

**PRÜFUNG ZUR ÖKOLOGISCHEN UND
ÖKONOMISCHEN UMSETZUNG
DES CARGOCAP-SYSTEMS
AM STANDORT BERGISCH GLADBACH**

**SCHLUSSBERICHT
Anonymisierte Fassung**

Bochum, 30. Dezember 2020

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34750/01-23	Referat	23	Fördersumme	93.836 €
----	-------------	---------	----	-------------	----------

Antragstitel Prüfung zur ökologischen und ökonomischen Umsetzung des CargoCap-Systems am Standort Bergisch Gladbach

Stichworte Bahn, Energie, Energieeffizienz, Logistik, Mobilität, Modell, Ökonomie, Transport, Verkehr, Verminderung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
19 Monate	06.03.2019	15.10.2020	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Hochschule Düsseldorf Münsterstr. 156 40476 Düsseldorf	Tel 0211 4351-3030 Fax
		Projektleitung Prof. Carsten Deckert
		Bearbeiter Pieper, Chandra, Schmidt, Schönheit

Kooperationspartner CargoCap GmbH & STEIN Ingenieure GmbH, Konrad-Zuse-Str. 6, 44801 Bochum
Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik (RUFIS), Universitätsstr. 150, 44801 Bochum
DLR, Institut für Verkehrsforschung, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin
Stadt Bergisch Gladbach, Wilhelm-Wagener-Platz, 51429 Bergisch Gladbach

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Stadt Bergisch Gladbach ist bereit, die weltweit erste Anwendung des CargoCap-Systems zu überprüfen. Der mögliche Anwendungsfall sieht vor, ein Güterverteilzentrum (GVZ) im Süden der Stadt an der A4 (Abfahrt Frankenforst) zu errichten und von dort aus die ankommenden Waren unterirdisch per Caps in die Innenstadt zu einem neu zu errichtenden City-Hub und/oder direkt anzuschließenden Kunden und umgekehrt Fertigprodukte, aber auch Abfälle, auch wieder aus der Stadt heraus zu transportieren. Das Projekt hat das Ziel, zu prüfen, ob der zu untersuchende Anwendungsfall des CargoCap-Systems in Bergisch Gladbach aus ökologischer und ökonomischer Sicht rentabel ist. Die Ergebnisse sollen als Grundlage für die weitergehende Planung und zur Formulierung und Bewerbung eines Fonds-Produktes für einen potenziellen Investor verwendet werden. Das CargoCap-System sorgt durch die Verlagerung des Güterverkehrs in den Untergrund für eine Entlastung bestehender Verkehrswege und ist darüber hinaus witterungsunabhängig, flexibel und zeitgenau. Gleichzeitig ist es durch den emissionsfreien Betrieb absolut umweltfreundlich.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Prüfung beinhaltet folgende Schritte:

1. Abstimmungen der Zielvorstellungen und Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb des CargoCap-Systems mit der Stadt Bergisch Gladbach, möglichen Investoren, Betreibern und Kunden/Nutzern
2. Klärung der Logistikaufgabe auf Grund der Vorgabe oder der Bedarfsplanung der Stadt Bergisch Gladbach und von Konsultationen und Besichtigungen vor Ort unter Einbeziehung von Handel, KEP, Industrie, Entsorgern, Spediteuren u.a.
3. Erarbeitung eines Planungskonzeptes einschließlich Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten auf der Basis von Straßenfahrzeugen mit gleichen Anforderungen, Dokumentation und Bewertung
4. Integrieren der Leistungen anderer fachlich Beteiligter inklusive Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten
5. Betriebswirtschaftliche Bewertung
6. Volkswirtschaftliche Bewertung
7. Abschlussdokumentation

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen der Klärung der Logistikaufgabe wurden durch fragebogen-gestützte Interviews Logistikdaten von Unternehmen in den Bereichen Industrie, Handel und KEP-Dienstleistern erhoben und durch Statistiken und Hochrechnungen ergänzt. Die logistische Bewertung wurde anhand der Komponenten der Logistikleistung vorgenommen. Es zeigt sich, dass das CargoCap-System in den Stadtteilen an der A4 zu Nachteilen bei der Lieferzeit führt. Die Industriegebiete Zinkhütte und West besitzen das größte Liefervolumen, gefolgt vom Handel, der jedoch räumlich stärker verteilt ist und einen nicht zu vernachlässigenden Anteil gekühlter Ware empfängt. Es werden eine hohe Vielfalt an Palettentypen sowie möglichst hohe Palettenladehöhen verwendet. Die befragten Unternehmen haben lediglich ein geringes Interesse an einer Verlagerung von Lagerplätzen und einer Just-in-time-Anbindung an das GVZ.

Die für den Erstanwendungsfall des CargoCap-Systems gewählte Pilotstrecke erstreckt sich zwischen dem GVZ und der Innenstadt mit direkter Anbindung der wesentlichen Industriekunden. Sie ist ca. 7,9 km lang und wird einspurig mit zwei jeweils 500 m langen doppelspurigen Kreuzungsstationen ausgelegt. Die autonom und elektrisch fahrenden Caps können jeweils zwei oder drei Europaletten transportieren. Es wurden zwei Varianten untersucht, und zwar 3 Paletten pro Cap mit einer Beladungshöhe von 1,20 m (Rohrinnendurchmesser DN 2000 bzw. DN 2200) und 2 Paletten pro Cap mit einer Beladungshöhe von 1,95 m (DN 2800 bzw. DN 3000). Bei einer weiteren untersuchten Variante wurden die Caps durch den eSprinter der Daimler AG ersetzt, wodurch ein Rohrinnendurchmesser DN 3200 erforderlich ist und die Beladungshöhe der Paletten auf 1,20 m (EUL 1) beschränkt wird. Alle untersuchten Varianten sind technisch machbar und jederzeit erweiterbar.

Vor dem Hintergrund der dynamischen Investitionsrechnung der betriebswirtschaftlichen Bewertung erreicht die CargoCap-Investition die Schwelle für ihre betriebswirtschaftliche Rentabilität, wenn der Ausgabenbarwert dem Einnahme- oder Erlösbarwert entspricht. Diese Bedingung wird für eine Zielerlösanuität von rund 10,5 Mio. € p.a. (DN 2200) bzw. 11 Mio. € p.a. (DN 3000) erfüllt, wenn die Gütertransportaufgabe in Bergisch Gladbach weitgehend vollständig von CargoCap übernommen wird. Die Gesamtkosten belaufen sich dann für DN 2200 auf rund 803 Mio. €, für DN 3000 auf 826 Mio. € p.a. Die Zielerlöse liegen bei insgesamt rund 837 Mio. € (DN 2200) bzw. rund 880 Mio. € (DN 3000). Werden der Betrieb des Güterverteilzentrums ausgegliedert und die Infrastrukturkosten öffentlich finanziert, sinken die jährlichen Kosten gravierend und die notwendigen Zielerlöse nehmen ab.

Die volkswirtschaftliche Bewertung nach dem Ressourcenverbrauchsansatz der Bundesverkehrswegeplanung 2030 zeigt, dass die analysierten Vorteile die systemimmanenten Nachteile des CargoCap-Systems nicht aufwiegen. Die im Vergleich zum Lkw höheren Betriebskosten und zusätzlichen Transportzeiten führen zu einem negativen Gesamtnutzen. Die Bewertung hat aber auch gezeigt, dass das Transportsystem CargoCap geeignet ist, fossile Kraftstoffe einzusparen, die Umweltbelastung durch Abgasemissionen zu reduzieren, die Verkehrssicherheit zu steigern und innerörtliche Trennwirkungen zu mindern. Aus jeder verlagerten Lkw-Fahrt ziehen die Verkehrsteilnehmer, Anwohner und die Stadt einen Nutzen, durch kürzere Reisezeiten, geringere Lärmeinwirkungen, Erhöhung der Zuverlässigkeit und niedrigeren Verschleiß der Infrastruktur.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde in zwei Informationsveranstaltungen über die Wirtschaftsförderung der Stadt Bergisch Gladbach und das Wirtschaftsgremium Bergisch Gladbach der IHK Köln vorgestellt. Die Projektergebnisse werden auf der Projekt-Website <https://machbarkeitsstudie-cargocap-bergischgladbach.de/> zur Verfügung gestellt. Ein Buchbeitrag über unterirdischen Warentransport für die zweite Auflage des Buches „CSR und Logistik“ (Hrsg.: Prof. Dr. Carsten Deckert) ist in Planung.

Fazit

Die Anforderungen an die volks- und betriebswirtschaftliche Rentabilität der CargoCap-Investition in Bergisch Gladbach fallen insgesamt vor dem Hintergrund der Betriebs- und Investitionsausgaben sowie vor dem Hintergrund des Potenzials des Transportaufkommens relativ hoch aus. Zudem ist nicht zu erwarten, dass sich der CargoCap-Transport ohne öffentliche Intervention in Konkurrenz zum Lkw-Transport durchsetzt, weil die Grenz- und Durchschnittskosten für die „letzten“ Kilometer des Lkw zwischen GVZ und den verschiedenen Stationen unter denen des CargoCaps liegen. Die Inangriffnahme der Realisation des subterrestrischen Transportsystems in Bergisch Gladbach kann trotzdem mit dem Hinweis auf seinen innovativen Pilotcharakter für die Entwicklung umweltfreundlicher, nachhaltiger Gütertransportsysteme politisch begründet werden. Die Bedingungen für eine betriebs- und volkswirtschaftliche Rentabilität verbessern sich dann erheblich, wenn das GVZ ausgegliedert und die Infrastrukturkosten wie beim Straßenbau öffentlich finanziert werden. Darüber hinaus führt ein Netzausbau über Bergisch Gladbach hinaus dazu, dass Skalenerträge, höhere Transportmengen sowie Kostendegressionseffekte und geringere Umladeposten realisiert werden, die für das Gesamtsystem eines wachsenden Netzes betriebs- und volkswirtschaftliche Rentabilitätsgewinne versprechen.

Inhalt

1	Veranlassung.....	7
2	Klärung der Logistikaufgabe	10
2.1	Zielvorstellungen und Rahmenbedingungen.....	10
2.2	Logistikleistung	11
2.3	Szenarien	12
2.3.1	Datenerhebung.....	13
2.3.2	Auswahl der Unternehmen	14
2.4	Ergebnisse	16
2.4.1	Lieferzeit und -treue.....	16
2.4.2	Lieferqualität und -flexibilität	17
2.4.3	Liefer- und Informationsbereitschaft.....	20
3	Erarbeitung eines Planungskonzeptes (Arbeitspakete 3 und 4)	22
3.1	Das CargoCap-System.....	22
3.2	Dimensionierung und Trassierung der Anlage	27
3.2.1	Fahrrohrleitung	27
3.2.1.1	Konstruktive Gestaltung der Rohre.....	27
3.2.1.2	Abmessungen der Rohre.....	31
3.2.1.3	Verlegung.....	35
3.2.1.4	Innenausbau.....	37
3.3	Streckenführung und Stationen.....	39
3.3.1	Linienführung und Stationsdaten	39
3.3.2	Betrachtungen zu Baugrund und Baufeld entlang der Trasse.....	41
3.3.3	Layout der Strecken.....	43
3.3.4	Fördertechnisches Layout der Stationen.....	44
3.3.5	Rohbau der Stationen.....	50
3.4	Betriebskonzept.....	52
3.4.1	Verbandsbildung.....	52
3.4.2	Taktung und Fahrplan.....	54
3.5	Schätzung der Investitions- und Betriebskosten	58
3.5.1	Investitionskosten	58
3.5.1.1	Allgemeines.....	58
3.5.1.2	Rohbau.....	58

3.5.1.3	Innenausbau und Technische Ausstattung	61
3.5.1.4	Caps	63
3.5.1.5	Softwareentwicklung	64
3.5.1.6	Zusammenfassung der Investitionskosten	64
3.6	Betriebskosten	65
3.6.1	Personal	65
3.6.2	Energie	65
3.6.3	Wartung	65
3.7	Umsetzungszeitraum	66
3.8	Sicherheitstechnik	67
3.9	Zuverlässigkeit	68
4	Betriebswirtschaftliche Bewertung	71
4.1	Dynamische Investitions- und Finanzierungsrechnung	72
4.2	Annahmen	73
4.2.1	Transportaufgabe und Betreibergesellschaft	73
4.2.2	Aufwand, Ertrag, Auszahlung, Einzahlung	73
4.2.3	Besteuerung	73
4.2.4	Preisänderungen	74
4.2.5	Zinssätze und Diskontierungsfaktor	74
4.2.6	Finanzierungs- und Kapitalstruktur	75
4.2.7	Afa und Nutzungsdauern	76
4.2.8	Personal-, Energie- und Wartungsausgaben	76
4.2.9	Transport- und Palettenaufkommen	77
4.3	Investitions- und Gewinnrechnung DN 2200	78
4.3.1	Sachinvestitionsausgaben DN 2200	78
4.3.2	Investition und Finanzierung DN 2200	79
4.3.3	Zinszahlungen und Tilgung DN 2200	79
4.3.4	Betriebsausgaben DN 2200	80
4.3.5	Ausgabenbarwerte DN 2200	80
4.3.6	Zielerlösannuität ohne Steuern DN 2200	83
4.3.7	Zielerlösannuität mit Ertragssteuern DN 2200	83
4.3.8	Kosten, Erlöse, Gewinne und Zielerlösannuität mit Steuern DN 2200	86
4.4	Investitions- und Gewinnrechnung DN 3000	90

4.4.1	Investition und Finanzierung DN 3000	90
4.4.2	Zinszahlungen und Tilgung DN 3000.....	90
4.4.3	Betriebsausgaben DN 3000.....	91
4.4.4	Ausgabenbarwerte DN 3000.....	91
4.4.5	Zielerlösannuität ohne Steuern DN 3000	94
4.4.6	Zielerlösannuität mit Ertragssteuern DN 3000.....	94
4.4.7	Kosten, Erlöse, Gewinne und Zielerlösannuität mit Steuern DN 3000....	97
4.5	Alternative Investitionsszenarien (Sensitivitätsanalyse)	101
4.5.1	Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	101
4.5.2	Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)	101
4.5.3	Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	102
4.5.4	Vergleich der Investitionsszenarien	102
4.6	Ergebnis und Ausblick	104
5	Volkswirtschaftliche Bewertung.....	106
5.1	Annahmen	106
5.1.1	Gütermenge	106
5.1.2	Entladeorte und Routen.....	106
5.1.3	Fahrzeiten und Fahrleistung	107
5.1.4	Ökonomische Annahmen.....	108
5.2	Nutzen- /Kostenkomponenten.....	110
5.2.1	Veränderung der Betriebskosten	111
5.2.1.1	Veränderung der Vorhaltekosten und Betriebsgrundkosten.....	111
5.2.1.2	Veränderung der Personalkosten	112
5.2.1.3	Veränderung der Energiekosten	113
5.2.2	Veränderung der Abgasleistung	114
5.2.3	Veränderung der Verkehrssicherheit	116
5.2.4	Veränderung der Transportzeit der Ladung	118
5.2.5	Veränderung der Instandhaltungs- und Betriebsgrundkosten der Verkehrswege.....	119
5.2.6	Veränderung der Geräuschbelastung.....	120
5.2.7	Veränderung der innerörtlichen Trennwirkung	122

5.2.8	Investitionskosten	123
5.2.9	Nutzen-Kosten-Verhältnis	124
5.2.10	Sensitivitätsanalyse	125
5.2.11	Partialbetrachtung	126
5.2.12	Weitere Nutzenaspekte	128
5.2.12.1	Veränderung der impliziten Nutzen.....	128
5.2.12.2	Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr.....	128
5.2.12.3	Veränderung der Zuverlässigkeit	128
5.2.12.4	Veränderung der Lebenszyklusemissionen von Treibhausgasen der Infrastruktur	129
5.3	Ergebnis	130
6	CargoCapVan-System: Alternatives Konzept mit speziellen Straßenfahrzeugen	131
6.1	Ausgangspunkt.....	131
6.2	Allgemeines	132
6.3	Skalierung des CargoCapVan-Systems.....	133
6.4	Systemspezifische Anforderungen an die Fahrzeuge	138
6.4.1	Antriebstechnik	140
6.4.2	Quersteuerung / Spurführung	141
6.4.3	Längssteuerung.....	142
6.4.4	Systemwechsel zwischen Oberflächen- und Rohrleitungsbetrieb	144
6.4.4.1	Organisation des Systemwechsels	144
6.4.4.2	Bauliche Anlagen.....	145
6.4.4.3	Einfädelerung in die Spurführung.....	150
6.4.4.4	Betriebsablauf und Konvoibildung.....	151
6.4.5	Unterirdische Stationen, automatische Be- und Entladung der Fahrzeuge	152
6.5	Zusammenstellung der zusätzlichen Komponenten am Fahrzeug	156
6.6	Komponenten der Fahrrohrleitung	158
6.7	Schätzung der Investitions- und Betriebskosten für das CargoCapVan-System im Vergleich zum konventionellen CargoCap-System.....	159
6.7.1	Allgemeines	159
6.7.2	Rohbau.....	159
6.7.3	Innenausbau und technische Ausstattung	160

6.7.4	Fahrzeuge	161
6.7.5	Softwareentwicklung.....	161
6.7.6	Zusammenfassung der Investitionskosten	161
6.7.7	Energie	162
6.7.8	Wartung.....	162
6.8	Ergebnis	162
7	Zusammenfassung	165
8	Tabellenanhang	172

1 Veranlassung

Kommunen und Industriestandorte sind von zuverlässigen und leistungsfähigen Transport- und Logistikdienstleistungen abhängig. Dabei ist es wichtig, sowohl den Anforderungen der gewerblichen Verkehre als auch den Bedürfnissen der Bevölkerung mit zunehmenden Warenmengen gerecht zu werden. Flankierend sind logistische Herausforderungen in Folge der zunehmenden Urbanisierung, der Zuspitzung der Verkehrssituation sowie die Umwelt-, Gesundheits- und Klimaschutzziele zu beachten. Als innovative Lösung bietet sich das CargoCap-System (CC-System) an, d. h. der automatische Gütertransport im Untergrund. Der Transport erfolgt in unterirdischen Fahrrohrleitungen mit einem Durchmesser, abhängig von der Ladehöhe, von bis zu 3,00 m durch elektrisch angetriebene, autonom fahrende Transportfahrzeuge (Caps), die mit bis zu drei Euro-Paletten oder standardisierten Behältern beladen sind. Die Ladung wird an CC-Stationen dem Empfänger zur Verfügung gestellt. Diese Stationen können sowohl mitten in Städten als auch punktgenau in/unter Unternehmen errichtet werden.

Das CargoCap-System sorgt durch die Verlagerung des Güterverkehrs in den Untergrund für eine Entlastung bestehender Verkehrswege und ist darüber hinaus witterungsunabhängig, flexibel und zeitgenau. Gleichzeitig ist es durch den emissionsfreien Betrieb absolut umweltfreundlich.

Die Stadt Bergisch Gladbach ist bereit, anstelle von Lkw-Vorzugsrouten, die weltweit erste Anwendung des CargoCap-Systems in Form eines Pilotprojektes zu überprüfen und damit den Nutzen des Konzeptes zu zeigen und nachvollziehbar zu machen. Die entsprechenden Beschlüsse des Rates sowie eine Vorkaufsrechtssatzung liegen vor.

Der mögliche Anwendungsfall sieht vor, ein Güterverteilzentrum (GVZ) im Süden der Stadt an der A4 (Abfahrt Frankenforst) zu errichten und von dort aus die ankommenden Waren per Caps unterirdisch in die Innenstadt zu einem neu zu errichtenden City-Hub und/oder direkt anzuschließenden Kunden innerhalb des Stadtgebietes, die den Bereichen Industrie, Handel und KEP zuzuordnen sind, zu transportieren. Gleichfalls werden Güter, aber auch Abfälle, aus der Stadt zum GVZ befördert (s. Abbildung 1).

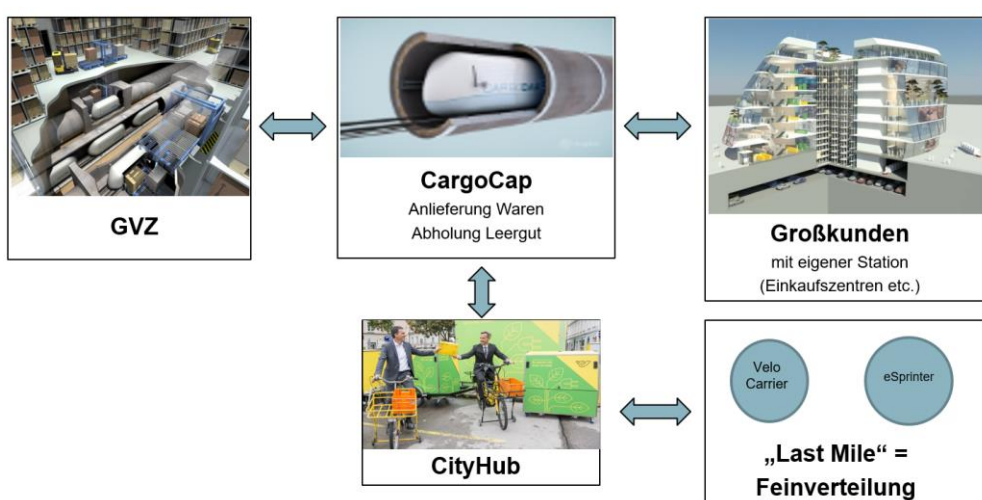


Abbildung 1: Citylogistik mit CargoCap - Anwendungsfall Bergisch Gladbach [Computergrafik: visaplan GmbH]

Sowohl für das Güterverteilzentrum (GVZ) als auch für das City-Hub sind noch keine konkreten Flächen vorgesehen. Für das GVZ gelten Suchräume im Einzugsbereich der Autobahn sowie im BAST-Umfeld. Für das City-Hub gelten Suchräume im Zentrum sowie im Gewerbegebiet Gohrsmühle.

Mit dieser Konzeption sieht der Rat der Stadt die Möglichkeit, den Schwerverkehrsan teil von 7 % am städtischen Verkehr und die damit verbundenen Belastungen der Bevölkerung durch Lärm, Stau, Unfälle, Feinstaub, Stickoxide und andere Gase drastisch zu reduzieren.

Das Projekt, auch Machbarkeitsstudie genannt, hat das Ziel zu prüfen, ob der zu untersuchende Anwendungsfall des CargoCap-Systems in Bergisch Gladbach aus technischer, ökologischer und ökonomischer Sicht möglich und rentabel ist. Die Ergebnisse sollen darüber hinaus als Grundlage für die weitergehende Planung und zur Formulierung und Bewerbung eines Fonds-Produktes für einen potenziellen Investor verwendet werden.

Die Prüfung beinhaltet folgende Schritte:

- Abstimmungen der Zielvorstellungen und Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb des CargoCap-Systems mit der Stadt Bergisch Gladbach, möglichen Investoren, Betreibern und Kunden/Nutzern (Arbeitspaket 1)
- Klärung der Logistikaufgabe auf Grund der Vorgabe oder der Bedarfsplanung der Stadt Bergisch Gladbach und von Konsultationen und Besichtigungen vor Ort unter Einbeziehung von Handel, KEP, Industrie, Entsorgern, Spediteuren u.a. (Arbeitspaket 2)
- Erarbeitung eines Planungskonzeptes einschließlich Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten auf der Basis von Straßenfahrzeugen mit gleichen Anforderungen, Dokumentation und Bewertung (Arbeitspaket 3)
- Integrieren der Leistungen anderer fachlich Beteiligter inklusive Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten (Arbeitspaket 4)
- Betriebswirtschaftliche Bewertung (Arbeitspaket 5)
- Volkswirtschaftliche Bewertung (Arbeitspaket 6)
- Abschlussdokumentation (Arbeitspaket 7)

Die Erarbeitung der Machbarkeitsstudie wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) - AZ 34750/01-23 und der Stadt Bergisch Gladbach finanziell gefördert.

An ihrer Erstellung haben mitgewirkt:

Bewilligungsempfänger:

Hochschule Düsseldorf (Arbeitspaket 1 und 2)

Münsterstr. 156, 40476 Düsseldorf

Tel.: +49 211 4351-3030

E-Mail: carsten.deckert@hs-duesseldorf.de

Prof. Dr. Carsten Deckert

Tanja Chandra

Matthias Schönheit

Moritz Pieper

Gerrit Schmidt

Kooperationspartner:

CargoCap GmbH und STEIN Ingenieure GmbH (Arbeitspaket 3 und 4)

Konrad-Zuse-Str. 6, 44801 Bochum

Prof. Dr.-Ing. Dietrich Stein

Dr.-Ing. Robert Stein

Dr.-Ing. Dietmar Beckmann

Dipl.-Ing. Beate Borchardt

Dipl.-Geol. Heiko Brix

Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik (RUFIS) (Arbeitspaket 5)

Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Prof. Dr. Helmut Karl

Thomas Werbeck

Imke Maren Rhoden

Johannes Rosche

DLR Institut für Verkehrsforschung (Arbeitspaket 6)

Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin

Gunnar Knitschky

Stadt Bergisch Gladbach

Wilhelm-Wagener-Platz, 51429 Bergisch Gladbach

Michael Zalfen

Willi Schmitz

Martin Westermann

2 Klärung der Logistikaufgabe

Ziel des Arbeitspaketes 2 ist laut Antrag die Klärung der Logistikaufgabe aufgrund der Vorgabe oder der Bedarfsplanung der Stadt Bergisch Gladbach und von Konsultationen und Besichtigungen vor Ort unter Einbeziehung von Handel, KEP, Industrie, Entsorgern, Spediteuren u.a.. Dazu gehören die Aufnahme des Mengengerüsts der Ware, die zeitliche Mengenstruktur, die Aufnahme des Entsorgungsvolumens sowie weitergehende Analysen bei ausgewählten Partnern zu Bereitstellungskonzepten und Beschaffungsformen.

Die Angaben wurden durch Befragung der potentiellen Betreiber der Gesamtanlage aus Industrie, KEP-Diensten (Kurier-, Express- und Paket-Dienste) und Handel ermittelt und durch statistische Daten und Hochrechnungen ergänzt. Die Ergebnisse wurden unter Einbeziehung von Vorgaben bzgl. der CargoCap-Anlage und bzgl. der Förderanlagen ermittelt.

2.1 Zielvorstellungen und Rahmenbedingungen

Folgende Zielvorstellungen und Rahmenbedingungen wurden im Rahmen eines runden Tisches mit Vertretern der Stadt Bergisch Gladbach festgelegt: Es wird zwischen drei logistische Szenarien unterschieden. Diese sind Industrie, Handel und KEP (Kurier, Express, Paket). Die logistische Bewertung erfolgt anhand der Parameter der Logistikleistung.

Das Szenario Industrie orientiert sich an den großen Gewerbegebieten in Bergisch Gladbach: Frankenforst, Zinkhütte, Gohrsmühle, West und Kradepohl. Das Gewerbegebiet Frankenforst ist mit seiner Nähe zur Autobahn A4 lediglich als möglicher Einstiegspunkt relevant. Kradepohl besitzt kein nennenswertes Volumen. Gohrsmühle ist derzeit lediglich als Flächenpotenzial anzusehen.

Das Szenario Handel fokussiert auf Filialisten aus Einzelhandel sowie Großhändler.

Das Szenario KEP fokussiert auf die fünf größten Paketzusteller. Als Bezirke mit hohem Potenzial für das Szenario KEP werden einwohnerstarke Bezirke angesehen (hohes Paketvolumen).

Der einwohnerstärkste Bezirk Bergisch Gladbachs ist die Stadtmitte. Mögliche Zukunftsentwicklungen ergeben sich aus dem neuen Flächennutzungsplan der Stadt, aber gewerbliche Neuausweisungen sind eher in Autobahnnähe und spielen daher vermutlich eine untergeordnete Rolle für das Projekt.

2.2 Logistikleistung

Das allgemeine Ziel jeder logistischen Tätigkeit ist die Verbesserung der Logistikleistung, welche vom Kunden und seinen Anforderungen an das entsprechende Liefersystem bestimmt wird. Wesentliche Komponenten der Logistikleistung sind Lieferzeit, Liefertreue, Lieferqualität, Lieferflexibilität, Lieferbereitschaft und Informationsbereitschaft [1, 2, 3].

Die **Lieferzeit** ist als Zeitspanne definiert, welche sich von der Aufgabe des Auftrags vom Kunden bis zur Auslieferung der aufgegebenen Ware erstreckt. Kurze Lieferzeiten begünstigen niedrigere Lagerbestände und kurzfristigere Dispositionen [2]. Die Lieferzeit setzt sich aus den Zeiten für Auftragsbearbeitung, Kommissionierung, Verpackung, Verladung, Transport und – bei nichtvorrätiger Ware – auch aus dem Produktionsdurchlauf zusammen. Da es sich bei dem CargoCap-System um ein Transportsystem handelt, sind für dieses Projekt in erster Linie die Transportzeit und die Umschlagzeiten relevant.

Als **Liefertreue** wird die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, mit der die vereinbarte Lieferzeit eingehalten wird. Der Kunde setzt eine zuverlässige und termingerechte Auftragsbearbeitung voraus, da ein außer Acht lassen des Liefertermins mit Verzögerungen im Betriebsablauf und somit mit hohen Kosten verbunden ist [3].

Die **Lieferqualität** wird durch den Anteil einwandfreier Ware bestimmt. Sie beschreibt die Liefergenauigkeit unter den Aspekten Art, Menge (Vollständigkeit), Qualität und Zustand der Ware beim Ausliefern [1]. Da beim Überschreiten der Bestellmenge Lagerkosten entstehen können und beim Unterschreiten Fehlmengen auftreten können, ist die bestellte Warenmenge strikt einzuhalten [3].

Die Anpassungsfähigkeit eines Lieferanten, auf spezielle Kundenwünsche eingehen zu können, wird als **Lieferflexibilität** bezeichnet. Hierbei sind die Einflussgrößen Auftragsmodalitäten, Liefermodalitäten und Informationen vom Kunden von großer Bedeutung [1].

Die **Lieferbereitschaft** gibt an, inwiefern der Lieferant fähig oder bereit ist, direkt von seinem Lager zu liefern [2]. Bei einem reinen Transportsystem bleibt die Lieferbereitschaft normalerweise unberührt. Da beim CargoCap-System aber eine Verlagerung von Beständen und eine Just-in-time-Anlieferung möglich sind, kann auch die Lieferbereitschaft beeinflusst werden.

Die **Informationsbereitschaft** beschreibt die Fähigkeit, während der gesamten Auftragsabwicklung auftrags- und produktbezogene Informationen bezüglich der Lieferung zur Verfügung zu stellen [1].

2.3 Szenarien

Im vorliegenden Projekt wurden die drei logistischen Szenarien Industrie, Handel und KEP (Kurier, Paket und Express) unterschieden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Logistische Szenarien

	Industrie	Handel	KEP
Anlieferort Cap	Direktzugang Unternehmen / Gewerbegebiet	City-Hub oder Direktzugang (Einkaufscenter)	City-Hub
Weiterverteilung	nein	teilweise	ja
Entbündelung	nein	teilweise	ja
Transportmittel Weiterverteilung	keines	Elektrofahrzeug o.ä.	E-Cargo Bike o.ä.
Zielort	1	1 oder mehrere	viele

Im Szenario Industrie wird auf Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes aus den Gewerbegebieten Bergisch Gladbachs fokussiert. Es wurde davon ausgegangen, dass für Großunternehmen ein Direktzugang zum CargoCap-System eingerichtet wird, was eine Weiterverteilung der Ware oder eine Entbündelung ausschließt. Für kleinere Unternehmen kann ggf. ein Zugang für das Gewerbegebiet erfolgen.

Das Szenario Handel konzentriert sich auf Groß- und Einzelhändler. Während Großhändler in der Regel in Gewerbegebieten sitzen, sind die Einzelhändler über das gesamte Stadtgebiet verteilt, mit einem Schwerpunkt im westlichen Teil Bergisch Gladbachs [4]. Händler können direkt an das CargoCap-System angeschlossen werden (z.B. Einkaufscenter), oder die Waren werden an einen City-Hub gesendet und danach mit Elektrofahrzeugen o.ä. weiterverteilt (Abbildung 1). Da für das City-Hub bisher kein konkreter Standort angegeben werden kann, kann die Weiterverteilung derzeit nicht konkret konzipiert werden.

Im Segment KEP (Kurier, Paket und Express) wird auf die Paketdienstleister fokussiert. Die Pakete werden in diesem Szenario mit CargoCap zum City-Hub transportiert und von dort mit Lastenfahrrädern an die Kunden ausgeliefert. Dabei dient das City-Hub als so genanntes Mikro-Depot. Ein Mikro-Depot ist ein vorübergehender Lagerort in der Stadt, der die letzte Meile der KEP-Lieferung in eine vorletzte Meile (vom Depot des KEP-Dienstleisters zum Mikro-Depot) und eine allerletzte Meile (vom Mikro-Depot zum Endkunden) aufteilt. Es verknüpft dabei die Transportbündelung der Lieferung zum Mikro-Depot mit dem Einsatz umweltfreundlicher Transportmittel mit geringerer Kapazität wie beispielsweise Lastenfahrräder, um gleichzeitig die innerstädtische Verkehrsinfrastruktur zu entlasten und Emissionen zu reduzieren [5]. In diesem Fall wird die vorletzte Meile noch einmal aufgeteilt in eine Lieferung der Pakete vom Depot des

KEP-Dienstleisters an die Einstiegsstation des CargoCap-Systems und eine Lieferung mit dem CargoCap-System zum City-Hub. Es wurde davon ausgegangen, dass die Pakete in Fahrradboxen angeliefert werden, die im Güterverteilzentrum palettiert werden können.

2.3.1 Datenerhebung

Zur Datenerhebung wurde zunächst der Informationsbedarf anhand der Komponenten der Logistikleistung festgelegt. Die meisten Daten wurden mit Hilfe von Fragebögen erhoben, die im Rahmen von Interviews mit den Logistikleitern der befragten Unternehmen ausgefüllt wurden (Abbildung 2). Die Fragebögen können auf der Projektwebsite (<https://machbarkeitsstudie-cargocap-bergischgladbach.de>) eingesehen werden. Ergänzend wurde bei einigen Unternehmen eine Werksbesichtigung durchgeführt. Die Fragebögen wurden auf die entsprechenden Szenarien abgestimmt: Während im Szenario Handel lediglich ein Wareneingang erfolgt, erfolgt bei den Industrieunternehmen sowohl ein Wareneingang (Vormaterial) als auch ein Warenausgang (Fertigwaren). Bei den KEP-Dienstleistern wurden die Paketmengen pro Stadtbezirk abgefragt. Zur Bestimmung der Versandeinheiten und Ladungsträger wurden außerdem die Logistikhandbücher von Industrieunternehmen und Einzelhändlern analysiert, ergänzende Beobachtungen bei Einzelhändlern durchgeführt und Logistikexperten befragt.



Abbildung 2: Fragebögen

2.3.2 Auswahl der Unternehmen

Die Unternehmen wurden je nach Szenario unterschiedlich ausgewählt. Zur Untersuchung der Unternehmen im Szenario Industrie wurden die wesentlichen Gewerbegebiete in Bergisch Gladbach betrachtet: Kradepohl, West, Gohrsmühle, Zinkhütte und Frankenforst (Abbildung 3). Das Gewerbegebiet Gohrsmühle stellt dabei lediglich ein Flächenpotential dar, und das Gewerbegebiet Kradepohl ist ohne nennenswertes Volumen. Das Gewerbegebiet Frankenforst befindet sich direkt an der Autobahn A4 und ist damit ein potenzieller Einstiegspunkt für das CargoCap-System. Damit verblieben für die weitergehende Analyse lediglich die Gewerbegebiete West und Zinkhütte.

Aus diesen beiden Gewerbegebieten wurden Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes zur weiteren Betrachtung recherchiert. Es wurden 22 relevante Unternehmen in den Gewerbegebieten West und Zinkhütte ermittelt. Anschließend wurden die zu den Unternehmen zugehörigen bilanzierten Vorräte und Umsätze anhand der Daten des Bundesanzeigers über die zentrale Plattform für die Speicherung von Unternehmensdaten (www.unternehmensregister.de) recherchiert. Anhand dieser wirtschaftlichen Daten der Unternehmen konnte eine Vorauswahl der anzusprechenden Unternehmen getroffen werden. Außerdem wurden die Daten zur Abschätzung der Paletten-Anzahl für die Unternehmen genutzt, für die keine Angaben zu Warenmengen ermittelt werden konnten. Es wurde dabei angenommen, dass die Höhe der Vorräte proportional zu den Mengen im Wareneingang und -ausgang ist.

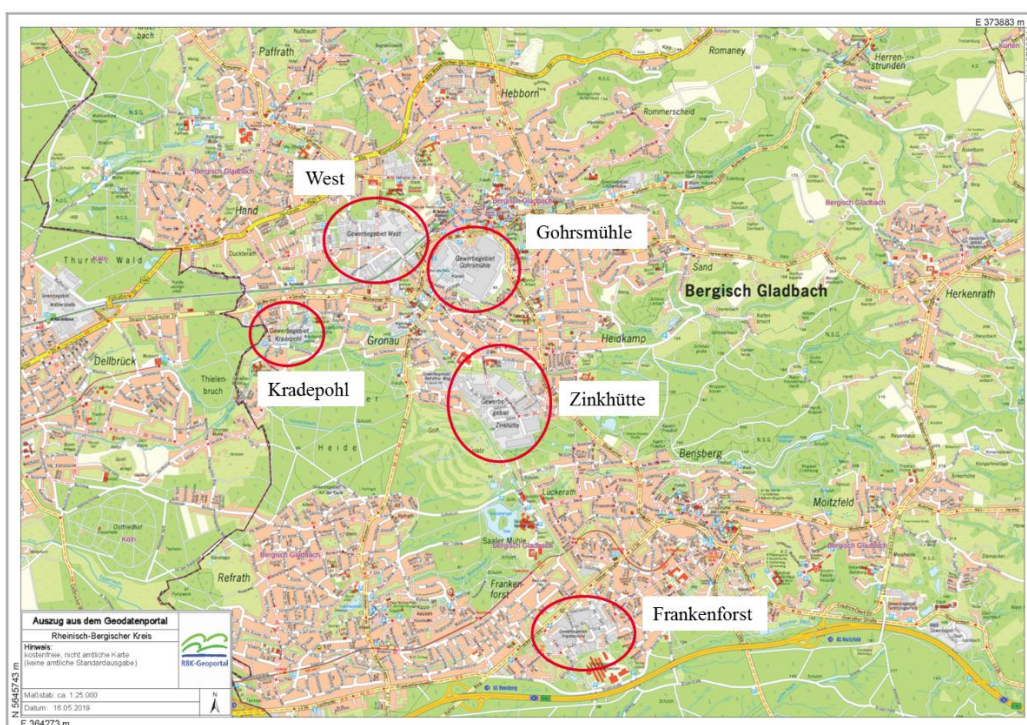


Abbildung 3: Gewerbegebiete in Bergisch Gladbach

Das Szenario Handel fokussiert auf die Segmente Lebensmittel und Drogerie, Technik und Elektronik sowie Baumarkt, da hier eine höhere Konzentration auf Marktteilnehmer herrscht als bei den verbleibenden Segmenten persönlicher Bedarf, Bekleidung und Möbel. Damit kann auf eine verstärkte Bündelung von Waren und die Anlieferung auf

Paletten geschlossen werden. Zudem ist mit dem Segment Lebensmittel und Drogerie das mit Abstand umsatzstärkste Einzelhandelssegment vertreten [6]. Durch das Einbeziehen von Waren- und Kaufhäusern besteht außerdem eine Überschneidung zu den Segmenten persönlicher Bedarf und Bekleidung. Zur Ermittlung der Unternehmen im Segment Handel wurden die Filialisten relevanter Supermärkte, Discounter, SB-Warenhäuser, Waren- und Kaufhäuser, DIY-Unternehmen und sonstige Einzelhandelsunternehmen anhand statistischer Daten wie Umsatz, Bekanntheitsgrad etc. ermittelt [7, 8, 9]. Anschließend wurden diese Händler anhand der Filialsuche auf ihren Websites in Bergisch Gladbach lokalisiert. Es ergab sich eine weit verstreute Verteilung der Händler (Abbildung 4), jedoch ist bereits hier eine Anhäufung von Handelsunternehmen im Zentrum Bergisch Gladbachs zu erkennen.

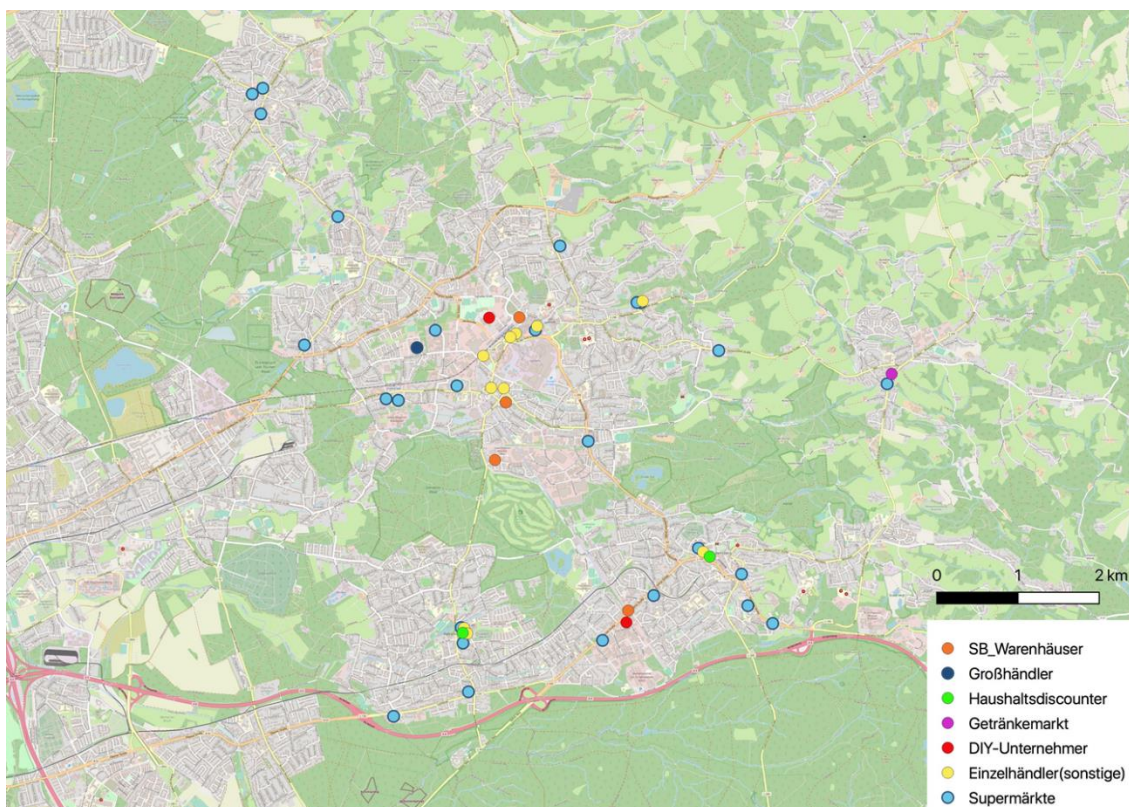


Abbildung 4: Handelsunternehmen in Bergisch Gladbach

Der Paketmarkt im Szenario KEP (Kurier, Paket und Express) ist geprägt durch fünf große Unternehmen, die den deutschen Markt unter sich aufteilen: DHL, DPD, Hermes, UPS und GLS [10, 11]. Anhand der Marktanteile wurden die Mengen der Unternehmen berechnet, von denen keine Daten erhoben werden konnten.

Die Unternehmen wurden in zwei Informationsveranstaltungen über die Wirtschaftsförderung der Stadt Bergisch Gladbach und das Wirtschaftsgremium Bergisch Gladbach der IHK Köln angesprochen. Außerdem wurden die Unternehmen über bestehende Kontakte der Stadt Bergisch Gladbach und der Projektpartner direkt angesprochen. Insgesamt wurden auf diese Weise 32 Unternehmen aus den drei Szenarien kontaktiert, von denen 10 für Interviews zur Verfügung standen und Daten im Rahmen der Datenerhebung lieferten.

2.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse lassen sich nach den einzelnen Komponenten der Logistikleistung Lieferzeit und -treue, Lieferqualität und -flexibilität sowie Liefer- und Informationsbereitschaft unterteilen.

2.4.1 Lieferzeit und -treue

Zur Bewertung der Lieferzeit wurde ein Modell aufgebaut, das die Lieferung mit LKW und Cap miteinander vergleicht. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Entladung des LKW in beiden Szenarien erfolgt und daher aus der Gleichung gekürzt werden kann, so dass lediglich der Transport sowie die Be- und Entladung des Caps verbleiben (Abbildung 5). Das bedeutet, dass der LKW durch das Be- und Entladen der Caps einen Zeitvorsprung hat, der durch eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit des Caps über eine entsprechende Strecke ausgeglichen werden kann.

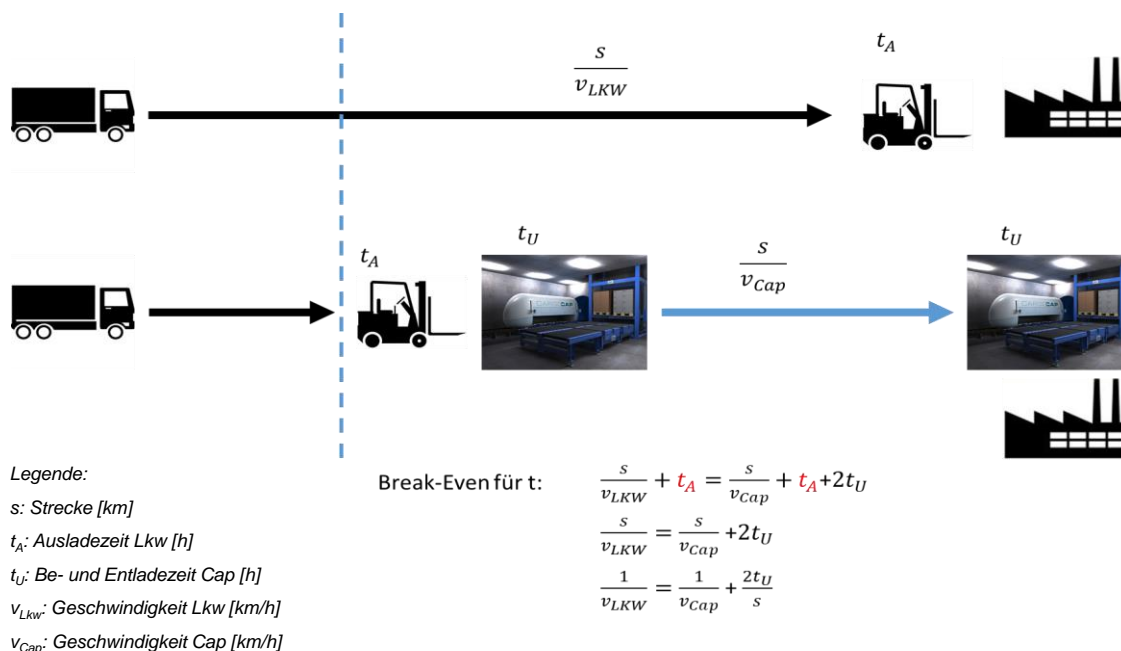


Abbildung 5: Modell zur Bewertung der Lieferzeit

Der Transport hängt von der Durchschnittsgeschwindigkeit des LKW und des Caps ab. Die Durchschnittsgeschwindigkeit des LKW wurde für den Weg von der A4 bis zur Innenstadt Bergisch Gladbach ermittelt. Dazu wurde das Vorrangroutennetz der Stadt Bergisch Gladbach zugrunde gelegt [12], aus dem drei Streckenvarianten entnommen werden konnten. Für diese drei Streckenvarianten wurde über Google Maps die durchschnittliche Geschwindigkeit für Fahrzeuge im Straßenverkehr ermittelt, die in Bergisch Gladbach bei 25 km/h liegt. Die Geschwindigkeit der Caps wurde mit 36 km/h angesetzt. Die Be- und Entladezeiten der Caps wurden von der CargoCap GmbH zur Verfügung gestellt.

Mit diesen Daten wurden zwei Vergleiche zur Ermittlung des Break-even-Punktes für den Transport mit Cap und LKW durchgeführt: Transport über Luftlinie und Transport mit einem Streckenfaktor zur Berücksichtigung der Abweichungen von der Luftlinie

beim LKW. Der Vergleich des Transports für die Luftlinie ergab, dass das Cap den LKW nach einer Strecke von etwa 2 km einholt. Der Vergleich mit einem Streckenfaktor, der die Tatsache berücksichtigt, dass der LKW im Gegensatz zum Cap nicht Luftlinie fährt, ergab, dass das Cap bereits bei einer Strecke von etwa 1 km einen Zeitvorteil hat. Einschränkend ist anzumerken, dass der Vergleich nur für die Be- und Entladung von einem Cap durchgeführt wurde, bei einer entsprechenden LKW-Ladung aber mehrere Caps genutzt werden müssten. Außerdem gilt die ermittelte Durchschnittsgeschwindigkeit für alle Fahrzeuge (Personen- und Nutzfahrzeuge) und nicht speziell für LKW. Allerdings konnte mit diesem Vergleich näherungsweise gezeigt werden, dass die Belieferung mittels Cap erst ab einem Korridor von 1 - 2 km um die Autobahn zeitlich gleichwertig oder besser ist. D.h. für die Orte Refrath und Bensberg, die in der Nähe der Autobahn liegen, würde das Cap-System durch die zusätzlichen Umschlagvorgänge auf jeden Fall zu einer höheren Lieferzeit führen.

Zur Ermittlung der benötigten Liefertreue wurden die Lieferfenster erhoben. Die An- bzw. Ablieferung der Waren erfolgt bei den Großunternehmen aufgrund der großen Liefervolumina täglich oder an wechselnden Wochentagen über den Tag verteilt. Für die KMU liegen keine Werte aus der Befragung vor. Die meisten der befragten Händler geben als Zeitfenster die Kern-Öffnungszeiten an.

2.4.2 Lieferqualität und -flexibilität

Zur Ermittlung der zu erbringenden Lieferqualität wurden die Mengengerüste für die drei logistischen Szenarien Industrie, Handel und KEP erhoben. Dabei wurde – außer im Bereich KEP - auf bereits palettierte Güter fokussiert.

In den untersuchten Gewerbegebieten existieren drei Großunternehmen, die den Hauptanteil der Lieferungen ausmachen, und KMU, die ein deutlich geringeres Liefervolumen besitzen. Dies liegt nur zum Teil an der Unternehmensgröße; die KMU stellen auch im Wesentlichen Gebrauchsgüter her, die ein geringeres Volumen haben als Verbrauchsgüter. Insgesamt wurde aus den erhobenen Daten ein Volumen von ca. 20.000 Paletten pro Woche abgeschätzt (An- und Ablieferungen). Die Palettenlieferungen umfassen nicht alle Lieferungen; nicht enthalten sind z.B. Pakete, Schüttgut und klassisches Stückgut.

Beim Handel wurden Daten für die Sparten Supermarkt, Drogerie und Baumarkt erhoben. Mit Hilfe dieser Datensätze wurden die Mengen der oben beschriebenen Filialisten über den Wert einer Palette pro Kategorie ermittelt, der über die Flächenproduktivität bzw. den Umsatz einer durchschnittlichen Filiale [13] errechnet wurde, sowie über durchschnittliche Transportkennzahlen für Anzahl Filialen pro Tour und Auslastungsgrad im Einzelhandel [14]. Der Anteil gekühlter Ware wurde über den Anteil der Artikel in den Warengruppen Frischwaren und Tiefkühlkost an der Gesamtanzahl der Artikel in allen Warengruppen [15] abgeschätzt. Insgesamt wurde aus den erhobenen Daten ein Volumen von maximal ca. 13.000 Paletten pro Woche abgeschätzt, davon etwa ein Viertel mit gekühlter Ware. In den Bezirk 2 (Innenstadt) fällt davon erwartungsgemäß der Großteil an (Abbildung 6). Einschränkend ist anzumerken, dass nicht alle Paletten des Handels erfasst wurden. So wurden im Lebensmitteleinzelhandel (LEH) nur die Filialisten betrachtet; etwa 13 % des Umsatzes im LEH wird jedoch durch unabhängige

Händler erwirtschaftet [8]. Insgesamt werden die Ergebnisse der Mengenerhebung in ihrer grundsätzlichen Ausprägung durch den Bericht zum integrierten Stadtentwicklungskonzept Bergisch Gladbach (ISEK) bestätigt, die für die die Bezirke ähnliche Relationen von Einzelhändlern und Verkaufsflächen aufweisen [4].

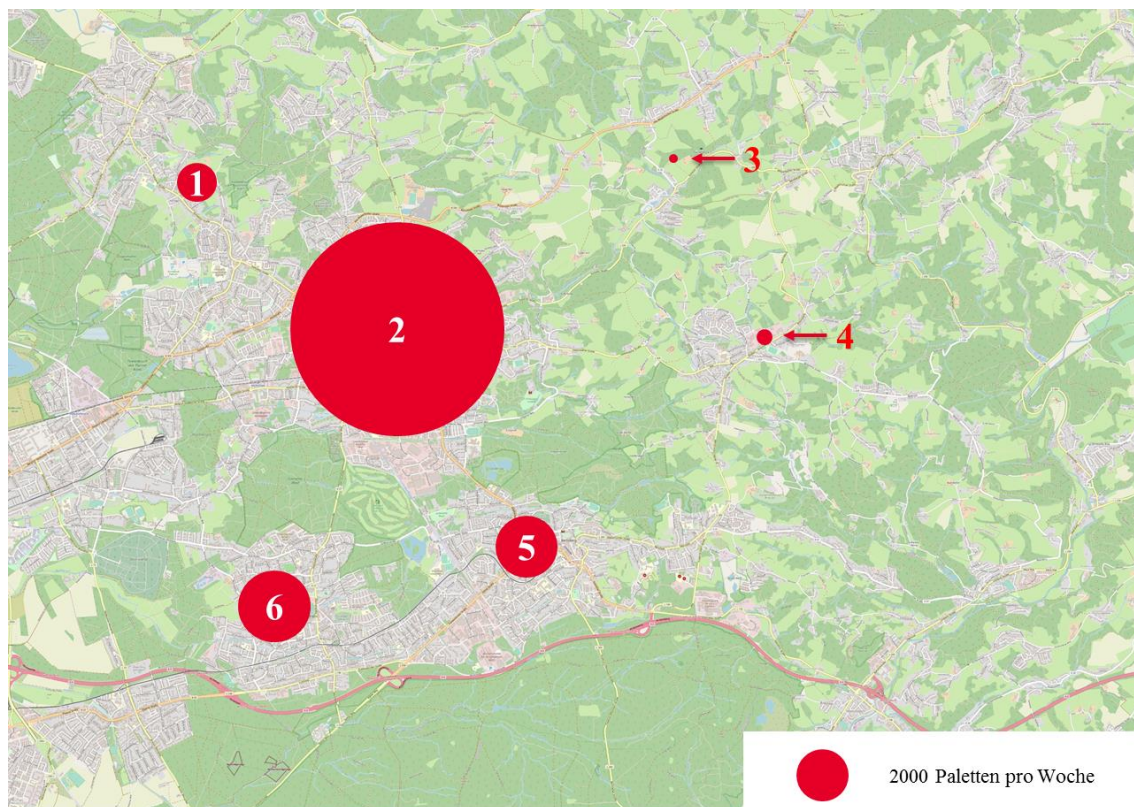


Abbildung 6: Anzahl Paletten Handel

Mit den verfügbaren Daten von KEP-Dienstleistern aus der Befragung und den Marktanteilen in Volumenprozent [11] wurde das Gesamtvolumen an Paketen hochgerechnet (Abbildung 7). Die Umrechnung des Paketvolumens in Paletten erfolgte auf Basis einer typischen Paketbox eines Lastenfahrads. Damit wurde ein Volumen von gut 1.000 Paletten pro Woche berechnet, davon etwa 25 % im Innenstadtbereich (Bezirk 2).

Für die berechnete Anzahl Paletten muss eine entsprechende Palettenrückführung erfolgen. In Deutschland wird der direkte Palettentausch (1:1-Tausch) bevorzugt vor den anderen Varianten wie nachträglicher Tausch oder Dienstleister [16]. Im Einzelnen ist dies jedoch mit den jeweiligen Kunden vorher abzuklären, da die Befragung größtenteils firmenspezifische Ergebnisse erbracht hat. Das rückzuführende Leergut wurde über den Umsatzanteil der Getränke und den Anteil an Mehrwegverpackungen des Lebensmitteleinzelhandels (LEH) abgeschätzt [17, 18].

Die Abfallentsorgung wird in der Industrie und im Handel größtenteils durch Entsorgungsunternehmen durchgeführt. Dabei kommen normalerweise Abfallcontainer zum Einsatz, die den Abfall nach Kategorien trennen und ggf. kompaktieren. Abfall lässt sich nur schwer palettieren und kann zu Hygieneproblemen führen, wenn die Transportmittel auch für andere Güter (z.B. Lebensmittel) verwendet werden sollen. Die Ab-

fallentsorgung eignet sich daher im ersten Schritt nicht für den Transport mittels Cargo-Cap.

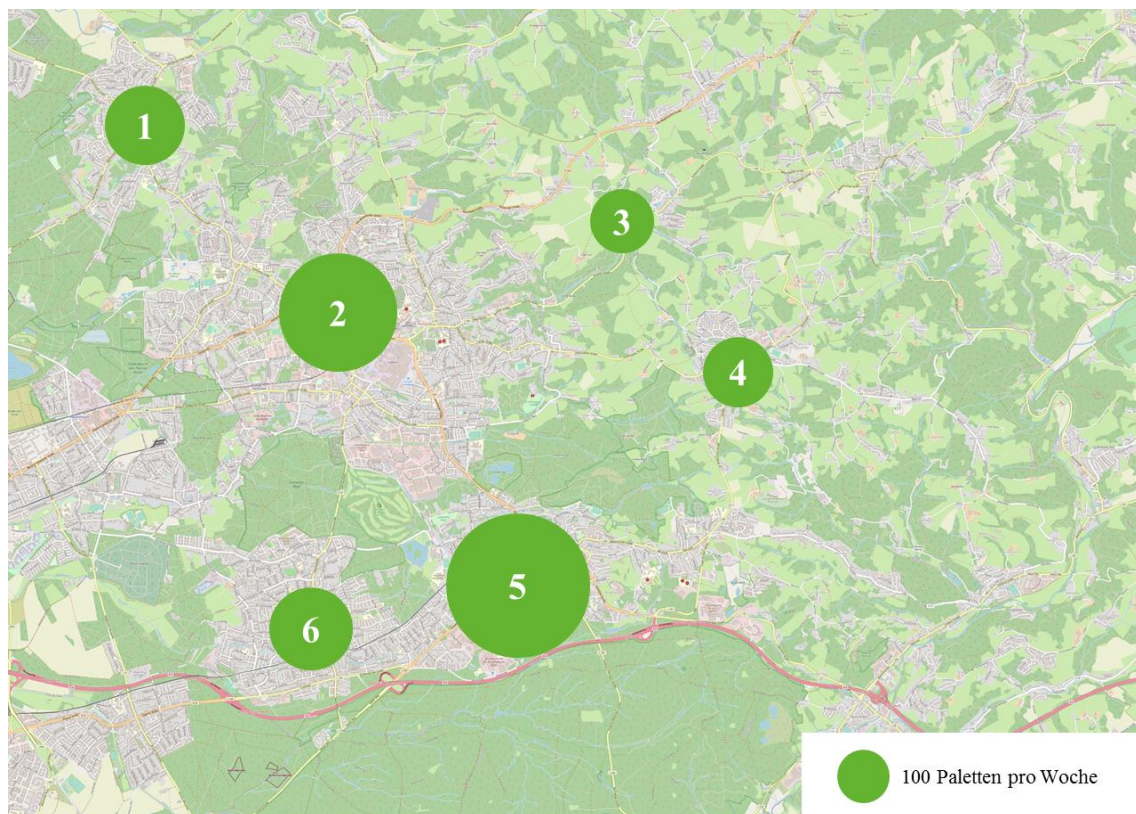


Abbildung 7: Anzahl Paletten KEP

Zur Bestimmung der Lieferflexibilität wurden die Ladungsträger und Palettenladehöhen abgefragt. Das wesentliche Palettenformat bei den betrachteten Industrieunternehmen ist das Europalettenformat (Mehrweg oder Einweg). Es kommen vereinzelt aber auch weitere Standardformate, z.B. Industriepaletten oder spezielle Palettenformate, z.B. Langpaletten, zum Einsatz. Palettenladehöhen, die in den Befragungen der Industrie bei Großunternehmen ermittelt wurden, liegen mehrheitlich bei über 1,75 m. Bei den KMU scheinen auch vermehrt geringere Palettenladehöhen zum Einsatz zu kommen, was aufgrund der spärlichen Datenlage jedoch überprüft werden müsste.

Palettentypen im Handel umfassen Ganzpaletten im Europaletten-Format, entsprechende Halb- und Viertelpaletten sowie Rollcontainer, Dollys und Rollys [19, 20, 21, 22]. Die Werte zur Palettenladehöhe, die aus den Befragungen und Beobachtungen des Handels gewonnen werden konnten, sind heterogen und reichen von der Palettenhöhenempfehlung CCG I (1,05 m) bei schweren Waren, die in Regale eingeräumt werden müssen, bis zu ca. 2 m bei leichten Gütern. Die normale Höhe von Display-Paletten im Handel liegt einer Studie zufolge bei 1,60 – 1,70 m (ECR Europe 1997) [24]. Dies deckt sich mit Daten der Befragung.

Ein Grund für große Palettenladehöhen ist vermutlich, dass durch eine Umstellung vom CCG-Ladehöhenstandard (1,05 m bzw. 1,65 – 1,95 m) zum EUL-Ladehöhenstandard (1,20 m bzw. 2,40 m) eine bessere Ausnutzung des LKW-Innenraums mit entsprechenden Einsparpotenzialen bei den Kosten möglich ist [23]. Einfluss auf die Palettenlade-

höhe hat primär der Transport. Generell ist daher ein Trend zur Ausnutzung der LKW-Höhe erkennbar. Weitere Einflüsse auf die Palettenladehöhe sind Kommissionierprozess, vorhandene Lagertechnik, Verpackungskosten und Filialbetrieb [24]. Insbesondere der letzte Punkt führt aus Handling-Gründen zu teilweise deutlich geringeren Palettenladehöhen in den Filialen des Handels.

2.4.3 Liefer- und Informationsbereitschaft

Wenn das CargoCap-System als reines Transportmittel eingesetzt wird, hat es keine wesentlichen Auswirkungen auf die Lieferbereitschaft. Allerdings können durch eine Lagerung im Güterverteilzentrum (GVZ) Konzepte der Just-in-Time-Anlieferung oder gebündelten Anlieferung realisiert werden. Dabei bieten sich für die Industrie folgende Möglichkeiten:

- Durch eine Verlagerung von Lagerplätzen in das GVZ kann Lagerplatz auf dem Werksgelände frei werden, der für andere Zwecke genutzt werden kann. Dies ist insbesondere für Unternehmen im Innenstadtbereich eine Option, da dort i.d.R. Platzmangel herrscht und keine Möglichkeit zur Erweiterung des Werksgeländes besteht. Für dieses Konzept hat in der Befragung lediglich ein Unternehmen Interesse angezeigt.
- Durch eine JIT-Belieferung bei Lagerung im GVZ können Güter produktionssynchron oder just-in-time direkt an die entsprechende Fertigungslinie angeliefert werden. Hier herrschte allgemein ein geringes Interesse bei den befragten Unternehmen, die anscheinend eine Vorratsbeschaffung als Bereitstellungskonzept bevorzugen.

Für die KEP-Dienstleister bieten sich folgende Möglichkeiten:

- Bei einer Verlagerung der Pakete aus dem Mikro-Depot in das GVZ kann das Mikro-Depot entsprechend klein dimensioniert werden (lediglich Umschlag der Pakete von Cap auf Lastenfahrrad). Die Anlieferung der Paketboxen müsste dazu auf Abruf vom GVZ erfolgen.
- Eine Bündelung von KEP-Lieferungen für kleine Einzelhändler im GVZ kann die Anzahl an Paketlieferungen reduzieren. Dies bietet sich insbesondere für Händler an, die zu einem Großteil durch Pakete beliefert werden. Konzepte mit LKW-Lieferungen existieren bereits, z.B. in charge der ABC-Logistik GmbH in Düsseldorf [25]. Mit CargoCap könnte die Lieferung gebündelt in Caps erfolgen. Ebenso könnten bei Versendern großer Paketmengen die Pakete gebündelt abgeholt und den KEP-Dienstleistern im GVZ übergeben werden.

Für die Sicherstellung der Informationsbereitschaft ist zunächst einmal die rechtliche Rolle des CargoCap-Betriebs zu klären (Spediteur, Frachtführer), und es müssen entsprechende Versanddokumente erstellt und Versicherungen abgeschlossen werden. Eine detaillierte Aufstellung der rechtlichen Regelungen und Versicherungen findet sich z.B. bei Voth & Hesse [26]. Um einen durchgängigen Informationsfluss vom Versender zum Empfänger und eine zeitnahe Informationsbereitschaft sicherzustellen, müsste weiterhin eine Verknüpfung mit den IT-Systemen der Versender, Versandspediteure

und Empfänger erfolgen (i.d.R. Warenwirtschaftssystem oder Produktionsplanungs- und -steuerungssystem). Hierzu müssten weitere Datenerhebungen bei den spezifischen Kunden erfolgen, da die IT-Systeme in hohem Maße firmenspezifisch sind.

3 Erarbeitung eines Planungskonzeptes (Arbeitspakete 3 und 4)

Das in der vorliegenden Studie zu untersuchende Transport-Konzept basiert auf dem von der CargoCap GmbH patentierten CargoCap-System, das an die vorliegende Transportaufgabe angepasst werden muss. Dieses System wurde im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsverbundes an der Ruhr-Universität Bochum mit Unterstützung des Ministeriums für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. D. Stein konzipiert und aus technischer, ökonomischer, ökologischer und juristischer Sicht bewertet [27, 28, 29, 30, 31, 32, 33]. Seitdem erfolgte mit der Unterstützung der Industrie die technische Weiterentwicklung durch die CargoCap GmbH, Bochum, den Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik der Ruhr-Universität Bochum sowie die S & P Consult GmbH (heute STEIN Ingenieure GmbH), Bochum bis zur inzwischen erreichten Einsatzreife.

3.1 Das CargoCap-System

Das CargoCap-System ist die 5., ergänzende Transportalternative zu Straße, Schiene, Wasser und Luft, um Güter von Konsolidierungszentren an der Peripherie von Städten oder Ballungsräumen in die einzelnen Stadtteile oder zu Städten, Großkunden, Logistikzentren etc. im Ballungsraum automatisiert durch unterirdische Fahrrohrleitungen schnell, wirtschaftlich, zuverlässig und umweltfreundlich zu transportieren. Es ist als eigenständiges, leistungsfähiges und problemlos erweiterbares System konzipiert, das betriebliche Rentabilitätsanforderungen erfüllt, sich einfach in traditionelle Verkehrssysteme und Logistikkonzepte implementieren (Abbildung 8) und schnell technisch und rechtlich ohne Verletzung von Bürgerinteressen realisieren lässt.

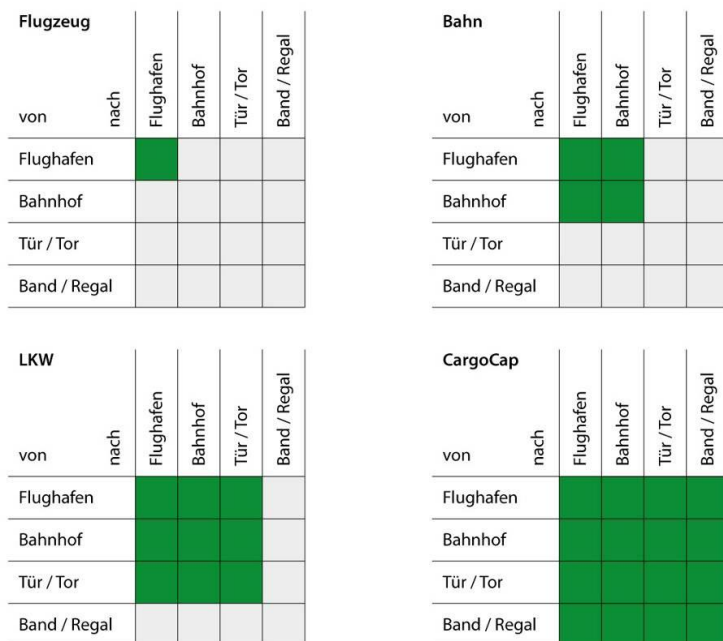


Abbildung 8: Einordnung von CargoCap in die traditionellen Transportverbindungen [Computergrafik: visaplan GmbH]

System und Aufgabe enden an den Schnittstellen zum Kunden (GVZ, Hubs, Einkaufscentren etc.), d. h. am Übergang der CargoCap-Fördertechnik zur Anschlusslogistik des Kunden.

Beim ursprünglichen CargoCap-System (www.cargocap.de) fahren in unterirdischen Rohrleitungen mit einem Innendurchmesser von nur 2,20 Meter unabhängig von Verkehrsstaus und Witterungsbedingungen vollautomatisch elektrisch angetriebene Transportfahrzeuge, die so genannten Caps, beladen mit jeweils zwei Ladungsträgern, in der Regel Euro-Paletten (EUL 1) mit den Abmessungen $B \times L \times H = 0,80 \text{ m} \times 1,20 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ (Abbildung 9, links).

Die Ladung der Caps wird an den Stationen bei Direktanschluss unmittelbar dem Empfänger zur Verfügung gestellt, z.B. an der Rampe von Warenhäusern oder punktgenau am Fließband einer Fabrik. Nur an diesen Stationen gibt es eine Verbindung zur Oberfläche. In Innenstädten können, je nach deren Struktur und Aufbau, die Güter darüber hinaus an einen oder an mehrere zentrale Punkte (City-Hub(s)) räumlich und zeitlich entzerrt geliefert werden. Von dort aus kann die Warenweiterverteilung mit modernen City-Logistikkonzepten, z.B. mit umweltfreundlichen E-Karren oder Lastenfahrrädern, an den in der Umgebung ansässigen Groß- und Einzelhandel erfolgen (Abbildung 1).

Zum Be- und Entladen der Paletten kommt herkömmliche Fördertechnik zum Einsatz. Die im Cap vorhandenen Rollenbahnen schließen sich direkt an Rollenbahnen der Stationen an. Vertikal- und/oder Horizontalförderer bringen dann die Paletten unmittelbar an ihr Ziel (Abbildung 9, rechts).

Der unterirdische Fahrweg des CargoCap-Systems (Fahrrohrleitungen) besteht aus Stahlbeton-Rohrleitungen, wie sie beim Bau von Kanalisationen in unseren Städten verwendet werden. Die Fahrrohrleitungen werden in bebauten Gebieten soweit wie möglich im öffentlichen Straßenraum neben, unter oder über vorhandenen Ver- und Entsorgungsleitungen, Strom- und Telekommunikationskabeln, U-Bahn- oder Straßentunnel und anderen Tiefbauwerken verlegt (Abbildung 10). Dies erfolgt umweltfreundlich, grabenlos (unterirdisch) nach dem Prinzip des Rohrvortriebs ohne dauerhafte Inanspruchnahme und Versiegelung von Flächen (s. Abschn. 3.2.1.3).



Abbildung 9: Transporteinheit (Cap) im Fahrrohr (links), automatisierte Be- und Entladung eines Caps über konventionelle Rollenbahnen (rechts) [Computergrafik: visaplan GmbH]



Abbildung 10: Positionierung der CargoCap-Fahrrohrleitung im öffentlichen Straßenraum neben bestehenden Infrastruktureinrichtungen [Computergrafik: visaplan GmbH]

Bei den **Caps** handelt es sich um auf Schienen geführte Zero-Emissionsfahrzeuge, deren Antrieb elektrisch über konventionelle Drehstrommotoren erfolgt. Sie besitzen eine aerodynamisch geformte Karosserie zur Erhöhung der betrieblichen Energieeffizienz durch Verringerung des aus der hohen Versperrung des Rohrquerschnitts resultierenden Luftwiderstands. Auf den Strecken bilden mehrere Caps Fahrverbände, in denen diese abstandsgeregelt in engen Abständen hintereinanderfahren. Auf diese Weise können die aerodynamischen Vorteile der Verbandsfahrt ausgenutzt und der betriebliche Energieverbrauch weiter gesenkt werden. Im vorliegenden Bericht wird von einem lichten Abstand der Caps innerhalb des Fahrverbandes von 4,0 m ausgegangen.

Die Höhe der Caps bestimmt in einem hohen Maße den Durchmesser der Fahrrohre, der einen entscheidenden Einfluss auf die Investitionskosten der gesamten Anlage hat. Deshalb sind die Caps als Tieflader konstruiert. Unterhalb der Paletten befindet sich neben einer höhenoptimierten Brücke (Tragkonstruktion) ein fest im Fahrzeug installierter Förderer, um die Paletten aus dem Cap herauszuschieben und diese bei einer automatisierten Übergabe innerhalb von Stationen an einen ortsfesten Förderer in der Station zu übergeben. Antriebe und Räder sowie weitere Technik der Caps sind vor bzw. hinter den zu transportierenden Paletten an den Brückenwiderlagern angeordnet, so dass sich diese Komponenten nicht auf die Höhe des Fahrzeugs auswirken. Die Caps rollen auf je nach Leistungsanforderung einzeln oder paarweise redundant angetriebenen Rädern und werden über separate horizontale Laufrollen geführt, wodurch sich der Bauraum für die Trag- und Führungskonstruktion in der Rohrleitung minimieren lässt [34].

Der **Antrieb** erfolgt über elektrische Drehstrommotoren, die in großer Vielfalt am Markt verfügbar und technisch ausgereift sind. Die robuste Konstruktion des Antriebs zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit, einen geringen Energieverbrauch, niedrige Anschaffungskosten sowie eine lange Lebensdauer bei geringem Wartungsaufwand aus. Zusätzlich gewährleistet das gewählte Antriebskonzept mit auf alle Räder verteilten Motoren eine gute Traktion und die paarweise angeordneten Umrichter eine hohe Betriebssicherheit. Die Antriebe sind so ausgelegt, dass sie die Caps dauerhaft mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s (36 km/h) antreiben können und darüber hinaus eine ausreichende Reserve aufweisen, damit beispielsweise einzelne Caps mit einem ausreichenden Beschleunigungsvermögen auch in einer Steigung von 3% zu einem anderen Fahrverband aufschließen können.

Die **Energieversorgung** der Caps erfolgt berührungslos und wartungsfrei über Übertragerköpfe, in die eine hochfrequente Wechselspannung aus zwischen den Schienen verlegten Leiterschleifen induziert wird. Frequenzumrichter, die durch den fahrzeugseitigen Industrie-PC gesteuert werden, formen diese Wechselspannung in eine andere Spannungs- und Frequenzebene um, die die stufenlos steuerbaren Drehstrommotoren zur Traktion benötigen.

Der **Leitstandsrechner** steht in einer Station und hat eine Bedienmöglichkeit. Er disponiert die aktuellen Transportaufgaben selbstständig ohne manuellen Eingriff. Im Normalbetrieb läuft das CargoCap-System vollautomatisch. Die Bedieneinrichtung wird aber in der Regel nur in der Inbetriebnahmephase und zum Aufspielen neuer Software auf die Caps eingesetzt.

Die **Steuerung** des Caps übernimmt ein fahrzeugseitiger Industrie-PC. Dieser verwaltet die Informationen, die er von der übergeordneten Betriebsleitetechnik, den umgebenden Caps und der Sensorik erhält und steuert auf dieser Basis die Hauptantriebe des Caps sowie die weiteren Komponenten an.

Die Caps kommunizieren untereinander und tauschen kontinuierlich ihre Fahrzeugzustandsdaten (Position, aktuelle Geschwindigkeit, Ziel, vorgesehene Fahrtrichtung bei Verzweigung etc.) aus. Auf dieser Basis wird kontinuierlich die zu fahrende Geschwindigkeit berechnet. Des Weiteren kann auf die gleiche Weise eine Abstandsregelung implementiert werden.

Die **Positionsermittlung** der Caps erfolgt unter Verwendung von RFID-Komponenten, wobei streckenseitig montierte Transponder als Wegmarken dienen. Die Caps lesen die Informationen der Transponder beim Vorbeifahren aus und referenzieren ihre Position. Auf Basis der eigenen Position und der Position der umgebenden Fahrzeuge regelt jedes Cap den Abstand zum vorausfahrenden Cap selbst. Als zusätzliche Rückfallebene werden optische Sensoren verwendet, die ständig den Abstand zum vorausfahrenden Cap überprüfen und beim Unterschreiten eines Mindestabstandes eine Verzögerung einleiten [35].

Als Redundanzebene zur Steigerung der Sicherheit können zusätzlich Abstandssensoren eingesetzt werden, die beim Unterschreiten eines Sicherheitsabstandes einen Nothalt auslösen. Wesentliche Voraussetzungen für die Verbandsbildung und -auflösung sind das von der CargoCap GmbH patentierte neuartige Weichenkonzept und die spezielle Gestaltung der Verzweigungen. Der Fahrweg ist passiv ausgeführt; im Bereich einer Weiche befinden sich streckenseitig keine bewegten Elemente. Das Cap übernimmt den aktiven Teil der Verzweigung und besitzt hierfür zwei Weichenmodule. Die darin enthaltenen Weichenarme greifen in neben dem Fahrweg montierte Führungsschienen ein. Auf diese Weise kann das Cap ohne Reduktion seiner Geschwindigkeit in die gewünschte Richtung ausscheren und nachfolgende Caps können die Verzweigung ohne Geschwindigkeitsverringeringung in jede gewünschte Richtung befahren [36, 37, 38 (Abbildung 11).

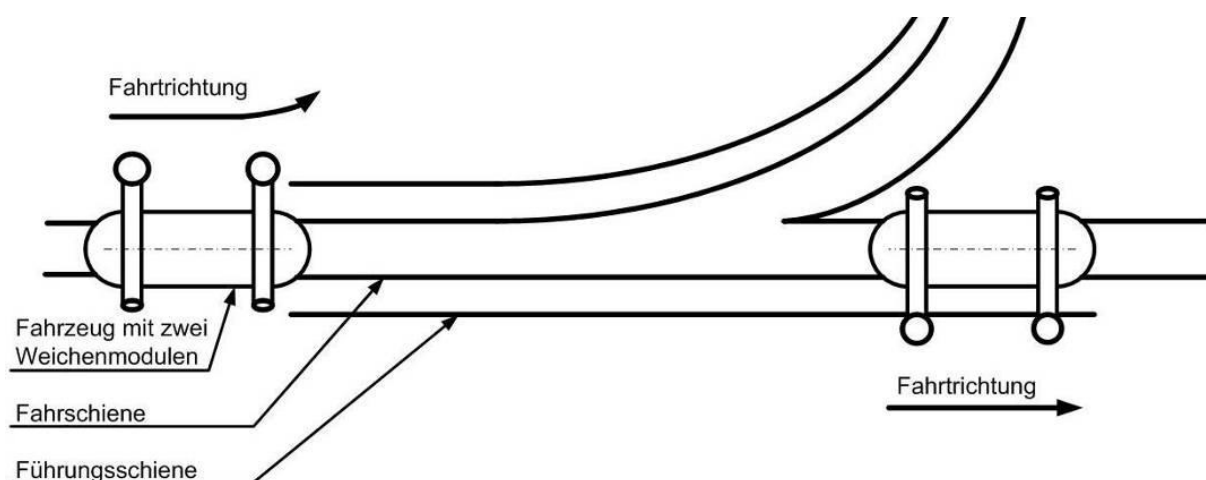


Abbildung 11: Prinzip der Verzweigungskonstruktion [37]

Für die im vorliegenden Anwendungsfall beschriebene Transportaufgabe konnte das beschriebene Grundprinzip dieses Systems mit einigen Anpassungen beibehalten werden.

Darüber hinaus wird im Abschnitt 6 eine Variante vorgestellt, bei der die Caps durch autonom fahrende Straßenfahrzeuge ersetzt werden. Diese als **CargoCapVan** bezeichnete Systemvariante basiert auf einer Untersuchung in Zusammenarbeit mit PIONEERING NeXt, Daimler AG [39]. Als Fahrzeuge werden serienmäßig hergestellte Transporter vom Typ Sprinter verwendet, die sich bereits mit einem elektrischen Antrieb auf dem Markt befinden und nur mit wenigen zusätzlichen Sensoren an das CargoCap-System anpassen lassen.

3.2 Dimensionierung und Trassierung der Anlage

3.2.1 Fahrrohrleitung

3.2.1.1 Konstruktive Gestaltung der Rohre

Der unterirdische Fahrweg des CargoCap-Systems besteht aus Rohrleitungen, wie sie in Kanalisationen für die Ableitung von Abwasser verwendet werden. Die Verlegung der Fahrrohrleitungen erfolgt in bebauten Gebieten in der Regel mit Hilfe des bemanneten Rohrvortriebes (siehe Abschnitt 3.2.1.3).

Grundsätzlich bieten sich Standard-Rohre mit kreisförmigem Innenquerschnitt an, die aus Stahlbeton in großen Stückzahlen in zahlreichen Fertigteilwerken in Deutschland gefertigt werden. Diese recht kostengünstigen Rohre für Abwassersammler und Kanäle haben Standard-Durchmesser bis zu 3,2 m mit Abstufungen in Schritten von 20 cm. Zwischendurchmesser (z.B. 3,10 m) sind selten, können aber bei großen Stückzahlen wirtschaftlicher sein als der nächstgrößere Durchmesser. Größere Rohre erfordern einen erhöhten Aufwand bei der Herstellung und beim Transport. Sie werden bei Bedarf meist in einer vor Ort zu errichtenden Feldfabrik produziert. Aus diesem Grunde stellen Rohre mit einem Innendurchmesser von 3,20 m keine technische, aber eine für den Rohrleitungsbau wirtschaftliche Grenze dar. Deshalb werden größere Durchmesser und Querschnitte in der Regel mit Tunnelvortriebsverfahren, wie z.B. dem Schildvortrieb mit Tübbingausbau [40], aufgeföhren.

Sämtliche Einwirkungen infolge des Eigengewichts der Einbauten sowie aus dem Fahrbetrieb werden über die in einem Abstand von 1000 mm vorgesehenen, tangential angeordneten Befestigungsschienen in das Rohr übertragen, die mit der inneren Oberfläche des Stahlbetonrohres bündig verlegt und entsprechend der Beanspruchung rückverankert sind.

Diese Konstruktion erlaubt es, tangential betrachtet, an jeder beliebigen Stelle des Rohres Trag- und Führungselemente zu befestigen und ebenso beliebig an jeder Stelle des Umfanges Leitungen für die Stromversorgung, Kommunikation und Sicherheitseinrichtungen sowie Trag- und Führungselemente anzuordnen. Diese Flexibilität ist aus bautechnischen Gründen erforderlich, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich die Rohre während des Vortriebs um einige Zentimeter um ihre eigene Achse drehen und damit sich die Position bereits eingelegter Befestigungspunkte verändern kann.

Abbildung 12 zeigt ein mögliches Befestigungssystem mit Halfenschienen, mit dem die erforderlichen Einbauten im Rohr angebracht werden können.



Abbildung 12: Flexible Befestigung von Einbauten im Stahlbetonrohr mittels Halfenschienen [31]

Die Rohrverbindungen müssen während des Vortriebes abwinkelbar sein, da in dieser Bauphase der Rohrstrang auch planmäßige Kurven durchfahren muss und darüber hinaus unvermeidbare Steuerbewegungen der Vortriebsmaschine zu berücksichtigen sind. Diese Rohrverbindungen sind auch hinsichtlich der Dichtheit gegen Grundwasser als dauerhaft flexibel ausgelegt, d.h. die Abwinkelbarkeit bleibt während des Betriebes erhalten. Sollten sich bei den Vortriebsrohren unter der dynamischen Belastung durch die Caps, insbesondere in den ersten Betriebswochen, noch Setzungen und damit zusätzliche Abwinkelungen in den Rohrverbindungen einstellen, bleiben die Rohre in ihrer Funktionsfähigkeit (Dichtheit) vollständig erhalten. Die Befestigung des Fahrweges ist dabei so konstruiert, dass ein einfaches Nachjustieren die Lage der Schienen im zulässigen Toleranzbereich gewährleisten kann.

Analog zum Abwasserrohr werden die Fahrrohre je nach örtlicher Situation radial von außen durch Erddruck, Wasserdruck und Straßen- bzw. Eisenbahnverkehr belastet. Hinzu kommen während des Vortriebes verfahrensbedingt erhebliche Einwirkungen in Längsrichtung infolge der Vortriebskraft. Für all diese Belastungen stehen moderne und sichere Berechnungs- und Bemessungsverfahren zur Verfügung, um eine Überbeanspruchung der Rohre beim Bau und Betrieb auszuschließen.

In Abweichung vom Abwasserrohr werden die Fahrrohre im vorliegenden Anwendungsfall von innen nicht durch Wasserfüllung oder Innen-Wasserdruck belastet. Stattdessen sind Einwirkungen anderer Herkunft zu berücksichtigen, insbesondere aus dem Fahrbetrieb mit den Fahrzeugen. Eine Bemessung der Rohre ist auch für diese Belastungen aber problemlos auf der Grundlage bestehender Normen und Regelwerke möglich.

Der Transport dieser Rohre erfolgt unproblematisch auf der Straße per Tieflader (Abbildung 13) als Konvoi in der Nacht mit Begleitung (BFR 3). Diese Transportart gehört zur Routine der Fertigteilwerke und ist kein wesentlicher Kostenfaktor (ca. 300,00 EUR pro Rohr). Auch das resultierende Gewicht (bei Stahlbetonrohren bis zu

32 t bei einer Baulänge von 4 m) kann im Werk und auf der Baustelle mit Portal- oder Mobilkränen gehandelt werden.



Abbildung 13: Beispielhafter Transport von Stahlbetonrohren DN 3200 mit Tiefladern liegend (links) und stehend (rechts)

Anforderung an die Dichtigkeit

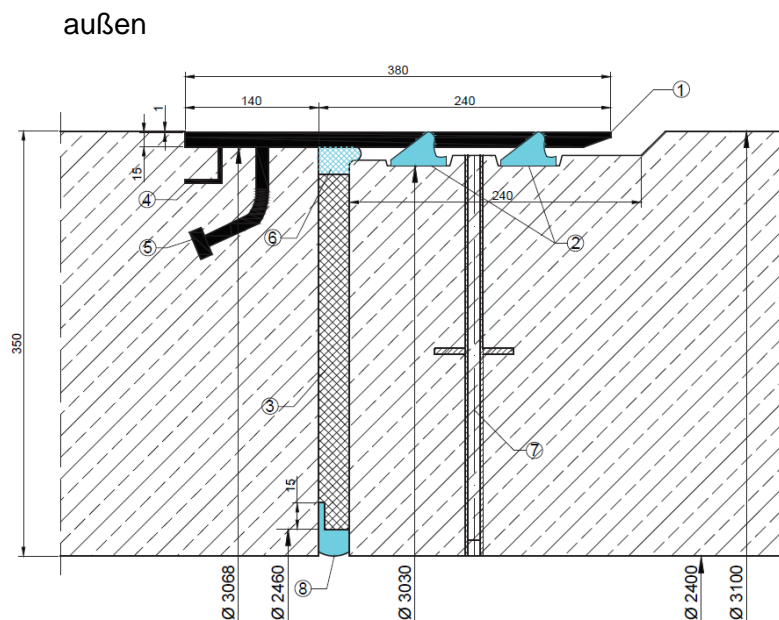
Alle Rohrleitungsteile einschließlich der Rohrverbindungen und Dichtungen müssen so ausgelegt, hergestellt und geprüft werden, dass die Dichtigkeit gegen Außendruck aus Grundwasser während der Baudurchführung (Bauzustand) und gesamten planerischen Nutzungsdauer (Betriebszustand) unter Berücksichtigung der Langzeiteigenschaften des Dichtmittels sowie möglicher Bewegungen der Rohrverbindungen unter den jeweiligen Belastungen sichergestellt ist.

Ein wichtiger Aspekt der Abdichtung ist die Festlegung des erforderlichen Grades der Dichtigkeit, den das fertige Bauwerk aufweisen muss. Da für Fahrrohrleitungen diesbezügliche Anforderungen noch fehlen, werden nachfolgend die diesbezüglichen Anforderungen der Deutschen Bahn AG herangezogen. Diese fordert beispielsweise in der Vorschrift für Eisenbahntunnel Ril 853 [41] die Einhaltung der Dichtigkeitsklasse 3 für Tunnelbereiche und Räume, die das Feuchtigkeitsmerkmal „Kapillar durchfeuchtet“ aufweist. Dies bedeutet gemäß Ril 853 [41] (Zitat):

„Die Laibung des Ausbaus muss so dicht sein, dass an den Innenseiten nur vereinzelt und örtlich begrenzt handfeuchte Stellen auftreten. Als handfeuchte Stellen sind solche anzusehen, an denen zwar eine Durchfeuchtung der Laibung zu erkennen und aufgelegtes Lösch- oder Zeitungspapier sich infolge Feuchtigkeitsaufnahme verfärbt, aber kein Tropfwasser austritt“

Diese Anforderungen werden auch an die Fahrrohrleitungen des CargoCap-Systems gestellt und über die Betonrezeptur und -verarbeitung sowie entsprechende Dichtsysteme der Rohrverbindungen aus der Abwassertechnik erfüllt. Darüber hinaus müssen Vortriebsrohre und deren Verbindungen im Bauzustand sogar einem Außendruck durch Gleit- und Stützmittel bis 5 bar standhalten.

Abbildung 14 zeigt eine Rohrverbindung mit einem hohen Dichtheitsanspruch. Die Hauptdichtung (2) ist doppelt ausgeführt, wobei beide Dichtungen von innen über das Prüfrohr (7) und den Zwischenraum jederzeit prüfbar sind. Im Bedarfsfall kann über das Prüfrohr (7) Dichtmaterial in den Zwischenraum eingepresst werden.



innen

- ① Stahlführungsring 380x15 mm aus S 355 J2
- ② GRS Dichtung aus Elastomer nach DIN EN 681- 1
- ③ Druckübertragungsring gem. Statik in OSB
- ④ Winkeleisen 30x30x3mm aus S 235 JR
- ⑤ Kopfbolzen 125x10mm aus S 235 JR
- ⑥ Blockprofil
- ⑦ Prüf-/ Entlüftungrohr
- ⑧ Innerer Fugenverschluss 30x45 mm (ID- Profil)

Abbildung 14: Beispiel für eine Rohrverbindung mit hohem Dichtheitsanspruch
(Quelle: Berding Beton GmbH, Schermbeck)

3.2.1.2 Abmessungen der Rohre

Ein entscheidender Parameter für die Kompatibilität mit der vor- und nachlaufenden Logistik ist die **Ladehöhe** für die Paletten (siehe Abschnitt 2.4.2).

Von der „Centrale für Organisation für Ladungs- und Ladehöhen von Europaletten in der Lebensmittelwirtschaft“ sind Ladungshöhen der Paletten mit dem Grundmaß $B \times L = 0,80 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ unter der Abkürzung CCG genormt. Darüber hinaus gibt es eine Europäische Palettenladehöhenempfehlung der „ECR Europe“ unter der Abkürzung EUL [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**]:

- CCG I: 1.050 mm
- CCG II: 1.650 mm bis 1.950 mm
- EUL 1: 1.200 mm
- EUL 2: 2.400 mm

Die Beladungshöhe der Paletten bestimmt die Höhe der Caps und damit den Innendurchmesser der Fahrrohrleitung. Er ist der entscheidende Faktor für die baulichen Investitionskosten, die mit steigendem Fahrrohrdurchmesser deutlich zunehmen.

In der vorliegenden Studie werden die nachfolgend aufgeführten vier deutlich unterschiedlichen Rohrrinnendurchmesser betrachtet und verglichen. Die Angabe des Innendurchmessers erfolgt als Nennweite mit dem Kurzzeichen DN. Sie ist eine Kenngröße für Kreisquerschnitte in der Größenordnung Millimeter:

- DN 3000 für Caps mit Karosserie und 1,95 m hohen Paletten (Abbildung 15)
- DN 2800 für Caps ohne Karosserie und 1,95 m hohen Paletten (Abbildung 16)
- DN 2200 für Caps mit Karosserie und 1,20 m hohen Paletten (Abbildung 17)
- DN 2000 für Caps ohne Karosserie und 1,20 m hohen Paletten (Abbildung 18)

Mit diesen Nennweiten wird das Spektrum der genormten Ladungshöhen der Paletten mit Ausnahme von EUL 2 vollständig abgedeckt [42].

Bei einer Beladungshöhe von 2,40 m (EUL 2) überschreitet der dann erforderliche Innendurchmesser den Größtwert für werksmäßig hergestellte Rohre. Deshalb wird diese Ladungshöhe nachfolgend nicht betrachtet (s. Abschnitt 3.2.1.1).

Die Paletten mit einer Höhe von 1,95 m werden im Cap quer positioniert, d.h. mit ihrer langen Seite (1,20 m) quer zur Fahrtrichtung. Die dadurch breitere Aufstandsfläche verhindert ein Umkippen der Paletten auch bei dynamischen Kräften in Kurven. Die Paletten mit einer Höhe von 1,20 m können im Cap problemlos längs orientiert werden, d.h. mit ihrer langen Seite in Fahrtrichtung. Um dieselbe Transportmenge pro Cap zu realisieren, müssen in diesem Fall drei statt zwei Paletten geladen werden.

Bei den Abmessungen ist bereits berücksichtigt, dass die Caps über eine unter den Paletten angeordnete Fördereinrichtung verfügen, um eine automatische Be- und Entladung zu ermöglichen.

Bei den Caps mit Karosserie ist vorausgesetzt, dass die Paletten in einem rundum geschlossenen Fahrzeug mit Schiebetüren transportiert werden. Falls im vorliegenden Anwendungsfall auf die Karosserie verzichtet werden kann, sind Vortriebsrohre mit einem um 20 cm reduzierten Innendurchmesser verwendbar.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wird der Durchmesser des Rohres nicht festgelegt. Vielmehr werden alle vier Rohrdurchmesser als Alternativen betrachtet, wobei der größere Innendurchmesser der Rohre DN 3000 zwar höhere Investitionskosten verursacht, aber auch die Möglichkeit eröffnet, Paletten mit einer Beladungshöhe von 1,95 m in einem geschlossenen Cap zu transportieren. Damit können alle heute üblichen Paletten des Handels (EUL 1, CCG I und CCG II) problemlos transportiert werden. Eine Änderung der Beladungshöhe und damit eine Änderung der Handhabung der Paletten im Warenlager oder im Verkaufsraum ist nicht erforderlich, wodurch die Akzeptanz des CargoCap-Systems wesentlich erhöht wird.

Sollen lediglich 1,20 m hohe Paletten (EUL 1) transportiert werden, reicht ein Rohr mit einer Nennweite von 2.000 mm (Cap ohne Karosserie) bzw. von 2.200 mm (Cap mit Karosserie), was die Investitionskosten für die Strecke erheblich verringert. Dabei muss aber in Kauf genommen werden, dass nicht alle heute üblichen Paletten transportiert werden können und eine Umstellung in den Warenlagern der Anschlussler erfolgen muss, um die zusätzlich erforderlichen Paletten händeln zu können. Dafür sind die niedrigeren Paletten besser stapelbar und es passen zwei Paletten übereinander in einen Standard-Lkw. Die von der HSD ermittelte Anzahl Paletten (s. Abschnitt 2.4) ist unabhängig von der Beladungshöhe, so dass zu einem unbekanntem Prozentsatz Paletten enthalten sind, deren Höhe zwischen 1,20 m und 1,95 m liegt. Bei diesen Paletten muss die Ladung einer Palette auf 2 Paletten verteilt werden, deren Höhe 1,20 m nicht übersteigt. Damit erhöht sich die Anzahl der Paletten gegenüber den Angaben im Abschnitt 2. Die Anzahl der erforderlichen Caps muss dagegen nicht vergrößert werden, da die kleineren Paletten leichter sind und dafür Caps konstruiert werden können, die eine niedrigere Bauhöhe haben und so lang sind, dass sie drei statt zwei Paletten laden können.

Ein kleiner Fahrrohrdurchmesser im Nennweitenbereich DN 2000/DN 2200 ist nicht nur aus ökonomischer, sondern auch aus bautechnischer Sicht vorteilhaft, u.a. durch:

- Mehr Möglichkeiten der Linienführung (engere Kurven, geringere Trassenbreite im Untergrund, geringerer Abstand zu vorhandenen Leitungen und Bauwerken)
- Keine Begrenzung der Bauausführung auf hoch spezialisierte Baufirmen
- Spätere Ergänzung eines zweiten parallelen Fahrrohres zur Kapazitätserhöhung ist einfacher oder überhaupt nur realisierbar
- Geringere Tiefenlagen sind bautechnisch möglich
- Geringerer Platzbedarf für die Baustelleneinrichtung (z.B. kleineres Hebezeug, kleineres Rohrlager etc.)
- Geringerer Platzbedarf für die Start- und Zielbaugruben für den Rohrvortrieb

Inwieweit auf die Karosserie der Caps verzichtet werden kann, muss im Einzelfall geklärt werden. Es werden ohnehin fast alle Paletten vollständig mit einer reißfesten Folie umwickelt, die die transportierte Ware vor Feuchtigkeit und Verschmutzung schützt.

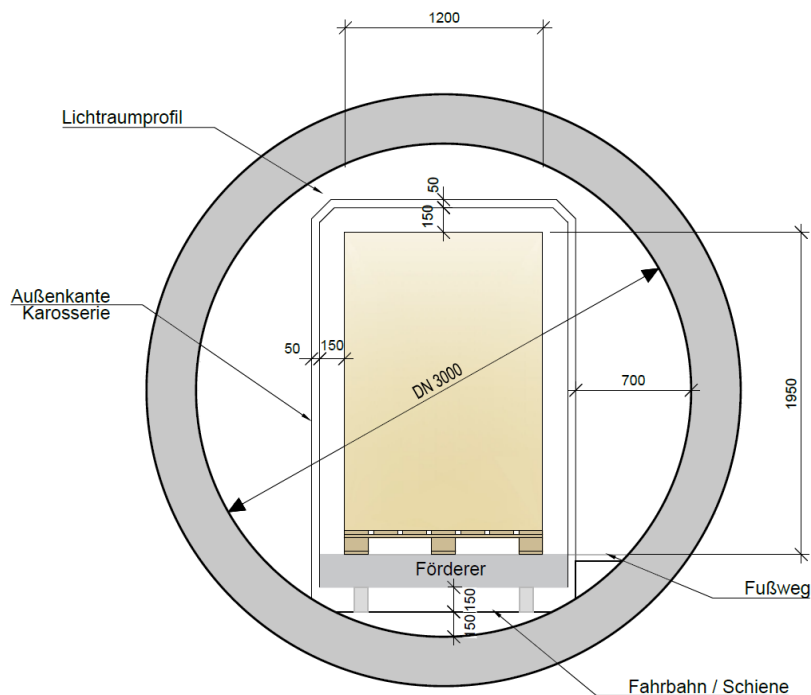


Abbildung 15: Vortriebsrohr DN 3000 mit geschlossenem Cap und Palette mit einer Höhe von 1,95 m (ohne Darstellung der Sicherheitseinrichtungen und Komponenten der Streckenausstattung)

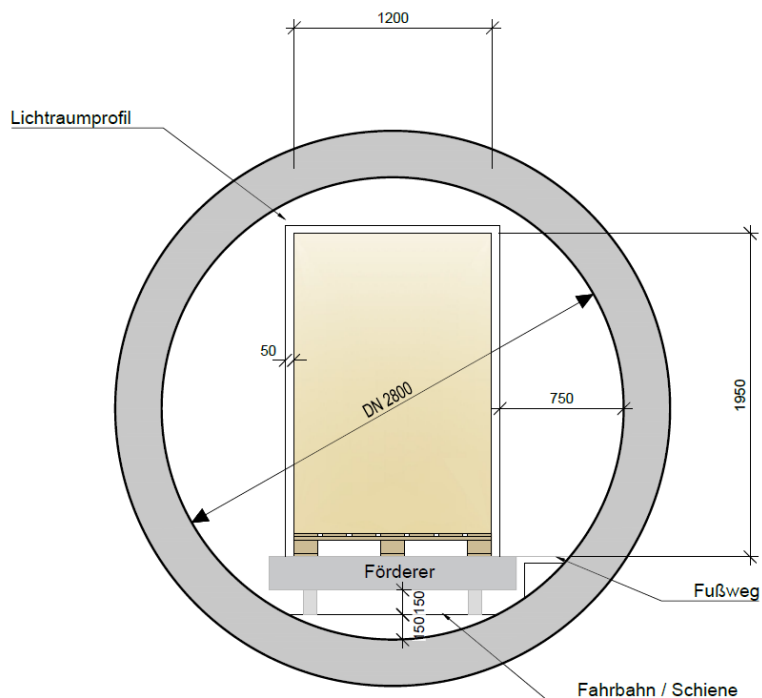


Abbildung 16: Vortriebsrohr DN 2800 mit offenem Cap und Palette mit einer Höhe von 1,95 m (ohne Darstellung der Sicherheitseinrichtungen und Komponenten der Streckenausstattung)

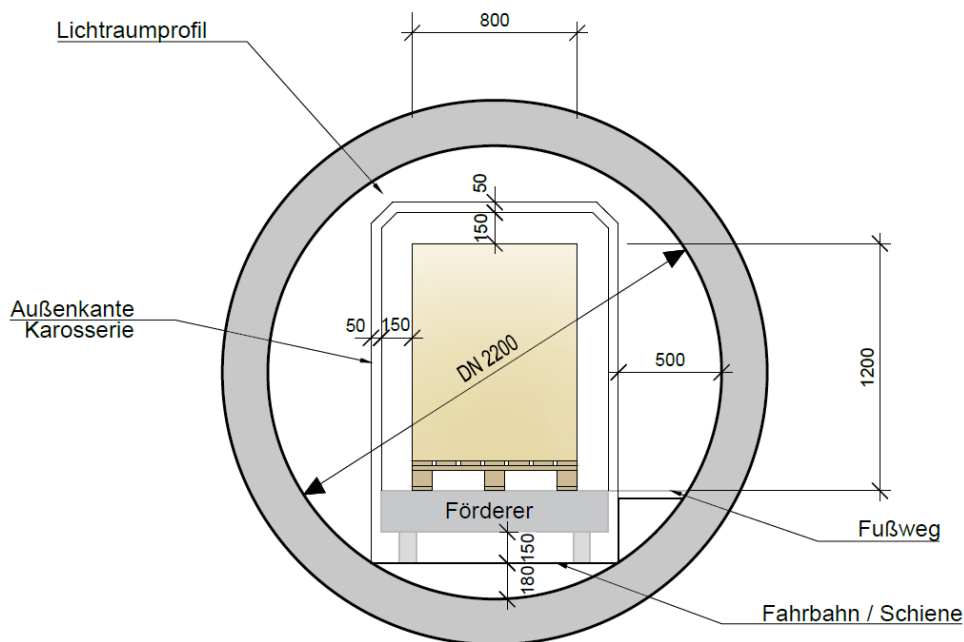


Abbildung 17: Vortriebsrohr DN 2200 mit geschlossenem Cap und Palette mit einer Höhe von 1,20 m (ohne Darstellung der Sicherheitseinrichtungen und Komponenten der Streckenausstattung)

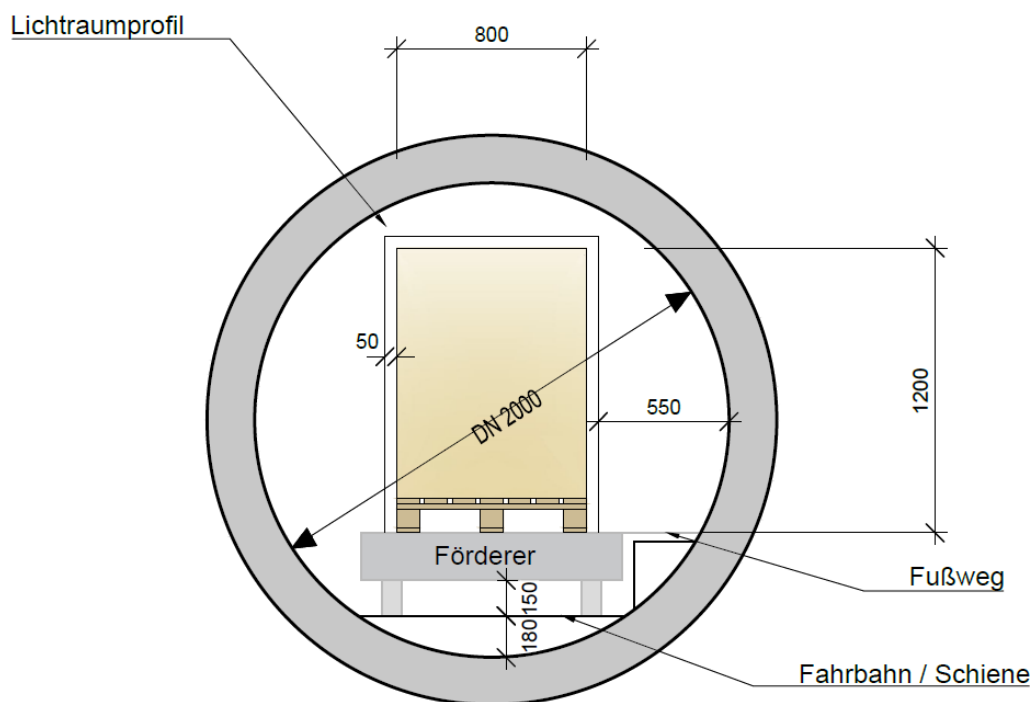


Abbildung 18: Vortriebsrohr DN 2000 mit offenem Cap und Palette mit einer Höhe von 1,20 m (ohne Darstellung der Sicherheitseinrichtungen und Komponenten der Streckenausstattung)

Die Tabelle 2 zeigt die beiden in der vorliegenden Untersuchung betrachteten Varianten der Beladungshöhe der Paletten und die jeweils erforderliche Nennweite der Rohre.

Tabelle 2: Untersuchte Rohrinne Durchmesser und maximale Palettenhöhe

Maximale Palettenhöhe	Erforderliche Nennweite	
	Mit Karosserie (geschlossenes Cap)	Ohne Karosserie (offenes Cap)
1,20 m	DN 2200	DN 2000
1,95 m	DN 3000	DN 2800

3.2.1.3 Verlegung

Die Fahrrohrleitungen werden in bebauten Gebieten soweit wie möglich im öffentlichen Straßenraum neben, unter oder über vorhandenen Ver- und Entsorgungsleitungen, Strom- und Telekommunikationskabeln, U-Bahn- oder Straßentunnel und anderen Tiefbauwerken verlegt.

Für die Verlegung der Fahrrohrleitungen kommen die im Rohrleitungsbau üblichen Bauverfahren infrage:

- Offene Bauweise
- Halboffene Bauweise
- Geschlossene Bauweise – Rohrvortrieb

In bebauten oder ökologisch sensiblen Bereichen erfolgt die Verlegung vorwiegend grabenlos nach dem Prinzip des Rohrvortriebs [43]. Dies gilt auch für den hier vorliegenden Anwendungsfall, weshalb die anderen oben aufgeführten Verlegemethoden nicht im Detail beschrieben werden.

Beim Rohrvortrieb werden von einem Startschacht aus mit Hilfe einer Hauptpresstation vorgefertigte Vortriebsrohre durch den Baugrund bis in einen Zielschacht vorgetrieben. Der anstehende Boden oder Fels wird an der Ortsbrust mechanisch abgebaut und durch den vorgetriebenen Rohrstrang nach über Tage abgefördert. Eine steuerbare Schildmaschine, die dem ersten Rohr vorgeschaltet ist, ermöglicht den genauen Vortrieb in gerader oder gekrümmter Linienführung (Abbildung 19).

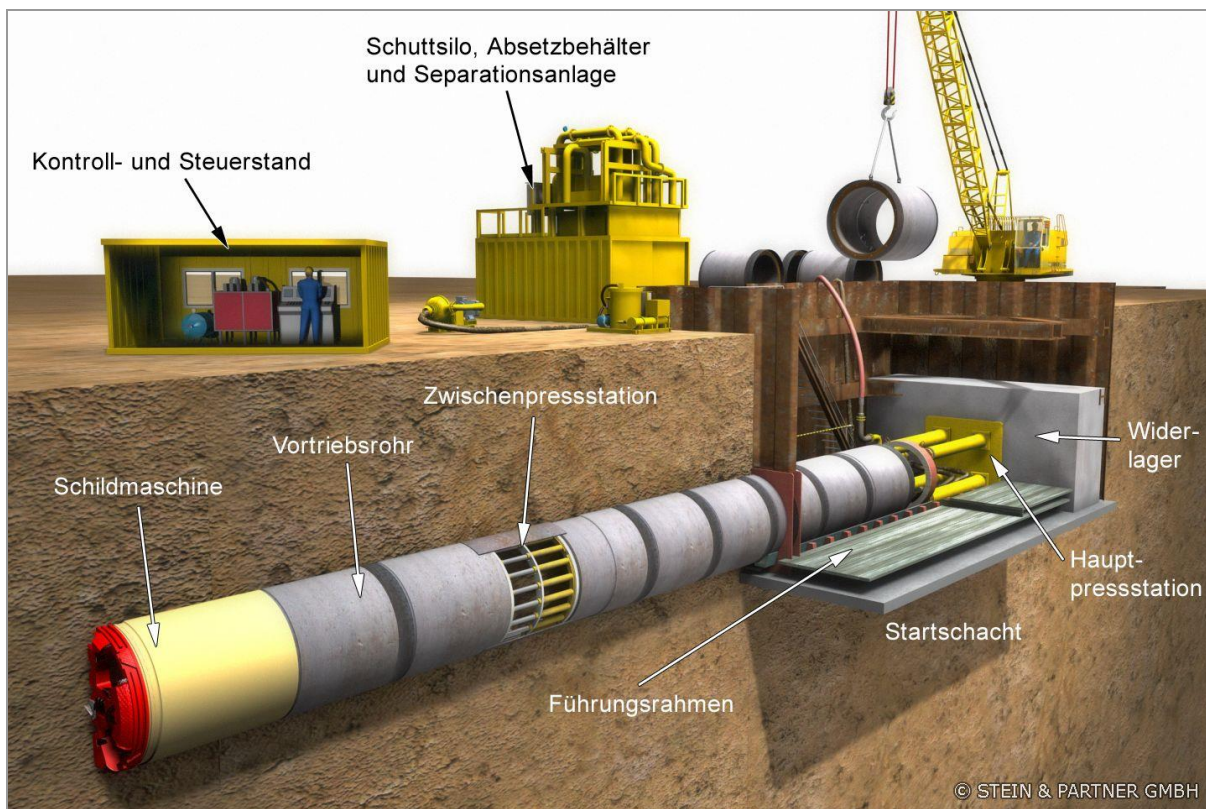


Abbildung 19: Prinzipdarstellung des gesteuerten Rohrvortriebs [43]

Das Rohrvortriebsverfahren hat sich heute zu einem Standardverfahren für die Verlegung von Rohrleitungen insbesondere in der Abwassersparte etabliert. Ausgestattet mit moderner Hard- und Software können auch Rohre mit großen Innendurchmessern (bis ca. 3,20 m) vorgetrieben werden. Dabei stellen inzwischen planmäßige Kurven, S-Kurven und auch Raumkurven sowohl vermessungs- als auch ausführungstechnisch keine Probleme mehr dar. Enge Kurvenradien unter 250 m bei großen Rohrdurchmessern erfordern zwar einen hohen Erfahrungsschatz der ausführenden Firma und einen ggf. etwas höheren finanziellen Aufwand, sind aber unter Anwendung spezieller Rohrverbindungen (z.B. hydraulische Fuge [44]) und moderner Überwachungssysteme (z.B. CoJack [45, 46]) sicher ausführbar.

Im Sinne eines wirtschaftlichen und insbesondere umweltschonenden Vortriebs wird generell das Erreichen einer großen Vortriebslänge von einem Startschacht aus angestrebt, da insbesondere die Herstellung von Schachtbauwerken einen erheblichen Kostenfaktor bei der Verlegung von Leitungen mit Hilfe des Rohrvortriebs darstellt. Derzeit werden bereits Vortriebslängen von mehr als 1200 m in diesem Nennweitenbereich realisiert.

Die Vorteile des Rohrvortriebs sind:

- Geringer Oberflächenbedarf – örtlich und zeitlich begrenzt auf die Start- und Zielbaugruben (jeweils nur wenige Monate)
- Geringe Störung der Anwohner sowie des ruhenden und fließenden Verkehrs

- Vermeidung von Schäden an angrenzenden Bauwerken, Bäumen, Bewuchs, Leitungen und Grundwasser
- In nahezu jeder Tiefenlage, Geologie und Hydrogeologie einsetzbar
- Keine Grundwasserabsenkung während der Bauzeit erforderlich
- Kurvenfahrten und Langstreckenvortriebe sind möglich
- Hohe Zielgenauigkeit durch präzise, computergestützte Steuerungssysteme
- Kostengünstig mit hoher Vortriebsgeschwindigkeit (4 km pro Jahr und Schildmaschine).

3.2.1.4 Innenausbau

Die Fahrrohrleitung wird mit Trag- und Führungsschienen, der Energieversorgung, der Informationstechnik sowie RFID-Transpondern zur Ortung der Fahrzeuge ausgestattet (s. Abschnitt 3.1).

Die beiden parallelen Schienen werden untereinander mit Schwellen aus einer Blechkonstruktion verbunden, damit sie stets einen gleichbleibenden Abstand aufweisen. Die Schwellen werden wiederum an den Halfenschienen (Abbildung 12) im Rohr befestigt. Für die Schienen werden Vollprofile verwendet, die im Querschnitt mit Eisenbahnschienen vergleichbar sind. Mit einer Spurweite von 800 mm dienen sie der Tragfunktion und Führung der Caps in der Rohrleitung.

Zwischen den Schienenprofilen wird eine Linienleiterschleife verlegt, die über eine Einspeisevorrichtung mit einer hochfrequenten Wechselspannung beaufschlagt wird und wiederum eine Spannung in die Übertragerköpfe der Fahrzeuge induziert. Die Länge eines Linienleiterschleifenabschnittes ist von dem Energiebedarf der Fahrzeuge abhängig. So sind die Einspeiseabschnitte in Steigungsbereichen und Beschleunigungsabschnitten deutlich kürzer als in ebenen Abschnitten, da hier deutlich mehr Energie durch die Caps aufgenommen wird. Eine Ringleitung, die entlang der Strecke führt und innerhalb der Rohrleitung verlegt wird, verbindet die einzelnen Einspeisevorrichtungen (Eseg) und versorgt diese mit der Spannungsebene 400 V. Die Ringleitung wiederum wird durch Transformatorstationen gespeist, deren gegenseitiger Abstand in Abhängigkeit der Leistungsaufnahme der Caps entlang der Strecke festgelegt ist.

Die Transformatorstationen wandeln die Spannung des Werksstroms in 400V-Dreiphasenwechselspannung um (Abbildung 20).

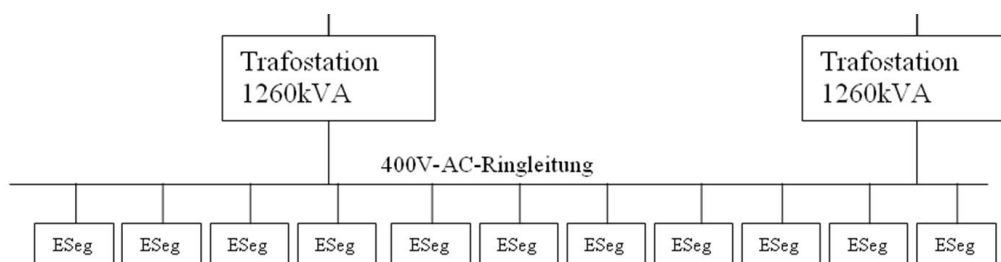


Abbildung 20: Prinzipdarstellung der Energieversorgung des CargoCap-Streckennetzes [31]

- CargoCap-Fahrzeug mit
- RFID-Antenne (Ortsinformation)
 - Übertragerkopf (Energieübertragung)
 - W-LAN-Antenne (Datenübertragung)

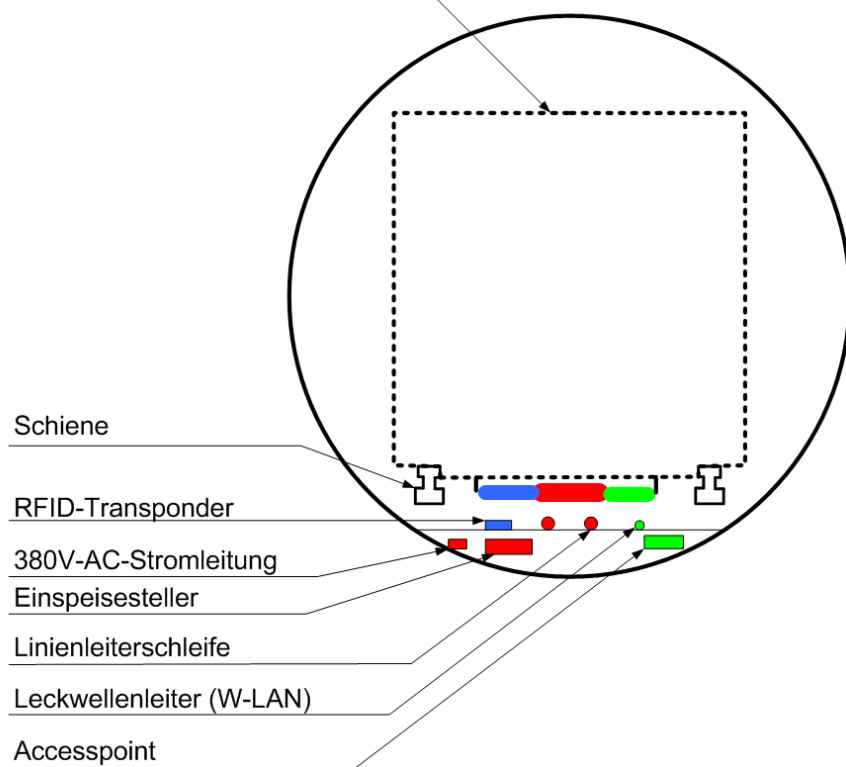


Abbildung 21: Anordnung der einzelnen Komponenten der Streckenausstattung im Rohrquerschnitt [31]

Die Fahrzeuge kommunizieren untereinander und mit der übergeordneten Betriebsleittechnik über ein WLAN-Tunnelfunksystem. Hierbei stellen Access-Points mit je zwei angeschlossenen Leckwellenleitern, die entlang der Strecke verlegt sind und ein linienartiges Kommunikationsnetz aufbauen, einzelne Kommunikationsbereiche dar. Diese wiederum sind mittels marktüblicher Netzwerkkomponenten ausreichender Bandbreite untereinander vernetzt.

Die Anordnung der einzelnen Komponenten der Streckenausstattung im Rohrquerschnitt ist in Abbildung 21 dargestellt.

3.3 Streckenführung und Stationen

3.3.1 Linienführung und Stationsdaten

Die Linienführung der aus unterirdischen Fahrrohrleitungen bestehenden Strecken des CargoCap-Systems orientiert sich an den im Abschnitt 2.4 aufgeführten Gütermengen. Als wichtigste Relationen ergeben sich daraus die Verbindungen des Güterverteilzentrums (GVZ) mit der Innenstadt und Anschließen aus der Industrie. Um möglichst viele Kunden mit hohem Transportbedarf in einer ersten Ausbaustufe anzubinden und die übrigen Nutzer ggf. in weiteren Ausbaustufen hinzuzufügen, besteht das geplante Streckennetz entsprechend Abbildung 22 aus den folgenden Strecken:

- **Zentrale Hauptstrecke zwischen dem GVZ und der Innenstadt** (blaue durchgehende Linie)
Diese Strecke nutzt zwischen der Frankenforster Straße und dem Refrather Weg über drei Kilometer die Trasse der stillgelegten Bahntrasse. Die dargestellte Schleife in der Innenstadt wird nur im Gegenuhrzeigersinn befahren.
- **Zweigstrecke nach Bensberg**
Der Abzweig befindet sich bei km 2,2
- **Zweigstrecke nach Gronau**
Der Abzweig befindet sich bei km 4,1
- **Zweigstrecke nach Duckterath**
Der Abzweig befindet sich bei km 5,1
- **Zweigstrecke nach Strundepark**
Der Abzweig befindet sich bei km 6,4
- **Nebenstrecke nach Refrath**
Diese Strecke führt unabhängig von der Hauptstrecke vom GVZ direkt nach Refrath

Auf dem Lageplan (Abbildung 22) sind die Stadtteile Bergisch Gladbachs mit ihren Einkaufszentren und zahlreichen Geschäften des Einzelhandels sowie die beiden großen Industriegebiete West und Zinkhütte gelb markiert. Grün markiert sind Vorschläge für Standorte der CityHubs (Microdepots) am westlichen Rand der Innenstadt, am Strundepark und in Bensberg.

Sowohl für das Güterverteilzentrum (GVZ) als auch für das City-Hub sind noch keine konkreten Flächen vorgesehen. Für das GVZ gelten Suchräume im Einzugsbereich der Autobahn und im BAST-Umfeld (GVZ 1, GVZ 2 oder GVZ 3). Für das City-Hub gelten Suchräume im Zentrum sowie im Gewerbegebiet Gohrsmühle.

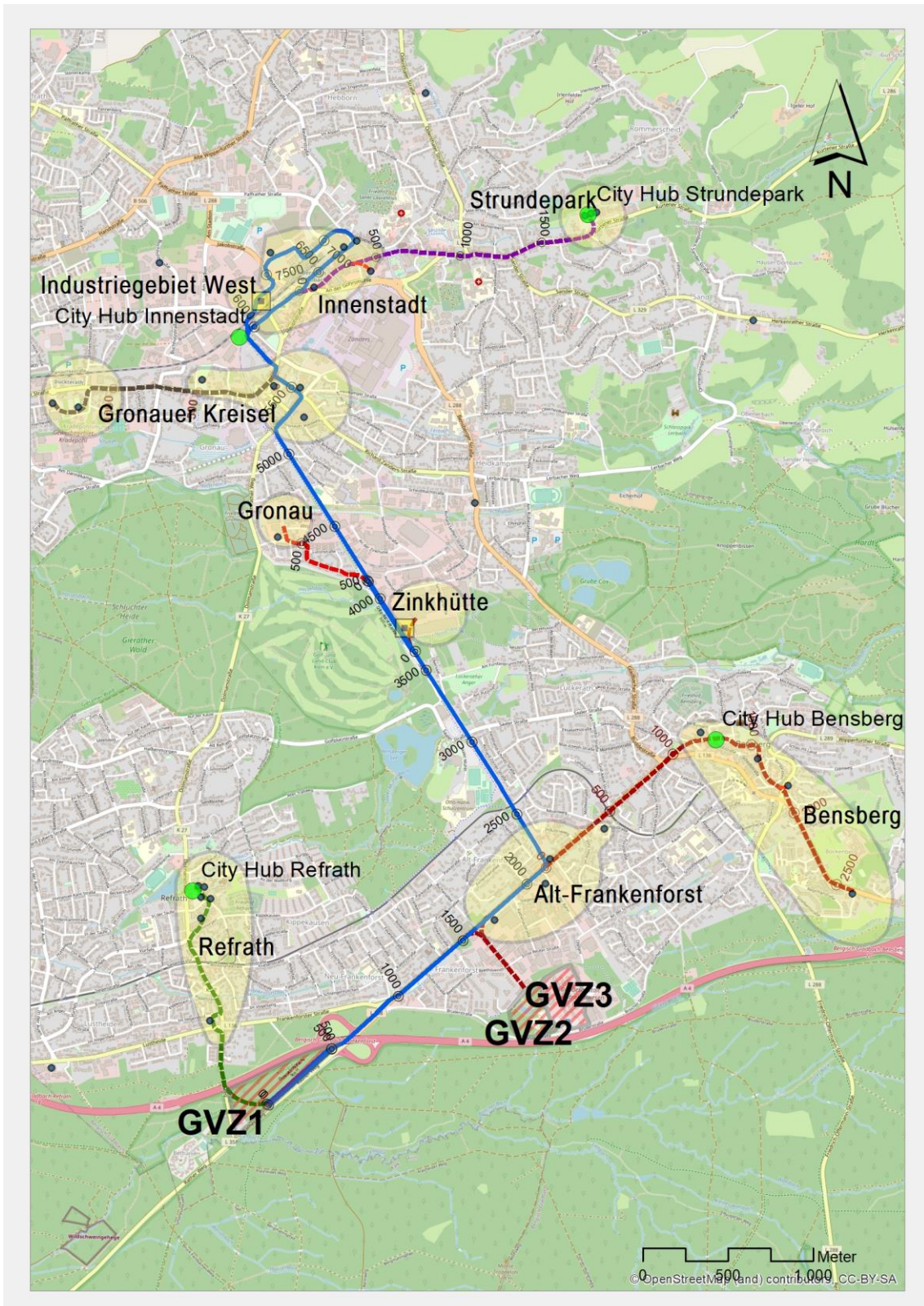


Abbildung 22: CargoCap-Streckennetz mit der Hauptstrecke, den Zweigstrecken und einer Nebenstrecke

Die gewählte Linienführung aller Strecken führt durch ein weitgehend ebenes Gelände, so dass stärkere Steigungen mit mehr als 3% Längsneigung weitgehend vermieden werden. Etwa drei Kilometer der Hauptstrecke verlaufen unterhalb der stillgelegten Bahnstrecke (Abbildung 23).



Abbildung 23: Stillgelegte Bahnstrecke

Die Zweig- und Nebenstrecken bleiben in der betriebswirtschaftlichen Betrachtung und Bewertung zunächst unbeachtet. Es erfolgt eine Konzentration auf die zentrale Hauptstrecke zwischen GVZ und der Innenstadt mit den besonders verkehrstarken Industriegebieten, die als Pilotstrecke für den weltweit erstmaligen Einsatz des CargoCap-Systems dient.

3.3.2 Betrachtungen zu Baugrund und Baufeld entlang der Trasse

Die gewählte Trassenführung liegt in einem geologisch komplexen Gebiet. Gemäß den Angaben im geologischen Kartenwerk [47, 48] werden verschiedenste Baugrundtypen durchquert (Abbildung 24). Im Untergrund entlang der vorläufig geplanten Trasse sind in für das Projekt relevanter Tiefe folgende geologische Schichten zu erwarten:

- Sand-, Ton- und Schluffsteine des Devons
- Kalksteine des Oberdevons
- Tone, Schluffe, Sande, z.T. mit Braunkohle des Tertiärs
- Terrassenablagerungen (Sande und Kiese) des Quartärs
- Flugsande des Quartärs

Innerhalb der Stadtgebiete Bergisch-Gladbach, Bensberg und Refrath ist zudem damit zu rechnen, dass die natürlichen Böden zum großen Teil durch künstliche Auffüllungen ersetzt oder bedeckt sind.

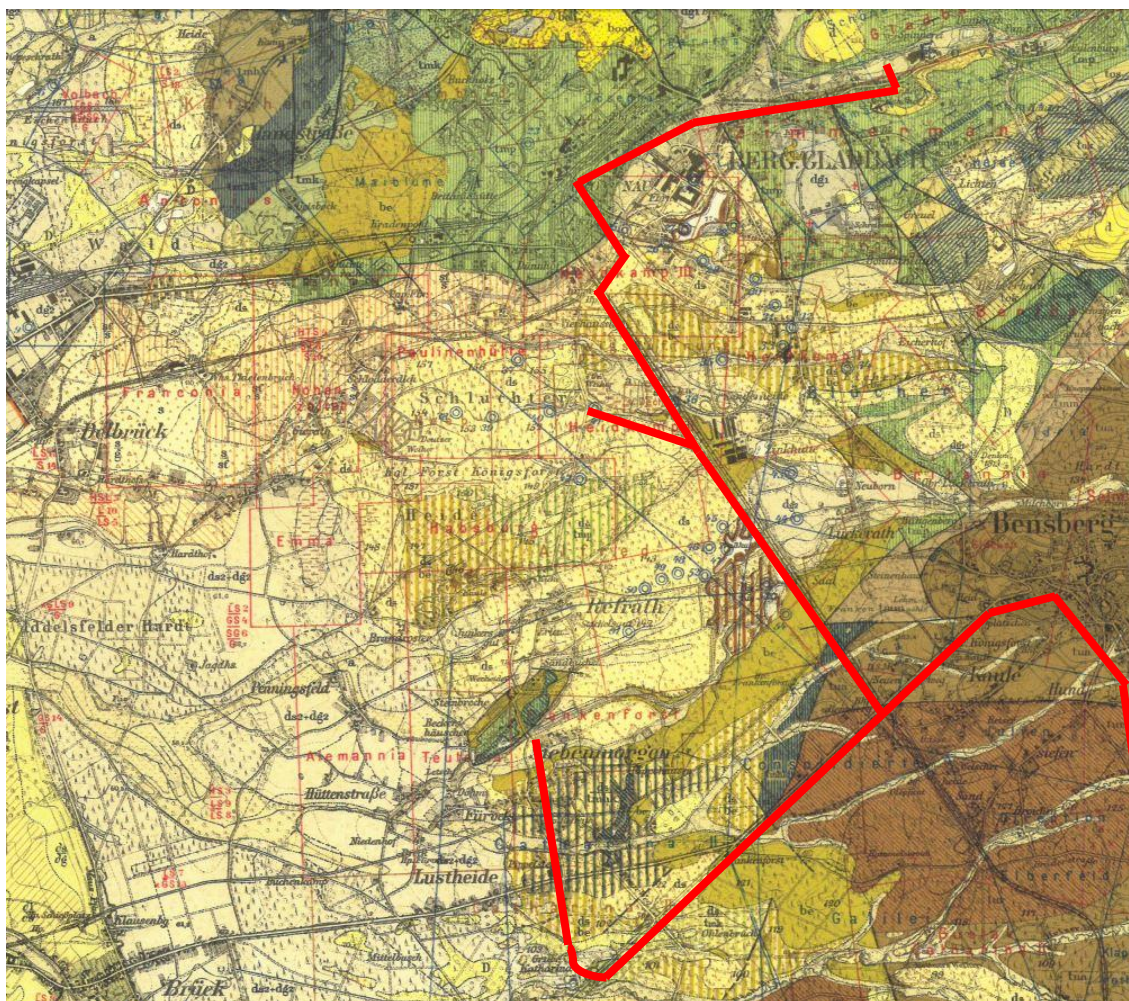


Abbildung 24: Ausschnitt aus der Geologischen Karte [48] mit grob skizzierter Trasse (in rot)

Eine Recherche frei zugänglicher Bohrungsdaten über das Bohrdatenportal des Geologischen Dienstes Nordrhein-Westfalen hat an zwölf Bohrungen die sehr unterschiedlichen Baugrundverhältnisse bestätigt [49].

Es sind demnach die verschiedensten Baugrundtypen, von hartem Festgestein, ggf. mit Karsterscheinungen, über bindige Verwitterungsschichten des Felses, bindige und organische Lockergesteine bis hin zu kohäsionslosen Sanden und Kiesen im Untergrund der Trasse zu erwarten.

Bisher liegen keine genauen Daten zum Grundwasserstand im Untersuchungsgebiet vor. Im Informationssystem ELWAS-Web des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW [50] sind jedoch mehrere aktive Grundwassermessstellen in der Nähe zur geplanten Trasse verzeichnet. Die Trasse quert von Süden nach Norden die Bachläufe Frankenforstbach, Saaler Mühlenbach, Hasselbach und Strunde. Es ist daher ebenfalls mit stark wechselnden Grundwasserverhältnissen und bereichsweise sehr niedrigen Flurabständen im Projektgebiet zu rechnen.

Die technische Durchführbarkeit der Vortriebsarbeiten für die CargoCap-Fahrrohrleitung ist auch bei den wechselhaften Baugrundverhältnissen gegeben.

3.3.3 Layout der Strecken

Grundsätzlich können die Strecken des CargoCap-Netzes ein- oder doppelspurig ausgebaut werden. Die Abbildung 25 zeigt die beiden diesbezüglich zur Verfügung stehenden Varianten des Streckenlayouts.

Die obere Darstellung ist die Prinzipskizze einer durchgehend doppelspurigen Strecke mit zwei Fahrrohrleitungen, die von den Caps jeweils nur in eine Richtung befahren werden. Standardmäßig wird der Links- oder Rechtsverkehr festgelegt, von dem aber bei Bedarf über die in definierten Abständen angeordneten doppelten Spurwechsel abgewichen werden kann.

Bei der darunter dargestellten Variante wird auf langen Streckenabschnitten nur eine Fahrrohrleitung verlegt, die bidirektional befahren wird. Um dennoch eine Begegnung (Kreuzung) zwischen zwei in unterschiedliche Richtung fahrenden Verbänden zu ermöglichen, müssen einzelne Streckenabschnitte doppelspurig ausgebaut werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen langen „Doppelspurinseln“, auf denen sich zwei Verbände ohne anzuhalten begegnen können, und wesentlich kürzeren Kreuzungsstationen, bei denen einer der sich begegnenden Verbände anhalten und die Durchfahrt des entgegenkommenden Verbandes abwarten muss. Bei Kreuzungsstationen muss der zweispurige Abschnitt zwischen zwei Weichen nur etwas länger sein als die Länge eines Verbandes (ca. 200 m), während bei einer Doppelspurinsel mindestens 700 m erforderlich sind.

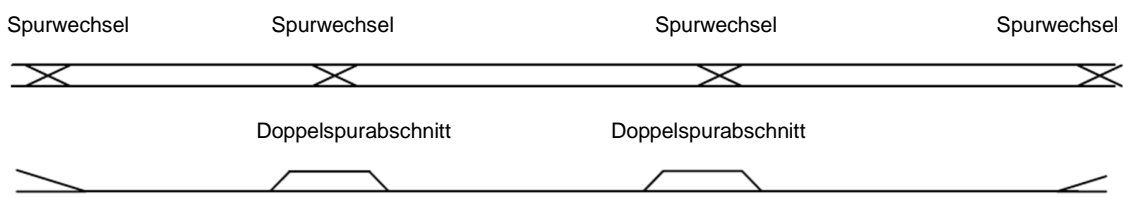


Abbildung 25: Doppelspur mit beidseitigem Spurwechsel (oben) und Einzelspur mit Doppelspurabschnitten (unten)

Beide Varianten haben ihre Vor- und Nachteile, von denen die wichtigsten nachfolgend zusammengestellt sind:

Vorteile der Doppelspurvariante:

- Flexiblere Betriebsführung (kein Begegnungsverkehr)
- Bereits für zukünftig steigende Transportmengen ausgelegt
- Möglichkeit von Eilfahrten im Bedarfsfall (Vorrangfahrt mit Überholung anderer Caps unter Nutzung der Gegenspur)
- Betriebliche Redundanz bei Ausfall/Sperrung des Betriebs in einer Fahrrohrleitung

Beim zuletzt genannten Vorteil einer durchgehenden Doppelspur ist zu beachten, dass die Notwendigkeit einer Sperrung einer Fahrrohrleitung aus den folgenden Gründen sehr unwahrscheinlich ist:

- Die Strecke besitzt keine beweglichen Teile (der Stellmechanismus der Weichen befindet sich im Fahrzeug).
- Die elektronische Ausstattung besteht aus Transpondern mit nur einer festen Information (kein streckenseitiges Signalsystem).
- Die Fahrzeuge sind antriebstechnisch redundant ausgeführt. Jede Achse (ggf. sogar jedes Rad) ist getrennt angetrieben (eigener Motor, eigener Umrichter etc.). Wenn der Antrieb einer Achse bzw. eines Rades ausfällt, kann der Antrieb der anderen Achse bzw. der anderen Räder die Beförderung bis zur Zielstation mit verminderter Leistung übernehmen.
- Die Leistungsfähigkeit jedes Caps ist so ausgelegt, dass es ein liegengebliebenes anderes Cap in der Rohrleitung weiterschieben kann.

Vorteile der Einzelspurvariante:

- Erheblich geringere Baukosten
- Kürzere Bauzeit
- Erheblich schmalere Trasse

Einen Sonderfall stellt die Schleife der Hauptstrecke in der Innenstadt dar, da sich dort alle drei Vorteile der Einzelspurvariante mit den ersten beiden Vorteilen der Doppelspurvariante kombinieren lassen.

Da sich, wie das im Abschnitt 3.4 vorgestellte Betriebskonzept zeigt, der gesamte Betrieb im vorliegenden Anwendungsfall einspurig mit Kreuzungsstationen abwickeln lässt, wird in allen nachfolgenden Untersuchungen diese kostengünstige Variante des Streckenlayouts vorausgesetzt.

3.3.4 Fördertechnisches Layout der Stationen

Grundsätzlich ist vorgesehen, bei jedem Anschließer eine eigene Station zu errichten. Alle Stationen werden im vorliegenden Anwendungsfall unterirdisch angeordnet, weil diese bei den beteiligten Unternehmen am besten integriert werden können und städtebaulich am wenigsten stören. Im Einzelfall kann bei der Planung geprüft werden, ob technisch oder logistisch sich eine ausnahmsweise oberirdische Platzierung anbietet.

In den Stationen sollen einzelne Caps anhalten und automatisch ent- und beladen werden. Dazu wird ein Stationsgrundmodul verwendet, das je nach umzuschlagender Palettenanzahl beliebig oft aneinandergereiht werden kann.

Die Abbildung 26 zeigt das Grundmodul mit den erforderlichen Fördereinrichtungen.

Bei der von der SSI-Schäfer GmbH entwickelten Fördertechnik in den Stationen werden ausschließlich erprobte und bewährte Elemente verwendet, die entsprechend den jeweils speziellen Anforderungen zu Standardmodulen kombiniert werden. Damit besteht in den Stationen kein größeres Risiko als bei konventionellen Anlagen gleicher Größenordnung.

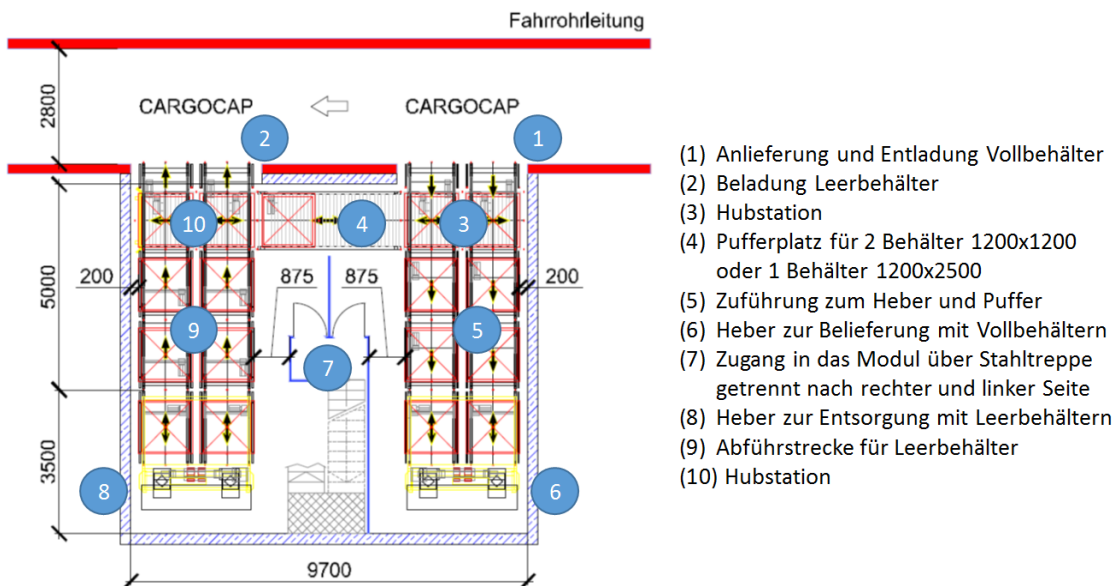


Abbildung 26: Standardmodul für die Stationen

Ein Grundmodul ist jeweils mit zwei Andockstellen für Caps ausgerüstet, wobei in der Regel die in Fahrtrichtung erste zum Entladen (Anlieferung) und die zweite zum Beladen vorgesehen ist. Dabei ist zu beachten, dass auch an den Stationen des Handels mit vorwiegend Wareneingang Caps beladen werden müssen, beispielsweise mit Leergut, Rückläufern, Verpackungsmaterial oder zumindest mit leeren Paletten.

Im Quertransport (Be- und Entladen) werden die Behälter oder das Behälterpaar auf den parallelen Kettenförderern mit einer Geschwindigkeit von ca. $v = 0,3 \text{ m/s}$ zum Heber transportiert. Der Abstand der äußeren Wange des Förderers zur Wand beträgt aufgrund der erforderlichen Sensorik (Lichtschranken, etc.) ca. 200 mm. Der Heber transportiert die Behälter oder das Behälterpaar per Vertikaltransport ($v = 1,0 \text{ m/s}$) auf das gewünschte Niveau (beispielsweise im Lager), von wo aus diese nach Ausfahrt aus dem Heber z.B. von einem Stapler abgenommen werden können.

Die Heber, als Doppelheber ausgeführt, können analog zu den Caps zwei Paletten aufnehmen. Auch wenn die Förderhöhe bei tief liegender Fahrrohrleitung sehr groß ist, stellt die Heberleistung bis 20 m Höhenunterschied keinen Engpass dar und ist somit für die Bemessung der Fördertechnik in den Stationen nicht maßgebend. In der Tabelle 3 ist der gesamte Zyklus eines Hebers dargestellt.

Das gegenüberliegende Heberpaar transportiert die Paletten des Wareneingangs (beispielsweise Leergut, Verpackungsmaterial, Stapel leerer Paletten) per Vertikaltransport nach unten. Auf den parallelen Kettenförderern werden die Paletten zur Andockstelle der Caps für den Wareneingang (zweite Position in Fahrtrichtung) gefördert und dort an das mit geöffneter Tür bereitstehende leere Cap übergeben.

Tabelle 3: Zyklus der Heber für eine Förderhöhe von 6 bis 8 Metern

Vorgang	Dauer	
Einfahrt eines Palettenpaares inkl. Positionierung	10 s	
Vollhub (Hubgeschwindigkeit 1m/s)	ca. 6-8 s	
Ausfahrt eines Palettenpaares (2m à 0,3m/s)	7 s	
Leerhub (Hubgeschwindigkeit 1m/s)	ca. 6-8 s	
Vollständiger Zyklus	33 s	
Palettenpaare pro Stunde / pro Takt	104/13	

Der gesamte Zyklus des Ent- und Beladens eines Caps an der Standardstation ist in der Tabelle 4 zusammengefasst. Tabelle 5 und Tabelle 6 enthalten die Zyklen für das reine Entladen (ohne Beladen) und das reine Beladen (ohne Entladen) eines Caps.

Nachdem das leere Cap die Beladestation erreicht hat, kann während des Beladevorgangs bereits das nächste an der Entladestation andocken. Der beschriebene Gesamtzyklus benötigt somit ca. 69 s bei Dauerbetrieb. Aufgrund der eingebauten Pufferplätze und der parallelisierten Abläufe ist der kontinuierliche Transport der Behälter sichergestellt. Über den Pufferplatz auf dem Rollenförderer parallel zur Fahrtrichtung der Caps können nach Bedarf „Überholvorgänge“ zur Änderung der Be- und Entladereihenfolge stattfinden.

Für das Betriebskonzept wird somit von den folgenden Standzeiten der Caps an den Stationen ausgegangen:

- Nur Entladen: 44 s
- Nur Beladen: 44 s
- Ent- und Beladen: 94 s (bei Dauerbetrieb: 69 s)

Die Förderung der Paletten zwischen Hubstation und Heber bzw. umgekehrt erfolgt gleichzeitig mit dem Vorrücken der Caps, so dass kein Einfluss auf den Zyklus des Ent- und Beladens der Caps besteht.

Für die Berechnung der Behandlungsdauer der Caps in den Stationen und der Umlaufzeiten innerhalb des Betriebskonzeptes wird auf der sicheren Seite stets ein Ent- und ein Beladevorgang mit ca. 90 Sekunden angesetzt.

Das beschriebene Standardmodul kann je nach Leistungsanforderung „in Reihe geschaltet“ werden. Dabei fährt das Cap immer die jeweils vorderste freie Station an, so dass die Be- und Entladevorgänge parallelisiert werden können und der Gesamtmaterialfluss nicht unterbrochen wird.

Tabelle 4: Zyklus des Ent- und Beladens eines Caps an der Standardstation

Vorgang	Dauer		
Entladen (39 s)			
Einfahrt 4 m à 1m/s	4 s		
1m Schleichfahrt mit 0,1m/s zum Positionieren	10 s		
Öffnen der Tür am Cap	5 s		
Transport des/der Behälter(s) aus dem Cap (3m à 0,3m/s)	10 s		
Schaltzeit/Positionierzeit Endanschlag auf der Förderstrecke	3 s		
Reserve	7 s		
Vorrücken (30 s)			
Hochfahren Klappstücke (kann ggf. entfallen)	5 s		
Vorrücken um 5 m mit 1m/s (Tür bleibt offen)	5 s		
1m Schleichfahrt mit 0,1m/s zum Positionieren	10 s		
Senken Klappstücke (kann ggf. entfallen)	5 s		
Reserve/Schaltzeiten	5 s		
Beladen (25 s)			
Transport des/der Behälter(s) ins Cap (3m à 0,3m/s)	10 s		
Schaltzeit/Positionierzeit Endanschlag im Cap	3 s		
Schließen der Tür	5 s		
Reserve	7 s		

träger, den Zugang über die Stahltreppe und die gesetzl. vorgeschriebenen Fluchtwegbreiten (mind. 875 mm), so dass pro Station eine lichte Grundfläche von 8.500 mm x 9.700 mm benötigt wird (Abbildung 26).

Sollten im hier nicht betrachteten Sonderfall die Heber in größerer Entfernung von der Straße z.B. innerhalb einer Halle angeordnet werden, lassen sich die Horizontalförderer entsprechend verlängern. Das Modul 3 eignet sich in diesem Fall für Stationen mit geringem, das Modul 4 mit hohem Durchsatz (Abbildung 27).



Abbildung 27: Stationsmodule für Sonderfälle (lange Horizontalförderer)

Die Streckenführung und insbesondere das Betriebskonzept (s. Abschnitt 3.4) erlauben im vorliegenden Anwendungsfall den vollständigen Verzicht auf Nebenspuren und Weichenbauwerke in den einzelnen Stationen des Handels und für die City-Hubs. Deshalb können auch hier lange Vortriebsstrecken mit wenigen Baugruben aufgeföhren werden. Die wenigen erforderlichen Verzweigungen werden auf der Strecke dort angeordnet, wo ohnehin Baugruben als Start- oder Zielgruben für den Rohrvortrieb abgeteuft werden müssen.

3.3.5 Rohbau der Stationen

Der Rohbau der Schächte für die Vertikalförderer an den Stationen kann im Einzugsbereich der bestehenden Warenannahme und Warenausgabe des Kunden erfolgen. Um in der Bauphase die Beeinflussung des laufenden Warenflusses räumlich klein und zeitlich kurz zu halten, ist hier neben den Standardverfahren des Schachtbaus das Schachtabsenkverfahren [43] vorgesehen, das z. B. auch innerhalb eines Warenlagers eingesetzt werden kann. Dabei wird nach dem Öffnen der Bodenplatte im Warenlager ein im Betonwerk vollständig oder in Teilen vorgefertigter Rahmen aus Stahlbeton abgesenkt, indem der Boden innerhalb des Rahmens sukzessive ausgebaggert wird. Der Rahmen senkt sich in Abhängigkeit von der Tiefe der aktuellen Schachtsohle immer weiter ab, wobei die Wandreibung über eine thixotrope Gleit- und Stützflüssigkeit minimiert wird. Der Stahlbetonrahmen dient dabei bauzeitlich als Verbau und bildet später nach Erreichen der Endlage die Wände des Schachtes.

Um die Höhe der Rahmenelemente in Anpassung an die räumlichen Gegebenheiten der Werkhallen klein zu halten, werden mehrere gleichartige Stahlbetonrahmen nach und nach übereinander gestapelt und mit einer wasserdichten Fugenkonstruktion miteinander verbunden.

Die Abbildung 28 zeigt als Beispiel das Absenken eines Fertigteilschachtes innerhalb einer Lagerhalle.

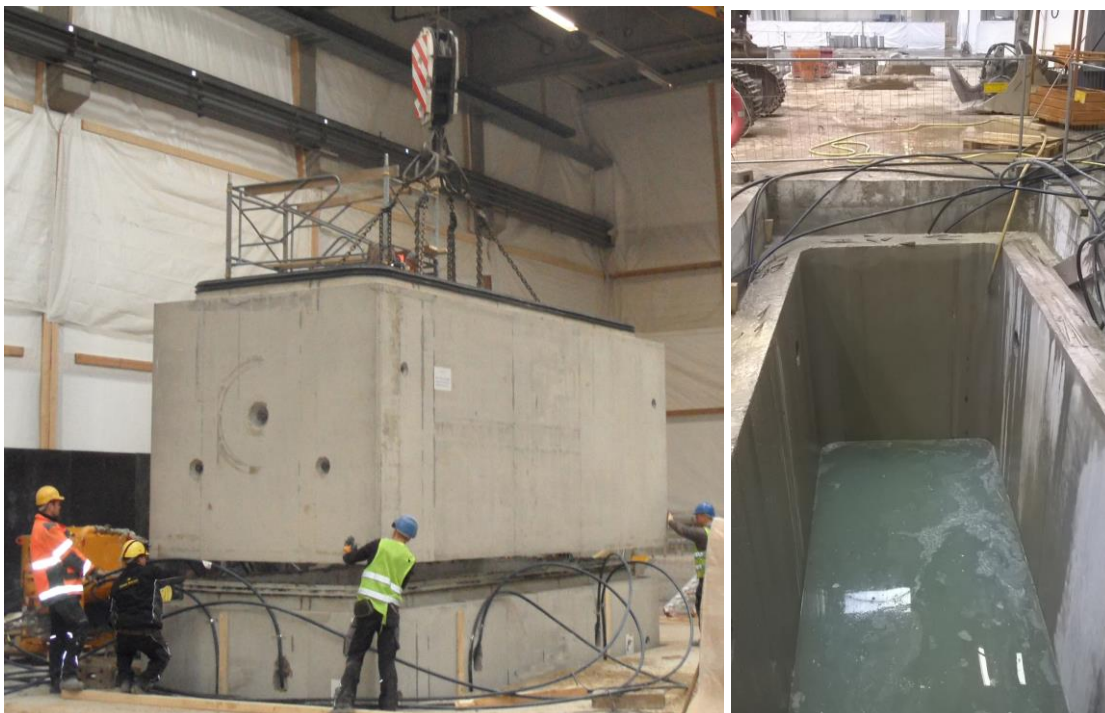


Abbildung 28: Herstellung einer Station mit Hilfe eines Absenkenschachtes innerhalb einer Lagerhalle

Der Einsatz der Fertigteile ermöglicht eine sehr kurze Bauzeit für die Schächte. Der eigentliche Absenkvorgang dauert in der Regel lediglich wenige Tage. Deshalb ist es durchaus denkbar, die Schächte für die Vertikalförderer insbesondere innerhalb des Warenlagers während einer längeren Betriebspause abzusenken und so den Warenverkehr nicht zu stören. Eine Absenkung des Grundwassers ist nicht erforderlich.

Die Verbindung der Schächte mit der Fahrrohrleitung kann ebenfalls mit dem Schachtabsenkverfahren oder, je nach vorhandener Geologie bzw. Hydrogeologie, auch als Stollenvortrieb erfolgen.

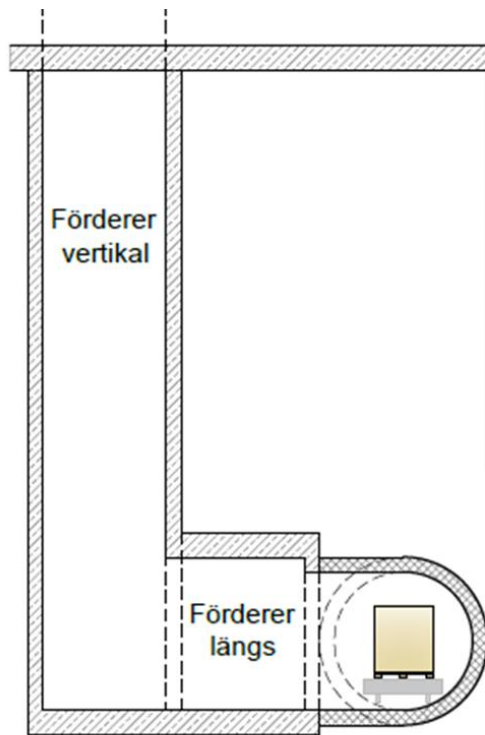


Abbildung 29: Standardstation mit Horizontal- und Vertikalförderer

3.4 Betriebskonzept

Das nachfolgend beschriebene Betriebskonzept gilt abweichend zum Original-CargoCap-System vorwiegend für einen bidirektionalen Einspurbetrieb, wobei die Hauptstrecke zwei jeweils ca. 500 m lange Doppelspurabschnitte enthält, und zwar

- zwischen km 0,000 und 0,500 im Bereich des GVZ und
- zwischen km 3,650 und 4,150.

Im Bereich der Innenstadt zwischen dem Streckenkilometer 6,0 und 7,9 teilt sich die Strecke in eine Ringleitung auf, die nur im Gegenuhrzeigersinn befahren wird (Abbildung 22).

3.4.1 Verbandsbildung

Zur Fahrt auf den Strecken werden die einzelnen Caps (mit einem Ladevolumen von zwei Europaletten) grundsätzlich zu einem Cap-Verband mit maximal 22 Caps zusammengeschlossen (Abbildung 30). Dabei werden sie nicht mechanisch mit einer Kupplung verbunden, sondern sie folgen jeweils mit einer automatischen Abstandsregelung dem vorausfahrenden Cap in einem lichten Abstand von ca. 4 m. Die Geschwindigkeit des führenden Mastercaps wird entsprechend der Kurvengeometrie der Strecke geregelt und liegt in der Regel durchgehend bei 10 m/sec.

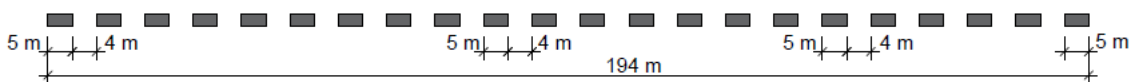


Abbildung 30: Cap-Verband mit 22 Caps

Die Begrenzung der Anzahl der Caps innerhalb des Verbandes im vorliegenden Anwendungsfall begründet sich in der häufigen Ein- und Ausreihung von Cap-Unterverbänden, d.h. von kleinen Gruppen von Caps an den Stationen. Um daraus resultierende Pumpeffekte in der Fahrrohrleitung zu begrenzen, werden sicherheitshalber nur kurze Verbände geplant. Bei durchgehenden Verbänden, die vom Start bis zum Ziel in unveränderter Reihung verkehren, sind doppelt so lange Verbände vorgesehen.

Der Betrieb wird systematisch mit mehreren Linien abgewickelt, auf denen die Verbände in einem festgelegten Takt verkehren

Da die meisten Stationen des Handels und der CityHubs an der durchgehenden Spur liegen und keine Nebenspur besitzen, werden die Caps eines Cap-Verbandes, d.h. eines Taktes, bereits vor dem Start im GVZ sequenziert. Dabei werden die Caps für jede Station zu Gruppen zusammengefasst. Die Gruppen ihrerseits werden in einer festen Reihenfolge in den Verband eingereiht. Die Cap-Gruppe für diejenige Station, die als erste erreicht wird (beim Normalbetrieb die Caps für die Station 1 in Frankendorf), laufen am Schluss des Verbandes, die Cap-Gruppe für die letzte Station in der Innenstadt an der Spitze.

Ein Beispiel für das Layout einer Sequenzierungsanlage zeigt die Abbildung 31. Sie wird im GVZ angeordnet und besteht aus 13 parallelen Gleisen, die bei jedem Verband jeweils einer Station zugeordnet sind. So können die Caps für jede Zielstation im GVZ separat nebeneinander gesammelt werden. In jedem Takt starten die Caps nacheinander in der vorgesehenen Reihenfolge und bilden so nach und nach den gesamten Verband. Die kurzen Gleise (6,0 m) sind für diejenigen Stationen vorgesehen, die von nur einem Cap pro Takt bedient werden, in den längeren Gleisen können mehrere Caps hintereinander aufgereiht werden.

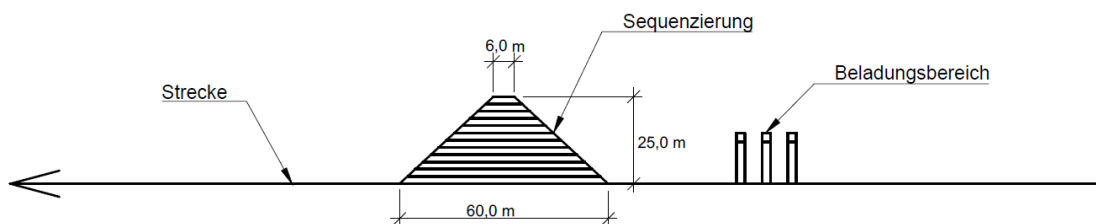


Abbildung 31: Beispiel einer Sequenzierungsanlage zur Bildung des Cap-Verbandes

Eine beispielhafte Reihung des Cap-Verbandes der Hauptlinie beim Start im GVZ ist in der Abbildung 32 dargestellt. Dabei sind die für die genannten Zielstationen vorgesehenen Cap-Gruppen farblich unterschieden.

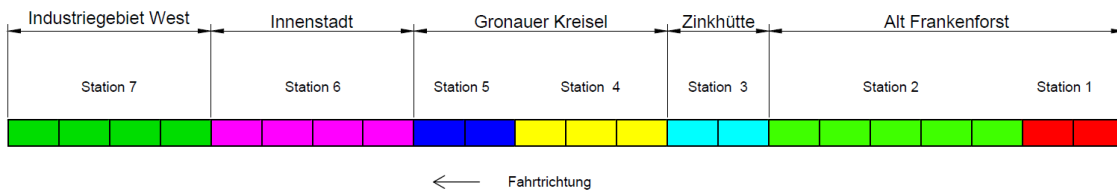


Abbildung 32: Beispielhafte Reihung des Cap-Verbandes der Hauptlinie beim Start im GVZ

Die Ein- und Ausreihung der Caps an einer beispielhaften Station X zeigt die Abbildung 33 in der zeitlichen Abfolge.

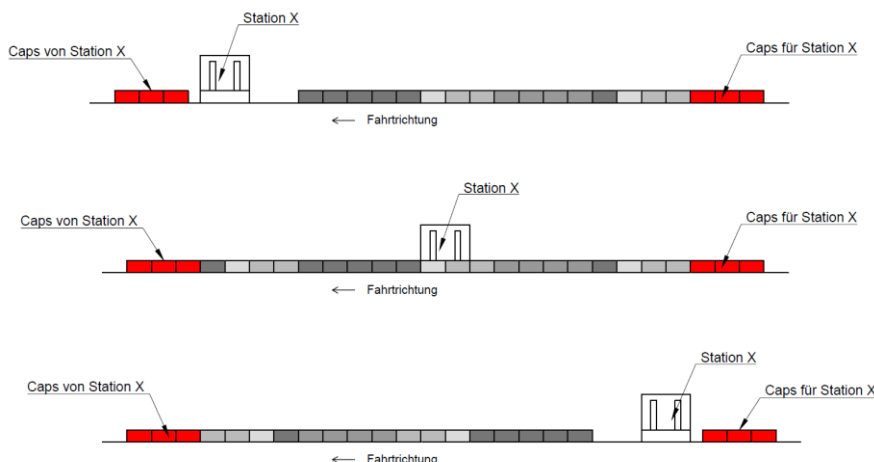


Abbildung 33: Ein- und Ausreihung der Caps an einer Station ohne Nebenspur

In der oberen Darstellung nähert sich der Cap-Verband der Station X, wo drei Caps zur Abholung bereitstehen. In der Darstellung in der Mitte reihen sich diese drei Caps vorne in den Cap-Verband ein und sind nun die führenden Caps des Verbandes. In der unteren Darstellung bleiben die letzten drei Caps des Verbandes in der Station X zurück.

Die Behandlungsdauer der Caps (Ent- und Beladen) in den Stationen beträgt gemäß Abschnitt 3.3.4 etwa 90 Sekunden je Standardmodul und Cap. Bei dem vorgesehenen Güterumschlag in den Stationen reicht bei allen Stationen des Handels und auch bei den CityHubs ein Standardmodul der Fördertechnik (Abbildung 26). Müssen beispielsweise drei Caps pro Takt an einer Station und somit an einem Standardmodul nacheinander behandelt werden, wird im Betriebskonzept die Mindestaufenthaltsdauer des Dreierverbandes mit $3 \times 90 \text{ sec} = 270 \text{ Sekunden} = 4,5 \text{ Minuten}$ festgelegt. Wenn die Ent- und Beladung der Caps nicht auf einer Nebenspur, sondern auf der Hauptspur der Fahrrohrleitung durchgeführt wird, darf in diesem Zeitraum kein anderer Verband die Station passieren.

Die beschriebene Vorgehensweise des Ein- und Ausreihens der Caps wird an jeder Station wiederholt bis alle Caps des Verbandes auf die Stationen verteilt und die fürs GVZ bestimmten Caps aufgenommen sind.

3.4.2 Taktung und Fahrplan

Der Bildfahrplan der Hauptstrecke (Abbildung 34) zeigt die Fahrschaulinien für die Hauptlinie im 15-Minuten-Takt (durchgezogene Graphen), die Industriegebiet-West-Linie (gepunktete Graphen) und die Zinkhütte-Linie (gestrichelte Graphen). Begegnungen (Kreuzungen) von Verbänden finden in der Kreuzungsstation zwischen km 3,650 und km 4,150 und ggf. am GVZ statt. In der Kreuzungsstation stehen die in Richtung GVZ verkehrenden Verbände 3 Minuten hintereinander, um zwei entgegenkommende Verbände durchfahren zu lassen.

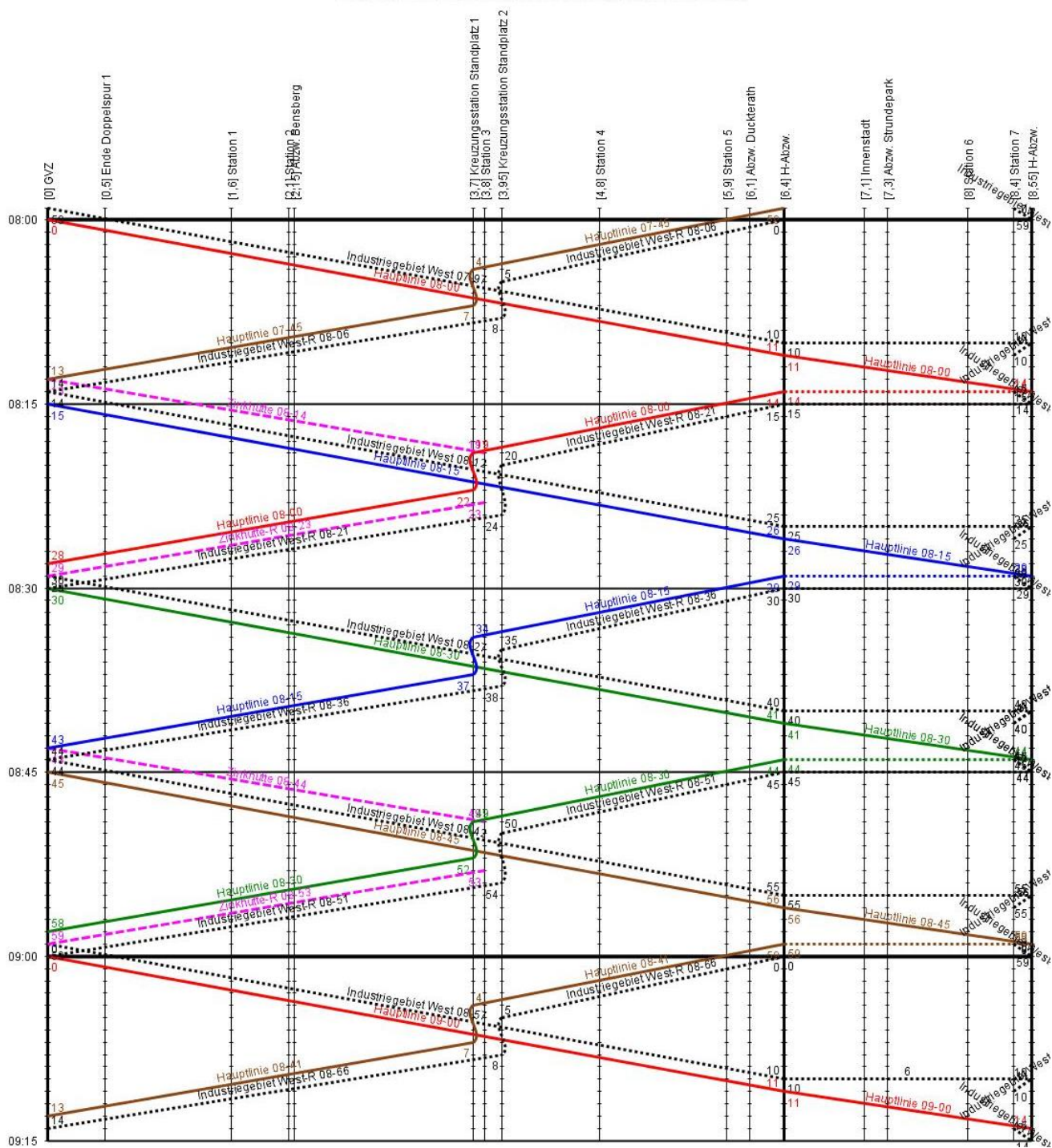


Abbildung 34: Bildfahrplan (Zeit-Wegdiagramm) für die Hauptstrecke

Tabelle 7: Kenndaten der Linien auf der Hauptstrecke

Hauptstrecke	Hauptlinie	Industriegebiet-West-Linie	Zinkhütte-Linie
Takt	15 min	15 min	30 min
Länge der vollständigen Fahrtstrecke (von der Abfahrt im GVZ bis zur Ankunft im GVZ))	15,0 km	13,2 km	7,5 km
Fahrtdauer mit betrieblichen Standzeiten	25 min	22 min	12,5 min
Umlauf Takte/Dauer	4 Takte / 60 min	4 Takte / 60 min	2 Takte / 60 min
Abstand der Stationen vom GVZ	1,6 bis 8,0 km	6,6 km	3,8 km
Anzahl Caps/Takt Handel	12,1	-	-
Anzahl Caps/Takt Industriegebiet West	(1 ^{**})	44	-
Anzahl Caps/Takt Zinkhütte	(4 ^{**})	-	20
Erforderliche Anzahl Caps	48,5	180	40

^{**} Nutzung zuvor an Handel-Stationen entladener Caps (Umlaufdauer erhöht sich um einen Takt)

Auf der Hauptstrecke (durchgehende blaue Linie in Abbildung 22) verkehren folgende Linien:

- Hauptlinie: Die Hauptlinie befährt die Gesamtstrecke inkl. der Innenstadtschleife (Fahrtrichtung gegen den Uhrzeigersinn)
- Zinkhütte-Linie zwischen GVZ und dem Industriegebiet Zinkhütte
- Industriegebiet-West-Linie zwischen GVZ und dem Industriegebiet West auf direktem Weg

Somit sind für die Bedienung der Stationen (Handel, Industrie und KEP) entlang der Hauptstrecke 269 Caps betrieblich erforderlich, wenn jede Linie separat betrachtet wird und keine Synergieeffekte zwischen den Linien betrachtet werden. Da die an der Hauptlinie gelegenen Stationen (Handel, KEP) einen deutlich größeren Wareneingang als Warenausgang aufweisen, fahren zahlreiche Caps leer zurück zum GVZ.

Die Tabelle 8 zeigt der Vollständigkeit halber ein Bedienungskonzept der Stationen auf den Zweig- und Nebenstrecken. Diese Strecken werden aber nicht bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung (s. Abschnitt 4) berücksichtigt.

Tabelle 8: Kenndaten der Neben- und Zweiglinien auf der Hauptstrecke

Neben- und Zweigstrecken	Refrath	Bensberg	Duckterath	Strunde- park
Takt	15 min	30 min	30 min	30 min
Länge der vollständigen Fahrtstrecke (von der Abfahrt im GVZ bis zur Ankunft im GVZ)	1,6 km	9,6 km	15 km	18
Fahrdauer ohne Standzeiten	5,5 min	16 min	25 min	30 min
Umlauf Takte/Dauer	1 Takt / 60 min	2 Takte / 60 min	2 Takte / 60 min	2 Takte / 60 min
Abstand der Stationen vom GVZ	0,7 bis 1,6 km	2,6 bis 4,8 km	6,6 bis 7,5 km	8,8 km
Anzahl Caps/Takt	2	8	4,25	4,2
Erforderliche Anzahl Caps	2	16	8,5	8,5

3.5 Schätzung der Investitions- und Betriebskosten

3.5.1 Investitionskosten

3.5.1.1 Allgemeines

Die maßgebenden Anteile der Investitionskosten setzen sich aus den nachfolgend genannten Hauptteilleistungen zusammen:

- a) Rohbau (Strecken und Stationen)
- b) Innenausbau (Strecken und Stationen)
- c) Fahrzeuge (Caps)
- d) Programmierung (Betriebsleitsystem und Bordsoftware)

3.5.1.2 Rohbau

Der Rohbau der Fahrrohrleitungen, d.h. der Einbau der Rohre mit einem Innendurchmesser zwischen 2.000 mm und 3.000 mm erfolgt vorwiegend mittels des Rohrvortriebsverfahrens (Abschnitt 3.2.1.3), das seit ca. 25 Jahren neben der offenen Rohrverlegung im Graben als Standardverfahren beim Bau von begehbaren Abwasserleitungen gilt. Zahlreiche, vorwiegend mittelständische Bauunternehmungen des Leitungsbaus haben sich hierauf spezialisiert und können umfangreiche Referenzen vorweisen. Damit besteht beim Bau der Rohrleitung kein erhöhtes technisches und finanzielles Risiko.

Ein besonders großes Projekt der Abwassertechnik, bei dem fast ausschließlich das Rohrvortriebsverfahren eingesetzt wurde, ist im Rohbau bereits fertiggestellt. Dabei handelt es sich um den Abwasserkanal Emscher (AKE) der Emschergenossenschaft, Essen mit einer 80 km langen, z.T. doppelröhrigen Abwasserleitung quer durch das Ruhrgebiet, deren Rohre einen Durchmesser zwischen 1600 mm und 2800 mm besitzen. Bei diesem Projekt war der für die Bautechnik zuständige Partner der CargoCap GmbH, die STEIN Ingenieure GmbH (vormals S & P Consult GmbH), Bochum, bei der Erstellung der „Zentralen Technischen Vorschriften“ (ZTV), der Ausführungsplanung und der Bauüberwachung maßgeblich beteiligt. Darauf kann auch die Kostenschätzung für den Rohbau zurückgreifen.

Mit diesem umfangreichen Erfahrungsschatz konnten die Rohbaukosten für die Fahrrohrleitung, die Baugruben sowie die Bauwerke der Stationen und Verzweigungen für das Streckennetz in Bergisch Gladbach mit den üblichen Kostenansätzen für die entsprechenden Bauleistungen ermittelt werden. Die tatsächlichen Rohbaukosten entstehen im Wettbewerb der Bieter.

Die Baukosten bei der geschlossenen Bauweise werden im Wesentlichen von dem anstehenden Baugrund und vom Grundwasserstand beeinflusst. Beide haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Auswahl der Vortriebstechnik und die Vortriebsgeschwindigkeit und somit auch auf die Baukosten. Vortriebe im Festgestein führen gegenüber Vortrieben im Lockergestein zu Baukostenerhöhungen, da die Abbauwerkzeuge stärker abgenutzt werden und die Vortriebsleistung geringer ist.

Im vorliegenden Fall wird ein Baugrund entsprechend den Ausführungen im Abschnitt 3.3.2 vorausgesetzt.

Tabelle 9: Zusammenstellung der Rohbaukosten nur Hauptstrecke für die Palettenhöhe von 1,95 m (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten		Länge Anz.	Kosten	
	DN 2800	DN 3000		DN 2800	DN 3000
Rohbau Strecke einspurig	4.900,00 EUR/m	5.200,00 EUR/m	6.900 m	33,8 Mio. EUR	35,9 Mio. EUR
Rohbau Strecke doppel- spurig	8.800,00 EUR/m	9.600,00 EUR/m	1.000 m	8,8 Mio. EUR	9,6 Mio. EUR
Rohbau Stationsan- schluss	6.000,00 EUR/m		350 m	2,1 Mio. EUR	
Rohbau Verkehrsstati- onsmodul	265.000,00 EUR/Stück		18 Stck.	4,8 Mio. EUR	
Rohbau Betriebsstati- onsmodul	280.600,00 EUR/Stück		6 Stck.	1,7 Mio. EUR	
Summe				51,2 Mio. EUR	54,1 Mio. EUR
6% Nebenkosten				3,1 Mio. EUR	3,2 Mio. EUR
Gesamtkosten				54,3 Mio. EUR	57,3 Mio. EUR

Die Tabelle 9 zeigt die Rohbaukosten für die Strecke (Rohre ohne Innenausbau) und für die Stationen (Schachtbauwerk ohne Fördereinrichtungen) für die Hauptstrecke. Bei den Stationen wird zwischen Verkehrsstationen, an denen Paletten be- und entladen werden, und Betriebsstationen, die nur betrieblich erforderlich sind und nicht mit Fördereinrichtungen ausgestattet werden (Abzweige, Wechsel von Einzel- auf Doppelspur) unterschieden. Die Kostendarstellung erfolgt für beide Rohrdurchmesservarianten DN 2800 und DN 3000. Als Nebenkosten werden die Kosten für Planung, Bauüberwachung, Baugrunduntersuchungen, landschaftspflegerische Begleitpläne und Wasserrechtsanträge bezeichnet. Die Tabelle 10 zeigt die Rohbaukosten für Fahrrohrleitungen mit den Nennweiten DN 2000 und DN 2200.

Tabelle 10: Zusammenstellung der Rohbaukosten nur Hauptstrecke für die Palettenhöhe von 1,20 m (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten		Länge Anz.	Kosten	
	DN 2000	DN 2200		DN 2000	DN 2200
Rohbau Strecke einspurig	3.500,00 EUR/m	3.800,00 EUR/m	6.900 m	24,1 Mio. EUR	26,2 Mio. EUR
Rohbau Strecke doppel- spurig	5.300,00 EUR/m	5.700,00 EUR/m	1.000 m	5,3 Mio. EUR	5,7 Mio. EUR
Rohbau Stationsan- schluss	5.000,00 EUR/m		350 m	1,8 Mio. EUR	
Rohbau Verkehrsstati- onsmodul	265.000,00 EUR/Stück		18 Stck.	4,8 Mio. EUR	
Rohbau Betriebsstati- onsmodul	280.600,00 EUR/Stück		6 Stck.	1,7 Mio. EUR	
Summe				37,7 Mio. EUR	40,2 Mio. EUR
6% Nebenkosten				2,3 Mio. EUR	2,4 Mio. EUR
Gesamtkosten				40,0 Mio. EUR	42,6 Mio. EUR

In der Tabelle 11 sind die gesamten Rohbaukosten für die unterschiedlichen Nennweiten inkl. Planung, Bauüberwachung, Baugrunduntersuchungen, landschaftspflegerische Begleitpläne und Wasserrechtsanträge zusammengefasst.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Rohbaukosten

Nennweite	Rohbaukosten
DN 3000	57,3 Mio. EUR
DN 2800	54,3 Mio. EUR
DN 2200	42,6 Mio. EUR
DN 2000	40,0 Mio. EUR

3.5.1.3 Innenausbau und Technische Ausstattung

Neben den Rohbaukosten fallen Investitionskosten für den Innenausbau der Rohre und die technische Ausstattung der Stationen an. Dazu gehören insbesondere die Trag- und Führungsschienen, die streckenseitige Energiezuführung, die RFID-Technik, die Trafostationen und die Halfenschienen auf den Strecken sowie die Fördereinrichtungen in den Stationen (s. Abschnitt 3.2.1.4). Die Kosten für den Innenausbau der Rohre werden einer Kostenkalkulation des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Förder-technik (LMF) der Ruhr-Universität Bochum für ein anderes Projekt entnommen. Die Kosten für die Ausrüstung der Verkehrsstationen mit der erforderlichen Fördertechnik wurden freundlicherweise von der Firma SSI SCHÄFER PEEM GMBH, Graz zur Verfügung gestellt.

Die Tabelle 12 beinhaltet eine Zusammenstellung der Kosten für die Einbauten in den Rohren und für die Fördertechnik in den Verkehrsstationen auf der Hauptstrecke für die Palettenhöhe von 1,95, die Tabelle 13 die für eine Palettenhöhe von 1,20 m.

Tabelle 12: Zusammenstellung der Kosten für die Einbauten in den Rohren und für die Fördertechnik in den Verkehrsstationen auf der Hauptstrecke für die Palettenhöhe 1,95 m (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten		Länge Anz.	Kosten		
	DN 2800	DN 3000		DN 2800	DN 3000	
Innenausbau einspurig	Strecke	1.500,00 EUR/m	1.550,00 EUR/m	6.900 m	10,4 Mio. EUR	10,7 Mio. EUR
Innenausbau doppelspurig	Strecke	3.000,00 EUR/m	3.100,00 EUR/m	1.000 m	3,0 Mio. EUR	3,1 Mio. EUR
Innenausbau Stationsan- schluss		1.500,00 EUR/m		350 m	0,5 Mio. EUR	
Fördertechnik Verkehrs- stationsmodul		410.000,00 EUR/Stück		18 Stck.	7,4 Mio. EUR	
Innenausbau Betriebssta- tionsmodul		In den Streckenkosten enthal- ten			0,0 Mio. EUR	
Summe					21,3 Mio. EUR	21,7 Mio. EUR
6% Nebenkosten					1,3 Mio. EUR	1,3 Mio. EUR
Gesamtkosten					22,5 Mio. EUR	23,0 Mio. EUR

Tabelle 13: Zusammenstellung der Kosten für die Einbauten in den Rohren und für die Fördertechnik in den Verkehrsstationen auf der Hauptstrecke für die Palettenhöhe 1,20 m (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten		Länge Anz.	Kosten		
	DN 2000	DN 2200		DN 2000	DN 2200	
Innenausbau einspurig	Strecke	1.400,00 EUR/m	1.450,00 EUR/m	6.900 m	9,7 Mio. EUR	10,0 Mio. EUR
Innenausbau doppelspurig	Strecke	2.800,00 EUR/m	2.900,00 EUR/m	1.000 m	2,8 Mio. EUR	2,9 Mio. EUR
Innenausbau Stationsan- schluss		1.500,00 EUR/m		350 m	0,5 Mio. EUR	
Fördertechnik Verkehrs- stationsmodul		410.000,00 EUR/Stück		18 Stck.	7,4 Mio. EUR	
Innenausbau Betriebssta- tionsmodul		In den Streckenkosten enthal- ten			0,0 Mio. EUR	
Summe					20,4 Mio. EUR	20,8 Mio. EUR
6% Nebenkosten					1,2 Mio. EUR	1,2 Mio. EUR
Gesamtkosten					21,6 Mio. EUR	22,0 Mio. EUR

In der Tabelle 14 sind die gesamten Kosten für den Innenausbau für die unterschiedlichen Nennweiten inkl. Planung und Bauüberwachung zusammengefasst.

Tabelle 14: Zusammenstellung der Kosten für den Innenausbau der Fahrrohrleitungen

Nennweite	Kosten für den Innenausbau
DN 3000	23,0 Mio. EUR
DN 2800	22,5 Mio. EUR
DN 2200	22,0 Mio. EUR
DN 2000	21,6 Mio. EUR

3.5.1.4 Caps

Zu den Investitionskosten gehört auch die Anschaffung der Fahrzeuge (Caps) unter Berücksichtigung der Entwicklungskosten für die vorliegende Transportaufgabe und der Herstellkosten für die Serienfertigung, die, wie in der Tabelle 15 dargestellt, abgeschätzt werden (s. auch Abschnitt 3.9):

Tabelle 15: Kosten für die Caps

Kostenart	Hauptstrecke
Entwicklungskosten (einmalig)	5,0 Mio EUR
Herstellkosten Serie	39.000,00 EUR/Cap
Betrieblich erforderliche Anz. Caps	247
Reserve	20%
Insgesamt erforderliche Anz. Caps	296
Gesamtkosten für die Caps	16,5 Mio. EUR

In der betriebswirtschaftlichen (s. Abschnitt 4) und volkswirtschaftlichen (s. Abschnitt 5) Bewertung wird die betrieblich erforderliche Anzahl von Caps in Höhe von 247 zugrunde gelegt. Die Gesamtkosten betragen in diesem Fall 14,63 Mio. EUR.

3.5.1.5 Softwareentwicklung

Für die Entwicklung der Software für das Betriebsleitsystem und für die Bordcomputer werden pauschal 10,0 Mio. EUR veranschlagt.

3.5.1.6 Zusammenfassung der Investitionskosten

In der Tabelle 16 sind die gesamten Investitionskosten zusammengestellt.

Tabelle 16: Zusammenstellung der gesamten Investitionskosten

Investitionsbereich	DN 3000	DN 2800	DN 2200	DN 2000
Rohbau	57,3 Mio. EUR	54,3 Mio. EUR	42,6 Mio. EUR	40,0 Mio. EUR
Innenausbau/Fördertechnik	23,0 Mio. EUR	22,5 Mio. EUR	22,0 Mio. EUR	21,6 Mio. EUR
Caps	16,5 Mio. EUR	16,5 Mio. EUR	16,5 Mio. EUR	16,5 Mio. EUR
Softwareentwicklung	10,0 Mio. EUR	10,0 Mio. EUR	10,0 Mio. EUR	10,0 Mio. EUR
Gesamte Investitionskosten	106,8 Mio. EUR	103,3 Mio. EUR	91,1 Mio. EUR	88,1 Mio. EUR

Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Investitionskosten DN 3000 und DN 2800 sowie DN 2200 und DN 2000 werden die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des CargoCap-Systems nur für die Varianten mit geschlossenem Cap (DN 3000 und DN 2200) durchgeführt (Abschnitt 4).

3.6 Betriebskosten

3.6.1 Personal

Durch den automatisierten Betrieb und die Nutzung unbemannter Fahrzeuge in der Fahrrohrleitung ist der Personalbedarf im Vergleich zu herkömmlichen Transportsystemen gering. Die Kosten hierfür hängen maßgeblich vom noch zu klärenden Betreibermodell ab (s. Abschnitt 4.2.8 und 4.5.1).

3.6.2 Energie

Der Energiebedarf ist im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern äußerst gering und entsteht lediglich bei der Beschleunigung und auf Steigungen. Bei einer Beharrungsfahrt in der Ebene ist ein Energiebedarf kaum messbar. Für ein Cap wird deshalb von einem Stromverbrauch in Höhe von 0,1 kWh/tkm ausgegangen, worin auch eine einmalige Beschleunigung zu Beginn der Fahrt und der Bedarf der Sekundärverbraucher des Systems enthalten sind. Damit ergeben sich bei einem Kostensatz von 30 Cent pro kWh (Stand 2020) gerade einmal 107.382,00 EUR pro Jahr für den Betrieb auf der Hauptstrecke.

3.6.3 Wartung

Um ein neues Transportsystem erfolgreich betreiben zu können, ist die Zuverlässigkeit des Betriebs und damit die Netzverfügbarkeit in besonderem Maße zu gewährleisten. Hierfür werden konstruktive Vorkehrungen getroffen, die den Verschleiß innerhalb der unbeweglichen unterirdischen Anlagen minimieren. Die Verschleißteile (also auch alle beweglichen technischen Elemente) werden auf den Fahrzeugen angebracht, die regelmäßig gewartet werden und deren Verschleißteile in entsprechend kurzen Intervallen erneuert werden. Daher kann als Wartungsbedarf für die Stationen und die Strecke pro Jahr 1% der Investitionssumme angenommen werden. Für die Rohrleitungshülle (Rohbau) wird wegen ihrer massiven Konstruktion und der Langlebigkeit des Werkstoffes (vorwiegend werksmäßig hergestellter Stahlbeton) keine Wartung angerechnet. Die Energie- und Informationsübertragung in der Fahrrohrleitung erfolgen berührungslos und müssen daher ebenfalls nicht gewartet werden. Für die Fahrzeuge wird ein Wartungsaufwand pro Jahr in Höhe von 3% der Investitionen in den jeweils vorhandenen Fahrzeugbestand angenommen.

Die Wartungskosten betragen somit 720.000,00 EUR bis 730.000,00 EUR pro Jahr für den Betrieb auf der Hauptstrecke.

3.7 Umsetzungszeitraum

In der Tabelle 17 ist die Gesamtdauer der Umsetzung des CargoCap-Systems in Bergisch Gladbach bis zur Aufnahme des kommerziellen Betriebs zusammengestellt.

Tabelle 17: Gesamtdauer der Umsetzung

Umsetzungsphasen	Dauer
Planungsleistungen bis Ausschreibungsreife	24 Monate
Ausführung der Arbeiten inkl. der Testphase bis zur kompletten Übergabe des Systems an den Betreiber (Rohbau, Innenausbau und Testbetrieb)	36 Monate
Gesamtdauer für die Umsetzung	5 Jahre

Durch eine maximale Parallelisierung der Arbeiten und das gleichzeitige Vortreiben von mehreren Vortriebsstrecken könnte die Ausführungsphase im Idealfall auf 24 Monate verkürzt werden, so dass die Gesamtdauer für die Umsetzung auf 4 Jahre sinken würde.

Für ausgiebige Testfahrten zur Simulation und zum Nachweis der Funktionsfähigkeit des automatischen Betriebes des CargoCap-Systems stehen die ersten fertiggestellten Fahrrohrleitungsabschnitte zur Verfügung, die zu diesem Zweck sofort nach dem Abschluss des Vortriebs mit den Innenausbauten (Schienen, Stromversorgung und Kommunikationskomponenten usw.) ausgestattet werden. Mit der Realisierung kann spätestens ab dem vierten Jahr begonnen werden. Bis dahin sind Entwicklung, Bau und Erprobung von Prototypen der Caps abgeschlossen, so dass sie für den Testbetrieb zur Verfügung stehen.

3.8 Sicherheitstechnik

Das Fahrrohrleitungssystem und die darin verlegten Leitungen werden durch Konstruktion, Materialeinsatz und Betriebsweise auf einen sicheren Betrieb ausgerichtet [51]. Die zu erfüllenden Sicherheitsziele betreffen insbesondere den Schutz von Personen und Sachen vor

- mechanischen Gefährdungen,
- Stromschlägen,
- Brand und
- Überflutung.

Der regelmäßige Fahrbetrieb wird vollkommen automatisch ohne Gefährdung von Personen durchgeführt. Lediglich bei Wartungs- und Reparaturarbeiten muss der Rohrstrang durch entsprechend geschultes Personal begangen werden. Im Bereich der Stationen und der Spurwechsel sind Bauwerke vorgesehen, die auch den entsprechenden Zugang ermöglichen. Sobald sich Menschen innerhalb der CargoCap-Anlage aufhalten, wird sichergestellt, dass auf dem betreffenden Abschnitt der Fahrbetrieb eingestellt und der Fahrstrom abgeschaltet ist.

Um die Auswirkungen eines Brandfalles so weit wie möglich zu reduzieren, soll das Fahrrohrleitungsnetz mit den folgenden sicherheitstechnischen Einrichtungen ausgerüstet werden:

- Feuermeldung mit Kamera
- Ventilationssystem zum Entfernen von Rauch und Hitze
- Schaumlöscher über die gesamte Länge analog zur Chemieindustrie

3.9 Zuverlässigkeit

Sämtliche Konstruktionen der Bautechnik, des Maschinenbaus und der Fördertechnik basieren fast ausschließlich auf bewährten Techniken und Verfahrensweisen. Sowohl beim Bau der Fahrrohrleitungen als auch der Caps kann weitgehend auf existierende Bauteile bzw. Verfahren zurückgegriffen werden, so dass im Rahmen der Realisierung keine nennenswerten Schwierigkeiten zu erwarten sind. Darüber hinaus steht mit den Gesellschaftern der CargoCap GmbH und dem Ingenieurbüro STEIN Ingenieure, Bochum, der Knowledge Factory GmbH, Bochum sowie dem Ingenieurbüro für Baumaschinen, Antriebs- und Fördertechnik GmbH, Bochum und Plauen (IBAF) ein Ingenieur-Team zur Verfügung, das die CargoCap-Entwicklung von Anfang an begleitet und mitgestaltet hat. Damit ist das erforderliche bau-, maschinen- und fördertechnische Know-how für die praxisgerechte Umsetzung in der CargoCap GmbH, Bochum gebündelt verfügbar. Mit der SSI SCHÄFER GmbH ist ein erfahrener, seit Jahrzehnten weltweit tätiger Partner mit großem Know-how und weitreichenden Branchenerfahrungen auf dem Gebiet der Planung und Realisierung ganzheitlicher Logistiksysteme in das Team integriert.

Bei der von der SSI-Schäfer GmbH entwickelten Fördertechnik in den Stationen werden ausschließlich erprobte und bewährte Elemente verwendet, die entsprechend den jeweils speziellen Anforderungen zu Standardmodulen kombiniert werden. Damit besteht in den Stationen kein größeres Risiko als bei konventionellen Anlagen gleicher Größenordnung.

Bei den Caps handelt es sich um neuartige, speziell für den vorliegenden Anwendungsfall konzipierte Fahrzeuge, die sorgfältig konstruiert und eingehend erprobt werden müssen. Zahlreiche Komponenten wie Motoren, Umrichter, Lauf- und Führungsrollen, Industrie-PC und auch die gesamte Sensorik sind Standardbauteile, deren Funktion und Dauerhaftigkeit bereits erwiesen sind. Das Zusammenwirken miteinander und mit den wenigen neuen Komponenten wurde bereits im Vorfeld auf einer bis zum Jahre 2016 betriebenen Modellstrecke im Maßstab 1:2 vom Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik (LMF) der Ruhr-Universität Bochum mit Industriepartnern erprobt (Abbildung 35). Dies gilt auch für die Trag- und Führungselemente (Schienen), die bei der Anwendung im Rohr verlegt werden [34, 35, 36, 37, 38, 52, 53].

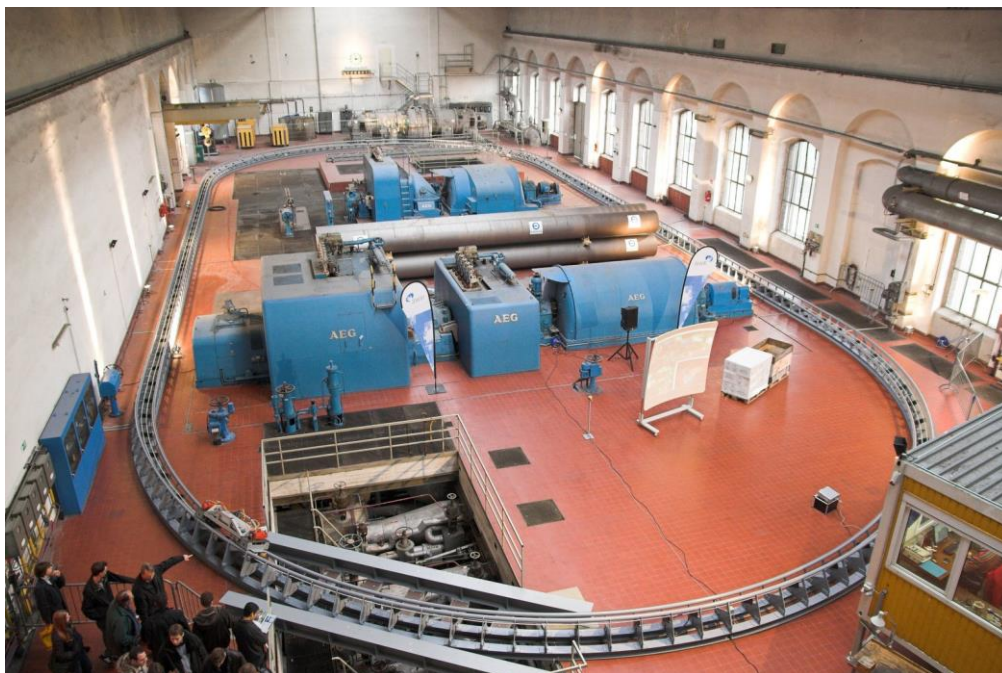


Abbildung 35: Gesamtüberblick über die CargoCap-Modellstrecke im Maßstab 1:2

Wegen der hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit und Transportsicherheit sind die Caps antriebstechnisch redundant ausgeführt. Jedes Rad ist getrennt angetrieben (eigener Motor, zumindest paarweise eigener Umrichter etc.). Wenn der Antrieb eines Rades oder Radpaares ausfällt, kann der Antrieb der anderen Räder die Beförderung bis zur Zielstation mit verminderter Leistung übernehmen. Bei Ausfall aller Antriebe eines Caps kann das Folgefahrzeug das defekte Cap über mechanischen Kontakt bis zur nächstgelegenen Station schieben. Sollte ein Rad oder ein Radpaar blockieren, kann das Cap über ein Hilfsfahrzeug angehoben und langsam über Hilfsrollen weiterbefördert werden. Es ist derzeit in der Überlegung, die Hilfsrollen in das Cap zu integrieren.

Bei den Lebensmittelgeschäften des Einzelhandels besteht im vorliegenden Anwendungsfall ein Teil der Güter aus Kühl- und Gefriergut. Der Anteil liegt bei bis zu 13,4% (s. Abschnitt 2.4.2).

Dafür könnte ein Teil der Caps mit einer leistungsfähigen aktiven Kühleinrichtung ausgerüstet werden. Die dafür benötigte Energie kann kontinuierlich aus der Berührungslosen Energieversorgung des Fahrbetriebes entnommen werden. Allerdings beträgt die Verweildauer des Kühlguts im Cap im ungünstigsten Fall nur 30 Minuten, da jedes Cap maximal 15 Minuten auf die Abfahrt warten muss (15-Minuten-Takt) und die Fahrzeit zum am weitest entfernten Ziel ebenfalls maximal 15 Minuten beträgt (Abbildung 34). Dafür reichen Thermohauben (linkes Bild in Abbildung 36) und/oder nicht aktiv gekühlte Isolierboxen auf Basis der Europalette (rechtes Bild in Abbildung 36) aus, wie sie beispielsweise von Edeka beim Lkw-Transport auch in Bergisch Gladbach verwendet werden (Abbildung 37).



Abbildung 36: In der Praxis eingesetzte Isolierhaube für Paletten (l.) und Isolierbox mit Palettengrundriss (r.)



Abbildung 37: Isolierbox im Einsatz in Bergisch Gladbach (E-Center)

Für eine Variante mit passiver Kühlung bzw. Isolierung spricht darüber hinaus, dass sich das Innere eines Caps bei weitem nicht so stark erwärmen kann wie ein Lkw im Sommer unter Sonneneinstrahlung. Das Cap ist stets vor Strahlungswärme geschützt und die Temperatur in der Rohrleitung wird im Sommer stets deutlich niedriger sein als unter freiem Himmel.

4 Betriebswirtschaftliche Bewertung

Im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Untersuchung wird geprüft, ob und wann die Übernahme der Transportaufgaben durch das CargoCap-System in Bergisch Gladbach (CCBG) betriebswirtschaftlich rentabel betrieben werden kann. Die betriebswirtschaftliche Analyse basiert einerseits auf der Abschätzung der Investitions- und Betriebsaufwendungen, die in eine dynamische Investitionsrechnung eingespeist werden. Andererseits werden die notwendigen Erlöse bzw. Einnahmen gegengerechnet, die für einen rentablen Betrieb von CCBG notwendig sind.

Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Investitionskosten DN 3000 und DN 2800 sowie DN 2200 und DN 2000 werden die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des CargoCap-Systems nur für die Varianten mit geschlossenem Cap (DN 3000 und DN 2200) durchgeführt (s. Abschnitt 3.2.1.2).

Die betriebswirtschaftliche Bewertung erfolgt für die folgenden Varianten

- a) **Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten)**
Einbeziehung aller Investitionen für die Infrastruktur im Rahmen der Umstellung auf das CargoCap-System (Strecke, Stationen, Fahrzeuge etc.) mit Betriebskosten für das GVZ und die CityHubs
- b) **Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)**
wie a), aber ohne Betriebskosten für das GVZ
- c) **Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)**
wie a), aber ohne Investitionskosten für die Infrastruktur
- d) **Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)**
Kombination von b) und c), d.h. wie a), aber ohne Betriebskosten für das GVZ und ohne Investitionskosten für die Infrastruktur

Die Hauptuntersuchungen erfolgen für die Variante a - Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten).

Die drei weiteren Varianten werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse als alternative Investitionsszenarien untersucht (Abschnitt 4.5). Nur die Varianten b) und d) entsprechen dem CargoCap-Geschäftsmodell, bei dem System und Aufgabe an den Schnittstellen zum Kunden (GVZ, Hubs, Einkaufszentren etc.), d. h. am Übergang der CargoCap-Fördertechnik zur Anschlusslogistik des Kunden enden.

4.1 Dynamische Investitions- und Finanzierungsrechnung

In Anlehnung an die CargoCap-Studie der BDO (2008) wird die Wirtschaftlichkeit von CCBG auf der Basis einer dynamischen Investitionsrechnung geprüft [54]. Es wird angenommen, dass 2021 die Planungsphase beginnt und der Transportbetrieb 2024 startet (s. Abschnitt 3.7). Die Nutzungszeit des Systems beläuft sich auf 80 Jahre [55].

Der Diskontierungsfaktor nach Steuern entspricht den $WACC_s^n$. Der Kapitalwert von CCBG ergibt sich als Differenz des Barwertes der Ausgaben und Einnahmen. Bei den Ausgaben (a) handelt es sich um die Investitions- und Betriebsausgaben. Der Ausgabenbarwert entspricht den diskontierten Auszahlungen:

$$ABW = \sum_{t=1}^{t=83} a_t * \frac{1}{(1+WACC_s^n)^t}$$

Bei den Ausgaben handelt es sich um die Betriebsausgaben (Energie-, Personal-, Wartungs- und Zinsausgaben), daneben um den Kapitaldienst aus der Finanzierung der Investitionen (s. Abschnitt 3.6).

Der Ausgabenbarwert wird auf den Zeitpunkt der Investitionsentscheidung (2021) diskontiert. Der Diskontierungsfaktor entspricht den gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (WACC: Weighted Average Cost of Capital) [56].

Anschließend wird in einem zweiten Schritt ermittelt, wie hoch eine Erlösannuität ausfallen muss, damit der Einnahme- dem Ausgabenbarwert entspricht und CargoCap sich rentiert. Der Barwert der Erlösannuität ergibt sich wie folgt, wenn nach der dreijährigen Planungs-, Bau- und Testphase die nach Bergisch Gladbach ein- und ausgehenden Güterströme vollständig von CCBG übernommen werden [57]:

$$EBW = \sum_{t=4}^{t=83} ea_t * \frac{1}{(1+WACC_s^n)^t}$$

Der Einnahmebarwert wird ebenfalls auf den Zeitpunkt 2021 diskontiert.

Für einen rentablen Betrieb muss eine Erlösannuität (ea) erzielt werden, die diskontiert und summiert über den Projektzeitraum einen Barwert besitzt, der dem Ausgabenbarwert entspricht (EBW = ABW). Dies führt zu einem Kapitalwert der Investition von Null, d.h. die Kapitalgeber erhalten ihr eingesetztes Kapital und eine Verzinsung in Höhe des Diskontfaktors zurück.

Bei den Einnahmen und Ausgaben in der dynamischen Investitionsrechnung wird auch der Einfluss der Finanzierung berücksichtigt, weil sowohl von einer Eigenkapital- als auch einer Fremdkapitalfinanzierung der Kapitalgesellschaft ausgegangen wird, die CCBG betreibt. Insofern werden Krediteinnahmen sowie Zins- und Tilgungszahlungen berücksichtigt.

4.2 Annahmen

4.2.1 Transportaufgabe und Betreibergesellschaft

Ausgangspunkt dieser Studie ist die Logistikaufgabe für das CC-System in Bergisch Gladbach [58]. Angenommen wird, dass die Logistikaufgabe von einer privaten, ertragsteuerpflichtigen Kapitalgesellschaft als Systembetreiber übernommen wird.

4.2.2 Aufwand, Ertrag, Auszahlung, Einzahlung

Die Ausgabenströme des Infrastrukturprojektes sind durch die hohen Investitionsausgaben in den ersten drei Jahren und relativ geringen Betriebsausgaben für Personal, Energie und Wartung sowie Gewinnsteuern charakterisiert. Ohne erhebliche Verzerrungen kann für die Betriebsausgaben unterstellt werden, dass Auszahlungen und Aufwendung deckungsgleich sind. Ebenfalls kann angenommen werden, dass die Transporterlöse den Transporteinnahmen entsprechen und insofern Forderungen aus Lieferungen und Leistungen ausgeblendet werden. Unter diesen Annahmen ergibt sich das Ergebnis vor Steuern aus der Differenz zwischen Einnahmeannuität und den Betriebs- und Zinsausgaben sowie Abschreibungen [59]. Die Kürzung des Gewinns vor Steuern um die Ertragsteuern führt schließlich zum Jahresüberschuss.

4.2.3 Besteuerung

Die Kapitalgesellschaft ist ertragsteuerpflichtig. Konkret werden Körperschaftsteuer (inkl. Solidaritätszuschlag) und Gewerbesteuer berücksichtigt. Der Gewerbesteuersatz beläuft sich auf 16,1% und basiert auf einer Steuermesszahl von 3,5% sowie einem Hebesatz für Bergisch Gladbach von 460% [60]. Der Körperschaftsteuersatz beläuft sich auf 15,8% und setzt sich aus der Körperschaftsteuer (15%) und dem auf die Körperschaftsteuer anfallenden Solidaritätszuschlag von 5,5% zusammen. Sobald positive Jahresüberschüsse erwirtschaftet werden, werden gegebenenfalls bestehende Verlustvorträge bei der Gewerbe- und Körperschaftsteuer unter Berücksichtigung der Mindestbesteuerung nach § 10 d (2) EStG berücksichtigt. Bei der Gewerbesteuer werden die Fremdkapitalzinsen hinzugerechnet. Die Kürzung des Gewerbeertrags um 1,2% des Einheitswertes des betrieblichen Grundbesitzes wurde vernachlässigt, da CCBG nur im geringen Umfang Grundstücksvermögen besitzt.

Die Studie umfasst eine Vor- und Nachsteuerbetrachtung. Der Einfluss der Ertragsteuerung auf CCBG wird mit folgenden Schritten approximiert: Die Zielerlösannuität wird in einem ersten Schritt ohne Berücksichtigung der Gewerbe- und Körperschaftsteuer ermittelt. Der Ausgabenbarwert enthält somit keine Steuerzahlung. Im zweiten Schritt werden für diese Zielerlösannuität die Gewinne (Verluste) vor und nach Steuern (Gewerbe- und Körperschaftsteuer) berechnet. In einem dritten Schritt werden die fälligen Ertragsteuern bei der Berechnung der Ausgaben und des Ausgabenbarwertes berücksichtigt. Die dann notwendige (höhere) Zielerlösannuität, deren Barwert dem Barwert der Ausgaben entspricht, wird anschließend ermittelt. Abschließend werden die jährlichen GuV-Rechnungen vor und nach Steuern kalkuliert.

4.2.4 Preisänderungen

Die Inflationsrate wird konstant vor dem Hintergrund der Preissteigerungen zwischen 2010 und 2019 auf 1,33% p.a. angenommen [61]. Preisänderungen führen zu einer Differenz zwischen dem nominalen und realen Diskontierungssatz. Es werden reale Barwerte berechnet. Dazu werden die nominalen Zahlungsreihen der Ein- und Ausgaben mit dem nominalen Diskontierungsfaktor nach Steuern ($WACC_s^n$) diskontiert [62].

Die Werte für die Wiederbeschaffung von Anlagen wurden mit der durchschnittlichen Preissteigerungsrate von 1,33% für die Jahre 2010 bis 2019 fortgeschrieben [63]. Die Personalkosten wurden auf Basis der mittleren Wachstumsrate der Arbeitskosten im Transportsektor für die Jahre der Projektdauer ermittelt [64]. Die tägliche Arbeitszeit beläuft sich auf 10 Stunden.

Die nominalen Energieausgaben wurden vor dem Hintergrund der Strompreisentwicklung zwischen 2010 und 2020 mit einer konstanten Energiepreissteigerungsrate von 2,9% p.a. veranschlagt [65].

Die nominalen Personalausgaben werden auf der Basis des mittleren Wachstums der Arbeitskosten im Transportsektor in Deutschland in Höhe von knapp 1% p.a. fortgeschrieben.

Nominale Wartungskosten werden auf Basis der allgemeinen Preissteigerungsrate von 1,33% ermittelt.

4.2.5 Zinssätze und Diskontierungsfaktor

Die für die Ermittlung der gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten relevanten Fremd- und Eigenkapitalzinssätze basieren auf der jüngsten KPMG (2019) Kapitalmarktstudie. Diese ermittelt auf der Basis einer Unternehmensbefragung (insgesamt 312) die in der Praxis angewandten und beobachtbaren Zinssätze. Diese werden branchenspezifisch differenziert und die für den Transportsektor relevanten Sätze wurden bei der Barwertberechnung übernommen. Es wird von den von KPMG ermittelten augenblicklichen Kreditzinsen (i_F) im Transportsektor in Höhe von 3,1% ausgegangen [66]. Die Orientierung am aktuellen Kreditzins trägt zudem der Tatsache Rechnung, dass das Gros der Kredite zeitnah in den ersten drei Jahren der Projektzeit (2021 – 2023) aufgenommen wird.

Mit den gewichteten durchschnittlichen (nominalen) Kapitalkosten ($WACC_s^n$) werden die nominalen Zahlungsreihen diskontiert und reale Barwerte ermittelt [67]:

$$WACC_s^n = (1-s) * FKQ * i_F + EKQ * i_E$$

Die Eigenkapitalkosten belaufen sich im Transportsektor nach der KPMG (2019) Studie auf 7,8%, die Fremdkapitalkosten auf 3,3%. Bei einer Eigenkapitalquote von 30% und einer Gewinnsteuer von 32% ergeben sich gewichtete durchschnittliche Kapitalkosten für CCBG in Höhe von 3,9% [68]

$$WACC_s^n = (1-0,32) * 0,7 * 0,033 + 0,3 * 0,078 = 3,9\%$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Kreditzinszahlungen im Jahr der Fremdkapitalaufnahme einsetzen. Die Tilgungszahlungen setzen mit Aufnahme des Betriebs von CCBG im Jahr 2024 ein. Es wird eine 20-jährige Tilgungszeit (n) unterstellt. Der Barwert der Finanzinvestition wird wie folgt ermittelt [69]:

$$FBW = \sum_{t=1}^n (FK_t - KANN_t) * \frac{1}{(1+i_F)^t}$$

Der Fremdkapitalbetrag wird einschließlich Zinsen durch gleiche Zahlungen in 20 Jahren zurückgezahlt. Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor (KWF) wird dann wie folgt berechnet [70]:

$$KWF = \sum_{t=1}^n FK * \frac{i_F * (1+i_F)^n}{(1+i_F)^n - 1}$$

4.2.6 Finanzierungs- und Kapitalstruktur

In Anlehnung an BDO (2008) sowie vor dem Hintergrund der Eigenkapitalquote mittelständischer Unternehmen sowie der Unternehmen im Transportsektor in Deutschland wird davon ausgegangen, dass die Investitionsausgaben für die Strecke, die Stationen und die Fahrzeuge zu 70% über Fremdkapital und 30% über Eigenkapital finanziert werden [71]. Da in den ersten drei Projektjahren keine Einnahmen generiert werden, wird vereinfachend angenommen, dass die Fremdkapitalzinsen ebenfalls kreditfinanziert werden. Dies führt dazu, dass die Fremdkapitalquote in diesen Jahren leicht über 70 Prozent liegt.

4.2.7 Afa und Nutzungsdauern

Tabelle 18 stellt die angenommenen durchschnittlichen Abschreibungs- und Nutzungsdauern zusammen.

Tabelle 18: CCBG Nutzungsdauern (Jahre)

Sachanlagen	AfA-Dauer	Betriebswirt. ND		Ersatzinvestitionsjahre
			wirtschaftliche Nutzungsdauer	
Verwaltungsausstattung		10	40	2064
Grundstücke			80	
Streckenrohbau		25	80	
Streckeneinbau		45	80	
Stationsmodul		25	80	
Stationstechnik		14	80	
Anschlussstrecke		50	80	
Abzweig		45	80	
CAP		15	20	2044, 2064, 2084
EDV-Leitsystem		10	80	

Abgeschrieben wird linear, beginnend mit der Inbetriebnahme.

4.2.8 Personal-, Energie- und Wartungsausgaben

Die Personalausgaben sind in Verbindung mit der Unternehmensführung und -verwaltung sowie im Rahmen der Betreuung der Stationen relevant:

- Es wird von einer Person bei der Geschäftsführung, zwei weiteren Personen für wirtschaftliche und technische Leitung sowie einer Person im Sekretariat, also insgesamt 3 Personen, ausgegangen. Der dabei insgesamt anfallende Ausgabenbedarf beläuft sich auf rund 266 Tsd. €. Für das erste Projektjahr in der Planungsphase wird die Hälfte dieses Betrags angesetzt. Für die Folgejahre wird der Ausgabenbedarf mit der konstanten Steigerungsrate der Arbeitskosten von rund einem Prozent fortgeschrieben [72].
- Für die CityHubs und insbesondere im GVZ für die Umladung zwischen Lkw und CargoCap wird von einer Personalausstattung in Höhe von 47,5 Personen ausgegangen. Sie werden entsprechend den durchschnittlichen Arbeitskosten im Logistiksektor entlohnt. Diese lagen 2020 bei 26,70 € pro Stunde [73].
- Für das in 2023 eingesetzte Testpersonal wurden rund 560 Tsd. € veranschlagt [74].
- Die Arbeitskosten pro Stunde betragen im Transportgewerbe 2020 rund 27 € und werden mit einer konstanten Preissteigerung p.a. von knapp einem Prozent fortgeschrieben [75].

Die nominalen Energieausgaben wurden vor dem Hintergrund der Strompreisentwicklung zwischen 2010 und 2020 mit einer konstanten Energiepreissteigerungsrate von 2,9% p.a. veranschlagt [76]. Ausgangspunkt waren die jährlichen Energiekosten in Höhe von 107.382 € in 2020 (s. Abschnitt 3.6.2). Diese wurden entsprechend der Preissteigerungsrate mit dem Jahr der Aufnahme des Testbetriebs (2023) fortgeschrieben. Für das Jahr des Testbetriebs wurde angenommen, dass sie sich auf die Hälfte der in der Betriebsphase anfallenden Energieausgaben belaufen.

Die Wartungsausgaben p.a. in Höhe von einem Prozent der Investitionsausgaben wurden ebenfalls mit der konstanten Preissteigerungsrate der Arbeitskosten kalkuliert. Sie enthalten auch alle Wartungsmittel für den Systembetrieb.

4.2.9 Transport- und Palettenaufkommen

Vor dem Hintergrund der Transportaufgabe wird pro Tag ein Palettenaufkommen von 6.740 Einheiten für den Warenein- und -ausgang generiert. Bei einer täglichen Betriebszeit von 10 Stunden und einem Fünftagebetrieb liegt das Palettenaufkommen über die 80-jährige Betriebszeit bei rund 140,1 Mio.

4.3 Investitions- und Gewinnrechnung DN 2200

4.3.1 Sachinvestitionsausgaben DN 2200

In den ersten beiden Projektjahren werden die Ausstattung der Verwaltung sowie die notwendigen Grundstücke für die Stationen beschafft. Tabelle 19 gibt einen Überblick zu den Sachinvestitionen in den ersten drei Jahren.

Tabelle 19: Sachinvestition in 2021 – 2023 DN 2200 (€)

Jahr	Sachinvestition	Ausgabe (€)
2021	Verwaltungsausstattung	48.127
2022	Grundstücke	274.865
2023	Streckenrohbau	30.814.200
2023	Strecke Einbau	13.679.300
2023	Stationsmodul Bau	5.056.200
2023	Stationstechnik	8.427.000
2023	Anschlussstrecke	2.226.000
2023	Abzweig	1.784.616
2023	247 Caps	14.633.021
2023	Leitsystem	14.630.255
Summe		91.573.584

Die Sachinvestitionen belaufen sich in den ersten drei Jahren auf rund 92 Mio. €.

Bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren für die Fahrzeuge sowie bei einer 40-jährigen Nutzungsdauer der Verwaltungsausstattung werden bei einer 80-jährigen Betriebszeit von CCBG folgende in Tabelle 20 aufgeführten Ersatzinvestitionen notwendig:

Tabelle 20: Cap-Ersatzinvestitionen (€)

Jahr	Ersatzinvestitionen	Ausgabe (€)
2044	Caps	19.058.769
2064	Caps	24.823.082
2064	Verwaltung	81.642
2084	Caps	32.330.808
Summe		76.294.301

Die Investitionsausgaben für die Fahrzeuge enthalten die auf die 247 Fahrzeuge umgelegten Entwicklungskosten [77].

Das Sachinvestitionsvolumen CCBG DN 2200 beläuft sich auf insgesamt rund 168 Mio. €.

4.3.2 Investition und Finanzierung DN 2200

Zur Finanzierung der Betriebs- und Investitionsausgaben in den ersten drei Jahren werden Kredite aufgenommen und auch die Kreditzinsen werden fremdfinanziert. Die Entwicklung der Verschuldung (bei einer Eigenkapitalquote von 30%) in den ersten drei Jahren stellt Tabelle 21 zusammen:

Tabelle 21: Kreditentwicklung in 2021 bis 2023 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2020				
2021	126.696	4.181	0	130.877
2022	130.877	4.319	0	135.196
2023	135.196	4.461	0	139.657
2022	380.186	12.546	0	392.732
2023	392.732	12.960	0	405.692
2023	65.685.294	2.167.615	67.852.909	67.852.909

Das Fremdkapital beläuft sich in den ersten drei Jahren auf rund 68 Mio. €.

Tabelle 22 stellt die Ausgaben in den ersten drei Projektjahren zusammen mit der Eigen- und Fremdkapitalfinanzierung zusammen.

Tabelle 22: Ausgaben- und Kapitalentwicklung in 2021 – 2023 DN 2200 (€)

Jahr	BA	INV	BA+INV	FK 2021	FK 2022	FK 2023	ΣFK	EK
2021	132.867	48.127	180.994	130.877	130877		261.754	54.298
2022	268.258	274.865	543.123	4.319	392.732		397.051	162.937
2023	2.585.542	91.250.592	93.836.134	4.461	12.960	67.852.909	67.870.330	28.150.840
							68.529.135	28.368.075

4.3.3 Zinszahlungen und Tilgung DN 2200

Die Tilgung beginnt für alle Kredittranchen der Jahre 2021 bis 2023 im Jahr 2024. Für den in 2021 aufgenommenen Kredit werden die Zinsen durch Kreditaufnahme bis zur Aufnahme des regulären Transportbetriebs finanziert. Für das

- 2021 aufgenommene Fremdkapital beläuft sich die Annuität auf knapp 10 Tsd. € p.a. (vgl. Tabelle 65 im Anhang),
- 2022er Darlehen liegt die Annuität bei rund 28 Tsd. € p.a. (vgl. Tabelle 66 im Anhang),
- 2023er Fremdkapital beträgt die Annuität rund 5 Mio. € p.a. (vgl. Tabelle 67 im Anhang).

Die Kreditlaufzeiten erstrecken 20 Jahre und die Tilgungszahlungen setzen mit dem Betriebsbeginn (2023) ein.

Hinsichtlich der Ersatzinvestitionen sind die Ausgaben für die Verwaltungsausstattung und die Wiederbeschaffung der Caps relevant. Auch in Hinblick auf die Ersatzinvestitionen wird davon ausgegangen, dass sich die Fremdkapitalquote auf 70% beläuft. Für die Fremdkapitalbeschaffung

- in 2024 (rund 13 Mio. €) liegt die Annuität bei rund 900 Tsd. € (vgl. Tabelle 68 im Anhang),
- in 2064 (rund 17 Mio. €) beläuft sich die Annuität auf rund 1,2 Mio. € (vgl. Tabelle 69 im Anhang),
- in 2084 (rund 23 Mio. €) beträgt die Annuität 1,7 Mio. € (vgl. Tabelle 70 im Anhang).

4.3.4 Betriebsausgaben DN 2200

Betriebsausgaben für CCBG fallen für die Energieversorgung, das Personal und die Wartung an. Im Bau- und Testjahr wird davon ausgegangen, dass lediglich die Hälfte des ansonsten im Betriebsjahr notwendigen Personals benötigt wird. Ab 2024 wird mit 47,5 Personen gerechnet. Es wird an 10 Stunden pro Tag und über 52 Kalenderwochen gearbeitet. Die Gesamtausgaben belaufen sich auf rund 560 Mio. € und sie werden von den Personalausgaben dominiert. Die Betriebsausgaben für Personal, Energie und Wartung stellt Tabelle 21 im Anhang zusammen.

4.3.5 Ausgabenbarwerte DN 2200

Die Zahlungsreihe für die Sach- und Finanzinvestition ohne Berücksichtigung der Transporterlöse sowie deren Ausgabenbarwert stellt Tabelle 23 zusammen. Neben den Betriebsausgaben werden die Fremdkapitalinvestitionen, die Zins- und Tilgungszahlungen sowie der Restwert der Grundstücke berücksichtigt. Aufgrund der Betrachtung vor Steuern werden Ertragsteuern nicht einbezogen.

Tabelle 23: Gesamtausgaben (ohne Steuern) und Ausgabenbarwert DN 2200 (€)

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GA	BWGA
2021	48.127	132.867	130.877	4.181			54.299	52.261
2022	274.865	268.258	397.051	16.865			162.937	150.935
2023	91.250.592	2.585.542	67.870.330	2.185.036			28.150.840	25.098.324
2024		4.329.385			4.725.896		9.055.281	7.770.335
2025		4.374.801			4.725.896		9.100.697	7.516.176
2026		4.420.743			4.725.896		9.146.639	7.270.567
2027		4.467.218			4.725.896		9.193.114	7.033.214
2028		4.514.233			4.725.896		9.240.129	6.803.833
2029		4.561.795			4.725.896		9.287.691	6.582.151
2030		4.609.912			4.725.896		9.335.808	6.367.903
2031		4.658.594			4.725.896		9.384.490	6.160.836
2032		4.707.846			4.725.896		9.433.742	5.960.702
2033		4.757.676			4.725.896		9.483.572	5.767.264
2034		4.808.096			4.725.896		9.533.992	5.580.294
2035		4.859.112			4.725.896		9.585.008	5.399.571
2036		4.910.731			4.725.896		9.636.627	5.224.880
2037		4.962.964			4.725.896		9.688.860	5.056.015
2038		5.015.821			4.725.896		9.741.717	4.892.780
2039		5.069.307			4.725.896		9.795.203	4.734.979
2040		5.210.621			4.725.896		9.936.517	4.622.993
2041		5.266.227			4.725.896		9.992.123	4.474.364
2042		5.322.501			4.725.896		10.048.397	4.330.666
2043		5.379.454			4.725.896		10.105.350	4.191.734
2044	19.058.769	5.437.092	13.341.138		921.790		12.076.513	4.821.347
2045		5.495.431			921.790		6.417.221	2.465.803
2046		5.554.476			921.790		6.476.266	2.395.082
2047		5.614.242			921.790		6.536.032	2.326.453
2048		5.674.736			921.790		6.596.526	2.259.852
2049		5.735.973			921.790		6.657.763	2.195.217
2050		5.797.960			921.790		6.719.750	2.132.489
2051		5.860.712			921.790		6.782.502	2.071.610
2052		5.924.240			921.790		6.846.030	2.012.525
2053		5.988.557			921.790		6.910.347	1.955.180
2054		6.053.672			921.790		6.975.462	1.899.522
2055		6.119.600			921.790		7.041.390	1.845.501
2056		6.186.353			921.790		7.108.143	1.793.067
2057		6.253.945			921.790		7.175.735	1.742.172
2058		6.322.388			921.790		7.244.178	1.692.771
2059		6.391.696			921.790		7.313.486	1.644.819
2060		6.461.882			921.790		7.383.672	1.598.271
2061		6.532.962			921.790		7.454.752	1.553.087
2062		6.604.948			921.790		7.526.738	1.509.224
2063		6.677.858			921.790		7.599.648	1.466.645

Fortsetzung Tabelle 23

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GA	BWGA
2064	24.904.724	6.751.703	17.433.307		1.204.534		15.427.653	2.865.601
2065		6.826.502			1.204.534		8.031.036	1.435.727
2066		6.902.269			1.204.534		8.106.802	1.394.872
2067		6.979.018			1.204.534		8.183.551	1.355.224
2068		7.056.769			1.204.534		8.261.303	1.316.747
2069		7.135.537			1.204.534		8.340.070	1.279.404
2070		7.215.338			1.204.534		8.419.872	1.243.163
2071		7.296.191			1.204.534		8.500.724	1.207.989
2072		7.378.113			1.204.534		8.582.646	1.173.850
2073		7.461.121			1.204.534		8.665.655	1.140.716
2074		7.545.236			1.204.534		8.749.769	1.108.554
2075		7.630.476			1.204.534		8.835.009	1.077.338
2076		7.716.860			1.204.534		8.921.393	1.047.037
2077		7.804.407			1.204.534		9.008.941	1.017.624
2078		7.893.138			1.204.534		9.097.672	989.073
2079		7.983.074			1.204.534		9.187.608	961.358
2080		8.074.237			1.204.534		9.278.771	934.453
2081		8.166.647			1.204.534		9.371.180	908.335
2082		8.260.325			1.204.534		9.464.858	882.979
2083		8.355.297			1.204.534		9.559.830	858.362
2084	32.330.808	8.451.582	22.631.565		1.563.701		19.714.526	1.703.693
2085		8.549.207			1.563.701		10.112.908	841.135
2086		8.648.195			1.563.701		10.211.896	817.486
2087		8.748.569			1.563.701		10.312.271	794.534
2088		8.850.358			1.563.701		10.414.059	772.259
2089		8.953.584			1.563.701		10.517.285	750.639
2090		9.058.276			1.563.701		10.621.977	729.654
2091		9.164.460			1.563.701		10.728.161	709.286
2092		9.272.163			1.563.701		10.835.864	689.516
2093		9.381.414			1.563.701		10.945.115	670.325
2094		9.492.243			1.563.701		11.055.944	651.696
2095		9.604.678			1.563.701		11.168.379	633.613
2096		9.718.749			1.563.701		11.282.450	616.058
2097		9.834.489			1.563.701		11.398.190	599.016
2098		9.951.928			1.563.701		11.515.629	582.472
2099		10.071.099			1.563.701		11.634.800	566.410
2100		10.192.035			1.563.701		11.755.736	550.815
2101		10.314.771			1.563.701		11.878.472	535.675
2102		10.439.342			1.563.701		12.003.043	520.974
2103		10.565.782			1.563.701	274.865	11.854.618	495.219
Summe	167.867.885	559.577.607	121.804.269		168.318.414	274.865	775.890.855	220.852.295

Die Gesamtausgaben belaufen sich auf rund 776 Mio. €. Ihr Barwert beträgt (bei $WACC_3^0 = 3,9\%$) rund 221 Mio. €.

4.3.6 Zielerlösannuität ohne Steuern DN 2200

Die Investition in CCBG ist rentabel, wenn in Höhe des Barwertes der Ausgaben mindestens eine Zielerlösannuität erzielt werden kann, deren Barwert wiederum dem Ausgabenbarwert entspricht. Der Ausgabenbarwert sowie die Zielerlösannuität berücksichtigen dabei im ersten Schritt nicht die Ertragsteuerzahlungen. Dann beläuft sich die jährlich notwendige Zielerlösannuität (bei KWF = 4,1%) auf rund 10 Mio. € (vgl. Tabelle 72 im Anhang). Diese Annuität ist notwendig, damit im Rahmen einer Vorsteuerbetrachtung das Projekt betriebswirtschaftlich rentabel wird.

Bei einer Erlösannuität von rund 10 Mio. € erwirtschaftet CCBG einen Gewinn vor Steuern von 36 Mio. €. Die dafür fälligen Ertragsteuern belaufen sich auf rund 25 Mio. €. Für die Zielerlöse in der Vorsteuerbetrachtung wird insgesamt in der Projektzeit ein Jahresüberschuss nach Besteuerung in Höhe von knapp 12 Mio. € erwirtschaftet.

4.3.7 Zielerlösannuität mit Ertragssteuern DN 2200

Bei der Barwertbetrachtung nach Besteuerung wird eine Zielerlösannuität gefordert, deren realer Barwert dem realen Ausgabenbarwert unter Berücksichtigung von Gewinnsteuern entspricht. Der Ausgabenbarwert nach Steuern umfasst neben den Investitions-, Betriebs- und Zinsausgaben zusätzlich die Ertragsteuern. Folglich führt dies zu einer Erhöhung der notwendigen Zielerlösannuität. Die in Tabelle 24 berücksichtigten Ertragsteuern werden durch die Gewerbesteuer (GwSt) und Körperschaftsteuer (KSt) für den Gewinn vor Steuern approximiert.

Tabelle 24: Ausgabenbarwert mit Steuern DN 2200 (€)

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GwSt	KSt	GA	BWGA
2020										
2021	48.127	132.867	130.877	4.181			0	0	54.299	52.261
2022	274.865	268.258	397.051	16.865			0	0	162.937	150.935
2023	91.250.592	2.585.542	67.870.330	2.185.036			0	0	28.150.840	25.098.324
2024		4.329.385			4.725.896		0	0	9.055.281	7.770.335
2025		4.374.801			4.725.896		0	0	9.100.697	7.516.176
2026		4.420.743			4.725.896		0	0	9.146.639	7.270.567
2027		4.467.218			4.725.896		0	0	9.193.114	7.033.214
2028		4.514.233			4.725.896		0	0	9.240.129	6.803.833
2029		4.561.795			4.725.896		0	0	9.287.691	6.582.151
2030		4.609.912			4.725.896		0	0	9.335.808	6.367.903
2031		4.658.594			4.725.896		0	0	9.384.490	6.160.836
2032		4.707.846			4.725.896		0	0	9.433.742	5.960.702
2033		4.757.676			4.725.896		0	0	9.483.572	5.767.264
2034		4.808.096			4.725.896		379.381	1.124	9.914.496	5.803.006
2035		4.859.112			4.725.896		370.773	5.024	9.960.805	5.611.271
2036		4.910.731			4.725.896		362.056	9.120	10.007.803	5.426.127
2037		4.962.964			4.725.896		353.226	13.421	10.055.507	5.247.346
2038		5.015.821			4.725.896		441.193	55.975	10.238.884	5.142.482
2039		5.069.307			4.725.896		589.194	122.360	10.506.757	5.078.942
2040		5.210.621			4.725.896		565.979	121.808	10.624.304	4.942.988
2041		5.266.227			4.725.896		556.548	126.950	10.675.621	4.780.427
2042		5.322.501			4.725.896		546.994	623.303	11.218.693	4.835.042
2043		5.379.454			4.725.896		537.314	502.930	11.145.594	4.623.231
2044	19.058.769	5.437.092	13.341.138		921.790		318.646	247.364	12.642.524	5.047.318
2045		5.495.431			921.790		309.359	240.657	6.967.238	2.677.145
2046		5.554.476			921.790		299.967	233.922	7.010.155	2.592.527
2047		5.614.242			921.790		290.467	227.158	7.053.657	2.510.698
2048		5.674.736			921.790		280.860	220.367	7.097.753	2.431.563
2049		5.735.973			921.790		359.237	300.004	7.317.004	2.412.584
2050		5.797.960			921.790		349.409	293.163	7.362.322	2.336.406
2051		5.860.712			921.790		339.468	286.299	7.408.270	2.262.741
2052		5.924.240			921.790		329.414	279.413	7.454.857	2.191.502
2053		5.988.557			921.790		319.245	272.506	7.502.098	2.122.607
2054		6.053.672			921.790		308.959	265.581	7.550.003	2.055.978
2055		6.119.600			921.790		298.556	258.638	7.598.584	1.991.538
2056		6.186.353			921.790		288.033	251.679	7.647.856	1.929.212
2057		6.253.945			921.790		277.390	244.707	7.697.832	1.868.931
2058		6.322.388			921.790		471.189	438.474	8.153.841	1.905.335
2059		6.391.696			921.790		460.300	431.479	8.205.265	1.845.382
2060		6.461.882			921.790		433.029	424.476	8.241.177	1.783.887
2061		6.532.962			921.790		425.393	417.466	8.297.610	1.728.684
2062		6.604.948			921.790		418.246	410.452	8.355.436	1.675.391
2063		6.677.858			921.790		411.097	403.437	8.414.181	1.623.840

Fortsetzung Tabelle 24

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GwSt	KSt	GA	BWGA
2064	24.904.724	6.751.703	17.433.307		1.204.534		62.708	42.765	15.533.126	2.885.192
2065		6.826.502			1.204.534		53.172	34.227	8.118.435	1.451.352
2066		6.902.269			1.204.534		43.564	25.645	8.176.012	1.406.780
2067		6.979.018			1.204.534		33.883	17.020	8.234.454	1.363.654
2068		7.056.769			1.204.534		24.129	8.352	8.293.783	1.321.924
2069		7.135.537			1.204.534		138.898	121.916	8.600.884	1.319.415
2070		7.215.338			1.204.534		128.999	113.166	8.662.037	1.278.918
2071		7.296.191			1.204.534		119.028	104.378	8.724.131	1.239.736
2072		7.378.113			1.204.534		108.986	95.553	8.787.185	1.201.825
2073		7.461.121			1.204.534		98.873	86.691	8.851.219	1.165.143
2074		7.545.236			1.204.534		106.284	95.063	8.951.116	1.134.064
2075		7.630.476			1.204.534		96.029	86.134	9.017.173	1.099.551
2076		7.716.860			1.204.534		85.705	77.175	9.084.273	1.066.153
2077		7.804.407			1.204.534		75.312	68.186	9.152.438	1.033.834
2078		7.893.138			1.204.534		64.850	59.170	9.221.692	1.002.556
2079		7.983.074			1.204.534		320.755	311.599	9.819.962	1.027.525
2080		8.074.237			1.204.534		310.158	302.534	9.891.463	996.157
2081		8.166.647			1.204.534		299.496	293.449	9.964.125	965.808
2082		8.260.325			1.204.534		289.745	284.346	10.038.948	936.536
2083		8.355.297			1.204.534		280.451	275.226	10.115.507	908.256
2084	32.330.808	8.451.582	22.631.565		1.563.701		0	0	19.714.526	1.703.693
2085		8.549.207			1.563.701		0	0	10.112.908	841.135
2086		8.648.195			1.563.701		0	0	10.211.896	817.486
2087		8.748.569			1.563.701		0	0	10.312.271	794.534
2088		8.850.358			1.563.701		0	0	10.414.059	772.259
2089		8.953.584			1.563.701		0	0	10.517.285	750.639
2090		9.058.276			1.563.701		0	0	10.621.977	729.654
2091		9.164.460			1.563.701		0	0	10.728.161	709.286
2092		9.272.163			1.563.701		0	0	10.835.864	689.516
2093		9.381.414			1.563.701		0	0	10.945.115	670.325
2094		9.492.243			1.563.701		0	0	11.055.944	651.696
2095		9.604.678			1.563.701		0	0	11.168.379	633.613
2096		9.718.749			1.563.701		0	0	11.282.450	616.058
2097		9.834.489			1.563.701		0	0	11.398.190	599.016
2098		9.951.928			1.563.701		0	0	11.515.629	582.472
2099		10.071.099			1.563.701		0	0	11.634.800	566.410
2100		10.192.035			1.563.701		0	0	11.755.736	550.815
2101		10.314.771			1.563.701		0	0	11.878.472	535.675
2102		10.439.342			1.563.701		0	0	12.003.043	520.974
2103		10.565.782			1.563.701	274.865	0	0	11.854.618	495.219
Summe	167.867.885	559.577.607	121.804.269		168.318.414	274.865	14.431.946	10.231.852	800.554.653	228.053.482

Die Berücksichtigung von Steuern erhöht die Ausgaben sowie deren Barwert. Sie belaufen sich auf rund 801 Mio. € bzw. 228 Mio. € (vgl. Tabelle 24). Die zum Ausgleich des Einnahmen- und Ausgabenbarwertes notwendigen Zielerlöse und Zielerlösannuitäten p.a. stellt Tabelle 73 im Anhang zusammen. Eine Zielerlösannuität von knapp 10,5 Mio. € ist notwendig, wenn unter Berücksichtigung von Ertragsteuern bei den Ausgaben und deren Barwert das Projekt betriebswirtschaftlich rentabel realisiert werden soll.

4.3.8 Kosten, Erlöse, Gewinne und Zielerlösannuität mit Steuern DN 2200

Tabelle 25 stellt die Jahresüberschüsse nach Besteuerung dar. Bei einer Zielerlösannuität von rund 10,5 Mio. € ergibt sich nach Abzug der Betriebs- und Zinsausgaben ein Gewinn vor Steuern von insgesamt rund 63 Mio. €.

Tabelle 25: Gewinne vor und nach Steuern für Zielerlösannuität mit Steuern DN 2200 (€)

Jahr	BA	ZI	Afa	ZEAN	GvS	GwSt	KSt	JÜ	GK
2020									
2021	132.867	4.181			-137.048	0	0	-137.048	137.048
2022	268.258	16.865			-285.123	0	0	-285.123	285.123
2023	2.585.542	2.185.036			-4.770.578	0	0	-4.770.578	4.770.578
2024	4.329.385	2.257.143	4.467.482	10.466.199	-587.811	0	0	-587.811	11.054.010
2025	4.374.801	2.175.674	4.467.482	10.466.199	-551.758	0	0	-551.758	11.017.957
2026	4.420.743	2.091.516	4.467.482	10.466.199	-513.542	0	0	-513.542	10.979.742
2027	4.467.218	2.004.582	4.467.482	10.466.199	-473.083	0	0	-473.083	10.939.282
2028	4.514.233	1.914.778	4.467.482	10.466.199	-430.294	0	0	-430.294	10.896.494
2029	4.561.795	1.822.012	4.467.482	10.466.199	-385.089	0	0	-385.089	10.851.289
2030	4.609.912	1.726.183	4.467.482	10.466.199	-337.379	0	0	-337.379	10.803.578
2031	4.658.594	1.627.193	4.467.482	10.466.199	-287.070	0	0	-287.070	10.753.269
2032	4.707.846	1.524.936	4.467.482	10.466.199	-234.064	0	0	-234.064	10.700.263
2033	4.757.676	1.419.304	4.467.482	10.466.199	-178.263	0	0	-178.263	10.644.463
2034	4.808.096	1.310.186	2.999.644	10.466.199	1.348.273	41.913	22.011	1.284.349	9.181.850
2035	4.859.112	1.197.468	2.999.644	10.466.199	1.409.975	44.072	25.910	1.339.993	9.126.206
2036	4.910.731	1.081.030	2.999.644	10.466.199	1.474.794	46.371	30.007	1.398.416	9.067.783
2037	4.962.964	960.749	2.999.644	10.466.199	1.542.842	219.553	34.308	1.288.981	9.177.218
2038	5.015.821	836.499	2.397.716	10.466.199	2.216.163	386.446	76.862	1.752.855	8.713.344
2039	5.069.307	708.149	1.422.181	10.466.199	3.266.562	550.395	143.247	2.572.921	7.893.278
2040	5.210.621	575.564	1.422.181	10.466.199	3.257.834	543.653	667.701	2.046.480	8.419.719
2041	5.266.227	438.603	1.422.181	10.466.199	3.339.189	551.238	685.592	2.102.359	8.363.840
2042	5.322.501	297.122	1.422.181	10.466.199	3.424.396	559.262	699.055	2.166.079	8.300.120
2043	5.379.454	150.972	1.422.181	10.466.199	3.513.592	567.740	555.148	2.390.705	8.075.495
2044	5.437.092	440.258	2.692.765	10.466.199	1.896.084	318.965	299.581	1.277.538	9.188.661
2045	5.495.431	424.367	2.692.765	10.466.199	1.853.636	311.491	292.874	1.249.270	9.216.929
2046	5.554.476	407.952	2.692.765	10.466.199	1.811.006	303.967	286.139	1.220.900	9.245.299
2047	5.614.242	390.995	2.692.765	10.466.199	1.768.197	296.392	279.375	1.192.429	9.273.770
2048	5.674.736	373.479	2.692.765	10.466.199	1.725.218	288.768	272.584	1.163.866	9.302.333
2049	5.735.973	355.385	2.145.593	10.466.199	2.229.248	369.188	352.221	1.507.839	8.958.360
2050	5.797.960	336.694	2.145.593	10.466.199	2.185.952	361.465	345.380	1.479.106	8.987.093
2051	5.860.712	317.385	2.145.593	10.466.199	2.142.508	353.694	338.516	1.450.298	9.015.901
2052	5.924.240	297.440	2.145.593	10.466.199	2.098.926	345.874	331.630	1.421.422	9.044.778
2053	5.988.557	276.836	2.145.593	10.466.199	2.055.213	338.007	324.724	1.392.482	9.073.717
2054	6.053.672	255.553	2.145.593	10.466.199	2.011.380	330.093	317.798	1.363.489	9.102.710
2055	6.119.600	233.567	2.145.593	10.466.199	1.967.439	322.134	310.855	1.334.450	9.131.749
2056	6.186.353	210.856	2.145.593	10.466.199	1.923.397	314.129	303.897	1.305.371	9.160.828
2057	6.253.945	187.395	2.145.593	10.466.199	1.879.266	306.079	296.924	1.276.262	9.189.937
2058	6.322.388	163.160	875.009	10.466.199	3.105.642	502.551	490.692	2.112.400	8.353.799
2059	6.391.696	138.125	875.009	10.466.199	3.061.370	494.415	483.696	2.083.258	8.382.941
2060	6.461.882	112.264	875.009	10.466.199	3.017.044	486.238	476.693	2.054.114	8.412.086
2061	6.532.962	85.550	875.009	10.466.199	2.972.679	478.601	469.683	2.024.394	8.441.805
2062	6.604.948	57.954	875.009	10.466.199	2.928.289	471.454	462.670	1.994.165	8.472.035
2063	6.677.858	29.447	875.009	10.466.199	2.883.885	464.306	455.654	1.963.926	8.502.273

Fortsetzung Tabelle 25

Jahr	BA	ZI	Afa	ZEAN	GvS	GwSt	KSt	JÜ	GK
2064	6.751.703	575.299	2.538.045	10.466.199	601.152	115.916	94.982	390.254	10.075.945
2065	6.826.502	554.534	2.538.045	10.466.199	547.118	106.381	86.445	354.292	10.111.907
2066	6.902.269	533.084	2.538.045	10.466.199	492.801	96.773	77.863	318.166	10.148.033
2067	6.979.018	510.927	2.538.045	10.466.199	438.210	87.092	69.237	281.881	10.184.318
2068	7.056.769	488.038	2.538.045	10.466.199	383.347	77.337	60.569	245.441	10.220.758
2069	7.135.537	464.393	1.764.160	10.466.199	1.102.109	192.106	174.133	735.869	9.730.330
2070	7.215.338	439.969	1.764.160	10.466.199	1.046.732	182.208	165.384	699.141	9.767.058
2071	7.296.191	414.738	1.764.160	10.466.199	991.110	172.237	156.595	662.278	9.803.921
2072	7.378.113	388.675	1.764.160	10.466.199	935.252	162.195	147.770	625.287	9.840.912
2073	7.461.121	361.751	1.764.160	10.466.199	879.166	152.081	138.908	588.177	9.878.023
2074	7.545.236	333.940	1.654.872	10.466.199	932.152	159.493	147.280	625.379	9.840.820
2075	7.630.476	305.210	1.654.872	10.466.199	875.641	149.238	138.351	588.052	9.878.147
2076	7.716.860	275.532	1.654.872	10.466.199	818.935	138.914	129.392	550.630	9.915.570
2077	7.804.407	244.875	1.654.872	10.466.199	762.045	128.520	120.403	513.121	9.953.078
2078	7.893.138	213.206	1.654.872	10.466.199	704.982	118.059	111.387	475.536	9.990.663
2079	7.983.074	180.493	0	10.466.199	2.302.632	373.964	363.816	1.564.853	8.901.347
2080	8.074.237	146.699	0	10.466.199	2.245.263	363.367	354.752	1.527.144	8.939.055
2081	8.166.647	111.791	0	10.466.199	2.187.762	352.704	345.666	1.489.391	8.976.808
2082	8.260.325	75.730	0	10.466.199	2.130.144	342.953	336.563	1.450.628	9.015.571
2083	8.355.297	38.480	0	10.466.199	2.072.423	333.660	327.443	1.411.320	9.054.879
2084	8.451.582	746.842	2.155.387	10.466.199	-887.612	0	0	-887.612	11.353.811
2085	8.549.207	719.885	2.155.387	10.466.199	-958.280	0	0	-958.280	11.424.480
2086	8.648.195	692.039	2.155.387	10.466.199	-1.029.422	0	0	-1.029.422	11.495.621
2087	8.748.569	663.275	2.155.387	10.466.199	-1.101.032	0	0	-1.101.032	11.567.231
2088	8.850.358	633.560	2.155.387	10.466.199	-1.173.107	0	0	-1.173.107	11.639.306
2089	8.953.584	602.866	2.155.387	10.466.199	-1.245.638	0	0	-1.245.638	11.711.837
2090	9.058.276	571.158	2.155.387	10.466.199	-1.318.623	0	0	-1.318.623	11.784.822
2091	9.164.460	538.404	2.155.387	10.466.199	-1.392.053	0	0	-1.392.053	11.858.252
2092	9.272.163	504.570	2.155.387	10.466.199	-1.465.921	0	0	-1.465.921	11.932.120
2093	9.381.414	469.618	2.155.387	10.466.199	-1.540.220	0	0	-1.540.220	12.006.419
2094	9.492.243	433.514	2.155.387	10.466.199	-1.614.945	0	0	-1.614.945	12.081.144
2095	9.604.678	396.217	2.155.387	10.466.199	-1.690.083	0	0	-1.690.083	12.156.283
2096	9.718.749	357.690	2.155.387	10.466.199	-1.765.627	0	0	-1.765.627	12.231.826
2097	9.834.489	317.892	2.155.387	10.466.199	-1.841.569	0	0	-1.841.569	12.307.768
2098	9.951.928	276.780	2.155.387	10.466.199	-1.917.896	0	0	-1.917.896	12.384.095
2099	10.071.099	234.312	0	10.466.199	160.788	0	0	160.788	10.305.411
2100	10.192.035	190.442	0	10.466.199	83.722	0	0	83.722	10.382.477
2101	10.314.771	145.125	0	10.466.199	6.303	0	0	6.303	10.459.896
2102	10.439.342	98.312	0	10.466.199	-71.454	0	0	-71.454	10.537.653
2103	10.565.782	49.954	0	10.466.199	-149.536	0	0	-149.536	10.615.735
Summe	559.577.607	48.720.227	166.322.435	837.295.934	62.675.665	14.773.650	13.678.365	34.223.650	803.072.284

Tabelle 25 stellt ebenfalls die Kosten- und Erlösstrukturen von CCBG dar. Die Gesamtkosten einschließlich Steuern belaufen sich auf rund 803 Mio. €. Die gesamten Erlöse summieren sich auf rund 837 Mio. € und der Gewinn nach Steuern liegt bei rund 34 Mio. €.

Die in der Nutzungsphase durchschnittlich anfallenden Kosten je Palette liegen bei einem Palettenaufkommen von rund 140,1 Mio. bei rund 5,73 €. Der Erlös je Palette liegt bei rund 5,98 €. Der Jahresüberschuss je Palette beläuft sich auf den Gesamtzeitraum auf rund 25 Cent.

4.4 Investitions- und Gewinnrechnung DN 3000

4.4.1 Investition und Finanzierung DN 3000

Gegenüber DN 2200 steigen die Ausgangsinvestitionen für den Streckenroh- und -einbau um rund 13 Mio. €. Statt 92 Mio. € beläuft sich die Investitionssumme in den ersten drei Jahren auf rund 105 Mio. €. Aufgrund dieses Anstiegs steigen auch die Finanzierungskosten des Projektes.

Die notwendigen Ersatzinvestitionen für die Fahrzeuge und die Verwaltungsausstattung entsprechen denen der DN 2200. Die gesamten Sachinvestitionen belaufen sich für DN 3000 unter Berücksichtigung der Ersatzinvestitionen auf insgesamt rund 181 Mio. €.

Zur Finanzierung der Betriebs- und Investitionsausgaben in den ersten drei Jahren werden Kredite aufgenommen und auch die Kreditzinsen werden fremdfinanziert. Die Entwicklung der Finanzierung in den ersten drei Jahren stellt Tabelle 26 zusammen:

Tabelle 26: Kreditentwicklung in 2021 bis 2023 DN 3000 (€)

Kreditjahr	Jahr	Schuld Januar	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2021	2020				
	2021	126.696	4.181	0	130.877
	2022	130.877	4.319	0	135.196
	2023	135.196	4.461	0	139.657
2022	2022	380.186	12.546	0	392.732
	2023	392.732	12.960	0	405.692
2023	2023	74.960.294	2.473.690	0	77.433.984

Gegenüber DN 2200 steigen in 2023 die Zinsausgaben und die Kreditschuld.

Das Fremdkapital beläuft sich in den ersten drei Jahren auf rund 78 Mio. € und das Eigenkapital auf rund 32 Mio. €. (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27: Ausgaben- und Kreditentwicklung in 2021 – 2023 DN 3000 (€)

Jahr	BA	INV	BA+INV	FK 2021	FK 2022	FK 2023	ΣFK	EK
2021	132.867	48.127	180.994	130.877			130.877	54.298
2022	268.258	274.865	543.123	4.319	392.732		397.051	162.937
2023	2.585.542	104.500.592	107.086.134	4.461	12.960	77.433.984	77.451.405	32.125.840
							77.979.333	32.343.075

Aufgrund der gegenüber DN 2200 gestiegenen Sachinvestitionen werden rund 9 Mio. € Fremd- und rund 4 Mio. € Eigenkapital zusätzlich benötigt.

4.4.2 Zinszahlungen und Tilgung DN 3000

Da gegenüber DN 2200 die Investitionsausgaben nur in 2023 steigen, führt dies für die Kreditaufnahme in diesem Jahr zu veränderten Kredit- und Annuitätzahlungen. Die

Zins- und Tilgungszahlungen für 2021 und 2022 ändern sich gegenüber DN 2200 nicht. Die ab 2024 zu zahlende Annuität beläuft sich für diesen Kredit auf rund 5,4 Mio. € p.a. und erstreckt sich über einen Tilgungszeitraum von 20 Jahren (vgl. Tabelle 74 im Anhang). Die Annuität p.a. für diesen Kredit steigt gegenüber DN 2200 leicht an.

Hinsichtlich der Ersatzinvestitionen (Verwaltungsausstattung, Caps) ändert sich gegenüber DN 2200 bei Kreditvolumen, Zinszahlung und Tilgung nichts.

4.4.3 Betriebsausgaben DN 3000

Der veränderte Streckendurchmesser führt gegenüber DN 2200 zu einem geringen Anstieg der Wartungskosten. Insgesamt fallen rund 561 Mio. € Betriebsausgaben an (vgl. Tabelle 75 im Anhang). Im Vergleich zu DN 2200 sind dies insgesamt Mehrausgaben von rund 1 Mio. €.

4.4.4 Ausgabenbarwerte DN 3000

Die Zahlungsreihe für die Sach- und Finanzinvestition ohne Berücksichtigung der Transporterlöse sowie deren Ausgabenbarwert stellt Tabelle 28 zusammen. Neben den Betriebsausgaben werden die Fremdkapitalinvestitionen, die Zins- und Tilgungszahlungen sowie der Restwert der Grundstücke berücksichtigt. Aufgrund der Vorsteuerbetrachtung werden Ertragsteuern nicht berücksichtigt.

Tabelle 28: Ausgabenbarwert ohne Steuern DN 3000 (€)

Jahr	INV	BA	FK	UI	KANN	RW	GA	BWGA
2020								
2021	48.127	132.867	130.877	3.928			54.045	52.016
2022	274.865	268.258	397.051	15.835			161.907	149.981
2023	104.500.592	2.585.542	77.451.405	2.491.111			32.125.840	28.642.297
2024		4.338.645			5.387.889		9.726.534	8.346.337
2025		4.384.184			5.387.889		9.772.073	8.070.659
2026		4.430.251			5.387.889		9.818.140	7.804.335
2027		4.476.852			5.387.889		9.864.741	7.547.044
2028		4.523.995			5.387.889		9.911.884	7.298.470
2029		4.571.687			5.387.889		9.959.576	7.058.313
2030		4.619.936			5.387.889		10.007.825	6.826.282
2031		4.668.751			5.387.889		10.056.640	6.602.097
2032		4.718.138			5.387.889		10.106.027	6.385.485
2033		4.768.105			5.387.889		10.155.995	6.176.186
2034		4.818.664			5.387.889		10.206.553	5.973.948
2035		4.869.820			5.387.889		10.257.709	5.778.527
2036		4.921.582			5.387.889		10.309.471	5.589.689
2037		4.973.959			5.387.889		10.361.848	5.407.206
2038		5.026.962			5.387.889		10.414.851	5.230.861
2039		5.080.596			5.387.889		10.468.485	5.060.442
2040		5.222.060			5.387.889		10.609.950	4.936.309
2041		5.277.819			5.387.889		10.665.708	4.775.988
2042		5.334.247			5.387.889		10.722.136	4.621.035
2043		5.391.356			5.387.889		10.779.245	4.471.268
2044	19.058.769	5.449.153	13.341.138		921.790		12.088.574	4.826.162
2045		5.507.652			921.790		6.429.442	2.470.499
2046		5.566.859			921.790		6.488.649	2.399.662
2047		5.626.790			921.790		6.548.580	2.330.920
2048		5.687.451			921.790		6.609.241	2.264.208
2049		5.748.857			921.790		6.670.647	2.199.465
2050		5.811.016			921.790		6.732.806	2.136.632
2051		5.873.941			921.790		6.795.731	2.075.651
2052		5.937.645			921.790		6.859.435	2.016.466
2053		6.002.140			921.790		6.923.930	1.959.023
2054		6.067.436			921.790		6.989.226	1.903.270
2055		6.133.547			921.790		7.055.337	1.849.156
2056		6.200.486			921.790		7.122.276	1.796.632
2057		6.268.266			921.790		7.190.056	1.745.649
2058		6.336.899			921.790		7.258.689	1.696.162
2059		6.406.400			921.790		7.328.190	1.648.126
2060		6.476.781			921.790		7.398.571	1.601.496
2061		6.548.059			921.790		7.469.849	1.556.232
2062		6.620.246			921.790		7.542.037	1.512.292
2063		6.693.360			921.790		7.615.150	1.469.636

Fortsetzung Tabelle 28

Jahr	INV	BA	FK	UI	KANN	RW	GA	BWGA
2064	24.904.724	6.767.411	17.433.307		1.204.534		15.443.361	2.868.519
2065		6.842.419			1.204.534		8.046.953	1.438.573
2066		6.918.397			1.204.534		8.122.931	1.397.647
2067		6.995.361			1.204.534		8.199.895	1.357.930
2068		7.073.330			1.204.534		8.277.864	1.319.386
2069		7.152.317			1.204.534		8.356.851	1.281.979
2070		7.232.342			1.204.534		8.436.876	1.245.674
2071		7.313.421			1.204.534		8.517.955	1.210.438
2072		7.395.572			1.204.534		8.600.106	1.176.238
2073		7.478.813			1.204.534		8.683.347	1.143.044
2074		7.563.163			1.204.534		8.767.696	1.110.826
2075		7.648.641			1.204.534		8.853.175	1.079.553
2076		7.735.267			1.204.534		8.939.800	1.049.197
2077		7.823.059			1.204.534		9.027.592	1.019.731
2078		7.912.038			1.204.534		9.116.572	991.128
2079		8.002.226			1.204.534		9.206.759	963.362
2080		8.093.643			1.204.534		9.298.177	936.408
2081		8.186.311			1.204.534		9.390.844	910.241
2082		8.280.250			1.204.534		9.484.784	884.837
2083		8.375.487			1.204.534		9.580.021	860.175
2084	32.330.808	8.472.042	22.631.565		1.563.701		19.734.985	1.705.461
2085		8.569.938			1.563.701		10.133.639	842.859
2086		8.669.202			1.563.701		10.232.903	819.167
2087		8.769.856			1.563.701		10.333.557	796.174
2088		8.871.928			1.563.701		10.435.629	773.858
2089		8.975.440			1.563.701		10.539.141	752.198
2090		9.080.423			1.563.701		10.644.124	731.175
2091		9.186.902			1.563.701		10.750.603	710.770
2092		9.294.903			1.563.701		10.858.604	690.963
2093		9.404.457			1.563.701		10.968.158	671.736
2094		9.515.592			1.563.701		11.079.293	653.073
2095		9.628.337			1.563.701		11.192.038	634.955
2096		9.742.723			1.563.701		11.306.424	617.367
2097		9.858.782			1.563.701		11.422.483	600.293
2098		9.976.544			1.563.701		11.540.245	583.717
2099		10.096.042			1.563.701		11.659.743	567.624
2100		10.217.310			1.563.701		11.781.011	552.000
2101		10.340.383			1.563.701		11.904.084	536.830
2102		10.465.294			1.563.701		12.028.995	522.101
2103		10.592.079			1.563.701	274.865	11.880.915	496.317
Summe	181.117.885	560.884.908	131.385.344		181.558.272	274.865	794.411.731	232.765.640

Die Gesamtausgaben belaufen sich auf rund 794 Mio. €. Deren Barwert liegt bei rund 233 Mio. €. Gegenüber DN 2200 steigen die Gesamtausgaben um rund 18 Mio. € und deren Barwert um 13 Mio. €.

4.4.5 Zielerlösannuität ohne Steuern DN 3000

Die Investition in CCBG ist rentabel, wenn in Höhe des Barwertes der Ausgaben eine Zielerlösannuität erzielt werden kann, deren Barwert wiederum dem Ausgabenbarwert entspricht. Der Ausgabenbarwert sowie die Zielerlösannuität berücksichtigen in der Vorsteuerbetrachtung keine Ertragsteuerzahlungen. Unter Vernachlässigung der Ertragsteuern beläuft sich die notwendige Zielerlösannuität bei einem KWF von 4,1% auf knapp 10,7 Mio. € p.a. (vgl. Tabelle 76 im Anhang). Gegenüber DN 2200 steigt die Zielerlösannuität um 600 Tsd. € an, weil aufgrund des veränderten Durchmessers und der zusätzlichen Wartungsausgaben die Ausgaben insgesamt gestiegen sind.

4.4.6 Zielerlösannuität mit Ertragssteuern DN 3000

Bei der Barwertbetrachtung mit Berücksichtigung der Besteuerung wird eine Zielerlösannuität gefordert, deren Barwert dem Ausgabenbarwert unter Berücksichtigung von Gewinnsteuern entspricht. Der Ausgabenbarwert umfasst somit die Investitions-, Betriebs- und Steuerausgaben, die in Tabelle 29 aufgeführt sind.

Tabelle 29: Ausgabenbarwert mit Steuern DN 3000 (€)

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GwSt	KSt	GA	BWGA
2020										
2021	48.127	132.867	130.877	3.928			0	0	54.045	52.016
2022	274.865	268.258	397.051	15.835			0	0	161.907	149.981
2023	104.500.592	2.585.542	77.451.405	2.491.111			0	0	32.125.840	28.642.297
2024		4.338.645			5.387.889		0	0	9.726.534	8.346.337
2025		4.384.184			5.387.889		0	0	9.772.073	8.070.659
2026		4.430.251			5.387.889		0	0	9.818.140	7.804.335
2027		4.476.852			5.387.889		0	0	9.864.741	7.547.044
2028		4.523.995			5.387.889		0	0	9.911.884	7.298.470
2029		4.571.687			5.387.889		0	0	9.959.576	7.058.313
2030		4.619.936			5.387.889		0	0	10.007.825	6.826.282
2031		4.668.751			5.387.889		0	0	10.056.640	6.602.097
2032		4.718.138			5.387.889		0	0	10.106.027	6.385.485
2033		4.768.105			5.387.889		0	0	10.155.995	6.176.186
2034		4.818.664			5.387.889		26.253	3.743	10.236.548	5.991.504
2035		4.869.820			5.387.889		29.165	8.631	10.295.505	5.799.819
2036		4.921.582			5.387.889		32.243	13.750	10.355.464	5.614.626
2037		4.973.959			5.387.889		35.493	19.106	10.416.448	5.435.698
2038		5.026.962			5.387.889		77.686	62.751	10.555.288	5.301.396
2039		5.080.596			5.387.889		491.046	130.263	11.089.794	5.360.781
2040		5.222.060			5.387.889		516.787	130.875	11.257.612	5.237.636
2041		5.277.819			5.387.889		526.665	137.220	11.329.593	5.073.268
2042		5.334.247			5.387.889		537.057	625.312	11.884.504	5.121.993
2043		5.391.356			5.387.889		547.982	534.922	11.862.149	4.920.461
2044	19.058.769	5.449.153	13.341.138		921.790		301.735	282.672	12.672.981	5.059.477
2045		5.507.652			921.790		294.235	275.940	6.999.618	2.689.587
2046		5.566.859			921.790		286.685	269.179	7.044.513	2.605.234
2047		5.626.790			921.790		279.084	262.389	7.090.053	2.523.653
2048		5.687.451			921.790		271.432	255.572	7.136.246	2.444.750
2049		5.748.857			921.790		357.901	341.144	7.369.692	2.429.956
2050		5.811.016			921.790		350.151	334.277	7.417.233	2.353.832
2051		5.873.941			921.790		342.351	327.385	7.465.467	2.280.211
2052		5.937.645			921.790		334.503	320.471	7.514.409	2.209.008
2053		6.002.140			921.790		326.607	313.536	7.564.074	2.140.142
2054		6.067.436			921.790		318.664	306.582	7.614.473	2.073.534
2055		6.133.547			921.790		310.676	299.611	7.665.623	2.009.108
2056		6.200.486			921.790		302.641	292.623	7.717.539	1.946.790
2057		6.268.266			921.790		294.561	285.620	7.770.237	1.886.510
2058		6.336.899			921.790		491.002	479.358	8.229.048	1.922.909
2059		6.406.400			921.790		482.835	472.332	8.283.357	1.862.945
2060		6.476.781			921.790		474.626	465.298	8.338.495	1.804.953
2061		6.548.059			921.790		466.958	458.257	8.395.064	1.748.987
2062		6.620.246			921.790		459.779	451.211	8.453.026	1.694.959
2063		6.693.360			921.790		452.597	444.164	8.511.910	1.642.701

Fortsetzung Tabelle 29

Jahr	INV	BA	FK	ZI	KANN	RW	GwSt	KSt	GA	BWGA
2064	24.904.724	6.767.411	17.433.307		1.204.534		104.175	83.459	15.630.995	2.903.371
2065		6.842.419			1.204.534		94.606	74.889	8.216.447	1.468.874
2066		6.918.397			1.204.534		84.963	66.273	8.274.167	1.423.669
2067		6.995.361			1.204.534		75.248	57.614	8.332.756	1.379.933
2068		7.073.330			1.204.534		65.458	48.911	8.392.233	1.337.615
2069		7.152.317			1.204.534		224.222	205.651	8.786.724	1.347.923
2070		7.232.342			1.204.534		214.287	196.866	8.848.029	1.306.379
2071		7.313.421			1.204.534		204.280	188.042	8.910.277	1.266.188
2072		7.395.572			1.204.534		194.201	179.180	8.973.487	1.227.306
2073		7.478.813			1.204.534		184.050	170.282	9.037.679	1.189.687
2074		7.563.163			1.204.534		191.424	178.616	9.137.736	1.157.708
2075		7.648.641			1.204.534		181.131	169.650	9.203.956	1.122.327
2076		7.735.267			1.204.534		170.768	160.652	9.271.220	1.088.094
2077		7.823.059			1.204.534		160.335	151.625	9.339.552	1.054.969
2078		7.912.038			1.204.534		149.833	142.570	9.408.975	1.022.917
2079		8.002.226			1.204.534		405.698	394.959	10.007.416	1.047.140
2080		8.093.643			1.204.534		395.060	385.854	10.079.091	1.015.053
2081		8.186.311			1.204.534		384.356	376.728	10.151.928	984.011
2082		8.280.250			1.204.534		374.563	367.583	10.226.930	954.072
2083		8.375.487			1.204.534		365.227	358.421	10.303.669	925.151
2084	32.330.808	8.472.042	22.631.565		1.563.701		0	0	19.734.985	1.705.461
2085		8.569.938			1.563.701		0	0	10.133.639	842.859
2086		8.669.202			1.563.701		0	0	10.232.903	819.167
2087		8.769.856			1.563.701		0	0	10.333.557	796.174
2088		8.871.928			1.563.701		0	0	10.435.629	773.858
2089		8.975.440			1.563.701		0	0	10.539.141	752.198
2090		9.080.423			1.563.701		0	0	10.644.124	731.175
2091		9.186.902			1.563.701		0	0	10.750.603	710.770
2092		9.294.903			1.563.701		0	0	10.858.604	690.963
2093		9.404.457			1.563.701		0	0	10.968.158	671.736
2094		9.515.592			1.563.701		0	0	11.079.293	653.073
2095		9.628.337			1.563.701		0	0	11.192.038	634.955
2096		9.742.723			1.563.701		0	0	11.306.424	617.367
2097		9.858.782			1.563.701		0	0	11.422.483	600.293
2098		9.976.544			1.563.701		0	0	11.540.245	583.717
2099		10.096.042			1.563.701		0	0	11.659.743	567.624
2100		10.217.310			1.563.701		0	0	11.781.011	552.000
2101		10.340.383			1.563.701		0	0	11.904.084	536.830
2102		10.465.294			1.563.701		0	0	12.028.995	522.101
2103		10.592.079			1.563.701	274.865	0	0	11.880.915	496.317
Summe	181.117.885	560.884.908	131.385.344		181.558.272	274.865	14.243.284	12.562.018	821.217.033	239.626.958

Die Gesamtausgaben einschließlich Ertragsteuern belaufen sich auf rund 821 Mio. € und deren Barwert beträgt rund 240 Mio. € (vgl. Tabelle 29). Die Berücksichtigung von Steuern erhöht den Ausgabenbarwert. Deshalb nimmt auch die für Rentabilität notwendige Zielerlösannuität zu. Bei einem KWF von 4,1% liegt dieses bei knapp 11 Mio. € p.a (vgl. Tabelle 77 im Anhang). Gegenüber DN 2200 sind somit rund 500 Tsd. € p.a. zusätzlich für einen rentablen Betrieb notwendig.

4.4.7 Kosten, Erlöse, Gewinne und Zielerlösannuität mit Steuern DN 3000

Tabelle 30 stellt die Jahresüberschüsse nach Besteuerung dar. Bei einer Zielerlösannuität von rund 11 Mio. € ergibt sich nach Abzug der Betriebs- und Zinsausgaben ein Gewinn vor Steuern von insgesamt rund 87 Mio. €.

Tabelle 30: Gewinne für Zielerlösannuität mit Steuern DN 3000 (€)

Jahr	BA	ZI	Afa	ZEAN	GvS	GwSt	KSt	JÜ	GK
2020									
2021	132.867	4.181			-137.048	0	0	-137.048	137.048
2022	268.258	16.865			-285.123	0	0	-285.123	285.123
2023	2.585.542	2.491.111			-5.076.653	0	0	-5.076.653	5.076.653
2024	4.338.645	2.573.318	4.778.698	10.997.348	-693.314	0	0	-693.314	11.690.662
2025	4.384.184	2.480.437	4.778.698	10.997.348	-645.972	0	0	-645.972	11.643.320
2026	4.430.251	2.384.491	4.778.698	10.997.348	-596.092	0	0	-596.092	11.593.440
2027	4.476.852	2.285.379	4.778.698	10.997.348	-543.582	0	0	-543.582	11.540.930
2028	4.523.995	2.182.996	4.778.698	10.997.348	-488.342	0	0	-488.342	11.485.690
2029	4.571.687	2.077.235	4.778.698	10.997.348	-430.272	0	0	-430.272	11.427.620
2030	4.619.936	1.967.983	4.778.698	10.997.348	-369.270	0	0	-369.270	11.366.617
2031	4.668.751	1.855.126	4.778.698	10.997.348	-305.228	0	0	-305.228	11.302.576
2032	4.718.138	1.738.545	4.778.698	10.997.348	-238.033	0	0	-238.033	11.235.381
2033	4.768.105	1.618.117	4.778.698	10.997.348	-167.573	0	0	-167.573	11.164.921
2034	4.818.664	1.493.714	3.310.860	10.997.348	1.374.110	46.531	23.644	1.303.935	9.693.413
2035	4.869.820	1.365.207	3.310.860	10.997.348	1.451.461	49.444	28.532	1.373.485	9.623.863
2036	4.921.582	1.232.458	3.310.860	10.997.348	1.532.448	52.522	33.651	1.446.275	9.551.073
2037	4.973.959	1.095.329	3.310.860	10.997.348	1.617.200	224.534	39.007	1.353.659	9.643.689
2038	5.026.962	953.674	2.708.932	10.997.348	2.307.780	405.913	82.652	1.819.215	9.178.133
2039	5.080.596	807.345	1.733.397	10.997.348	3.376.009	572.008	150.164	2.653.837	8.343.510
2040	5.222.060	656.187	1.733.397	10.997.348	3.385.703	567.485	509.314	2.308.904	8.688.444
2041	5.277.819	500.041	1.733.397	10.997.348	3.486.091	577.362	708.802	2.199.926	8.797.421
2042	5.334.247	338.742	1.733.397	10.997.348	3.590.962	587.754	725.372	2.277.836	8.719.512
2043	5.391.356	172.120	1.733.397	10.997.348	3.700.475	598.679	584.675	2.517.120	8.480.227
2044	5.449.153	440.258	3.003.981	10.997.348	2.103.956	352.432	332.425	1.419.099	9.578.249
2045	5.507.652	424.367	3.003.981	10.997.348	2.061.347	344.933	325.693	1.390.722	9.606.626
2046	5.566.859	407.952	3.003.981	10.997.348	2.018.555	337.382	318.932	1.362.241	9.635.107
2047	5.626.790	390.995	3.003.981	10.997.348	1.975.581	329.781	312.142	1.333.658	9.663.690
2048	5.687.451	373.479	3.003.981	10.997.348	1.932.436	322.130	305.325	1.304.981	9.692.367
2049	5.748.857	355.385	2.419.073	10.997.348	2.474.033	408.599	390.897	1.674.537	9.322.811
2050	5.811.016	336.694	2.419.073	10.997.348	2.430.565	400.848	384.029	1.645.688	9.351.660
2051	5.873.941	317.385	2.419.073	10.997.348	2.386.948	393.048	377.138	1.616.762	9.380.586
2052	5.937.645	297.440	2.419.073	10.997.348	2.343.189	385.200	370.224	1.587.765	9.409.583
2053	6.002.140	276.836	2.419.073	10.997.348	2.299.298	377.305	363.289	1.558.704	9.438.644
2054	6.067.436	255.553	2.419.073	10.997.348	2.255.285	369.362	356.335	1.529.588	9.467.760
2055	6.133.547	233.567	2.419.073	10.997.348	2.211.161	361.373	349.363	1.500.424	9.496.924
2056	6.200.486	210.856	2.419.073	10.997.348	2.166.933	353.338	342.375	1.471.219	9.526.129
2057	6.268.266	187.395	2.419.073	10.997.348	2.122.614	345.258	335.373	1.441.982	9.555.366
2058	6.336.899	163.160	1.148.489	10.997.348	3.348.800	541.699	529.110	2.277.991	8.719.357
2059	6.406.400	138.125	1.148.489	10.997.348	3.304.334	533.532	522.085	2.248.717	8.748.631
2060	6.476.781	112.264	1.148.489	10.997.348	3.259.813	525.324	515.051	2.219.439	8.777.909
2061	6.548.059	85.550	1.148.489	10.997.348	3.215.250	517.655	508.009	2.189.585	8.807.763
2062	6.620.246	57.954	1.148.489	10.997.348	3.170.659	510.476	500.964	2.159.219	8.838.129
2063	6.693.360	29.447	1.148.489	10.997.348	3.126.052	503.294	493.916	2.128.842	8.868.506

Fortsetzung Tabelle 30

Jahr	BA	ZI	Afa	ZEAN	GvS	GwSt	KSt	JÜ	GK
2064	6.767.411	575.299	2.811.525	10.997.348	843.113	154.872	133.212	555.029	10.442.319
2065	6.842.419	554.534	2.811.525	10.997.348	788.869	145.303	124.641	518.925	10.478.423
2066	6.918.397	533.084	2.811.525	10.997.348	734.341	135.661	116.026	482.654	10.514.693
2067	6.995.361	510.927	2.811.525	10.997.348	679.535	125.945	107.367	446.224	10.551.124
2068	7.073.330	488.038	2.811.525	10.997.348	624.455	116.156	98.664	409.635	10.587.712
2069	7.152.317	464.393	1.764.160	10.997.348	1.616.477	274.920	255.403	1.086.154	9.911.194
2070	7.232.342	439.969	1.764.160	10.997.348	1.560.877	264.985	246.618	1.049.273	9.948.075
2071	7.313.421	414.738	1.764.160	10.997.348	1.505.028	254.978	237.794	1.012.256	9.985.092
2072	7.395.572	388.675	1.764.160	10.997.348	1.448.941	244.899	228.933	975.110	10.022.238
2073	7.478.813	361.751	1.764.160	10.997.348	1.392.623	234.748	220.034	937.841	10.059.507
2074	7.563.163	333.940	1.654.872	10.997.348	1.445.374	242.121	228.369	974.883	10.022.465
2075	7.648.641	305.210	1.654.872	10.997.348	1.388.625	231.828	219.403	937.394	10.059.954
2076	7.735.267	275.532	1.654.872	10.997.348	1.331.677	221.465	210.405	899.807	10.097.541
2077	7.823.059	244.875	1.654.872	10.997.348	1.274.542	211.032	201.378	862.132	10.135.216
2078	7.912.038	213.206	1.654.872	10.997.348	1.217.231	200.531	192.323	824.378	10.172.970
2079	8.002.226	180.493	0	10.997.348	2.814.630	456.395	444.711	1.913.523	9.083.825
2080	8.093.643	146.699	0	10.997.348	2.757.006	445.758	435.607	1.875.641	9.121.707
2081	8.186.311	111.791	0	10.997.348	2.699.246	435.053	426.481	1.837.712	9.159.636
2082	8.280.250	75.730	0	10.997.348	2.641.367	425.260	417.336	1.798.771	9.198.577
2083	8.375.487	38.480	0	10.997.348	2.583.381	415.924	408.174	1.759.282	9.238.066
2084	8.472.042	746.842	2.155.387	10.997.348	-376.923	0	0	-376.923	11.374.270
2085	8.569.938	719.885	2.155.387	10.997.348	-447.863	0	0	-447.863	11.445.211
2086	8.669.202	692.039	2.155.387	10.997.348	-519.280	0	0	-519.280	11.516.628
2087	8.769.856	663.275	2.155.387	10.997.348	-591.170	0	0	-591.170	11.588.518
2088	8.871.928	633.560	2.155.387	10.997.348	-663.528	0	0	-663.528	11.660.876
2089	8.975.440	602.866	2.155.387	10.997.348	-736.346	0	0	-736.346	11.733.693
2090	9.080.423	571.158	2.155.387	10.997.348	-809.621	0	0	-809.621	11.806.969
2091	9.186.902	538.404	2.155.387	10.997.348	-883.345	0	0	-883.345	11.880.693
2092	9.294.903	504.570	2.155.387	10.997.348	-957.512	0	0	-957.512	11.954.860
2093	9.404.457	469.618	2.155.387	10.997.348	-1.032.114	0	0	-1.032.114	12.029.462
2094	9.515.592	433.514	2.155.387	10.997.348	-1.107.145	0	0	-1.107.145	12.104.493
2095	9.628.337	396.217	2.155.387	10.997.348	-1.182.594	0	0	-1.182.594	12.179.942
2096	9.742.723	357.690	2.155.387	10.997.348	-1.258.453	0	0	-1.258.453	12.255.801
2097	9.858.782	317.892	2.155.387	10.997.348	-1.334.713	0	0	-1.334.713	12.332.061
2098	9.976.544	276.780	2.155.387	10.997.348	-1.411.363	0	0	-1.411.363	12.408.711
2099	10.096.042	234.312	0	10.997.348	666.994	0	0	666.994	10.330.354
2100	10.217.310	190.442	0	10.997.348	589.595	0	0	589.595	10.407.753
2101	10.340.383	145.125	0	10.997.348	511.841	0	0	511.841	10.485.507
2102	10.465.294	98.312	0	10.997.348	433.742	0	0	433.742	10.563.605
2103	10.592.079	49.954	0	10.997.348	355.315	0	0	355.315	10.642.032
Summe	560.884.908	52.685.086	179.572.435	879.787.830	86.645.401	17.133.036	15.771.368	53.740.996	826.046.833

Der Jahresüberschuss nach Besteuerung beläuft sich auf rund 54 Mio. €. Tabelle 30 stellt auch die Erlös- und Kostenstrukturen dar. Die Gesamtkosten einschließlich Steuern belaufen sich auf rund 826 Mio. €. Gegenüber der Variante DN 2200 sind dies rund 23 Mio. € Zusatzkosten. Die Kosten p.a. je Palette liegen bei einem Aufkommen von insgesamt 140,1 Mio. Paletten bei 5,90 € (5,73 € bei DN 2200). Der (Ziel-)Erlös je Palette liegt bei 6,28 € (DN 2200 5,98 €). Der notwendige Gewinn je Palette liegt bei rund 38 Cent (25 Cent bei DN 2200).

4.5 Alternative Investitionsszenarien (Sensitivitätsanalyse)

4.5.1 Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)

Wird das GVZ nicht von der Kapitalgesellschaft betrieben, sinken die Investitionsausgaben marginal, weil weniger Grundstücke beschafft werden müssen. Dies führt für beide Durchmesservarianten zu einem Rückgang der Sachinvestitionen um rund 270 Tsd. €.

Die Abtrennung des GVZ senkt insbesondere den Personalbedarf von 47,5 auf 3,5 Personen für das Restpersonal im GVZ (2 Personen) und für das CityHub (1,5 Personen). Folglich nehmen die Personalkosten gravierend ab (s. Abschnitt 4.2.8). Sie liegen unter diesen Bedingungen insgesamt bei rund 64 Mio. €. Dadurch sinken für DN 2200 die insgesamt anfallenden Betriebsausgaben auf 173 Mio. € gegenüber 561 Mio. € in der Variante mit dem GVZ (Betriebskosten). Für die Variante DN 3000 sinken die Betriebsausgaben insgesamt von 561 Mio. € auf 176 Mio. €.

Die gesunkenen Personalausgaben reduzieren für beide Durchmesservarianten die notwendigen Zielerlöse. Die Kosten je Palette für DN 2200 sinken auf 2,98 € (5,73 € mit GVZ) und bei DN 3000 auf 3,14 € (5,90 € mit GVZ).

4.5.2 Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)

Wird die Streckeninfrastruktur von einem öffentlichen Träger finanziert, ändern sich die Sachinvestitionsausgaben im Jahr 2023 (vgl. Tabelle 31).

Tabelle 31: Sachinvestitionen Infrastrukturausgabe DN 2200, DN 3000 (€) / Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ

Jahr	Sachinvestition	Ausgabe (€) DN 2200 und DN 3000
2021	Verwaltungsausstattung	48.127
2022	Grundstücke	274.865
2023	Streckenrohbau	
2023	Strecke Einbau	
2023	Stationsmodul Bau	
2023	Stationstechnik	
2023	Anschlussstrecke	
2023	Abzweig	
2023	247 Caps	14.633.021
2023	Leitsystem	14.630.255
Summe		29.586.268

Bei DN 2200 und DN 3000 sinken die Investitionsausgaben auf rund 30 Mio. €. Die Übernahme der Infrastrukturkosten senkt den Eigen- und Fremdkapitalbedarf und reduziert die Zinsausgaben. Hinsichtlich der Ersatz- und Capinvestitionen ändert sich nichts. Die Übernahme der Infrastrukturkosten eröffnet Spielräume für die Senkung des Zielerlösbarwertes. Die Summe der Abschreibungen sinkt auf rund 104 Mio. € und die Zinsausgaben auf rund 30 Mio. €. Bei Gesamtkosten in Höhe von rund 722 Mio. € sinken die Kosten pro Palette von 5,74 auf 5,16 €. Bei DN 3000 sinken die Investitionsausgaben ebenfalls auf 30 Mio. € und gleichfalls fallen die Zinsausgaben auf 30 Mio. €. Die Kosten je Palette sinken von 5,90 € auf 5,20 €.

4.5.3 Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)

Werden die Kosten des GVZ ausgegliedert und die Infrastrukturkosten der Strecke öffentlich getragen, reduzieren sich die Gesamtkosten für DN 2200 auf 336 Mio. €. Dies geschieht zum einen über die deutlich reduzierten Personalkosten und zum anderen über die im Zuge der gesunkenen Investitionsausgaben abgenommenen Abschreibungen. Die Kosten je Palette belaufen sich deshalb für DN 2200 auf 2,40 €. Bei DN 3000 liegen die Kosten je Palette bei 2,60 €.

4.5.4 Vergleich der Investitionsszenarien

Die Abtrennung des GVZ senkt die zu tragenden Investitionskosten um einen relativ geringen Betrag (vgl. Tabelle 32). Ein gravierender Effekt ist hingegen bei den Personalausgaben zu verzeichnen, die um 173 Mio. € (DN 2200) bzw. 176 Mio. € (DN 3000) sinken.

Bei der Übernahme der Infrastrukturkosten durch die öffentliche Hand werden für beide Varianten erhebliche Investitionsausgaben eingespart (vgl. Tabelle 32).

Tabelle 32: Vergleich der Investitionsszenarien

Jahr	Sachinvestition	DN 2200	DN 2200 ohne GVZ	DN 3000	DN 3000 ohne GVZ	DN 2200 und DN 3000 ohne Infra- struktur und mit GVZ	DN 2200 und DN 3000 ohne GVZ und Infrastruktur
2021	Verwaltungsausstattung	48.127	48.127	48.127	48.127	48.127	48.127
2022	Grundstücke	274.865		274.865		274.865	6.800
2023	Streckenrohbau	30.814.200	30.814.200	43.120.800	43.120.800		
2023	Strecke Einbau	13.679.300	13.679.300	14.622.700	14.622.700		
2023	Stationsmodul Bau	5.056.200	5.056.200	5.056.200	5.056.200		
2023	Stationstechnik	8.427.000	8.427.000	8.427.000	8.427.000		
2023	Anschlussstrecke	2.226.000	2.226.000	2.226.000	2.226.000		
2023	Abzweig	1.784.616	1.784.616	1.784.616	1.784.616		
2023	247 Caps	14.633.021	14.633.021	14.633.021	14.633.021	14.633.021	14.633.021
2023	Leitsystem	14.630.255	14.630.255	14.630.255	14.630.255	14.630.255	14.630.255
	Summe	91.573.584	91.298.719	104.823.584	104.548.719	29.586.268	29.318.203

Bei der Abtrennung von GVZ und bei Übernahme der Investitionskosten für die Infrastruktur fallen für beide Varianten die Ausgaben bei rund 30 Mio. €. Die eingesparten Investitionsausgaben liegen damit bei rund 62 Mio. € (DN 2200) bzw. 75 Mio. € (DN 3000).

Aufgrund der gesunkenen Personalkosten sinken die Kosten je Palette im Szenario ohne GVZ um rund 48% (DN 2200 und DN 3000). Bei Übernahme der Kosten der Infrastruktur entfallen entsprechende Abschreibung und die Kosten sinken je Palette um rund 10% - 58 Cent (DN 2200) bzw. um 70 Cent (DN 3000). Entfallen sowohl GVZ und Infrastruktur sinken die Kosten je Palette um rund 58% (DN 2200) bzw. 56% (DN 3000) (Tabelle 33).

Tabelle 33: Palettenkosten der Investitionszenarien (€)

Investitionsszenarien	DN 2200	DN 3000
Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)	5,74	5,90
Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	2,98	3,14
Streckentrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)	5,16	5,20
Streckentrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	2,40	2,60

4.6 Ergebnis und Ausblick

Vor dem Hintergrund der dynamischen Investitionsrechnung erreicht die CargoCap Investition die Schwelle für ihre betriebswirtschaftliche Rentabilität, wenn der Ausgabenbarwert dem Einnahme- oder Erlösbarwert entspricht. Der Ausgabenbarwert wird auf den Zeitpunkt der Investitionsentscheidung (2021) diskontiert. Der Diskontierungsfaktor entspricht den gewichteten durchschnittlichen Kapitalkosten (WACC: Weighted Average Cost of Capital), die sich im Transport- und Logistiksektor auf 3,9% belaufen. Im Anschluss an die Ermittlung des Ausgabenbarwertes wird in einem zweiten Schritt ermittelt, welche Erlösannuität p.a. notwendig ist und erzielt werden muss, damit der Einnahme- dem Ausgabenbarwert entspricht und CargoCap sich rentiert.

Unter Berücksichtigung der Ertragbesteuerung liegt die notwendige Zielerlösannuität bei DN 2200 bei rund 10,5 Mio. € p.a. Die Gesamtkosten einschließlich Steuern belaufen sich auf rund 803 Mio. €. Die insgesamt notwendigen Erlöse summieren sich auf rund 837 Mio. € und der Gewinn nach Steuern liegt bei rund 34 Mio. €. Die in der Nutzungsphase durchschnittlich anfallenden Kosten je Palette liegen bei einem Palettenaufkommen von rund 140,1 Mio. bei rund 5,74 €. Der Erlös je Palette liegt bei rund 5,98 €. Der Jahresüberschuss je Palette beläuft sich auf den Gesamtzeitraum auf rund 25 Cent.

Bei der Wahl eines Durchmessers von drei Metern kommt es gegenüber DN 2200 zu einem relativ geringen Anstieg der Sachinvestitionsausgaben um rund 14%. Statt 92 Mio. € (DN 2200) sind 105 Mio. € (DN 3000) aufzubringen.

Die für Rentabilität notwendige Zielerlösannuität beläuft sich für die Investition DN 3000 auf rund 11 Mio. € p.a. Dies ist ein geringfügiger Anstieg gegenüber DN 2200. Die Gesamtkosten einschließlich Steuern belaufen sich auf rund 826 Mio. €. Die insgesamt notwendigen Erlöse summieren sich auf rund 880 Mio. € und der für Rentabilität notwendige Gewinn nach Steuern liegt bei rund 54 Mio. €. Die Kosten p.a. je Palette liegen bei einem Aufkommen von insgesamt 140,1 Mio. Paletten bei 5,90 €. Der Zielerlös je Palette liegt bei 6,28 €. Der notwendige Gewinn je Palette liegt bei rund 38 Cent (25 Cent bei DN 2200).

Werden der Betrieb des Güterverteilzentrums ausgegliedert und die Infrastrukturkosten für die Rohrleitung und Stationsmodule öffentlich finanziert, sinken die jährlichen Kosten gravierend, weil die Personal- und Zinsausgaben und die Abschreibungen abnehmen. Dies führt zu Kosten je Palette von unter drei Euro.

Die Anforderungen an die Rentabilität der CargoCap-Investition in Bergisch Gladbach fallen insgesamt vor dem Hintergrund der Betriebs- und Investitionsausgaben sowie vor dem Hintergrund des Potenzials des Transportaufkommens relativ hoch aus. Zudem ist nicht zu erwarten, dass ohne öffentliche Intervention sich der CargoCap Transport in Konkurrenz zum LKW-Transport durchsetzt, weil vorausgesetzt werden kann, dass die Grenz- und Durchschnittskosten für die „letzten“ Kilometer des LKW zwischen GVZ und den verschiedenen Stationen unter denen von CargoCap liegen. Die Inangriffnahme der Realisation des subterrestrischen Transportsystems in Bergisch Gladbach muss somit mit dem Hinweis auf seinen Pilotcharakter für die Entwicklung umweltfreundlicher, nachhaltiger Gütertransportsysteme begründet werden, dessen Be-

dingungen für betriebs- und volkswirtschaftliche Rentabilität sich erst dann erheblich verbessern, wenn das GVZ ausgegliedert und die Infrastrukturkosten wie beim Teilen des Straßenbaus öffentlich finanziert werden. Darüber hinaus führt ein Netzausbau über Bergisch Gladbach hinaus dazu, dass Skalenerträge, höhere Transportmengen sowie Kostendegressionseffekte und geringere Umladekosten realisiert werden, die für das Gesamtsystem eines wachsenden Netzes betriebswirtschaftliche Rentabilitätsgewinne versprechen. Diese Netzwerkeffekte konnten bei der Bewertung der Pilotstrecke in Bergisch Gladbach nicht berücksichtigt werden. Studien zu subterrestrischen Transportsystemen an Rhein und Ruhr haben ihre empirische Bedeutung und Relevanz nachgewiesen und gezeigt, dass der Kapitalbarwert der Investition eines Verbundes von Rhein und Ruhr um rund 54% gegenüber einem singulären Ruhrnetz bzw. singulären Rheinnetz gesteigert werden kann [32].

5 Volkswirtschaftliche Bewertung

Nachfolgend wird die volkswirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des CargoCap-Systems in Anlehnung an die Bewertungsmethodik für den Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030 untersucht. Die Nutzen-Kosten-Betrachtung erfolgt ohne Berücksichtigung der Investitionen in das GVZ im Einzugsbereich der Autobahn A4. Dies entspricht der Variante a der betriebswirtschaftlichen Bewertung „Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten)“, (Abschnitt 4).

5.1 Annahmen

5.1.1 Gütermenge

Die Ent- / Beladeorte und damit die umzuschlagenden und zu transportierenden Gütermengen ergeben sich aus der Logistikanalyse (s. Abschnitt 2). Es gehen 13 Entladestationen mit einer täglichen Anzahl von 4.200 Paletten in die Analyse ein.

Der Gütertransport erfolgt im Bezugsfall nur durch Sattelzüge, das heißt mit jedem Lkw werden maximal 34 Paletten transportiert. Bei einer vollständigen Ladeflächenauslastung wird von täglich 125 Lkw ausgegangen, dies entspricht 30 Tsd. Lkw p.a. (20 Arbeitstage pro Monat).

Für den Planfall des CargoCap-Systems beträgt aus transportorganisatorischen Gründen die tägliche Anzahl 5.100 Paletten. Entsprechend Abschnitt 3.5.1.4 wird eine Anzahl von 247 Caps benötigt.

5.1.2 Entladeorte und Routen

Für den Bezugsfall werden die kürzesten bzw. schnellsten Strecken zu den Entladeorten ab der Autobahnanschlussstelle angenommen. Route 1 verläuft über Bensberg (L 136 / L 288), Route 2 verläuft über Refrath (K 27) (Abbildung 38).

Die Strecke des CargoCap-Systems im Planfall und die Entfernungen zu den Anschlüssen ist dem Abschnitt 3.3.1 zu entnehmen. Sie verläuft ab der Anschlussstelle zunächst über die Frankenforster Straße und über einen ehemaligen Bahndamm.

Zentraler Umschlagpunkt für die ein- und ausgehenden Güter ist das GVZ nahe der BAB 4 Anschlussstelle Frankenforst. Da der konkrete Standort noch nicht feststeht, werden alle Entfernungen ab der Anschlussstelle gemessen.

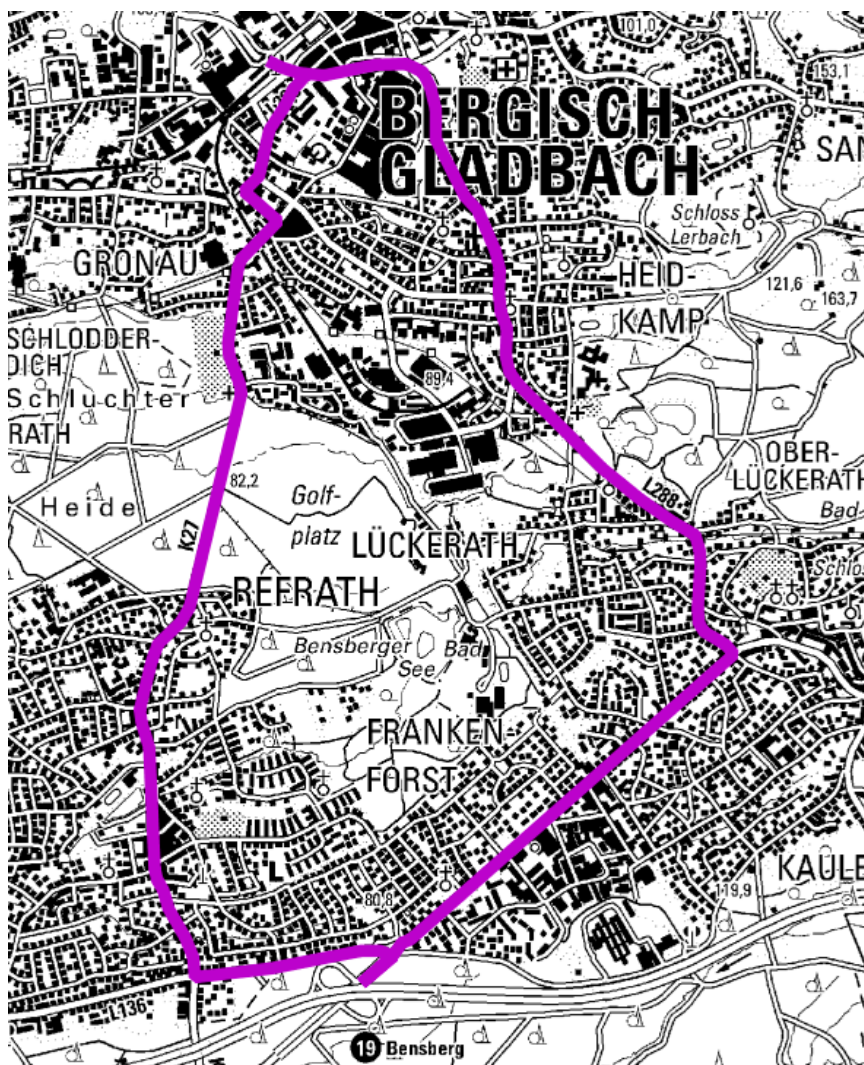


Abbildung 38: Lkw-Routen

„Quelle: Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen“ [78]

5.1.3 Fahrzeiten und Fahrleistung

Die Fahrzeiten der Lkw zu den Entladeorten werden entsprechend den Fahrstrecken mit einem Routenplaner bestimmt.

Die Fahrzeiten des CargoCap-Systems werden entsprechend der Streckenlängen gemäß Abschnitt 3.3 und einer Geschwindigkeit von 36 km/h bestimmt. Die einzelnen Streckenlängen unterscheiden sich nur gering von denen des Lkw, die Fahrzeiten sind um maximal zwei Minuten unbedeutend länger.

Die Gesamtfahrleistung der einfachen Strecke beträgt für alle Lkw 157 Tsd. Fahrzeugkilometer (Fzkm) p.a., die gesamte Fahrzeit 5.500 Stunden p.a. Da die Lkw den Entladeort auch wieder verlassen müssen, wird erforderlichenfalls der doppelte Wert angesetzt.

5.1.4 Ökonomische Annahmen

Bezüglich der betriebswirtschaftlichen Annahmen wird auf die Ausführungen in Abschnitt 4 verwiesen.

Basisjahr für die Bewertung ist das Jahr 2020. Die Planung des CargoCap-Systems erfolgt in den Jahren 2021 und 2022, die Bau- und Testphase mit halber Kapazität in 2023. Der Betriebsbeginn mit voller Kapazität ist das Jahr 2024, Betriebsdauer 80 Jahre. Aus planerischer Sicht erscheint eine längere Bau- und Testzeit realistisch; aus projektorganisatorischen Gründen wird in beiden ökonomischen Betrachtungen eine leicht verkürzte Bau- und Testzeit gegenüber der in Abschnitt 3.7 angegebenen angenommen.

Die Investitionskosten werden mittels der Annuitätenfaktoren gleichmäßig auf die Nutzungsdauer verteilt (Tabelle 34).

Tabelle 34: Annuitätenfaktoren für unterschiedliche Nutzungsdauer

Nutzungsdauer [Jahre]	Annuitätenfaktor
20	0,0594
40	0,0347
80	0,0320

Die volkswirtschaftliche Bewertung des CargoCap-Systems erfolgt in Anlehnung an die Nutzen-Kosten-Analyse im BVWP 2030 [79] zu realen Preisen des Basisjahrs 2020, das heißt ohne Berücksichtigung der Inflation.

Die Wertansätze des BVWP beziehen sich einheitlich auf das Jahr 2012. Bis auf die Treibstoff- und Personalkosten werden die übrigen Wertansätze mit der allgemeinen durchschnittlichen Inflationsrate von 1,33 % p.a. inflationiert, um den Preisstand des Jahres 2020 abbilden zu können (Tabelle 35).

Tabelle 35: Preisänderungen

Preisänderungen	% p.a.
Inflationsrate 2010-2019	1,33
Energiepreissteigerung	2,9
Arbeitskosten	1,0

Sämtliche ermittelte Nutzen- und Kostenkomponenten werden auf das Bezugsjahr 2020 abgezinst (diskontiert), um miteinander vergleichbar zu sein. Der Diskontierungssatz dient zur Abzinsung von Nutzen und Kosten auf einen einheitlichen Bezugszeitpunkt. Bei der Abzinsung wird berücksichtigt, dass zukünftige Nutzen und Kosten aus heutiger Perspektive eine geringere Bedeutung haben als heute anfallende Nutzen und Kosten gleicher Höhe [79].

Als Diskontierungssatz wird der Wert des BVWP 2030 übernommen, er beträgt 1,7 %.

5.2 Nutzen- /Kostenkomponenten

Die volkswirtschaftliche Bewertung erfolgt mit Hilfe einer Nutzen-Kosten-Analyse in Anlehnung an die Methodik des Ressourcenverbrauchsansatzes des BVWP 2030. Hierbei werden die zur Wohlfahrtssteigerung geeigneten Nutzenbestandteile den vom Staat übernommenen Kosten – den Investitionskosten – gegenübergestellt. Es werden monetäre quantifizierbare und wissenschaftlich begründbare Nutzenkomponenten berücksichtigt, bei denen ein signifikanter Beitrag zum Gesamtnutzen zu erwarten ist [80]. Der Nutzenbarwert ergibt sich aus der Summe der jährlichen Nutzenkomponenten und der Nutzungsdauer. Die Diskontierung erfolgt auf das Bezugsjahr 2020.

In dem hier vorliegenden Fall des CCBG werden die folgenden Nutzenkomponenten untersucht:

- Veränderung der Betriebskosten
 - o Veränderung der Vorhalte- und Betriebsgrundkosten
 - o Veränderung der Personalkosten
 - o Veränderung der Energiekosten
- Veränderung der Abgasbelastung
- Veränderung der Verkehrssicherheit
- Veränderung der Transportzeit der Ladung im Güterverkehr
- Veränderung der Instandhaltungs- und Betriebsgrundkosten der Verkehrswege
- Veränderung der Geräuschbelastung
- Veränderung der innerörtlichen Trennwirkung

Nicht bewertet, sondern nur beschrieben, werden die Nutzenkomponenten für deren Bestimmung Verkehrsmodelle erforderlich sind:

- Veränderung der impliziten Nutzen
- Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr
- Veränderung der Zuverlässigkeit
- Veränderung der Lebenszyklusemissionen von Treibhausgasen der Infrastruktur

Als Kostenkomponente gehen die Investitionskosten für den Bau des CargoCap-Systems in die Bewertung ein.

Im Einzelnen ergeben sich die im Folgenden näher erläuterten Nutzen- und Kostenkomponenten.

5.2.1 Veränderung der Betriebskosten

Der Einsatz des CargoCap-Systems führt zu Änderungen bei den fahrzeugbezogenen Betriebskosten. Die Lkw erbringen eine geringere Fahrleistung, im Gegenzug übernimmt CargoCap die Transportleistung des Lkw. Die Betriebskosten setzen sich zusammen aus der Veränderung der

- Vorhalte- und Betriebsgrundkosten
- Personalkosten und
- Energiekosten.

5.2.1.1 Veränderung der Vorhaltekosten und Betriebsgrundkosten

Die Veränderung der Vorhaltekosten wird durch Multiplikation der Fahrzeitdifferenzen zwischen Bezugs- und Planfall mit fahrleistungsgewichteten und fahrzeitabhängigen Wertansätzen ermittelt. [79]

Die spezifischen Vorhaltungskosten und Betriebskostengrundwerte des Jahres 2012 gehen entsprechend der durchschnittlichen Preissteigerung von 1,33 % p.a. in Werten des Jahrs 2020 in die Bewertung ein (Tabelle 36).

Tabelle 36: Gewichtetes Mittel von Vorhaltekosten und Betriebskostengrundwert für Sattelzüge mit Auflieger (< 33 t und ≥ 33 t zulässiges Gesamtgewicht)

	Spezifische Vorhaltungskosten [Euro/ Fzh]	Betriebskostengrundwert [Euro/ 100 Fzkm]
2012	9,38	25,61
2020	10,38	28,47

Quelle: BMVI (2016), S. 133. [79]

Für die Lkw ergeben sich spezifische Vorhaltekosten von 56 Tsd. Euro p.a. und ein Betriebskostengrundwert von 179 Tsd. Euro p.a.

Werte für Vorhaltekosten und Betriebskostengrundwerte des CargoCap-Systems liegen nicht vor. Für das CargoCap-System gehen die jährlichen Wartungskosten für Strecke, Stationen und Caps i.H.v. 500 Tsd. Euro p.a. in die Bewertung ein.

Tabelle 37: Veränderung der Vorhalte- und Betriebsgrundkosten [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CC [Euro p.a.]
Vorhaltekosten	114.948	
Betriebskostengrundwert	178.875	
Wartungskosten		500.097
Summe	293.823	500.097
Differenz Lkw ./ CC	-206.274	

Es ergeben sich eine Veränderung der Vorhalte- und Betriebsgrundkosten i.H.v. -206 Tsd. Euro p.a. Die Veränderung der Nutzenkomponente ist somit negativ (Tabelle 37).

5.2.1.2 Veränderung der Personalkosten

Die Personalkosten ergeben sich für den Lkw aus dem Produkt von Fahrerstundenlohn und Fahrzeitreduzierung des Lkw; für das CargoCap-System werden die Angaben aus Abschnitt 3.6.1 genutzt.

Der Fahrerlohn für einen Lkw-Fahrer über 3,5 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht mit Anhänger wird mit 20,14 Euro₂₀₁₂/h angenommen [79]. Bei einer Lohnpreissteigerung von 1,0 % beträgt der Stundenlohn 21,81 Euro₂₀₂₀/h in Preisen des Jahres 2020. Dieser Wert erscheint heute als zu niedrig, weshalb der in Abschnitt 4.2.8 genutzte Stundenlohn Logistik in Höhe von 27 Euro/h gewählt wird.

Aus der Fahrzeitreduzierung des Lkw ergeben sich geringere jährliche Lkw-Personalkosten von 149 Tsd. Euro p.a.

Die Personalkosten betragen inklusive zusätzlicher Logistikaufgaben für das CargoCap-System 948 Tsd. Euro p.a. ab dem Jahr 2024.

Die Personalkosten steigen um ein Vielfaches, wenn der für eine solitäre Strecke notwendige zusätzliche Warenumschlag auf den Lkw mit betrachtet wird (Tabelle 38).

Tabelle 38: Veränderung der Personalkosten [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Personalkosten	149.480	460.766
Differenz Lkw ./.. CargoCap		-311.286

Im Ergebnis ergibt sich eine Veränderung der Personalkosten für das CargoCap-System von -311 Tsd. Euro p.a. Die Nutzenkomponente ist somit negativ.

5.2.1.3 Veränderung der Energiekosten

Zur Ermittlung der Energiekosten wird die Differenz aus den Produkten der Fahrleistung von Bezugs- und Planfall, den spezifischen Energie- und Kraftstoffverbrauchsfaktoren und den korrespondierenden Energie- und Kraftstoffpreisen gebildet [79].

Die Lkw-Fahrleistung beträgt inklusive der Rückfahrt 314 Tsd. Fzkm p.a. Die Kraftstoffkosten werden mit 0,3208 Euro/km angenommen [81]. Dies entspricht einem Kraftstoffverbrauch des Lkw von 33 Liter/100 km und Kraftstoffkosten für Diesel von 97,21 ct/Liter (Großverbraucherabnahmepreis 2010). Entsprechend der Preissteigerungsrate von 2,9 % p.a. betragen im Jahr 2020 die Kraftstoffkosten 0,4149 Euro₂₀₂₀/km. Es ergeben sich für den Lkw Energiekosten i.H.v. 130 Tsd. Euro p.a.

Der Energieverbrauch beträgt gemäß Abschnitt 3.6.2 für das CargoCap-System 344 Tsd. kWh p.a. Der (Endkunden-)Strompreis wird mit 30 Cent/kWh angenommen. Der Strompreis muss um die für eine gesamtwirtschaftliche Bewertung nicht relevanten Steuern und Abgaben (Konzessionsabgabe, Stromsteuer, § 19 Umlage) reduziert werden, allerdings wird die EEG-Umlage dem Ressourcenverzehr zugeordnet [79]. Der Anteil von Steuern, Abgaben und Umlagen beträgt im Jahr 2020 für Haushaltsstrom und Industriestrom (Jahresverbrauch zwischen 160 Tsd. und 20 Mio. kWh) 52 % [82].

Vereinfacht wird von einem Strompreis von 20 Cent/kWh ausgegangen. Für das CargoCap-System ergeben sich damit Energiekosten für Strom i.H.v. von 68 Tsd. Euro p.a..

Tabelle 39: Veränderung der Energiekosten [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Energiekosten	130.370	68.979
Differenz Lkw ./.. CargoCap		61.392

Die Veränderung der Nutzenkomponente Energiekosten beträgt 61 Tsd. Euro p.a. und ist somit positiv (Tabelle 39).

5.2.2 Veränderung der Abgasleistung

In die Berechnung der Nutzen durch Veränderung der Abgasbelastungen gehen die sechs Schadstoffe NO_x, CO, CO₂, HC, Partikel (PM) und SO₂ ein [79]. Grundlage sind Kostensätze für verkehrsbezogene Aktivitäten, die über die Verknüpfung von Emissionsfaktoren für einzelne Fahrzeugkategorien, die Unterscheidung in innerorts, außerorts und Autobahn sowie in Betriebs- und anderen Life-Cycle-Phasen gebildet werden (Abbildung 39).

Tabelle 40: Umweltkosten Betrieb innerorts Lkw Trailer 28 bis 40 t [Euro2016 / Fzkm]

Belastung	Kostensatz
Treibhausgase	0,1787
Luftschadstoffe Auspuff	0,0810
Luftschadstoffe Abrieb	0,0076
Energiebereitstellung	0,0499
Summe [Euro₂₀₁₆ / Fzkm]	0,3172

Quelle: UBA (2019), S. 33 [83]

Der Kostensatz für Betrieb und Vorprozesse schwerer Lkw mit 28 bis 40 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht beträgt 0,3172 Euro₂₀₁₆ / Fzkm [83] und 0,3344 Euro₂₀₂₀ / Fzkm (Tabelle 40).

Fahrzeug-kategorie	Emissions-konzept	Betrieb				Vorprozesse		Flächenverbrauch und Zerschneidung	Gesamt
		Treibhaus-gase	Luftschad-stoffe Auspuff	Luftschad-stoffe Abrieb	Lärm	Infrastruktur und Fahrzeuge	Energiebereit-stellung		
PKW	Benzin	2,94	0,26	0,10	***	2,06	0,94	0,34	6,64
PKW	Diesel	2,71	1,60	0,10	***	2,35	0,96	0,34	8,07
PKW	Elektro	0,00	0,00	0,10	***	3,15	2,59	0,34	6,17
kleines Kraftrad	Benzin	1,30	0,65	0,03	***	2,07	0,59	0,11	4,75
Kraftrad	Benzin	1,83	0,36	0,03	***	2,21	1,00	0,15	5,57
Linienbus	Diesel	21,03	13,89	0,82	***	4,81	5,91	0,81	47,26
Reisebus	Diesel	17,42	16,86	0,82	***	6,03	4,44	0,81	46,38
Personenzug, Fernverkehr	elektrisch	0,00	0,00	2,71	***	201,50	219,01	59,48	482,70
Personenzug, Nahverkehr	gew. DS	17,53	22,73	1,38	***	59,13	89,36	39,65	229,79
LNF	Benzin	2,96	0,60	0,10	***	1,66	1,10	0,36	6,77
LNF	Diesel	2,71	1,95	0,10	***	1,82	1,18	0,36	8,11
LNF	Elektro	0,00	0,00	0,10	***	2,83	4,81	0,36	8,10
LKW <7,5t	Diesel	5,17	3,61	0,76	***	2,42	2,82	0,41	15,18
LKW 7,5-14t	Diesel	8,21	5,02	0,76	***	3,59	3,34	0,75	21,67
LKW 14-28t	Diesel	13,04	7,84	0,76	***	4,92	4,37	0,81	31,75
LKW: Trailer 28-40t	Diesel	17,87	8,10	0,76	***	6,93	4,99	1,02	39,67

Abbildung 39: Innerörtliche Umweltkosten verschiedener Fahrzeugtypen pro Fahrzeugkilometer [Euro₂₀₁₆ / Fzkm]

Quelle: UBA (2019), S. 33 [83]

Der Emissionskostensatz der sechs Schadstoffe beträgt für elektrischen Strom 0,0693 Euro₂₀₁₂ / kWh (Abbildung 40) [79].

Schadstoffart	Emissionsfaktor ¹⁾ [g/kWh]	Wertansatz [€/t Schadstoff]	Emissionskostensatz [Cent/kWh]
	(1)	(2)	(3) = (1) x (2) x 10 ⁻⁴
NO _x	0,30	15.400	0,46
CO	0,18	46	u. R. ⁷⁵
CO ₂	414	145	6,00
HC	0,76	1.600	0,12
PM	0,02	55.400	0,12
SO ₂	0,17	13.200	0,23
Summe			6,93

¹⁾ inkl. 7 % Aufschlag für Wirkungsgradverluste zwischen Kraftwerk und Stromabnehmer bzw. Ladestation für Elektro-Pkw

Abbildung 40: Emissionskostensatz bei der Erzeugung von elektrischem Strom

Quelle: BMVI (2016), S 112 [79]

Für den Lkw ergeben sich bei 314 Tsd. Fzkm Umweltkosten i.H.v. 105 Tsd. Euro p.a..

Gemäß Abschnitt 3.6.2 hat CargoCap einen Energiebedarf von 143,71 kWh/h; dies entspricht einem Energiebedarf von 344.894 kWh p.a. Es ergeben sich Emissionskosten i.H.v. 27 Tsd. Euro p.a..

Tabelle 41: Veränderung der Abgasbelastung [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Abgasbelastung	105.073	26.566
Differenz Lkw ./.. CargoCap	78.507	

Die Veränderung der Nutzenkomponente Umweltkosten beträgt 78 Tsd. Euro p.a. und ist positiv (Tabelle 41).

5.2.3 Veränderung der Verkehrssicherheit

Die Verkehrssicherheit wird anhand fahrleistungsbezogener Unfallkostenraten [Euro/km] bewertet (Abbildung 41) [79]. Es gehen die Schadenskosten und die Risk-Value-Komponenten für Personenschäden sowie Schadenskosten für Sachschäden in die Bewertung ein. Eine Differenzierung zwischen Personen- und Sachschäden wird nicht vorgenommen.

Bei den beiden ausgewählten Routen (Abbildung 38) handelt es sich vorrangig um plangleiche Strecken ohne Mittelstreifen innerhalb bebauter Gebiete mit/ohne Seitenstreifen und einer Richtungsfahrspur; es wird eine mittlere Streckenqualität angenommen. Es ergeben sich Unfallkostenraten von 101,20 Euro/1.000 Fahrzeugkilometer.

Streckentyp:		2. Ziffer =						3. Ziffer / Fahrspuren / Richtung	4. Ziffer / Streckenqualität		
		1. Ziffer =								5	6
		3		5	6	7	8	1	4		
										2	
									82,62	3	
										4	
										5	
		4				37,84		82,62	1	3	
										2	
										3	
										4	
										5	
	3			31,63	31,63	82,62	82,62	1	2		
									2		
									3		
									4		
									5		
	2							1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	1							1	4		
									2		
									3		
									4		
									5		
	4						120,44	1	3		
									2		
									3		
									4		
									5		
	3				44,93		120,44	1	3		
									2		
									3		
									4		
									5		
	2			44,93	44,93	120,44	120,44	1	2		
									2		
									3		
									4		
									5		
	1			57,40				1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	57,40			66,17	82,39	82,39		1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	120,80			66,17	82,39	98,26		1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	89,91			89,91	101,20	101,20		1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	251,26			89,91	101,20	251,26		1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		
	120,80			120,80	251,26	251,26		1	1		
									2		
									3		
									4		
									5		

Abbildung 41: Unfallkostenraten unter Berücksichtigung des Risk-Values differenziert nach der vierten Kennziffer (Qualität) [Euro / Tsd. Fzkm]
 Quelle: BMVI (2016), S. 150 [79]

Die reduzierte Lkw-Fahrleistung beträgt 314.200 km p.a., daraus folgen geringere Unfallkosten in Höhe von 35 Tsd. Euro p.a. für den Lkw.

Eine Unfallwahrscheinlichkeit für das CargoCap-System ist nicht bekannt, sie wird als so gering eingeschätzt, dass für dieses keine Unfallkosten angesetzt werden.

Tabelle 42: Veränderung der Verkehrssicherheit [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Verkehrssicherheit	35.342	0
Differenz Lkw ./.. CargoCap	35.342	

Es ergeben sich geringere Unfallkosten in Höhe von 35 Tsd. Euro p.a. Die Nutzenkomponente ist positiv (Tabelle 42).

5.2.4 Veränderung der Transportzeit der Ladung

Die Veränderung der Transportzeit der Ladung betrifft die Dauer des Transports. In den Zeitwerten (Abbildung 42) sind die Kapitalbindungskosten, die Auswirkungen auf die Logistik-, Produktions- und Verkaufsprozesse sowie die Verlustrisiken der Ladung zusammengefasst.

Transportsegment	Zeitwerte der Ladung in €/Std und t
Maritimer KV	0,305
Kontinentaler KV	1,180
Nahrungsmittel	1,011
Steine, Erden	0,374
Mineralölerzeugnisse	0,746
Chemieerzeugnisse, Düngemittel	0,727
Metalle	0,827
Fahrzeuge, Maschinen	1,506
Sonstige Produkte	0,201

Abbildung 42: Mittlere Zeitwerte der Ladung nach Transportsegmenten

Quelle: BMVI (2016), S. 100 [79]

Vereinfacht wird hier von einem mittleren Zeitwert der Ladung i.H.v. 6,88 Euro₂₀₁₂ / Lkw-Stunde mit Preisstand 2012 ausgegangen. Dieser Wertansatz gilt für vollständig beladene Lkw mit einem zulässigen Gesamtgewicht von ≥ 12 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht [79]. Für das Jahr 2020 ergibt sich ein mittlerer Zeitwert der Ladung von 7,65 Euro₂₀₂₀ / Fahrzeugstunde.

Die Fahrzeit des Lkw im Warenein- und -ausgang beträgt 5.536 Stunden.

Für das CargoCap-System werden die Fahrzeit, das Paletten-Handling im Autobahn-Hub und die Lade- und Entladezeit des Caps angesetzt. Das Paletten-Handling wird mit 1,5 Minuten je Doppelpalette angenommen, die Lade- und Entladezeit mit einer Dauer von 0,75 Minuten je Doppelpalette bzw. 1,5 Minuten für die gleichzeitige Be- und Entladung. Das zusätzliche Paletten-Handling im Autobahn-Hub wird mit 1,5 Minuten je Doppelpalette angenommen, so dass für einen Lkw mit 34 Paletten zusätzliche 25,5 Minuten eingerechnet werden. Die Fahr- und Ladezeit beträgt insgesamt 24.854 Stunden.

Tabelle 43: Veränderung der Transportzeit der Ladung [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Transportzeit	42.336	181.511
Differenz Lkw ./ CargoCap	-139.174	

In Summe ergibt sich für das CargoCap-System eine Transportzeitveränderung von -16.649 Stunden und damit eine Transportzeitverlängerung. Der Zeitwert der Ladung beträgt -139 Tsd. Euro p.a., die Nutzenkomponente ist negativ (Tabelle 43).

5.2.5 Veränderung der Instandhaltungs- und Betriebsgrundkosten der Verkehrswege

Der Schwerlastverkehr hat einen hohen Einfluss auf die Lebensdauer von Straßen. Die Abnutzung bzw. Schädigung der Fahrbahn steigt gegenüber dem Pkw in der vierten Potenz der Achslast [84]. Ein Lastwagen mit beispielsweise 10 Tonnen Achslast beansprucht die Verkehrswege damit pro Entfernungseinheit 160.000-mal stärker als ein Pkw mit einer Achslast von 0,5 Tonnen. Damit ist der Lkw-Verkehr der entscheidende Faktor für die Beanspruchung des Straßenkörpers. Eine Reduzierung des Lkw-Verkehrs führt deshalb zu einer überproportionalen Verringerung von Straßenschäden.

Das Straßennetz von Bergisch Gladbach hat eine Länge von 433 Kilometern [85], hiervon sind 72 km Bundes-, Landes- und Kreisstraßen. Die gesamten jährlichen Investitionen für den Bau-, Unterhalt und Planungsausgaben an Verkehrsflächen und -anlagen betragen aktuell 6 Mio. Euro p.a. [86].

Zur Ermittlung der Instandhaltungs- und Betriebsgrundkosten der Verkehrswege nutzt die BWVP-Methodik Änderungen der Netzbestandteile. Die Reduzierung des Verkehrs auf bestehenden Strecken wird hierfür nicht betrachtet.

Vereinfacht werden als Wertansätze die fahrleistungsabhängigen Mautsätze für Bundesfernstraßen genutzt. Sie setzen sich aus den Anteilen für externe Kosten, also für Luftverschmutzung und Lärmbelästigung, sowie aus einem Anteil für die Infrastruktur zusammen. Dieser Infrastrukturanteil beträgt für Lkw größer 17 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht und mehr als vier Achsen 17,4 Cent/km [87].

Tabelle 44: Veränderung der Instandhaltungs- und Betriebsgrundkosten der Verkehrswege [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CargoCap [Euro p.a.]
Verkehrswege	45.671	0
Differenz Lkw ./.. CargoCap	54.671	

Es ergeben sich geringere Instandhaltungskosten in Höhe von 55 Tsd. Euro p.a. Die Nutzenkomponente ist positiv (Tabelle 44).

5.2.6 Veränderung der Geräuschbelastung

Die üblichen Anlieferungen erfolgen tagsüber zwischen 6 und 18 Uhr. Für die Bewertung der Veränderung der Geräuschbelastung wird angenommen, dass der Lkw-Verkehr auch in der lärmsensibleren Abend- und Nachtzeit erfolgt. Eine Bewertung erfolgt nur dann, wenn der Mittelungspegel Tag/Abend/Nacht den Wert von 45 dB(A) überschreitet und zudem die Differenz der Lärmbelastung zwischen Bezugs- und Planfall mindestens 2 dB(A) beträgt [79].

Für Teile beider Streckenalternativen liegen streckenweise 24-h-Verkehrsbelastungen vor, Route 1 über Bensberg 19.522 Fahrzeuge und 885 Fahrzeuge Schwerverkehr, das heißt Lkw über 3 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht, sowie Route 2 über Refrath 13.498 Fahrzeuge und 537 Fahrzeuge Schwerverkehr (Abbildung 43) [78].

Um die Veränderung der Geräuschbelastung deutlicher hervorheben zu können, wird vereinfacht angenommen, dass der Verkehr nur über eine Route führt. Als werktäglicher Verkehr über 24 h (DTV(w)) werden 20.000 Fahrzeuge angenommen. Der Anteil des Schwerlastverkehrs über 24 h (SV(w)) beträgt 4,5 %, dies entspricht 900 Fahrzeugen.

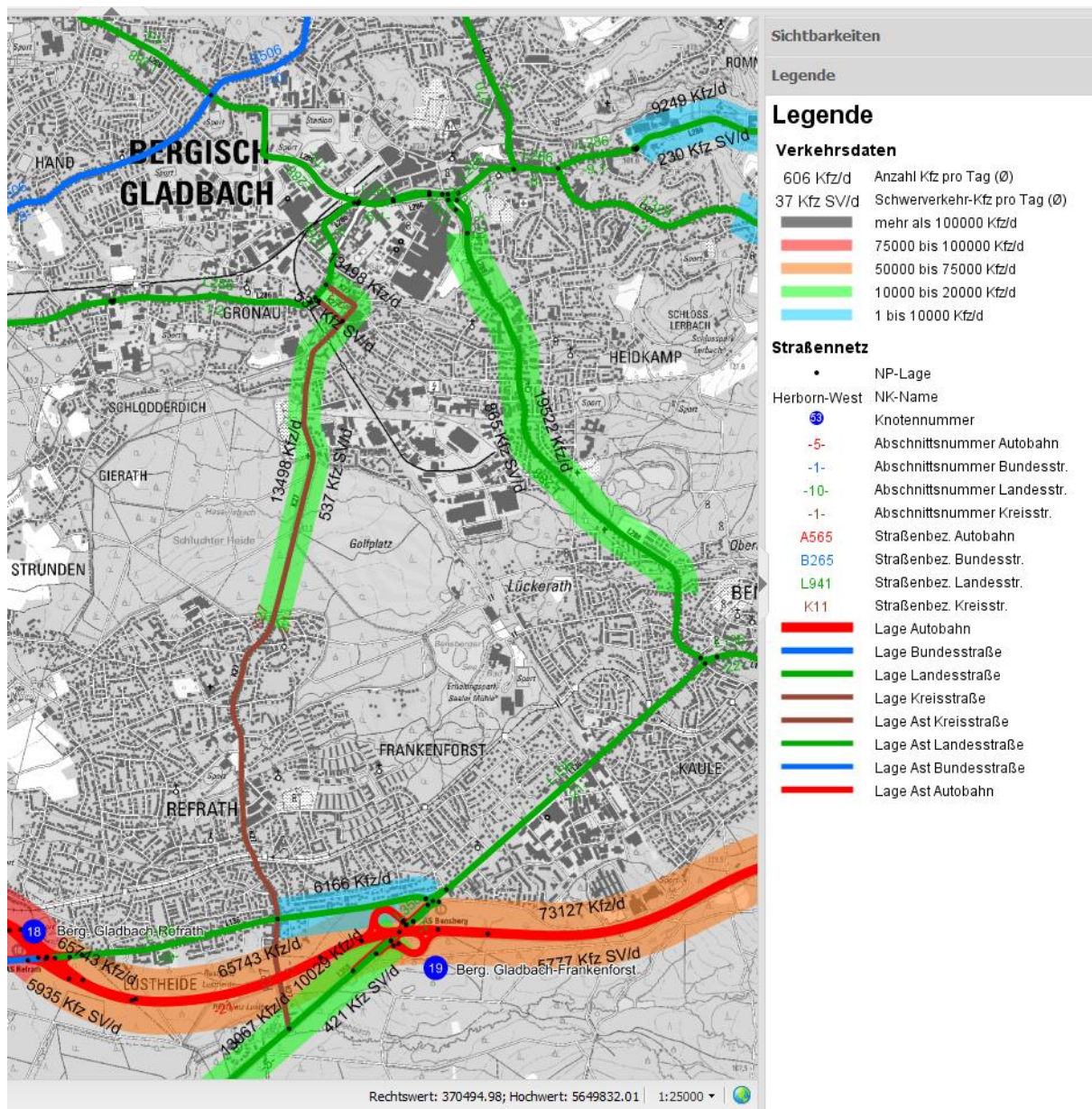


Abbildung 43: Verkehrsbelastung Bergisch Gladbach /
Quelle: Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen [78]

Der Mittelungspegel wird aus den zeitlich gewichteten Mittelungspegeln für Tag, Abend und Nacht gebildet. Für 20.000 Fahrzeuge und einem Schwerlastanteil von 4,5 % beträgt dieser 53,78 dB(A).

Durch die Verringerung des Lkw-Anteils um 250 Fahrten beträgt der Lkw-Anteil 3,3 %, dies entspricht einem Mittelungspegel von 53,39 dB(A). Die Verringerung der Geräuschbelastung ist somit nicht bewertungsrelevant.

Für nennenswerte Lärminderungen ist der Lkw-Anteil am Gesamtverkehr zu gering. Würden beispielsweise alle angenommenen 900 Lkw wegfallen, betrüge der Mittelungspegel 52,21 dB(A) und wäre damit 1,5 dB(A) niedriger. Eine Differenz von 2 dB(A) würde zum Beispiel bei einer angenommenen Lkw-Anzahl SV(w) von 1.500 und einer Reduzierung um 1.300 Fahrzeuge erreicht. Die tatsächlichen Lkw-Routen beschränken sich jedoch nicht nur auf die beiden angenommenen Routen, sondern verteilen sich auf

unterschiedliche Routen. Deshalb ist davon auszugehen, dass auch eine stärkere Reduzierung des Lkw-Verkehrs durch weitere Anschließter nur geringe Veränderungen der Lärminderungen bewirkt.

Aus kleinräumigeren Verkehrszählungen der Stadt Bergisch Gladbach liegen Verkehrsbelastungen für den Tag (8 bis 18 Uhr) und Abend/Nacht (18 bis 8 Uhr) differenziert nach Gesamt- und Lkw-Verkehr vor. Für beide Routen liegen die DTV-Werte (Stand 2016) zwischen 13.000 und 25.000 Fahrzeugen. 68 bis 77 % der Lkw verkehren tagsüber, während der Anteil bei allen Kfz 59 bis 68 % beträgt (Tabelle 45).

Tabelle 45: Verkehrsbelastung auf ausgewählten Streckenabschnitten im Jahr 2016

	24 Stunden			8 bis 18 Uhr		
	Kfz	Lkw > 3 t zGG	Anteil Lkw	Kfz	Lkw > 3 t zGG	Anteil Lkw
Frankenforster / Kölner Str. (L136)	15.600- 22.200	650-900	4,17- 5,05	10.000- 14.850	500-650	4,38- 5,00
Budde / Bensberger Str. (L288)	21.400- 25.000	900- 1.050	4,20- 4,21	12.700- 16.900	650-800	4,73- 5,12
Dolmanstr. / Refrather Weg (K27)	19.200- 23.400	660-800	3,42- 3,44	12.150- 15.700	450-550	3,50- 3,70

Quelle: Stadt Bergisch Gladbach [85]

5.2.7 Veränderung der innerörtlichen Trennwirkung

Die Entlastung innerörtlicher Straßen durch Verkehrsprojekte trägt dort zur Verbesserung der Aufenthaltsqualität bei. Diese Qualitätsverbesserung wird quantifiziert mit Hilfe berechneter Zeitverluste, die Fußgänger beim Überqueren der innerstädtischen Straße hinnehmen müssen. Diese werden mit Hilfe der Anzahl der betroffenen Anwohner (Annahme 5.000) unter Annahme einer mittleren Überquerungshäufigkeit (3 Überquerungen je Anwohner je Tag) und eines Zeitkostenansatzes für die Trennwartestunde von 6,40 Euro/Personenstunde Wartezeit gebildet.

Für die Berechnung werden alle Lkw wieder über Bensberg (Route 1) geführt. Bei den genutzten Straßen handelt sich mit Ausnahme des 1 Kilometer langen Abschnitts „An der Gormühle“ um zweistreifige Straßen mit jeweils einer Richtungsfahrbahn. Vereinfacht wird die Wartezeit deshalb nur für Direktquerer bestimmt; ebenfalls wird vereinfacht angenommen, dass die Verkehrsstärke auf der gesamten 7 Kilometer langen Strecke ab der Autobahn um 250 Lkw geringer ist.

Bei einem DTV(w) von 20.000 Fahrzeugen und einer pauschal angenommenen stündlichen Verkehrsstärke zwischen 8 und 18 Uhr von 1.600 Fahrzeugen ergibt sich durch die Verringerung des Lkw-Verkehrs um 250 Fahrzeuge eine Veränderung der innerörtlichen Trennwirkung von 133 Tsd. Euro p.a. Die Nutzenkomponente ist positiv (Tabelle 46).

Tabelle 46: Veränderung der Trennwirkung [Euro p.a.]

	Lkw [Euro p.a.]	CC [Euro p.a.]
Trennwirkung	133.792	0
Differenz Lkw ./ CC	133.792	

5.2.8 Investitionskosten

Die Investitionskosten bestehen vor allem aus den Baukosten und den technischen Systemen. Die Anfangsinvestitionen betragen für das CargoCap-System 91,3 Mio. Euro (Tabelle 47), die Ersatzinvestitionen 44 Mio. Euro (Tabelle 48).

Tabelle 47: Investitionen für das CargoCap-System

Jahr	Investition	[Euro]	Nutzungsdauer [Jahre]
2021	Verwaltungsausstattung	48.127	40
2022	Grundstücke	6.800	80
2023	Streckenrohbau	30.814.200	80
2023	Strecke Einbau	13.679.300	80
2023	Stationsmodul Bau	5.056.200	80
2023	Stationstechnik	8.427.000	80
2023	Anschlussstrecke	2.226.000	80
2023	Abzweig	1.784.616	80
2023	Caps (247 Stück)	14.633.021	20
2023	Leitsystem	14.630.255	80
	Summe	91.305.519	

Tabelle 48: Ersatzinvestitionen für das CargoCap-System

Jahr	Investition	[Euro]	Nutzungsdauer [Jahre]
2044	Caps	14.633.021	20
2064	Caps	14.633.021	20
2064	Verwaltungsausstattung	48.127	40
2084	Caps	14.633.021	20
	Summe	43.947.190	

Die jährliche Annuität der Investitionen für das CargoCap-System beträgt 2.630.243 Mio. Euro p.a..

5.2.9 Nutzen-Kosten-Verhältnis

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Nutzen- und Kosten-Komponenten (Tabelle 49):

Tabelle 49: Barwerte der Nutzen- und Kostenkomponenten für das CargoCap-System

Komponente	Veränderung der Nutzen p.a. [Euro]	Veränderung der Kosten p.a. [Euro]
Vorhaltungs- & Betriebsgrundkosten	-206.274	
Personalkosten	-311.286	
Energiekosten	61.392	
Abgasbelastung	78.507	
Verkehrssicherheit	35.342	
Transportzeit der Ladung	-139.174	
Verkehrswege	54.671	
Geräuschbelastung	0	
Trennwirkung	133.792	
Investitionskosten		2.630.243
Summe Nutzen / Summe Kosten	-293.030	2.630.243
Nutzen-/Kostenbarwert	-12.750.636	110.973.663

Die jährliche Annuität der Investitionen beträgt 2,6 Mio. Euro p.a. Die Summe der Nutzenkomponenten des CargoCap-Systems in der hier untersuchten Ausgestaltung beträgt -293 Tsd. Euro p.a. und ist negativ. Der Nutzenbarwert über die Projektlaufzeit beträgt -12,8 Mio. Euro. Eine Bestimmung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses ist nicht möglich.

Ausschlaggebend für den negativen Gesamtnutzen sind die höheren Betriebskosten des CargoCap-Systems und die zusätzliche Transportzeit der Ladung.

Die Betriebskosten des Lkw verändern sich aufgrund der Bewertungssätze pro Lkw proportional zur Transportmenge. Für das CargoCap-System liegen hierüber keine Informationen vor. Es ist aber davon auszugehen, dass die Betriebs- und Wartungskosten einem degressiven Verlauf folgen und mit steigenden Transportmengen Größenvorteile erzielt werden.

Der zusätzliche Umschlag zwischen Lkw und dem CargoCap-System ist systemimmanent. Die zusätzliche Transportzeit ist sowohl entfernungs- als auch von der lokalen Verkehrssituation abhängig, die tageszeitlich, täglich und jahreszeitlich Schwankungen unterworfen ist. Das CargoCap-System erreicht seine Vorteilhaftigkeit deshalb auf längeren Fahrstrecken und mit sinkender Durchschnittsgeschwindigkeit des städtischen Straßenverkehrs. Der Gesamtnutzen bleibt auch unter der Annahme eines zukünftig bestehenden überörtlichen CargoCap-Netzes und dem damit verbundenen Wegfall des zusätzlichen Lkw-Umschlags negativ.

Die für das CargoCap-System vorteilhaften positiven Nutzenkomponenten steigen weiter, wenn die Transportmenge wächst, ohne dass weitere überproportional hohe Investitionen erforderlich sind.

5.2.10 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss darüber, wie empfindlich die Nutzen- und Kostenkomponenten auf Änderungen der Eingangsparameter reagieren. Insbesondere bei Bewertungskomponenten, bei denen eine große Bandbreite der Bewertungsansätze vorliegt, ist es zweckmäßig, eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

Die Veränderung der Transportmengen wird für das CargoCap-System analysiert. Bei einer Steigerung der Transportmenge von +44 % wird der Nutzenbarwert positiv. Bei +424 % wechselt das Nutzen-Kosten-Verhältnis für das CargoCap-System zu größer 1 und damit wäre die Investition volkswirtschaftlich vorteilhaft.

Da es sich bei Schäden durch den Klimawandel um generationenübergreifende Schäden handelt, empfiehlt das UBA die Verwendung eines Kostensatzes von 180 Euro₂₀₁₆/t CO₂-äq. für das Jahr 2016. Für die Sensitivitätsanalyse spiegelt ein Wert von 640 Euro₂₀₁₆/t CO₂-äq. eine Gleichgewichtung der Nutzen heutiger und zukünftiger Generationen wider [83]. Die Umweltkosten pro Fahrzeugkilometer für den Sattelzug von 28 bis 40 Tonnen zulässiges Gesamtgewicht betragen dann statt 0,2958 Euro₂₀₁₆/Fahrzeugkilometer bei einem Treibhausgas (THG)-Kostensatz von 180 Euro/t CO₂-äq. bei einem THG-Kostensatz von 640 Euro/t CO₂-äq. 0,8035 Eu-

ro_{2016} / Fahrzeugkilometer [83]. Für die Veränderung der Abgasbelastung wird deshalb ebenfalls der 2,7-fache Wertansatz angesetzt.

Hierdurch steigt die jährliche Veränderung der Abgasbelastung von 78.507 Euro p.a. auf 258.844 Euro p.a. (Tabelle 50).

Tabelle 50: Veränderung des Nutzens für unterschiedliche THG-Kostensätze

	THG-Kostensatz 180 Euro ₂₀₁₆ / t CO ₂ -äq.	THG-Kostensatz 640 Euro ₂₀₁₆ / t CO ₂ -äq.
Komponente	Veränderung [Euro]	Veränderung [Euro]
Abgasbelastung	78.507	258.844
Differenz Lkw ./ CC p.a.	-293.030	-112.693
Nutzen-/Kostenbarwert	-12.750.636	-5.198.146

Der negative Gesamtnutzen verbessert sich auf -113 Tsd. Euro p.a., der Nutzenbarwert des CargoCap-Systems über die Projektlaufzeit beträgt -5,2 Mio. Euro.

5.2.11 Partialbetrachtung

Unter der Annahme, dass die Infrastrukturkosten zum Beispiel im Rahmen einer Innovationsförderung bereitgestellt werden, wird in einer Partialbetrachtung die Auswirkung auf das Nutzen-Kosten-Verhältnis untersucht.

Werden die Infrastrukturinvestitionen für das CargoCap-System nicht mit betrachtet, betragen die Anfangsinvestitionen nur 29 Mio. Euro, die Ersatzinvestitionen unverändert 44 Mio. Euro (Tabelle 51).

Tabelle 51: Anfangsinvestitionen für das CargoCap-System ohne Infrastrukturinvestitionen

Jahr	Investition	[Euro]	Nutzungsdauer [Jahre]
2021	Verwaltungsausstattung	48.127	40
2022	Grundstücke	0	80
2023	Streckenrohbau	0	80
2023	Strecke Einbau	0	80
2023	Stationsmodul Bau	0	80
2023	Stationstechnik	0	80
2023	Anschlussstrecke	0	80
2023	Abzweig	0	80
2023	Caps (247 Stück)	14.633.021	20
2023	Leitsystem	14.630.255	80
	Summe	29.311.403	

Die jährliche Annuität der Investitionen ohne Infrastrukturinvestitionen beträgt 1,2 Mio. Euro p.a.

Die Summe der Nutzenkomponenten bleibt auch negativ, wenn die Infrastrukturinvestitionen des CargoCap-Systems nicht betrachtet werden (Tabelle 52). Eine Bestimmung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses ist nicht möglich.

Tabelle 52: Nutzen- und Kostenkomponenten für das CargoCap-System ohne Infrastrukturinvestitionen

Komponente	Veränderung der Nutzen [Euro]	Veränderung der Kosten [Euro]
[...]		
Investitionskosten p.a.		1.206.801
Summe Nutzen / Summe Kosten p.a.	-293.030	1.206.801
Nutzen-/Kostenbarwert	-12.750.636	51.034.680

Bei einer Steigerung der Transportmenge um +44 % wird der Nutzenbarwert positiv. Bei +219 % wechselt das Nutzen-Kosten-Verhältnis für das CargoCap-System zu größer 1 und die Investition wäre volkswirtschaftlich vorteilhaft.

5.2.12 Weitere Nutzenaspekte

Im Folgenden werden die nicht bestimmten Nutzenkomponenten näher analysiert.

5.2.12.1 Veränderung der impliziten Nutzen

Als implizite Nutzen werden Vorteile der Verkehrsteilnehmer bezeichnet, die nicht gemessen werden oder nicht messbar sind. Die Nutzen fallen außerhalb des Verkehrs an. In der Methodik des BVWP wird die Veränderung der impliziten Nutzen im Güterverkehr nur für marktbedingte Verlagerungen berücksichtigt, das heißt solche, die auf die Einflussgrößen Transportzeiten, Transportkosten und Zuverlässigkeit zurückzuführen sind.

Letztendlich umfassen die impliziten Nutzen in der Logistik die Zahlungsbereitschaft seitens der Logistik zum Beispiel für eine bessere Rampenlogistik, Taktfrequenz oder Güterpuffer. In dem hier gewählten Ressourcenverbrauchsansatz unter vereinfachten Annahmen für Nutzen in der Logistik kann die Veränderung der impliziten Nutzen nicht abgebildet werden und werden vernachlässigt.

Zur Problematik von Anforderungen der Anschließer an die Logistik wird auf die Ergebnisse in Abschnitt 2 verwiesen.

5.2.12.2 Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr

Die Veränderung der Reisezeit im Personenverkehr bestimmt sich aus dem Nutzen, der sich durch geringere Fahrzeiten ergibt. In dem hier untersuchten Fall reduziert sich die Anzahl der Lkw um 125 Fahrzeuge; das heißt 250 Ein- und Ausfahrten. Bei einer Betriebszeit von 10 Stunden entspricht dies 25 Lkw pro Stunde. Sowohl wegen der über das Stadtgebiet verteilten Abladeorte als auch wegen der hier nicht näher untersuchten tatsächlichen Lkw-Routen, beispielsweise für Lkw aus Richtung Norden, verteilt sich die Entlastung noch stärker. Von einer nennenswerten Veränderung der Reisezeit kann deshalb nicht ausgegangen werden.

5.2.12.3 Veränderung der Zuverlässigkeit

Die Veränderung der Zuverlässigkeit kann mittels Wertansätze für verspätet eintreffende Ware bestimmt werden.

Über außerplanmäßig längere Transportzeiten im Warenein- und -ausgang der Anschließer liegen keine Informationen vor. Aufgrund der geplanten Transportzeit des CargoCap-Systems ist davon auszugehen, dass die Zuverlässigkeit zunimmt.

Zur Problematik der Zuverlässigkeit an die Logistik in Bergisch Gladbach wird auf die Ergebnisse in Abschnitt 3.9 verwiesen.

5.2.12.4 Veränderung der Lebenszyklusemissionen von Treibhausgasen der Infrastruktur

Mit dem Bau und der Nutzung von Infrastruktur sind über den Lebenszyklus Emissionen von Treibhausgasen (THG) für Ersatzinvestitionen, Restinvestitionen, Streckenunterhalt und dem Betrieb verbunden.

Die Reduzierung des Lkw-Verkehrs führt zu einer längeren Lebensdauer der Infrastruktur. Die daraus resultierenden THG-Emissionen verringern sich ebenfalls. Aufgrund der bereits existierenden Strecke und der geringen Anzahl eingesparter Lkw erscheint diese Nutzenkomponente vernachlässigbar gegenüber den Investitionen des CargoCap-Systems.

Spezifische THG-Lebenszyklusemissionen für Röhrenbauwerke liegen nicht vor. Die spezifischen THG-Emissionen für Bundesstraßen liegen beispielsweise bei 4,6 kg CO₂-äq. / m² Straßenoberfläche p.a.; für Tunnelabschnitte werden zusätzlich 27,1 kg aufgeschlagen [79]. Der Wertansatz für CO₂-Emissionen beträgt 145 Euro / Tonne [79].

Es ist davon auszugehen, dass die Veränderung den Nutzen verringert.

5.3 Ergebnis

CargoCap ist ein Transportsystem, das geeignet ist, den Lkw-Verkehr in Bergisch Gladbach zu reduzieren. Durch CargoCap werden fossile Kraftstoffe eingespart, die Umweltbelastung durch Abgasemissionen reduziert, die Verkehrssicherheit gesteigert und innerörtliche Trennwirkungen gemindert. Aus jeder verlagerten Lkw-Fahrt ziehen die übrigen Verkehrsteilnehmer, Anwohner und die Stadt einen Nutzen, durch schnellere Reisezeiten, geringere Lärmeinwirkungen, Erhöhung der Zuverlässigkeit und niedrigeren Verschleiß der Infrastruktur. Diese Nutzenkomponenten liefern alle einen teilweise erheblichen Beitrag zur Vorteilhaftigkeit eines Einsatzes des CargoCap-Systems in Bergisch Gladbach.

Die volkswirtschaftliche Bewertung nach dem Ressourcenverbrauchsansatz der Bundesverkehrswegeplanung 2030 zeigt, dass die analysierten Vorteile die systemimmanenten Nachteile des CargoCap-Systems in der hier untersuchten Nutzungsform nicht aufwiegen. Die im Vergleich zum Lkw höheren Betriebskosten und zusätzlichen Transportzeiten führen zu einem negativen jährlichen Gesamtnutzen des CargoCaps-Systems. Durch eine Steigerung der Transportmenge um fast 50 % wird erst ein positiver Gesamtnutzen erreicht. Für ein gesamtwirtschaftlich vorteilhaftes Nutzen-Kosten-Verhältnis von größer 1 muss die Transportmenge um 430 % ansteigen. Werden in einer Partialbetrachtung die Infrastrukturinvestitionen nicht betrachtet, ist immer noch eine Mengensteigerung um mehr als 220 % erforderlich.

Allerdings konnten einzelne Nutzenaspekte nicht bewertet werden. In Kombination mit einem der Generationengerechtigkeit entsprechenden wesentlich höheren Wertansatz für THG-Emissionen erscheint ein positiver Gesamtnutzen möglich. Ein Nutzen-Kosten-Verhältnis größer 1 wird aber auch damit nicht erreicht.

Darüber hinaus existieren eine Reihe impliziter Nutzen in der Logistik, die einzelbetriebwirtschaftliche Aspekte betreffen, zum Beispiel die Verbesserung der Rampenlogistik, Taktfrequenz und Einrichtung eines Güterpuffers.

Die Investition des CargoCap-Systems ist unter den hier vorliegenden und gewählten Annahmen in Bergisch Gladbach gesamtwirtschaftlich nicht vorteilhaft.

Die grundsätzliche Vorteilhaftigkeit des CargoCap-Systems unter anderen Voraussetzungen erscheint dennoch möglich. Als Voraussetzung für eine gesamtwirtschaftlich vorteilhafte Infrastrukturinvestition haben sich in dieser Analyse herausgestellt:

- lange Transportstrecken,
- hohe Transportmengen,
- hoher Lkw-Anteil am Kfz-Verkehr,
- Reduzierung von nächtlichem Lkw-Verkehr,
- geringe räumliche Verteilung der Anschließer.

6 CargoCapVan-System: Alternatives Konzept mit speziellen Straßenfahrzeugen

6.1 Ausgangspunkt

Als Alternative zum konventionellen CargoCap-System wird nachfolgend eine Variante untersucht, bei der die speziellen CargoCap-Fahrzeuge, die Caps, durch serienmäßig hergestellte Straßenfahrzeuge ersetzt werden [39]. Durch die fortschreitenden Entwicklungen der Automobilindustrie im Rahmen des „autonomen Fahrens“ sind zahlreiche Elemente der für einen Tunnelbetrieb erforderlichen Sensorik bereits in Serienfahrzeugen vorhanden. Auch der elektrische Antrieb ist für Transporter bis zur Größe des Sprinters serienmäßig im Angebot.

Seitens der Gesetzgebung bestehen Bemühungen, das autonome Fahren ohne einen Fahrer mit Eingriffsmöglichkeit an Bord im Straßenverkehr zu erlauben. Rechtlich in Deutschland ungelöst ist der Tatbestand, wenn einem Menschen durch ein autonomes Fahrzeug ein körperlicher Schaden zugeführt wird. Beim automatisierten, unterirdischen Warentransport kann dieses Problem außer Acht gelassen werden, da sich keine Person im Gefahrenbereich (in der Fahrrohrleitung) befinden kann (Abbildung 44).



Abbildung 44: Autonom fahrender Transporter in der Fahrrohrleitung DN 3200 [Computergrafik: visaplan GmbH]

6.2 Allgemeines

Der grundlegende Unterschied zwischen dem konventionellen CargoCap-System und dem CargoCapVan-System (nachfolgend CargoCapVan genannt) besteht in dem Ersatz der schienengebundenen Caps durch gummibereitete Straßenfahrzeuge, die mit möglichst geringen Modifikationen den auf dem Markt befindlichen Serien-Fahrzeugen entsprechen sollen. Damit sind gegenüber den schienengeführten Caps des konventionellen CargoCap-Systems die folgenden Vorteile verbunden:

- Fahrzeuge sind schon existent und bedürfen lediglich zusätzlicher Komponenten
- Die Wartung erfolgt in konventionellen Fachwerkstätten
- Öffentliche Batterieladestationen können genutzt werden
- Die Fahrzeuge können auch den automatisierten Betriebshof nutzen

Der entscheidende Vorteil besteht aber darin, dass die Fahrzeuge sowohl unterirdisch durch die Fahrrohre als auch oberirdisch im öffentlichen Straßenverkehr fahren können. Dies eröffnet eine recht große Freizügigkeit des Einsatzes, insbesondere in der Migrationsphase.

Mit dem CargoCapVan-System lassen sich verschiedene Ausbaustufen von CargoCap in Bergisch Gladbach feiner abstufen und so die Migration des Systems deutlich erleichtern. So kann beispielsweise bereits die Hauptstrecke etappenweise in Betrieb genommen werden.

Es sind die folgenden Ausbaustufen denkbar, in denen das CargoCapVan-System für Bergisch Gladbach eine Alternative zum konventionellen CargoCap-System darstellen könnte:

1. Ausbaustufe:
Unterirdischer Betrieb ausschließlich auf der in Abschnitt 3.3.1 (Abbildung 22) dargestellten Hauptstrecke (1:1 Ersatz des konventionellen CargoCap-Systems)
2. Ausbaustufe
Unterirdischer Betrieb auf der Hauptstrecke **und** Bedienung der Zweig- und Nebenstrecken (s. Tabelle 8) **oberirdisch** auf dem öffentlichen Straßennetz. Der Wechsel zwischen dem unter- und dem oberirdischen Betrieb erfolgt über Rampen, die in den Anschlusspunkten der Zweigstrecken an die Hauptstrecke angeordnet sind (Abbildung 49).
3. Ausbaustufe
Unterirdischer Betrieb auf der Hauptstrecke **und** Bedienung der Zweig- und Nebenstrecken (s. Tabelle 8) **unterirdisch** in eigenen Fahrrohrleitungen.
4. Ausbaustufe
Ergänzung des Fahrrohrleitungsnetzes über die Stadtgrenzen hinaus, bzw. Vereinigung mit Nachbarnetzen (beispielsweise Stadt Köln)

Die Linienführung des Streckennetzes der 1. Ausbaustufe entspricht der im Abschnitt 3.3.1 vorgestellten Linienführung der Hauptstrecke (Abbildung 22). Für das CargoCapVan-System sind allerdings technische Anpassungen erforderlich, die in den nachfolgenden Unterabschnitten beschrieben sind.

6.3 Skalierung des CargoCapVan-Systems

In einem ersten Schritt erfolgt eine Skalierung des neuen unterirdischen Transportsystems auf die gegenüber den Caps deutlich größeren Straßenfahrzeuge. Dabei ist hinsichtlich der Größe der Fahrzeuge ein optimaler Kompromiss zu finden zwischen der von einem Fahrzeug beförderbaren Gütermenge (maximales Volumen und Gewicht der Zuladung, maximale Abmessungen der Ladungsträger) einerseits und den äußeren Fahrzeugabmessungen andererseits, die den erforderlichen Durchmesser der Fahrrohrleitung bestimmen.

Mit dieser Skalierung des Systems im ersten Schritt werden für die weiteren Untersuchungen die folgenden Parameter festgeschrieben:

- Maßgebende Baureihe des Transporters mit seinen Abmessungen
- Standard-Innendurchmesser der Fahrrohrleitung
- Randbedingungen für die Stationen

In einem zweiten Schritt erfolgt

- die Anpassung der Bautechnik für die Infrastruktur (Fahrrohrleitung und Stationen) und
- die Beschreibung der erforderlichen Modifizierungen der Serienfahrzeuge.

Die erste Grobauswahl aus dem umfangreichen Fahrzeugangebot der Automobilhersteller [39] hat ergeben, dass sich ausschließlich die Kastenwagen aus der Produktreihe der Transporter für die angestrebten Transportaufgaben eignen. Während die Fahrzeuge der Pkw-Sparte für einen effizienten Gütertransport zu klein sind, benötigen die Trucks einen sehr großen Tunnelquerschnitt und verursachen extrem hohe Kosten für die unterirdische Infrastruktur. Deshalb werden die weiteren Untersuchungen ausschließlich für den Transporter vom Typ Sprinter mit elektrischem Antrieb der Daimler AG durchgeführt (Abbildung 45).

Die Länge des Fahrzeugs hat überhaupt keinen Einfluss auf die Dimensionierung der Fahrrohrleitungen, lediglich die unterirdischen Stationen sind darauf abzustimmen.

Abbildung 45 zeigt die Abmessungen des serienmäßigen Sprinters der Daimler AG mit niedrigem Dach. Die entsprechende Ausführung mit elektrischem Antrieb ist beim Hersteller geplant, aber noch nicht in Serie, da die Seitenwand nicht der Variante mit Verbrennungsmotor entspricht.

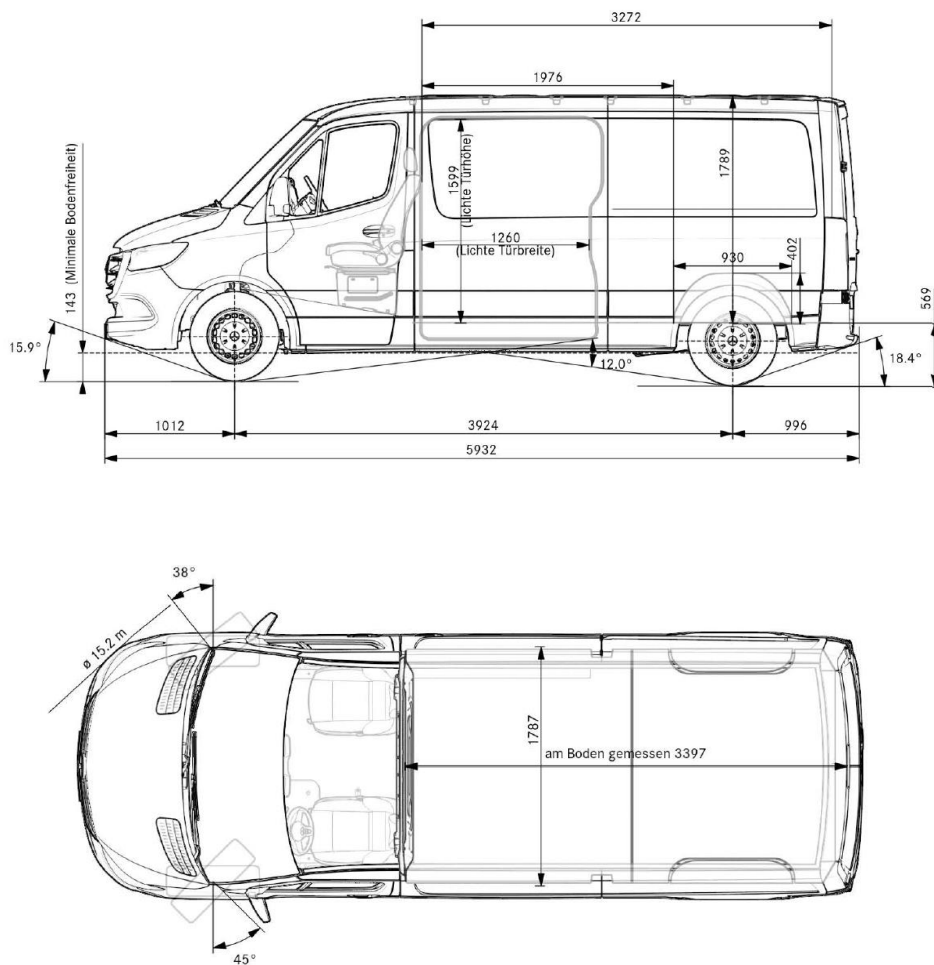


Abbildung 45:
Abmessungen des serienmäßigen Sprinters der Daimler AG (mit Verbrennungsmotor)

In der Tabelle 53 sind die maßgebenden Parameter des Sprinters zusammengefasst.

Tabelle 53: Für die Fahrzeugauswahl maßgebende Abmessungen

	Sprinter Standard
Erforderlicher Fahrrohrdurchmesser	DN 3200
Innenhöhe (Abstand Boden – Dach)	1789 mm
Laderaumlänge	3272 mm
Laderaubbreite	1787 mm
Laderaubbreite am Radkasten	1412 mm
Lichte Seitentürhöhe	1599 mm
Lichte Seitentürbreite	1260 mm
Lichte Hecktürhöhe	1631 mm
Lichte Hecktürbreite	1553 mm

Wie die Abbildung 46 oben zeigt, kann der *Sprinter Standard* in der Standardausführung vier Paletten laden, die allerdings unterschiedlich orientiert sind und somit zum Teil durch die Seitentür und zum Teil durch die Hecktür im Fahrzeug positioniert werden müssen. Unten in Abbildung 46 ist die Anordnung der Paletten im Fahrzeug für die automatische Beladung dargestellt. In diesem Fall sind die Paletten gleich orientiert und können wahlweise durch die Seiten oder die Hecktür ins Fahrzeug gefördert werden.

Ein entscheidender Parameter für die Kompatibilität mit der vor- und nachlaufenden Logistik ist die Ladehöhe für die Paletten.

Von der „Centrale für Organisation für Ladungs- und Ladehöhen von Europaletten in der Lebensmittelwirtschaft“ sind Ladungshöhen der Paletten unter der Abkürzung CCG genormt. Darüber hinaus gibt es eine Europäische Palettenladehöhenempfehlung der „ECR Europe“ unter der Abkürzung EUL [**Fehler! Textmarke nicht definiert.**].

Der Sprinter ist für die folgenden genormten Ladehöhen geeignet:

- CCG I: 1.050 mm und
- EUL 1: 1.200 mm

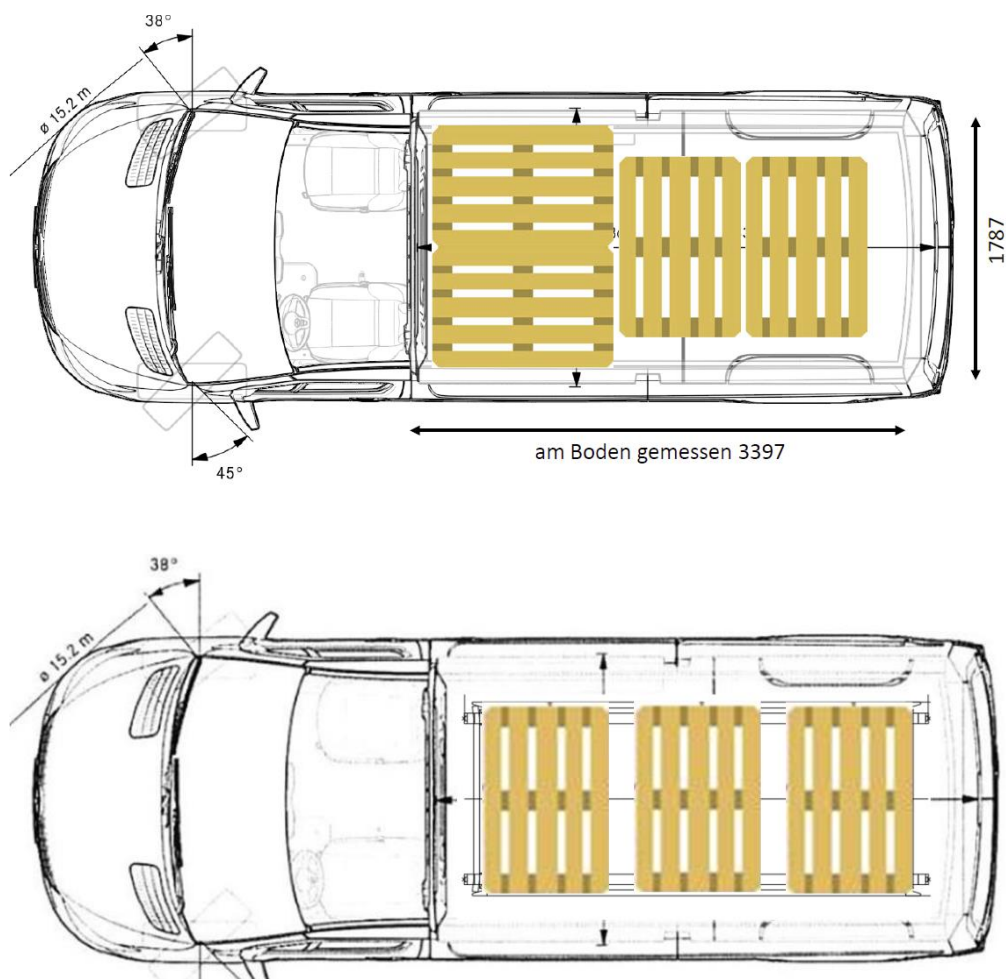


Abbildung 46: Anordnung der Europaletten (CCG 1 oder EUL 1) im Laderaum vom Sprinter Standard

Oben: maximale Beladung mit vier Paletten

Unten: automatische Beladung mit drei Paletten

Ein weiteres Kriterium ist die Breite der Seitentür, die beim Sprinter mit 1260 mm ausreichend breit ist, so dass sie darüber hinaus die Positionierungstoleranzen des Fahrzeugs in der Station abdeckt. Der E-Sprinter in einer leicht modifizierten Version ist somit für den Einsatz in einer Fahrrohrleitung DN 3200 (Abbildung 47) sehr gut geeignet.

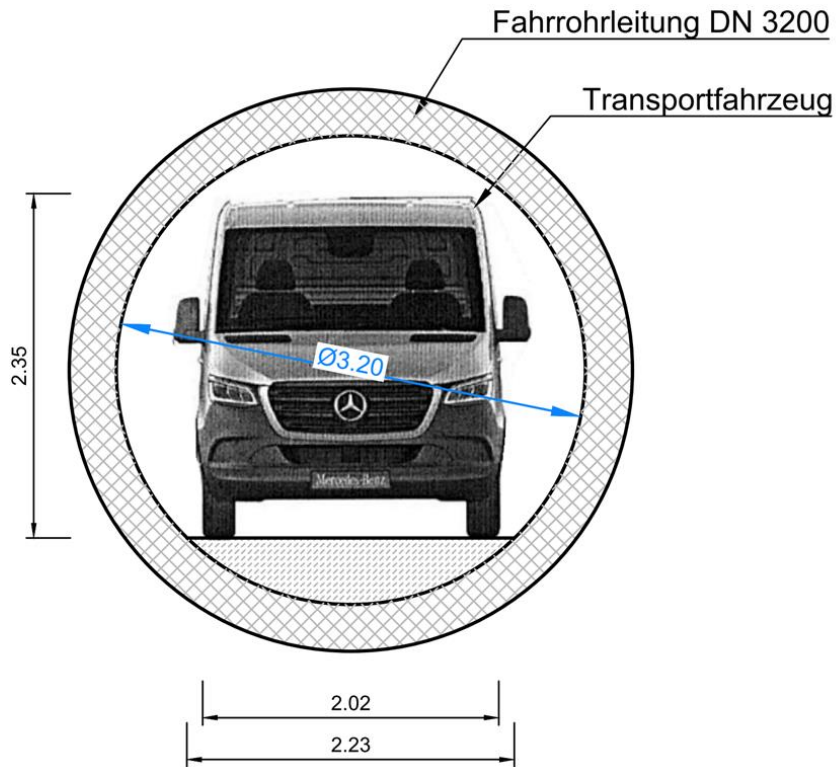


Abbildung 47: Erforderlicher Innendurchmesser der Fahrrohrleitungen für den Sprinter mit niedrigem Dach (Maße in m)

In den nachfolgenden Abschnitten werden die bautechnischen und fahrzeugtechnischen Anforderungen zusammengefasst, und es werden Lösungsvorschläge vorgestellt.

6.4 Systemspezifische Anforderungen an die Fahrzeuge

Die Fahrzeuge für das CargoCapVan-System müssen sowohl im öffentlichen Straßenraum als auch in der Fahrrohrleitung verkehren können. Sie besitzen somit zwei Modi, zwischen denen umgeschaltet werden muss.

Die beiden Modi werden wie folgt definiert:

- **Modus O:**
Oberirdischer Betrieb im öffentlichen Straßenraum als konventionelles Transportfahrzeug. Die Steuerung des Fahrzeugs übernimmt – zumindest bis das autonome Fahren auf der öffentlichen Straße eingeführt ist – ein Fahrer mit einer üblichen Fahrerlaubnis.
- **Modus U:**
Unterirdischer Betrieb in den für die Öffentlichkeit nicht zugänglichen Fahrrohrleitungen. Die Steuerung des Fahrzeugs erfolgt automatisch. Ein Fahrer ist auf dem Fahrzeug nicht zugelassen.

Die Anforderungen an das Fahrzeug im **Modus O** entsprechen vollständig den Anforderungen an ein konventionelles Straßenfahrzeug. Zusätzliche, für den Modus U erforderliche Komponenten dürfen die Betriebserlaubnis für das Fahrzeug nicht gefährden oder müssen explizit zugelassen werden. Je nach Entwicklungsstand kann zukünftig auf autonom im Straßenraum verkehrende Fahrzeuge umgestellt werden.

Bei einem räumlich abgegrenzten Betriebshof (Gated Area) kann das Fahrzeug bereits heute ohne Fahrer gesteuert werden. Das Fahrzeug muss hierbei nicht über das komplette Set an Sensoren für den autonomen Betrieb verfügen, sondern es reicht hierbei eine Antenne aus, welche von einer automatisierten Leitzentrale eine Fahrtrajektorie übermittelt bekommt und diese Anweisung fahrtechnisch ausführt. Auf diese Weise kann das Güterverteilzentrum mit teilautomatisierten Fahrzeugen menschenlos betrieben werden.

Im **Modus U** wird von einem fahrerlosen Betrieb ausgegangen, da sich aufgrund fehlender Flucht- und Rettungswege kein Mensch im Fahrzeug oder in der Rohrleitung aufhalten darf. Das Fahrzeug muss deshalb mit allen Funktionen von außen steuerbar sein oder „selbstständig“ agieren. Die Anforderungen an die Steuerung sind teilweise, aber nicht vollumfänglich identisch mit den Anforderungen an die in der Entwicklung befindlichen autonomen Straßenfahrzeuge. Bezüglich der nachfolgend genannten Punkte stellt der Fahrbetrieb in der Rohrleitung höhere Ansprüche an die Steuerung:

- **Geringere Toleranz bei der Quersteuerung (Spurhaltung)**
Die Breite der Fahrbahn ist in der Rohrleitung deutlich kleiner als auf der Straße und wird durch die Innenwand des Rohres begrenzt. Dem Sprinter steht eine Fahrspur mit einer Breite von 2,23 m zur Verfügung.
- **Verzicht auf GPS**
Durch die fehlende Verbindung zu den Satelliten ist eine Verwendung von GPS-gestützten Navigations- und Ortungssystemen nicht möglich.

Andererseits gibt es zahlreiche Aspekte, die die Steuerung für den automatisierten Betrieb in der Rohrleitung z.T. in einem hohen Maße erleichtern:

- **Keine Gefährdung von Menschen**
Selbst bei Unfällen kann lediglich Sachschaden entstehen
- **Homogene Fahrbahnoberfläche**
Keine Witterungseinflüsse wie Schnee, Eis, Laub, Seitenwind, Wasserfilm auf der Fahrbahn etc.
- **Keine „Störer“**
Keine fremden Fahrzeuge zugelassen; alle Fahrzeuge sind mit derselben Sensorik und Aktorik ausgestattet
- **Keine Geschwindigkeitsunterschiede**
Alle Fahrzeuge fahren weitgehend mit derselben Geschwindigkeit, so dass keine Überholvorgänge erforderlich sind
- **Geringe Höchstgeschwindigkeit**
Die Entwurfsgeschwindigkeit liegt bei 10 m/s (36 km/h) oder allenfalls 50 km/h. Durch den Wegfall von Geschwindigkeitseinbrüchen (Ampel, Stau, langsamere Fahrzeuge etc.) liegt die Durchschnittsgeschwindigkeit in der Rohrleitung deutlich höher als auf der konventionellen Stadtstraße

Für den Modus U müssen zusätzliche Anforderungen an das Fahrzeug gestellt und zusätzliche Komponenten installiert werden. Für das reine Fahren in der Rohrleitung sind neben dem elektrischen Antrieb die folgenden beiden Steuerungssysteme unbedingt erforderlich, auch wenn keine Stationen angefahren werden oder Verzweigungen installiert sind:

- Quersteuerung (Spurhaltung)
- Längssteuerung (Routing, Geschwindigkeitsteuerung, Abstandshaltung, Anhalten am Zielpunkt)

Dies sind die Minimalanforderungen an die Fahrzeuge, die in der Fahrohrleitung verkehren sollen.

Wenn die Fahrzeuge in der Rohrleitung unterirdisch be- und entladen werden sollen, ist ein automatisches System erforderlich, um Behälter aus dem Fahrzeug zu entnehmen und im Fahrzeug zu platzieren.

In diesem Fall sind weitere Anforderungen an das Fahrzeug zu stellen, z.B.:

- Zentimetergenaues Positionieren in der Station
- Automatisch öffnende und schließende Seitentür (alternativ kann eventuell in der Rohrleitung mit geöffneter Tür gefahren werden)
- Auf der Ladefläche installierter Rollen- oder Kettenförderer
- Routing für das Anhalten an der Zielstation und für die Richtungswahl an Verzweigungen
- Spurführungssystem mit Richtungswahl an den Verzweigungen
- Haltesystem für Zusammenführungen

Da sich während des Betriebs keine Menschen im Fahrrohrleitungssystem aufhalten, sind an die Frischluftzufuhr und an die Positionierung von Notausgängen keine besonderen Anforderungen zu stellen.

Im Einzelnen müssen die Fahrzeuge die in den nachfolgenden Abschnitten genannten Fähigkeiten besitzen.

6.4.1 Antriebstechnik

Die Antriebstechnik bleibt gegenüber den konventionellen Elektrofahrzeugen unverändert, zumal eine elektrische Variante des Sprinters inzwischen verfügbar ist. Eine Stromzuführung von außen, wie beim konventionellen CargoCap-System (s. Abschnitt 3.1)

- a) über in der Fahrrohrleitung installierte Schleifleitungen mit Gleichstrom (Spannung: beispielsweise 750 V) oder
- b) berührungslos über Übertragerköpfe, in die eine hochfrequente Wechselspannung aus zwischen den Schienen verlegten Leiterschleifen induziert wird,

wird in der vorliegenden Studie nicht weiter verfolgt. Es wird davon ausgegangen, dass die Energieversorgung über eine mitgeführte, fahrzeugeigene Batterie erfolgt und deshalb in der Fahrrohrleitung keine Elemente der Stromzuführung erforderlich sind.

Bei den weiteren Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuge eine für eine Tagesleistung ausreichend bemessene Batterie mitführen, die in Schwachlastzeiten mit geringem Transportbedarf (beispielsweise nachts) vollständig aufgeladen werden.

Die Aufladung der Batterien erfolgt bei elektrischen Straßenfahrzeugen derzeit meist noch an speziellen Ladestationen, an denen das Ladekabel von Hand in das Fahrzeug eingesteckt wird. Dieses konventionelle Verfahren ist zwar grundsätzlich auch für die CargoCapVan-Fahrzeuge geeignet, sie müssten aber stets zur Aufladung an die Oberfläche gefahren werden oder es müsste ein spezieller unterirdischer Raum geschaffen werden, in dem die Fahrzeuge anhalten und der von Wartungsarbeitern betreten werden kann.

Aus diesem Grunde wäre zu prüfen, ob stattdessen die Fahrzeugbatterien induktiv und automatisch geladen werden können, wenn sich das Fahrzeug an einer dafür vorgesehenen Stelle positioniert. Über ein derartiges Verfahren könnten auch kurze Zwischenaufladungen in den Stationen ermöglicht werden. Dieses Verfahren eignet sich bis zu einer induktiven Ladeleistung von 3,7 KW. Darüber hinaus bedarf es einer aktiven Kühlung. Ansonsten gibt es auch mobile konduktive Ladelösungen, die von innovativen StartUps entwickelt werden (z.B. easelink aus Österreich, Abbildung 48).



Abbildung 48: Konduktives Ladeverfahren des Grazer E-Mobility-Startups „Easelink“

6.4.2 Quersteuerung / Spurführung

An die Quersteuerung der Fahrzeuge werden für das Fahren in der Rohrleitung sehr hohe Ansprüche gestellt, da der Toleranzbereich für die seitliche Abweichung von der Solllinie nur wenige Zentimeter beträgt. Aus diesem Grunde müssen Sensorik und Aktorik sowohl schnell als auch genau arbeiten. Es bieten sich folgende Varianten an:

- **Mechanische Lenkung über seitliche Führungsrollen**
Die Spurführung erfolgt im Standardbetrieb über seitliche Führungsrollen, die kontinuierlichen Kontakt zu beidseitig der Fahrbahn angeordneten Führungsschienen haben. Dieses System ist bei verschiedenen Metrosystemen und beim Spurbus in Essen realisiert.
Entscheidender Nachteil: Verzweigungen sind bei einem fahrerlosen System sehr aufwändig.
- **Mechanische Lenkung über eine Mittelschiene**
Die Spurführung erfolgt mechanisch über eine in die Fahrbahn eingelassene Mittelschiene, die über Kontakt fahrzeugseitige Rollen führt. Der Stellmechanismus an Verzweigungen befindet sich zwar ortsfest in der Strecke, ist aber schnell und kann vom Fahrzeug bedient werden. Ein Beispiel hierfür ist der Tramway in Nancy.
- **Spurkabel**
Bei diesem System wird ein induktiver Leitdraht in die Fahrbahn verlegt und vergossen. Über eine fahrzeugseitig installierte Antenne wird die Position des Fahrzeugs bzw. die Abweichung von der vorgegebenen Fahrspur bestimmt. Die Lenkung erfolgt über die Drehzahldifferenz der Räder oder durch direkten Eingriff in die Lenkmechanik über einen Momentengeber. Dieses berührungslose System findet bereits vielfach Anwendung als „Fahrerloses Transportsystem“ (FTS) zum Materialtransport innerhalb und außerhalb von Gebäuden.
- **Optische Spurhaltung**
Bei diesem berührungslosen System orientieren sich optische Sensoren (Kameras) an Fahrbahnkanten oder -linien. Die Lenkung erfolgt über die Drehzahldifferenz der Räder oder durch direkten Eingriff in die Lenkmechanik über einen Momentengeber. Dieses System ist Bestandteil der bereits serienmäßig implementierten Spurhaltungsassistenten.

Für das Führen (Lenken) des Fahrzeugs können somit bestehende Systeme adaptiert werden, die in der Tabelle 54 vergleichend zusammengestellt sind.

Tabelle 54: Vergleich der Spurführungssysteme

Kriterium	Mechanische Systeme		Berührungslose Systeme	
	Spurbus	Tramway	induktiv	optisch
Genauigkeit	++	++	+	+
Verzweigung	--	-	++	++
Praxiserfahrung	++	+	+	+ ¹
Aufwand Strecke	--	-	++	++
Aufwand Fahrzeug	--	--	++	++

++ sehr günstig + günstig - ungünstig -- sehr ungünstig

¹ zunehmende Praxiserfahrung bei der Anwendung als Spurhaltungsassistent

Die wichtigsten Anforderungen an das Führungssystem, insbesondere

- minimale Toleranz bezüglich der Abweichung von der Solllinie und
- fahrzeugseitige individuelle Richtungswahl an Verzweigungen,

sind bestmöglich durch die beiden berührungslosen Systeme realisierbar.

Darüber hinaus ist zu prüfen, ob für den Straßenverkehr entwickelte Spurhaltungssysteme, die insbesondere auf einer optischen Sensorik basieren, für den Einsatz in Fahrrohrleitungen adaptiert werden können. Im Hinblick auf das autonome oberirdische Fahren im Anschlussverkehr auf der Straße ist diese Technik ohnehin erforderlich, so dass sie sich auch in der Fahrrohrleitung anbietet.

6.4.3 Längssteuerung

Ein wesentliches Merkmal von CargoCapVan im Modus U ist, dass die Fahrzeuge nicht nur vollkommen autonom fahren, sondern von Transportaufgabe zu Transportaufgabe geleitet werden müssen. Die entsprechende Disposition übernimmt ein Zentralrechner, der alle in den Stationen anstehenden Transportaufgaben sammelt. Gleichzeitig kennt er die den einzelnen Fahrzeugen bereits zugewiesenen Transportaufgaben und deren Erledigungszeitpunkt und Erledigungsort. Somit kann er die noch nicht einem Fahrzeug zugewiesenen Transportaufgaben optimal verteilen, wobei dringliche oder just-in-Time-Transporte kurzfristig integriert werden können. Die Informationen über weitere Transportaufgaben wird in den Stationen auf die Bordcomputer der Fahrzeuge übertragen. Damit kennt jedes Fahrzeug stets seinen anstehenden Fahrtverlauf (Fahrplan) als Zeit-Weg-Diagramm.

Die Fahrzeuge besitzen einen Bordcomputer, der zusätzlich zu den Aufgaben bei konventionellen Straßenfahrzeugen auch die Leitung bzw. das Routing des Fahrzeugs innerhalb der Fahrrohrleitung übernimmt. Da ein ausschließlich GPS-gestütztes Or-

tungssystem in den Fahrrohrleitungen mangels Kontakt zu den Satelliten nicht funktioniert, soll die exakte Positionsbestimmung mit optischen Komponenten (Kameras) erfolgen, die Markierungen an der Tunnelwand erkennen und auswerten. Dabei können die Markierungen aus Text und/oder Zahlen vorzugsweise in OCR-Schrifttypen bestehen, die auch vom Wartungspersonal gelesen und ausgewertet werden können.

Die Fahrzeuge lesen die Information beim Vorbeifahren und referenzieren ihre Position. Die Interpolation der Position zwischen den Markierungen wird über die Messung der Umdrehungen der Räder ermöglicht.

Die Abstandsregelung spielt bei der Betriebsabwicklung eine zentrale Rolle, da im vorliegenden Anwendungsfall grundsätzlich Fahrverbände aus mehreren Fahrzeugen gebildet werden, die abstandsgeregelt in engen Abständen hintereinanderfahren. Auf diese Weise können die aerodynamischen Vorteile der Verbandsfahrt ausgenutzt und der betriebliche Energieverbrauch weiter gesenkt werden. Im Sonderfall können die Fahrverbände (bei geringer Auslastung des Systems) aus einem Fahrzeug und bei hohem Güteraufkommen aus 10 oder 20 Fahrzeugen bestehen. Die maximal mögliche Länge hängt von der Qualität des Abstandsregelungssystems ab.

Die Abstandsregelung basiert nicht auf der globalen Positionsbestimmung, sondern auf einer kontinuierlichen lokalen Abstandsmessung zum vorausfahrenden Fahrzeug mittels Radar. Damit regelt jedes Fahrzeug den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug selbst. Bei der Unterschreitung eines Mindestabstandes wird eine Verzögerung, bei der Überschreitung eines Maximalabstandes eine Beschleunigung eingeleitet.

In zahlreichen Pkw und auch beim Sprinter werden bereits Abstandsassistenten verbaut, die den Abstand aktiv regeln. Diese Systeme können nahezu unverändert übernommen werden. Derzeit ist für den öffentlichen Straßenverkehr ein minimaler lichter Abstand zwischen den Fahrzeugen von einer Sekunde einstellbar. Aufgrund der günstigen Randbedingungen in der Rohrleitung (keine Gefahr für Menschen, keine Störer ...) kann der Abstand auf 0,7 Sekunden reduziert werden. Dies entspricht einem räumlichen Abstand von 7,00 m bei 36 km/h und knapp 10,00 m bei 50 km/h.

6.4.4 Systemwechsel zwischen Oberflächen- und Rohrleitungsbetrieb

6.4.4.1 Organisation des Systemwechsels

Im Gegensatz zum konventionellen CargoCap-System müssen die CargoCapVans zwischen dem öffentlichen Straßenverkehr und dem Betrieb in der Fahrrohrleitung wechseln.

Eine besondere Herausforderung an das Sicherheitskonzept ist der Wechsel vom Straßen- auf das Fahrrohrsystem, da sichergestellt werden muss, dass sich keine Personen mehr im Fahrzeug befinden. Dies gilt nicht nur für den Fahrer und ggf. den Beifahrer, sondern auch für eventuell unbemerkt im Frachtraum mitfahrende Personen. Eine Mitfahrt im Fahrzeug durch die Fahrrohrleitungen ist sicherheitstechnisch nicht realisierbar und wird deshalb nicht zugelassen. Der entscheidende Unterschied zwischen dem automatisierten Fahren auf der Straße und in der Rohrleitung besteht somit darin, dass im Modus O sich derzeit noch ein Fahrer auf dem Fahrzeug befinden muss, im Modus U sich keine Person auf dem Fahrzeug befinden darf.

Da kein automatisches System zur Erkennung von Menschen in den Fahrzeugen existiert, muss der Fahrer die Verantwortung übernehmen und bestätigen, dass sich niemand mehr im Fahrzeug befindet.

In einer fortgeschrittenen Projektphase nach einer längeren unfallfreien Betriebsphase könnte ein Nachweisverfahren initiiert werden, das aussagt, dass der Verbleib des Fahrers im Fahrzeug mindestens die gleiche Sicherheit erreicht, wie das Fahren auf der öffentlichen Straße. Dabei wären die mangelnden Flucht- und Rettungsmöglichkeiten für die Fahrer in der Rohrleitung dem höheren Unfallrisiko auf der öffentlichen Straße gegenüberzustellen. Gelingt dieser Nachweis, besteht eine Chance für eine Zulassung des Verbleibs des Fahrers während der Fahrt in der Rohrleitung. Dies würde die organisatorische Abwicklung des Betriebs erheblich vereinfachen.

Da die Fahrzeuge sowohl fahrerlos durch die Rohrleitungen geschickt werden (Modus U) als auch oberirdisch am öffentlichen Straßenverkehr teilnehmen (Modus O) sollen, sind die folgenden Maßnahmen für den Systemwechsel erforderlich:

- Errichtung baulicher Anlagen, mit denen die Fahrzeuge den Höhenunterschied zwischen dem Niveau der Straße und dem Niveau der Fahrbahn in der Rohrleitung überwinden können
- Entwicklung von Verfahren für den Wechsel zwischen Spurführung und Handsteuerung
- Entwicklung von Verfahren zur Steuerung des Betriebsablaufs

Wenn in Zukunft das autonome Fahren auf der Straße ohne Fahrer mit Eingriffsmöglichkeit an Bord technisch möglich und gesetzlich erlaubt sein sollte, wäre der Wechsel vom unterirdischen zum oberirdischen Verkehr und umgekehrt übergangsfrei ohne die oben genannten Systemwechselmaßnahmen möglich.

6.4.4.2 Bauliche Anlagen

Für den Wechsel der Fahrzeuge vom Straßenniveau auf die Tiefenlage der Fahrrohrleitung und umgekehrt stehen prinzipiell zwei Varianten zur Verfügung:

- Selbstfahrend über eine Rampe
- Passiv über einen Vertikalförderer (Aufzug)

Rampe

Je nach Größe der Längsneigung der Fahrbahn, die von der Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge und insbesondere von der zulässigen Neigung des Ladegutes sowie von der Tiefenlage der Rohrleitung abhängt, hat eine Rampe einen erheblichen Platzbedarf, der bei bidirektionalem Betrieb bei einer Grundfläche von ungefähr 8 x 30 m liegt. Der Vorteil einer Rampe liegt in der hohen Leistungsfähigkeit, die nicht niedriger ist als in der Fahrrohrleitung selbst.

Rampen dieser Art stellen häufig bei modernen Einkaufszentren die Zufahrt zum unterirdischen Anliefer- und Abholbereich her.



Abbildung 49: Rampe zum unterirdischen Anliefer- und Abholbereich des Einkaufszentrums Limbecker Platz in Essen

Die Fahrbahn der Rampe selbst kann, wie in der Abbildung 49 gezeigt, noch zum Straßenraum mit bemannten Fahrzeugen (Modus O) gehören, wobei der Systemwechsel unterirdisch vorgenommen werden muss. Alternativ kann der Systemwechsel oberirdisch erfolgen und die Fahrzeuge nutzen die Rampe bereits im automatischen Modus U. Bei der zweiten Variante kann die Rampe mit engeren Fahrspuren schmaler konstruiert werden, was Fläche und Kosten spart.

Die Rampe bietet sich für Stationen mit einem hohen Warenaustausch an, insbesondere am GVZ, wo die geplante Doppelspur als bidirektional befahrbare Rampe ausgebildet werden kann. Auch bei den Industriegebieten West und Zinkhütte sind Rampen eine günstige Alternative zu einer großen unterirdischen Station, weil dort die beste-

hende Fördertechnik zwischen Straßenfahrzeug und innerbetrieblicher Fördertechnik weiter genutzt werden kann und keine große Umrüstung erforderlich ist.

Aufzug

Eine Alternative zu den Ein- und Ausfahrten des Rohrleitungssystems besteht in der Herstellung eines Schachtbauwerks mit einem integrierten Aufzug.

Der Platzbedarf für einen Vertikalförderer beschränkt sich auf einen Schachtdurchmesser von voraussichtlich 7,0 m und einem eventuell zusätzlich erforderlichen Wartebereich. Allerdings ist die Leistungsfähigkeit von Vertikalförderern in Abhängigkeit von der Förderhöhe stark begrenzt, so dass sich ihr Einsatz auch bei einer Anordnung mehrerer Aufzüge nebeneinander auf weniger frequentierte Systemwechselstellen begrenzt.

Wenn nur ein Fahrzeug pro Takt behandelt werden muss, reicht die Herstellung eines Schachtbauwerks mit einem Innendurchmesser von ca. 7,00 m, in den zwei Hub-Plattformen eingebaut werden (Abbildung 50). Die obere Plattform muss das Fahrzeug vom Niveau der Fahrbahn in der Rohrleitung bis auf die Geländeoberfläche befördern, so dass der Aufzug als Seilzugförderer mit Gegengewicht ausgelegt werden muss. Die untere Plattform hat lediglich eine geringe Hubhöhe mit geringer Last, so dass hier Hydraulikzylinder ausreichen. Der Ablauf einer Ausschleusung ist in der Abbildung 51 dargestellt. Die Einschleusung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

Bei der Aufzugsvariante erfolgt der Systemwechsel grundsätzlich oberirdisch, vorzugsweise direkt auf der Aufzugsplattform.

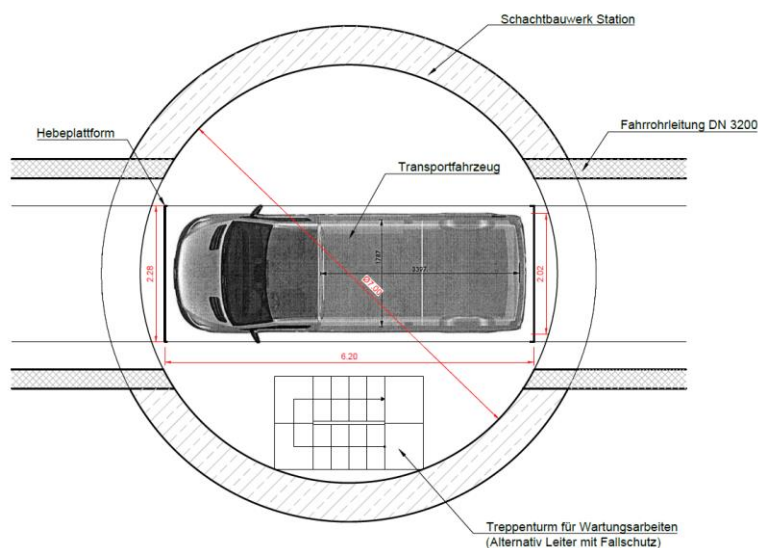


Abbildung 50: Grundriss für einen Ein- und Ausschleusungspunkt der einfachsten Bauart mit einem auf die Rohrleitung aufgesetzten Schachtbauwerk

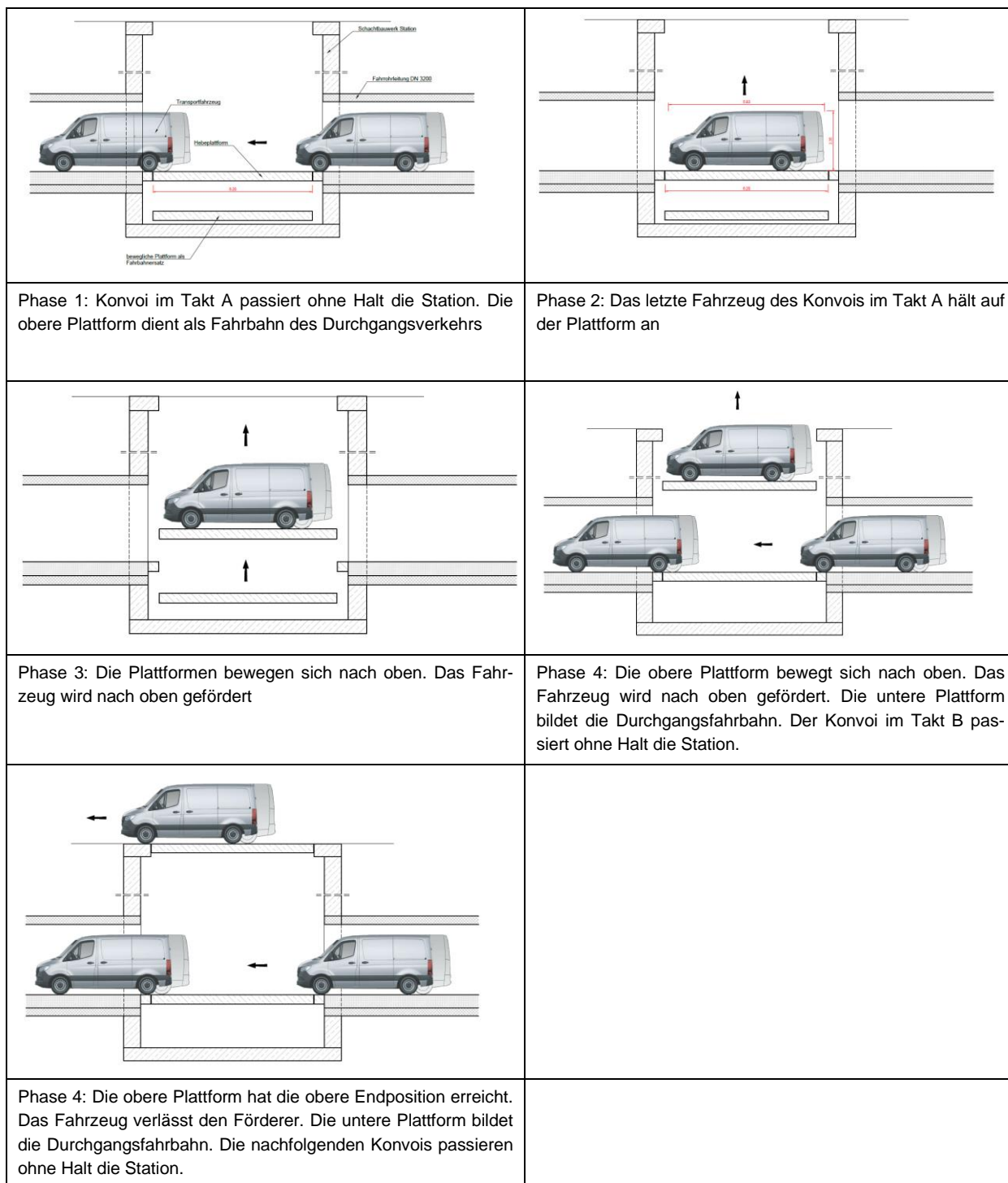


Abbildung 51: Ablauf der Ausschleusung eines Fahrzeugs an einem Ein- und Ausschleusungspunkt

In der Tabelle 55 sind die Vor- und Nachteile von Rampen und Aufzügen im Vergleich dargestellt.

Tabelle 55: Vor- und Nachteile von Rampen und Aufzügen im Vergleich

	Rampe	Aufzug
Kapazität / Durchsatz	Volle Kapazität der Rohrleitung	Ein Fahrzeug pro ca. 4 Minuten
Platzbedarf	Hoch	Sehr gering, beschränkt auf Fahrzeuggröße
Baulicher Aufwand	Hoch	Niedrig

Die Station mit einem Aufzug wird als Standardstation des CargoCapVan-Systems bezeichnet.

Die einzelnen Fahrzeuge werden an den Stationen entsprechend Abbildung 51 aus dem Fahrverband ausgeschleust. Die Sperrpause für durch die Station durchfahrende Konvois beträgt gerade einmal 17 s und ist somit nicht maßgebend für den Abstand der Konvois untereinander (Tabelle 56).

Tabelle 56: Sperrpause für das Ausschleusen eines Vans per Aufzug

Vorgang	Dauer
Ausschleusen (17 s)	
Einfahrt 4 m à 1m/s	4 s
1m Schleichfahrt mit 0,1m/s zum Positionieren	10 s
Hub um 3 m mit 0,3 m/s	10 s

Die Tabelle 57 zeigt die Gesamtdauer des Ein- und Ausschleusens eines Fahrzeuges

Tabelle 57: Zyklus des Ent- und Beladens eines Vans an der Standardstation (Aufzug)

Vorgang	Dauer
Ausschleusen (58 s)	
Einfahrt in der Fahrrohr. 4 m à 1m/s	4 s
1m Schleichfahrt mit 0,1m/s zum Positionieren	10 s
Hub des Vertikalförderers mit 0,3 m/s	33 s
Vorrücken des Vans um 4 m mit 1 m/s	4 s
Reserve	7 s
Einschleusen (58 s)	
Einfahrt auf der GOK. 4 m à 1m/s	4 s
1m Schleichfahrt mit 0,1m/s zum Positionieren	10 s
Hub des Vertikalförderers mit 0,3 m/s	33 s
Vorrücken des Vans um 4 m mit 1 m/s	4 s
Reserve	7 s
Beladen (37 s)	
Transport des/der Behälter(s) ins Cap (3m à 0,3m/s)	30 s
Reserve	7 s
Aufenthaltsdauer gesamt	153 s

6.4.4.3 Einfädelung in die Spurführung

Die Zweisystemfahrzeuge des CargoCapVan-Systems müssen in der Lage sein, zwischen dem Modus O (oberirdisch im öffentlichen Straßenraum mit Fahrer) und dem Modus U (unterirdisch in der Fahrrohrleitung ohne Fahrer) in beide Richtungen zu wechseln.

Modus U → Modus O:

Der Wechsel vom Modus U in den Modus O gestaltet sich recht einfach. Das Fahrzeug wird am Ende des automatischen Bereichs beispielsweise mit einer Ampel angehalten. Der Fahrer kann danach einsteigen, auf den Modus O umschalten und die Steuerung übernehmen.

Modus O → Modus U:

Vor dem Wechsel vom Modus O in den Modus U muss der Fahrer das Fahrzeug zunächst in die Spurführung einfädeln. Bei den mechanischen Spurführungssystemen ist in der Regel eine trichterförmige Einspurungshilfe vorgesehen. Die Abbildung 52 zeigt die entsprechenden Vorrichtungen beim Spurbus in Essen (links) und beim Tramway in Nancy (rechts). In der täglichen Praxis haben die Fahrer nach einer Schulungs- und Eingewöhnungsphase keine Probleme, die Einspurung während der Fahrt für die Fahrgäste kaum wahrnehmbar durchzuführen.



Abbildung 52: Trichterförmige Einfädelung bei den mechanischen Spurführungssystemen: Wechsel von Handlenkung auf Spurführung beim Spurbus in Essen (links) und beim Tramway in Nancy (rechts)

Bei den kontaktlosen Spurführungssystemen muss der Fahrer das Fahrzeug in einen Bereich steuern, in dem sich die Spurkabel bzw. die Leitkanten in der Reichweite der fahrerseitigen Sensorik befinden. Dies kann mit einseitigen Radführungen gewährleistet werden, die beispielsweise bei Waschstraßen zur Anwendung kommen. Ist das Fahrzeug vom Spurführungssystem eingefangen, wird dies dem Fahrer beispielsweise per Kontrollleuchte bestätigt. Nun muss er das Fahrzeug verlassen und draußen bestätigen, dass sich kein Mensch mehr im Fahrzeug befindet. Danach befindet sich das Fahrzeug im Modus U.

6.4.4.4 Betriebsablauf und Konvoibildung

Die Zweisystemfahrzeuge für das CargoCapVan-System werden über Rampen oder Aufzüge in die Fahrrohrleitung eingeschleust. Nachdem der Fahrer das Fahrzeug verlassen hat und die automatische Längs- und Querregelung aktiviert ist, kann jedes Fahrzeug analog zum Straßenverkehr ganz individuell durch die Fahrrohrleitung fahren. Allerdings ist es aus den folgenden Gründen zweckmäßiger, zunächst mehrere Fahrzeuge zu sammeln und in einem festgelegten Takt ein Konvoi aus mehreren Fahrzeugen in die Rohrleitung zu schicken:

- **Luftwiderstand**

Da der Querschnitt des Fahrzeugs einen großen Anteil des Rohrleitungsquerschnitts ausfüllt, ist der aerodynamische Versperrungsgrad sehr groß. Dadurch schiebt das Fahrzeug eine Luftsäule vor sich her und zieht eine weitere Luftsäule hinter sich her. Das Fahrzeug wirkt wie ein Kolben in einem Zylinder. Dieser energieverzehrende Effekt für das Einzelfahrzeug wird durch eine Konvoibildung mit möglichst vielen Fahrzeugen gemildert (Windschatteneffekt).

- **Betriebsablauf**

Um die Kosten für die Infrastruktur niedrig zu halten, können Aus- und Einschleusungen (z.B. per Aufzug) oder sogar unterirdische Be- und Entladevorgänge auch in der Durchgangsspur erfolgen, da eine Nebenspur in einer parallelen Rohrleitung erhebliche zusätzliche Baukosten erzeugen würde. Voraussetzung ist allerdings eine entsprechende Betriebspause von mehreren Minuten, die bei getakteten Konvoifahrten selbst bei hoher Auslastung realisiert werden kann.

Die Konvoibildung an einer stark frequentierten Einschleusungsstation kann mit bereits betriebsfähigen Elementen der Fahrzeugsensorik realisiert werden. Benötigt wird der ohnehin installierte Abstandssensor mit Ausrichtung in Fahrtrichtung, ein identischer Sensor mit Ausrichtung senkrecht zur Fahrtrichtung und ein Ampelmodul.

Die Taktung der Konvois muss mit der Ladedauer an den Zwischenstationen und der Ausschleusungsdauer an den Fahrzeughebern (Aufzüge) abgestimmt sein. Die Reihenfolge der Aufstellung der Fahrzeuge an der Startposition entspricht der umgekehrten Reihenfolge der angefahrenen Stationen. Für jede Station ist genau die Anzahl Startplätze reserviert, die der Anzahl der Andockstellen bzw. der Aufzüge entspricht. Die Taktzeit ist somit bei jedem System individuell zu ermitteln.

Die Planung des Betriebsablaufs inkl. der Berechnung der erforderlichen Fahrzeuganzahl kann analog zum konventionellen CargoCap-System erfolgen (s. Abschnitt 3.4).

6.4.5 Unterirdische Stationen, automatische Be- und Entladung der Fahrzeuge

Wenn die Station ohnehin über eine unterirdische Güterumschlaganlage verfügt, wie sie bereits heute bei zahlreichen Einkaufszentren realisiert ist, kann das CargoCapVan-Fahrzeug auf seiner unterirdischen Ebene bleiben und sich an den dort vorgesehenen Güterumschlag anpassen.

Da die Fahrzeuge des CargoCapVan-Systems auch als konventionelle Straßenfahrzeuge nutzbar sind, können sie in konventioneller Vorgehensweise be- und entladen werden. Dazu sind natürlich keine stationären oder fahrzeugseitigen Zusatzeinrichtungen erforderlich.

Insbesondere in Innenstädten, Einkaufszentren oder auch bei produzierenden Betrieben ist die zur Verfügung stehende oberirdische Fläche rar und wertvoll, so dass eine attraktive Alternative darin besteht, die Fahrzeuge unterirdisch zu be- und entladen.

Unter der Voraussetzung, dass die Fahrzeuge stets mit Ladungsträgern mit den Abmessungen einer Europalette beladen werden, kann das Grundkonzept einer unterirdischen Station entsprechend dem konventionellen CargoCap-System (Abbildung 26) gestaltet werden. Die Grundstation ist modular aufgebaut und entsprechend der individuellen Gütermengen der Station skalierbar. Im Idealfall liefert die stationäre Förder-technik die Paletten direkt an den Zielpunkt.

Die Be- und Entladung des Sprinters kann dabei grundsätzlich durch die Seiten- oder Hecktüren erfolgen. Im Sinne einer Aufwandsminimierung für die Fördertechnik werden die Paletten im Fahrzeug nicht unterschiedlich orientiert sein, so dass der *Sprinter Standard* drei querstehende Paletten mit relativ viel Platz dazwischen laden kann (Abbildung 53).

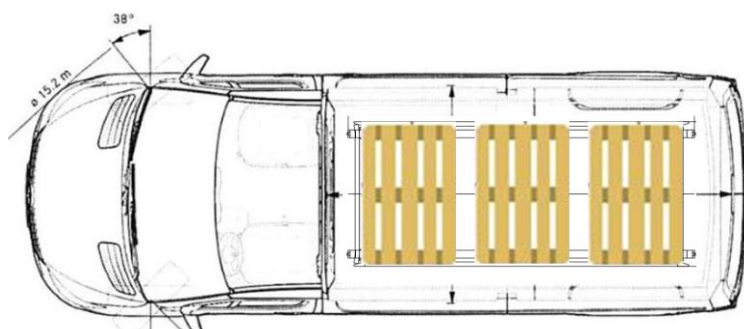


Abbildung 53: Anordnung der Paletten im Sprinter bei automatischer Be- und Entladung

Beladung durch die Hecktüröffnung

Wenn der Ladevorgang durch die Hecktür erfolgen soll, muss das Fahrzeug nach der Ankunft in der Station zunächst um 90° gedreht werden. Eine stationäre Teleskopgabel außerhalb des Fahrzeugs könnte Euro-Paletten bis zum einem Gewicht von ca. 700 kg 3-fach tief (bis zu den Lehnen des Fahrersitzes) aus dem Fahrzeug entnehmen bzw. im Fahrzeug platzieren. Die Paletten würden auf einem Stahlgestell im Fahrzeug (Höhe ca. 230 mm) stehen. Unter Berücksichtigung der Durchbiegung der Gabel von ca. 120 mm und von einem Höhenzuschlag fürs Anheben ergäbe sich eine Palettenladehöhe von 1,30 m.

Vorteile der Be- und Entladung von hinten:

- Geringe Mehrkosten pro Fahrzeug
- Durch einen Hub der Teleskopgabel entsteht eine flexible Standardlösung für unterschiedliche Fördertechnikhöhen weitestgehend unabhängig vom eingesetzten Fahrzeug
- Kosten sind unabhängig von der eingesetzten Fahrzeuganzahl

Nachteile der Be- und Entladung von hinten:

- Lange Ladezeiten
- Drehen des Fahrzeugs erforderlich

Da das Drehen des Fahrzeugs zum einen die Ladedauer maßgeblich verlängert und zum anderen die Kosten für eine unterirdische Drehscheibe erheblich sind, wird die Heckbeladung nicht weiter verfolgt.

Beladung durch die Seitentüröffnung

Bei einer Beladung durch die Seitentüröffnung können die Paletten von der stationären Fördereinrichtung nur an einer Stelle im Fahrzeug, und zwar unmittelbar neben der Tür platziert werden. Um eine zweite und dritte Palette zu laden, muss eine Fördereinrichtung im Fahrzeug installiert werden, die die Palette von der vordersten Position auf die hintere oder mittlere Position in Fahrzeuginnenrichtung verschiebt.

Da bei einer Be- und Entladung der Fahrzeuge durch die Seitentüröffnungen das Drehen des Fahrzeugs entfällt, wird diese Ladetechnik favorisiert.

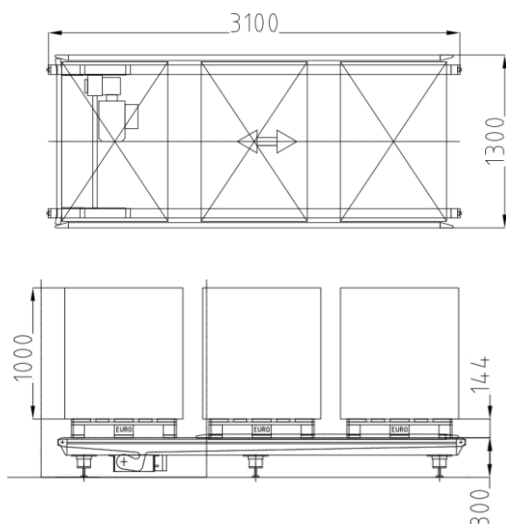


Abbildung 54: Fahrzeugeigener Kettenförderer in der Draufsicht (oben) und in der Seitenansicht (unten)

Der im Fahrzeug zu installierende Horizontalförderer ist als Ketten- oder als Rollenförderer ausführbar. Im Vergleich ist der Rollenförderer ca. 20% teurer und mit einem Gewicht von 275 kg deutlich schwerer als der 170 kg schwere Kettenförderer. Er ermöglicht aber durch seine geringe Bauhöhe eine deutlich größere Palettenladehöhe. In der Abbildung 54 ist der **Kettenförderer** in der Draufsicht und in der Seitenansicht dargestellt. Die bei diesem System maximal mögliche Palettenladehöhe von 1.144 mm erreicht nicht das genormte Maß EUL 1 = 1.200 mm. Aus diesem Grunde wird die alternative Ausstattung des Fahrzeugs mit einem Rollenförderer favorisiert.

Mit einem im Fahrzeug fest installierten **Rollenförderer** ist eine Palettenladehöhe von 1.260 mm realisierbar, womit die standardisierten Ladehöhen CCG I (1.050 mm) und EUL I (1200 mm) automatisch in den Sprinter geladen werden können (Abbildung 55).

Für beide fahrzeugseitigen Fördersysteme ist eine Teleskopgabel erforderlich, die die an der Seitentür stehende Palette anhebt und auf die Stationsfördertechnik absetzt (Abbildung 56).

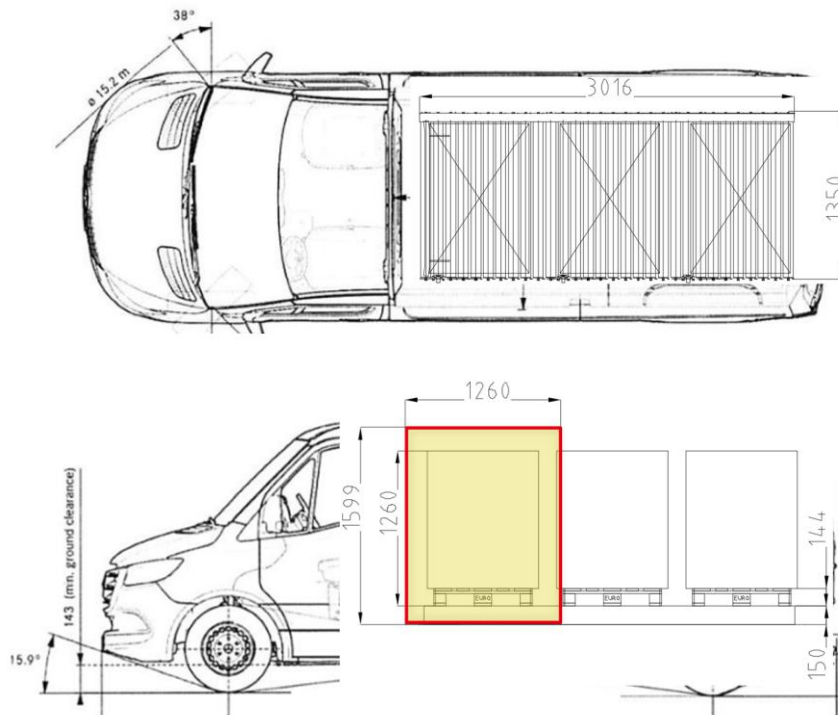


Abbildung 55: Sprinter mit Rollenförderer und drei automatisch verladenen Paletten, Draufsicht (oben) und Seitenansicht (unten) mit Seitentüröffnung (gelb hinterlegt)

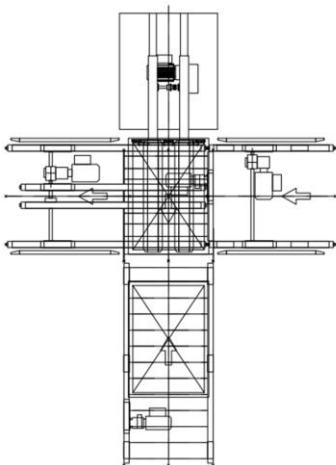


Abbildung 56: Teleskopgabel als zusätzliche Komponente der lokalen Stationsfördertechnik

Die Zykluszeit für eine Palette beträgt 40 Sekunden, für die vollständige Be- und Entladung von drei Paletten zwei Minuten.

Die Fördertechnik im Fahrzeug und in der Station wurde von der SSI Schäfer Fritz Schäfer GmbH aus Neunkirchen/Siegerland konstruiert.

6.5 Zusammenstellung der zusätzlichen Komponenten am Fahrzeug

In der Tabelle 58 sind die für den *Sprinter Standard* (als Basisfahrzeug) im vorliegenden Anwendungsfall zusätzlich erforderlichen Komponenten mit ihren Funktionalitäten zusammengestellt. Dabei werden je nach den gewünschten Anforderungen unterschiedliche Ausstattungsstufen unterschieden. Die hinterlegten Farben finden sich in den Abbildungen wieder, um die entsprechende Zuordnung zu ermöglichen.

Tabelle 58: Erforderliche Komponenten am Fahrzeug

Funktion	Komponente	Anmerkung
Ausstattungsstufe 1: Unbedingt erforderliche Komponenten für die Fahrt durch die Rohrleitung		
Emissionsfreier Antrieb	E/E-Architektur STAR2.5	Elektrischer Antrieb für den Betrieb in der Rohrleitung
Quersteuerung (Spurführung)	Elektronisches Spurführungssystem mit Antennenpaar für den Empfang der induktiv übermittelten Frequenzen aus dem Spurkabel oder mit Kameras zur optischen Erfassung der Leitlinien sowie Momentengeber für die Lenkung	Praxiserprobte Spurführung mit einer Genauigkeit von ± 20 mm, Richtungswahl des Fahrzeugs an Verzeigungen Optische Systeme können an die Anforderungen angepasst werden.
Längssteuerung (Abstandshaltung)	DISTRONIC	Automatische Regelung eines zeitlich konstanten Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug (0,7 Sekunden)
Ausstattungsstufe 2: Über Ausstattungsstufe 1 hinausgehende zusätzliche Komponenten zur Übermittlung von Fahrbefehlen von außen und zur Konvoibildung:		
Übermittlung der Befehle „Abfahren“ und „Anhalten“ an das Fahrzeug	Ampelmodul	Erkennung der Ampelstellungen rot und grün, automatisches Anfahren und Anhalten
Konvoibildung gemäß Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	Seiten-Nahbereichsradar	Erkennung, ob ein weiteres Fahrzeug in der Nachbarbox steht
Ausstattungsstufe 3: Über Ausstattungsstufe 2 hinausgehende zusätzliche Komponenten für die automatische Beladung		
Automatisches Öffnen und Schließen der Seitentür	Elektrisch angetriebene Seitentür	
Verschieben der Paletten innerhalb des Fahrzeugs	Im Fahrzeug installierter Rollen- oder Kettenförderer	Verschieben der Paletten von der Absetzposition der stationären Fördertechnik zur endgültigen Position im Fahrzeug für die Fahrt (und umgekehrt)

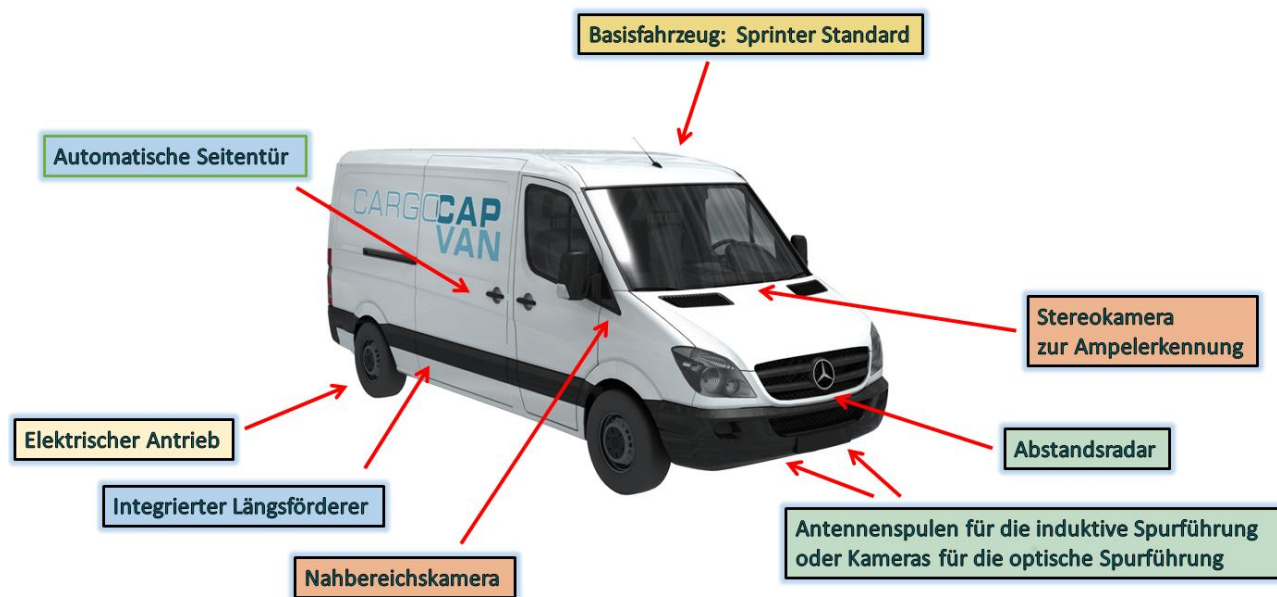


Abbildung 57

Zusätzliche Komponenten für den Einsatz als CargoCap Van

Bedeutung der hinterlegten Farben:

Grundausstattung

Ausstattungsstufe 1:

Unbedingt erforderliche Komponenten für die Fahrt durch die Rohrleitung

Ausstattungsstufe 2:

Über Ausstattungsstufe 1 hinausgehende zusätzliche Komponenten zur Übermittlung von Fahrbefehlen von außen und zur Konvoibildung:

Ausstattungsstufe 3:

Über Ausstattungsstufe 2 hinausgehende zusätzliche Komponenten für die automatische Beladung

6.6 Komponenten der Fahrrohrleitung

In der Tabelle 59 sind die Komponenten der Rohrleitung mit ihren Funktionalitäten zusammengestellt, die für den Betrieb des Sprinters erforderlich sind. Die Abbildung 58 zeigt die Anordnung der Komponenten im aufgeschnittenen Rohrleitungsquerschnitt.

Tabelle 59: Erforderliche Komponenten der Rohrleitung

Funktion	Komponente	Anmerkung
Statisch tragendes Bauwerk	Fahrrohr	Werksmäßig hergestelltes Rohr aus Stahlbeton
Fahrbahn für die Vans	Fahrbahn	Örtlich hergestellte Betonfüllung mit konstruktiver Bewehrung
Spurführung	Spurkabel oder optische Leitlinien	Oberflächennah und mittig in der Fahrbahn integriertes Kabel, das mit schwachem Wechselstrom unterschiedlicher Frequenzen gespeist wird, oder Leitlinien auf der Fahrbahn bzw. am Rohr
Referenzierung der Fahrzeugposition	Positionsmarkierungen an der Rohrleitungswand	Positionsmarkierung mit lesbarer Beschriftung. Zur besseren Erkennbarkeit durch die optischen Sensoren wird OCR-Schrift verwendet.

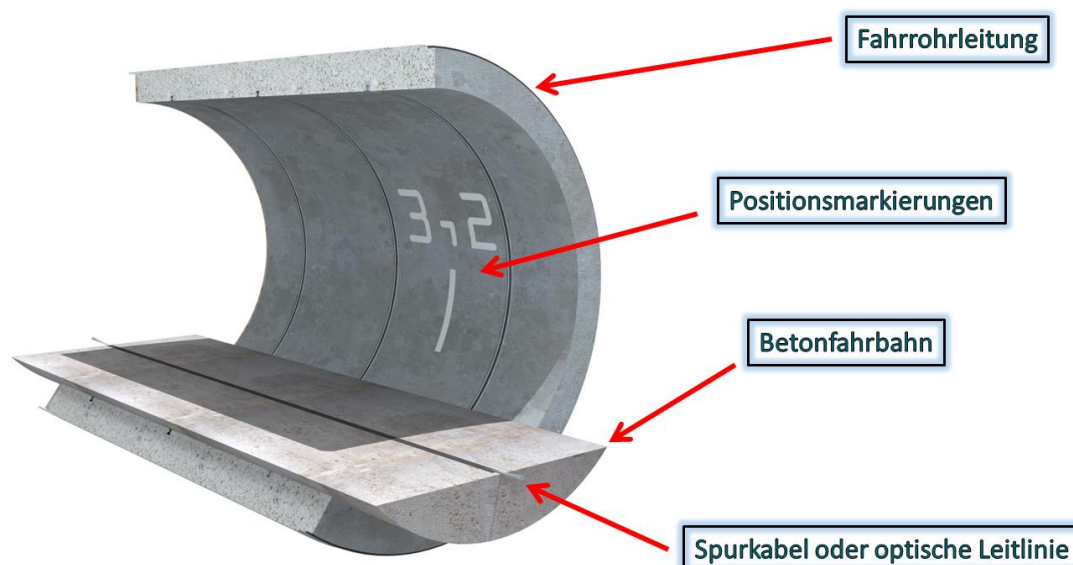


Abbildung 58: Komponenten der Fahrrohrleitung für das CargoCapVan-System

6.7 Schätzung der Investitions- und Betriebskosten für das CargoCapVan-System im Vergleich zum konventionellen CargoCap-System

6.7.1 Allgemeines

Die maßgebenden Anteile der Investitionskosten setzen sich auch beim CargoCapVan-System aus den nachfolgend genannten Hauptteileleistungen zusammen:

- e) Rohbau (Strecken, Stationen und Rampen)
- f) Innenausbau (Strecken und Stationen)
- g) Fahrzeuge (Vans)
- h) Programmierung (Betriebsleitsystem und Bordsoftware)

6.7.2 Rohbau

Für das CargoCapVan-System werden Fahrrohrleitungen mit einem Innendurchmesser von 3.200 mm benötigt (s. Abbildung 47).

Kosten für die Stationsanschlüsse entfallen, da die Vans nach dem Ausschleusen selbständig an die Rampe fahren können.

Eine Zusammenstellung der Rohbaukosten für die Hauptstrecke enthält Tabelle 60.

Tabelle 60: Zusammenstellung der Rohbaukosten nur Hauptstrecke (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten	Länge Anz.	Kosten
	DN 3200		DN 3200
Rohbau Strecke einspurig	5.600,00 EUR/m	6.900 m	38,6 Mio. EUR
Rohbau Strecke doppel-spurig	10.000,00 EUR/m	1.000 m	10,0 Mio. EUR
Rohbau Verkehrs-stationsmodul	150.000,00 EUR/Stück	18 Stck.	2,7 Mio. EUR
Rohbau Betriebs-stationsmodul	280.600,00 EUR/Stück	6 Stck.	1,7 Mio. EUR
Summe			55,1 Mio. EUR
6% Nebenkosten			3,3 Mio. EUR
Gesamtkosten			58,4 Mio. EUR

6.7.3 Innenausbau und technische Ausstattung

Neben den Rohbaukosten fallen Investitionskosten für den Innenausbau der Rohre und die technische Ausstattung der Stationen an, die beim CargoCapVan-System deutlich niedriger liegen als beim konventionellen CargoCap-System.

Die Tabelle 61 beinhaltet eine Zusammenstellung der Kosten für die Einbauten in den Rohren und für die Fördertechnik in den Verkehrsstationen auf der Hauptstrecke.

Tabelle 61: Zusammenstellung der Kosten für die Einbauten in den Rohren und für die Fördertechnik in den Verkehrsstationen auf der Hauptstrecke (Grobkosten-Schätzung)

Gewerk	Einheitskosten	Länge Anz.	Kosten
	DN 3200		DN 3200
Innenausbau Strecke einspurig	200,00 EUR/m	6.900 m	1,38 Mio. EUR
Innenausbau Strecke doppelspurig	400,00 EUR/m	1.000 m	0,40 Mio. EUR
Fördertechnik Verkehrs- stationsmodul	125.000,00 EUR/Stück	18 Stck.	2,25 Mio. EUR
Innenausbau Betriebs- stationsmodul	In den Streckenkosten enthal- ten		0,0 Mio. EUR
Summe			4,0 Mio. EUR
6% Nebenkosten			0,3 Mio. EUR
Gesamtkosten			4,3 Mio. EUR

6.7.4 Fahrzeuge

Zu den Investitionskosten gehört die Anschaffung der Fahrzeuge (Vans) unter Berücksichtigung der Entwicklungskosten für die zusätzlich erforderliche Sensorik. Die Sprinter können drei Paletten laden, eine mehr als das Standard-CargoCap-Fahrzeug. Dafür ist allerdings die Beladungshöhe der Paletten auf 1,20 m begrenzt, so dass im Mittel davon ausgegangen werden kann, dass die erforderliche Anzahl Sprinter derjenigen der Caps entspricht. Da es sich um ein Serienfahrzeug handelt, kann die Anzahl der Reservefahrzeuge gegenüber den Caps auf 10% herabgesetzt werden.

Tabelle 62: Kosten für die Fahrzeuge

Kostenart	Hauptstrecke
Entwicklungskosten Sensorik (einmalig)	0,1 Mio EUR
Herstellkosten Serie	55.000,00 EUR/VAN
Betrieblich erforderliche Anz. Vans	247
Reserve	10%
Insgesamt erforderliche Anzahl Vans	272
Gesamtkosten für die Vans	15,1 Mio. EUR

6.7.5 Softwareentwicklung

Für die Entwicklung der Software für das Betriebsleitsystem und für die Bordcomputer werden pauschal 10,0 Mio. EUR veranschlagt. Dies ist unverändert zum konventionellen CargoCap-System.

6.7.6 Zusammenfassung der Investitionskosten

In der Tabelle 63 sind die gesamten Investitionskosten zusammengestellt.

Tabelle 63: Zusammenstellung der gesamten Investitionskosten

	Investitionskosten
Rohbau	58,4 Mio. EUR
Innenausbau/Fördertechnik	4,3 Mio. EUR
Vans	15,1 Mio. EUR
Softwareentwicklung	10,0 Mio. EUR
Gesamte Investitionskosten	87,8 Mio. EUR

6.7.7 Energie

Der Energieverbrauch für den e-Sprinter beträgt 37 kWh pro 100 km, wobei für eine kWh 35 Cent gezahlt werden muss, da die Verwendung von Industriestrom unzulässig ist.

6.7.8 Wartung

Für die Wartungskosten liegen noch keine umfangreichen Erfahrungswerte vor. Sie liegen ca. 70% unter denjenigen des konventionellen Sprinters mit Verbrennungsmotor.

6.8 Ergebnis

Als Alternative zum konventionellen CargoCap-System wurde zusätzlich eine Variante untersucht, bei der die speziellen CargoCap-Fahrzeuge, die Caps, durch serienmäßig hergestellte Straßenfahrzeuge mit elektrischem Antrieb ersetzt werden und die als CargoCapVan-System bezeichnet wird. Durch die rasanten Entwicklungen der Automobilindustrie im Rahmen des „autonomen Fahrens“ sind zahlreiche Elemente der für einen automatischen, unterirdischen Betrieb in Fahrrohrleitungen erforderlichen Sensorik (Assistenzsysteme zur Spurhaltung, zur Abstandsregelung und zur Reaktion auf äußere Signale (beispielsweise Lichtzeichenanlagen)) bereits in Serienfahrzeugen vorhanden und lassen eine Perfektionierung in den nächsten Jahren erwarten. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde der Transporter des Typs eSprinter der Daimler Benz AG ausgewählt.

Seitens der Gesetzgebung bestehen Bemühungen, das autonome Fahren ohne einen Fahrer mit Eingriffsmöglichkeit an Bord im Straßenverkehr zu erlauben. Rechtlich in Deutschland ungelöst ist der Tatbestand, wenn einem Menschen durch ein autonomes Fahrzeug ein körperlicher Schaden zugeführt wird. Beim automatisierten, unterirdischen Warentransport kann dieses Problem außer Acht gelassen werden, da sich keine Person im Gefahrenbereich (in der Fahrrohrleitung) befinden dürfen.

Gegenüber den schienengeführten Caps des konventionellen CargoCap-Systems sind mit dem CargoCap-Van-System folgende Vorteile verbunden:

- Die Fahrzeuge sind schon existent und bedürfen lediglich zusätzlicher Komponenten.
- Die Wartung erfolgt in konventionellen Fachwerkstätten.
- Öffentliche Batterieladestationen können genutzt werden.
- Die Fahrzeuge können auch den automatisierten Betriebshof nutzen.

Der entscheidende Vorteil besteht aber darin, dass die Fahrzeuge sowohl unterirdisch durch die Fahrrohre als auch oberirdisch im öffentlichen Straßenverkehr fahren können. Dies eröffnet eine recht große Freizügigkeit des Einsatzes, insbesondere in der Migrationsphase.

Mit dem CargoCapVan-System lassen sich verschiedene Ausbaustufen von CargoCap in Bergisch Gladbach feiner abstufen und so die Migration des Systems deutlich erleichtern. So kann beispielsweise bereits die Hauptstrecke etappenweise in Betrieb genommen werden.

Der eSprinter als Standardfahrzeug des CargoCapVan-Systems stellt einige veränderte Anforderungen an die Infrastruktur, die sich im Wesentlichen auf die folgenden Komponenten beziehen:

- Der Durchmesser der Fahrrohrleitung muss von 2,2 m bzw. 3,0 m auf 3,2 m vergrößert werden. Das Bauverfahren des Rohrvortriebs kann aber beibehalten werden.
- Das Schienensystem zum Tragen und Führen der Caps wird durch eine einfache ebene Fahrbahn ersetzt, in deren Mitte ein einfaches Kabel integriert ist, an dem sich die Spurführungssensoren des Fahrzeugs orientieren.
- Die Fördertechnik in den Stationen kann analog zum CargoCap-System ausgeführt werden. Alternativ dazu können aber auch Rampen oder Aufzüge vorgesehen werden, die das komplette Fahrzeug an die Oberfläche bringen.
- Die Energiezuführung im Fahrrohrleitungsnetz entfällt durch den Batteriebetrieb.

Die Linienführung der CargoCap-Strecken und das Betriebskonzept mit einem Taktverkehr und Konvoibildung auf einspurigen Strecken mit Doppelspurabschnitten bedürfen keiner Anpassung.

Die Ladungshöhe der Paletten beschränkt sich im Sprinter auf $\leq 1,20$ m (EUL 1 bzw. CCG I). Dafür können aber jeweils drei Paletten mit dem Grundmaßen $B \times L = 0,8 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ geladen werden. Dabei muss in Kauf genommen werden, dass nicht alle heute üblichen Paletten transportiert werden können und eine Umstellung in den Warenlagern erfolgen muss. Dafür sind die niedrigeren Paletten besser stapelbar und es passen zwei Paletten übereinander in einen Standard-Lkw.

In der Tabelle 64 sind die gesamten Investitionskosten für das CargoCapVan-System beim Einsatz auf der Hauptstrecke zwischen dem GVZ und der Innenstadt Bergisch Gladbach mit direkter Anbindung der Industriestandorte West und Zinkhütte zusammengefasst.

Tabelle 64: Zusammenstellung der Investitionskosten für das CargoCapVan-System

	Investitionskosten
Rohbau	58,4 Mio. EUR
Innenausbau/Fördertechnik	4,3 Mio. EUR
Vans	15,1 Mio. EUR
Softwareentwicklung	10,0 Mio. EUR
Gesamte Investitionskosten	87,8 Mio. EUR

Die Van-Variante führt gegenüber dem eigentlichen CargoCap-System zu zusätzlichen Kostenbelastungen. Diese resultieren zum einen daraus, dass die Energiekosten p.a. deutlich höher ausfallen. Zum anderen fällt die betriebswirtschaftliche Nutzungszeit beim e-Sprinter mit rund zehn Jahren gegenüber den Caps (20 Jahre) geringer aus. Dies führt zu höheren Investitionsausgaben und damit zu höheren Abschreibungen sowie höheren Zinsbelastungen. Im Ergebnis steigen die Kosten je Palette über den gesamten Betriebszeitraum auf rund 9 € (Variante a: Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten)). Dies sind gegenüber der vergleichbaren CargoCap-Variante DN 2200 rund 3 € Zusatzkosten (vgl. Tabelle 33).

7 Zusammenfassung

Kommunen und Industriestandorte sind von zuverlässigen und leistungsfähigen Transport- und Logistikdienstleistungen abhängig. Dabei ist es wichtig, sowohl den Anforderungen der gewerblichen Verkehre als auch den Bedürfnissen der Bevölkerung mit zunehmenden Warenmengen gerecht zu werden. Flankierend sind logistische Herausforderungen in Folge der zunehmenden Urbanisierung und Zuspitzung der Verkehrssituation sowie die Umwelt-, Gesundheits- und Klimaschutzziele zu beachten. Als Lösung bietet sich das CargoCap-System an.

CargoCap ist ein innovatives Konzept, um palettierte Güter in Städten und Ballungsräumen automatisiert durch unterirdische Fahrrohrleitungen schnell, wirtschaftlich, zuverlässig und umweltfreundlich zu transportieren. Die Transporte werden durch elektrisch und vollautomatisch fahrende Transportfahrzeuge (Caps) unabhängig von oberirdischen Verkehrsstaus und Witterungsverhältnissen durchgeführt.

Die Be- und Entladung der Caps erfolgt automatisch an ober- oder unterirdischen Stationen; nur hier gibt es eine Verbindung zur Oberfläche. Die Ladung der Caps wird an den Stationen bei Direktanschluss unmittelbar dem Empfänger zur Verfügung gestellt, z.B. an der Rampe von Warenhäusern oder punktgenau am Fließband einer Fabrik.

In Innenstädten können, je nach deren Struktur und Aufbau, die Güter darüber hinaus an einen zentralen Punkt (City-Hub) oder an mehrere zentrale Punkte (City-Hubs) ungehindert geliefert werden, von denen dann jeweils die Weiterverteilung z.B. mit umweltfreundlichen E-Karren oder Lastenfahrrädern an den in der Umgebung ansässigen Groß- und Einzelhandel erfolgen kann. Alle zurzeit diskutierten neuen Verteil- und Abholkonzepte lassen sich in dieser Form realisieren. Auf diese Weise werden die Warenzufuhr und -verteilung nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich entzerrt. Belieferungszeit und -frequenz hängen ausschließlich von den jeweiligen Anforderungen und Möglichkeiten des angeschlossenen Geschäftes/Kunden ab.

Die Stadt Bergisch Gladbach ist bereit, die weltweit erste Anwendung des CargoCap-Systems in Form eines Pilotprojektes zu prüfen und bei Realisierung den Nutzen des Konzeptes zu zeigen und nachvollziehbar zu machen. Die entsprechenden Beschlüsse des Rates sowie eine Vorkaufsrechtssatzung liegen vor. Mit dieser Konzeption sieht der Rat der Stadt die Möglichkeit, den Schwerverkehrsanteil von 7 % am städtischen Verkehr und die damit verbundenen Belastungen der Bevölkerung durch Lärm, Stau, Unfälle, Feinstaub, Stickoxide und andere Gase drastisch zu reduzieren.

Der mögliche Anwendungsfall sieht vor, ein Güterverteilzentrum im Süden der Stadt an der A4 (Abfahrt Frankenforst) zu errichten und von dort aus die ankommenden Waren per Caps unterirdisch in die Innenstadt zu einem neu zu errichtenden City-Hub und/oder direkt anzuschließenden Kunden und umgekehrt Fertigprodukte, aber auch Abfälle, auch wieder aus der Stadt heraus zu transportieren.

Sowohl für das Güterverteilzentrum (GVZ) als auch für das City-Hub sind noch keine konkreten Flächen vorgesehen. Für das GVZ gelten Suchräume im Einzugsbereich der Autobahn sowie im BAST-Umfeld. Für das City-Hub gelten Suchräume im Zentrum sowie im Gewerbegebiet Gohrsmühle.

Im Rahmen der Klärung der Logistikaufgabe wurden durch fragebogen-gestützte Interviews Logistikdaten von Unternehmen in den Bereichen Industrie, Handel und KEP-Dienstleistern erhoben und durch Statistiken und Hochrechnungen ergänzt. Die logistische Bewertung wurde anhand der Komponenten der Logistikleistung vorgenommen. Es zeigt sich, dass das CargoCap-System in den Stadtteilen an der A4 zu Nachteilen bei der Lieferzeit führt. Die Industriegebiete Zinkhütte und West besitzen das größte Liefervolumen, gefolgt vom Handel, der jedoch räumlich stärker verteilt ist und einen nicht zu vernachlässigenden Anteil gekühlter Ware empfängt. Es werden eine hohe Vielfalt an Palettentypen sowie möglichst hohe Palettenladehöhen verwendet. Die befragten Unternehmen haben lediglich ein geringes Interesse an einer Verlagerung von Lagerplätzen und einer Just-in-time-Anbindung an das GVZ.

Die in Bergisch Gladbach vorliegenden Randbedingungen erfordern eine Anpassung des CargoCap-Systems insbesondere hinsichtlich der Fahrzeuggröße, der Anzahl der zu transportierenden Paletten pro Cap und damit auch des Innendurchmessers der Fahrrohrleitung auf 2.200 mm bzw. 3.000 mm, um Euro-Paletten mit den Grundmaßen $B \times L = 0,8 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$ mit Beladungshöhen bis 1,20 m (EUL 1) bzw. bis 1,95 (CCG II) transportieren zu können.

In der vorliegenden Studie wurden 4 Varianten untersucht:

- DN 2000 für Caps ohne Karosserie mit je 3 Stck. 1,20 m hohen Paletten
- DN 2200 für Caps mit Karosserie mit je 3 Stck. 1,20 m hohen Paletten
- DN 2800 für Caps ohne Karosserie mit je 2 Stck. 1,95 m hohen Paletten
- DN 3000 für Caps mit Karosserie mit je 2 Stck. 1,95 m hohen Paletten

Mit den oben angeführten Nennweiten wird das Spektrum der genormten Ladungshöhen der Paletten mit Ausnahme von EUL 2 (Beladungshöhe 2,40 m) vollständig abgedeckt.

Die für den Erstanwendungsfall des CargoCap-Systems gewählte Pilotstrecke (im Bericht Hauptstrecke genannt) erstreckt sich zwischen dem GVZ und der Innenstadt mit direkter Anbindung der Industriegebiete West und Zinkhütte. Sie ist ca. 7,9 km lang und wird einspurig mit zwei jeweils 500 m langen doppelspurigen Kreuzungsstationen ausgelegt.

Nicht nur aus aerodynamischen Gründen, sondern auch zur getakteten Bedienung der Stationen werden bei allen untersuchten Varianten Verbände mit bis zu 22 Caps gebildet, die auf drei Linien im 15- oder 30-Minuten-Takt mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s (36 km/h) verkehren.

Die Grobschätzung der gesamten Investitionskosten der Hauptstrecke Bergisch Gladbach in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers für einen Betrieb mit geschlossenen Caps enthält die nachfolgende Tabelle.

Tabelle: Zusammenstellung der gesamten Investitionskosten für einen Betrieb mit geschlossenen Caps

Investitionsbereich	DN 2200 3 Paletten pro Cap Ladehöhe bis 1,20 m	DN 3000 2 Paletten pro Cap Ladehöhe bis 1,95 m
Rohbau	42,6 Mio. EUR	57,3 Mio. EUR
Innenausbau/Fördertechnik	22,0 Mio. EUR	23,0 Mio. EUR
Caps (Bedarf + Reserve (296 Stck.) + Entwicklungskosten)	16,5 Mio. EUR	16,5 Mio. EUR
Softwareentwicklung	10,0 Mio. EUR	10,0 Mio. EUR
Gesamte Investitionskosten	91,1 Mio. EUR	106,8 Mio. EUR

Bemerkung: In der betriebswirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Bewertung wird die betrieblich erforderliche Anzahl von Caps in Höhe von 247 zugrunde gelegt. Die Gesamtkosten betragen in diesem Fall 14,63 Mio. EUR.

Die Wartungskosten für den Betrieb auf der Hauptstrecke betragen 720.000,00 EUR bis 730.000,00 EUR pro Jahr.

Der Rohbau der Fahrrohrleitungen, d.h. der Einbau der Rohre, erfolgt vorwiegend mittels des Rohrvortriebsverfahrens, das seit ca. 25 Jahren neben der offenen Rohrverlegung im Graben als Standardverfahren beim grabenlosen Bau von begehbaren Abwasserleitungen gilt. Die Etablierung dieses Bauverfahrens im Leitungsbau stellt das eigentliche Zeitfenster für die technische Realisierung des CargoCap-Systems durch unsere Generation dar. Zahlreiche, vorwiegend mittelständische Bauunternehmungen des Leitungsbaus haben sich hierauf spezialisiert und können umfangreiche Referenzen vorweisen. Damit, aber auch aus Sicht der geologischen und hydrogeologischen Bedingungen besteht im vorliegenden Anwendungsfall beim Bau des Fahrrohrleitungsnetzes kein erhöhtes technisches, finanzielles und juristisches Risiko.

Durch die unterirdische Streckenführung und die grabenlose Verlegung der Fahrrohrleitungen kann das CargoCap-System jederzeit und uneingeschränkt ohne Inanspruchnahme wertvoller städtischer Flächen erweitert und damit die Transportkapazität gesteigert werden. Der Platzbedarf an der Oberfläche während der Bauarbeiten ist gering. Die Anwohner sowie der Verkehr werden, wenn überhaupt, nur partiell geringfügig und zeitlich befristet gestört. Schäden an angrenzenden Bauwerken, Bäumen, Bewuchs und Leitungen werden vermieden. Vorhandenes Grundwasser muss nicht abgesenkt werden.

Der Betrieb des CargoCap-Systems ist innerhalb der Stadt nicht bemerkbar (man hört, sieht, riecht und spürt es nicht). Das bedeutet gegenüber einem Lkw-Verkehr eine erhebliche Verbesserung der Lebensqualität im Einzugsbereich. Aus diesem Grunde wird dieses Vorhaben normalerweise wenig Widerstand bei der Bevölkerung hervorrufen. Auch in der Bewilligungsphase ist mit dieser Bauweise nur ein sehr geringes juristisches Konfliktpotential zu erwarten.

Die Hauptstrecke Bergisch Gladbach verfügt über große Kapazitätsreserven, die es erlauben, nach erfolgreicher Etablierung des CargoCap-Systems nachträglich über Verzweigungen zusätzliche Gebiete zu erschließen und in das System zu integrieren. Hierfür bieten sich insbesondere die folgenden, in der Machbarkeitsstudie vorgestellten Zweig- und Nebenstrecken an. Sie sind in der betriebswirtschaftlichen Betrachtung und Bewertung unbeachtet geblieben:

- **Zweigstrecke nach Bensberg**
Der Abzweig befindet sich bei km 2,2
- **Zweigstrecke nach Gronau**
Der Abzweig befindet sich bei km 4,1
- **Zweigstrecke nach Duckterath**
Der Abzweig befindet sich bei km 5,1
- **Zweigstrecke nach Strundepark**
Der Abzweig befindet sich bei km 6,4
- **Nebenstrecke nach Refrath**
Diese Strecke führt unabhängig von der Hauptstrecke vom GVZ direkt nach Refrath

Mit weiteren kommerziellen Verbindungen in der Umgebung kann sich ein regionales Netz entwickeln, das die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Verbindungen infolge der Netzwirkung erheblich erhöht.

Im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Untersuchung wurde geprüft, ob und wann das CargoCap-System die zu übernehmende Transportaufgabe in Bergisch Gladbach (CCBG) rentabel absolvieren kann. Die Analyse basiert einerseits auf der Abschätzung der Investitions- und Betriebsaufwendungen, die in eine dynamische Investitionsrechnung eingespeist werden. Andererseits wurden die notwendigen Erlöse bzw. Einnahmen gegengerechnet, die für einen rentablen Betrieb von CCBG notwendig sind.

Die betriebswirtschaftliche Bewertung erfolgte für die folgenden Varianten

- a) **Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten)**
Einbeziehung aller Investitionen für die Infrastruktur im Rahmen der Umstellung auf das CargoCap-System (Strecke, Stationen, Fahrzeuge etc.) mit Betriebskosten für das GVZ und die CityHubs
- b) **Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)**
wie a), aber ohne Betriebskosten für das GVZ
- c) **Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)**
wie a), aber ohne Investitionskosten für die Infrastruktur
- d) **Streckenbetrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)**
Kombination von b) und c), d.h. wie a), aber ohne Betriebskosten für das GVZ und ohne Investitionskosten für die Infrastruktur

Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Investitionskosten DN 3000 und DN 2800 sowie DN 2200 und DN 2000 wurden die Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit des CargoCap-Systems nur für die Varianten mit geschlossenem Cap (DN 3000 und DN 2200) durchgeführt.

Vor dem Hintergrund der dynamischen Investitionsrechnung der betriebswirtschaftlichen Bewertung erreicht die CargoCap-Investition die Schwelle für ihre betriebswirtschaftliche Rentabilität, wenn der Ausgabenbarwert dem Einnahme- oder Erlösbarwert entspricht. Diese Bedingung wird bei der **Variante a)** für eine Zielerlösannuität von rund 10,5 Mio. € p.a. (DN 2200) bzw. 11 Mio. € p.a. (DN 3000) erfüllt, wenn die Gütertransportaufgabe in Bergisch Gladbach weitgehend vollständig von CargoCap übernommen wird. Die Gesamtkosten belaufen sich dann für DN 2200 auf rund 803 Mio. €, für DN 3000 auf 826 Mio. € p.a.. Die Zielerlöse liegen bei insgesamt rund 837 Mio. € (DN 2200) bzw. rund 880 Mio. € (DN 3000). Werden der Betrieb des Güterverteilzentrums ausgliedert und die Infrastrukturkosten öffentlich finanziert (**Variante d)**, sinken die jährlichen Kosten gravierend und die notwendigen Zielerlöse nehmen ab.

Von den oben aufgeführten Varianten entsprechen nur b) und d) dem eigentlichen CargoCap-Geschäftsmodell, bei dem System und Aufgabe an den Schnittstellen zum Kunden (GVZ, Hubs, Einkaufszentren etc.), d. h. am Übergang der CargoCap-Fördertechnik zur Anschlusslogistik des Kunden enden. Diese zeichnen sich gegenüber den Varianten a) und c) durch deutlich geringere Palettenkosten aus. Bei der Interpretation der Palettenkosten ist zudem zu berücksichtigen, dass diese im Zuge des Netzausbaus über Bergisch Gladbach hinaus zu Skalenerträgen sowie höheren Transportmengen und damit zu Kostendegressionseffekten führen. Diese konnten bei der Bewertung der Pilotstrecke in Bergisch Gladbach nicht berücksichtigt werden. Sie sind allerdings empirisch außerordentlich relevant und führen zu einer weiteren Senkung der Kosten- und Rentabilitätsschwelle.

Tabelle: Palettenkosten der Investitionsszenarien (€)

Variante	Investitionsszenarien	DN 2200	DN 3000
a)	Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)	5,74	5,90
b)	Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	2,98	3,14
c)	Streckentrieb ohne Infrastrukturkosten und mit GVZ (Betriebskosten)	5,16	5,20
d)	Streckentrieb ohne Infrastrukturkosten und ohne GVZ (Betriebskosten)	2,40	2,60

Die volkswirtschaftliche Bewertung nach dem Ressourcenverbrauchsansatz der Bundesverkehrswegeplanung 2030 zeigt, dass die analysierten Vorteile die systemimmanenten Nachteile des CargoCap-Systems im vorliegenden Anwendungsfall nicht aufwiegen. Die im Vergleich zum Lkw höheren Betriebskosten und zusätzlichen Transportzeiten führen zu einem negativen Gesamtnutzen. Die Bewertung hat aber auch gezeigt, dass das Transportsystem CargoCap geeignet ist, fossile Kraftstoffe einzusparen, die Umweltbelastung durch Ab-gasemissionen zu reduzieren, die Verkehrssicherheit zu steigern und innerörtliche Trennwirkungen zu mindern. Aus jeder verlagerten Lkw-Fahrt ziehen die Verkehrsteilnehmer, Anwohner und die Stadt einen Nutzen durch kürzere Reisezeiten, geringere Lärmeinwirkungen, Erhöhung der Zuverlässigkeit und niedrigeren Verschleiß der Infrastruktur.

Bei einer weiteren untersuchten Variante wurden die Caps durch den eSprinter der Daimler AG ersetzt, wodurch ein Rohrrinnendurchmesser DN 3200 erforderlich ist und die Beladungshöhe der Paletten auf 1,20 m (EUL 1) beschränkt wird.

Seitens der Gesetzgebung bestehen Bemühungen, das autonome Fahren ohne einen Fahrer mit Eingriffsmöglichkeit an Bord im Straßenverkehr zu erlauben. Rechtlich in Deutschland ungelöst ist der Tatbestand, wenn einem Menschen durch ein autonomes Fahrzeug ein körperlicher Schaden zugeführt wird. Beim automatisierten, unterirdischen Warentransport kann dieses Problem außer Acht gelassen werden, da sich keine Person im Gefahrenbereich (in der Fahrrohrleitung) befinden darf.

Der entscheidende Vorteil besteht darin, dass die Fahrzeuge im Prinzip bereits existieren und sowohl unterirdisch durch die Fahrrohre (ohne Fahrer) als auch oberirdisch im öffentlichen Straßenverkehr (mit Fahrer) fahren können. Dies eröffnet eine recht große Freizügigkeit des Einsatzes, insbesondere in der Migrationsphase.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Investitionskosten für das CargoCapVan-System beim Einsatz auf der Hauptstrecke zwischen dem GVZ und der Innenstadt Bergisch Gladbach mit direkter Anbindung der Industriestandorte West und Zinkhütte zusammengefasst.

Tabelle: Zusammenstellung der Investitionskosten für das CargoCapVan-System

	Investitionskosten
Rohbau	58,4 Mio. EUR
Innenausbau/Fördertechnik	4,3 Mio. EUR
Vans	15,1 Mio. EUR
Softwareentwicklung	10,0 Mio. EUR
Gesamte Investitionskosten	87,8 Mio. EUR

Die Van-Variante führt gegenüber dem eigentlichen CargoCap-System zu zusätzlichen Kostenbelastungen. Diese resultieren zum einen daraus, dass die Energiekosten p.a. deutlich höher ausfallen. Zum anderen fällt die betriebswirtschaftliche Nutzungszeit beim e-Sprinter mit rund zehn Jahren gegenüber den Caps (20 Jahre) geringer aus. Dies führt zu höheren Investitionsausgaben und damit zu höheren Abschreibungen sowie höheren Zinsbelastungen. Im Ergebnis steigen die Kosten je Palette über den gesamten Betriebszeitraum auf rund 9 € (Variante a: Streckenbetrieb mit Infrastrukturkosten und GVZ (Betriebskosten)). Dies sind gegenüber der vergleichbaren CargoCap-Variante DN 2200 rund 3 € Zusatzkosten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Anforderungen an die volks- und betriebswirtschaftliche Rentabilität der CargoCap-Investition in Bergisch Gladbach insgesamt vor dem Hintergrund der Betriebs- und Investitionsausgaben sowie vor dem Hintergrund des Potenzials des Transportaufkommens relativ hoch ausfallen. Zudem ist nicht zu erwarten, dass sich der CargoCap-Transport ohne öffentliche Intervention in Konkurrenz zum Lkw-Transport durchsetzt, weil die Grenz- und Durchschnittskosten für die „letzten“ Kilometer des Lkw zwischen GVZ und den verschiedenen Stationen unter denen des CargoCap-Systems liegen. Die Inangriffnahme der Realisation des subterrestrischen Transportsystems in Bergisch Gladbach kann trotzdem mit dem Hinweis auf seinen innovativen Pilotcharakter für die Entwicklung umweltfreundlicher, nachhaltiger Gütertransportsysteme politisch begründet werden. Die Bedingungen für eine betriebs- und volkswirtschaftliche Rentabilität verbessern sich dann erheblich, wenn das GVZ ausgegliedert und die Infrastrukturkosten wie beim Straßenbau öffentlich finanziert werden. Darüber hinaus führt ein Netzausbau über Bergisch Gladbach hinaus dazu, dass Skalenerträge, höhere Transportmengen sowie Kostendegressions-effekte und geringere Umladekosten realisiert werden, die für das Gesamtsystem eines wachsenden Netzes betriebs- und volkswirtschaftliche Rentabilitätsgewinne versprechen.

8 Tabellenanhang

Tabelle 65: Entwicklung der Kreditschuld 2021 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2020					
2021	126.696		4.181	0	130.877
2022	130.877		4.319	0	135.196
2023	135.196		4.461	0	139.657
2024	139.657	9.649	4.609	5.041	134.617
2025	134.617	9.649	4.442	5.207	129.409
2026	129.409	9.649	4.271	5.379	124.031
2027	124.031	9.649	4.093	5.556	118.474
2028	118.474	9.649	3.910	5.740	112.734
2029	112.734	9.649	3.720	5.929	106.805
2030	106.805	9.649	3.525	6.125	100.680
2031	100.680	9.649	3.322	6.327	94.353
2032	94.353	9.649	3.114	6.536	87.817
2033	87.817	9.649	2.898	6.751	81.066
2034	81.066	9.649	2.675	6.974	74.092
2035	74.092	9.649	2.445	7.204	66.887
2036	66.887	9.649	2.207	7.442	59.445
2037	59.445	9.649	1.962	7.688	51.757
2038	51.757	9.649	1.708	7.941	43.816
2039	43.816	9.649	1.446	8.204	35.612
2040	35.612	9.649	1.175	8.474	27.138
2041	27.138	9.649	896	8.754	18.384
2042	18.384	9.649	607	9.043	9.341
2043	9.341	9.649	308	9.341	0

Tabelle 66: Entwicklung der Kreditschuld 2022 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2020					
2021	0		0	0	0
2022	380.186		12.546	0	392.732
2023	392.732		12.960	0	405.692
2024	405.692	28.031	13.388	14.643	391.049
2025	391.049	28.031	12.905	15.126	375.923
2026	375.923	28.031	12.405	15.625	360.298
2027	360.298	28.031	11.890	16.141	344.157
2028	344.157	28.031	11.357	16.674	327.483
2029	327.483	28.031	10.807	17.224	310.259
2030	310.259	28.031	10.239	17.792	292.467
2031	292.467	28.031	9.651	18.379	274.088
2032	274.088	28.031	9.045	18.986	255.102
2033	255.102	28.031	8.418	19.612	235.489
2034	235.489	28.031	7.771	20.260	215.229
2035	215.229	28.031	7.103	20.928	194.301
2036	194.301	28.031	6.412	21.619	172.682
2037	172.682	28.031	5.699	22.332	150.350
2038	150.350	28.031	4.962	23.069	127.281
2039	127.281	28.031	4.200	23.831	103.450
2040	103.450	28.031	3.414	24.617	78.833
2041	78.833	28.031	2.601	25.429	53.404
2042	53.404	28.031	1.762	26.269	27.135
2043	27.135	28.031	895	27.135	0

Tabelle 67: Entwicklung der Kreditschuld 2023 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2020					
2021	0		0	0	0
2022	0		0	0	0
2023	65.685.294		2.167.615	0	67.852.909
2024	67.852.909	4.688.216	2.239.146	2.449.070	65.403.839
2025	65.403.839	4.688.216	2.158.327	2.529.889	62.873.950
2026	62.873.950	4.688.216	2.074.840	2.613.375	60.260.574
2027	60.260.574	4.688.216	1.988.599	2.699.617	57.560.958
2028	57.560.958	4.688.216	1.899.512	2.788.704	54.772.253
2029	54.772.253	4.688.216	1.807.484	2.880.731	51.891.522
2030	51.891.522	4.688.216	1.712.420	2.975.796	48.915.726
2031	48.915.726	4.688.216	1.614.219	3.073.997	45.841.730
2032	45.841.730	4.688.216	1.512.777	3.175.439	42.666.291
2033	42.666.291	4.688.216	1.407.988	3.280.228	39.386.063
2034	39.386.063	4.688.216	1.299.740	3.388.476	35.997.587
2035	35.997.587	4.688.216	1.187.920	3.500.295	32.497.292
2036	32.497.292	4.688.216	1.072.411	3.615.805	28.881.486
2037	28.881.486	4.688.216	953.089	3.735.127	25.146.360
2038	25.146.360	4.688.216	829.830	3.858.386	21.287.974
2039	21.287.974	4.688.216	702.503	3.985.713	17.302.261
2040	17.302.261	4.688.216	570.975	4.117.241	13.185.020
2041	13.185.020	4.688.216	435.106	4.253.110	8.931.910
2042	8.931.910	4.688.216	294.753	4.393.463	4.538.447
2043	4.538.447	4.688.216	149.769	4.538.447	0

Tabelle 68: Entwicklung der Kreditschuld 2044 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2044	13.341.138	921.790	440.258	481.532	12.859.606
2045	12.859.606	921.790	424.367	497.423	12.362.183
2046	12.362.183	921.790	407.952	513.838	11.848.345
2047	11.848.345	921.790	390.995	530.795	11.317.550
2048	11.317.550	921.790	373.479	548.311	10.769.239
2049	10.769.239	921.790	355.385	566.405	10.202.834
2050	10.202.834	921.790	336.694	585.097	9.617.738
2051	9.617.738	921.790	317.385	604.405	9.013.333
2052	9.013.333	921.790	297.440	624.350	8.388.983
2053	8.388.983	921.790	276.836	644.954	7.744.029
2054	7.744.029	921.790	255.553	666.237	7.077.792
2055	7.077.792	921.790	233.567	688.223	6.389.569
2056	6.389.569	921.790	210.856	710.934	5.678.635
2057	5.678.635	921.790	187.395	734.395	4.944.240
2058	4.944.240	921.790	163.160	758.630	4.185.610
2059	4.185.610	921.790	138.125	783.665	3.401.945
2060	3.401.945	921.790	112.264	809.526	2.592.419
2061	2.592.419	921.790	85.550	836.240	1.756.179
2062	1.756.179	921.790	57.954	863.836	892.343
2063	892.343	921.790	29.447	892.343	0

Tabelle 69: Entwicklung der Kreditschuld 2064 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2064	17.433.307	1.204.534	575.299	629.234	16.804.073
2065	16.804.073	1.204.534	554.534	649.999	16.154.073
2066	16.154.073	1.204.534	533.084	671.449	15.482.624
2067	15.482.624	1.204.534	510.927	693.607	14.789.017
2068	14.789.017	1.204.534	488.038	716.496	14.072.521
2069	14.072.521	1.204.534	464.393	740.140	13.332.381
2070	13.332.381	1.204.534	439.969	764.565	12.567.816
2071	12.567.816	1.204.534	414.738	789.796	11.778.020
2072	11.778.020	1.204.534	388.675	815.859	10.962.162
2073	10.962.162	1.204.534	361.751	842.782	10.119.379
2074	10.119.379	1.204.534	333.940	870.594	9.248.785
2075	9.248.785	1.204.534	305.210	899.324	8.349.462
2076	8.349.462	1.204.534	275.532	929.001	7.420.460
2077	7.420.460	1.204.534	244.875	959.658	6.460.802
2078	6.460.802	1.204.534	213.206	991.327	5.469.475
2079	5.469.475	1.204.534	180.493	1.024.041	4.445.434
2080	4.445.434	1.204.534	146.699	1.057.834	3.387.600
2081	3.387.600	1.204.534	111.791	1.092.743	2.294.857
2082	2.294.857	1.204.534	75.730	1.128.803	1.166.054
2083	1.166.054	1.204.534	38.480	1.166.054	0

Tabelle 70: Entwicklung der Kreditschuld 2084 DN 2200 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2084	22.631.565	1.563.701	746.842	816.859	21.814.706
2085	21.814.706	1.563.701	719.885	843.816	20.970.890
2086	20.970.890	1.563.701	692.039	871.662	20.099.229
2087	20.099.229	1.563.701	663.275	900.426	19.198.802
2088	19.198.802	1.563.701	633.560	930.141	18.268.662
2089	18.268.662	1.563.701	602.866	960.835	17.307.827
2090	17.307.827	1.563.701	571.158	992.543	16.315.284
2091	16.315.284	1.563.701	538.404	1.025.297	15.289.987
2092	15.289.987	1.563.701	504.570	1.059.131	14.230.856
2093	14.230.856	1.563.701	469.618	1.094.083	13.136.773
2094	13.136.773	1.563.701	433.514	1.130.188	12.006.585
2095	12.006.585	1.563.701	396.217	1.167.484	10.839.102
2096	10.839.102	1.563.701	357.690	1.206.011	9.633.091
2097	9.633.091	1.563.701	317.892	1.245.809	8.387.282
2098	8.387.282	1.563.701	276.780	1.286.921	7.100.361
2099	7.100.361	1.563.701	234.312	1.329.389	5.770.972
2100	5.770.972	1.563.701	190.442	1.373.259	4.397.713
2101	4.397.713	1.563.701	145.125	1.418.576	2.979.137
2102	2.979.137	1.563.701	98.312	1.465.389	1.513.747
2103	1.513.747	1.563.701	49.954	1.513.747	0

Tabelle 71: Betriebsausgaben DN 2200 (€)

Jahr	Energie	Personal	Wartung	Betriebsausgabe
2020				
2021		132.867		132.867
2022		268.258		268.258
2023	58.499	2.527.043		2.585.542
2024	120.391	3.697.937	511.057	4.329.385
2025	123.882	3.733.065	517.854	4.374.801
2026	127.474	3.768.527	524.742	4.420.743
2027	131.171	3.804.326	531.721	4.467.218
2028	134.975	3.840.465	538.793	4.514.233
2029	138.889	3.876.947	545.959	4.561.795
2030	142.917	3.913.775	553.220	4.609.912
2031	147.062	3.950.954	560.578	4.658.594
2032	151.327	3.988.485	568.034	4.707.846
2033	155.715	4.026.373	575.588	4.757.676
2034	160.231	4.064.621	583.244	4.808.096
2035	164.878	4.103.233	591.001	4.859.112
2036	169.659	4.142.211	598.861	4.910.731
2037	174.579	4.181.559	606.826	4.962.964
2038	179.642	4.221.282	614.897	5.015.821
2039	184.851	4.261.381	623.075	5.069.307
2040	190.212	4.389.047	631.362	5.210.621
2041	195.728	4.430.740	639.759	5.266.227
2042	201.404	4.472.829	648.268	5.322.501
2043	207.245	4.515.319	656.890	5.379.454
2044	213.255	4.558.211	665.626	5.437.092
2045	219.440	4.601.512	674.479	5.495.431
2046	225.803	4.645.223	683.450	5.554.476
2047	232.352	4.689.350	692.540	5.614.242
2048	239.090	4.733.896	701.750	5.674.736
2049	246.024	4.778.865	711.084	5.735.973
2050	253.158	4.824.261	720.541	5.797.960
2051	260.500	4.870.088	730.124	5.860.712
2052	268.054	4.916.351	739.835	5.924.240
2053	275.828	4.963.054	749.675	5.988.557
2054	283.827	5.010.200	759.645	6.053.672
2055	292.058	5.057.793	769.749	6.119.600
2056	300.528	5.105.839	779.986	6.186.353
2057	309.243	5.154.342	790.360	6.253.945
2058	318.211	5.203.305	800.872	6.322.388
2059	327.439	5.252.733	811.524	6.391.696
2060	336.935	5.302.630	822.317	6.461.882
2061	346.706	5.353.002	833.254	6.532.962
2062	356.760	5.403.852	844.336	6.604.948
2063	367.106	5.455.186	855.566	6.677.858

Fortsetzung Tabelle 71

Jahr	Energie	Personal	Wartung	Betriebsausgabe
2064	377.752	5.507.006	866.945	6.751.703
2065	388.707	5.559.320	878.475	6.826.502
2066	399.980	5.612.130	890.159	6.902.269
2067	411.579	5.665.441	901.998	6.979.018
2068	423.515	5.719.260	913.994	7.056.769
2069	435.797	5.773.589	926.151	7.135.537
2070	448.435	5.828.435	938.468	7.215.338
2071	461.440	5.883.801	950.950	7.296.191
2072	474.821	5.939.694	963.598	7.378.113
2073	488.591	5.996.117	976.413	7.461.121
2074	502.760	6.053.076	989.400	7.545.236
2075	517.340	6.110.577	1.002.559	7.630.476
2076	532.343	6.168.624	1.015.893	7.716.860
2077	547.781	6.227.222	1.029.404	7.804.407
2078	563.667	6.286.376	1.043.095	7.893.138
2079	580.013	6.346.093	1.056.968	7.983.074
2080	596.834	6.406.377	1.071.026	8.074.237
2081	614.142	6.467.234	1.085.271	8.166.647
2082	631.952	6.528.668	1.099.705	8.260.325
2083	650.279	6.590.687	1.114.331	8.355.297
2084	669.137	6.653.294	1.129.151	8.451.582
2085	688.542	6.716.496	1.144.169	8.549.207
2086	708.509	6.780.299	1.159.387	8.648.195
2087	729.056	6.844.707	1.174.806	8.748.569
2088	750.199	6.909.728	1.190.431	8.850.358
2089	771.954	6.975.366	1.206.264	8.953.584
2090	794.341	7.041.628	1.222.307	9.058.276
2091	817.377	7.108.519	1.238.564	9.164.460
2092	841.081	7.176.045	1.255.037	9.272.163
2093	865.472	7.244.213	1.271.729	9.381.414
2094	890.571	7.313.029	1.288.643	9.492.243
2095	916.398	7.382.498	1.305.782	9.604.678
2096	942.973	7.452.627	1.323.149	9.718.749
2097	970.319	7.523.423	1.340.747	9.834.489
2098	998.459	7.594.890	1.358.579	9.951.928
2099	1.027.414	7.667.037	1.376.648	10.071.099
2100	1.057.209	7.739.869	1.394.957	10.192.035
2101	1.087.868	7.813.393	1.413.510	10.314.771
2102	1.119.416	7.887.616	1.432.310	10.439.342
2103	1.151.879	7.962.543	1.451.360	10.565.782
Summe	36.778.952	450.647.883	72.150.773	559.577.607

Tabelle 72: Zielerlösannuität ohne Steuern DN 2200 (€)

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	ZEBW
2020				
2021	52.261	52.261		
2022	150.935	150.935		
2023	25.098.324	25.098.324		
2024	7.770.335	7.770.335	10.135.711	8.697.451
2025	7.516.176	7.516.176	10.135.711	8.370.983
2026	7.270.567	7.270.567	10.135.711	8.056.769
2027	7.033.214	7.033.214	10.135.711	7.754.350
2028	6.803.833	6.803.833	10.135.711	7.463.282
2029	6.582.151	6.582.151	10.135.711	7.183.139
2030	6.367.903	6.367.903	10.135.711	6.913.512
2031	6.160.836	6.160.836	10.135.711	6.654.006
2032	5.960.702	5.960.702	10.135.711	6.404.241
2033	5.767.264	5.767.264	10.135.711	6.163.850
2034	5.580.294	5.580.294	10.135.711	5.932.484
2035	5.399.571	5.399.571	10.135.711	5.709.801
2036	5.224.880	5.224.880	10.135.711	5.495.478
2037	5.056.015	5.056.015	10.135.711	5.289.199
2038	4.892.780	4.892.780	10.135.711	5.090.663
2039	4.734.979	4.734.979	10.135.711	4.899.579
2040	4.622.993	4.622.993	10.135.711	4.715.668
2041	4.474.364	4.474.364	10.135.711	4.538.661
2042	4.330.666	4.330.666	10.135.711	4.368.297
2043	4.191.734	4.191.734	10.135.711	4.204.328
2044	4.821.347	4.821.347	10.135.711	4.046.514
2045	2.465.803	2.465.803	10.135.711	3.894.624
2046	2.395.082	2.395.082	10.135.711	3.748.435
2047	2.326.453	2.326.453	10.135.711	3.607.733
2048	2.259.852	2.259.852	10.135.711	3.472.313
2049	2.195.217	2.195.217	10.135.711	3.341.976
2050	2.132.489	2.132.489	10.135.711	3.216.531
2051	2.071.610	2.071.610	10.135.711	3.095.795
2052	2.012.525	2.012.525	10.135.711	2.979.591
2053	1.955.180	1.955.180	10.135.711	2.867.749
2054	1.899.522	1.899.522	10.135.711	2.760.105
2055	1.845.501	1.845.501	10.135.711	2.656.501
2056	1.793.067	1.793.067	10.135.711	2.556.787
2057	1.742.172	1.742.172	10.135.711	2.460.815
2058	1.692.771	1.692.771	10.135.711	2.368.446
2059	1.644.819	1.644.819	10.135.711	2.279.543
2060	1.598.271	1.598.271	10.135.711	2.193.978
2061	1.553.087	1.553.087	10.135.711	2.111.625
2062	1.509.224	1.509.224	10.135.711	2.032.363
2063	1.466.645	1.466.645	10.135.711	1.956.076

Fortsetzung Tabelle 72

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	ZEBW
2064	2.865.601	2.865.601	10.135.711	1.882.652
2065	1.435.727	1.435.727	10.135.711	1.811.985
2066	1.394.872	1.394.872	10.135.711	1.743.970
2067	1.355.224	1.355.224	10.135.711	1.678.508
2068	1.316.747	1.316.747	10.135.711	1.615.504
2069	1.279.404	1.279.404	10.135.711	1.554.864
2070	1.243.163	1.243.163	10.135.711	1.496.500
2071	1.207.989	1.207.989	10.135.711	1.440.328
2072	1.173.850	1.173.850	10.135.711	1.386.263
2073	1.140.716	1.140.716	10.135.711	1.334.228
2074	1.108.554	1.108.554	10.135.711	1.284.147
2075	1.077.338	1.077.338	10.135.711	1.235.945
2076	1.047.037	1.047.037	10.135.711	1.189.552
2077	1.017.624	1.017.624	10.135.711	1.144.901
2078	989.073	989.073	10.135.711	1.101.926
2079	961.358	961.358	10.135.711	1.060.564
2080	934.453	934.453	10.135.711	1.020.755
2081	908.335	908.335	10.135.711	982.439
2082	882.979	882.979	10.135.711	945.563
2083	858.362	858.362	10.135.711	910.070
2084	1.703.693	1.703.693	10.135.711	875.909
2085	841.135	841.135	10.135.711	843.031
2086	817.486	817.486	10.135.711	811.387
2087	794.534	794.534	10.135.711	780.931
2088	772.259	772.259	10.135.711	751.618
2089	750.639	750.639	10.135.711	723.405
2090	729.654	729.654	10.135.711	696.251
2091	709.286	709.286	10.135.711	670.117
2092	689.516	689.516	10.135.711	644.963
2093	670.325	670.325	10.135.711	620.754
2094	651.696	651.696	10.135.711	597.453
2095	633.613	633.613	10.135.711	575.027
2096	616.058	616.058	10.135.711	553.443
2097	599.016	599.016	10.135.711	532.669
2098	582.472	582.472	10.135.711	512.674
2099	566.410	566.410	10.135.711	493.430
2100	550.815	550.815	10.135.711	474.909
2101	535.675	535.675	10.135.711	457.083
2102	520.974	520.974	10.135.711	439.926
2103	495.219	495.219	10.135.711	423.413
Summe	220.852.295	220.852.295	810.856.855	220.852.295

Tabelle 73: Zielerlösannuität mit Ertragsteuern DN 2200 (€)

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	BWZE
2020				
2021	52.261	52.261		
2022	150.935	150.935		
2023	25.098.324	25.098.324		
2024	7.770.335	7.770.335	10.466.199	8.981.044
2025	7.516.176	7.516.176	10.466.199	8.643.930
2026	7.270.567	7.270.567	10.466.199	8.319.471
2027	7.033.214	7.033.214	10.466.199	8.007.191
2028	6.803.833	6.803.833	10.466.199	7.706.632
2029	6.582.151	6.582.151	10.466.199	7.417.355
2030	6.367.903	6.367.903	10.466.199	7.138.937
2031	6.160.836	6.160.836	10.466.199	6.870.969
2032	5.960.702	5.960.702	10.466.199	6.613.059
2033	5.767.264	5.767.264	10.466.199	6.364.831
2034	5.803.006	5.803.006	10.466.199	6.125.920
2035	5.611.271	5.611.271	10.466.199	5.895.977
2036	5.426.127	5.426.127	10.466.199	5.674.665
2037	5.247.346	5.247.346	10.466.199	5.461.660
2038	5.142.482	5.142.482	10.466.199	5.256.651
2039	5.078.942	5.078.942	10.466.199	5.059.337
2040	4.942.988	4.942.988	10.466.199	4.869.429
2041	4.780.427	4.780.427	10.466.199	4.686.650
2042	4.835.042	4.835.042	10.466.199	4.510.731
2043	4.623.231	4.623.231	10.466.199	4.341.416
2044	5.047.318	5.047.318	10.466.199	4.178.456
2045	2.677.145	2.677.145	10.466.199	4.021.613
2046	2.592.527	2.592.527	10.466.199	3.870.658
2047	2.510.698	2.510.698	10.466.199	3.725.368
2048	2.431.563	2.431.563	10.466.199	3.585.533
2049	2.412.584	2.412.584	10.466.199	3.450.946
2050	2.336.406	2.336.406	10.466.199	3.321.411
2051	2.262.741	2.262.741	10.466.199	3.196.738
2052	2.191.502	2.191.502	10.466.199	3.076.745
2053	2.122.607	2.122.607	10.466.199	2.961.256
2054	2.055.978	2.055.978	10.466.199	2.850.102
2055	1.991.538	1.991.538	10.466.199	2.743.120
2056	1.929.212	1.929.212	10.466.199	2.640.154
2057	1.868.931	1.868.931	10.466.199	2.541.053
2058	1.905.335	1.905.335	10.466.199	2.445.672
2059	1.845.382	1.845.382	10.466.199	2.353.871
2060	1.783.887	1.783.887	10.466.199	2.265.516
2061	1.728.684	1.728.684	10.466.199	2.180.477
2062	1.675.391	1.675.391	10.466.199	2.098.631
2063	1.623.840	1.623.840	10.466.199	2.019.856

Fortsetzung Tabelle 73

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	BWZE
2064	2.885.192	2.885.192	10.466.199	1.944.039
2065	1.451.352	1.451.352	10.466.199	1.871.067
2066	1.406.780	1.406.780	10.466.199	1.800.835
2067	1.363.654	1.363.654	10.466.199	1.733.238
2068	1.321.924	1.321.924	10.466.199	1.668.179
2069	1.319.415	1.319.415	10.466.199	1.605.562
2070	1.278.918	1.278.918	10.466.199	1.545.296
2071	1.239.736	1.239.736	10.466.199	1.487.291
2072	1.201.825	1.201.825	10.466.199	1.431.464
2073	1.165.143	1.165.143	10.466.199	1.377.733
2074	1.134.064	1.134.064	10.466.199	1.326.018
2075	1.099.551	1.099.551	10.466.199	1.276.244
2076	1.066.153	1.066.153	10.466.199	1.228.339
2077	1.033.834	1.033.834	10.466.199	1.182.232
2078	1.002.556	1.002.556	10.466.199	1.137.856
2079	1.027.525	1.027.525	10.466.199	1.095.145
2080	996.157	996.157	10.466.199	1.054.038
2081	965.808	965.808	10.466.199	1.014.473
2082	936.536	936.536	10.466.199	976.394
2083	908.256	908.256	10.466.199	939.744
2084	1.703.693	1.703.693	10.466.199	904.470
2085	841.135	841.135	10.466.199	870.519
2086	817.486	817.486	10.466.199	837.843
2087	794.534	794.534	10.466.199	806.394
2088	772.259	772.259	10.466.199	776.125
2089	750.639	750.639	10.466.199	746.992
2090	729.654	729.654	10.466.199	718.953
2091	709.286	709.286	10.466.199	691.967
2092	689.516	689.516	10.466.199	665.993
2093	670.325	670.325	10.466.199	640.994
2094	651.696	651.696	10.466.199	616.934
2095	633.613	633.613	10.466.199	593.776
2096	616.058	616.058	10.466.199	571.488
2097	599.016	599.016	10.466.199	550.037
2098	582.472	582.472	10.466.199	529.391
2099	566.410	566.410	10.466.199	509.519
2100	550.815	550.815	10.466.199	490.394
2101	535.675	535.675	10.466.199	471.987
2102	520.974	520.974	10.466.199	454.270
2103	495.219	495.219	10.466.199	437.219
	228.053.482	228.053.482	837.295.934	228.053.482

Tabelle 74: Entwicklung der 2023 Kreditschuld DN 3000 (€)

Jahr	Schuld Januar	Annuität	Zins	Tilgung	Restschuld Dezember
2020					
2021	0	0	0	0	0
2022	0	0	0	0	0
2023	74.960.294	0	2.473.690	0	77.433.984
2024	77.433.984	5.350.209	2.555.321	2.794.887	74.639.096
2025	74.639.096	5.350.209	2.463.090	2.887.119	71.751.978
2026	71.751.978	5.350.209	2.367.815	2.982.393	68.769.584
2027	68.769.584	5.350.209	2.269.396	3.080.812	65.688.772
2028	65.688.772	5.350.209	2.167.729	3.182.479	62.506.293
2029	62.506.293	5.350.209	2.062.708	3.287.501	59.218.792
2030	59.218.792	5.350.209	1.954.220	3.395.989	55.822.803
2031	55.822.803	5.350.209	1.842.153	3.508.056	52.314.747
2032	52.314.747	5.350.209	1.726.387	3.623.822	48.690.925
2033	48.690.925	5.350.209	1.606.801	3.743.408	44.947.517
2034	44.947.517	5.350.209	1.483.268	3.866.941	41.080.576
2035	41.080.576	5.350.209	1.355.659	3.994.550	37.086.026
2036	37.086.026	5.350.209	1.223.839	4.126.370	32.959.656
2037	32.959.656	5.350.209	1.087.669	4.262.540	28.697.116
2038	28.697.116	5.350.209	947.005	4.403.204	24.293.912
2039	24.293.912	5.350.209	801.699	4.548.510	19.745.403
2040	19.745.403	5.350.209	651.598	4.698.610	15.046.792
2041	15.046.792	5.350.209	496.544	4.853.665	10.193.128
2042	10.193.128	5.350.209	336.373	5.013.836	5.179.292
2043	5.179.292	5.350.209	170.917	5.179.292	0

Tabelle 75: Betriebsausgaben DN 3000 (€)

Jahr	Energie	Personal	Wartung	Betriebsausgabe
2020				
2021		132.867		132.867
2022		268.258		268.258
2023	58.499	2.527.043		2.585.542
2024	120.391	3.697.937	520.317	4.338.645
2025	123.882	3.733.065	527.237	4.384.184
2026	127.474	3.768.527	534.250	4.430.251
2027	131.171	3.804.326	541.355	4.476.852
2028	134.975	3.840.465	548.555	4.523.995
2029	138.889	3.876.947	555.851	4.571.687
2030	142.917	3.913.775	563.244	4.619.936
2031	147.062	3.950.954	570.735	4.668.751
2032	151.327	3.988.485	578.326	4.718.138
2033	155.715	4.026.373	586.017	4.768.105
2034	160.231	4.064.621	593.812	4.818.664
2035	164.878	4.103.233	601.709	4.869.820
2036	169.659	4.142.211	609.712	4.921.582
2037	174.579	4.181.559	617.821	4.973.959
2038	179.642	4.221.282	626.038	5.026.962
2039	184.851	4.261.381	634.364	5.080.596
2040	190.212	4.389.047	642.801	5.222.060
2041	195.728	4.430.740	651.351	5.277.819
2042	201.404	4.472.829	660.014	5.334.247
2043	207.245	4.515.319	668.792	5.391.356
2044	213.255	4.558.211	677.687	5.449.153
2045	219.440	4.601.512	686.700	5.507.652
2046	225.803	4.645.223	695.833	5.566.859
2047	232.352	4.689.350	705.088	5.626.790
2048	239.090	4.733.896	714.465	5.687.451
2049	246.024	4.778.865	723.968	5.748.857
2050	253.158	4.824.261	733.597	5.811.016
2051	260.500	4.870.088	743.353	5.873.941
2052	268.054	4.916.351	753.240	5.937.645
2053	275.828	4.963.054	763.258	6.002.140
2054	283.827	5.010.200	773.409	6.067.436
2055	292.058	5.057.793	783.696	6.133.547
2056	300.528	5.105.839	794.119	6.200.486
2057	309.243	5.154.342	804.681	6.268.266
2058	318.211	5.203.305	815.383	6.336.899
2059	327.439	5.252.733	826.228	6.406.400
2060	336.935	5.302.630	837.216	6.476.781
2061	346.706	5.353.002	848.351	6.548.059
2062	356.760	5.403.852	859.634	6.620.246
2063	367.106	5.455.186	871.068	6.693.360

Fortsetzung Tabelle 75

Jahr	Energie	Personal	Wartung	Betriebsausgabe
2064	377.752	5.507.006	882.653	6.767.411
2065	388.707	5.559.320	894.392	6.842.419
2066	399.980	5.612.130	906.287	6.918.397
2067	411.579	5.665.441	918.341	6.995.361
2068	423.515	5.719.260	930.555	7.073.330
2069	435.797	5.773.589	942.931	7.152.317
2070	448.435	5.828.435	955.472	7.232.342
2071	461.440	5.883.801	968.180	7.313.421
2072	474.821	5.939.694	981.057	7.395.572
2073	488.591	5.996.117	994.105	7.478.813
2074	502.760	6.053.076	1.007.327	7.563.163
2075	517.340	6.110.577	1.020.724	7.648.641
2076	532.343	6.168.624	1.034.300	7.735.267
2077	547.781	6.227.222	1.048.056	7.823.059
2078	563.667	6.286.376	1.061.995	7.912.038
2079	580.013	6.346.093	1.076.120	8.002.226
2080	596.834	6.406.377	1.090.432	8.093.643
2081	614.142	6.467.234	1.104.935	8.186.311
2082	631.952	6.528.668	1.119.630	8.280.250
2083	650.279	6.590.687	1.134.521	8.375.487
2084	669.137	6.653.294	1.149.611	8.472.042
2085	688.542	6.716.496	1.164.900	8.569.938
2086	708.509	6.780.299	1.180.394	8.669.202
2087	729.056	6.844.707	1.196.093	8.769.856
2088	750.199	6.909.728	1.212.001	8.871.928
2089	771.954	6.975.366	1.228.120	8.975.440
2090	794.341	7.041.628	1.244.454	9.080.423
2091	817.377	7.108.519	1.261.006	9.186.902
2092	841.081	7.176.045	1.277.777	9.294.903
2093	865.472	7.244.213	1.294.772	9.404.457
2094	890.571	7.313.029	1.311.992	9.515.592
2095	916.398	7.382.498	1.329.441	9.628.337
2096	942.973	7.452.627	1.347.123	9.742.723
2097	970.319	7.523.423	1.365.040	9.858.782
2098	998.459	7.594.890	1.383.195	9.976.544
2099	1.027.414	7.667.037	1.401.591	10.096.042
2100	1.057.209	7.739.869	1.420.232	10.217.310
2101	1.087.868	7.813.393	1.439.122	10.340.383
2102	1.119.416	7.887.616	1.458.262	10.465.294
2103	1.151.879	7.962.543	1.477.657	10.592.079
Summe	36.778.952	450.647.883	73.458.074	560.884.908

Tabelle 76: Zielerlösannuität ohne Steuern DN 3000 (€)

Jahr	BWGA	ZE	ZEANN	ZEBW
2020				
2021	52.016	52.016		
2022	149.981	149.981		
2023	28.642.297	28.642.297		
2024	8.346.337	8.346.337	10.682.457	9.166.615
2025	8.070.659	8.070.659	10.682.457	8.822.536
2026	7.804.335	7.804.335	10.682.457	8.491.372
2027	7.547.044	7.547.044	10.682.457	8.172.639
2028	7.298.470	7.298.470	10.682.457	7.865.870
2029	7.058.313	7.058.313	10.682.457	7.570.616
2030	6.826.282	6.826.282	10.682.457	7.286.445
2031	6.602.097	6.602.097	10.682.457	7.012.940
2032	6.385.485	6.385.485	10.682.457	6.749.702
2033	6.176.186	6.176.186	10.682.457	6.496.344
2034	5.973.948	5.973.948	10.682.457	6.252.497
2035	5.778.527	5.778.527	10.682.457	6.017.803
2036	5.589.689	5.589.689	10.682.457	5.791.918
2037	5.407.206	5.407.206	10.682.457	5.574.512
2038	5.230.861	5.230.861	10.682.457	5.365.267
2039	5.060.442	5.060.442	10.682.457	5.163.875
2040	4.936.309	4.936.309	10.682.457	4.970.044
2041	4.775.988	4.775.988	10.682.457	4.783.488
2042	4.621.035	4.621.035	10.682.457	4.603.934
2043	4.471.268	4.471.268	10.682.457	4.431.121
2044	4.826.162	4.826.162	10.682.457	4.264.794
2045	2.470.499	2.470.499	10.682.457	4.104.710
2046	2.399.662	2.399.662	10.682.457	3.950.635
2047	2.330.920	2.330.920	10.682.457	3.802.344
2048	2.264.208	2.264.208	10.682.457	3.659.619
2049	2.199.465	2.199.465	10.682.457	3.522.251
2050	2.136.632	2.136.632	10.682.457	3.390.039
2051	2.075.651	2.075.651	10.682.457	3.262.790
2052	2.016.466	2.016.466	10.682.457	3.140.318
2053	1.959.023	1.959.023	10.682.457	3.022.443
2054	1.903.270	1.903.270	10.682.457	2.908.992
2055	1.849.156	1.849.156	10.682.457	2.799.800
2056	1.796.632	1.796.632	10.682.457	2.694.706
2057	1.745.649	1.745.649	10.682.457	2.593.558
2058	1.696.162	1.696.162	10.682.457	2.496.206
2059	1.648.126	1.648.126	10.682.457	2.402.508
2060	1.601.496	1.601.496	10.682.457	2.312.327
2061	1.556.232	1.556.232	10.682.457	2.225.531
2062	1.512.292	1.512.292	10.682.457	2.141.994
2063	1.469.636	1.469.636	10.682.457	2.061.592

Fortsetzung Tabelle 76

Jahr	BWGA	ZE	ZEANN	ZEBW
2064	2.868.519	2.868.519	10.682.457	1.984.207
2065	1.438.573	1.438.573	10.682.457	1.909.728
2066	1.397.647	1.397.647	10.682.457	1.838.044
2067	1.357.930	1.357.930	10.682.457	1.769.051
2068	1.319.386	1.319.386	10.682.457	1.702.648
2069	1.281.979	1.281.979	10.682.457	1.638.737
2070	1.245.674	1.245.674	10.682.457	1.577.225
2071	1.210.438	1.210.438	10.682.457	1.518.023
2072	1.176.238	1.176.238	10.682.457	1.461.042
2073	1.143.044	1.143.044	10.682.457	1.406.200
2074	1.110.826	1.110.826	10.682.457	1.353.417
2075	1.079.553	1.079.553	10.682.457	1.302.615
2076	1.049.197	1.049.197	10.682.457	1.253.720
2077	1.019.731	1.019.731	10.682.457	1.206.660
2078	991.128	991.128	10.682.457	1.161.367
2079	963.362	963.362	10.682.457	1.117.774
2080	936.408	936.408	10.682.457	1.075.817
2081	910.241	910.241	10.682.457	1.035.435
2082	884.837	884.837	10.682.457	996.569
2083	860.175	860.175	10.682.457	959.161
2084	1.705.461	1.705.461	10.682.457	923.158
2085	842.859	842.859	10.682.457	888.506
2086	819.167	819.167	10.682.457	855.155
2087	796.174	796.174	10.682.457	823.056
2088	773.858	773.858	10.682.457	792.162
2089	752.198	752.198	10.682.457	762.427
2090	731.175	731.175	10.682.457	733.809
2091	710.770	710.770	10.682.457	706.264
2092	690.963	690.963	10.682.457	679.754
2093	671.736	671.736	10.682.457	654.239
2094	653.073	653.073	10.682.457	629.681
2095	634.955	634.955	10.682.457	606.045
2096	617.367	617.367	10.682.457	583.297
2097	600.293	600.293	10.682.457	561.402
2098	583.717	583.717	10.682.457	540.329
2099	567.624	567.624	10.682.457	520.047
2100	552.000	552.000	10.682.457	500.527
2101	536.830	536.830	10.682.457	481.739
2102	522.101	522.101	10.682.457	463.656
2103	496.317	496.317	10.682.457	446.253
Summe	232.765.640	232.765.640	854.596.573	232.765.640

Tabelle 77: Zielerlösannuität mit Ertragsteuern DN 3000 (€)

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	BWZE
2020				
2021	52.016	52.016		
2022	149.981	149.981		
2023	28.642.297	28.642.297		
2024	8.346.337	8.346.337	10.997.348	9.436.822
2025	8.070.659	8.070.659	10.997.348	9.082.601
2026	7.804.335	7.804.335	10.997.348	8.741.675
2027	7.547.044	7.547.044	10.997.348	8.413.547
2028	7.298.470	7.298.470	10.997.348	8.097.735
2029	7.058.313	7.058.313	10.997.348	7.793.778
2030	6.826.282	6.826.282	10.997.348	7.501.230
2031	6.602.097	6.602.097	10.997.348	7.219.663
2032	6.385.485	6.385.485	10.997.348	6.948.665
2033	6.176.186	6.176.186	10.997.348	6.687.840
2034	5.991.504	5.991.504	10.997.348	6.436.804
2035	5.799.819	5.799.819	10.997.348	6.195.192
2036	5.614.626	5.614.626	10.997.348	5.962.648
2037	5.435.698	5.435.698	10.997.348	5.738.834
2038	5.301.396	5.301.396	10.997.348	5.523.420
2039	5.360.781	5.360.781	10.997.348	5.316.093
2040	5.237.636	5.237.636	10.997.348	5.116.548
2041	5.073.268	5.073.268	10.997.348	4.924.492
2042	5.121.993	5.121.993	10.997.348	4.739.646
2043	4.920.461	4.920.461	10.997.348	4.561.738
2044	5.059.477	5.059.477	10.997.348	4.390.508
2045	2.689.587	2.689.587	10.997.348	4.225.706
2046	2.605.234	2.605.234	10.997.348	4.067.089
2047	2.523.653	2.523.653	10.997.348	3.914.427
2048	2.444.750	2.444.750	10.997.348	3.767.495
2049	2.429.956	2.429.956	10.997.348	3.626.078
2050	2.353.832	2.353.832	10.997.348	3.489.969
2051	2.280.211	2.280.211	10.997.348	3.358.969
2052	2.209.008	2.209.008	10.997.348	3.232.886
2053	2.140.142	2.140.142	10.997.348	3.111.536
2054	2.073.534	2.073.534	10.997.348	2.994.742
2055	2.009.108	2.009.108	10.997.348	2.882.331
2056	1.946.790	1.946.790	10.997.348	2.774.139
2057	1.886.510	1.886.510	10.997.348	2.670.009
2058	1.922.909	1.922.909	10.997.348	2.569.787
2059	1.862.945	1.862.945	10.997.348	2.473.327
2060	1.804.953	1.804.953	10.997.348	2.380.488
2061	1.748.987	1.748.987	10.997.348	2.291.134
2062	1.694.959	1.694.959	10.997.348	2.205.134
2063	1.642.701	1.642.701	10.997.348	2.122.362

Fortsetzung Tabelle 77

Jahr	BWGA	ZE	ZEAN	BWZE
2064	2.903.371	2.903.371	10.997.348	2.042.697
2065	1.468.874	1.468.874	10.997.348	1.966.022
2066	1.423.669	1.423.669	10.997.348	1.892.225
2067	1.379.933	1.379.933	10.997.348	1.821.198
2068	1.337.615	1.337.615	10.997.348	1.752.838
2069	1.347.923	1.347.923	10.997.348	1.687.043
2070	1.306.379	1.306.379	10.997.348	1.623.718
2071	1.266.188	1.266.188	10.997.348	1.562.770
2072	1.227.306	1.227.306	10.997.348	1.504.110
2073	1.189.687	1.189.687	10.997.348	1.447.651
2074	1.157.708	1.157.708	10.997.348	1.393.312
2075	1.122.327	1.122.327	10.997.348	1.341.013
2076	1.088.094	1.088.094	10.997.348	1.290.676
2077	1.054.969	1.054.969	10.997.348	1.242.229
2078	1.022.917	1.022.917	10.997.348	1.195.601
2079	1.047.140	1.047.140	10.997.348	1.150.723
2080	1.015.053	1.015.053	10.997.348	1.107.529
2081	984.011	984.011	10.997.348	1.065.957
2082	954.072	954.072	10.997.348	1.025.945
2083	925.151	925.151	10.997.348	987.435
2084	1.705.461	1.705.461	10.997.348	950.370
2085	842.859	842.859	10.997.348	914.697
2086	819.167	819.167	10.997.348	880.363
2087	796.174	796.174	10.997.348	847.318
2088	773.858	773.858	10.997.348	815.513
2089	752.198	752.198	10.997.348	784.902
2090	731.175	731.175	10.997.348	755.439
2091	710.770	710.770	10.997.348	727.083
2092	690.963	690.963	10.997.348	699.791
2093	671.736	671.736	10.997.348	673.524
2094	653.073	653.073	10.997.348	648.242
2095	634.955	634.955	10.997.348	623.910
2096	617.367	617.367	10.997.348	600.491
2097	600.293	600.293	10.997.348	577.951
2098	583.717	583.717	10.997.348	556.257
2099	567.624	567.624	10.997.348	535.377
2100	552.000	552.000	10.997.348	515.281
2101	536.830	536.830	10.997.348	495.939
2102	522.101	522.101	10.997.348	477.324
2103	496.317	496.317	10.997.348	459.407
	239.626.958	239.626.958	879.787.830	239.626.958

Literatur

- [1] Koether, R. (2018). Taschenbuch der Logistik (5. Auflage). Hanser: München
- [2] Pfohl, H.-C. (2018). Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen (9. Auflage). Springer: Berlin
- [3] Schulte, C. (2016). Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain (7. Auflage). Vahlen: München
- [4] Stadt Bergisch Gladbach (2012). Integriertes Stadtentwicklungskonzept Bergisch Gladbach – ISEK 2030. Zugriff am 23.05.2019 unter <https://www.bergischgladbach.de/isek2030.aspx>
- [5] Stodick, K., Deckert, C. (2019). Sustainable Parcel Delivery in Urban Areas with Micro Depots. In Vogelsang, M. (Hg). Mobility in a Globalised World 2018. Bamberg: University of Bamberg Press, 2019 (Logistik & Supply Chain Management; 22)
- [6] Seeck, S., Groß, W., Bötzel, M., Hermannsdorfer, M. (2014). Logistik im Handel. Strukturen, Erfolgsfaktoren, Trends. Hamburg: DVV Media Group
- [7] Statista (2019a). Dossier Baumärkte und Gartencenter in Deutschland. Zugriff am 25.04.2019 unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/7152/dokument/baumaerkte-und-gartencenter---statista-dossier/>
- [8] Statista (2019b). Dossier Einzelhandel in Deutschland. Zugriff am 26.03.2019 unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/6557/dokument/einzelhandel-in-deutschland-statista-dossier/>
- [9] Statista (2019c). Dossier Großhandel in Deutschland. Zugriff am 11.04.2019 unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/17733/dokument/grosshandel-in-deutschland--statista-dossier/>
- [10] Statista (2019d). Dossier Kurier-, Express- und Paketbranche (KEP). Zugriff am 23.04.2019 unter <https://de.statista.com/statistik/studie/id/10539/dokument/kurier-express-und-paket-branche-kep-statista-dossier/>
- [11] BIEK (2017). Nachhaltigkeitsstudie 2017. Zugriff am 23.04.2019 unter <https://www.biek.de/download.html?getfile=508>
- [12] Stadt Bergisch Gladbach (2016). Mobilitätskonzept Bergisch Gladbach 2030. Zugriff am 23.05.2019 unter <https://www.bergischgladbach.de/startseite-mobilitaetskonzept.aspx>

- [13] Hahn Gruppe (2018). Retail Real Estate Report Germany 2018/2019. Zugriff am 22.07.2019 unter https://www.bulwiengesa.de/sites/default/files/hahn_retail_real_estate_report_2018_2019.pdf
- [14] EHI Retail Institute (2019b). Transport in der Handelslogistik. Trends, Herausforderungen und Maßnahmen des Handels. Köln: EHI Retail Institute
- [15] EHI Retail Institute (2019a). EHI Handelsdaten aktuell 2019. Köln: EHI Retail Institute
- [16] Lange, V. , Hoffmann, J. (2011). Palettenstudie Österreich 2011. Zugriff am 09.09.2019 unter <https://www.wko.at/branchen/industrie/studie2011.pdf>
- [17] Statista (2019e). Umsatz mit Food im Lebensmitteleinzelhandel in Deutschland nach Warengruppen in den Jahren 2016 und 2017. Zugriff am 11.11.2019 unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28082/umfrage/lebensmittelbranche-umsaetze-in-2008/>
- [18] Leighty, A. (2019). Verbrauch von Getränken in Mehrweg- und ökologisch vorteilhaften Einweggetränkeverpackungen. Umweltbundesamt. Zugriff am 11.11.2019 unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-09_texte_106-2019_einweggetraenkeverpackungen-2017.pdf
- [19] Metro (2015). Logistikhandbuch. Zugriff am 10.09.2019 unter https://www.gs1.at/fileadmin/user_upload/Logistikhandbuch_METRO.pdf
- [20] REWE (2019a). Logistikhandbuch Frischesortiment. Zugriff am 10.09.2019 unter https://www.gs1.at/fileadmin/user_upload/REWE_Logistikhandbuch_Frischesortiment_AUT_V1.4.pdf
- [21] REWE (2019b). Logistikhandbuch Trockensortiment/Nonfood. Zugriff am 10.09.2019 unter https://www.ecr.digital/wp_contents/uploads/2016/08/REWE_Logistikhandbuch_Trockensortiment_2019.pdf
- [22] Spar (2016). Logistikhandbuch für Lieferanten. Zugriff am 11.11.2019 unter https://www.gs1.at/fileadmin/user_upload/LHB_TS_DEU2016.pdf
- [23] GS1 Germany, Accenture (2014). Palettenhöhen in der deutschen Konsumgüterindustrie im Jahr 2013. Zugriff am 09.09.2019 unter https://www.gs1-germany.de/fileadmin/gs1/basis_informationen/Palettenladehoehen_in_der_deutschen_Konsumgueterwirtschaft_2013.pdf

- [24] ECR Europe (1997). Efficient Unit Loads Report. Zugriff am 10.09.2019 unter https://www.ecr.digital/wp_content/uploads/2016/07/The_Efficient_Unit_Loads_Report.pdf
- [25] ABC-Logistik (2019). Incharge – Smarte Innenstadtlogistik. Zugriff am 11.12.2019 unter <https://www.abc-logistik.com/leistung/incharge-smarte-innenstadtlogistik/>
- [26] Voth, M., Hesse, G. (2019). Leistungsprozesse Spedition und Logistik (15. Auflage). Köln: Bildungsverlag EINS
- [27] Stein, D. et al. (2002): Transport- und Versorgungssysteme unter der Erde, Abschlussbericht des interdisziplinären Verbundprojektes IV A 5 – 201 001 98 des Ministeriums für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW
- [28] Kersting, M. (2002): Subterrestrische Gütertransporte in Ballungsgebieten. Ökonomische Rahmenbedingungen und Potentiale; (RUFIS-Studien Nr. 4/2002), Hagen, ISL-Verlag
- [29] Stein, D. (2006): CargoCap – Unterirdischer Gütertransport im Ballungsraum, Geotechnik (29) Nr. 2
- [30] Stein, D.; Wagner, G.; Aldejohann, S. (2010): „CargoCap – automatischer, unterirdischer Gütertransport in Ballungsräumen“, Bauportal, Heft 9
- [31] Stein, D. et al. (2009): CargoCap – Automatischer Gütertransport im Untergrund – Marktpotentialanalyse am Beispiel einer Ruhrgebietstrecke, Bochum (unveröff.)
- [32] Kersting, M.; Werbeck, N. (2008): Subterrestrische Transportalternativen in Ballungsräumen, Forschungsbericht von RUFIS im Auftrag des Ministeriums für Bauen und Verkehr des Landes NRW, Dezember 2008 (unveröff.)
- [33] Pielow, Joh.-Christian (2009): CargoCap-Marktpotentialanalyse – Juristische Bewertung der anvisierten Pilotstrecke („Ruhrgebietstrasse“)
- [34] Wagner, G.; Aldejohann, S. (2009): Abschlussbericht des Projekts „CargoCap-Marktpotentialanalyse – Maschinenbauliche Betrachtung, Lehrstuhl Maschinenelement und Fördertechnik, Ruhr-Universität-Bochum
- [35] Hölscher, H. (2012): CargoCap – Optimale Koordinierung der Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge im lokalen Umfeld von Verzweigungen und Zusammenführungen; Dissertation: In: Schriftenreihe Institute Product and Service Engineering, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 12.1
- [36] Hohaus, L. (2009): Entwicklung einer Verzweigungsvorrichtung für das System CargoCap, simulationsgestützte Ermittlung von Betriebslasten, Dissertation: In: Schriftenreihe Institute Product and Service Engineering, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 09.3

- [37] Aldejohann, S. (2015): CargoCap – Weiterentwicklung der Verzweigungstechnik für ein spurgeführtes Güterverkehrssystem, Dissertation: In: Schriftenreihe Institute Product and Service Engineering, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 16.2
- [38] Scholten, J. et al. (2010): CargoCap – Gütertransport unter der Erde; Tagungsband 39; Großseminar des VDBUM, Braunlage, 23.-27. Februar 2010
- [39] Stein, D. et al (2018): Machbarkeitsstudie - Automatisierter unterirdischer Güterverkehr mit Mercedes-Benz VANS, im Auftrag von PIONEERING NeXt, Daimler AG, Steffen Kaup
- [40] Beckmann, D; Siefer, Th.; Stein, D.; Stein, R. (2014): „Automatisierter Güterverkehr im Untergrund – Ein verkehrstechnisches Zukunftsszenario“, Europäische Fach-hochschule (EUFH), Nr. 11
- [41] Ril 853: Vorschrift für die Abdichtung von Ingenieurbauwerken. Drucksachenzentrale der DB (03.11)
- [42] Haubenreißer, M.; Neumann, J.; Cetinkaya, B. (2014): Palettenhöhen in der deutschen Konsumgüterindustrie im Jahr 2013, GS1 Germany Accenture
- [43] Stein, D. (2003): „Grabenloser Leitungsbau“, Ernst & Sohn, Berlin
- [44] Beckmann, D.; Bergemann, D.; Grauvogel, W.; Kreutz, H. (2015): CoJackHydra - Premiere in Burscheid, bi Umwelt Bau 5/15
- [45] Beckmann, D. (2006): CoJack – Praktische Erfahrungen mit der statischen Online-Kontrolle bei Rohrvortriebsmaßnahmen. TIS – Straßen- und Tiefbau, Nr. 7-8, S. 42-45
- [46] Beckmann, D.; Stein, R. (2004): Mathematische Simulation von Rohrbeanspruchungen bei schwierigen Vortriebsstrecken. Int. Soc. f. Trenchless Technology ISTT (Veranst.): NO DIG 2004, Hamburg
- [47] Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen [Hrsg.]: Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen, Erläuterungen zu Blatt C 5106 Köln, Krefeld 1986
- [48] Preußische Geologische Landesanstalt [Hrsg.]: Geologische Karte von Preußen und benachbarten Bundesstaaten, Erläuterungen zu Blatt 5008 Mühlheim am Rhein, Berlin 1923
- [49] www.bohrungen.nrw.de, abgerufen am 18.12.2019
- [50] www.elwasweb.nrw.de, abgerufen am 18.12.2019
- [51] Stein, D. (2002): Der begehbare Leitungsgang, Ernst&Sohn, Berlin

- [52] Knüpfer, P. (2009): CargoCap – Optimale Fahrbewegungen autonomer Fahrzeuge, Dissertation; in: Schriftenreihe Institute Product and Service Engineering, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 09.4
- [53] Schmitt, M. (2011): CargoCap – Einfluss der Aerodynamik auf den Energiebedarf eines unterirdischen Transportsystems; Dissertation: In: Schriftenreihe Institute Product and Service Engineering, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Heft 11.3
- [54] Stein, D. et al. (2009): CargoCap – Automatischer Gütertransport im Untergrund – Marktpotentialanalyse am Beispiel einer Ruhrgebietstrecke, Bochum (unveröff.), S. 114.
- [55] <https://old.unitracc.com/aktuelles/artikel/nutzungsdauer-von-abwasserkanal-systemen>
Siehe auch BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen, (unveröff.), S. 14.
- [56] BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen, (unveröff.), S. 15.
- [57] Deckert, C. (2020): Prüfung zur ökologischen und ökonomischen Umsetzung des CargoCap-Systems am Standort Bergisch Gladbach – Abstimmung der Zielvorstellungen und Klärung der Logistikaufgabe; Hochschule Düsseldorf.
- [58] Deckert, C. (2020): Prüfung zur ökologischen und ökonomischen Umsetzung des CargoCap-Systems am Standort Bergisch Gladbach – Abstimmung der Zielvorstellungen und Klärung der Logistikaufgabe; Hochschule Düsseldorf.
- [59] Busse von Colbe, W., Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, S. 86.
- [60] <https://www.bergischgladbach.de/Dienstleistung.aspx?dlid=1938>; Hebesatzsatzung der Stadt Bergisch Gladbach ab dem Haushaltsjahr 2018 (Hebesatzsatzung 2018) (abgerufen 13. November 2019).
- [61] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindex-zum-vorjahr/> (abgerufen 15.10.2019).
- [62] Busse von Colbe, W., Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, S. 106.
- [63] Vgl. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1046/umfrage/inflationsrate-veraenderung-des-verbraucherpreisindex-zum-vorjahr/> (abgerufen 14. November 2019).
- [64] Vgl. Statistisches Bundesamt (2019), S. 397 (Arbeitskosten je Stunde in Verkehr und Lagerei), (abgerufen 9. Dezember 2019).

- [65] Vgl. Statistisches Bundesamt (2019), S. 397 (Arbeitskosten je Stunde in Verkehr und Lagerei), (abgerufen 9. Dezember 2019).
- [66] KPMG (2019): Cost of Capital Study 2019., o.O., S. 32.
- [67] BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen (unveröff.), S. 15; S. Busse von Colbe, W., Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, 82.
- [68] KPMG (2019): Cost of Capital Study 2019, Übersicht 27, Übersicht 32.
- [69] Busse von Colbe, W., Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, S. 82.
- [70] Busse von Colbe, W., Witte, F. (2018): Investitionstheorie und Investitionsrechnung, Berlin, S. 40.
- [71] Vgl. BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen. (unveröff.), S. 15; Stein, D. et al. (2009): CargoCap – Automatischer Gütertransport im Untergrund – Marktpotentialanalyse am Beispiel einer Ruhrgebietstrecke, Bochum (unveröff.), S. 88 ff.
- [72] Die Werte der BDO-Studie (2008) wurden vor dem Hintergrund der Strecke in BG und der Preisentwicklung seit 2008 angepasst. BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen. (unveröff.), S. 13.
- [73] Statistisches Bundesamt (2019), S. 397 (Arbeitskosten je Stunde in Verkehr und Lagerei), (abgerufen 9. Dezember 2019).
- [74] Die Werte der BDO-Studie (2008) wurde vor dem Hintergrund der Strecke in BG und der Preisentwicklung seit 2008 angepasst. BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen, (unveröff.), S. 13.
- [75] Statistisches Bundesamt (2019), S. 397 (Arbeitskosten je Stunde in Verkehr und Lagerei), (abgerufen 9. Dezember 2019).
- [76] <https://strom-report.de/strompreise/strompreisentwicklung/> (abgerufen 3. November 2019).
- [77] Der von der BDO (2008) angesetzte Wert wurde mit einer konstanten Preissteigerungsrate von 1,33% fortgeschrieben. BDO (2008): Bericht über die betriebswirtschaftliche Beratung im Projekt CargoCap, Essen, (unveröff.), S. 10.
- [78] Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen, <https://www.nwsib-online.nrw.de/>
- [79] BMVI (2016): Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030, PTV, TCI Röhling, Hans-Ulrich Mann, FE-Projekt-Nr.: 97.358/2015 im Auftrag des

- Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 7. Oktober 2016, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bwvp-2030-methodenhandbuch.pdf?__blob=publicationFile
- [80] BMVI (2015): Grundsätzliche Überprüfung und Weiterentwicklung der Nutzen-Kosten-Analyse im Bewertungsverfahren der Bundesverkehrswegeplanung, Planco, ITP, TU Berlin, FE-Projekt 960974/2011 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Essen, Berlin, München, Anhang D, <https://www.bing.com/search?q=Grunds%20tzliche+%20berpr%20BCfung+und+Weiterentwicklung+der+Nutzen-Kosten-Analyse+im+Bewertungsverfahren+der+Bundesverkehrswegeplanung&form=QBLH&sp=-1&pq=&sc=1-0&qsn=&sk=&cvid=3608D593AE0B49A8ADE09E88899369C7>
- [81] BVU, TNS, KIT (2016): Entwicklung eines Modells zur Berechnung von modalen Verlagerungen im Güterverkehr für die Ableitung konsistenter Bewertungsansätze für die Bundesverkehrswegeplanung, BVU, TNS, KIT, FE-Projekt 96.1002/2012 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, August 2016, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/BVWP/bwvp-2015-modalwahlzeit-zuverlaessigkeit-gueterverkehr.pdf>
- [82] BDEW (2020), BDEW-Strompreisanalyse Juli 2020, Haushalte und Industrie, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), 30. Juli 2020, <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>
- [83] UBA (2019): Astrid Matthey, Björn Bünger, Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze – Stand 02/2019, hrsg. v. Umweltbundesamt (UBA), 19. Feb. 2019, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-11_methodenkonvention-3-0_kostensaetze_korr.pdf
- [84] BMVI (2020): Forschungs-Informationssystem (FIS), Infrastrukturschäden durch den Straßengüterverkehr, Stand des Wissens: 30. August 2019, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/39816>
- [85] Stadt Bergisch Gladbach (2017): Zahlenspiegel 2017, Zahlen, Daten und Fakten, <https://www.bergischgladbach.de/statistik.aspx>
- [86] Stadt Bergisch Gladbach (2018): Haushaltsplan, Doppelhaushalt 2019 / 2020, <https://www.bergischgladbach.de/haushalt-2019-20.aspx>
- [87] Toll Collect (2018), Mauttarife ab 1. Januar 2019, https://www.toll-collect.de/de/toll_collect/bezahlen/maut_tarife/maut_tarife.html