosten [Mio. €]	Annuität [Mio. €]
Wagenzug mit Dreistrom E-Lok	0,4	3	14,7	44,1	1,80
Triebwagen HGV C Elektro	1,0	3	23,1	69,3	2,97
Summe Elektro	1,4	6		111,3	4,76
Wagenzug mit Diesellok	0,4	3	13,4	40,2	1,72
Triebwagen HGV C Diesel	1,0	3	21	63,0	2,70
Summe Diesel	1,4	6		103,2	4,42

Tabelle 114: Investitionskosten SPFV konventionell

Zur Erbringung der Fahrleistung mit Hybridfahrzeugen werden aufgrund der geringeren Fahrleistung der Lokomotiven gegenüber den Triebwagen zehn statt sechs Fahrzeuge benötigt. Dadurch wird der Effekt der geringeren spezifischen Kosten der Lok-Variante gegenüber der Triebwagen-Variante überkompensiert. Die Annuität auf Basis der spezifischen Kosten nach Abschnitt 8.1.1.3.2 fällt höher aus und beläuft sich auf 6,42 Mio. Euro (s. Tabelle 115).

Fahrzeugbestand					
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anzahl	Preis je Fahrzeug [Mio. €]	Investitionskosten [Mio. €]	Annuität [Mio. €]
Wagenzug mit Dreistrom Hybridlok	1,4	10	16,0	159,67	6,42

Tabelle 115: Investitionskosten SPFV-Hybrid

8.1.2.3.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Basierend auf der benötigten Anzahl an Fahrzeugen und den spezifischen Investitionskosten nach Abschnitt 8.1.1.3.3, ergeben sich folgende, Tabelle 116 zu entnehmende Beschaffungskosten für den SPNV:

Fahrzeugbestand				
n-Teilig	Anzahl	Modellfahrzeug	Verteilung [%]	Investitionskosten [Mio. €]
1	223	NV 120 BEMU	10,61	1.043,64
2	1593	NV 120 BEMU	75,82	7.455,24
3	84	NV 180 BEMU	4,00	480,48
Lokbespannter Wagenzug	201	2 * NV 180 BEMU	9,57	2.299,44

Tabelle 116: Investitionskosten BEMU

Die Annuität beträgt für die Triebwagen 384,58 Mio. Euro und für die den Wagenzug ersetzenden Triebwagen 98,48 Mio. Euro. Insgesamt fällt für die BEMU Flotte des SPNV eine Annuität von 483,06 Mio. Euro an.

Da grundsätzlich mehrere Möglichkeiten existieren, den Wagenzug zu bewerten, sind die Beschaffungskosten für die mit dem Modellfahrzeug Lok vergleichbaren Dieseltriebwagen und Elektrotriebwagen in Tabelle 117 aufgelistet.

Lok ersetzt durch	Anzahl	Investitionskosten [Mio. €/Fahrzeug]	Investitionskosten [Mio. €]	Annuität [Mio. €]
Wagenzug mit Diesellok	201	8,3	1668,3	71,45
Wagenzug mit Elektrolok	201	8,3	1668,3	66,20
2 * NV 180D	201	7,4	1487,4	73,53
2 * NV 180 E SD	201	8,8	1768,8	75,76
2 * NV 180 BEMU	201	11,44	2299,44	98,48

Tabelle 117: Investitionskosten Modellfahrzeugtyp Lok

8.1.2.3.3 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Um die prognostizierte Fahrleistung erbringen zu können, werden 75 Fahrzeuge mit einem Preis von 5,1 Mio. Euro je Fahrzeug benötigt. Daraus resultiert eine Flotten-Annuität von 13,17 Mio. Euro gemäß Abschnitt 8.1.1.3.4 (s. Tabelle 123).

Fahrzeugbestand					
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anzahl	Preis je Fahrzeug [Mio. €]	Investitionskosten [Mio. €]	Annuität [Mio. €]
Dreistrom Hybridlok	13,71	75	5,1	380,00	13,17

Tabelle 118: Investitionskosten Lokomotiven SGV

8.1.2.4 Instandhaltungskosten

8.1.2.4.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Die Fahrleistung nach Abschnitt 8.1.2.1.1 wird konventionell durch jeweils drei Triebwagen oder lokbespannte Wagenzüge erbracht, die Kosten sind Tabelle 119 zu entnehmen.

Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr. km]	Anzahl	Instandhaltungskosten [€/Fahrzeug-km]	Instandhaltungskosten [Mio. €]
Wagenzug mit Dreistrom E-Lok	0,4	3	3,7	1,4
Triebwagen HGV C Elektro	1,0	3	5,5	5,6
Summe Elektro	1,4	6		7,0
Wagenzug mit Diesellok	0,4	3	3,6	1,4
Triebwagen HGV C Diesel	1,0	3	5,0	5,0
Summe Diesel	1,4	6		6,5

Tabelle 119: Instandhaltungskosten SPFV konventionell

In Tabelle 120 sind die anfallenden Instandhaltungskosten der Hybridvariante gemäß der spezifischen Kosten nach Abschnitt 8.1.1.4.2 für die gegebenen Fahrleistungen aufgeführt.

Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]			Instandhaltungskosten [Mio. €]		
	Diesel	Elektrisch	Gesamt	Diesel	Elektrisch	Gesamt
Wagenzug mit Dreistrom Hybridlok	0,3	1,1	1,4	1,17	4,14	5,31

Tabelle 120: Instandhaltungskosten SPF-Hybrid

Demnach fallen jährlich Kosten von 5,31 Mio. Euro im SPFV für die Instandhaltung an.

8.1.2.4.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Basierend auf den zurückgelegten Zugkilometern nach Abschnitt 8.1.2.1.2 und den spezifischen Instandhaltungskosten nach Abschnitt 8.1.1.4.3 ergeben sich folgende, in Tabelle 121 aufgeführte Instandhaltungskosten.

Fahrzeugbestand					Instandhaltungskosten		
n-teilig	Fahrleistung [Mio. Zug km/Jahr]		Modell- fahrzeug	Vertei- lung [%]	[Mio. €]		
Betriebsart	Akku	Netz			Akku	Netz	Gesamt
1	16	7	NV 120 BEMU	10,61	18,65	3,00	21,65
2	115	54	NV 120 BEMU	75,82	133,25	21,41	154,66
3	6	3	NV 180 BEMU	4,00	10,39	1,69	12,08
Lokbesp. Wagenzug	14	7	2 * NV 180 BEMU	9,57	49,71	8,10	57,81
Summe	151	71	Alle Fahr- zeugtypen	100	212,00	34,20	246,20

Tabelle 121: Instandhaltungskosten BEMU

Insgesamt fallen für die BEMU Flotte des SPNV jährliche Instandhaltungskosten von 246,20 Mio. Euro an.

Die Instandhaltungskosten für die mit dem Modellfahrzeug Lok vergleichbaren Dieseltriebwagen und Elektrotriebwagen wären:

Fahrzeugbestand		Instandhaltungskosten	
Lok ersetzt durch	Fahrleistung [Mio. Zug km/Jahr]	[€/Fahrzeug-km]	[Mio. €/Jahr]
Lokbespannter Wagenzug D	21	2,25	47,78
Lokbespannter Wagenzug E	21	1,65	35,04
2 * NV 180D	21	2,1	44,59
2 * NV 180 E SD	21	1,2	25,48
2 * NV 180 BEMU	21	3,43 Akku	1,20 Netz
			57,81

Tabelle 122: Instandhaltungskosten Modellfahrzeugtyp Lok

Die BEMU Doppeltraktion als Ersatz für die lokbespannten Züge liegt in den jährlichen Instandhaltungskosten folglich abhängig von der Fahrleistungsverteilung zwischen Akku- und Oberleitungsbetrieb über oder unter den Dieselvarianten, in diesem Fall aufgrund des hohen Akku-Anteils darüber.

8.1.2.4.3 Dieselhybrid Schienengüterverkehr

Basierend auf den zurückgelegten Zugkilometern nach Abschnitt 8.1.2.1.3 und den spezifischen Instandhaltungskosten nach Abschnitt 8.1.1.4.4 ergeben sich die in Tabelle 123 aufgelisteten Instandhaltungskosten.

Fahrzeugbestand						
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]			Instandhaltungskosten [Mio. €]		
	Diesel	Elektrisch	Gesamt	Diesel	Elektrisch	Gesamt
Dreistrom Hybridlok	4,8	8,9	13,7	6,9	7,9	14,8

Tabelle 123: Instandhaltungskosten Lokomotiven SGV

Jährlich ist mit Instandhaltungskosten in Höhe von 14,8 Mio. Euro im SGV zu rechnen.

8.1.2.5 Zusammenfassung Hybridfahrzeuge

In Tabelle 124 sind die Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb derjenigen Hybrid-Triebfahrzeuge anfallen, mit denen Dieseltraktion im Netz „Bezugsfall Knoten 2030“ gemäß Ausbau zum „Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr“ ersetzt wird.

	Hybridnetz 2030
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	6,42
SPNV	483,06
SGV	13,17
gesamt	502,66
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	5,31
SPNV	246,20
SGV	14,75
gesamt	266,26
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	3,64
SPNV	103,51
SGV	35,19
gesamt	142,33
Gesamtkosten	911,25 Mio. €

Tabelle 124: Kostenübersicht Hybridnetz 2030

8.1.3 2030 – Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr

„Im Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr“ sind alle Strecken elektrifiziert, auf denen Güterverkehr stattfindet. Das bedeutet: im SPNV erfolgt der Verkehr in diesem Netzzustand weiterhin mit Batteriehybridtriebwagen, im SPFV weiterhin mit Dieselhybridlokomotiven, aber im SGV kommen nur noch reine E-Lokomotiven zum Einsatz. Für den SPNV und SPFV sinkt dadurch ebenfalls der Anteil an nicht elektrischer Traktion, im SGV wird der Zustand des Planfalls 2030 „Komplettelektrifizierung des Schienennetzes“ erreicht.

8.1.3.1 Fahrleistung

Die Fahrleistung wird für den Netzzustand 2030 getrennt nach den drei Sparten Schienenpersonennahverkehr, Schienenpersonenfernverkehr und Schienengüterverkehr auf Basis der durch die PTV bereitgestellten Daten (s.o.) bestimmt.

8.1.3.1.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Im Jahr 2030 beträgt die im SPFV zurückgelegte Fahrleistung mit Dieselfahrzeugen 1,4 Mio. Zugkilometer, wobei 0,7 Mio. Zug-km auf bereits elektrifizierten Strecken stattfinden. Hinzu kommen 0,46 Mio. Zugkilometer, die auf bis 2030 elektrifizierten Strecken zurückgelegt werden können. Die letztlich noch mit Dieselmotor zurückzulegenden Zugkilometer betragen 0,24 Mio. Tabelle 125 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung nochmals.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Zug-km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	0,700	50,00
Zusätzliche Inselelektrifizierung	0,459	32,80
Summe elektrifiziert	1,159	82,80
Nicht elektrifiziert (Dieselbetrieb)	0,241	17,20

Tabelle 125: Fahrleistung SPFV nach Traktionsart

8.1.3.1.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Der Anteil der auf im Rahmen einer Inselelektrifizierung bis 2030 neu elektrifizierten Strecken zurückgelegten Traktionsleistung steigt von 38,13 auf 82,10 Mio. km. Mittels Akkubetrieb werden nur noch 107,40 Mio. km zurückgelegt. Tabelle 126 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Zug-km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	32,46	14,62
Zusätzliche Inselelektrifizierung	82,10	36,99
Summe elektrifiziert	114,56	51,61
Nicht elektrifiziert (Akkubetrieb)	107,40	48,39

Tabelle 126: Fahrleistung SPNV nach Traktionsart

8.1.3.1.3 Elektrische Traktion Schienengüterverkehr

Im Jahr 2030 beträgt die im SGV zurückgelegte Fahrleistung mit Dieselfahrzeugen 13,71 Mio. Zugkilometer, wobei 7,99 Mio. Zug-km auf bereits elektrifizierten Strecken stattfinden. Die restlichen 5,72 Mio. Zug-km können bis 2030 auch elektrifiziert erbracht werden. Tabelle 127 verdeutlicht die Fahrleistungsverteilung. Mit Dieseltraktion finden per definitionem keine Fahrten mehr statt.

Verteilung der Fahrleistung	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anteil [%]
Bereits elektrifiziert (nach BVWP)	7,99	58,29
Zusätzliche Inselelektrifizierung	5,72	41,71
Summe elektrifiziert	13,71	100
Nicht elektrifiziert (Dieselbetrieb)	0	0

Tabelle 127: Fahrleistung SGV nach Traktionsart

8.1.3.2 Energiekosten

8.1.3.2.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Auf Basis der ermittelten spezifischen Energieverbräuche (Abschnitt 8.1.1.1.1) und den von PTV bereitgestellten Daten zur Fahrleistung erfolgt die Berechnung des Energieverbrauchs und der Energiekosten. Die Rückspeisequote liegt wie zuvor im SPFV bei 9,3 %.

Der Energiebedarf und die resultierenden Stromkosten sind Tabelle 128 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise-energie		Rückspeisung		Netto-kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,08	21,97	11,07	2,43	0,01	2,04	8,86	0,18	2,25

Tabelle 128: Energiekosten Strom SPFV

Hinzu kommen die Kosten für Dieselkraftstoff, welcher wie bisher mit einem Preis von 115,33 € je 100 Liter angenommen wird, was zu den folgenden, in Tabelle 129 aufgelisteten Energiekosten führt. Hierbei ist die für Dieselfahrzeuge prognostizierte Kraftstoffverbrauchsreduktion in Höhe von 10 % bereits eingerechnet.

Kosten Strom [Mio. €]	Kosten Diesel [Mio. €]	Kosten gesamt [Mio. €]
2,25	1,19	3,44

Tabelle 129: Energiekosten SPFV

8.1.3.2.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Analog zum „Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr“ werden anhand der in Abschnitt 8.1.1.1.3 ermittelten spezifischen Energieverbräuche und den durch die PTV bereitgestellten Daten zur Fahrleistung der Energieverbrauch und die Energiekosten berechnet.

Der Energiebedarf und die resultierenden Kosten sind Tabelle 130 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise-energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio.€]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
3,86	1073,24	11,07	118,81	0,64	178,91	8,86	15,85	102,96

Tabelle 130: Energiekosten SPNV

8.1.3.2.3 Elektrische Traktion Schienengüterverkehr

Analog zum „Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr“, jedoch mit den in Abschnitt 3.2.1.2.3 ermittelten spezifischen Energieverbräuchen reiner E-Lokomotiven und den durch die PTV bereitgestellten Daten zur Fahrleistung, werden der Energieverbrauch und die Energiekosten berechnet. Die Rückspeisequote beträgt 8,8 %. Da keine Fahrten mehr mit Dieseltraktion stattfinden, fallen keine Kosten für Dieselkraftstoff an.

Der Energiebedarf und die resultierenden Stromkosten sind Tabelle 131 zu entnehmen.

Bruttobedarf		Energiebezug		Rückspeise-energie		Rückspeisung		Netto- kosten [Mio. €]
[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio.€]	[PJ]	[GWh]	Preis [ct/kWh]	Kosten [Mio. €]	
0,69	191,89	10,58	20,30	0,06	16,89	8,46	1,43	18,87

Tabelle 131: Energiekosten Strom SGV

Die Energiekosten für den SGV mit Lückenschluss belaufen sich also auf 18,87 Mio. Euro.

8.1.3.3 Beschaffungskosten

8.1.3.3.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Im Schienenpersonenfernverkehr verändert sich lediglich die Kilometerverteilung zwischen den Traktionsarten, nicht aber die Fahrzeuganzahl. Daher entsprechen die Beschaffungskosten exakt denen des Hybridnetzes ohne Lückenschluss, die Annuität beläuft sich auf 6,42 Mio. Euro.

8.1.3.3.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Auch im Schienenpersonennahverkehr entsprechen die Beschaffungskosten der Fahrzeuge exakt denen des Hybridnetzes ohne Lückenschluss, da sich lediglich die Verteilung, mit welcher Traktionsart wieviel Kilometer zurückgelegt werden, ändert. Folglich fällt für die BEMU Flotte des SPNV eine Annuität von 483,06 Mio. Euro an.

8.1.3.3 Elektrische Traktion Schienengüterverkehr

Da durch den Lückenschluss im Schienengüterverkehr alle Zugfahrten elektrisch erfolgen, werden keine Hybridlokomotiven mehr benötigt, sondern günstigere Elektrolokomotiven verwendet. Dadurch sinken die Beschaffungskosten. Zum Einsatz kommen die bereits erwähnten Dreistrom-Elektrolokomotiven der BVWP-Methodik für 3,8 Mio. Euro pro Fahrzeug. Die Annuität für die 75 benötigten Fahrzeuge ist in Tabelle 132 zusammengefasst und liegt bei 9,88 Mio. Euro.

Fahrzeugbestand					
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]	Anzahl	Preis je Fahrzeug [Mio. €]	Investitionskosten [Mio. €]	Annuität [Mio. €]
Dreistrom Elektrolok	13,71	75	3,8	285,00	9,88

Tabelle 132: Investitionskosten Lokomotiven SGV

8.1.3.4 Instandhaltungskosten

8.1.3.4.1 Dieselhybrid Schienenpersonenfernverkehr

Der Schienenpersonenfernverkehr profitiert geringfügig vom Lückenschluss im SGV, da mehr Kilometer elektrisch zurückgelegt werden können, was in leicht sinkenden Instandhaltungskosten resultiert. In Tabelle 133 sind die anfallenden Instandhaltungskosten für die gegebenen Fahrleistungen aufgeführt.

Fahrzeugbestand						
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Tr.km]			Instandhaltungskosten [Mio. €]		
	Diesel	Elektrisch	Gesamt	Diesel	Elektrisch	Gesamt
Wagenzug mit Dreistrom Hybridlok	0,24	1,16	1,4	0,93	4,38	5,31

Tabelle 133: Instandhaltungskosten SPFV-Hybrid

Demnach fallen jährlich Kosten von 5,31 Mio. Euro im SPFV für die Instandhaltung an.

8.1.3.4.2 Batteriehybrid Schienenpersonennahverkehr

Durch den Lückenschluss verschiebt sich die Fahrleistungsverteilung leicht in Richtung elektrischer Traktion. Entsprechend fallen für die BEMU Flotte des SPNV insgesamt etwas niedrigere jährliche Instandhaltungskosten von 205,93 Mio. Euro an, wie Tabelle 134 entnommen werden kann.

Fahrzeugbestand					Instandhaltungskosten		
n-teilig	Fahrleistung [Mio. Zug km/Jahr]		Modell- fahrzeug	Vertei- lung [%]	[Mio. €]		
Betriebsart	Akku	Netz			Akku	Netz	Gesamt
1	11	12	NV 120 BEMU	10,61	13,24	4,86	18,10
2	81	87	NV 120 BEMU	75,82	94,55	34,74	129,29
3	4	5	NV 180 BEMU	4,00	7,37	2,75	10,12
Lokbesp. Wagenzug	10	11	2 * NV 180 BEMU	9,57	35,27	13,15	48,42
Summe	107	115	Alle Fahr- zeugtypen	100	150,42	55,51	205,93

Tabelle 134: Instandhaltungskosten BEMU

8.1.3.4.3 Elektrische Traktion Schienengüterverkehr

Durch die Möglichkeit der Verwendung konventioneller Elektrolokomotiven anstelle komplexer Hybridfahrzeuge in diesem Netzzustand sinken die Instandhaltungskosten auf das Niveau der Komplettelektrifizierung 2030 aus Studie I. Jährlich ist mit Instandhaltungskosten in Höhe von 10,97 Mio. im SGV zu rechnen (s. Tabelle 135).

Fahrzeugbestand		Instandhaltungskosten	
Fahrzeug	Fahrleistung [Mio. Zug km/Jahr]	[€/Fahrzeug-km]	[Mio. €/Jahr]
Dreistrom Elektrolok	13,71	0,80	10,97

Tabelle 135: Instandhaltungskosten SGV

8.1.3.5 Zusammenfassung Lückenschluss

In Tabelle 136 sind die Kosten zusammengefasst, die durch die Anschaffung und den Betrieb derjenigen Hybrid- und E-Triebfahrzeuge anfallen, die zur Substitution der Dieseltraktion im „Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr“ ggü. dem Netz „Bezugsfall Knoten 2030“ benötigt werden.

	Hybridnetz mit Lückenschluss 2030
Annuität für Fahrzeugbeschaffung	Mio. €
SPFV	6,42
SPNV	483,06
SGV	9,88
gesamt	499,36
Instandhaltungskosten je Jahr	Mio. €
SPFV	5,31
SPNV	205,93
SGV	10,97
gesamt	222,21
Energiekosten je Jahr	Mio. €
SPFV	3,44
SPNV	102,96
SGV	18,87
gesamt	125,28
Gesamtkosten	846,85 Mio. €

Tabelle 136: Kostenübersicht Hybridnetz mit Lückenschluss

8.1.4 Zusammenfassung der Kosten der Hybrid-Netzzustände

An dieser Stelle erfolgt die Gegenüberstellung der Kosten mit konventioneller Traktion (Basis- und Planfall 2030 der Studie I) im Vergleich zur Hybrid-Traktion (Hybridnetz 2030 ohne und mit Lückenschluss im SGV)). Beim Modellfahrzeugtyp „Lok“ des Schienenpersonenverkehrs und des Schienenpersonenfernverkehrs wird nicht nur die Lokomotive, sondern der gesamte Wagenzug bei den Kosten berücksichtigt. Daraus resultieren eine höhere Annuität und höhere Instandhaltungskosten im SPNV und SPFV und folglich auch insgesamt. Nur so ist aber ein realistischer Vergleich mit den Hybridfahrzeugen möglich.

Für die betrachteten Netzzustände ergibt sich bei einer Komplettelektrifizierung des Schienennetzes (Planfall 2030 aus Studie I) eine Kostenersparnis gegenüber dem Dieselbetrieb von ca. 297,1 Mio. Euro im Jahr 2030. Die Kostenersparnisse bei Verwendung von Hybridfahrzeugen liegen bei ca. 18,5 Mio. Euro. Der zusätzliche Lückenschluss im Güterverkehr führt zu Ersparnissen in Höhe von ca. 82,9 Mio. Euro. Eine Übersicht über die Kosten liefert Tabelle 137, die genauere Aufteilung ist in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Kosten pro Jahr in Mio. Euro	Basisfall 2030 (Studie I)	Planfall 2030 (Komplettelekt-rifizierung)	Hybridnetz ohne LS im GV 2030	Hybridnetz mit LS im GV 2030
Annuität	363,12	376,67	502,66	499,36
Instandhaltung	238,36	135,07	266,26	222,21
Energie	328,23	120,84	142,33	125,28
gesamt	929,71	632,58	911,25	846,85

Tabelle 137: Zusammenfassung Netzzustände 2030 Studie I und Hybridnetze (Studie II)

8.1.4.1 Annuitäten

Die Annuitäten für die verschiedenen Netzzustände 2030 sind in Tabelle 138 dargestellt. Unter den gesetzten Randbedingungen sind hier bei den Elektrotriebfahrzeugen geringfügig und bei den Hybridfahrzeugen deutlich höhere Kosten zu erwarten. Die Elektrotriebfahrzeuge wurden tendenziell mit einem höheren Investitionspreis angesetzt, da diese jedoch eine längere Nutzungsdauer aufweisen, ergibt sich eine ähnliche jährliche Investitionssumme. Der Mehraufwand für Elektrofahrzeuge beträgt 13,55 Mio. Euro im Jahr 2030 bei einer Komplettelektifizierung. Bei den Hybridfahrzeugen wiegt der ca. 1/3 höhere Anschaffungspreis so schwer, dass dieser auch durch längere Nutzungsdauern nicht mehr egalisiert werden kann. Die Mehrkosten belaufen sich auf 139,54 Mio. Euro für das Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr 2030 und 136,24 Mio. Euro für das Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr. Die Differenz zwischen den beiden Netzzuständen resultiert einzig daraus, dass im SGV im Hybridnetz mit Lückenschluss auf teure Hybridfahrzeuge verzichtet werden kann und stattdessen günstigere Elektrofahrzeuge genutzt werden. Die insgesamt höheren Kosten bei beiden Hybridnetzen im SPFV beruhen auf den Mehrkosten für entsprechende lokbespannte Züge. Teure Hochgeschwindigkeitstriebwagen sind derzeit als Hybridfahrzeuge nicht erhältlich. Die geringere Fahrleistung je Fahrzeug bei der lokbespannten Variante resultiert jedoch in mehr benötigten Fahrzeugen und letztlich höheren Gesamtkosten.

Annuitäten für Fahrzeugbeschaffung in Mio. Euro	Basisfall 2030 (Studie I)	Planfall 2030 (Komplettelekt-rifizierung)	Hybridnetz ohne LS im GV 2030	Hybridnetz mit LS im GV 2030
SPFV	4,42	4,76	6,42	6,42
SPNV	348,42	362,03	483,06	483,06
SGV	10,28	9,88	13,17	9,88
gesamt	363,12	376,67	502,66	499,36

Tabelle 138: Vergleich Annuitäten

8.1.4.2 Instandhaltungskosten

Die Instandhaltungskosten für die Netzzustände sind in Tabelle 139 dargestellt. Die äquivalente Elektrotriebfahrzeugflotte weist im SGV rund ein Drittel günstigere Instandhaltungskosten als die Dieseltiefahrzeugflotte auf, was sich erneut als großer Vorteil bei dem Hybridnetz mit Lückenschluss im SGV bemerkbar macht. Die Hybridfahrzeuge im SPNV sind im Unterhalt etwa doppelt so teuer wie rein elektrische Fahrzeuge und ähnlich teuer wie ihr Diesel-Pendant. Das liegt darin begründet, dass aufgrund der hohen Akkukosten Fahren im Akkubetrieb teurer als konventioneller Dieseltiefahrt ist, während der Oberleitungsbetrieb von allen Vorteilen des elektrischen Betriebes profitiert. Der Elektrifizierungsgrad beeinflusst folglich maßgeblich die Instandhaltungskosten im SPNV. Beim SPFV handelt es sich bei den Hybridfahrzeugen um die günstigste Variante, da die Kosten der rein elektrischen Traktion aufgrund der hohen Wartungskosten speziell der Mehrstrom-Hochgeschwindigkeitstriebwagen sogar über denen der Dieselvariante liegen.

Insgesamt ist mit Mehrkosten von 27,90 Mio. Euro für das „Hybridnetz 2030 ohne Lückenschluss im Güterverkehr“ und Einsparungen von 16,15 Mio. Euro für das „Hybridnetz mit Lückenschluss im Güterverkehr“ jährlich zu rechnen. Die Werte sind im Vergleich zu 103,29 Mio. Euro bei der Komplettelektrifizierung 2030 zwar deutlich geringer, allerdings auch mit wesentlich weniger Aufwand im Bereich der Infrastruktur zu erreichen.

Instandhaltungskosten pro Jahr in Mio. Euro	Basisfall 2030 (Studie I)	Planfall 2030 (Komplettelektrifizierung)	Hybridnetz ohne LS im GV 2030	Hybridnetz mit LS im GV 2030
SPFV	6,45	7,00	5,31	5,31
SPNV	215,46	117,10	246,20	205,93
SGV	16,45	10,97	14,75	10,97
gesamt	238,36	135,07	266,26	222,21

Tabelle 139: Vergleich Instandhaltungskosten der Netzzustände 2030 Studie I und II

8.1.4.3 Energie

Die Energiekosten für die verschiedenen Netzzustände sind in Tabelle 140 dargestellt. Die Kosten wurden mit den in Abschnitt 3.2.1.1 angegebenen Kostensätzen ermittelt. Die Energiekosten der Elektrotraktion betragen jeweils ca. 1/3 der Dieseltiefahrt. Die Energiekosten besitzen somit eine sehr große Beeinflussungsmöglichkeit der Gesamtkosten.

Die jährliche Ersparnis beläuft sich auf 207,39 Mio. Euro im Jahr 2030 für reine E-Traktion (Komplettelektrifizierung). Die Hybridfahrzeuge erreichen dieses Ergebnis zwar nicht ganz, die Werte sind aber nur geringfügig schlechter und nähern sich dem Wert mit zunehmendem Elektrifizierungsgrad stärker an. Für das „Hybridnetz 2030 ohne Lückenschluss im Güterverkehr“ liegt die Ersparnis bei 185,90 Mio. Euro, für das „Hybridnetz 2030 mit Lückenschluss im Güterverkehr“ sogar bei 202,95 Mio. Euro pro Jahr.

Energiekosten pro Jahr in Mio. Euro	Basisfall 2030 (Studie I)	Planfall 2030 (Komplettelektifizierung)	Hybridnetz ohne LS im GV 2030	Hybridnetz mit LS im GV 2030
SPFV	6,93	2,19	3,64	3,44
SPNV	254,91	99,34	103,51	102,96
SGV	66,39	19,31	35,19	18,87
gesamt	328,23	120,84	142,33	125,28

Tabelle 140: Vergleich Energiekosten der Netzzustände 2030 in Studie I und II

8.1.4.4 Kostenseitige Auswirkung von Triebwageneinsatz anstelle Lok im SPNV

Es wurde bereits in den jeweiligen Abschnitten darauf hingewiesen, dass mangels geeigneter Fahrzeuge im SPNV anstelle der lokbespannten Züge Triebwagen zum Einsatz kommen müssen, weshalb die Wagen mitbetrachtet worden sind. Eine Alternative dazu wäre, die konventionellen, lokbespannten Züge durch konventionelle Triebzüge zu ersetzen und mit den Hybridfahrzeugen zu vergleichen. Werden die 201 Wagenzüge bei Dieseltraktion durch entsprechende Dieseltriebwagen ersetzt, steigt die Annuität um 2,08 Mio. Euro im Basisfall 2030 (Studie I). Analog steigt die Annuität bei Ersatz der E-Lokomotiven durch E-Triebwagen im Planfall 2030 (Studie I, Komplettelektifizierung) um 9,56 Mio. Euro. Die Instandhaltungskosten sinken bei Dieseltraktion um 3,19 Mio. Euro und bei E-Traktion um 9,56 Mio. Euro jährlich. Somit würde die Kostenersparnis gegenüber Dieseltraktion um 1,1 Mio. Euro geringer als in der hier vorgestellten Betrachtung ausfallen. Gegenüber der Komplettelektifizierung ergeben sich keine Änderungen, da sich Einsparungen bei der Instandhaltung und Mehrkosten bei der Beschaffung egalisieren.

9 Infrastruktur

9.1 Einordnung der Untersuchung

9.1.1 Projektziel

Für eine mögliche Teilelektrifizierung der heute noch mit Dieselfahrzeugen befahrenen deutschen Eisenbahnstrecken wurde von der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden ein generisches Streckennetz mit zusätzlichen Elektrifizierungsabschnitten sowie Ladepunkten für den Betrieb von Oberleitungs-/ Batteriehybridfahrzeugen im Regionalverkehr entwickelt und monetär bewertet. Grundlage für dieses Streckennetz war das von der PTV zur Verfügung digitale Schienennetz, das auf dem Netz „Bezugsfall Knoten 2030“ des BVWP basiert.

Prämissen für die elektrische Netzkonzeption waren

- die vollständige Berücksichtigung der bis 2030 ohnehin gemäß BVWP geplanten Elektrifizierungsvorhaben,
- die zusätzliche Elektrifizierung von Strecken mit Höchstgeschwindigkeiten von 160 km/h und mehr,
- die zusätzliche abschnittsweise Elektrifizierung sowie Anordnung von punktuellen Nachladestationen für Regionalverkehrszüge sowie
- die zusätzliche Elektrifizierung von Strecken mit potenziellem Güterverkehrsaufkommen (optional)

in der Art, dass im Gesamtnetz keine „elektrische Lücke“ (d.h. keine Strecke ohne Oberleitung oder punktuelle Nachlademöglichkeit) von mehr als 40 km Länge verbleit. Dieser Wert wurde zu Projektbeginn als Richtgröße für den zuverlässigen Regelbetrieb von Oberleitungs-/ Batteriehybridfahrzeugen definiert.

Für den Güterverkehr waren in einer Variantenuntersuchung darüber hinaus zwei grundsätzliche Fälle zu berücksichtigen:

1. keine zusätzlichen Elektrifizierungen für den Güterverkehr, Beförderung von Güterzügen auf nichtelektrifizierten Strecken mit leistungsstarken Dual-Mode-Lokomotiven (Elektro/ Diesel)
2. zusätzliche Elektrifizierungen für den Güterverkehr in Abhängigkeit des aktuell prognostizierten Güterzugaufkommens für 2030.

Ziel der Untersuchungen der MKS ist eine Kosten- und Nutzenabschätzung für eine derartige Elektrifizierungsstrategie, wobei den aus der Netzkonfiguration der Teilelektrifizierung zu ermittelnden Investitions- und Betriebskosten entsprechende CO₂-Einsparpotenziale gegenübergestellt werden.

Die im Ergebnis der Untersuchungen entstandene Netztopologie aus elektrifizierten und nicht elektrifizierten Streckenabschnitten sowie punktuell vorgesehenen Nachladestationen soll zudem als ein Beitrag zur Erstellung einer Elektrifizierungsstrategie des BMVI genutzt werden.

9.1.2 Arbeitsinhalte

In einem ersten Untersuchungsschritt der Projektbearbeitung mit Blick auf die zu entwickelnde elektronische Dokumentation wurde ein geeignetes Datentransferkonzept erstellt, um einerseits die Ausgangsdaten vom Projektpartner PTV übernehmen zu können und andererseits der PTV eine Visualisierung der Netzattribute in einer Gesamtnetzkarte streckenscharf zu ermöglichen. Durch eine geeignete Importfunktion in der Software PTV Visum und der bereits in Microsoft-Excel vorliegenden Netztopologie ist eine Darstellung der Untersuchungsergebnisse seitens PTV komfortabel möglich.

Ausgangsbasis für die im Projektverlauf von der TU Dresden erstellten Netztopologie waren Datensätze der PTV, die in zwei Excel-Dateien übergeben wurden:

- Die „Strecken“- Datei stellt alle Teilstrecken der Eisenbahnen in Deutschland und Europa bereit. Jede Teilstrecke ist dabei als Knoten-Kanten-Modell mit einer eindeutigen Knotennummer für den Anfangs- und Endhalt sowie einer nicht eindeutigen Streckennummer vorhanden. Streckennummern können auch mehrfach vergeben sein, wenn mehrere Teilverkehre auf zumindest zum Teil identischen Strecken operieren.
- Die „Knoten“- Datei enthält ortsbezogene Informationen zu den einzelnen Knoten. Die X- und Y-Koordinaten sind im Gauss-Krüger-Format dokumentiert. Eine Verknüpfung der beiden Dateien ist dabei über die eindeutige Knotennummer jeder Station möglich.

Folgende Aufgaben wurden im Detail bearbeitet:

1. Filterung der Streckendatei nach relevanten Teilstrecken: Industriebahnen, stillgelegte und nicht betriebene Strecken wurden aussortiert und nicht berücksichtigt
2. Entscheidung über klassische Elektrifizierung der Strecken anhand definierter Kriterien (z. B. Geschwindigkeitsniveau ≥ 160 km/h, Lückenschlüsse, Reichweite im Akkubetrieb, optional: Güterverkehrsaufkommen)
3. Entscheidung über Ausrüstung der verbleibenden Strecken mit Ladeinfrastruktur anhand definierter Kriterien (Maximallänge nicht elektrisch ≤ 40 km, Halte in Knotenbahnhöfen oder Ballungszentren, Endhalte bei Stichstrecken, ...)
4. Ermittlung der Mengengerüste und der Kosten für die Teilelektrifizierung
5. Darstellung der erzeugten Netztopologie in MATLAB und PTV-Visum.

Während der Projektbearbeitung wurde an der Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden ein eigenes Berechnungstool genutzt, das ausgehend von

- der aufbereiteten Datenbasis,
- den gewählten Kriterien zur Elektrifizierungswürdigkeit von Teilstrecken und
- spezifischen Kostensätzen, die bereits zur Bewertung der Komplettelektrifizierung herangezogen wurden,

die infrastruktureitigen Investitions- und Betriebskosten der Teilnetzelektrifizierung berechnet.

Als weiteres Resultat aus diesem Berechnungstool wird ein Excel-Dokument erzeugt, das Informationen zu den im Jahr 2030 in Betrieb befindlichen elektrifizierten Strecken sowie zur zusätzlich für den Regionalverkehr zu installierenden Ladeinfrastruktur enthält. Diese Datei wird der PTV zur Visualisierung der Strecken in PTV Visum zur Verfügung gestellt.

9.2 Methodik der Projektbearbeitung

9.2.1 Datenbasis der vorhandenen Strecken

Durch die PTV AG wurde ein digitales Schienennetzmodell in Form einer Excel-Datei bereitgestellt. Es enthält Daten zum Prognosestand des Jahres 2030 zu sämtlichen Bahnstrecken in Deutschland und Europa. Wichtige Attribute in der Datei sind:

- Streckennummer
- Knotennummer VON und NACH
- Knotenname VON und NACH
- Streckenlänge in km
- Traktionsart „Elektrisch“ oder „Diesel“.

Eine Angabe zu Geoinformationen ist in der zusätzlichen Knoten-Datei vorhanden. Dort wird jedem Knotennamen eine XY-Koordinate im Gauss-Krüger-Format zugeordnet. Durch „mergen“ der beiden Dateien kann das Netz visuell dargestellt werden. Entsprechende Funktionen bringt die Visualisierungssoftware PTV Visum bereits mit.

Im Rahmen der Bearbeitung war nunmehr zu entscheiden, ob alle verbleibenden Teilstrecken, die im Jahr 2030 noch nicht elektrifiziert sind,

- mit einer klassischen Oberleitung inklusive 16,7-Hz-Bahnstromversorgung ausgestattet,
- mit punktuellen Ladestation für den Regionalverkehr versehen oder
- im Güterverkehr weiterhin mit Dieseltraktion betrieben

werden.

Dazu wurde in einem ersten Bearbeitungsschritt jede einzelne der deutschen Teilstrecken separat untersucht und aufgrund geografischer, betrieblicher und energetischer Rahmenbedingungen entschieden, ob und wenn ja, wie die dieselbetriebene Teilstrecke für das Jahr 2030 elektrifiziert wird (Oberleitung / Ladestation).

Es sind allerdings nicht alle im digitalen Schienenmodell der PTV vorhandenen Bahnstrecken für die angestrebte Kosten-/ Nutzenabschätzung relevant. Daher waren zunächst

- nicht bundeseigene (Industrie-) Bahnen (meist mit dem Attribut Streckennummer = 0 versehen) sowie
- für das Jahr 2030 prognostiziert nicht befahrene und nicht betriebene Strecken (Information hierzu ist nicht im digitalen Schienennetzmodell enthalten!)

zu identifizieren und aus den Untersuchungsdaten zu eliminieren.

Während das Aussortieren der Industriebahnen über das Netzattribut „Streckennummer“ möglich ist, sind die Informationen zu betriebenen und zu stillgelegten Strecken nicht direkt verfügbar. Bereits zu Beginn der Projektbearbeitung geschah diese Filterung individuell („händisch“) durch Betrachtung und Prüfung jeder einzelnen Teilstrecke.

Automatisiert werden kann die Identifizierung relevanter Teilstrecken nur bei ausreichender Datenlage zum baulichen und betrieblichen Status der Strecke. Aus dem Grunddatenbestand der von PTV zur Verfügung gestellten Daten war dies nicht möglich. Vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie wird das sogenannte Digitale Landschaftsmodell 1:250.000 (DLM) als Open Data bereitgestellt.¹⁰⁸ Es enthält sämtliche Strecken der DB und der nicht-bundeseigenen Bahnen. Weiterhin kann über das Attribut ZUS (Zustand) der Status der Teilstrecke abgerufen werden. Der Attributwert 2100 entspricht dabei dem Status „Außer Betrieb, stillgelegt, verlassen“.¹⁰⁹ Eine Zusammenführung der verschiedenen Datenmodelle von PTV und DLM kann über das Attribut „Streckennummer“ erreicht werden. Das DLM bildet den IST-Zustand (2017) ab und kann daher keine garantiert richtige Darstellung der in Betrieb befindlichen Strecken für das Jahr 2030 abgeben.

Tabelle 141 zeigt alle 291 ermittelten, im Jahr 2017 nicht befahrenen und nicht betriebenen Strecken an.

¹⁰⁸ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, „Link zum DLM“: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=1&gdz_user_id=0; [Zugriff am 21. 01. 2019].

¹⁰⁹ Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, „Dokumentation DLM,“: http://sg.geodatenzentrum.de/web_download/dlm/dlm250/dlm250.pdf; [[Zugriff am 21. 01. 2019].

STRECKENNUMMER_2030													
1001	1821	2534	3131	3734	4831	6154	6509	6613	6688	6778	6857	6936	9224
1002	1940	2541	3201	3740	4901	6157	6512	6615	6696	6782	6859	6940	9231
1003	1942	2556	3236	3745	4954	6163	6514	6616	6703	6783	6860	6942	9241
1012	1943	2557	3281	3747	5000	6177	6515	6617	6704	6798	6861	6957	9257
1021	1963	2572	3283	3901	5003	6194	6516	6618	6705	6800	6862	6968	9266
1041	2002	2610	3290	3911	5114	6200	6521	6619	6710	6803	6864	9110	9278
1112	2122	2631	3304	3920	5200	6214	6524	6620	6717	6806	6870	9113	9279
1137	2131	2681	3420	3922	5211	6216	6528	6621	6719	6810	6878	9127	9305
1216	2133	2703	3434	3924	5231	6218	6529	6627	6722	6812	6881	9129	9310
1221	2165	2710	3440	3944	5385	6219	6542	6628	6725	6814	6883	9163	9350
1501	2181	2850	3450	4242	5564	6226	6543	6629	6726	6815	6886	9165	9372
1503	2232	2860	3500	4320	5803	6269	6573	6630	6727	6823	6891	9166	9380
1534	2233	2982	3504	4330	5843	6356	6575	6632	6729	6825	6894	9168	9428
1563	2241	2983	3562	4401	5844	6362	6577	6635	6731	6826	6900	9169	9464
1573	2246	2985	3563	4512	5853	6407	6584	6636	6733	6828	6901	9175	9487
1575	2262	3005	3572	4520	5905	6412	6588	6653	6734	6829	6903	9176	9490
1722	2273	3015	3578	4521	5916	6413	6591	6657	6735	6830	6904	9180	9492
1723	2324	3021	3579	4611	6008	6432	6595	6663	6752	6832	6905	9181	9531
1744	2501	3032	3705	4730	6022	6503	6597	6664	6759	6837	6906	9182	
1811	2505	3034	3720	4740	6118	6505	6602	6680	6769	6848	6919	9200	
1813	2524	3100	3721	4810	6151	6508	6609	6683	6777	6849	6928	9210	

Tabelle 141: Streckennummern der nicht in Betrieb befindlichen und nicht befahrenen Strecken im Jahr 2017

9.3 Kriterien zur Definition der Teilelektrifizierung

Als Kriterien, nach denen eine verbleibende Dieselstrecke im Jahr 2030 mit einer Oberleitung oder mit Ladestationen für den Regionalverkehr elektrifiziert werden soll, wurden bei der vorliegenden Untersuchung folgende Prämissen definiert, die zunächst ausschließlich für den Personenverkehr gelten:

- 2030 sind gemäß den Vorgaben des BVWP bereits weitere Strecken elektrifiziert (z.B. Teile Mühldorfer Netz, Knappenrode - Horka, München - Lindau, Hof - Regensburg, Hof - Nürnberg, Lüneburg - Puttgarden, Y-Spange Hamburg / Bremen - Hannover, usw.).
- Bei Großstädten mit mehr als 100.000 Einwohnern und weniger als 200 km Entfernung zueinander wird die vorhandene Verbindungsstrecke aus Angebotsgründen elektrifiziert (z. B. Chemnitz - Leipzig).
- Strecken mit zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ≥ 160 km/h werden aus Gründen der Leistungsfähigkeit elektrifiziert.

- Zusätzlich notwendige Oberleitungsabschnitte gehen nach Möglichkeit vom bestehenden elektrifizierten Netz aus und sind bevorzugt aus dem zentralen Bahnstromnetz zu versorgen (Vermeidung von Inselnetzen, Wirtschaftlichkeit).
- Ladestationen für Regionalverkehrszüge werden bevorzugt an Knoten- und Wendebahnhöfen mit längeren fahrplanmäßigen Aufenthaltszeiten vorgesehen (Gewährleistung ausreichender Ladezeiten).
- Bei Stichstrecken, insbesondere im Gebirge, werden Ladestationen an betrieblichen Zwangspunkten (Begegnungshalte) oder an Endpunkten vorgesehen.
- Aus Gründen der Fahrplan- und Umlaufstabilität werden nach Möglichkeit keine direkt aufeinander folgenden Ladestationen im Streckenverlauf einer Regionalverkehrslinie vorgesehen (z. B. Marschbahn).

Bei den anschließenden Variantenuntersuchungen zum Güterverkehr kann es vorkommen, dass aufgrund der o.g. Kriterien für den Personenverkehr eine Strecke nicht für die durchgehende Elektrifizierung mit Oberleitungen vorgesehen wird, infolge des für 2030 prognostizierten, bisher dieselbetriebenen Güterverkehrsaufkommens jedoch die durchgehende Elektrifizierung grundsätzlich sinnvoll erscheint. In einem ersten Ansatz hierzu wurde deshalb eine Elektrifizierung nur dann unterstellt, wenn der gesamte Güterverkehr (schnell und langsam) in Summe mindestens 8 Güterzüge pro Tag auf einer Strecke (im Querschnitt) beträgt.

Für die Untersuchung weiterer Varianten zum Güterverkehr kann in dem genutzten Berechnungstool vorgegeben werden, ab wieviel Güterzügen pro Tag eine Elektrifizierung unterstellt werden soll. Hierbei wird nach langsamen und schnellen Güterzügen differenziert. Das Berechnungstool passt dann automatisiert diverse Werte zum Elektrifizierungsstatus der Strecke und zur Kostenberechnung an.

Aus den 26.339 gegebenen Teilstrecken im digitalen Streckennetz von PTV (inkl. Europäischem Ausland) blieben nach Filterung der Datei nach relevanten Teilstrecken insgesamt 10.765 Datensätze übrig. Jeder Datensatz entspricht einer Teilstrecke zwischen zwei Stationen, die gemäß der bisherigen Prognose im Jahr 2030 entweder bereits elektrifiziert ist oder weiter mit Dieselfahrzeugen befahren wird.

Ausgehend von der unterstellten Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge von 40 km im Regelbetrieb war nach den o.g. Kriterien nunmehr eine Entscheidung zu treffen, ob eine verbleibende Dieselstrecke mit klassischen Oberleitungen elektrifiziert werden soll oder ob an geeigneten Stellen der Bau einer punktuellen Ladeinfrastruktur ausreicht. Dazu wurde jede der identifizierten Teilstrecken separat überprüft. Im Ergebnis dieser Überprüfung wurden insgesamt 2.220 km zusätzliche Oberleitungsstrecken und netzweit 88 Ladestationen erforderlich, wenn allein der Personenverkehr die maßgebende Gestaltungsgröße ist und keine zusätzlichen Strecken aufgrund von vorhandenem Güterverkehr elektrifiziert werden.

Im digitalen Schienennetzmodell der PTV (und der daraus modifizierten internen Arbeitsdatei der TU Dresden) ist zusätzlich verzeichnet, wie viele langsame und schnelle Güterzüge pro Tag auf den Teilstrecken für das Jahr 2030 prognostiziert sind. Durch Vorgabe einer Elektrifizierungswürdigkeitsgrenze in Form einer wählbaren Anzahl von Güterzügen pro Tag (z.B. Anzahl 8, 5 oder 1) im genutzten Berechnungstool wird die betreffende Strecke automatisch als durchgehend zu elektrifizieren eingestuft. Wird eine Strecke nunmehr in Folge dieses Auswahlkriteriums zusätzlich elektrifiziert, kann auf ihr die bisher ggf. notwendige punktuelle Nachladeinfrastruktur für den Regionalverkehr entfallen, da eine doppelte Energieversorgung nicht erforderlich ist. Die entfallenden Ladestationen dieser Teilstrecke werden dann in der Datenbasis automatisch entsprechend markiert. Wird beispielsweise in der Vorgabemaske ein Güterzugaufkommen von mindestens einem Zug pro Tag für die Elektrifizierung unterstellt, werden alle entsprechenden Teilstrecken mit gleichem oder höherem Güterzugaufkommen fortan als elektrifiziert eingestuft und die bis dahin dort vorhandenen Ladestationen auf diesen Strecken obsolet.

Für die Ermittlung einer repräsentativen Bandbreite von Ergebnissen für unterschiedliche Güterverkehrsfälle wurden die nachfolgenden Kriterien E1, E2 und E3 definiert, nach denen eine Strecke durchgängig elektrifiziert wird:

E1 Elektrifizierung für Personenverkehr

Die Parameter für Personenverkehr sind erfüllt (160 km/h, Verbindung Großstädte, Leistungsfähigkeit Angebot, Abschnittslänge ohne Lademöglichkeit > 40 km, ...).

E2 Elektrifizierung für (hinreichend) viel Güterverkehr

Falls das Kriterium E1 nicht erfüllt ist, ist dennoch zu elektrifizieren, wenn langsames und schnelles Güterverkehrsaufkommen in der Summe mindestens 8 Züge pro Tag betragen.

E3 Elektrifizierung für wenig Güterverkehr

Wenn die Kriterien für E1 und E2 nicht erfüllt sind, wird dennoch elektrifiziert, wenn langsamer und schneller Güterverkehr jeweils eine vorgebbare Zuganzahl pro Tag mindestens erreichen.

9.4 Erläuterungen zur Kostenkalkulation

Mit dem genutzten Berechnungstool ist es möglich, die Kostenkalkulation für die Elektrifizierung getrennt für die Kosten des Personen- und Güterverkehrs durchzuführen. Analog zur durchgeführten Kostenberechnung für die Komplettelektrifizierung werden sämtliche Kosten jeweils separat für die Streckenkategorien Flachland, Mittelgebirge oder Gebirge, für ein- und zweigleisige Strecken sowie für die relevanten Oberleitungsbauarten Re100 oder Re200 berechnet. Die Informationen zur erforderlichen Oberleitungsbauart und zur Gleisanzahl werden aus dem digitalen Schienennetzmodell entnommen, welches auch die

maximale Streckengeschwindigkeit enthält. Die Angabe, ob die betreffende Strecke zur Kategorie Flachland, Mittelgebirge oder Gebirge zählt, wird über das Attribut „HÖHE_NACHKNOTNR“ bestimmt. Wie bei der Studie zur Komplettelektrifizierung sind dabei als Flachland Strecken von 0 - 300 m Höhe, als Mittelgebirge von 300 - 750 m Höhe und als Gebirge von 750 - 1250 m Höhe definiert.

In Abhängigkeit von der ermittelten Gleisanzahl, der Oberleitungsbauart und der Höhenkategorie werden spezifische Kostensätze für die Errichtung der Oberleitungsanlage auf den zu elektrifizierenden Streckenkilometern bei maximal 40 km Unterbrechung (Teilelektrifizierung) herangezogen. Anhand hinterlegter spezifischer Faktoren werden zusätzlich Anzahl und Kosten der benötigten Unterwerke und Umrichterwerke, die Längen neu zu bauender Freileitungen sowie der Flächenbedarf der Bahnstromanlagen und Freileitungen berechnet. Bei Ausrüstung mit punktueller Ladeinfrastruktur (Ladestationen inkl. Ladeabschnitte) wird die Gesamtanzahl anhand der oben beschriebenen Verfahrensweise berücksichtigt. Hinzu kommen Kostenaufschläge für die Anpassung von Ingenieurbauwerken (Brücken, Tunnel) und der Signaltechnik. Zu jeder Kostenposition wird jeweils ein spezifischer Kostenwert verwendet, woraus sich über die Mengengerüste dann die tatsächlichen Kosten ergeben.

Das gleiche Prinzip wird bei der separaten Kostenermittlung für zusätzliche Elektrifizierungen infolge wählbarer Güterzugzahlen angewendet. Dabei wird die Anzahl der aufgrund der Zusatzelektrifizierung nicht mehr benötigten Ladestationen ermittelt und die Kostendifferenz ausgewiesen.

Als spezifische Kostensätze für die Elektrifizierung wurden die gleichen Werte angesetzt wie in der Studie zur Komplettelektrifizierung, die zuvor im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit¹¹⁰ umfassend verifiziert wurden.

9.5 Berechnungsergebnisse zur Infrastruktur

9.5.1 Streckenlängen und spezifische Kosten

Auf Basis der vorstehend beschriebenen Methodik sowie unter Nutzung der hierfür erstellten Werkzeuge zur Streckenauswahl, -darstellung und -kostenberechnung wurden die infrastrukturseitigen Mengengerüste und Kosten der Teilelektrifizierung für mehrere betriebliche Netzzustände detailliert ermittelt. In Tabelle 142 sind die kilometerspezifischen Kosten für die Elektrifizierung der einzelnen Netzzustände mit den insgesamt zu elektrifizierenden Streckenkilometern dargestellt. Neben dem Planfall „Komplettelektrifizierung“ wurden das Kriteriennetz der Teilnetzelektrifizierung für den Personenverkehr (PV) sowie drei Güterverkehrsfälle (Elektrifizierung bei 8, 5 oder 1 Güterzügen pro Tag und Strecke) dargestellt.

¹¹⁰ S. Meissner, "Ermittlung spezifischer Ausrüstungsstandards und Kostenansätze von Oberleitungsanlagen zur Untersuchung der Elektrifizierungswürdigkeit", Masterarbeit, Professur für Elektrische Bahnen, Technische Universität Dresden, 2017.

	Komplett- elektrifi- zierung	Teilelektri- fizierung (nur PV)	8 Güterzüge pro Tag		5 Güterzüge pro Tag		1 Güterzug pro Tag	
			PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.
zu elektrifizie- rende Strecken in km	18.796	2.220	346	2.566	871	3.091	3.578	5.798
(Kilometer-)spezifische Kosten für die Infrastrukturanlagen der Elektrifizierung in EUR/km								
Mittlere Kos- ten OL-Anlage in EUR / Gkm	733.408	733.990	646.572	722.205	656.265	712.092	665.366	691.645
Mittlere Kos- ten Bahnstromver- sorgung in EUR / km	199.677	199.925	199.925	199.925	199.925	199.925	199.925	199.925
Mittlere Kos- ten Anpassung Ingenieurbau- werke, LST-Anpassung, Profilfreima- chung in EUR / km	207.600	207.600	207.600	207.600	207.600	207.600	207.600	207.600
Ladestationen in EUR / km		79.262	-11.561	67.018	-11.480	53.696	-11.179	23.454
Grunderwerb in EUR / km	4.630	4.636	4.636	4.636	4.636	4.636	4.636	4.636

Tabelle 142: Kilometerspezifische Kosten für die Elektrifizierung

In den Spalten der drei Güterverkehrsfälle sind neben den Längen und spezifischen Kosten dieser Fälle („PV exkl.“, d.h. ohne Elektrifizierungsanteil des Personenverkehrs) ebenfalls die Längen und spezifischen Kosten inkl. des Personenverkehrs eingetragen („PV inkl.“). Wird beispielsweise nur die Teilnetzelektrifizierung für den Personenverkehr umgesetzt, müssen 2.220 km Strecke zusätzlich elektrifiziert werden. Sollen dann auch noch jene Strecken elektrifiziert werden, auf denen z. B. mindestens 5 Güterzüge am Tag verkehren, müssten weitere 871 km elektrifiziert werden. Insgesamt ergibt sich für diesen Fall eine Elektrifizierungslänge von $2.220 + 871 = 3.091$ km.

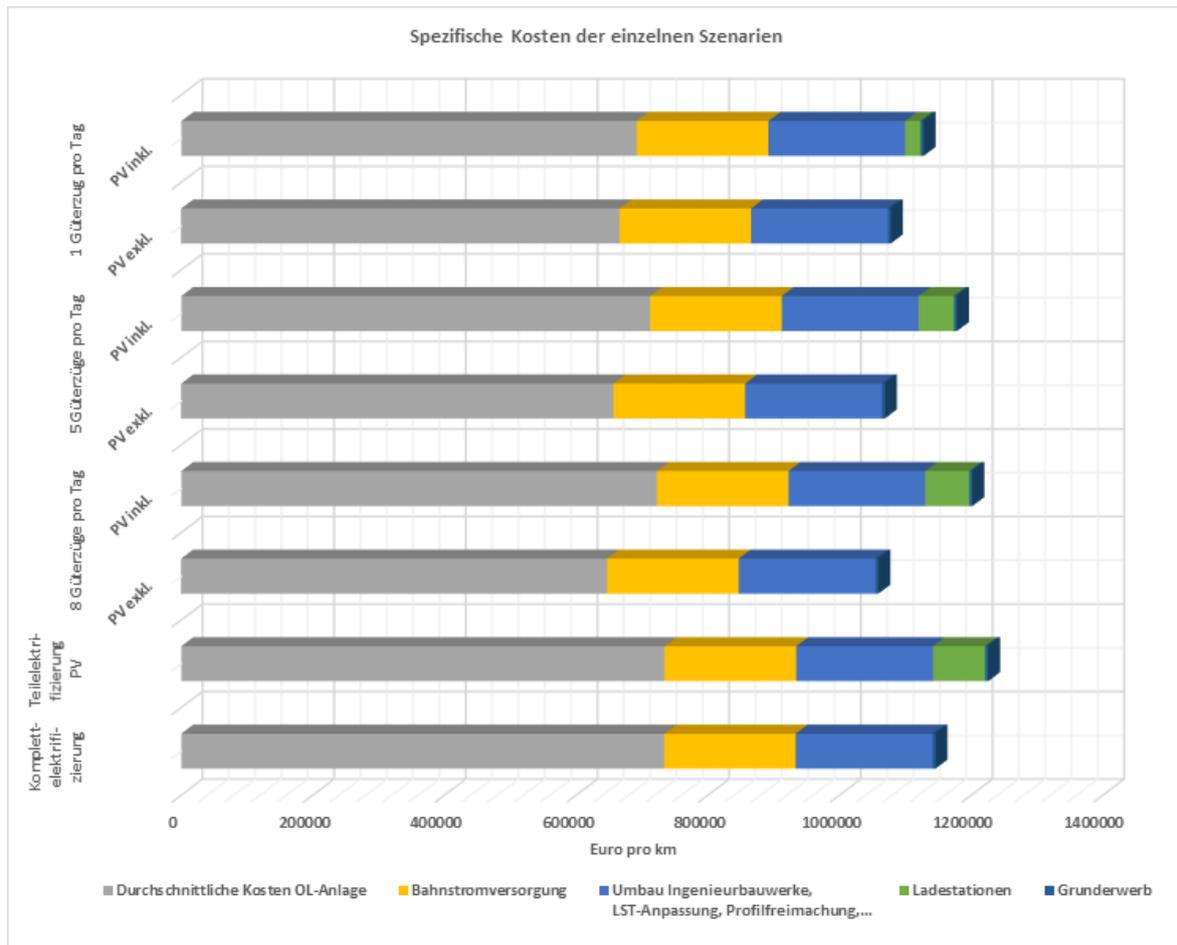


Abbildung 44: Spezifische Kosten für die gewählten Netzzustände

9.5.2 Personenverkehr

Als Referenz für alle nachfolgenden Kostenvergleiche dient der Planfall 2030 der Komplettelektrifizierung des deutschen Streckennetzes mit einem Gesamtinvestitionsvolumen von 21,2 Mrd. EUR. Alle Einzelkosten sind in Tabelle 143 aufgeführt.

Im ersten Schritt wurde ausschließlich die Elektrifizierung der Strecken des Personenverkehrs nach dem Kriterium E1 betrachtet. Daraus resultiert ein Elektrifizierungsbedarf von 2.220 km Strecke (einschließlich der darin befindlichen Bahnhöfe) mit klassischen Oberleitungen und zugehöriger 16,7-Hz-Bahnstromversorgung. Hinzu kommen netzweit 88 Ladestationen mit zugehörigen Ladeabschnitten.

Unter Ansatz der gleichen spezifischen Kostensätze für die Elektrifizierung inklusive der erforderlichen infrastrukturellen Anpassungen an Ingenieurbauwerken und Signaltechnik sowie Grunderwerb wie in der vorangegangenen MKS-Untersuchung zur Komplettelektrifizierung ergeben sich Gesamtinvestitionen von **2,72 Mrd. EUR** ausschließlich für die Strecken des Personenverkehrs gemäß Kriterium E1. Darin enthalten sind auch die Kosten für Ladestationen und Ladeabschnitte. Da für letztere noch keine gesicherten Kostenwerte vorliegen, wurde nach Recherche bei Industriepartnern und Betreibern zunächst mit Varianzen

zwischen 1 und 2 Mio. EUR pro Ladeort gearbeitet. Das Gesamtergebnis der Investitionskosten variiert dadurch um ca. 7,5 %, für die Kostenermittlung. Zum Vergleich mit der Komplettelektrifizierung wurde deshalb grundsätzlich der höhere Wert von 2 Mio. EUR herangezogen. Selbst bei Ansatz eines noch höheren spezifischen Kostenwertes von 3 Mio. EUR pro Nachladeort würden daraus nur geringfügig höhere Gesamtinvestitionen von 2,81 Mrd. EUR resultieren, so dass für eine Teilelektrifizierung des Personenverkehrs eine infrastrukturseitige Gesamtinvestition von weniger **als 3 Mrd. EUR** realistisch ist. Das für die Teilelektrifizierung des Personenverkehrs ermittelte Investitionsvolumen entspricht damit nur knapp 13 % der Investitionssumme der zuvor untersuchten Komplettelektrifizierung, die – auf Basis nahezu gleicher spezifischer Kostensätze – mit **insgesamt 21,2** Mrd. EUR für knapp 19.000 km Strecken veranschlagt war.

Im hier beschriebenen Fall des Personenverkehrs müsste allerdings der gesamte für 2030 prognostizierte Güterverkehr auf den verbleibenden nicht elektrifizierten Streckenabschnitten des deutschen Schienennetzes mit Dual-Mode-Lokomotiven (kombinierte Elektro-/ Dieseltraktion) erbracht werden.

9.6 Varianten mit Güterverkehr

Als nächste Variante wurde gemäß **Kriterium E2** eine zusätzliche Elektrifizierung aller Strecken unterstellt, auf denen im Jahr 2030 mindestens **8 Güterzüge** pro Tag prognostiziert sind. Da dies insgesamt nur sehr wenige Strecken betrifft, ergibt sich daraus auch nur eine geringe zusätzliche Elektrifizierungslänge von 346 km gegenüber Kriterium E1, die zusätzliche elektrifizierte Gesamtlänge beträgt dann **2.566 km**. Die Gesamtinvestitionen dieser Variante steigen gegenüber dem Fall E1 um 279 Mio. EUR auf ca. **3,00 Mrd. EUR** an, was nunmehr **14,2 %** der Investitionssumme für die Komplettelektrifizierung entspricht. Darin berücksichtigt ist bereits der Entfall einiger Ladestationen für den Regionalverkehr an den nun zusätzlich elektrifizierten Güterverkehrsstrecken.

Um eine Abschätzung der Kosteneffekte bei zusätzlicher Elektrifizierung von weiteren Güterverkehrsstrecken - allerdings mit nur geringem Aufkommen - zu ermöglichen, wurden schließlich noch Mengengerüste und Kosten für die Elektrifizierung nach dem **Kriterium E3** ermittelt. Exemplarisch sollen hier die Ergebnisse für einen mittleren Fall mit mindestens fünf Güterzügen (Kriterium E3-5) und ein minimaler Fall mit nur einem Güterzug pro Tag (Kriterium E3-1) wiedergegeben werden:

Ergebnisse für Kriterium E3-5 (Strecken mit min. 5 Güterzügen pro Tag elektrifiziert):

- zusätzliche Elektrifizierungslänge gegenüber E1: 871 km für Güterverkehr
- Gesamtelektrifizierungslänge 2030 zusätzlich: 3.091 km (PV und GV)
- Gesamtinvestition: 3,64 Mrd. EUR

entspricht **17,2 %** der Investitionen für Komplettelektrifizierung des Netzes

Ergebnisse für Kriterium E3-1 (Strecken mit min. 1 Güterzug pro Tag elektrifiziert):

- zusätzliche Elektrifizierungslänge gegenüber E1: 3.578 km für Güterverkehr
- Gesamtelektrifizierungslänge 2030 zusätzlich: **5.798 km** (PV und GV)
- Gesamtinvestition: **6,54 Mrd. EUR**
- entspricht **30,8 %** der Investitionen für Komplettelektrifizierung des Netzes.

9.7 Gesamtübersicht der Investitionen

Zusammenfassend sind alle ermittelten Kostenwerte für die Infrastrukturinvestition der Elektrifizierung nochmals in Tabelle 143 gegenübergestellt. Neben den Gesamtkosten pro Fall können jeweils auch die einzelnen Kostenanteile der Anlagen abgelesen werden. Darüber hinaus sind die durch Berücksichtigung unterschiedlicher Güterverkehrsaufkommen entstehenden Differenzen separat ausgewiesen (Spalten PV exkl.). Schließlich wurden in der letzten Zeile die Investitionen in Annuitäten umgerechnet. Abbildung 45 stellt die Ergebnisse zu den Investitionen nochmals grafisch dar.

Kostenanteil	Komplett- elektri- fizie- rung	Teil- elektri- fizie- rung (nur PV)	8 Güterzüge pro Tag		5 Güterzüge pro Tag		1 Güterzug pro Tag	
			PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.
OL-Anlage	13,585	1,630	0,170	1,800	0,572	2,201	2,381	4,011
Bahnstromversor- gung gesamt	3,699	0,444	0,055	0,499	0,174	0,618	0,715	1,159
darin: Unterwerke / Um- richterwerke	3,071	0,369	0,046	0,414	0,145	0,513	0,594	0,963
darin: 2AC- / 3AC- Versorgungsleitun- gen	0,628	0,075	0,009	0,085	0,030	0,105	0,121	0,197
Anpassung Ingeni- eurbauwerke LST-Anpassung, Profilfreimachung;	3,845	0,461	0,057	0,518	0,181	0,642	0,743	1,204
Ladestationen		0,176	-0,004	0,172	-0,010	0,166	-0,040	0,136
Grunderwerb	0,086	0,010	0,001	0,012	0,004	0,014	0,017	0,027
Gesamtinvestition	21,215	2,721	0,279	3,000	0,921	3,642	3,815	6,536
<i>Annuität in Mio. EUR p.a.</i>	<i>566,80</i>	<i>72,70</i>	<i>7,45</i>	<i>80,15</i>	<i>24,61</i>	<i>97,30</i>	<i>101,93</i>	<i>174,62</i>

Tabelle 143: Gesamtinvestition für Elektrifizierung (in Mrd. EUR)

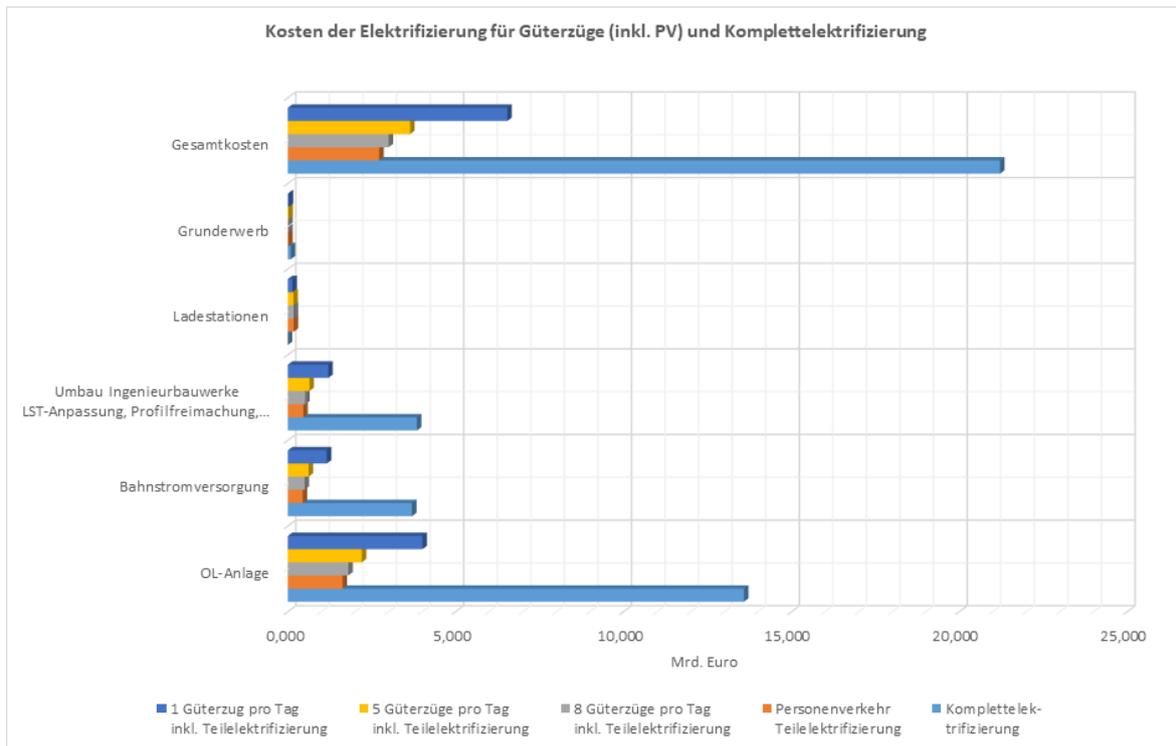


Abbildung 45: Gesamtinvestition der Infrastrukturanlagen für Komplet- und Teilelektrifizierung

9.8 Laufende jährliche Betriebskosten

Analog zu der in Kap. 4.5.5 erwähnten Methodik zur Berechnung der laufenden jährlichen Infrastrukturkosten zeigt Tabelle 144 die ermittelten jährlichen Betriebskosten für das jeweilige Szenario der Teilelektrifizierung. Die ausgewiesenen laufenden Kosten beziehen sich dabei nur auf die Investitionssummen für die elektrotechnischen Anlagen, die in den Gesamtinvestitionen enthaltenen Zusatzkosten für die Anpassung von Ingenieurbauwerken und LST sowie für Grunderwerb wurden nicht mit eingerechnet.

Kostenanteil	Komplettelektrifizierung	Teilelektrifizierung (nur PV)	8 Güterzüge pro Tag		5 Güterzüge pro Tag		1 Güterzug pro Tag	
			PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.	PV exkl.	PV inkl.
Investition E-Anlagen in Mrd. EUR	17,283	2,074	0,225	2,299	0,746	2,820	3,096	5,170
Betriebskosten p.a. in Mio. EUR (1. Bezugsjahr)	173	21	2,2	23	7,5	28	31	52

Tabelle 144: Laufende jährliche Betriebskosten für die Infrastruktur der Elektrifizierung

Da die jährlichen Kosten prozentual aus den Investitionen berechnet wurden, sind die prozentualen Werte bezogen auf die jährlichen Kosten der Komplettelektrifizierung identisch. Die laufenden jährlichen Kosten für Betrieb und Instandhaltung der elektrotechnischen Anlagen betragen somit zwischen minimal 21 Mio. EUR p.a. (nur Personenverkehr, entspricht

12 % der Komplettelektrifizierung) und maximal 52 Mio. EUR p.a. (Strecken ab 1 Güterzug elektrifiziert, entspricht 30 % der Komplettelektrifizierung).

9.9 Darstellung in PTV Visum

Die von der TU Dresden modifizierte Ergebnisdatei, die alle Informationen zum Elektrifizierungsstatus einer Strecke enthält, stammt ursprünglich aus der „Strecken“-Datei, welche aus PTV Visum exportiert wurde. Im Zuge der Bearbeitung durch die TU Dresden wurden einige zusätzliche Spalten hinzugefügt („Ladestation vorhanden“, „Elektrifizieren des Personenverkehrs“, usw.).

Durch die Importfunktion in PTV Visum kann die modifizierte Ergebnisdatei problemlos eingelesen werden und die grafische Darstellung anhand der in Abschnitt 9.2 vorgestellten Methodik nachvollzogen werden. Abbildung 46 zeigt exemplarisch die erfolgreiche Darstellung der ermittelten Ladestationen in PTV Visum.¹¹¹

Das erstellte Werkzeug ist zudem in der Lage, bei steigendem Elektrifizierungsgrad durch den Güterverkehr überflüssige Ladestationen in der grafischen Darstellung zu markieren.

Die Darstellung der Untersuchungsergebnisse sowohl in Matlab als auch in PTV Visum gestaltet sich aufgrund des strukturierten Aufbaus des angepassten Excel-Dokuments zur Datenübergabe problemlos.

¹¹¹ S. Forkert, PTV AG, Grafik als Email-Anhang, Email vom Mo 10.12.2018 10:56.

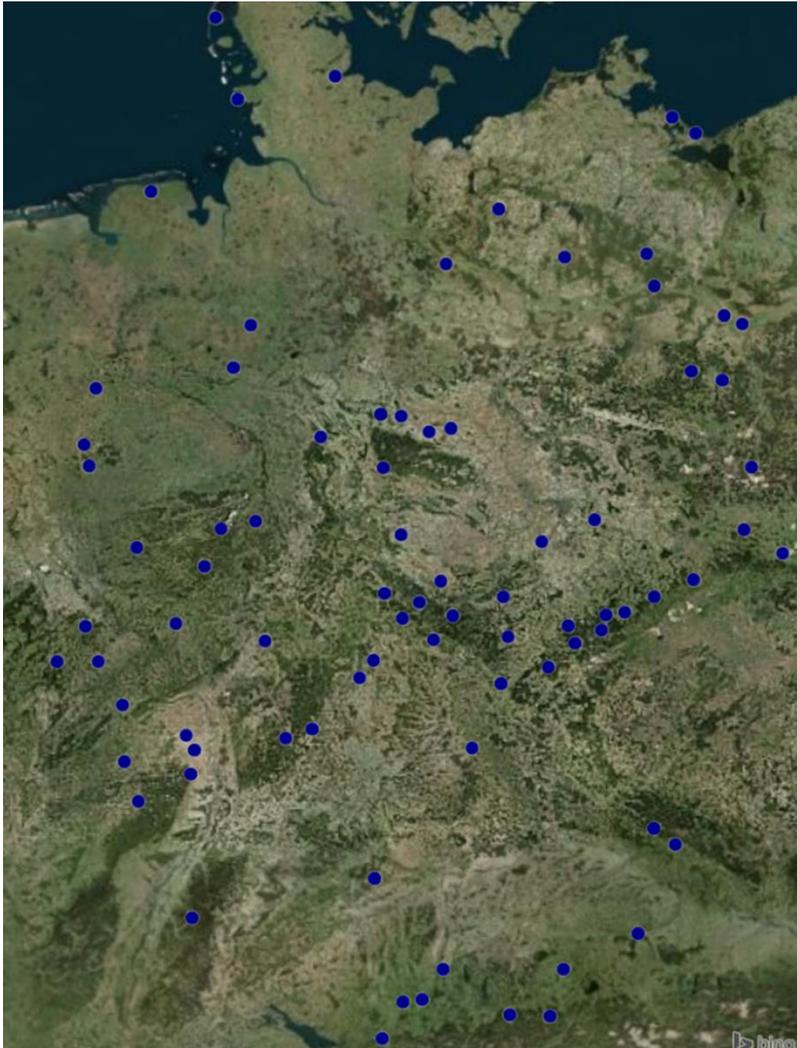


Abbildung 46: Beispielhafte Darstellung der Ladestationen (blaue Punkte) in PTV Visum

9.10 Infrastrukturkosten der Teilelektrifizierung

Ausgehend vom geplanten Bestandsnetz des Jahres 2030 wurden zunächst Kriterien und Ausführungsvarianten für zusätzliche Elektrifizierungen des Personenverkehrs definiert. Im Ergebnis konnten Mengengerüste für die abschnittsweise Elektrifizierung zusätzlicher Strecken sowohl mit klassischen Oberleitungen als auch mit punktuellen Ladestationen für Regionalverkehrsfahrzeuge ermittelt werden. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit geschaffen, mittels eines vorgebbaren Kriteriums die durchgehende Elektrifizierung von Strecken in Abhängigkeit des prognostizierten Güterverkehrsaufkommens zusätzlich zu unterstellen.

Ausgehend von einer zu Projektbeginn definierten Reichweite kombinierter Oberleitungs-/ Batteriefahrzeugen im oberleitungsfreien Regelfahrbetrieb von 40 km wurden alle zusätzlichen Oberleitungsabschnitte und Ladestationen so angeordnet, dass im Fahrplanbetrieb keine größere nichtelektrifizierte Fahrstrecke als 40 km entsteht.

Auf Basis der für 2030 prognostizierten Verkehrsmengen und Zugzahlen auf den o.g. Strecken ergeben sich zusätzliche Elektrifizierungslängen von minimal 2.220 km (nur Personen-Regionalverkehr) bis zu maximal 5.798 km (Elektrifizierung auch bei geringen Güterverkehrsmengen). Dies entspricht minimal 12 % und maximal 30 % der für die Komplettelektrifizierung berechneten Streckenlängen. Zusätzlich sind für den Regionalverkehr im Gesamtnetz zwischen maximal 88 (nur Personenverkehr) und minimal 68 (infolge zusätzlicher elektrischer Güterstrecken) punktuelle Ladestationen erforderlich.

Die Gesamtinvestitionen für die untersuchten Varianten der Teilelektrifizierung belaufen sich auf Werte zwischen minimal unter 3 Mrd. EUR (nur Regionalverkehr) und maximal ca. 6,5 Mrd. EUR (nahezu alle Güterverkehre). Dies entspricht wiederum zwischen 13 % und 30 % der Investitionen der Komplettelektrifizierung. Die jährlichen Betriebskosten der zusätzlichen Elektrifizierungsinfrastruktur liegen zwischen minimal 21 Mio. EUR und maximal 52 Mio. EUR.

Somit ließe sich ein nahezu vollständiger elektrischer Verkehr im deutschen Schienennetz mit maximal einem Drittel der Kosten einer Komplettelektrifizierung erreichen.

Werden außer dem Regionalverkehr nur die verkehrsstärkeren Güterverkehrsstrecken elektrifiziert, kann der überwiegende Anteil des für 2030 prognostizierten Dieserverkehrs mit nur etwa einem Siebentel der Kosten einer Komplettelektrifizierung auf elektrische Traktion umgestellt werden. Die jährlichen Zusatzkosten für die Streckenelektrifizierung (Annuität aus der Investition und Betriebskosten) belaufen sich für diesen Fall auf $80 + 23 = 103$ Mio. EUR im 1. Bezugsjahr.

10 Kostenanalyse

Als **Hybridisierungs-Szenario** wird abschließend der Fall der Teilelektrifizierung im Personenverkehr gemäß Kriterium E1 und der zusätzlichen Elektrifizierung von Strecken mit mindestens 8 Güterzügen pro Tag im Querschnitt bezeichnet (vgl. Kapitel 9.3). Da nur wenige Strecken im Güterverkehr dieses Kriterium erfüllen, können näherungsweise die Werte des Szenarios „Hybridnetz ohne Lückenschluss im Güterverkehr“ aus den Betrachtungen zum Rollmaterial herangezogen werden. Unter Verwendung des Hybridisierungs-Szenario wird verglichen, wie sich die Gesamtkosten, Verbrauchszahlen und Emissionswerte verändern, wenn der Netzzustand „Bezugsfall Knoten 2030“ (mit gemischter Traktion) gemäß den genannten Kriterien ausgebaut wird: zusätzliche Elektrifizierung bestimmter ausgewählter Strecken im Personenverkehr unter Nutzung hybrider Antriebstechnologie (Elektrifizierungsinself), Elektrifizierung ausgewählter Strecken für den Güterverkehr sowie einem Restanteil von verbleibenden Dieselstrecken.

Auf Grund der Nutzung hybrider Antriebstechnik wurden bei den Zugkategorien alle Kenngrößen entsprechend angepasst. Sowohl bei den Verbrauchswerten als auch bei den Gewichtsangaben der hybrid nutzbaren Lokomotiven veränderten sich die angenommenen Parameter. Die Information, welche hybriden Fahrzeuge bei den Elektrifizierungsinself eingesetzt werden können, lieferte der Projektpartner TU Berlin (vgl. 8.1). Alle weiteren Betriebskosten wurden wiederum gemäß BVWP-Methodik berechnet (vgl. 5.3).

Abweichend zu den zwei Netzzuständen bei der Studie zur Komplettelektrifizierung des Schienennetzes wurde bei der Untersuchung zur Nutzbarkeit von hybriden Antriebstechniken und Elektrifizierungsinself von einem prognostizierten Netzzustand 2030 (basierend auf dem Schienennetz „Bezugsfall Knoten 2030“) ausgegangen. Zu der Bewertung der Maßnahme wurde das „Bezugsfall Knoten 2030 Netz“ in Relation zu dem Hybridisierungs-Szenario gesetzt und die Auswirkungen auf Kosten und Emissionsentwicklungen untersucht.

Im Folgenden werden die Ergebnisse ausgewählter Betriebskosten und Kenngrößen erläutert.

10.1 Energieverbrauch des Schienenverkehrs

Der Energieverbrauch des Schienenverkehrs verändert sich für den untersuchten Fall folgendermaßen:

Im Hybridisierungs-Szenario gibt es eine Reduktion des Energieverbrauchs beim Diesel von **7,16 PJ**. Auf Grund von zusätzlichen Teilelektrifizierungen, vor allem im Personennahverkehr und auf SGV- Strecken mit mindestens 4 Zugpaaren/Tag können dieselbetriebene Strecken reduziert werden. Durch den zusätzlichen Einsatz hybrider Antriebstechnologien im SPNV sinkt der Energieverbrauch durch Dieseltraktion.

Abnahme Diesel	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (PJ)	-6,72
SPFV (PJ)	-0,09
SGV (PJ)	-0,35
gesamt (PJ)	-7,16

Tabelle 145: Abnahme Energieverbrauch Diesel

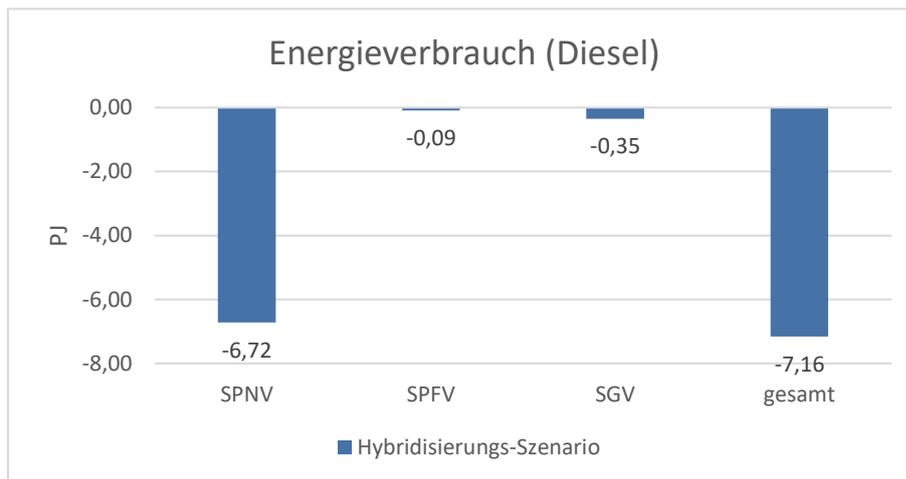


Abbildung 47: Abnahme Energieverbrauch Diesel

Analog zu dem Energieverbrauch unter Diesel wurde der elektrische Energieverbrauch berechnet. Der erhöhte Einsatz von elektrischer Energie im Hybridisierungs-Szenario bewirkt einen Anstieg von **3,69 PJ**.

Zunahme Elektro	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (PJ)	3,49
SPFV (PJ)	0,06
SGV (PJ)	0,13
gesamt (PJ)	3,69

Tabelle 146: Zunahme Energieverbrauch Elektro

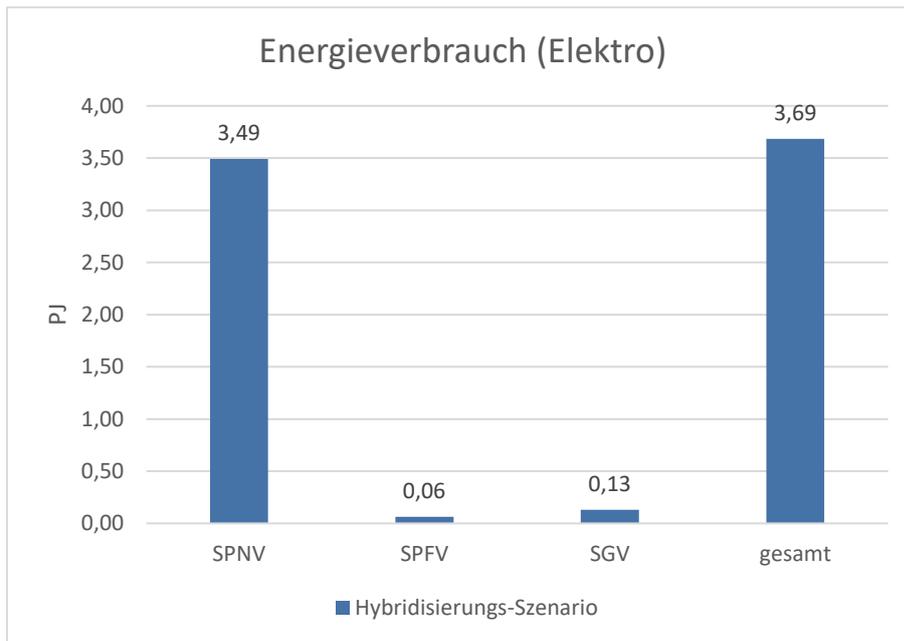


Abbildung 48: Zunahme Energieverbrauch Elektro

In Summe kann man sagen, dass die Teilelektrifizierung auf ausgewählten Strecken und der Einsatz von hybriden Lokomotiven auf verbleibenden Dieselstrecken (im SPNV) eine Reduktion des Energieverbrauchs von **3,47 PJ** mit sich bringen würde.

gesamt	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (PJ)	-3,23
SPFV (PJ)	-0,03
SGV (PJ)	-0,22
gesamt (PJ)	-3,47

Tabelle 147: Änderung Energieverbrauch gesamt (PJ/Jahr)

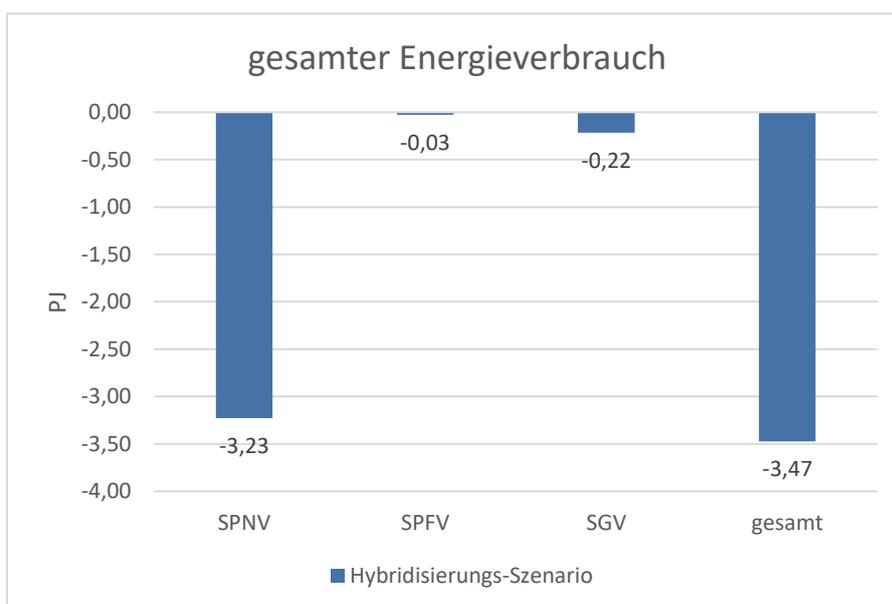


Abbildung 49: Änderung gesamter Energieverbrauch

10.2 Abgasemissionen des Schienenverkehrs

Neben dem Energieverbrauch sind die damit verbundenen Abgasemissionen, besonders die CO₂-Emissionen von Interesse. Die Berechnungen haben ergeben, dass bei einem Einsatz von Teilelektrifizierungen auf ausgewählten Strecken und zusätzlichem Einsatz von hybriden Lokomotiven auf noch nicht elektrifizierten Strecken eine prognostizierte Reduktion der CO₂-Emissionen für 2030 von insgesamt **0,45 Mt** /Jahr erreichbar wäre.

Im ersten Schritt bedeutet dies, dass im Hybridisierungs-Szenario eine durch Dieselstreckenreduktion bedingte Abnahme der CO₂-Emissionen von 0,65 Mt/Jahr erzielbar wäre.

Abnahme Diesel	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (Mt)	-0,62
SPFV (Mt)	0,00
SGV (Mt)	-0,03
gesamt (Mt)	-0,65

Tabelle 148: Abnahme CO₂-Emissionen – Diesel

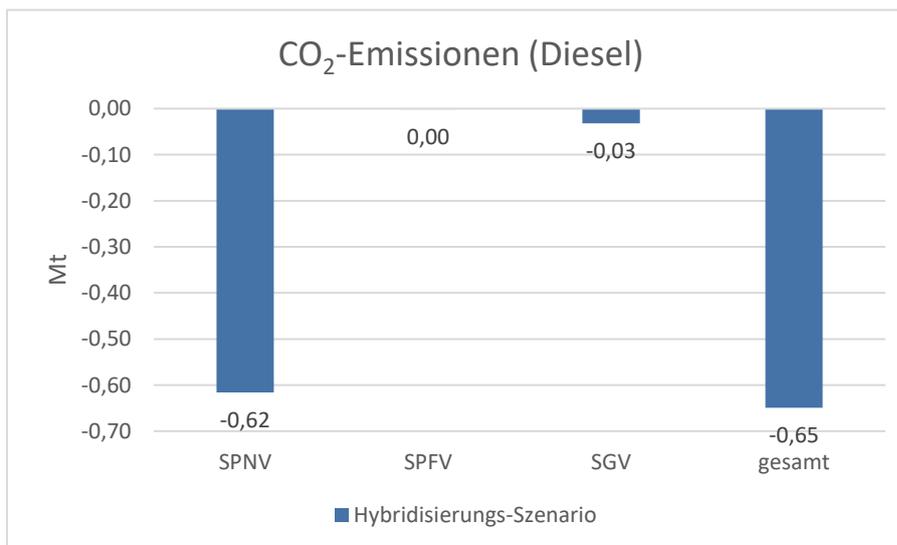
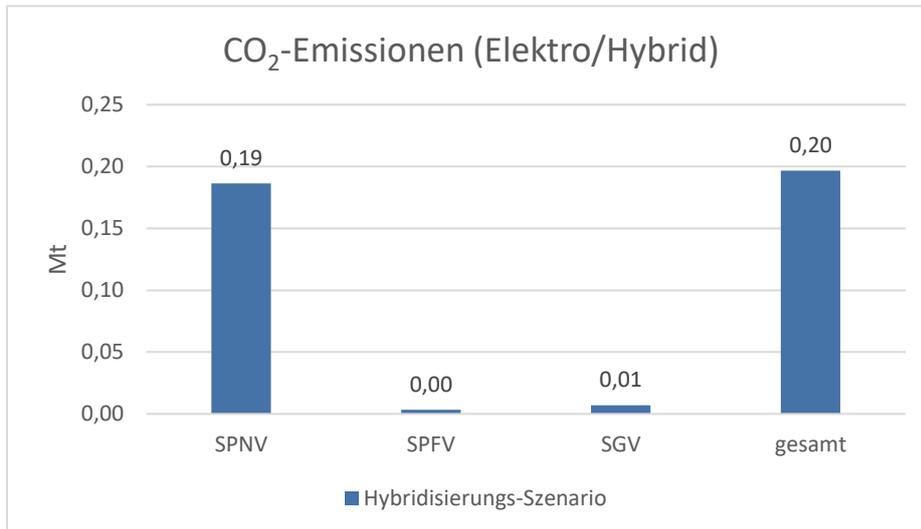


Abbildung 50: Abnahme CO₂-Emissionen – Diesel

Durch einen vermehrten Einsatz elektrifizierter Züge kommt es dann aber zu einem geringen Anstieg der CO₂-Emissionen.¹¹²

¹¹² Diese Zunahme wird bei der Bereitstellung (Vorleistung) ausgewiesen.

Zunahme Elektro	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (Mt)	0,19
SPFV (Mt)	0,00
SGV (Mt)	0,01
gesamt (Mt)	0,20

Tabelle 149: Zunahme CO₂-Emissionen - ElektroAbbildung 51: Zunahme CO₂-Emissionen – Elektro

Betrachtet man die gesamten errechneten CO₂-Emissionen für das Hybridisierungs-Szenario kommt man zu folgendem Saldo (s. Tabelle 150).

Gesamt	Hybridisierungs-Szenario
SPNV (Mt)	-0,43
SPFV (Mt)	0,00
SGV (Mt)	-0,02
gesamt (Mt)	-0,45

Tabelle 150: Gesamte CO₂-Emissionen

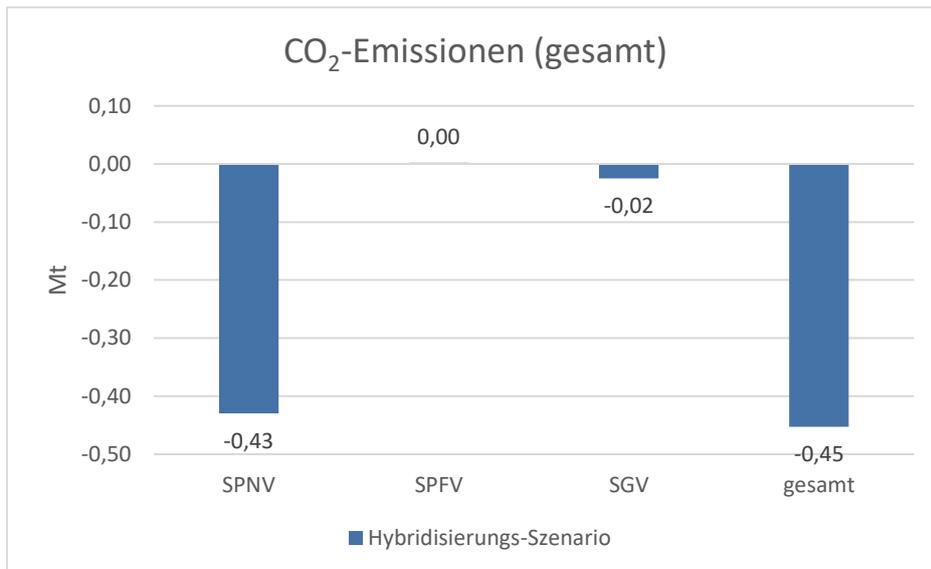


Abbildung 52: Änderung Abgasemissionen (Mt/Jahr)

10.3 Vermeidungskosten

Analog zur Studie I über die Komplettelektrifizierung des deutschen Schienennetzes wurden zusätzlich zu den Betriebskosten die Vermeidungskosten berechnet (vgl. 5.3.6).

Die Betriebskosten folgen aus den Infrastrukturkosten der TU Dresden und den Rollmaterialkosten der TU Berlin. Ergänzende Betriebskosten wurden nach der Methodik der BVWP berechnet. Für eine durchschnittliche angenommene Nutzungsdauer von **35 Jahren** für das Rollmaterial, einer angenommenen Lebensdauer der Infrastruktur von **60 Jahren**, und einem angenommenen **Zinssatz** von **1,70%** gemäß BVWP-Methodik bekommt man im Ergebnis Vermeidungskosten für das Hybridisierungs-Szenario in Höhe von **202,59 €/tCO₂** (s. Tabelle 151).

		Hybridisierungs-Szenario	
Treibhausgasemissionen (WtW) Einsparung pro Jahr	Mt CO ₂ /a	-0,45	
Investitionskosten (Infrastruktur)	Mio. €	3.000,00	
Lebensdauer	Jahre	60	
Zinssatz BVWP		1,70%	
Annuität Infrastruktur	Mio. €/a	80,15	
jährlicher Unterhalt Infrastruktur	Mio. €/a	30,00	
Rollmaterial	Annuität Rollmaterial	Mio. €/a	139,54
	Instandhaltung	Mio. €/a	27,90
	Energie	Mio. €/a	-185,90
weitere Betriebskosten	Personalkosten SV	Mio. €/a	0,00
	Vorhaltungskosten SGV	Mio. €/a	0,00
	Zugbereitstellungskosten SGV	Mio. €/a	0,00
	Zugbildungskosten SGV	Mio. €/a	0,00
	Traktionswechselkosten SGV	Mio. €/a	0,00
jährliche Vermeidungskosten	Mio. €/a	91,69	
Vermeidungskosten je Tonne CO₂	€/tCO₂	202,59	

Tabelle 151: Vermeidungskosten (€/tCO₂)

11 Verifizierung der betrieblich-technischen Machbarkeit

11.1 Untersuchungsziel

Die Machbarkeit einer hybridelektrischen Traktion im Regionalverkehr unter Nutzung netzseitiger Elektrifizierungsinselfen wird maßgeblich von der dafür genutzten Energiespeichertechnologie auf den Fahrzeugen und der darauf abgestimmten Nachladeinfrastruktur bestimmt. Hierbei geht es einerseits um die (dauerhafte) Gewährleistung der unterstellten Reichweite im batterieelektrischen Fahrzeugbetrieb und andererseits um das belastungsabhängige Lebensdauerverhalten der Batteriespeicher.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes der TU Dresden sollte mittels Simulation von Fahrzeugfahrdynamik, Nachladestrategie und Energiespeicherbelastung gezeigt werden, dass unter den trassierungsseitigen Voraussetzungen des deutschen Streckennetzes einerseits und den Eigenschaften der Hybridfahrzeugantriebe andererseits das Zielkonzept mit Elektrifizierungsinselfen machbar ist. Hierbei wurden neben den im Elektrifizierungsnetz verbleibenden 40-km-Lücken typische Randbedingungen wie Winterbetrieb mit Heizleistung, steigungsreiche Strecken und realistische Nachladezeiten unterstellt. Wesentliches Zielkriterium ist hierbei auch die Lebensdauer der Batteriespeicher, da diese die Wirtschaftlichkeit der Hybridkonzepte maßgeblich beeinflusst.

Für den Nachweis wurden vorhandene Simulationswerkzeuge der TU Dresden verwendet, die einerseits den Bahnbetrieb technisch und betrieblich exakt abbilden und andererseits die lebensdauerrelevante Batteriebeanspruchung ermitteln. Der Nachweis wurde am Beispiel zweier konkreter Strecken im Netz der DB AG mit zwei typischen Einsatzfällen (schneller Regio-Verkehr, Nahverkehr) geführt.

11.2 Einzelfälle

11.2.1 Beispielstrecken und Betriebsvarianten

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden für die Untersuchungen zwei Beispielstrecken ausgewählt, die das Spektrum der typischen betrieblichen Einsatzfälle vom schnellen Regional-Express (RE) bis zur langsameren Regionalbahn (RB) mit vielen Halten repräsentieren und für die an der TU Dresden alle relevanten Fahrzeug- und Betriebsdaten vorlagen. Dabei handelt es sich um folgende Szenarien:

- 1) **RE-Strecke Flachland**, schwerer RE-/ RB-Verkehr bis 160 km/h; Streckenlänge 84,2 km, davon 27,6 km elektrifiziert (Elektrifizierungslücke 56,6 km);
- 2) **RB-Strecke Mittelgebirge**, leichter RB-Verkehr, viele Halte, enge Bögen, kalte Winter; Streckenlänge 58,5 km, davon 12,6 km elektrifiziert (Elektrifizierungslücke 45,9 km);

Nachfolgend sind die Gradienten sowie die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten beider Beispielstrecken über dem jeweiligen Streckenverlauf einschließlich der Stationen dargestellt.

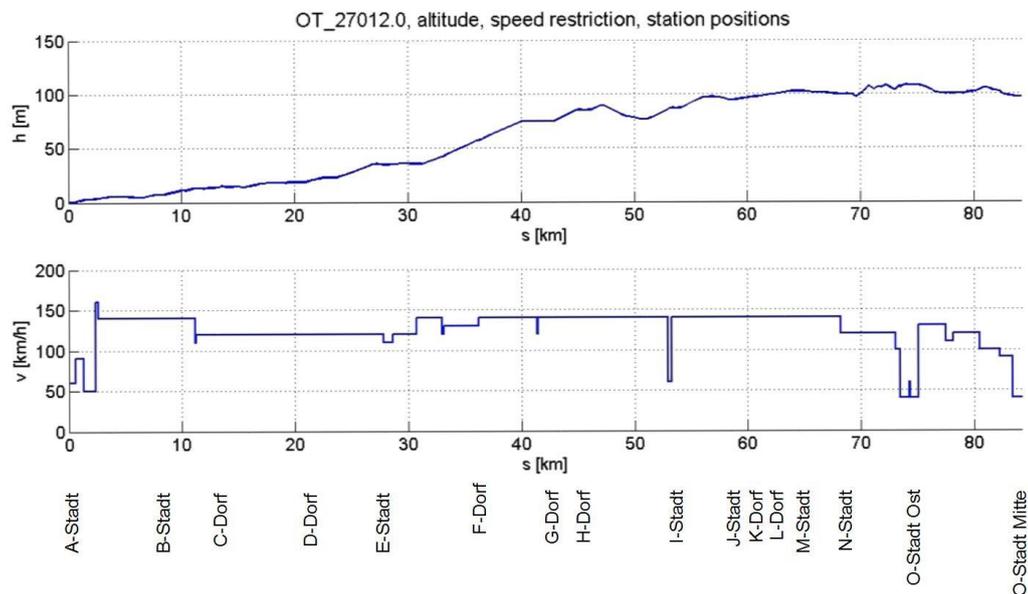


Abbildung 53: Höhen- und Geschwindigkeitsprofil der RE-Strecke Flachland

Die RE-Strecke im Flachland überwindet in Richtung des Zielbahnhofs O-Stadt Mitte einen Höhenunterschied von gut 100 m mit maximalen Längsneigungen von 1,2 %, wobei der überwiegende Anteil davon im Bereich des nichtelektrifizierten Abschnittes von D-Dorf bis I-Stadt liegt. Dort sind zudem Höchstgeschwindigkeiten bis 140 km/h mit mehreren Zwischenhalten zu fahren. Für die Batteriebeanspruchung wird dies somit der maßgebende Fall sein. Im anschließenden elektrifizierten Streckenabschnitt bis O-Stadt Mitte und wieder zurück bis I-Stadt können die Fahrzeugbatterien im Fahrbetrieb wieder geladen werden.

Die RB-Strecke im Mittelgebirge weist einen Höhenunterschied von ca. 300 m mit maximalen Längsneigungen von 1,7 % auf, allerdings sind hier aufgrund der engen Bögen und zahlreichen Halte nur Höchstgeschwindigkeiten zwischen 50 km/h und 80 km/h möglich. Daraus ist eine moderatere Traktionsbelastung der Batterien zu erwarten, allerdings wird hier aufgrund der längeren Fahrzeiten das Thema Hilfsbetriebs- und Komfortleistung für die Auslegung und Reichweite relevant.

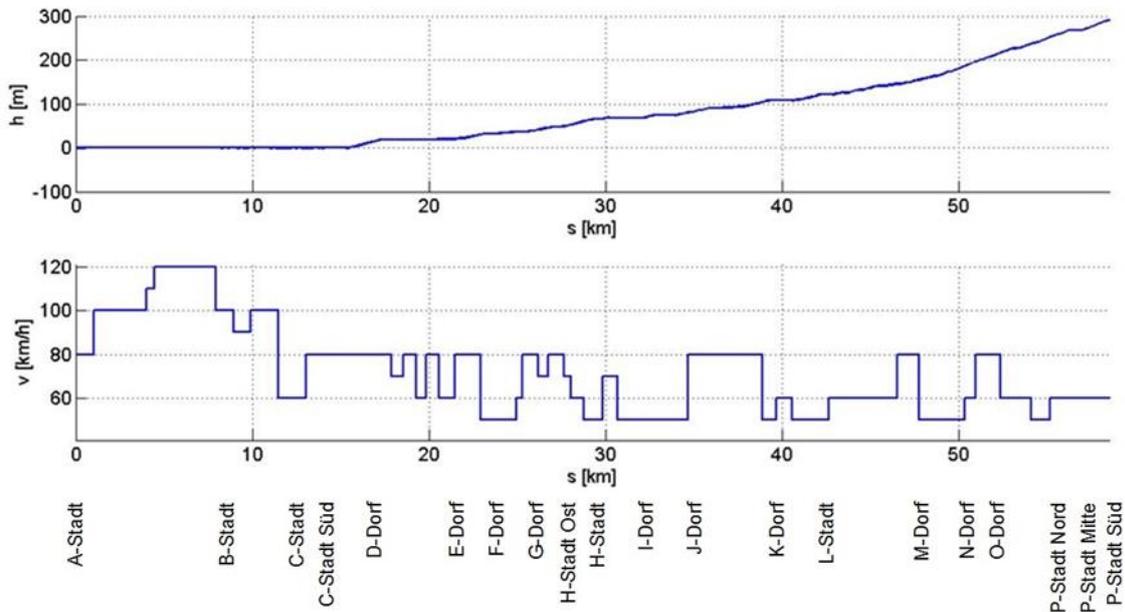


Abbildung 54: Höhen- und Geschwindigkeitsprofil der RB-Strecke Mittelgebirge

In beiden Fällen ist die Elektrifizierungslücke aktuell größer als 40 km, so dass im Sinne des Untersuchungsziels zusätzliche Ladeinfrastruktur vorgesehen werden muss. Für beide Strecken wurden deshalb alternative Nachladestrategien der Fahrzeugenergiespeicher sowohl mit zusätzlichen Elektrifizierungsabschnitten (Laden während der Fahrt) als auch mit stationären Ladestationen (Laden im Stillstand) untersucht.

Neben den Varianten der streckenseitigen Anlagen wurden gleichfalls verschiedene Fahrstrategien (zeitminimale Spitzfahrt, energieoptimale Fahrplanfahrt) sowie unterschiedliche Lade-/ Entladeraten für die Energiespeicher simulationstechnisch untersucht. Zudem wurden zwei Varianten der Energiespeicherdimensionierung auf den Fahrzeugen unterstellt.

Somit entsteht ein breites Variantenspektrum, das die Einschätzung der betrieblich-technischen Machbarkeit des untersuchten Teilelektrifizierungskonzeptes ermöglicht.

11.2.2 Fahrzeug- und Energiespeicherdaten

Für die Simulation des Fahrbetriebes wurde eine aktuelle Fahrzeugplattform (Talent 3 von Bombardier Transportation) unterstellt. Dabei handelt es sich um einen dreiteiligen Elektrotriebwagen für Oberleitungsbetrieb (EMU – Electric Multiple Unit), der zusätzlich mit Batteriespeichern (korrekt: Akkumulatoren) zur Überbrückung nichtelektrifizierter Streckenabschnitte ausgerüstet ist (BEMU). Ein derartiger Zug befindet sich aktuell in der Erprobungs- und Zulassungsphase. Gleichartige Fahrzeuge werden inzwischen auch von anderen Herstellern auf Basis ihrer jeweiligen EMU-Plattformen angeboten (z.B. von Alstom, Siemens, Stadler). Insofern sind die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der Fahrzeuge repräsentativ für den Sektor. Nachfolgende Tabelle 152 zeigt die wesentlichen Fahrzeugdaten für die vorliegende Untersuchung.

Fahrzeugparameter	Einheit	Wert	Bemerkung
Länge	<i>m</i>	56	
Masse (ohne Batterie)	<i>t</i>	114 / 140	leer / voll beladen
Anteil Adhäsionsmasse	-	52 %	
Rotationsmassenfaktor	-	1,07	Bezug: voll beladen
Höchstgeschwindigkeit	<i>km/h</i>	160 / 120	Oberleitung / Batterie
Maximale Beschleunigung	<i>m/s²</i>	1,1 / 0,9	Traktion / Bremsen
Zugkraft (Traktion)	<i>kN</i>	140	mechanisch am Rad
Zugkraft (Bremsen)	<i>kN</i>	110	mechanisch am Rad
Leistung (Traktion und Bremsen)	<i>kW</i>	2020	mechanisch am Rad
Hilfsbetriebe-/ Komfortleistung	<i>kW</i>	140	Dauerbetrieb
Wirkungsgrad Antrieb	-	0,875	konstant

Tabelle 152: Wesentliche Fahrzeug- und Antriebsdaten (BEMU)

Die Hilfsbetriebe- und Komfortleistung wurde gemäß Untersuchungsauftrag als dauerhaft hoch angesetzt, um mit Blick auf Reichweite und Batterielebensdauer ungünstige Randbedingungen zu unterstellen. Erfahrungsgemäß liegen die entsprechenden Dauerwerte im Bereich von 20 - 30 kW pro Wagen(teil), hier wird mit konstant knapp 50 kW pro Wagenteil gerechnet, um den Winterbetrieb mit hoher Heizleistung abzubilden.

Im Batteriebetrieb werden aus Gründen der Speicherleistung und der Reichweite die Antriebsleistung und die Höchstgeschwindigkeit des Zuges gegenüber dem Oberleitungsbetrieb reduziert. Abbildung 55 zeigt das zugehörige Traktionsdiagramm. Das Fahrzeug operiert im Batteriebetrieb im oberen Geschwindigkeitsbereich nur mit etwa halber Traktionsleistung.

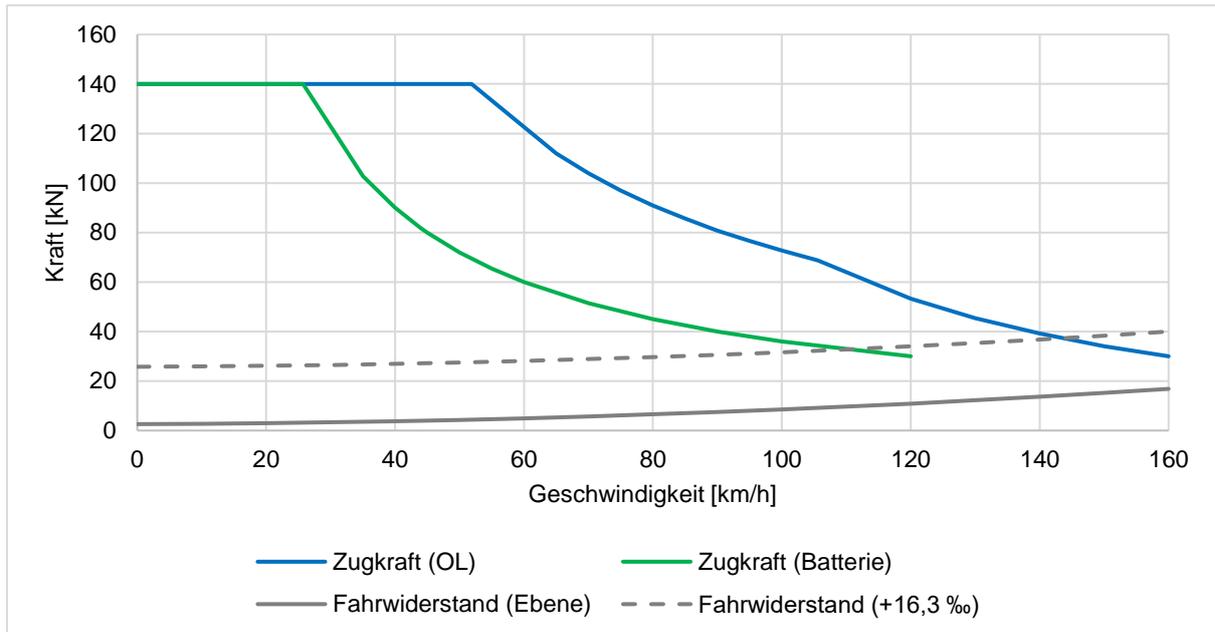


Abbildung 55: Traktionsdiagramm BEMU für Oberleitungs- und Batteriebetrieb

Für die Untersuchung sind darüber hinaus die Art, die Dimensionierung und die Betriebsweise der Batteriespeicher relevant, da diese die maximale Reichweite und die erreichbare Fahrzeit gleichermaßen beeinflussen.

Im vorliegenden Fall wurden Lithium-Ionen-Batterien sowohl mit der Zellchemie NMC/C als auch mit der Zellchemie NMC/LTO einbezogen, um auch hier die Bandbreite aktueller Lösungen abzubilden. NMC/C ist bezogen auf die gleiche Batteriemasse preiswerter, hat aber einen geringeren nutzbaren Energieinhalt.

Im aktuellen Prototyp des Talent 3 BEMU ist ein Batteriespeicher mit 300 kWh Energieinhalt installiert, dieser Wert wurde als Ausgangsbasis für die Untersuchungen verwendet. Nach Aussagen des Fahrzeugherstellers wäre damit allerdings keine dauerhafte Gewährleistung einer Einsatzreichweite von 40 km im Batteriebetrieb möglich. Aus diesem Grund wurde zusätzlich ein Batteriespeicher mit 600 kWh Energieinhalt untersucht, wodurch sich die Fahrzeugleermasse erhöht. Fahrzeugseitig ist dieser integrierbar.

Hinsichtlich der möglichen Lade- und Entladeleistungen der Batteriespeicher wurden verschiedene sogenannte „C-Raten“ untersucht, die das Verhältnis von Lade- bzw. Entladeleistung (in kW) zum Energieinhalt (in kWh) ausdrücken. Als Zielkriterien für die Untersuchung wurden hierbei die Parameter Gesamtfahrzeit (inkl. Haltezeit zum Nachladen im Stillstand), Batterielebensdauer (Erreichen von nur noch 80 % nutzbarem Speicherinhalt) und Energiebedarf berücksichtigt. Höhere C-Raten führen zu kürzeren Lade- und Entladezeiten, was sich positiv auf die Fahrzeit auswirkt. Allerdings nimmt mit höheren C-Raten die Batterielebensdauer ab, so dass hier ein klassischer Zielkonflikt besteht. Zusätzlich wird auch der Energiebedarf durch die C-Raten beeinflusst, da bei höheren C-Raten mehr Bremsenergie eingespeichert werden kann, was den Gesamtenergiebedarf senkt.

Da die Machbarkeit des 40-km-Ansatzes auch für Batterien am Ende ihrer Lebensdauer (also mit nur noch 80 % nutzbarem Energieinhalt) nachgewiesen werden sollte, wurden in allen Berechnungen die nutzbaren Energieinhalte einer gealterten Batterie unterstellt.

Tabelle 153 zeigt einige Daten zu den angesetzten Batterieparametern.

Batterieparameter	Einheit	300 kWh	600 kWh	Bemerkung
Masse	<i>t</i>	7,5	15	Batterie inkl. Kühlung und Steuerung
Max. Energieinhalt (Ende Lebensdauer)	<i>kWh</i>	240	480	80 % des Anfangswerts
Ladeleistung 1C	<i>kW</i>	300	600	
Ladeleistung 2C	<i>kW</i>	600	1200	
Ladeleistung 3C	<i>kW</i>	900	1800	
Ladeleistung 3,5C	<i>kW</i>	1050	2100	
Ladeleistung 4C	<i>kW</i>	1200	2400	
Ladeleistung 4,5C	<i>kW</i>	1350	2700	

Tabelle 153: Parameter zu den Fahrzeugbatterien (Beispiel NMC/LTO)

Als Grenzwert für die maximal zulässige Entladung wurde ein unterer Wert von 5 % SoC (State of Charge) angesetzt. Als Obergrenze für die Ladung wurde 90 % SoC unterstellt. Der SoC-Wert bezieht sich dabei auf den Nenn-Energieinhalt der Batterie.

11.2.3 Betriebsstrategien der Energiespeicher

Im Vorfeld der betrieblichen Simulationsrechnungen auf den untersuchten Strecken wurde des Weiteren überprüft, welche Ladezeiten sich bei verschiedenen Ladeleistungen und Energiespeichergrößen ergeben (Abbildung 56). Dies war beispielsweise für die Festlegung von Mindesthaltezeiten zur Nachladung in den Fahrplänen erforderlich. Zudem wurden die möglichen Nachladeenergien für zeitlich begrenzte Ladevorgänge in Abhängigkeit der C-Raten untersucht (Abbildung 57).

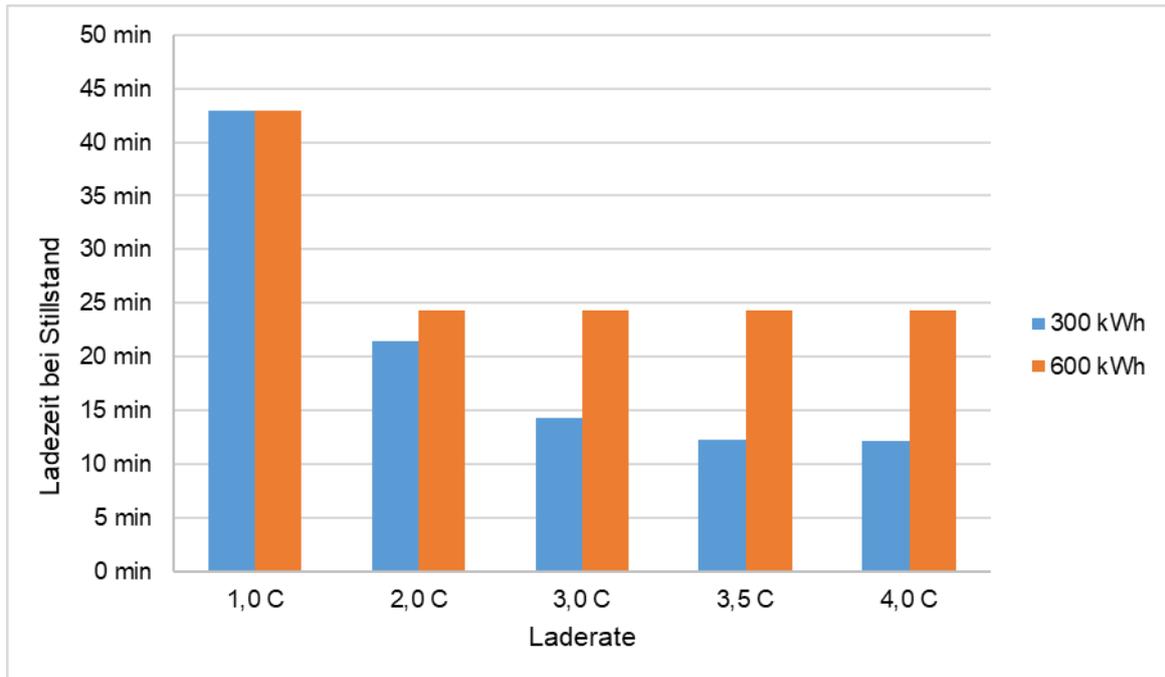


Abbildung 56: Laderaten und Ladezeiten für Nachladung von 5 auf 90 % SoC

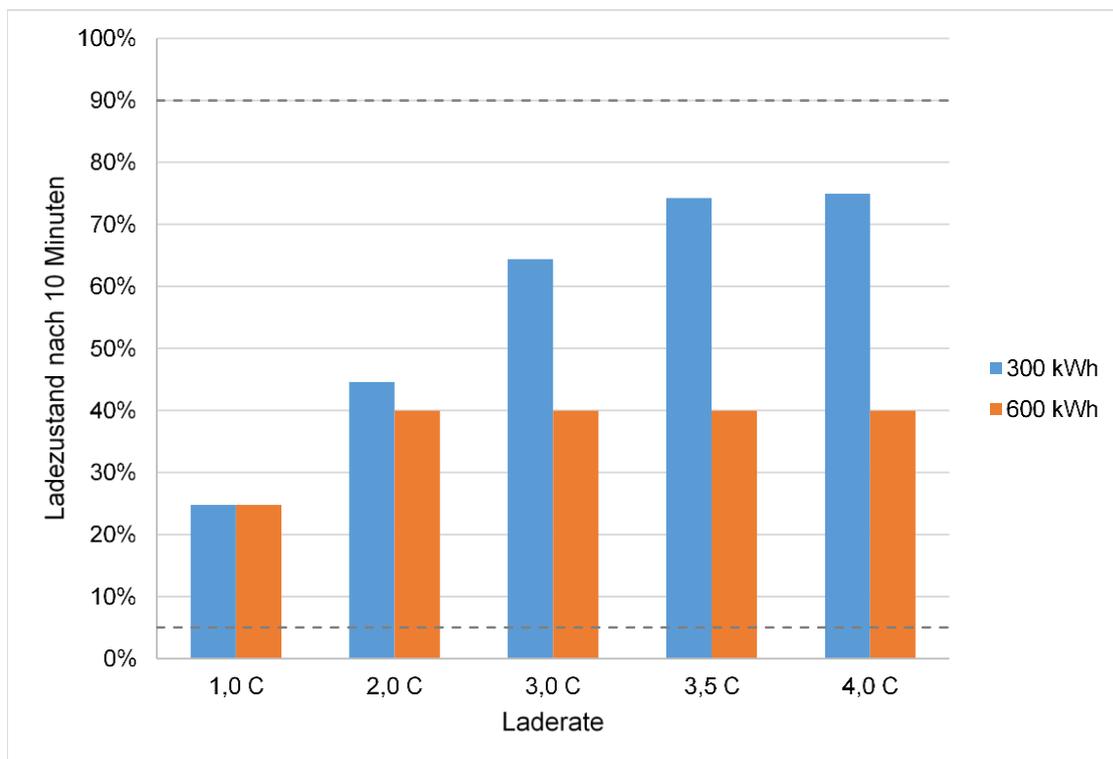


Abbildung 57: Laderaten und Ladezustände nach 10 min Ladezeit

Anhand der Darstellung von Zugkraftkennlinien in Abhängigkeit der Entladeleistung konnte schließlich abgeleitet werden, mit welchen C-Raten sich überhaupt sinnvolle Fahrzyklen realisieren lassen (Abbildung 58).

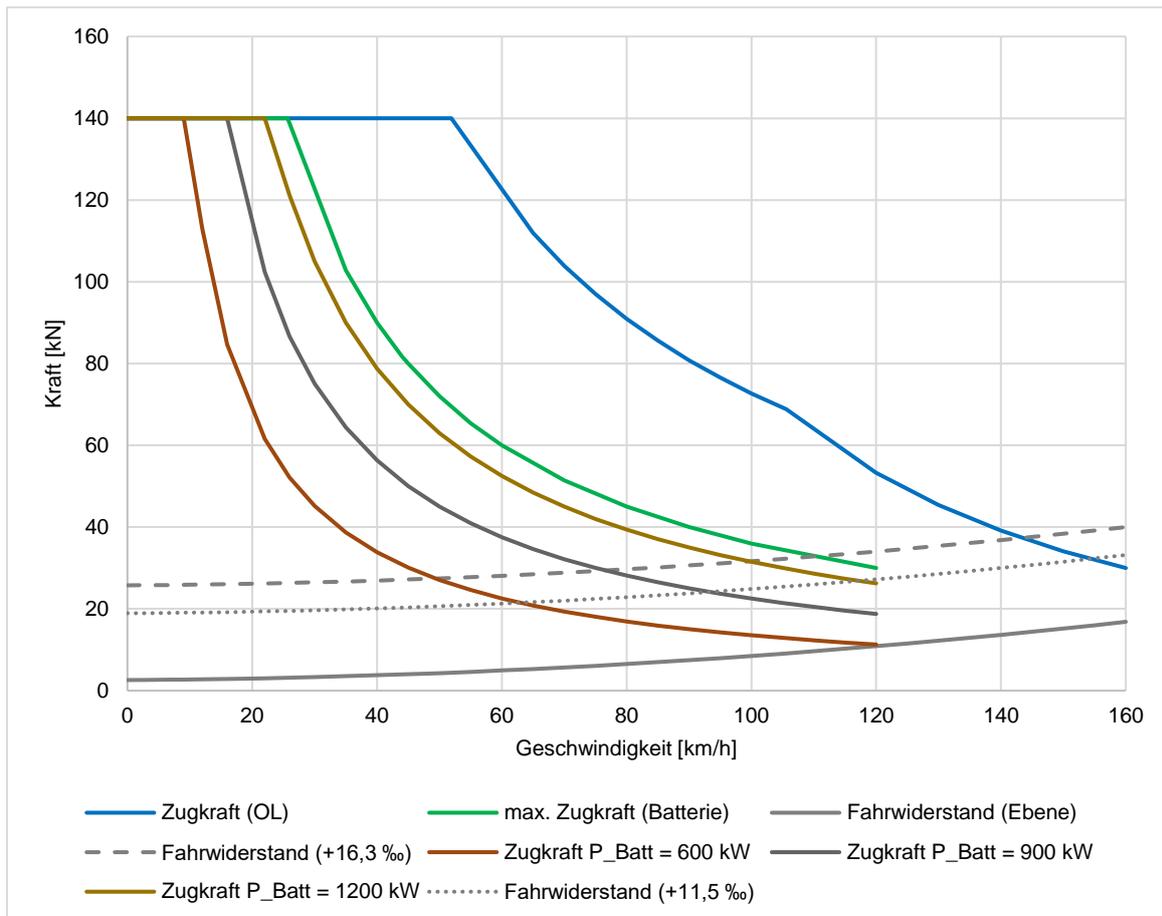


Abbildung 58: Auswirkung der C-Raten auf die Traktionsleistung

Im Zuge dieser Betrachtungen wurde festgestellt, dass für die betrieblich-technischen Simulationsrechnungen mit Laderaten von mindestens 2C für die 600-kWh-Batterie und 3C für die 300-kWh-Batterie gerechnet werden muss, um sinnvolle Fahrspiele und angemessene Fahrzeiten zu erreichen. Beim Entladen, welches für die Batterielebensdauer grundsätzlich weniger negative Auswirkungen hat, liegen die notwendigen C-Raten bei 3C bis 4C.

Schließlich wurde noch untersucht, welche Reichweiten sich bei den getroffenen Annahmen zu den Batterien ergeben würden, wenn aus der Literatur bekannte spezifische Energiebedarfswerte für den Fahrzeugbetrieb angesetzt werden. Diese liegen – je nach Einsatzfall und Randbedingungen – im Bereich zwischen 4 kWh/km und 8 kWh/km. Abbildung 59 zeigt dies für einen erweiterten Bereich von 4 ... 10 kWh/km. Im Ergebnis der späteren Simulationsrechnungen kann dann festgestellt werden, in welchem Bereich die untersuchten Strecken diesbezüglich liegen und ob sie tatsächlich hohe energetische Anforderungen an den Fahrbetrieb im Batteriemodus stellen.

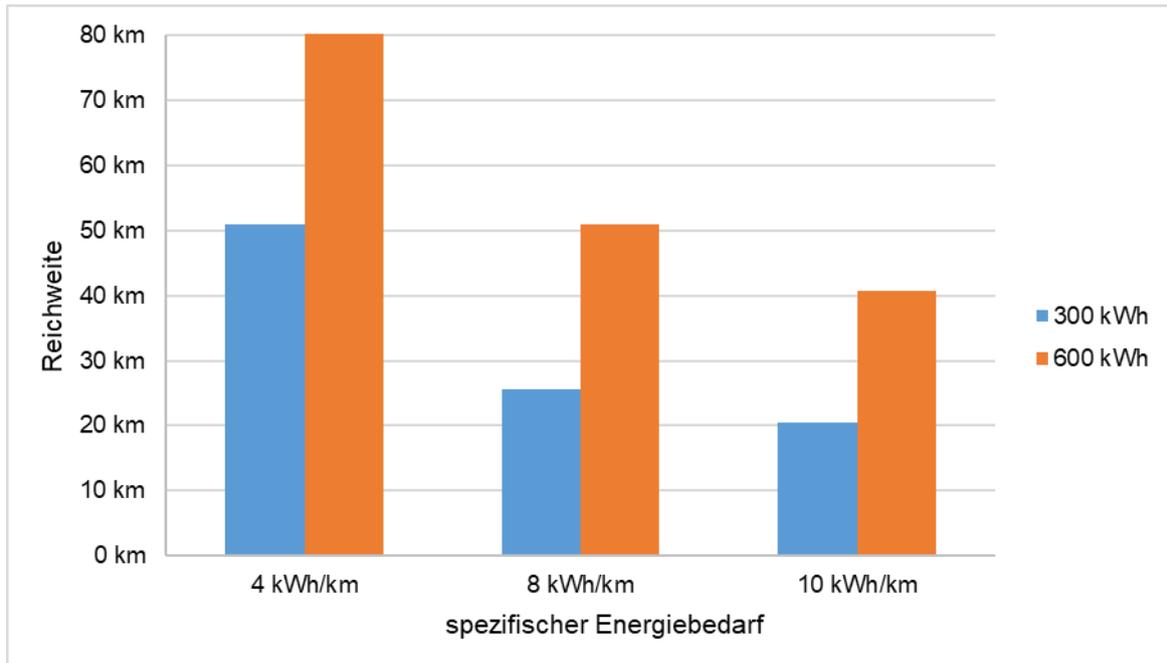


Abbildung 59: Reichweiten in Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs

Aus der Darstellung kann abgeleitet werden, dass eine verlässliche Reichweite von 40 km aktuell nur mit der 600-kWh-Batterie möglich sein wird. Die 300-kWh-Batterie schafft dies nur bei vergleichsweise „anspruchlosen“ Traktionsaufgaben, d.h. beispielsweise Flachland, mittlere Geschwindigkeiten oder geringe Heizleistung.

Im Ergebnis aller Voruntersuchungen zur Betriebsstrategie der Energiespeicher wurden die Betriebsszenarien für die nachfolgenden Simulationen wie folgt festgelegt:

- 300-kWh-Batterie mit großen C-Raten zum Zwischenladen (damit nur kurze Abschnitte ohne Nachladung möglich)
- 600-kWh-Batterie mit geringeren C-Raten (damit Überbrücken längerer Abschnitte ohne Oberleitung möglich)

11.2.4 Infrastrukturvarianten

Aus den Untersuchungen zu Batteriegrößen, C-Raten und Reichweiten wurden Prämissen für die Gestaltung der Nachlade-Infrastruktur abgeleitet. Diese wurden differenziert nach Strecken mit Berücksichtigung der Bestandselektrifizierung und Betriebsszenarien der Batterien modelliert.

Für die kleine Batterie (300 kWh) wurden mehrere kurze, nichtelektrifizierte Abschnitte mit zusätzlichen Ladestationen unterstellt, für die größere Batterie (600 kWh) ergaben sich längere nichtelektrifizierte Abschnitte ohne Ladestationen, dafür aber mit Zusatzelektrifizierung. Die so erarbeiteten Varianten stellen sich wie folgt dar:

RE-Strecke Flachland:

- 300-kWh-Batterie: Ladestationen in F-Dorf, D-Dorf, A-Stadt, maximal 20,7 km ohne Nachladung/ Oberleitung
- 600-kWh-Batterie: zusätzliche Elektrifizierung B-Stadt – A-Stadt, maximal 45,6 km ohne Oberleitung

RB-Strecke Mittelgebirge:

- 300-kWh-Batterie: Ladestationen in E-Dorf, I-Stadt, P-Stadt Süd, maximal 20,8 km ohne Nachladung/ Oberleitung
- 600-kWh-Batterie: zusätzliche Elektrifizierung O-Dorf – P-Stadt Süd, maximal 40,0 km ohne Oberleitung

Damit liegt aufbauend auf den Fahrzeug- und Batterieparametern ein passfähiges Infrastrukturkonzept für die Untersuchung vor.

11.3 Simulationsrechnungen

11.3.1 Werkzeuge und Funktionsprinzip

Die betrieblich-technischen Simulationsrechnungen wurden mit dem gekoppelten Simulationssystem OpenTrack / OpenPowerNet vom IFB – Institut für Bahntechnik GmbH durchgeführt. Der Bahnbetriebssimulator OpenTrack übernimmt dabei die Simulation des fahrplangesteuerten Zugfahrbetriebs auf einem Modell der Bahninfrastruktur mit zeitschrittweiser Nachbildung der mechanischen Fahrzeugbewegung. Parallel dazu berechnet der Antriebs- und Energienetzsimulator OpenPowerNet die Vorgänge im elektrischen Antriebsstrang des Fahrzeugs einschließlich Batteriespeicher sowie im elektrischen Versorgungsnetz (Oberleitung mit Unterwerken oder Ladestationen). Die Simulation ist rückwirkungsbehaftet, so dass elektrische Begrenzungen im Antriebsstrang (z.B. Batterieleistung) oder im Energieversorgungsnetz (z.B. Strombegrenzung) auf die mechanische Bewegungssimulation einwirken und diese gleichfalls begrenzen. So wird ein realistisches Abbild des Bahnbetriebs sowie der energetischen Vorgänge / Zustände in Fahrzeug und Netz erzeugt.

Dabei sind verschiedene Fahrstrategien (z.B. zeitminimale Fahrweise = Spitzfahrt, energieoptimale Fahrplanfahrt unter Nutzung des Zeitrückhalts) simulierbar.

Abbildung 60 zeigt eine Spitzfahrt für die RE-Strecke Flachland ohne Nutzung der fahrplanmäßigen Fahrzeitreserve (sogenanntes „Aufholprofil“), was für die Batteriebeanspruchung den Extremfall darstellt. Es gibt im Streckenverlauf nur wenige Geschwindigkeitswechsel, der mittlere Haltestellenabstand beträgt ca. 8 km. Die Höchstgeschwindigkeit liegt in den hier als elektrifiziert unterstellten Abschnitten bei maximal 140 km/h, im Batteriebetrieb wird generell nur bis 120 km/h gefahren.

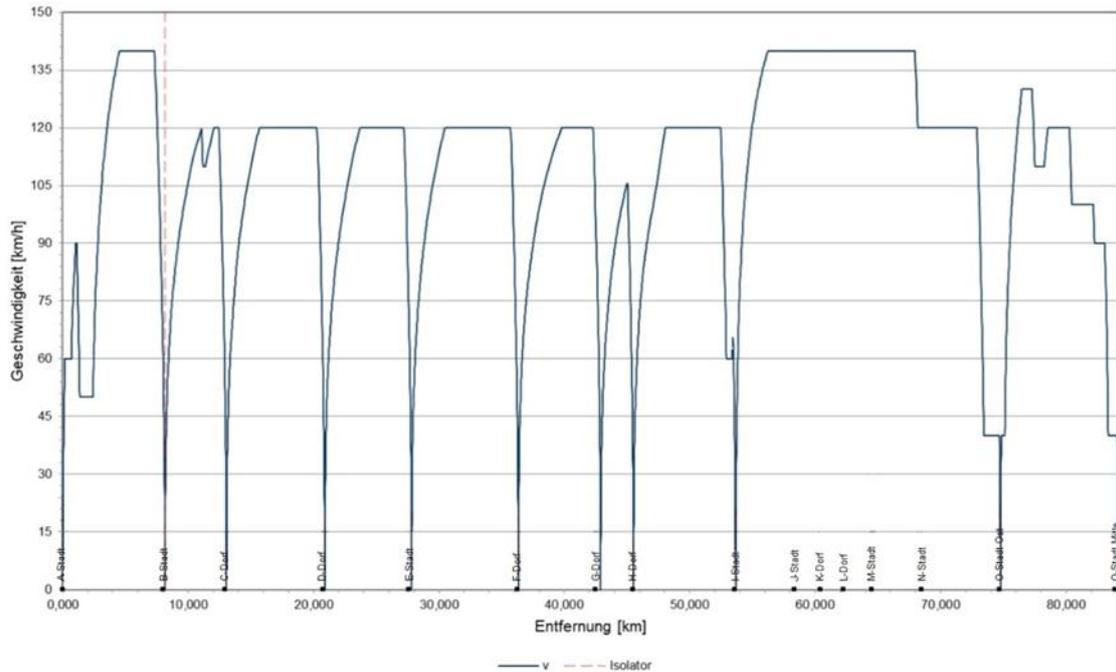


Abbildung 60: Fahrschaubild RE-Strecke Flachland, Spitzfahrt

In Abbildung 61 ist eine Fahrplanfahrt auf der RB-Strecke Mittelgebirge dargestellt. Es gibt zahlreiche Geschwindigkeitswechsel (d.h. häufiges Beschleunigen und Bremsen), der mittlere Haltstellenabstand beträgt knapp 3 km. Die Höchstgeschwindigkeit im Oberleitungsbetrieb liegt hier streckenseitig bei maximal 120 km/h, im Batteriebetrieb werden (selten) maximal 80 km/h erreicht.

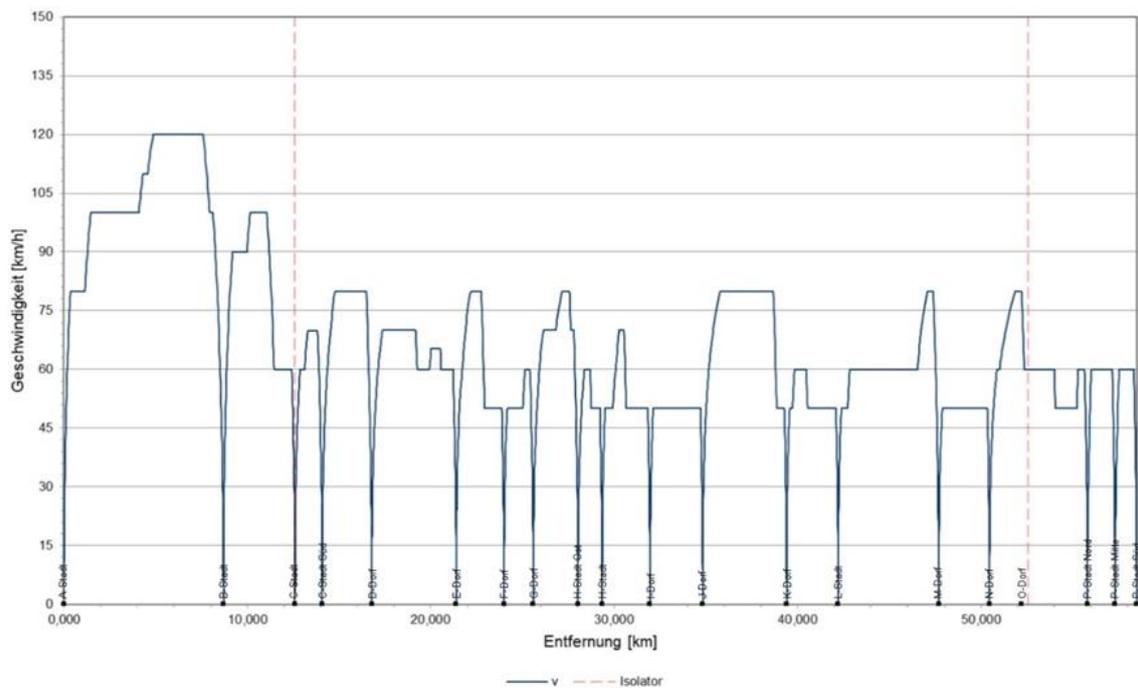


Abbildung 61: Fahrschaubild RB-Strecke Mittelgebirge, energieoptimal

Fahrzeugintern wird die umgesetzte elektrische Leistung berechnet, wobei unterschieden wird, ob diese aus der Oberleitung, einem stationären Nachladepunkt oder der Batterie entnommen bzw. in diese zurückgespeist wird. Abbildung 62 zeigt beispielhaft einen solchen Leistungsgang bei Spitzfahrt mit 600-kWh-Batterie und definierten Lade-/ Entladeraten.

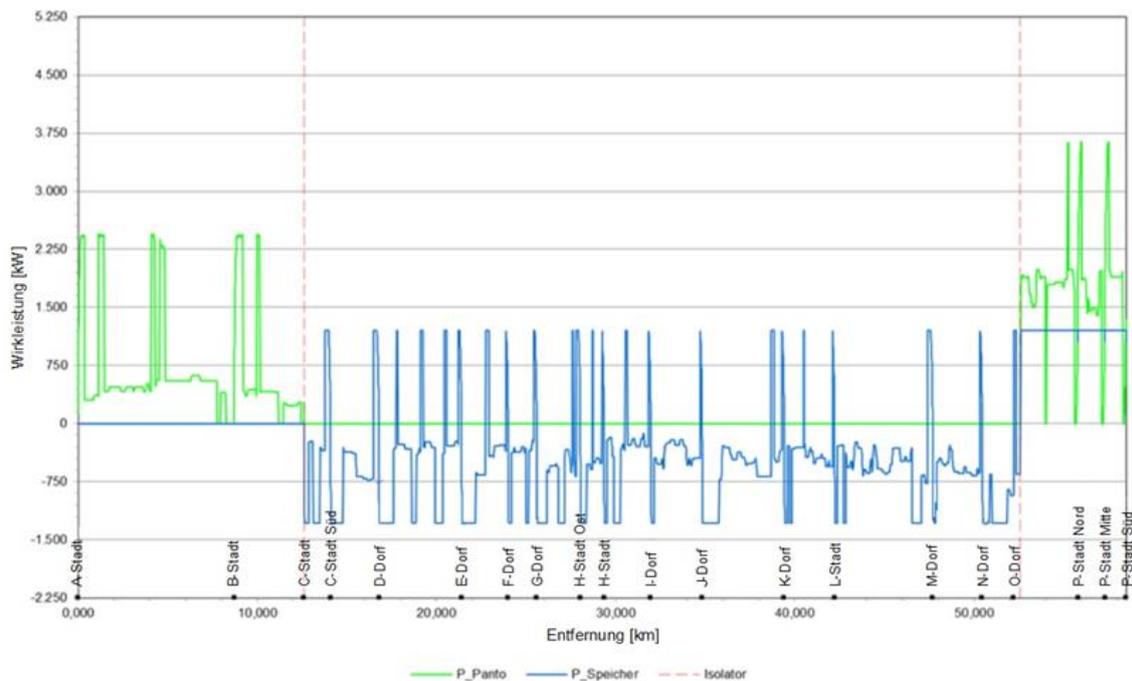


Abbildung 62: Elektrische Fahrzeugleistung RB-Strecke Mittelgebirge, Spitzfahrt mit 2C/3C

Hierbei sind die kurzzeitigen Ladevorgänge bei Bremsvorgängen mit Rückspeisung in die Batterie zu erkennen. Anschließend folgen meist längere Entladevorgänge beim Beschleunigen.

Schließlich wird aus den elektrischen Leistungsverläufen und den in der Simulation hinterlegten Batteriemodellen der Ladezustand (SoC) der Batterien zu jedem Zeitpunkt berechnet. Abbildung 63 zeigt beispielhaft einen SoC-Verlauf der 600 kWh-Batterie für die RE-Strecke Flachland bei unterstellter Zusatzelektrifizierung zwischen A-Stadt und B-Stadt. Der nichtelektrifizierte Streckenabschnitt im Batteriebetrieb ist hier ca. 46 km lang, die Batterie wird nahezu kontinuierlich entladen. Lediglich kurze Zwischenladungen treten während der Bremsvorgänge auf, die aber energetisch kaum ins Gewicht fallen. Dies liegt vorrangig an den begrenzten C-Raten. Die relativ hoch angesetzte Hilfsbetriebe- und Komfortleistung trägt ebenfalls dazu bei.

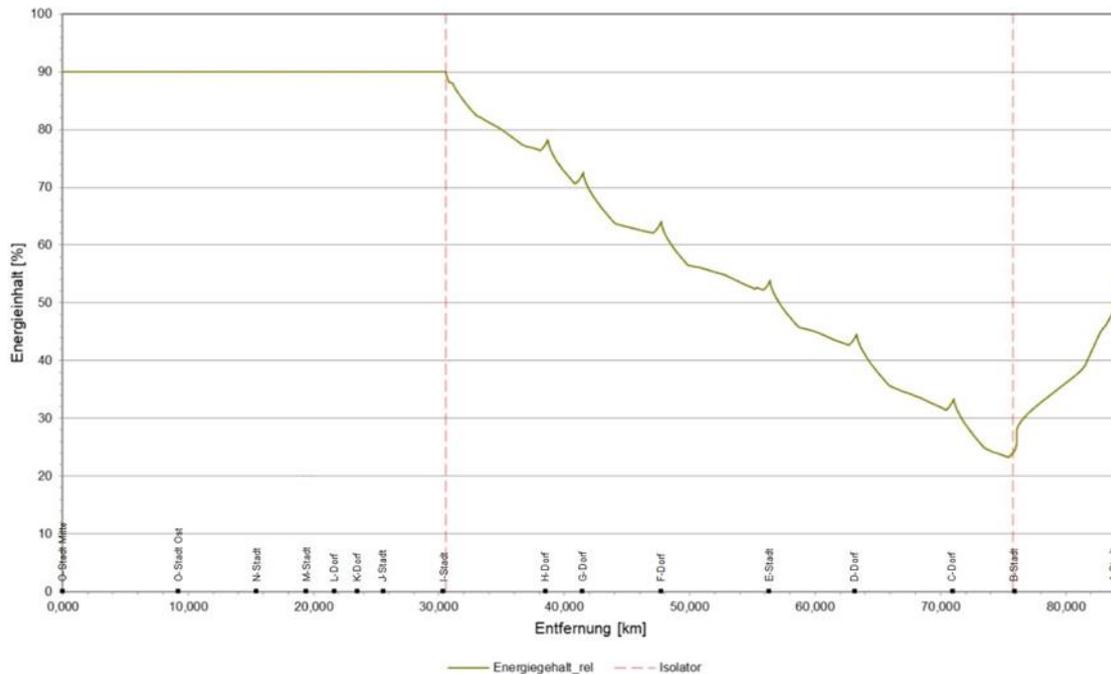


Abbildung 63: Batterieladezustand SoC RE-Strecke Flachland, Spitzfahrt mit 2C / 3C

11.3.2 Ergebnisse der Simulationen

Für alle Varianten des Fahrzeugbetriebs und der Infrastruktur liegen im Einzelnen folgende Ergebnisse vor:

- Fahrprofile (Geschwindigkeit über Weg und Zeit) und Fahrzeiten
- Leistungsverläufe (über Weg und Zeit)
- Ladezustände (SoC) der Batterien (über Weg und Zeit)
- Energiebedarfswerte der Fahrzeuge (absolut und spezifisch)

Beispielhaft zeigt Abbildung 64 einige dieser Werte für die RB-Strecke Mittelgebirge. Hierbei fällt auf, dass nur mit der 600-kWh-Batterie akzeptable Fahrzeiten erreicht werden, da für die kleinere 300-kWh-Batterie im Streckenverlauf häufigere und damit längere Nachladephasen im Stand erforderlich wurden. Scheinbar überraschend ist dabei, dass der spezifische Energiebedarf mit den längeren Fahrzeiten ansteigt. Dies liegt jedoch allein an der hohen Hilfsbetriebe- und Komfortleistung, die trotz annähernd gleicher umgesetzter Traktionsleistung auf der Strecke über eine längere Fahrzeit anliegt und somit den spezifischen Wert nach oben treibt.

Die im besten Fall erreichbaren spezifischen Energiewerte liegen hier knapp oberhalb von 10 kWh pro Kilometer. Dies ist in Anbetracht der eher moderaten Traktionsanforderungen auf der Strecke ein sehr hoher Gesamtwert, der aufgrund der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit stark von der hohen Komfortleistung geprägt wird. Der Anwendungsfall liegt somit tatsächlich im oberen Bereich der aus der Literatur bekannten spezifischen Werte, was seine Auswahl für diese Untersuchung rechtfertigt.

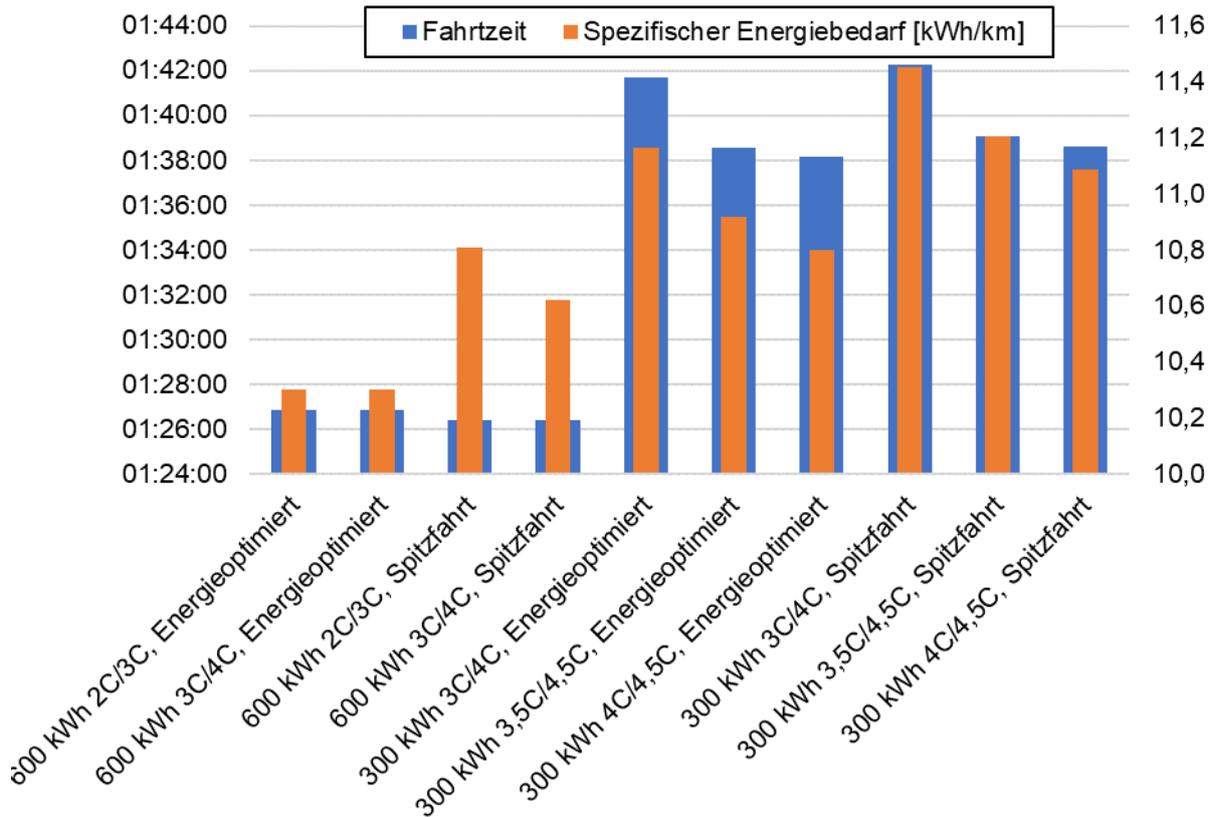


Abbildung 64: Fahrzeiten und spez. Energiebedarfswerte RB-Strecke Mittelgebirge

Im Gegensatz dazu sind die spezifischen Energiewerte auf der RE-Strecke Flachland (Abbildung 65) etwas geringer und liegen zwischen 7 und 8 kWh pro Kilometer. Hier wirken sich sowohl die kürzeren Fahrzeiten (d.h. anteilig weniger Komfortenergie) und die höheren Rückspeisegrade bei Bremsung aus höheren Fahrgeschwindigkeiten positiv aus. Insgesamt sind aber die gleichen Effekte wie auf der anderen Strecke feststellbar: mit der kleineren 300-kWh-Batterie sind keine akzeptablen Fahrzeiten erreichbar und der spezifische Energiebedarf steigt damit fahrzeitproportional sogar noch an.

Auch diese Strecke liegt mit ihrem spezifischen Energiebedarf am oberen Rand der aus der Literatur bekannten Werte. Damit entspricht auch diese Strecke dem Untersuchungsauftrag.

Durch die Voruntersuchungen wurden die Parameter für Laderaten, Batteriegröße und Positionierung der Nachladeinfrastruktur so gewählt, dass mit den Simulationen der Nachweis der Machbarkeit des unterstellten Konzeptes erbracht werden konnte.

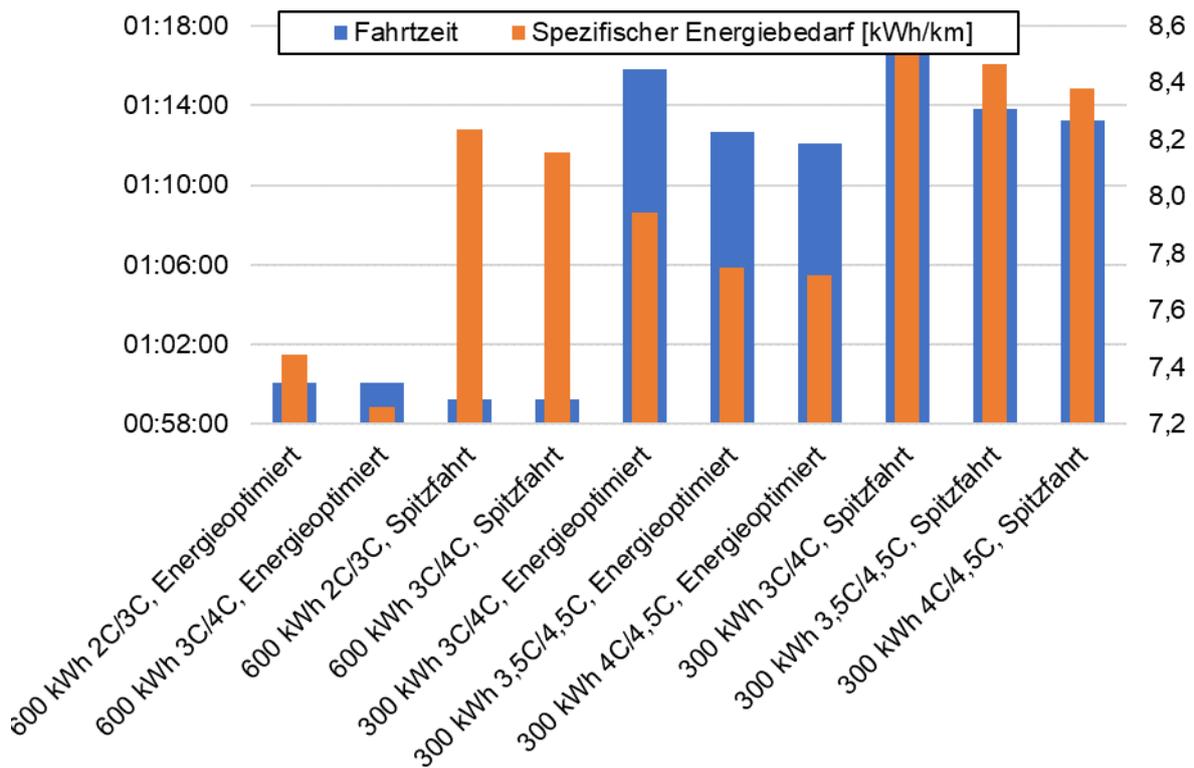


Abbildung 65: Fahrzeiten und spez. Energiebedarfswerte RE-Strecke Flachland

11.4 Ergebnisse

Die Untersuchungen zur betrieblich-technischen Machbarkeit auf Basis von Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass bereits mit heute verfügbaren Fahrzeug-, Batterie und Infrastrukturtechnologien ein teilelektrifizierter Bahnbetrieb mit Oberleitungs-Hybridtriebwagen stabil möglich sein sollte. Die dabei unterstellten nichtelektrifizierten „Lücken“ von ca. 40 km sind ein realistischer Wert. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Zusammentreffen ungünstiger Randbedingungen wie

- anspruchsvoller Streckencharakter (Steigungen, Höchstgeschwindigkeiten),
- hohe Komfortleistung (Winterbetrieb mit maximaler Heizung),
- Aufholen von Verspätungen (Spitzfahrt) und
- fortgeschrittene Batterialterung

unterstellt wird. Davon ist im Regelbetrieb derartiger Fahrzeuge grundsätzlich auszugehen bzw. die Fahrzeuge und ihre Infrastruktur sind mit Blick auf eine hohe Betriebsstabilität dafür auszulegen. Höhere Reichweiten sind zwar durchaus möglich, aber eben nicht immer, überall und dauerhaft.

Aus den Simulationen konnten im Einzelnen folgende konkrete Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die technische Vorzugslösung für einen stabilen, energieeffizienten Betrieb eines 3-teiligen Oberleitungs-/ Batterietriebzuges auf anspruchsvollen Strecken mit nicht-elektrifizierten Streckenabschnitten bis zu 40 km benötigt eine 600-kWh-Batterie in NMC/LTO-Technologie mit 3C-Laderate und 4C-Entladerate. Damit ergibt sich ein Optimum aus Fahrzeit und Energiebedarf. Die Installation einer solchen Batterie auf dem Fahrzeug ist mit heutigen Technologien möglich.
- Die Verwendung einer anderen Zellchemie (NMC/C) benötigt für einen stabilen Betrieb eine größere Batterie (750 bis 850 kWh).
- Bei typischer Fahrplanfahrt mit Nutzung des Zeitrückhalts und bei geringeren Hilfsbetriebe- und Komfortleistungen reduziert sich die Batteriebeanspruchung deutlich, gleichsam steigt die Reichweite. Allerdings stellen diese Randbedingungen nicht den Auslegungsfall für einen stabilen Betrieb dar.
- Die untersuchten realitätsnahen Streckenszenarien haben Beispielcharakter für typische Anwendungsfälle in Deutschland. Die mittels Fahrbetriebs- und Antriebssimulation berechneten Energiebedarfswerte für anspruchsvolle Randbedingungen liegen deutlich oberhalb der in der Literatur (und von den Herstellern) angegebenen Mittelwerte.

Insgesamt ist festzustellen, dass das für die gesamte Untersuchung angenommene 40-km-Lücken-Netz auch aus bahntechnischer Sicht eine verlässliche Grundlage für die Kosten- und Nutzenermittlung der Teilelektrifizierung darstellt.

12 Fazit

Die weitere Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes wird allgemein und besonders im Hinblick auf die Einhaltung der Klimaschutzziele als notwendiger Entwicklungsschritt für den Verkehrsträger Schiene angesehen. Dabei sind zwar aktuell nur gut 60 Prozent der Länge des Schienennetzes elektrifiziert, dennoch werden bereits ungefähr 90 Prozent der Traktionsleistung elektrisch erbracht. Was lässt sich also erreichen, wenn auch die verbleibenden 10 Prozent der Traktionsleistung nicht mehr im Dieselbetrieb erbracht werden müssen und wie hoch ist der Aufwand dafür?

Ganz offensichtlich vermeidet der elektrische Betrieb die Schadstoffemissionen des Dieselbetriebs und auch die der Raffinierung des Dieselmotorkraftstoffs. Die Schadstoffemissionen der Verstromung beim gegebenen europäischen Bahnstrommix sind dem prinzipiell gegenzurechnen, in der Bilanzierung z.B. für den Klimaschutzplan werden diese Schadstoffemissionen jedoch dem Energiesektor zugerechnet. Der vorliegende Bericht rapportiert die Emissionen der Energiebereitstellung trotzdem.

Darüber hinaus gibt es betriebliche Vorteile: elektrische Lokomotiven oder allgemeiner Triebfahrzeuge bedürfen einer geringeren Wartung als Dieseltriebfahrzeuge, haben entsprechende höhere Einsatzzeiten und bieten die Möglichkeit zur Vorhaltung kleinerer Flotten respektive einer höheren Anzahl von Reservefahrzeugen. Ferner entfallen bei einer Komplettelektrifizierung sämtliche Umspannvorgänge, bzw., wo diese bereits jetzt betrieblich vermieden werden, entfällt die entsprechende Dieseltraktion unter Fahrdracht. Inwieweit diese Vereinfachungen des Bahnbetriebs zu zusätzlichen Kapazitäten im Netz, zu verbesserten Angeboten und damit mehr Nachfrage im Personen- wie im Güterverkehr führen, war nicht Gegenstand dieser Untersuchung, ist aber sicher eine weitergehende Abklärung wert.

Die vorliegende Studie zeigt, dass eine Komplettelektrifizierung des bereits gegenüber heute weitergehend elektrifizierten Zielnetzes des BVWP 2030 Investitionen von über 21 Milliarden Euro erfordert, damit aber natürlich die Null-Emissionen des Fahrbetriebs ermöglicht. Sofern der Strom aus regenerativen Energieträgern erzeugt wird, entspricht dies einer Einsparung von 1,3 Mt CO₂ pro Jahr. Unterstellt man einen Strommix mit hohem, aber nicht ausschließlichem Anteil an regenerativen Energieträgern, wie er generell in der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie verwendet wird, so ergeben sich 192 gCO₂/kWh bzw. bei der Komplettelektrifizierung ca. 0,3 Mt CO₂ bei der Energiebereitstellung, die prinzipiell gegenzurechnen sind.

Verrechnungen von Investitions- und Unterhaltskosten der Infrastruktur, des Rollmaterials und der sonstigen Betriebskosten zeigen, dass hier trotz der Langlebigkeit der erstellten Infrastruktur Vermeidungskosten von ca. 321 € pro eingesparter Tonne CO₂ – bei Anrechnung der CO₂-Emissionen der Energiebereitstellung - erforderlich sind. Dabei ist, wie be-

reits erwähnt, zu überprüfen, ob durch betriebliche Verbesserungen bedingte Verlagerungen von der Straße dort noch weitere Einsparungen des Ausstoßes von Kohlendioxid ermöglichen.

Vor diesem Hintergrund lohnt es sich zu schauen, welche Alternativen es zu dem Ansatz der Komplettelektrifizierung gibt. Die vorliegende Studie hat daher in einem „Hybridisierungs-Szenario“ untersucht, welche Teilstrecken durch Hybridfahrzeuge ohne Elektrifizierung überbrückt werden können. Hierbei ist zunächst zwischen Personen- und Güterverkehr zu unterscheiden. Für die großen Massen, die im Güterverkehr zu transportieren sind, stehen derzeit keine batterie-elektrischen Lokomotiven zur Verfügung. Eine Hybridisierung im Güterverkehr meint also diesel-elektrische Zugmaschinen, die sicher Traktionswechsel ersparen, auf nicht-elektrifizierten Strecken jedoch emissionsseitig keine Vorteile bieten.

Ganz anders im Personenverkehr, wo batterie-elektrische Triebfahrzeuge gesichert Strecken bis 40 km ohne Elektrifizierung, sogenannte Elektrifizierunginseln, überbrücken und die Batterien an Bahnhöfen oder bei der Fahrt unter Fahrdrabt sowie durch Rekuperation nachladen können (vgl. Detailuntersuchungen und Simulationen in Kapitel 11). Verschiedene Hersteller weisen darauf hin, dass sie auch Strecken bis zu 80 km überbrücken können. Das ist sicher immer wieder richtig, aber nicht in 100 Prozent aller Fälle und nicht bei jedem Wetter oder jeder Topografie garantiert. Die Studie bleibt hier also auf der sicheren Seite, insbesondere auch, weil Ladezustände zwischen 30 und 70 Prozent die Lebensdauer einer Batterie wesentlich erhöhen, bei der genannten Überbrückungslänge auch eingehalten werden können sowie zusätzlich die Lebensdauer der Batterien mit den generellen Wartungsintervallen der Hybridtriebfahrzeuge harmonisieren.

Das Hybridisierungs-Szenario soll in einer überschlägigen Weise die generellen Wirkweisen einer Teilelektrifizierung unter Ausnutzung von Elektrifizierunginseln und bei Einsatz von hybriden Triebfahrzeugen aufzeigen. Daher wurde das gesamte Referenznetz „Bezugsfall Knoten 2030“ des BVWP einer generischen, automatisierten Anpassung auf Basis folgender Kriterien unterzogen:

- Strecken bis 40 km Länge werden im Personenverkehr hybrid überbrückt.
- Strecken, die im Personenverkehr zentrale Orte mit Dieselbetrieb verbinden, werden elektrifiziert.
- Strecken im Personenverkehr mit einer Fahrtgeschwindigkeit von mindestens 160 km/h werden elektrifiziert.
- Strecken mit acht und mehr Güterzügen am Tag werden elektrifiziert: dieses Kriterium hat Priorität gegenüber den oben genannten.

Es zeigt sich, dass in diesem Szenario nur knapp die Hälfte der CO₂-Emissionen der Komplettelektrifizierung eingespart werden kann, nämlich 0,45 Mt bei Anrechnung des Kohlendioxidausstoßes der Energiebereitstellung, dies jedoch bei nur ca. 3 Mrd. € bzw. 14 % der

Infrastrukturkosten, wie sie für eine Komplettelektrifizierung notwendig sind. Unter Berücksichtigung des Trade off zwischen weniger Infrastrukturkosten und Mehrkosten beim Rollmaterial durch teure Hybridfahrzeuge ergeben sich nun Vermeidungskosten von ca. 203 € pro eingesparter Tonne CO₂. Dies entspricht einem Rückgang der spezifischen Vermeidungskosten gegenüber der Komplettelektrifizierung um 36,5%.

Das Kriterium zur Elektrifizierung auf Strecken mit Güterverkehr mit einer Mindestanforderung von acht Zügen am Querschnitt führt zu einer zusätzlichen Elektrifizierung von nur ca. 300 km Strecke ggü. dem Referenznetz „Bezugsfall Knoten 2030“ des BVWP oder umgerechnet zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes von ca. 30 kt. Da mit dem vorgestellten Szenarienansatz der Personenverkehr fast vollständig elektrisch oder batterie-elektrisch betrieben werden kann, sind die noch zu hebenden Potentiale zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes der Schiene im Güterverkehr zu suchen, wenn Strecken mit auch geringem Güterverkehrsaufkommen elektrifiziert werden.

Es ist davon auszugehen, dass ein mittleres Szenario mit einem Investitionsvolumen zwischen vier und acht Milliarden zum Tragen kommen wird, das eine weitergehende, wirtschaftlich vertretbare Elektrifizierung der noch verbleibenden Güterverkehrsstrecken unter Dieselbetrieb ermöglicht. Hierbei werden die Vermeidungskosten pro eingesparter Tonne CO₂ sukzessive im Sinne von Grenzkosten steigen, von den 203 €/tCO₂ des Hybridisierungs-Szenarios ausgehend aber niemals die 321 €/tCO₂ der Komplettelektrifizierung erreichen, da durch die Ausnutzung von Elektrifizierungseinseln und hybriden Triebfahrzeugen bei Weitem nicht mehr alle Strecken des Personenverkehrs elektrifiziert werden müssen. Da die im mittleren Szenario tatsächlich notwendige Elektrifizierung sich im 70%-Korridor der aktuellen Planungen der Bundesregierung bewegt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Finanzierung und Umsetzung bis 2030 sichergestellt werden kann. Positiv ist dabei zu beachten, dass die Mehraufwendungen für die (noch) teuren hybriden Triebfahrzeuge durch die Einsparungen im Energiebereich aufgefangen werden können.

Das Hybridisierungs-Szenario macht deutlich, wie die Wirtschaftlichkeit der weitergehenden Elektrifizierung des deutschen Schienennetzes durch Teilelektrifizierungen und den Einsatz von hybriden Triebfahrzeugen gesteigert werden kann. Mit diesem generischen Ansatz ist jedoch in keiner Weise festgelegt, wie eine Teilelektrifizierung des deutschen Schienennetzes im Detail aussehen wird oder aussehen sollte und welche alternativen Antriebe dabei letztlich zum Einsatz kommen.

Gemäß den Beschlüssen des Klimapakets stehen auch durch Regionalisierungsmittel und GVFG-Förderung mit erhöhten Fördersätzen erweiterte Budgets für die Elektrifizierung des Schienennetzes zur Verfügung. Das mit dieser Studie vorgelegte Berechnungsverfahren auf Basis der BVWP-Methodik ist in der Lage, Aufwände und Wirkungen möglicher Elektrifizierungskonzepte, auch korridorweise, zu quantifizieren und grafisch darzustellen.

13 Literaturverzeichnis

- [1] Dahl, A.; Burg, R.: Schlussbericht Kurzstudie „Ausbau der Elektrifizierung auf Hauptstrecken des Schienengüterverkehrs“, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, 2017.
- [2] H. m. e. & N. E. E. e. V., „Wettbewerber-Report Eisenbahn 2015/2016“, 2015.
- [3] D. M. L. A. Deutsche Bahn AG, „Deutsche Bahn - DB Mobility Logistics – Daten & Fakten 2011“, Berlin, 2012.
- [4] Dahl, A.; Kindl, A.; Walther, C.; Paufler-Mann, D.; Roos, A.; Waßmuth, V.; Weinstock, F.; Röhling, W.; Mann, H.-U. (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, Schlussbericht zum FE 97.358/2015, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München.
- [5] PTV: „Datengrundlage: Streckennetz und Anzahl der Züge zwischen den Knoten“.
- [6] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2010“, Köln, 2011.
- [7] „Verkehr in Berlin: Ausgabe 70-2008-09-18“.
- [8] „Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2011“, Elektrische Bahnen, 2011 Heft 1-2.
- [9] Eisenbahn-Kurier-Aspekte 30, DB-Triebfahrzeuge 2010, Freiburg, 2010.
- [10] F.-I. f. S.-. u. Innovationsforschung, „Daten und Fakten zum Energieverbrauch des Schienenverkehrs“, 2011. [Online]. Available: <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342234/?print>. [Zugriff am 07 2017].
- [11] B. d. A. d. SPNV, Persönliche Auskunft aus einer Erhebung für das Jahr 2016.
- [12] M. Leenen, A. Wolf, L. Neumann und A. Herbermann, „Fahrzeugfinanzierung in SPNV - Bewertung der Chancen und Risiken verschiedener Finanzierungslösungen aus Sicht von Aufgabenträgern, Verkehrsunternehmen und Finanzierungsanbieter im Auftrag der DB Regio AG“, SCI Verkehr GmbH, Köln, 2012.
- [13] B. f. V. u. d. Infrastruktur, „Verkehr in Zahlen 2014/2015“, DVV Media Group GmbH, Hamburg, 2014.
- [14] U. B. Siegfried Großmann, „Bahnenergiemessung und -rückspeisung bei den DB-Verkehrsunternehmen“, Elektrische Bahnen, 2014 Heft 4.
- [15] L. u. G. Sachsen Landesamt für Umwelt, „Emission des Schienenverkehrs in Sachsen“, Bd. Heft 2/2012, 2012.
- [16] V. D. Verkehrsunternehmen, „VDV-Statistik 2006“, 2007.
- [17] Behmann, „Traktionsenergiebilanz mit Energierückspeisung im DB-Netz im Jahr 2014“. Elektrische Bahnen 2015 Heft 10.
- [18] M. Grams, „Masterarbeit: "Technische und wirtschaftliche Analyse weiterer Energieeinsparpotenziale bei Elektrotraktionen am Beispiel DB Regio Nordost", 2016.
- [19] Statistisches Bundesamt: „Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2000 bis Juni 2017“, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017.
- [20] Bundesnetzagentur, „Tätigkeitsbericht Eisenbahnen 2013“, Bonn, 2014.

- [21] „Wie die Deutsche Bahn Wettbewerber beim Bahnstrom diskriminiert!“, mofair e.V., Netzwerk Privatbahnen-Vereinigung Europäischer Eisenbahngüterverkehrsunternehmen e.V., 2010.
- [22] Bundesministerium für Verkehr, „Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung“, 19. März 2014.
- [23] „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.
- [24] Bericht des Rechnungshofes, „Triebfahrzeugdisposition und Triebfahrzeugbeschaffungen“, 2015.
- [25] J. Hoinkis, Chemie für Ingenieure, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [26] J. Rowas, „Ökologischer Einsatz der Traktionsarten im System Bahn“, Stuttgart, 2014.
- [27] Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, „Link zum DLM“, [Online]. Available: http://www.geodatenzentrum.de/geodaten/gdz_rahmen.gdz_div?gdz_spr=deu&gdz_akt_zeile=5&gdz_anz_zeile=1&gdz_unt_zeile=1&gdz_user_id=0. [Zugriff am 21. 01. 2019].
- [28] Bundesamt für Kartografie und Geodäsie, „Dokumentation DLM“, [Online]. Available: http://sg.geodatenzentrum.de/web_download/dlm/dlm250/dlm250.pdf. [Zugriff am 21. 01. 2019].
- [29] S. Meissner, "Ermittlung spezifischer Ausrüstungsstandards und Kostenansätze von Oberleitungsanlagen zur Untersuchung der Elektrifizierungswürdigkeit", Masterarbeit, Professur für Elektrische Bahnen, Technische Universität Dresden, 2017.
- [30] S. Forkert, PTV Group, Grafik als Email-Anhang, Email vom Mo 10.12.2018 10:56.