

Machbarkeitsstudie der Nahverkehrsflotte am Rhein (Köln & Düsseldorf)



Auftragsnummer: 29/2019

Dokumentennummer: 29/2019 B-01

Auftraggeber: RheinWerke GmbH,
Höherweg 200,
40233 Düsseldorf

Inhalt

Zusammenfassung	3
Fakten auf einen Blick.....	6
1. Ziele und Fokus	7
2. Jetzige Verkehrssituation	8
3. Wasserbusnetz	9
4. Der Wasserbus	18
5. Geschwindigkeitsprofil.....	20
6. Haltestelle & Lageplan	20
7. Ladekontakt des Batteriesystem	22
8. Design und Auslegungen	27
8.1. Allgemein	27
8.2. Hauptabmessungen.....	27
8.3. Generalplan.....	29
8.4. Batteriesysteme	30
8.5. PV-Anlagen.....	31
8.6. Brennstoffzellen.....	31
8.7. Widerstandsberechnung	33
8.8. Energetische Grundlagen	36
8.9. Städtischer Verkehrsvergleich.....	41
9. Kostenschätzung	42
9.1. Fahrzeug- und Haltestellenanzahl.....	42
9.2. Baukostenschätzung.....	47
9.2.1. Baukosten Schiff	48
9.2.2. Baukosten Haltestelle.....	49
9.3. Betriebskostenschätzung	50
9.3.1. Betriebskosten Schiff	50
9.3.2. Betriebskosten Haltstelle	51
9.4. Gesamt	52
10. Fazit.....	56
11. Ausblick	58

Zusammenfassung

Der öffentliche Verkehr bildet eine der wichtigsten Säulen des Verkehrssystems der Städte Köln und Düsseldorf und ist ein wichtiges Rückgrat für ein umweltfreundliches Gesamtverkehrssystem.

Bei dieser Untersuchung wird die Möglichkeit der Ergänzung des öffentlichen Nahverkehrs durch Fähren in den Städten Köln und Düsseldorf betrachtet.

Es wurde eine Anordnung von Haltestellen empfohlen, ein passendes Fahrzeug entwickelt und die entstehenden Kosten betrachtet.

Hierzu wird die Machbarkeitsstudie hinsichtlich der notwendigen und möglichen Anforderungen an elektrische Schiffe unter gegenseitigen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt. Mit dem Schwerpunkt auf vollelektrischen Systemen wurden die folgenden Themen in den beiden Städten Köln und Düsseldorf diskutiert.

I. Teil 1

- 1) Ziele und Fokus
- 2) Jetzige Verkehrssituation
- 3) Wasserbusnetz
- 4) Der Wasserbus
- 5) Geschwindigkeitsprofil
- 6) Haltestelle & Lageplan
- 7) Ladekontakt
- 8) Festmachersystem

II. Teil 2

- 9) Design und Auslegungen
- 10) Kostenschätzung

In dieser Machbarkeitsstudie wurde die Verwendung von Wasserbussen als ergänzendes Nahverkehrsmittel am Rhein in zwei großen Städten wie Köln und Düsseldorf untersucht. Dies bildet einen nennenswerten Unterschied zu allen anderen verkehrstechnischen Betrachtungen. Es kommt zu keiner höheren Auslastung eines Verkehrsmittels bzw.

eines Verkehrsweges bei gleichzeitigem Kapazitätswachstum. Soll heißen, weder die Straße oder aber die Schiene erfährt eine höhere Belastung durch diesen Kapazitätswachstum. Dies liegt daran, dass der Fluss für den öffentlichen Nahverkehr noch nicht in einer nennenswerten Form erschlossen ist. Im ersten Schritt wurden die vorhandenen Transportmittel wie S- und U-Bahn, die die Fahrgäste von einem Stadtteil in einen anderen transportieren, verglichen. Die Studie ergab z.B., dass ein Passagier, der von Köln-Weiss nach Köln-Stammheim fahren möchte, seine Transportlinie bei einer Reisezeit von etwa 80 Minuten zweimal wechseln muss. In Bezug auf dieses Beispiel ergibt die Machbarkeitsstudie Sinn, da die Stadt Köln gute Möglichkeiten hat, mithilfe des Flusses den Transport durch die Stadt zu erleichtern. Dank bestehender Wasserstraßen wie dem Rhein lässt sich, verglichen mit z.B. gleisgebundenen Fahrzeugen, ein sehr flexibles Verkehrsmittel etablieren, welches mit relativ geringen Investitionskosten umsetzbar ist. Der Vergleich zur S-Bahn und U-Bahn wird in dieser Studie mehrfach gezogen, da es gewisse Parallelen zu diesen Verkehrsmitteln gibt. Schienenfahrzeuge sind ebenfalls wie ein Schiff an eine Route gebunden. (Fluss / Gleis). Beim Schiff jedoch ist die Flexibilität was den Standort von Haltestellen angeht um ein Vielfaches höher, wobei die Routenwahl bei gleisgebundenen Fahrzeugen logischerweise flexibler ist.

In dieser Studie wurde der Schiffsgeneralplan mit einer Kapazität von 120 Passagieren entworfen. Im Rahmen der Studie wurde noch nicht die maximale Passagieranzahl für dieses Fahrzeug ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass auf diesem Fahrzeug noch mehr Passagiere transportiert werden können. Es bedarf intensiverer Untersuchungen des Schwimmverhaltens und des Schiffswiderstandes um dies zu evaluieren. Die Fähre hat eine maximale Geschwindigkeit von 40 km/h und eine Gesamtlänge von 32 m mit einer Breite von 11 m. Die Fahrzeuge für Köln und Düsseldorf sollen baugleich ausgeführt werden, um entsprechend flexibel zu sein, was Ersatzfahrzeuge angeht. Des Weiteren kann ein Serienschiff gebaut werden, welches die Investitionskosten für beide Städte mindert. Die Schiffe unterscheiden sich nur in Bezug auf die installierte Batteriekapazität. Die Kölner Fahrzeuge werden mit etwa 1000 kWh Kapazität ausgestattet, die Düsseldorfer Schiffe erhalten 800 kWh.

Hinsichtlich der Ladeinfrastruktur sollen in Köln 5 von 14 Anlegern mit Schnellladesystemen ausgestattet werden, welche mit Technik aus dem Schienenfahrzeugbau ausgestattet werden und eine leistungsstarke Landstromversorgung benötigen. In Düsseldorf wird das gleiche Prinzip angewandt und es werden 2 von 8 Haltestellen entsprechend ausgeführt.

Die 6 Kölner Schiffe fahren täglich jeweils etwa 360 km. In Düsseldorf fahren die 3 Schiffe jeweils etwa 310 km. Es ist jährlich eine Energiemenge von etwa 15 Mio. kWh notwendig, um die Kölner Flotte zu betreiben. In Düsseldorf werden etwa 6,5 Mio. kWh benötigt.

Die Kölner Flotte erreicht im Jahr eine Transportkapazität von etwa 94 Mio. Pkm (Platzkilometer, Anzahl der transportierten Sitzplätze*Gesamtstrecke pro Jahr). Dieser Betrag bedeutet einen Zuwachs der Platzkilometer der KVB um 1,5% in Bezug auf die Zahlen aus dem Geschäftsbericht der KVB von 2018. Die Düsseldorfer Flotte erbringt etwa 40 Mio. Platzkilometer.

Für den Bau der Flotte in Köln wird ein Investment von etwa 50 Mio Euro geschätzt. In diesen Kosten sind landseitige Baumaßnahmen zur Anbindung der Anleger an den weiteren ÖPNV und zur Anbindung ans Stromnetz nicht berücksichtigt. Die Betriebskosten werden auf etwa 12,5 Mio. € pro Jahr geschätzt. Selbige Zahlen ergeben sich für Düsseldorf für das Investment mit etwa 27 Mio. € und für den Betrieb von etwa 6,5 Mio. €.

Bei der Betrachtung der sog. total cost of ownership für einen Zeitraum von 25 Jahren wurde herausgestellt, dass ein Diesel betriebenes System einen Kostenvorteil von etwa 9% ausmachen würden.

Als weiterer Vorteil bei einem Schiff kann hinzugefügt werden, dass es auch als Touristenattraktion fungieren kann. In den betrachteten Städten wird dies einerseits für positive Effekte sorgen, was den innerstädtischen Tourismus angeht. Andererseits birgt dieser Umstand großes Konfliktpotenzial mit derzeitigem Tourismus treibenden Reedereien. Es ist denkbar, dass dieser Konflikt durch Beteiligung der Reedereien z.B. am Betrieb der

Fahrzeuge entschärft werden kann. Grundsätzlich wird die lokale, einfache Ausflugschiffahrt durch ein Wasserbussystem wirtschaftliche Defizite erfahren.

Fakten auf einen Blick

Datenblatt		
	Köln	Düsseldorf
Schiff Hauptabmessungen		
Länge über alles	32,70 [m]	32,70 [m]
Breite	11,00 [m]	11,00 [m]
Seitenhöhe	2,50 [m]	2,50 [m]
∇	64,89 [m ³]	63,40 [m ³]
Geschwindigkeit	40 [km/h]	40 [km/h]
Fahrgäste	120 Personen	120 Personen
Flotte		
Schiff	6	3
Haltestelle	14	8
Batteriesystem		
Kapazität	1000 [kWh]	800 [kWh]
Ladeleistung	1600 [kW]	1000 [kW]
Fahrtstrecke		
Anzahl der Haltestellen	14	8
Gesamtstrecke	19,7 [km]	8,5 [km]
Gesamtstrecke pro Tag/ Schiff	354,6 [km]	306,0 [km]
Anzahl der Schiffe	6	3
Platzkilometer/Jahr	93.188.880 [Pkm]	40.208.400 [Pkm]
Energiebedarf		
pro Tag/ Schiff	6800 [kWh]	5700 [kWh]
pro Jahr/ Flotte	14.892.000 [kWh]	6.241.500 [kWh]
Kostenschätzung		
Schiffbau	3.500.000 €	3.500.000 €
Haltestelle Gesamt mit Ladestationen	2.217.000 €	2.217.000 €
Haltestelle Gesamt ohne Ladestationen	1.967.000 €	1.967.000 €
Schiffbetrieb	1.580.056 €	1.580.056 €
Haltestellenbetrieb	212.219 €	212.219 €
Gesamtbaukosten/ Flotte	49.788.000 €	26.736.000 €
Gesamtbetriebskosten/ Flotte	12.451.396 €	6.437.917 €

1. Ziele und Fokus

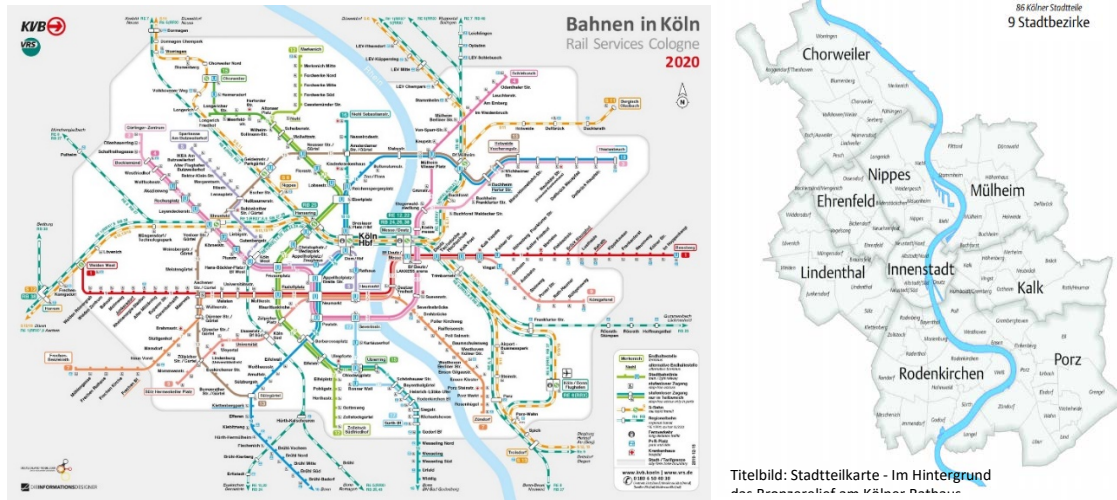


Abbildung 1, Bahnen in Köln (links), Stadtteilkarte-Köln (rechts) (Kölner Rathaus „Kölner Wand“ von Ernst Wille, 2005)

Die Zielsetzung des Projektes war es, in erster Instanz eine Nutzung des Rheins als Verkehrsträger in Köln aus einer energetischen Perspektive zu betrachten. Es sollte ein Verkehr quer zum Rhein wie auch längs zum Rhein möglich sein - späteren Projekt auf Düsseldorf ausgeweitet.

Verbindung der Stadtteile Köln-West und Köln-Ost (über 20 Stadtteile) und über 7 Stadtteile in Düsseldorf

- Verkürzung der Fahrzeiten
- Entlastung der anderen Verkehrsträger
- Erhöhung der Transportkapazität des gesamten ÖPNV

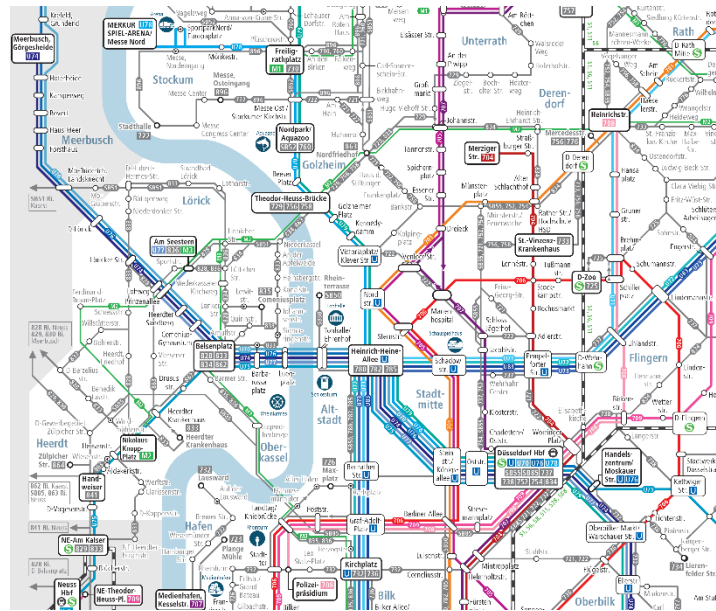


Abbildung 2, Fahrplan in Düsseldorf

2. Jetzige Verkehrssituation

Der öffentliche Nahverkehr stellt ein bedeutendes umweltfreundliches Verkehrsmittel dar. Eine hohe ÖPNV-Akzeptanz ist eine wichtige Grundlage für eine effiziente und umweltfreundliche Gestaltung des städtischen Verkehrs (Stadtentwicklung und Mobilität GbR, 2019).

- Ca. 60 Minuten von Zündorf bis Stammheim
- Ca. 80 Minuten von Stammheim bis Weiss

Köln

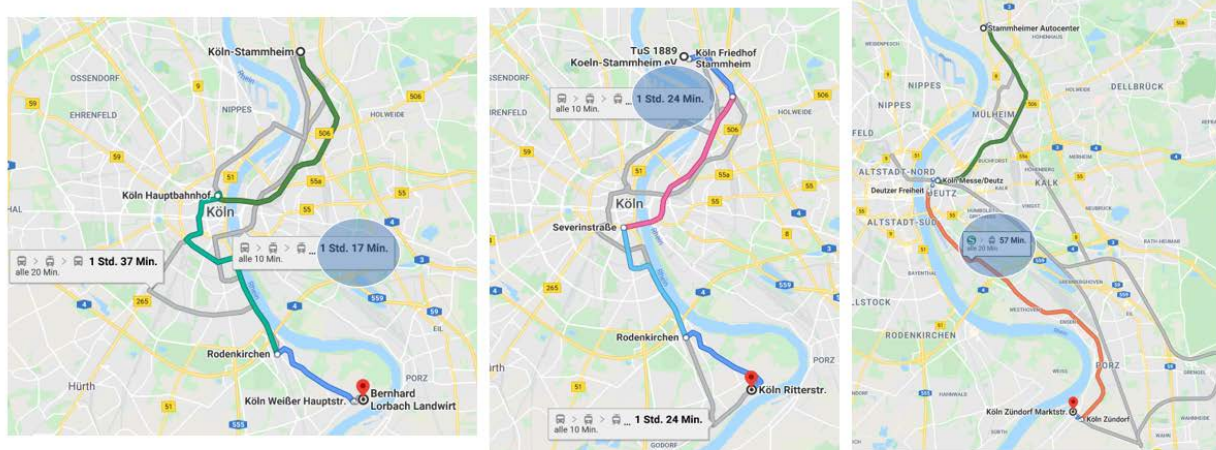
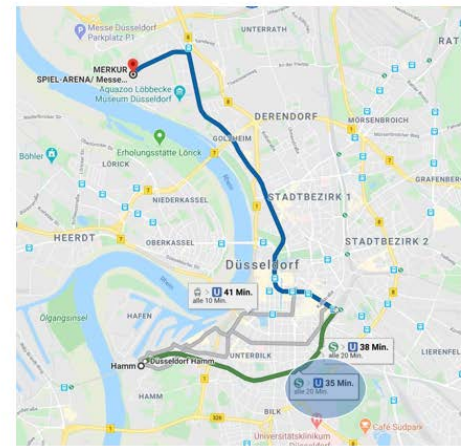
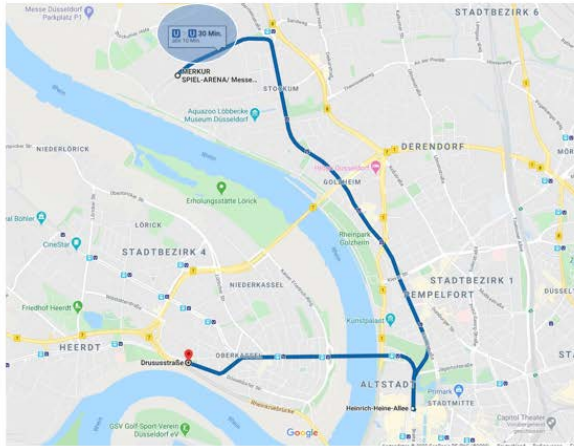


Abbildung 3, Kölner Fahrstrecken, (Google Maps)

- Ca. 30 Minuten von Oberkassel bis Stockum
- Ca. 35 Minuten von Hamm/Hafen bis Stockum



Düsseldorf

Abbildung 4, Düsseldorfer Fahrstrecken, (Google Maps)

Abbildung 4 zeigt, dass die Fahrt in Düsseldorf von Oberkassel nach Stockum etwa 30 Minuten dauert, wobei auch einmal umgestiegen werden muss. Hierzu wird in Abschnitt 10.1 verglichen, dass die Zeit mit der Wasserbusinfrastruktur auf weniger als 20 Minuten reduziert werden kann.

3. Wasserbusnetz

Nachdem die Fahr- und Streckenpläne der beiden Städte studiert worden sind, wurden vierzehn Orte in Köln und acht Orte in Düsseldorf in Betracht gezogen, die für den Bau von Haltestellen geeignet sein könnten. Diesbezüglich ist es wichtig, dass diese Haltestellen in jedem Stadtteil platziert werden und anderen Transportmitteln helfen. Mit anderen Worten, sie sollten so nahe wie möglich an anderen Transportmitteln wie U-Bahn, Bus usw. liegen. Des Weiteren wurden die Haltestellen bereits grob auf die wasserbauliche Eignung vor Ort geprüft. Dies bedeutet, dass die Kollision mit den Verkehrswegen der Wasserstraße, und auch anderen wasserbaulichen Einrichtungen grob betrachtet wurde. Hinzukommend wurde die potenzielle Anfahbarkeit der Haltestellen betrachtet, um einen möglichst schnellen und effizienten Fährverkehr aufbauen zu können.

- ii. Rheinallee (Leverkusen)
- i. Henry-Ford-Straße (Longerich)
- 14. Stammheimer Hauptstraße (Stammheim)
- 13. Mülheimer Ufer (Mülheim)
- 12. Trankgasenwerft (Agnestviertel)
- 11. Konrad-Adenauer-Ufer (Köln Hauptbahnhof)
- 10. Hermann-Pürder-Straße (Deutz)
- 9. Imhoff-Stollwerck Museum (Altstadt-Süd)
- 8. Alfred-Schütte-Allee (Deutzer Hafen)
- 7. Schönhauserstraße (Bayenthal)
- 6. Heinrich-Lübke-Ufer (Marienburg)
- 5. Weidenweg (Grünzug Poll)
- 4. Erkerstraße (Westhoven)
- 3. Friedrich-Ebert-Ufer (Köln Porz)
- 2. Hauptstraße (Zündorf)
- 1. Körberstraße (Weiss)

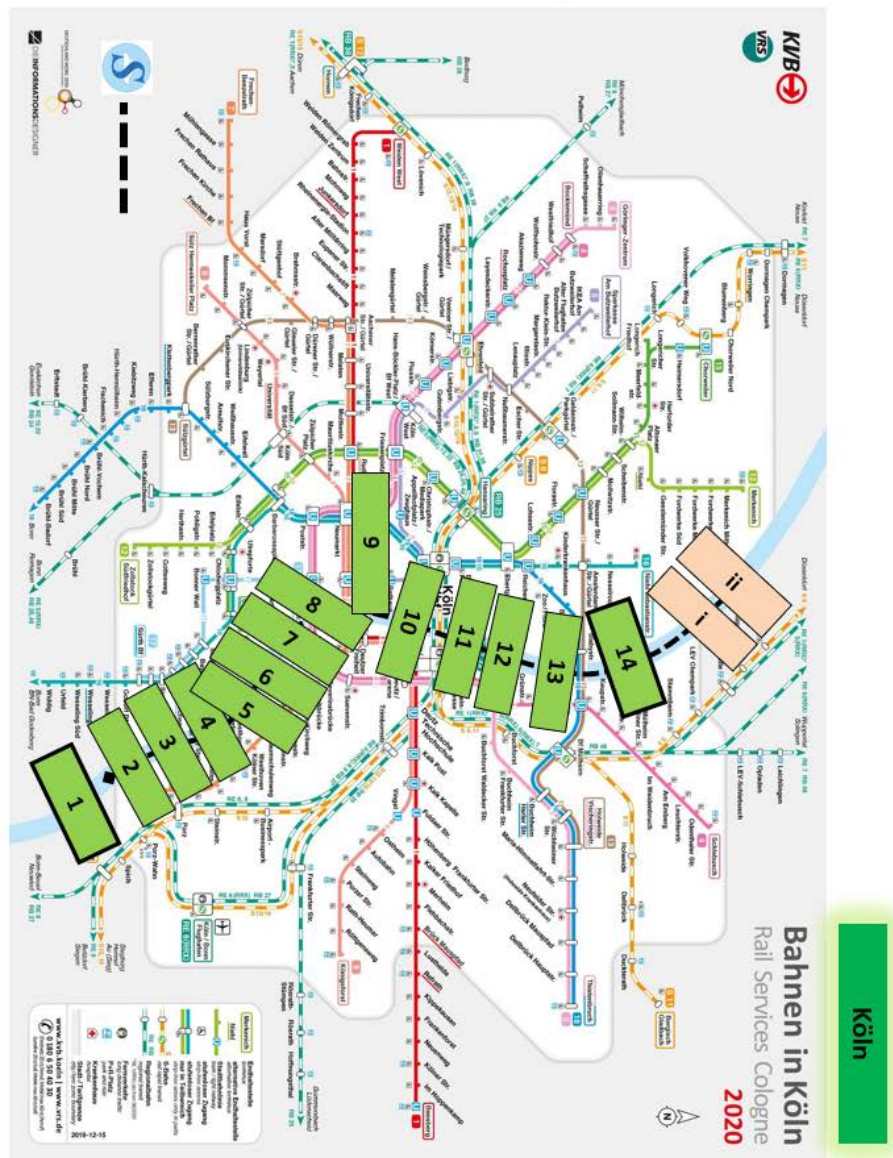
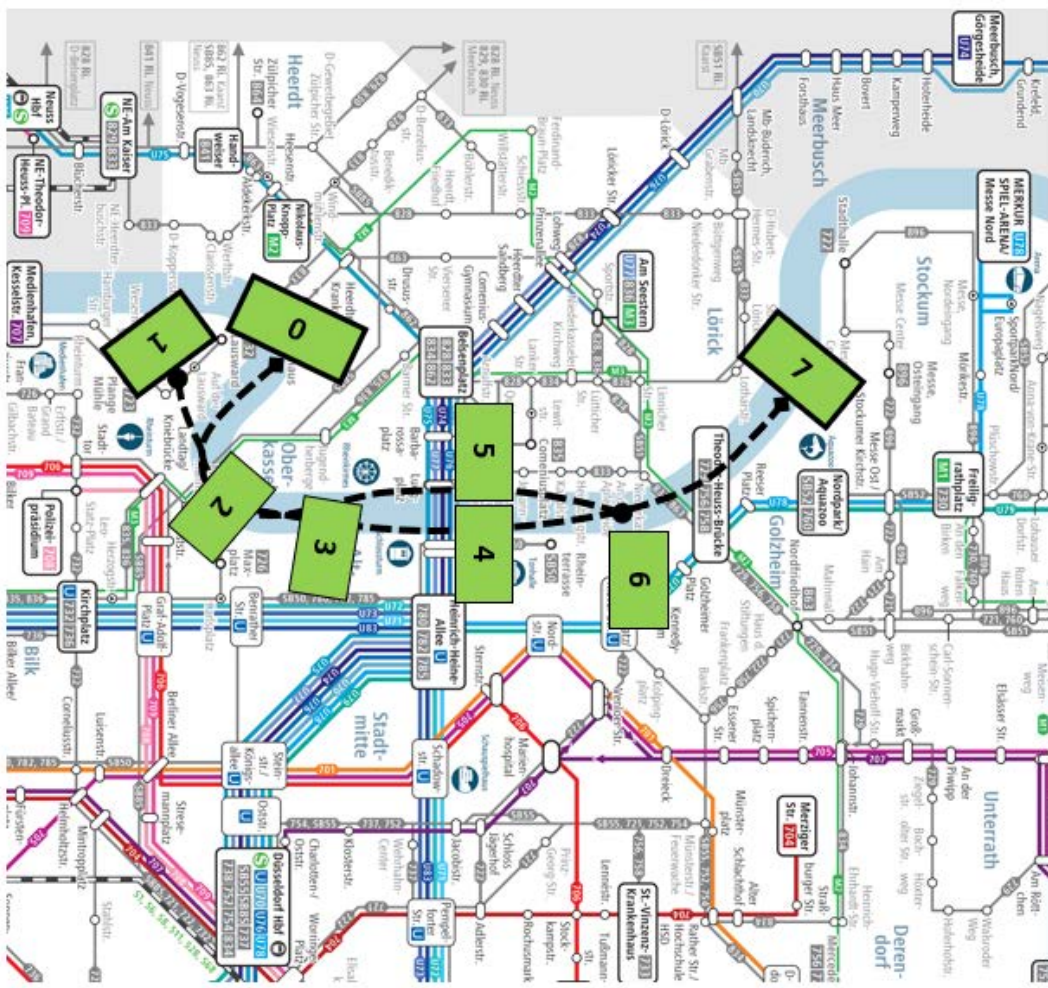


Abbildung 5, empfohlene Stationen auf dem Fahrplan in Köln

7. Messe/ Arena (Stockum)
6. T-H-Brücke (Golzhelm)
5. Luegplatz (NiederKassel)
4. Tonhalle (Altstadt)
3. Altstadt (Stadtmitte)
2. Medienhafen/Landtag (Carlstadt)
1. Hafen/ Hamm
0. Drususstraße (Heerdt)



Düsseldorf

Abbildung 6, empfohlene Stationen auf dem Fahrplan in Düsseldorf

Die zwei nachfolgenden Pläne repräsentieren die Streckenpläne in Köln und Düsseldorf. In beiden Fällen wurden die Stationen auf der Karte platziert. Der Kölner Plan zeigt vierzehn Stationen verteilt auf beide Seiten des Rheins. Demnach ist die erste Haltestelle (Weiss) etwa 19,7 Kilometer von der letzten (Stammheim) entfernt.

In Düsseldorf zeigt der Streckenplan 8,5 km Fahrstrecke mit acht Stationen, bei der die Route von Heerdt nach Stockum in Betracht gezogen wurde. Wie im folgenden Streckenplan zu sehen ist, befinden sich die Haltestellen so nahe wie möglich an anderen Verkehrsmitteln der Stadt.

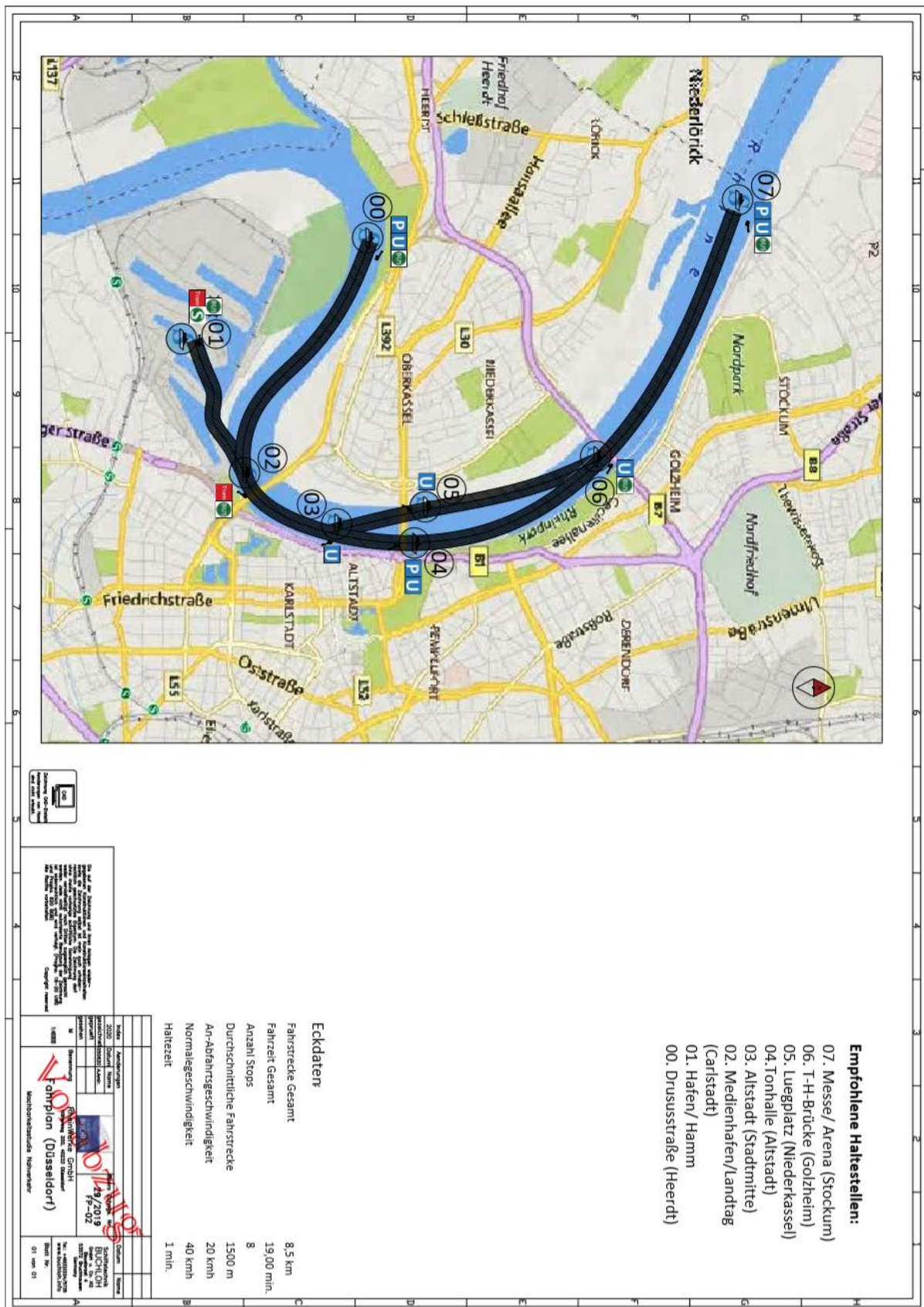
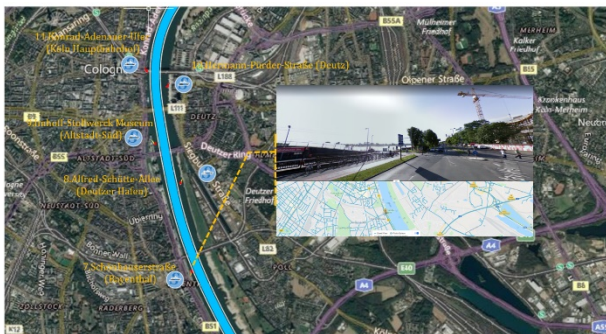
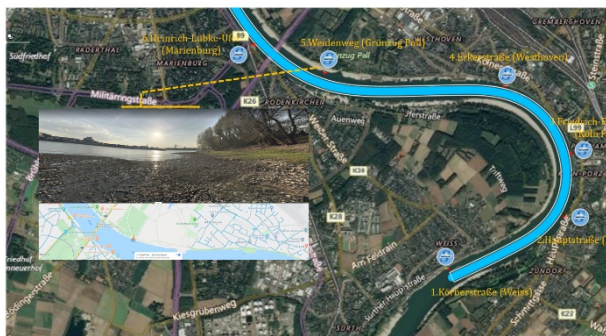
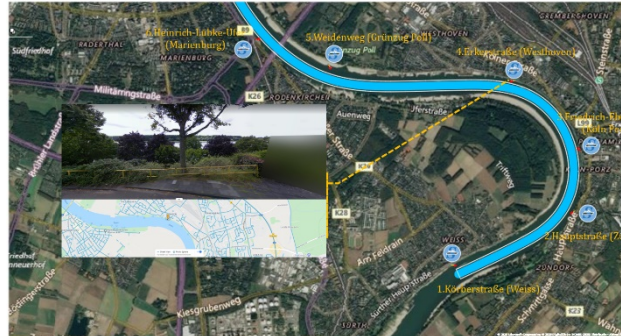
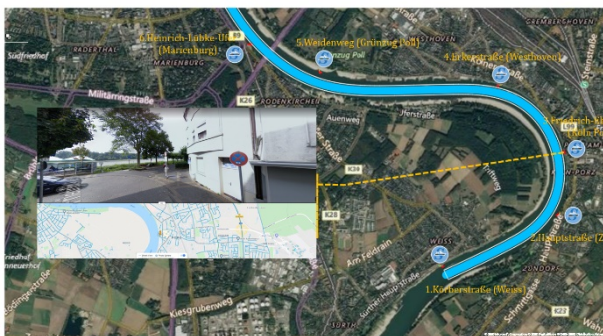
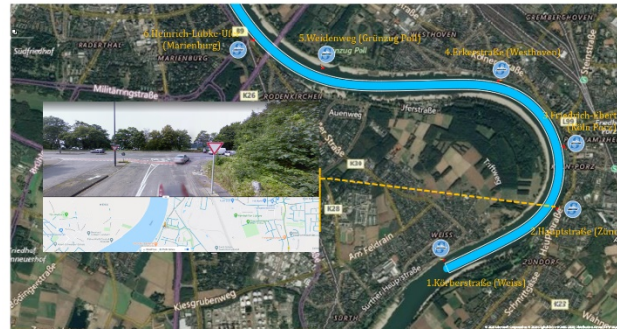


Abbildung 8, Streckenplan in Düsseldorf

Die folgenden Abbildungen zeigen die empfohlenen Stationen in verschiedenen Bildern, die von Google Maps aufgenommen wurden.



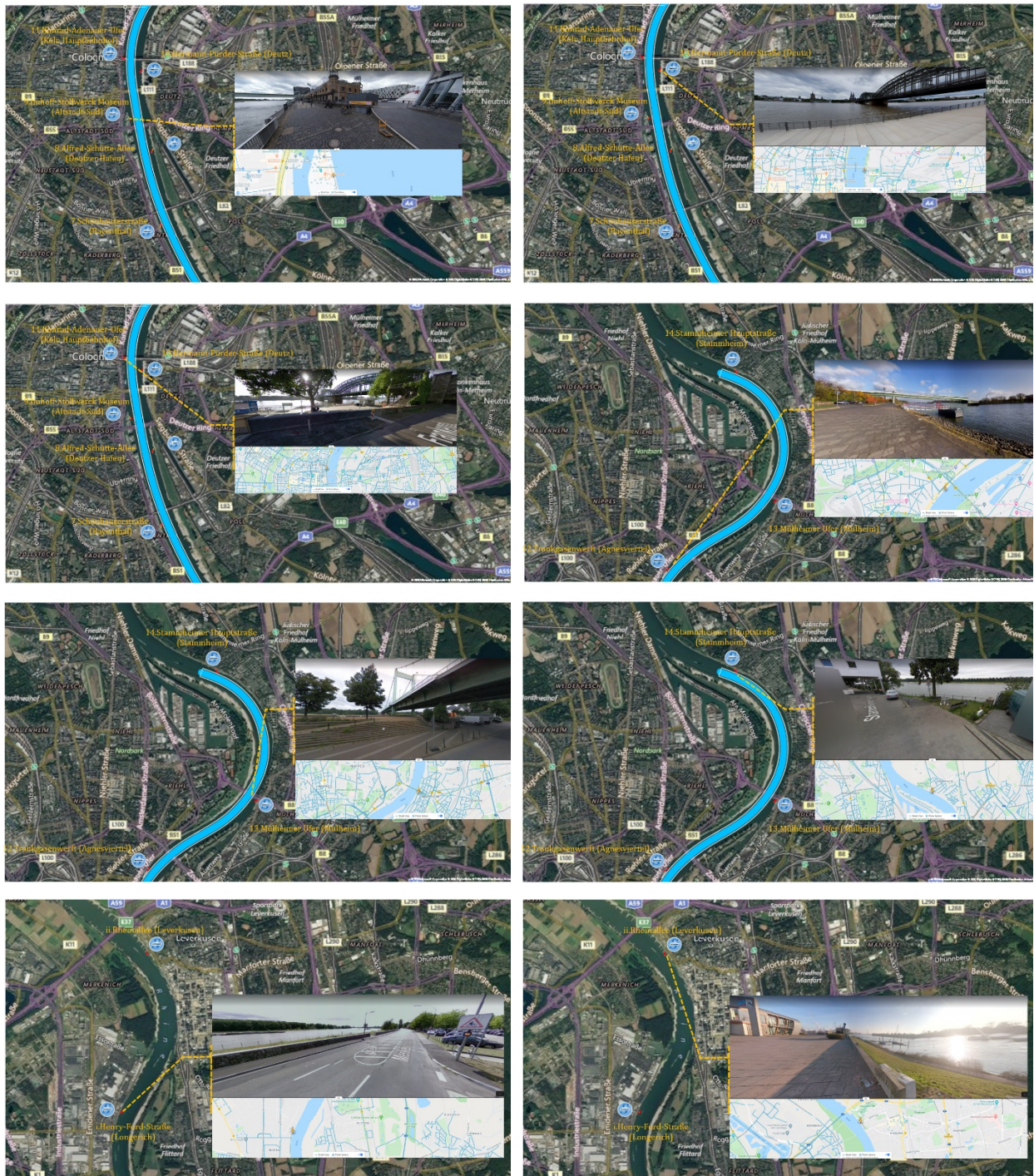


Abbildung 9, empfohlene Stationen auf Google Maps in Köln

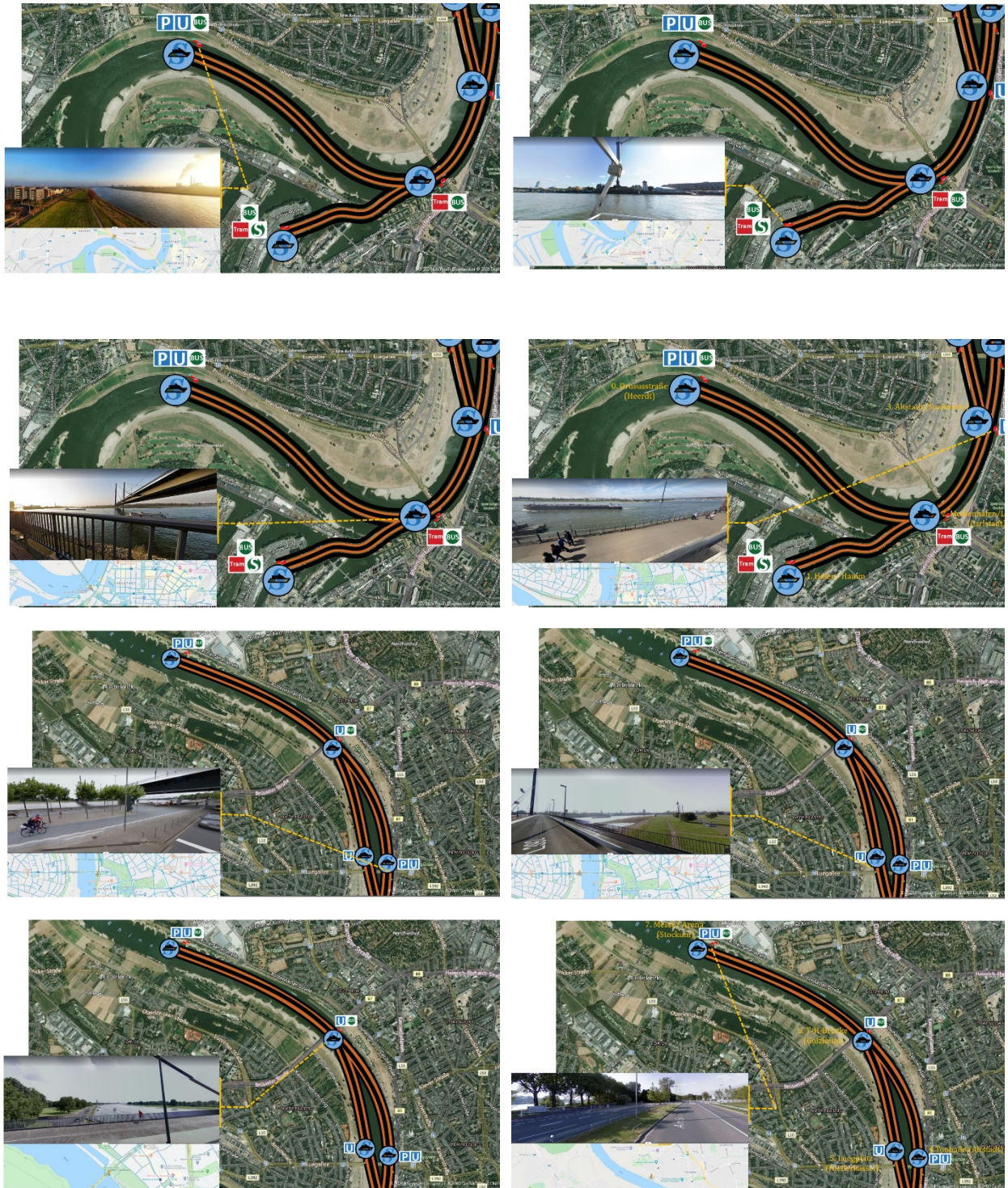


Abbildung 10, empfohlene Stationen auf Google Maps in Düsseldorf

4. Der Wasserbus

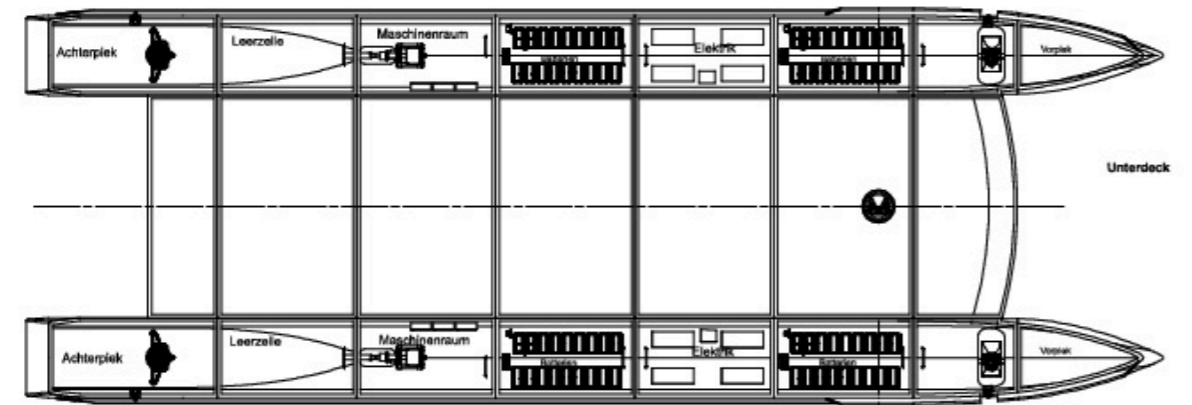
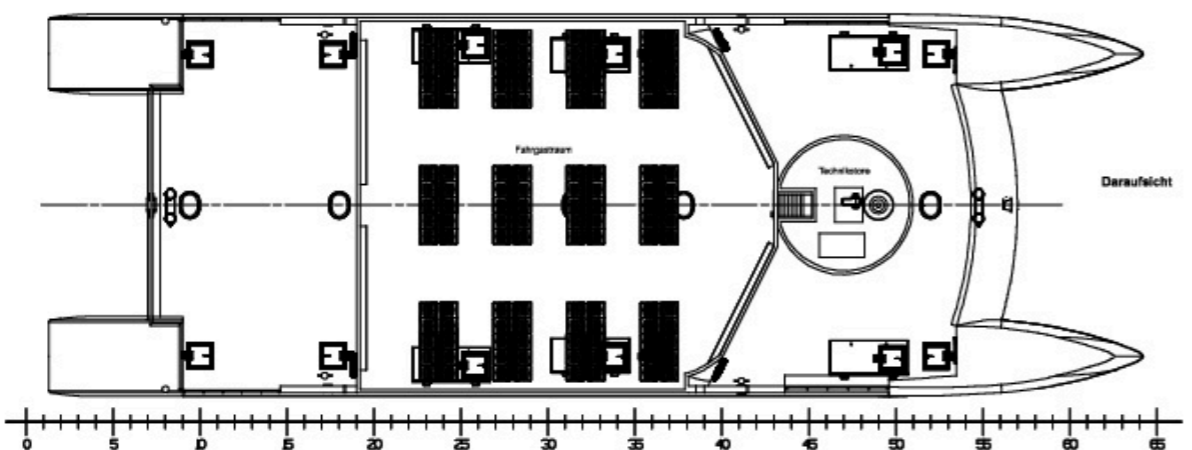
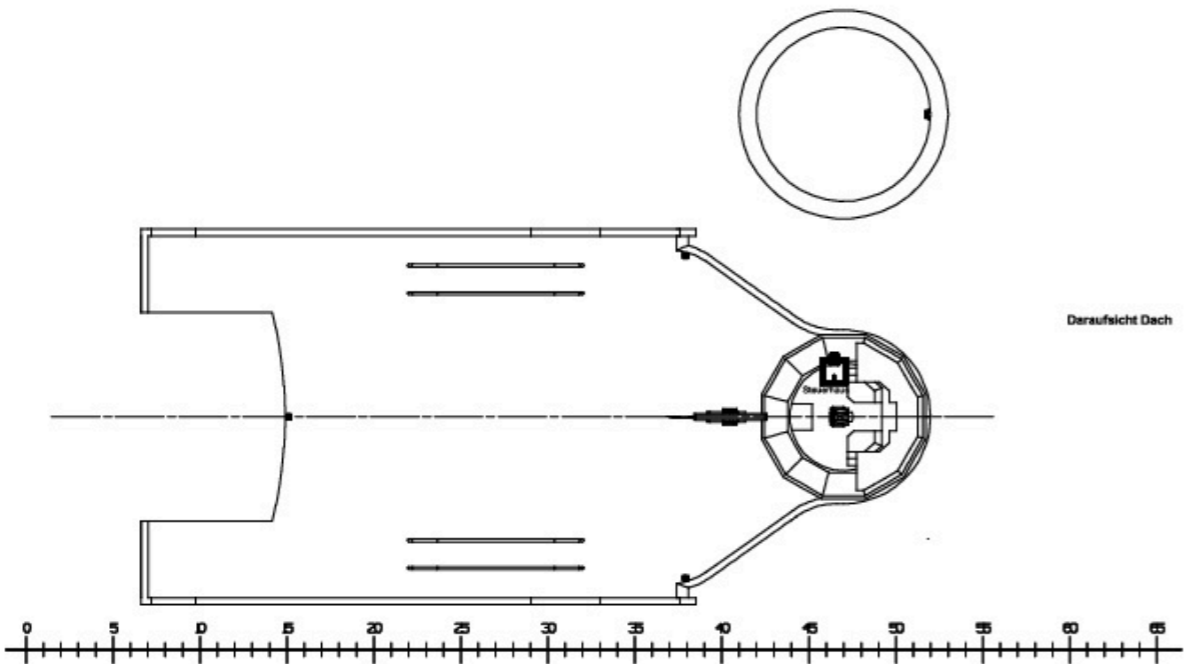
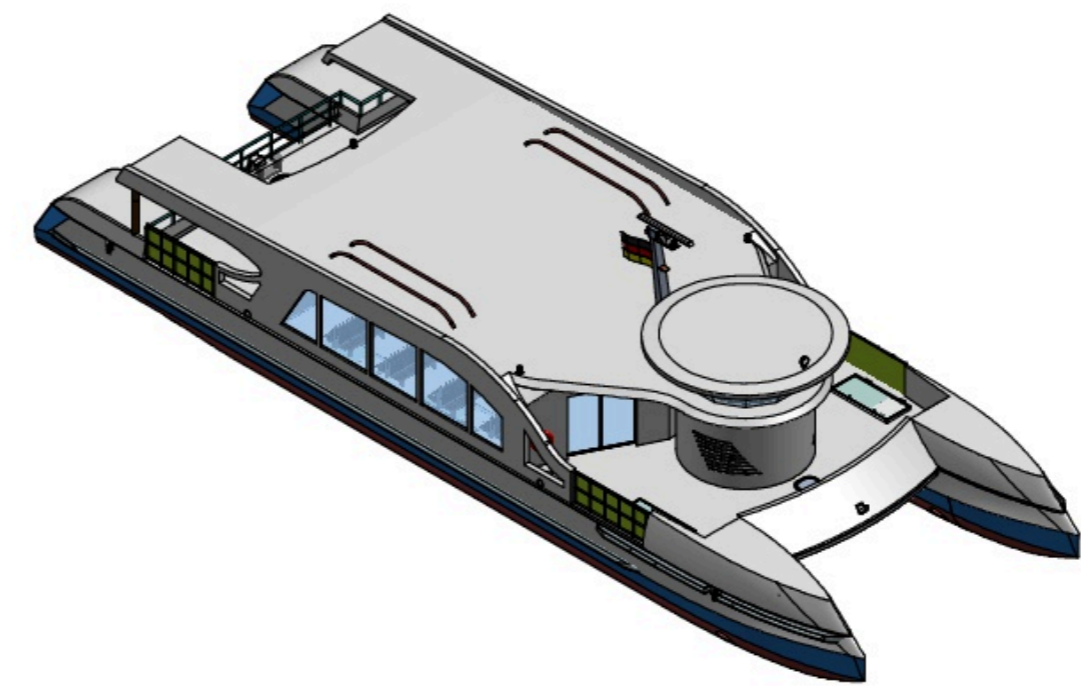
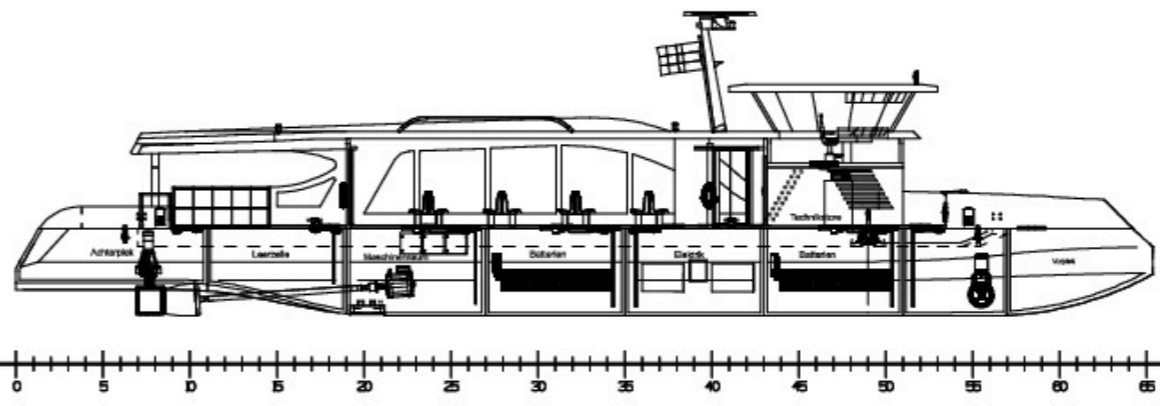
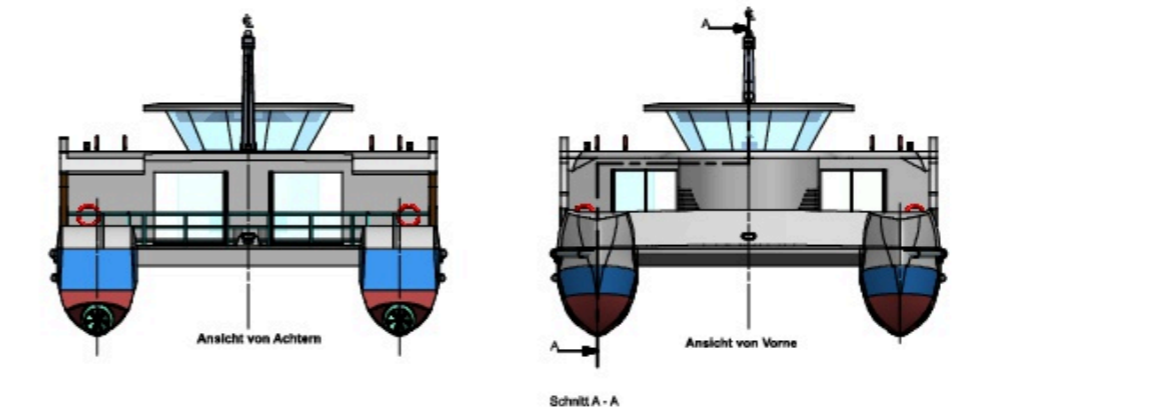
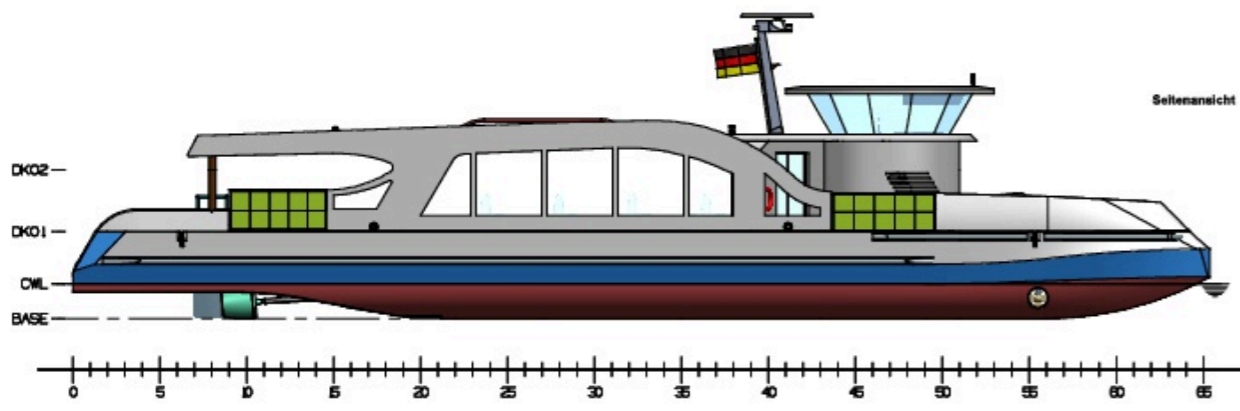
Wie bereits erwähnt, wurde die Designstudie mit dem Schwerpunkt voll elektrischer Systeme unter Berücksichtigung der wichtigen Anforderungen wie Anzahl der Fahrgäste, Geschwindigkeit und Energieverbrauch, Schiffsverdrängung und der folgenden Punkte konzipiert.

- Katamaran / Monohull besseres Verhältnis des Energiebedarfs zur Fahrtgeschwindigkeit
- Katamaran / Monohull besseres Beschleunigungsverhalten
- mehr Platz und Sitzfläche als auf Einrümpfen (Monohulls)
- Manövrierfähigkeit
- „einfache“ Verschiebung / Ergänzung der Haltestellen und einfacher Streckenausbau

Das Elektrifizieren der Fähre verbessert auch im Hinblick auf den Umweltschutz das Image der Region und kann als touristische Attraktion vermarktet werden. Die Region in der die Fähre operiert, ist stark touristisch geprägt. Die Fähre könnte hinsichtlich der verkehrspolitischen Ziele des Bundes als Leuchtturm-Projekt der Region angesehen werden. Das folgende Bild zeigt eine Abbildung dieses Schiffes.



Abbildung 11, entworfenes Katamaran-Schiff auf dem Wasser



Hauptabmessungen

Länge über alles	32,70 m
Länge CWL	32,31 m
Breite auf Spant	11,00 m
Breite über alles	11,42 m
Sitenhöhe	2,50 m
Tiefgang	1,00 m
Antriebsleistung	ca. 2x300 kW
Fahrgäste	120 Personen

		Schiffsbau BUCHLOH Göttinger Str. 40 37075 Göttingen Tel: +49 (0)551 324710 Fax: +49 (0)551 324711	
PROJECT NO.: 10-10-2020 DRAWING NO.: 10-10-2020-01 DATE: 10.10.2020 SCALE: 1:75	PROJECT NO.: 10-10-2020 DRAWING NO.: 10-10-2020-01 DATE: 10.10.2020 SCALE: 1:75	PROJECT NO.: 10-10-2020 DRAWING NO.: 10-10-2020-01 DATE: 10.10.2020 SCALE: 1:75	PROJECT NO.: 10-10-2020 DRAWING NO.: 10-10-2020-01 DATE: 10.10.2020 SCALE: 1:75
GÖTTINGEN GAP Fibre RheinWerke		SHEET 1 OF 1	

5. Geschwindigkeitsprofil

Im untenstehenden Schaubild wird der ungefähre Geschwindigkeitsverlauf der Fähre zwischen zwei Haltestellen beschrieben. Es wurde für die Kalkulationen die Vereinfachung getroffen, dass das Beschleunigen und Verzögern des Fahrzeuges binnen insgesamt einer Minute möglich ist. Somit ergibt sich zu jedem Fahrtbeginn, eine 30 sekundige Beschleunigungsphase und am Fahrtende eine 30 sekundige Verzögerungsphase. In beiden Fällen wird mit einer gemittelten Geschwindigkeit von 20 km/h gerechnet. Zwischen den 30 sekundigen Randzeiten wird die maximale Geschwindigkeit von 40 km/h angesetzt.

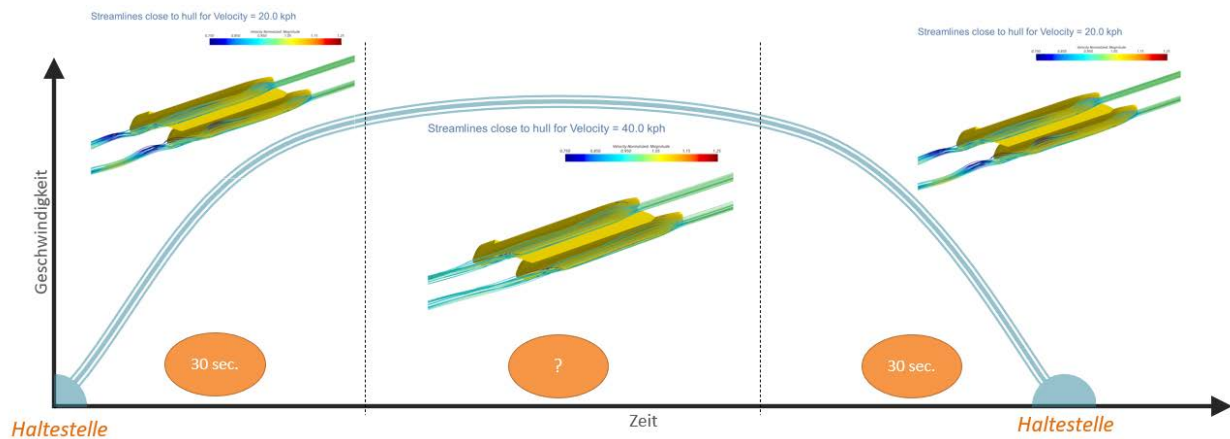


Abbildung 12, Geschwindigkeitsprofil

6. Haltestelle & Lageplan

Entsprechend dem Uferprofil des Rheins und der Wassertiefe bei Hoch- und Niedrigwasser wird die Station als Ponton ausgeführt. Der Ponton muss genügend Kapazität in Form von Fläche für die Schiffspassagiere haben, um schnelle Passagierwechsel durchführen zu können. Er wird mit zwei oder drei Dalben befestigt und über eine Rampe zum Flussufer überbrückt.

Es ist möglich, dass die Schwimmkörper weitestgehend als baugleiche Strukturen ausgeführt werden können. Es müssen dann entsprechend der Uferbeschaffenheit individuelle Anpassungen an der Zuwegung und der Landbrücke vorgenommen werden.

Die folgende Zeichnung zeigt den Lageplan in Rheinkilometer 743.

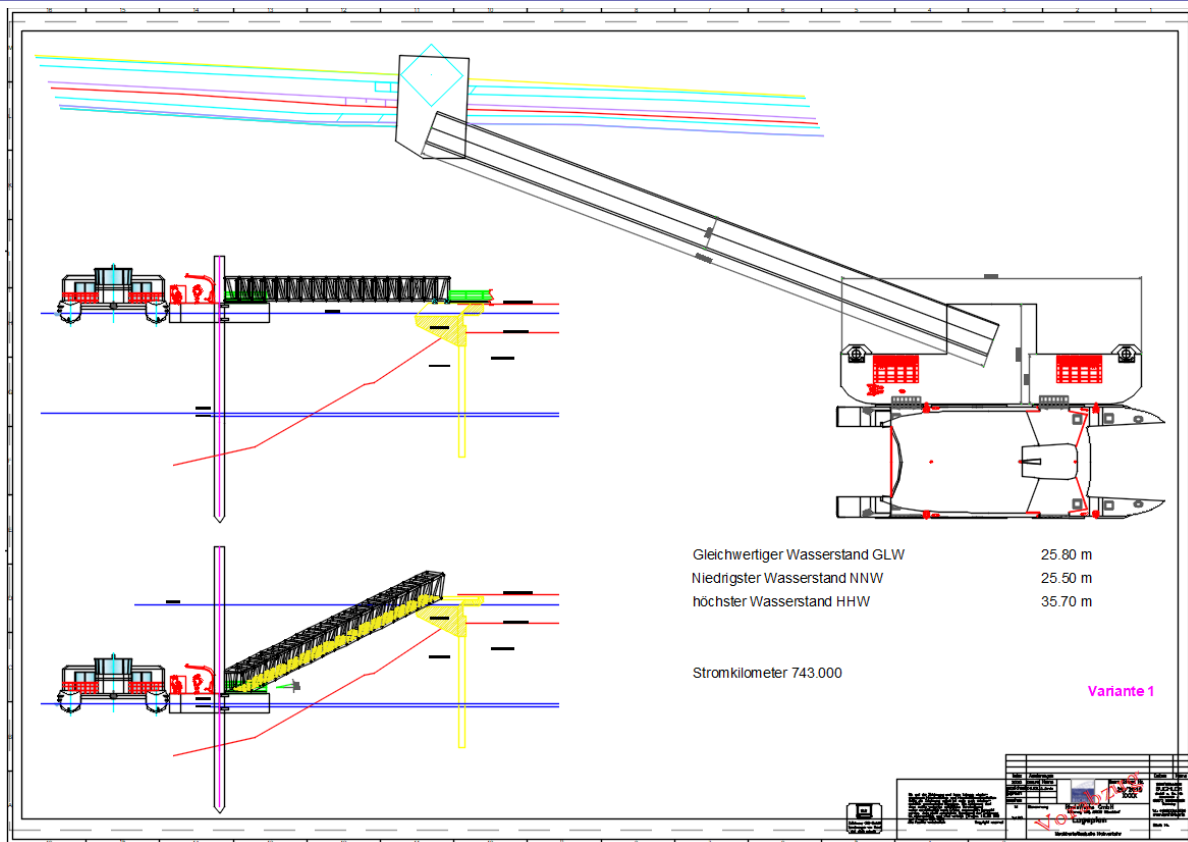


Abbildung 13, Lageplan

In Bezug auf die Anleger gilt es zu beachten:

- ein großer Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasser
- Auswahl von Gebieten, die in der Nähe anderer öffentlicher Verkehrsmittel liegen
- Flussuferkontur an jeder Haltestelle
- erforderliche Einrichtungen innerhalb der Haltestellen und effizientes Design des Festmachersystems

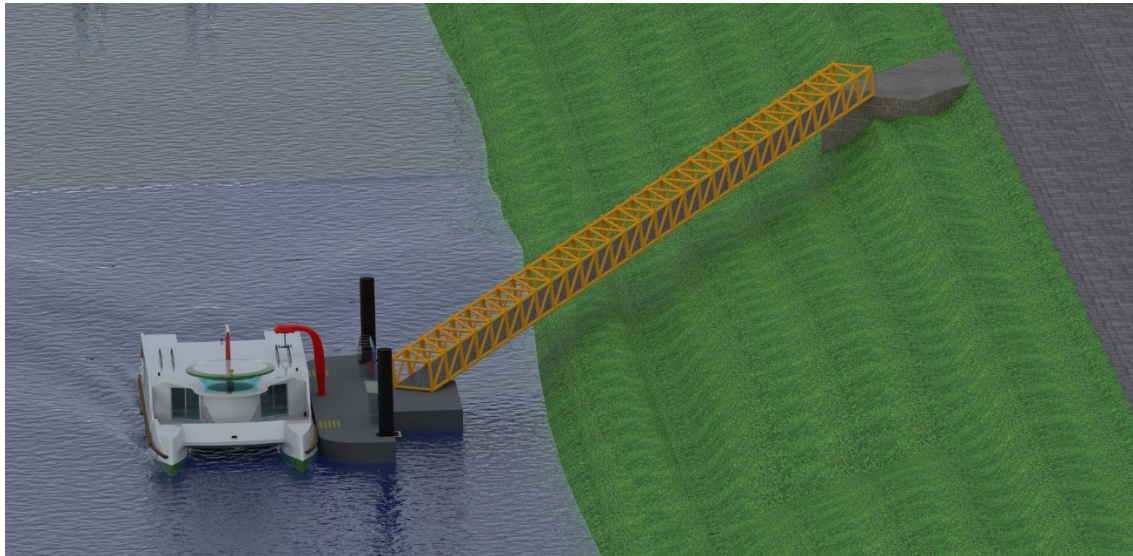


Abbildung 14, Haltestelle Design Rendering

7. Ladekontakt des Batteriesystem

Die Elektromobilität kann fossile Kraftstoffe für mobile Anwendungen ersetzen und so vor allem in Verbindung mit erneuerbaren Energien einen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz leisten. Die Notwendigkeit einer Umgestaltung der Verkehrssysteme wird im Hinblick auf ambitionierte Klimaschutzziele durch umfangreiche Studien, z.B. des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) oder die International Energy Agency (IEA) unterstrichen.

Heutzutage werden moderne Schiffe mit elektrischen Antriebssträngen ausgestattet, dies kann sich positiv auf die Energieeffizienz und die Abgasemissionen auswirken. Im Vergleich zu reinen Dieselantrieben fahren batteriebetriebene Schiffe leiser und vibrationsärmer.

Das Single-Line Diagramm stellt vereinfacht den Aufbau der Energieversorgung an Bord dar. Die Energiebereitstellung auf dem Fahrzeug ist über einen sog. DC-Link bzw. eine Gleichstromschiene geplant. Die größten Energiequellen (Batterien) sind Gleichstrom-Komponenten. Um möglichst wenige Verluste zu erfahren, wurde ein Gleichstromnetz geplant. Die Batterien speisen den Motor über einen DC/AC Wandler, des Weiteren kann eine Solaranlage in die DC-Schiene speisen. Eine Solaranlage hätte auf diesen Fahrzeugen vornehmlich den Sinn, die Elektrifizierung des

Fahrzeuges bei der Betrachtung des Fahrzeuges kenntlich zu machen. Der Ertrag aus den Solarmodulen wird in Relation zum Gesamtbedarf verschwindend gering sein.

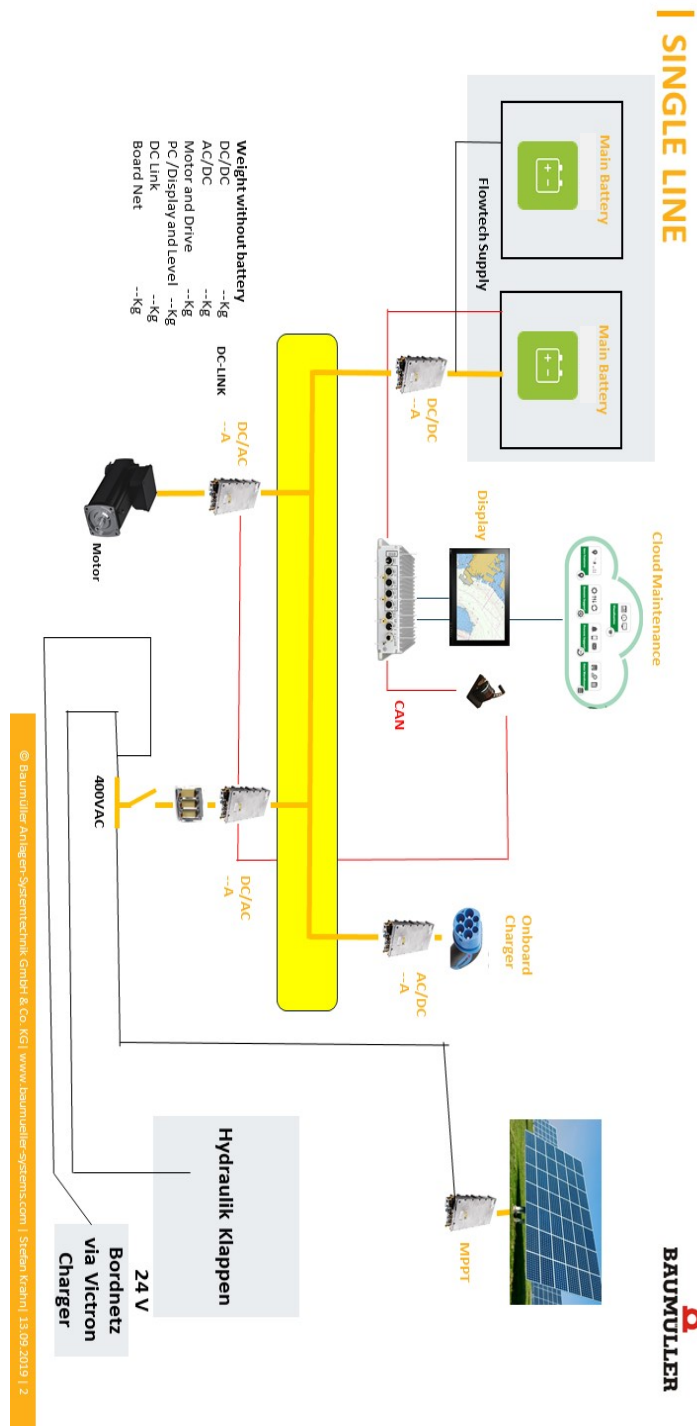


Abbildung 15, Grafisch vereinfachtes Single-Line Diagramm zur Darstellung des Systemaufbaus (Baumüller Anlagen-Systemtechnik GmbH & Co. KG, 2019)

Die Ladestation wird vom Bordsystem durch das Andocken der Fähre aktiviert. Sobald die Fähre ihre Anlegeposition erreicht, verbindet sich die Ladestromzuführung innerhalb von wenigen Sekunden mit der Onboard-Einheit und das Laden der Batterie beginnt. Die Fährladesysteme sind in der Lage, unterschiedliche Wasserstandshöhen zu kompensieren. (Faiveley Stemmann-Technik GmbH).



Abbildung 16, ChargingPANTO für Elektrobusse (Faiveley Stemmann-Technik GmbH)

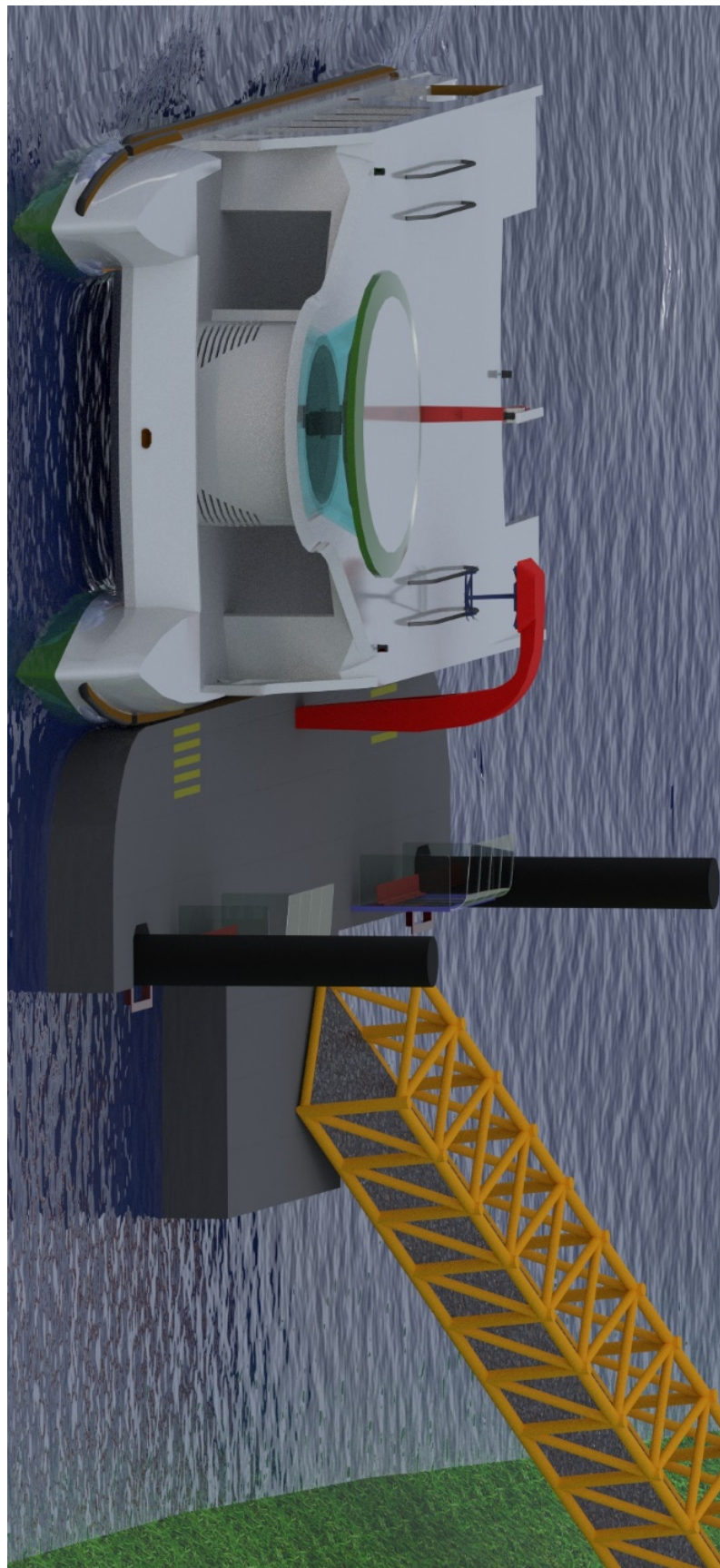


Abbildung 17, Pantograph am Anleger

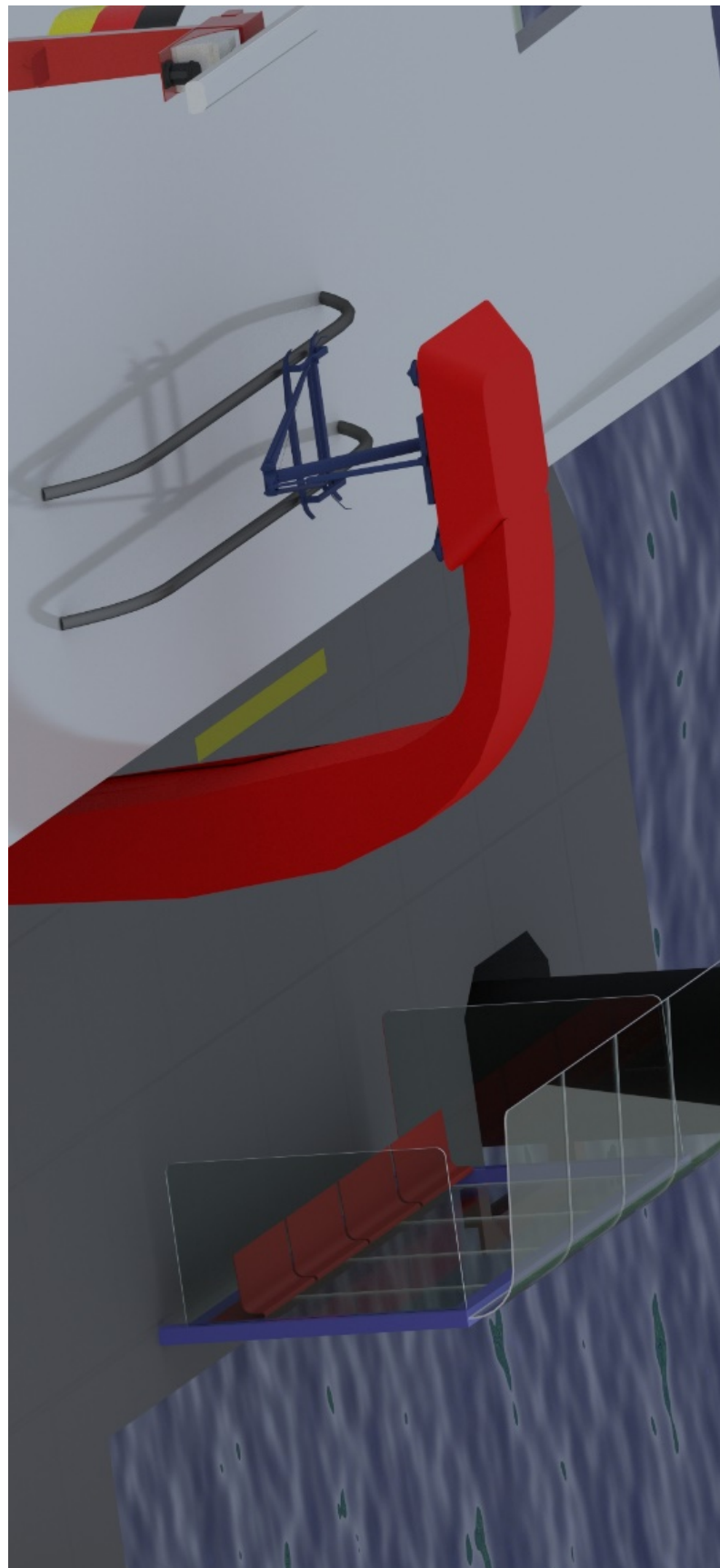


Abbildung 18, Pantograph am Anleger

am Schiff

8. Design und Auslegungen

8.1. Allgemein

Die ganze Flotte (Schiffe und Haltestellen) muss nach den Regeln der Schiffbautechnik gebaut sein. Die Auslegung und der Bau des Schiffes wird in Verbindung mit „Europäischer Ausschuss zur Ausarbeitung von Standards im Bereich der Binnenschifffahrt (CESNI)“ aus „Europäischer Standard der technischen Vorschriften für Binnenschiffe“ nachstehend "ES-TRIN" (Stand: 2019/1) genannt, durchgeführt.

8.2. Hauptabmessungen

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wird ein Fährkonzept unter Berücksichtigung sämtlicher Aspekte, die im Vorhinein aufgegriffen wurden, entwickelt. Die Hauptkriterien für diesen Entwurf bestanden aus der Anpassung an die zu erwartenden Fahrpläne, Ausarbeitung eines elektrischen Antriebssystems und die Betrachtung der geeigneten möglichen Kapazität und Geschwindigkeit. Die folgende Tabelle zeigt die Hauptabmessungen des berechneten Schiffes mit Kapazität für 120 Personen und einer Geschwindigkeit von 40 km/h.

Tabelle 1, Hauptabmessungen, Köln und Düsseldorf

Hauptabmessungen	Köln Fähre	Düsseldorf Fähre
Länge über alles	32.70 [m]	32.70 [m]
Breite	11.00 [m]	11.00 [m]
Seitenhöhe	2.50 [m]	2.50 [m]
∇	64.89 [m ³]	63.40 [m ³]
Geschwindigkeit	40 [km/h]	40 [km/h]
Fahrgäste	120 Personen	120 Personen



Auftrag & Dokument
29-2019 B-01

**Machbarkeitsstudie der Nahverkehrsflotte
am Rhein (Köln & Düsseldorf)**

 **RheinWerke**

Auftraggeber
RheinWerke

8.3. Generalplan

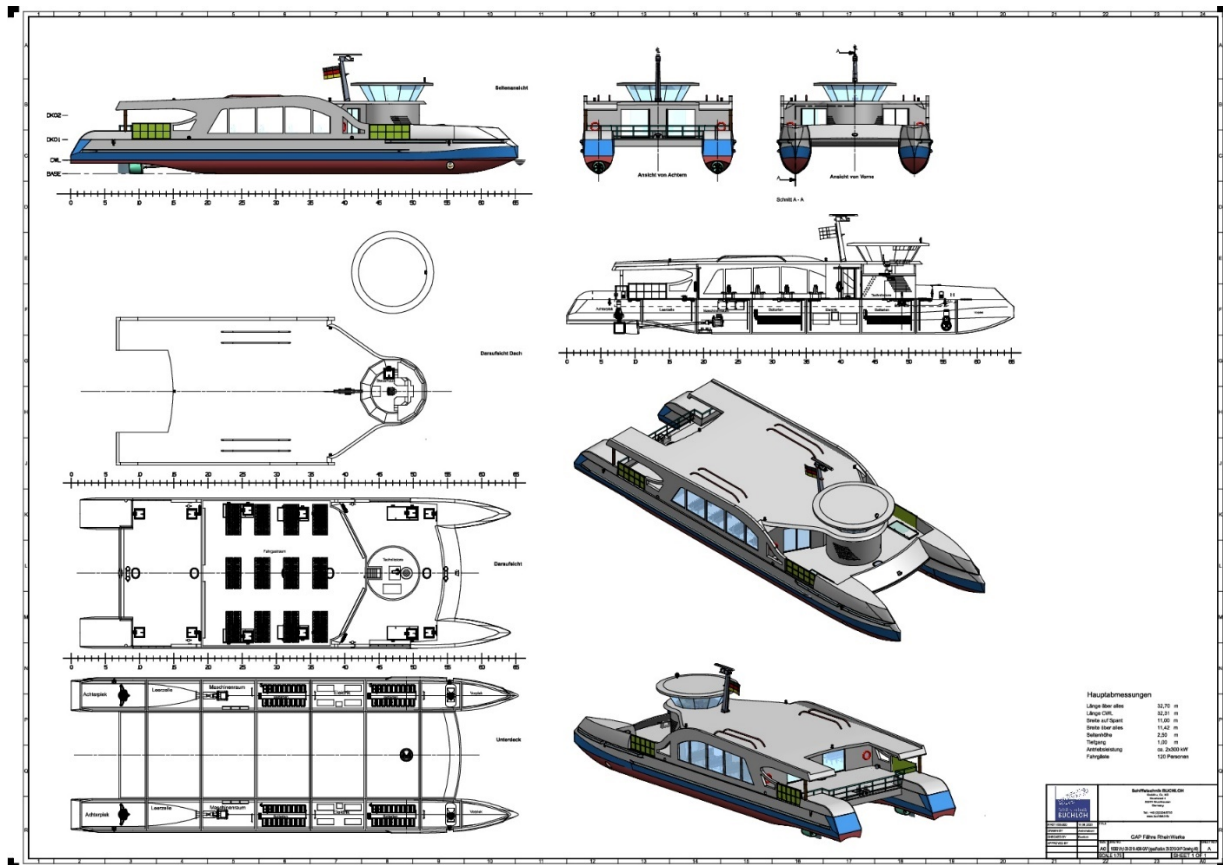


Abbildung 19, Generalplan

In der obigen Abbildung (Generalplan) sind die Ebenen der Fähre, Rumpf, Deck und Aufbau dargestellt.

Für einen Wasserbus als schnelles öffentliches Verkehrsmittel ist es wichtig, dass die Fahrgäste unter Berücksichtigung des breiten Durchgangs und der Türen auf jeder Seite schnell ein- und aussteigen können. Für einen schnellen Ein- und Ausstieg bietet sich ein Einbahnverkehr an, d.h. die Fahrgäste steigen an einer Tür ein, an der anderen Tür ist der Ausstieg. Auf dem Achterdeck ist Platz für die Mitnahme von Fahrrädern vorgesehen.

Das folgende Bild zeigt eine alternative Farbgebung des Entwurfs. Wie bereits erwähnt, wurde dieses Design anhand der mehr effizienten Eingabedaten entwickelt.



Abbildung 20, Eine Ansicht vom Schiff

Besatzung

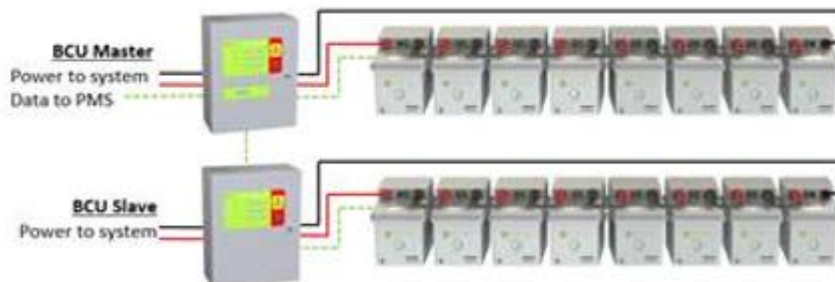
Mindestbesatzung der Fähre im Übersetzverkehr ist eine Person (Fährführer). Der Fährführer kann vom Steuerhaus aus die Ladefläche ungehindert überblicken. Für die Überwachung des achterlichen Eingangs können Kameras verwendet werden.

8.4. Batteriesysteme

Die Batteriesysteme speisen mittels je eines DC/DC-Wandlers den Gleichstromzwischenkreis. Die Batterien decken den Leistungsbedarf des Antriebssystems ab. Das Laden der Batterien erfolgt über den Landanschluss im Liegebetrieb.

Anhand des Fahrprofils und der Widerstandsprognose ist es möglich, einen Richtwert der benötigten Leistung zu ermitteln. Aus Redundanzgedanken und für die Einhaltung der Vorschriften schlagen wir zwei separate ESS (Energy Storage System) vor.

System 1:



System 2:

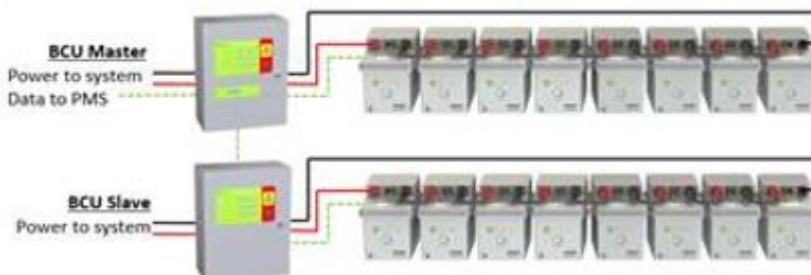


Abbildung 21, Auslegung der Batteriesysteme (EST-Floattech B.V.)

8.5. PV-Anlagen

Die Installation einer Solaranlage würde sich einerseits positiv auf die Batterieladung und andererseits negativ auf die Stabilität und das Gewicht der Fähre auswirken. Der Ertrag aus der PV Anlage kann für die Auslegung des Systems nicht herangezogen werden, da auch in Dunkelheit wie auch im Winter mit sehr geringen Strahlungseinträgen operiert wird. Des weiteren ist der Ertrag aus der PV Anlage in Relation zum gesamten Energiebedarf so gering, dass es fraglich ist, ob das mitgeführte Mehrgewicht hinsichtlich der Energiebilanz tatsächlich ein positives Ergebnis erzielt.

8.6. Brennstoffzellen

Entscheidend für die Auswahl des Brennstoffs und des Brennstoffzellentyps sind neben den Investitionskosten der Wirkungsgrad, der Energiebedarf und die Kohlenstoffdioxid-Emissionen sowohl für die Bereitstellung des Rohstoffs als auch für den eigentlichen Prozess. Der Wirkungsgrad für die Methanol Herstellung liegt zwischen circa 40% für die Flugstromvergasung von Kohle bis 70% für Verfahren auf Erdgasbasis.

Für Brennstoffzellen gibt es kein Typgenehmigungs- oder anderes Zulassungsverfahren. Der Einsatz von Brennstoffzellen ist aktuell in der Schifffahrt noch nicht geregelt. Dennoch sind die Schnittstellen zu beachten. Mitunter sind auch arbeitsschutztechnische und -rechtliche Anforderungen zu berücksichtigen. Für den Betrieb des Schiffes mit der Brennstoffzelle gelten für das Personal ebenfalls die Vorschriften zum Umgang mit brennbaren Gasen sowie der Arbeitsschutz beim Betrieb von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieb (siehe Wilms in Technische Überwachung Band 43 (2002) Nr. 10).

Ein großer Faktor bei der Entscheidung gegen Wasserstoff ist das Thema Zeit bis zur Verfügbarkeit der Fähre. Es ist ungewiss und nicht planbar, wann eine ausreichende landseitige Versorgung mit Wasserstoff zu wirtschaftlich sinnvollen Bedingungen einrichtbar ist. Der entscheidende Faktor ist, dass es nicht planbar ist, wie lange die Zulassung des Fahrzeugtyps dauert, da es eine Empfehlung des Verkehrsministeriums bei der CESNI bedarf, um das Genehmigungsverfahren anzustoßen. Dieser Vorschlag bildet keinen normalen und zeitlich definierbaren Vorgang seitens des Verkehrsministeriums und auch der CESNI.

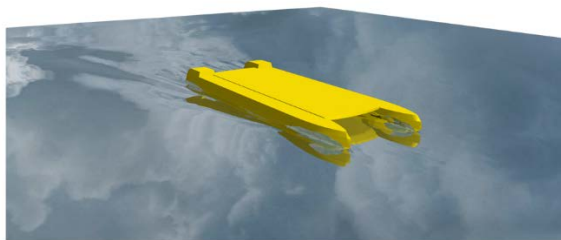
Abschließend wird für das Projekt empfohlen, das Konzept mit den Batterien beizubehalten. In den gegebenen Randbedingungen ist dies die wirtschaftlichste und in Verbindung mit Strom aus erneuerbaren Energien auch eine nachhaltige Lösung. Des Weiteren ist die Genehmigungslage klar definiert und die Verfügbarkeit der Lösung kann entsprechend sicher geplant werden.

8.7. Widerstandsberechnung

Die Widerstandsabschätzung dient als Kalkulationsgrundlage zur Festlegung der benötigten Leistung.

Hull Performance Results

29-2019-CFD02
k.buchloh
05-05-2020



Geometric Properties

Main Particular	Symbol	Value	Unit
Length at the Waterline	Lwl	32.314	m
Length Overall	Loa	32.685	m
Beam/Breadth	B	10.703	m
Draught	T	1.00	m
Displacement (Volume)	∇	64.895	m ³
Displacement (Mass)	Δ	64718.807	kg
Static Full Hull Wetted Surface	S	173.888	m ²
Block Coefficient	cB	0.188	-
Prismatic Coefficient	cP	0.738	-

29-2019-CFD02, 05-05-2020

3

Abbildung 22, CFD Rechnung Eingaben

Durch die CFD-Berechnung ist die erforderliche Leistung in verschiedenen Geschwindigkeiten bestimmt worden. Die Ergebnisse der CFD-Berechnung werden benötigt, um die erforderliche effiziente Motorleistung und schließlich die Batteriekapazität zu ermitteln. Die folgenden Diagramme und Bilder stellen verschiedene Aspekte dieser Berechnung heraus. Sie stimulieren, um die erforderliche Leistung und Energie bei verschiedenen Geschwindigkeiten genau abzuschätzen.

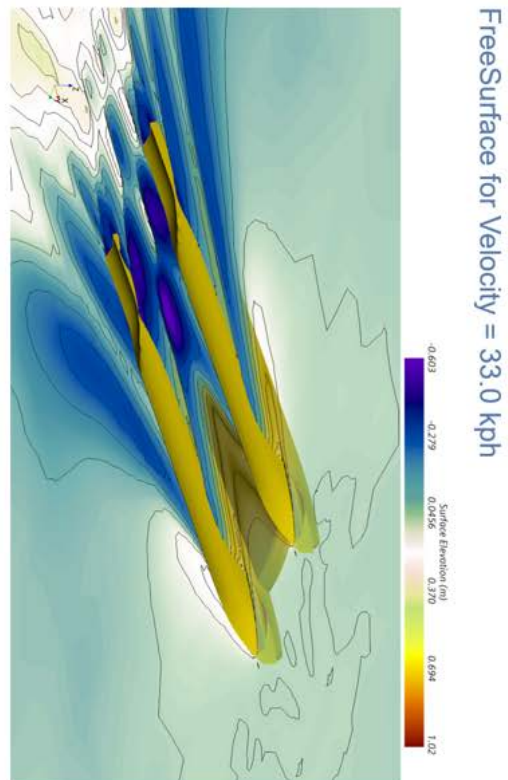
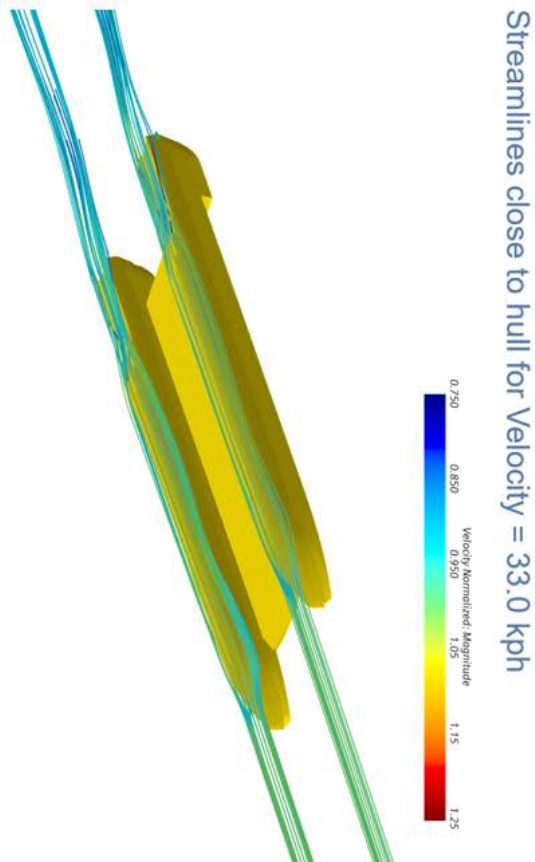


Abbildung 23, Stromlinienkontur auf 33 km/h

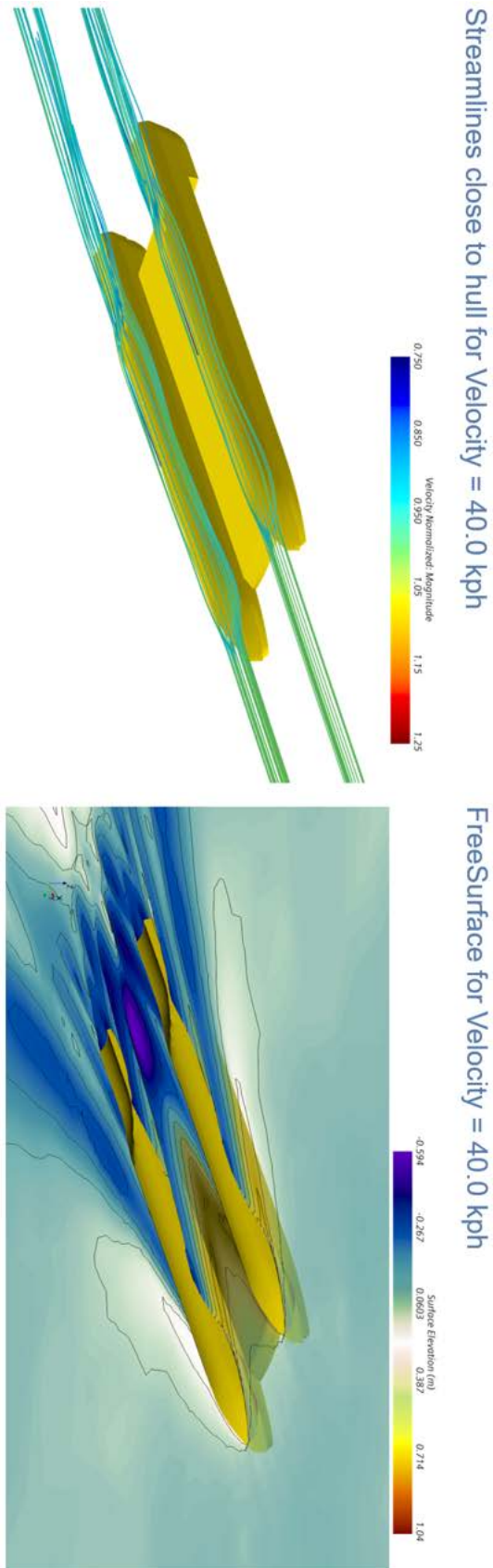


Abbildung 24, Stromlinienkontur auf 40 km/h

Hull Wall Shear Stress - Flow Direction for Velocity = 40.0 kph

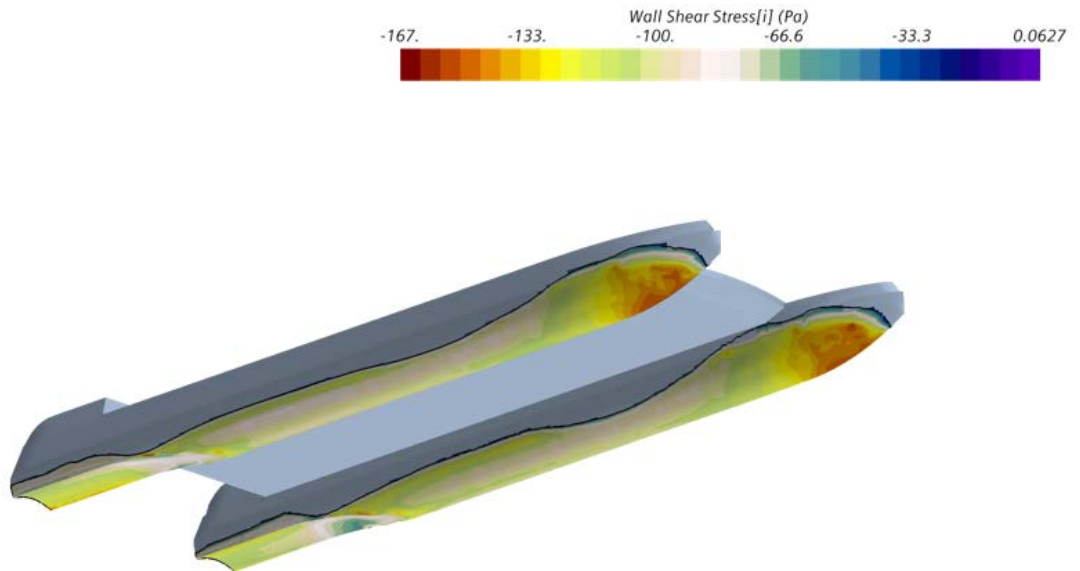


Abbildung 25, Rumpfstress bei 40 km/h

8.8. Energetische Grundlagen

Im Folgenden werden kurz die energetischen Grundlagen für die Untersuchung dargelegt, die sich aus den CFD-Rechnungen des Fahrzeugs ergeben. Die Daten, die zu der jetzigen Betrachtung herangezogen wurden, werden in der Tabelle gezeigt.

Tabelle 2, Strombedarf Eingabe Daten in Köln (rechts), Düsseldorf (links)

Eingabedaten			Eingabedaten		
Voll Geschwindigkeit	40,00	Km/h	Voll Geschwindigkeit	40,00	Km/h
Verzögerung-Beschleunigung Geschwindigkeit	20,00	Km/h	Verzögerung-Beschleunigung Geschwindigkeit	20,00	Km/h
Flussaufwärts (Up River Current-N)	7,00	Km/h	Flussaufwärts (Up River Current-N)	7,00	Km/h
Flussabwärts (Down River Current-S)	-7,00	Km/h	Flussabwärts (Down River Current-S)	-7,00	Km/h
Max. Berechnende Leistung	941,90	kW	Max. Berechnende Leistung	941,90	kW
Ladeleistung [kW]	1600,00	kW	Ladeleistung [kW]	1000,00	kW
Pauszeit	01:00	min	Pauszeit	01:00	min
LetztehaltstelleStopMinuten	00:12	min	LetztehaltstelleStopMinuten	00:10	min
Gesamte Strecke	19700	m	Gesamte Strecke	8500	m
Startzeitpunkt	05:00:00	Uhr	Startzeitpunkt	05:00:00	Uhr
Verzögerung / Beschleunigung	00:01	min	Verzögerung / Beschleunigung	00:01	min
Leistung Bordverbraucher	25,00	kW	Leistung Bordverbraucher	25,00	kW
Batteriegesamtkapazität	1000	kWh	Batteriegesamtkapazität	800	kWh

Die folgenden Schaubilder zeigen den Verlauf des Energiebedarfs rund um die Uhr. Jedes Schaubild zeigt, dass der Betrachtungszeitraum um 05:00 Uhr beginnt und um

22:30 Uhr endet. Über den Tag benötigt das Fahrzeug 6800 kWh in Köln und 5700 kWh in Düsseldorf. Es wurden ca. 17 Stunden pro Tag betrachtet.

Die Schritte in den Diagrammen zeigen die kumulierte Energie, welche in die Batterien geladen wurde, d. h. die großen Schritte veranschaulichen die Lademenge von bis zu 320 kWh in Köln und 168 kWh in Düsseldorf für 10 bis 12 Minuten an der ersten oder letzten Station. Für jede Minute werden in Köln und Düsseldorf bis zu 27 kWh bzw. 16,7 kWh berechnet.

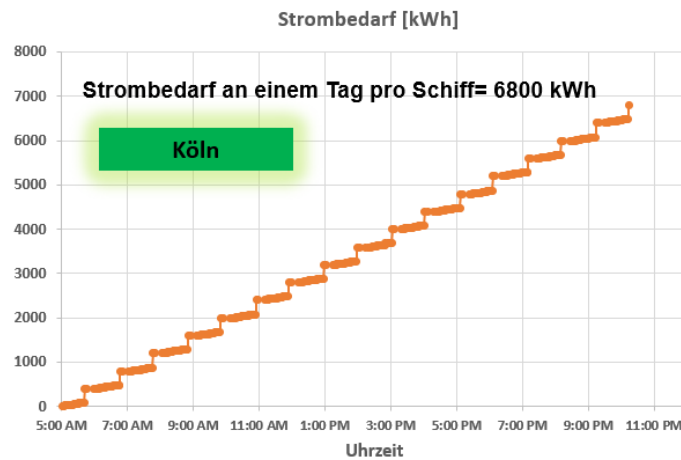


Abbildung 26, Kumulierter Energiebedarf über einen repräsentativen Tag in Köln

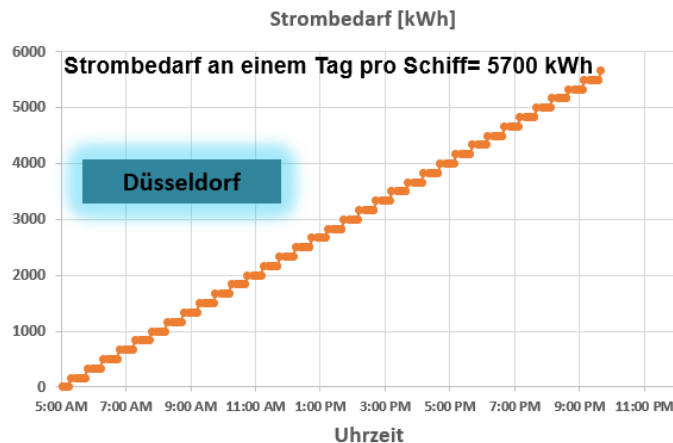


Abbildung 27, Kumulierter Energiebedarf über einen repräsentativen Tag in Düsseldorf

Die folgenden Tabellen veranschaulichen Daten für die obigen Diagramme in einer Hin- und Rückfahrt in Köln bzw. Düsseldorf.

Machbarkeitsstudie der Nahverkehrsflotte am Rhein (Köln & Düsseldorf)

Tabelle 3, Hinfahrt Daten in Köln

Strcke	Ladestation	Strcke [m]	Engine ahead Speed/Over Water	Speed over ground	Uhrzeit Start	Verzögerung / Beschleunigung [min]	Füllspeed [min]	Leistung Voll[kW]	Leistung L-B [kW]	Leistung Bordverbraucher [kW]	Pausezeit [min]	Liegezeit/ Uhrzeit Ende	Zeit/Dauer [min]	Energiebedarf Antrieb [kWh]	Energie Bordverbraucher [kWh]	Energiebedarf Gesamt [kWh]	Ladeleistung [kW]	Ladekapazität [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [%]
01-02	N	1900	33	40	05:00:00	00:01	00:02:10	608	255	25,00	00:00	5:03:10 AM	00:03:10	26,21	1,32	27,53	0	0,00	822,48	82,25%
Stop an 02	N	0	0	0	05:03:10	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:04:10 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	822,06	82,21%
02-03	N	1000	33	40	05:04:10	00:01	00:01:00	608	255	25,00	00:00	5:06:10 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	806,84	80,68%
Stop an 03	N	0	0	0	05:06:10	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:07:10 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	806,43	80,64%
03-04	N	1400	33	40	05:07:10	00:01	00:01:25	608	255	25,00	00:00	5:09:35 AM	00:02:25	18,61	1,01	19,61	0	0,00	786,81	78,68%
Stop an 04	N	0	0	0	05:09:35	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:10:35 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	813,06	81,31%
04-05	N	2800	33	40	05:10:35	00:01	00:03:31	608	255	25,00	00:00	5:15:06 AM	00:04:31	39,89	1,88	41,77	0	0,00	771,30	77,13%
Stop an 05	N	0	0	0	05:15:06	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:16:06 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	770,88	77,09%
05-06	N	1100	33	40	05:16:06	00:01	00:01:00	608	255	25,00	00:00	5:18:06 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	755,66	75,57%
Stop an 06	N	0	0	0	05:18:06	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:19:06 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	755,25	75,52%
06-07	N	1900	33	40	05:19:06	00:01	00:02:10	608	255	25,00	00:00	5:22:16 AM	00:03:10	26,21	1,32	27,53	0	0,00	727,72	72,77%
Stop an 07	N	0	0	0	05:22:16	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:23:16 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	727,30	72,73%
07-08	N	1300	33	40	05:23:16	00:01	00:01:16	608	255	25,00	00:00	5:25:32 AM	00:02:16	17,09	0,94	18,03	0	0,00	709,27	70,93%
Stop an 08	N	0	0	0	05:25:32	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:26:32 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	735,52	73,55%
08-09	N	700	33	40	05:26:32	00:01	00:01:00	608	255	25,00	00:00	5:28:32 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	720,31	72,03%
Stop an 09	N	0	0	0	05:28:32	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:29:32 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	719,89	71,99%
09-10	N	900	33	40	05:29:32	00:01	00:01:00	608	255	25,00	00:00	5:31:32 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	704,67	70,47%
Stop an 10	N	0	0	0	05:31:32	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:32:32 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	704,26	70,43%
10-11	N	400	33	40	05:32:32	00:01	00:01:00	608	255	25,00	00:00	5:34:32 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	689,04	68,90%
Stop an 11	N	0	0	0	05:34:32	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:35:32 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	715,29	71,53%
11-12	N	1300	33	40	05:35:32	00:01	00:01:16	608	255	25,00	00:00	5:37:48 AM	00:02:16	17,09	0,94	18,03	0	0,00	697,26	69,73%
Stop an 12	N	0	0	0	05:37:48	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:38:48 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	696,84	69,68%
12-13	N	2300	33	40	05:38:48	00:01	00:02:46	608	255	25,00	00:00	5:42:34 AM	00:03:46	32,29	1,57	33,86	0	0,00	662,99	66,30%
Stop an 13	N	0	0	0	05:42:34	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	5:43:34 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	662,57	66,26%
13-14	N	2700	33	40	05:43:34	00:01	00:03:22	608	255	25,00	00:00	5:47:56 AM	00:04:22	38,37	1,82	40,19	0	0,00	622,39	62,24%
Stop an 14	N	0	0	0	05:47:56	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:12	5:59:56 AM	00:12:00	0,00	5,00	5,00	1600	320,00	850,00	85,00%

Dauer 00:47:56

Machbarkeitsstudie der Nahverkehrsflotte am Rhein (Köln & Düsseldorf)

Tabelle 4, Rückfahrt Daten in Köln

Strecke	Labestation	Strecke [m]	Engine ahead Speed/Over Water	Speed over ground	Uhrzeit Start	Verzögerung / Beschleunigung [min]	Füllspeed [min]	Leistung Voll[kW]	Leistung V-8 [kW]	Leistung Bordverbraucher [kW]	Pauszeit [min]	Liegezeit Uhrzeit Ende	Zeit/Dauer [min]	Energiebedarf Antrieb [kWh]	Energie Bordverbraucher [kWh]	Energiebedarf Gesamt [kWh]	Ladeleistung [kW]	Ladekapazität [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [%]	
14-13	S	2700	40	33	05:59:56	00:01	00:04:05	941,900559	255	25,00	00:00	6:05:01 AM	00:05:05	68,35	2,12	70,47	0	0,00	779,53	77,95%	
Stop an 13	S	0	0	0	06:05:01	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:06:01 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	779,11	77,91%	
13-12	S	2300	40	33	06:06:01	00:01	00:03:21	941,900559	255	25,00	00:00	6:10:22 AM	00:04:21	56,84	1,81	58,65	0	0,00	720,46	72,05%	
Stop an 12	S	0	0	0	06:10:22	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:11:22 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	720,05	72,00%	
12-11	S	1300	40	33	06:11:22	00:01	00:01:32	941,900559	255	25,00	00:00	6:13:54 AM	00:02:32	28,32	1,06	29,38	0	0,00	690,67	69,07%	
Stop an 11	S	0	0	0	06:13:54	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:14:54 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	716,92	71,69%	
11-10	S	400	40	33	06:14:54	00:01	00:01:00	941,900559	255	25,00	00:00	6:16:54 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	696,14	69,61%	
Stop an 10	S	0	0	0	06:16:54	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:17:54 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	695,72	69,57%	
10-09	S	900	40	33	06:17:54	00:01	00:01:00	941,900559	255	25,00	00:00	6:19:54 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	674,94	67,49%	
Stop an 09	S	0	0	0	06:19:54	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:20:54 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	674,52	67,45%	
09-08	S	700	40	33	06:20:54	00:01	00:01:00	941,900559	255	25,00	00:00	6:22:54 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	653,74	65,37%	
Stop an 08	S	0	0	0	06:22:54	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:23:54 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	679,99	68,00%	
08-07	S	1300	40	33	06:23:54	00:01	00:01:32	941,900559	255	25,00	00:00	6:26:26 AM	00:02:32	28,32	1,06	29,38	0	0,00	650,61	65,06%	
Stop an 07	S	0	0	0	06:26:26	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:27:26 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	650,20	65,02%	
07-06	S	1900	40	33	06:27:26	00:01	00:02:38	941,900559	255	25,00	00:00	6:31:04 AM	00:03:38	45,59	1,51	47,10	0	0,00	603,09	60,31%	
Stop an 06	S	0	0	0	06:31:04	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:32:04 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	602,68	60,27%	
06-05	S	1100	40	33	06:32:04	00:01	00:01:10	941,900559	255	25,00	00:00	6:34:14 AM	00:02:10	22,56	0,90	23,47	0	0,00	579,21	57,92%	
Stop an 05	S	0	0	0	06:34:14	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:35:14 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	578,79	57,88%	
05-04	S	2800	40	33	06:35:14	00:01	00:04:16	941,900559	255	25,00	00:00	6:40:30 AM	00:05:16	71,23	2,19	73,42	0	0,00	505,37	50,54%	
Stop an 04	S	0	0	0	06:40:30	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:41:30 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	1600	26,67	531,62	53,16%	
04-03	S	1400	40	33	06:41:30	00:01	00:01:43	941,900559	255	25,00	00:00	6:44:13 AM	00:02:43	31,20	1,13	32,33	0	0,00	499,29	49,93%	
Stop an 03	S	0	0	0	06:44:13	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:45:13 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	498,87	49,89%	
03-02	S	1000	40	33	06:45:13	00:01	00:01:00	941,900559	255	25,00	00:00	6:47:13 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	478,09	47,81%	
Stop an 02	S	0	0	0	06:47:13	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:01	6:48:13 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	477,67	47,77%	
02-01	S	1900	40	33	06:48:13	00:01	00:02:38	941,900559	255	25,00	00:00	6:51:51 AM	00:03:38	45,59	1,51	47,10	0	0,00	430,57	43,06%	
Stop an 01	S	0	0	0	06:51:51	00:00	00:00:00	0	0	25,00	00:12	7:03:51 AM	00:12:00	0,00	5,00	5,00	1600	320,00	745,57	74,56%	
																				Dauer	01:51:51

Machbarkeitsstudie der Nahverkehrsflotte am Rhein (Köln & Düsseldorf)

Tabelle 5, Hin- und Rückfahrt Datentabelle in Düsseldorf

Strecke	Ladestation	Strecke [m]	Engine ahead Speed/Over Water	Speed Over ground	Uhrzeit Start	Verzögerung / Beschleunigung [min]	Fullspeed [min]	Leistung Voll[kW]	Leistung V-B [kW]	Reisezeit [h]	Leistung Bordverbraucher [kW]	Pauszeit [min]	Liegezeit / Uhrzeit Ende	Zeit/Dauer [min]	Energiebedarf Antrieb [kWh]	Energie Bordverbraucher [kWh]	Energiebedarf Gesamt [kWh]	Ladeleistung [kW]	Ladekapazität [kWh]	Batteriekapazität [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [kWh]	Batteriekapazität mit Ladung [%]
01-02	N	2300	33	40	05:00:00	00:01	00:02:46	608	255	0,0461	25,00	00:00	5:03:46 AM	00:03:46	32,29	1,57	33,86	0	0,00	646,15	80,77%	
Stop an 02	N	0	0	0	05:03:46	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:04:46 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	645,73	80,72%	
02-03	N	1000	33	40	05:04:46	00:01	00:01:00	608	255	0,0167	25,00	00:00	5:06:46 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	630,51	78,81%	
Stop an 03	N	0	0	0	05:06:46	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:07:46 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	630,10	78,76%	
03-04	N	900	33	40	05:07:46	00:01	00:01:00	608	255	0,0167	25,00	00:00	5:09:46 AM	00:02:00	14,38	0,83	15,22	0	0,00	614,88	76,86%	
Stop an 04	N	0	0	0	05:09:46	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:10:46 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	614,46	76,81%	
04-05	N	1900	33	40	05:10:46	00:01	00:02:10	608	255	0,0361	25,00	00:00	5:13:56 AM	00:03:10	26,21	1,32	27,53	0	0,00	586,94	73,37%	
Stop an 05	N	0	0	0	05:13:56	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:14:56 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	586,52	73,32%	
05-06	N	2400	33	40	05:14:56	00:01	00:02:55	608	255	0,0486	25,00	00:00	5:18:51 AM	00:03:55	33,81	1,63	35,44	0	0,00	551,08	68,89%	
Stop an 06	N	0	0	0	05:18:51	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:10	5:28:51 AM	00:10:00	0,00	4,17	4,17	1000	166,67	680,00	85,00%	
06-05	S	2400	40	33	05:28:51	00:01	00:03:32	941,9	255	0,0589	25,00	00:00	5:33:23 AM	00:04:32	59,72	1,89	61,61	0	0,00	618,39	77,30%	
Stop an 05	S	0	0	0	05:33:23	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:34:23 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	617,98	77,25%	
05-04	S	1900	40	33	05:34:23	00:01	00:02:38	941,9	255	0,0439	25,00	00:00	5:38:01 AM	00:03:38	45,59	1,51	47,10	0	0,00	570,87	71,36%	
Stop an 04	S	0	0	0	05:38:01	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:39:01 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	570,46	71,31%	
04-03	S	900	40	33	05:39:01	00:01	00:01:00	941,9	255	0,0167	25,00	00:00	5:41:01 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	549,68	68,71%	
Stop an 03	S	0	0	0	05:41:01	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:42:01 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	549,26	68,66%	
03-02	S	1000	40	33	05:42:01	00:01	00:01:00	941,9	255	0,0167	25,00	00:00	5:44:01 AM	00:02:00	19,95	0,83	20,78	0	0,00	528,48	66,06%	
Stop an 02	S	0	0	0	05:44:01	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:01	5:45:01 AM	00:01:00	0,00	0,42	0,42	0	0,00	528,06	66,01%	
02-01	S	2300	40	33	05:45:01	00:01	00:03:21	941,9	255	0,0558	25,00	00:00	5:49:22 AM	00:04:21	56,84	1,81	58,65	0	0,00	469,41	58,68%	
Stop an 01	S	0	0	0	05:49:22	00:00	00:00:00	0	0	0,0000	25,00	00:10	5:59:22 AM	00:10:00	0,00	4,17	4,17	1000	166,67	631,91	78,99%	

Dauer 00:18:51

Dauer 00:49:22

Darüber hinaus zeigen die folgenden Diagramme den Grad der Ladung der Batterien zu jeder Tageszeit. An welchen Stationen die Fähre aufgeladen werden soll, wird durch die Stufenlinien deutlich.

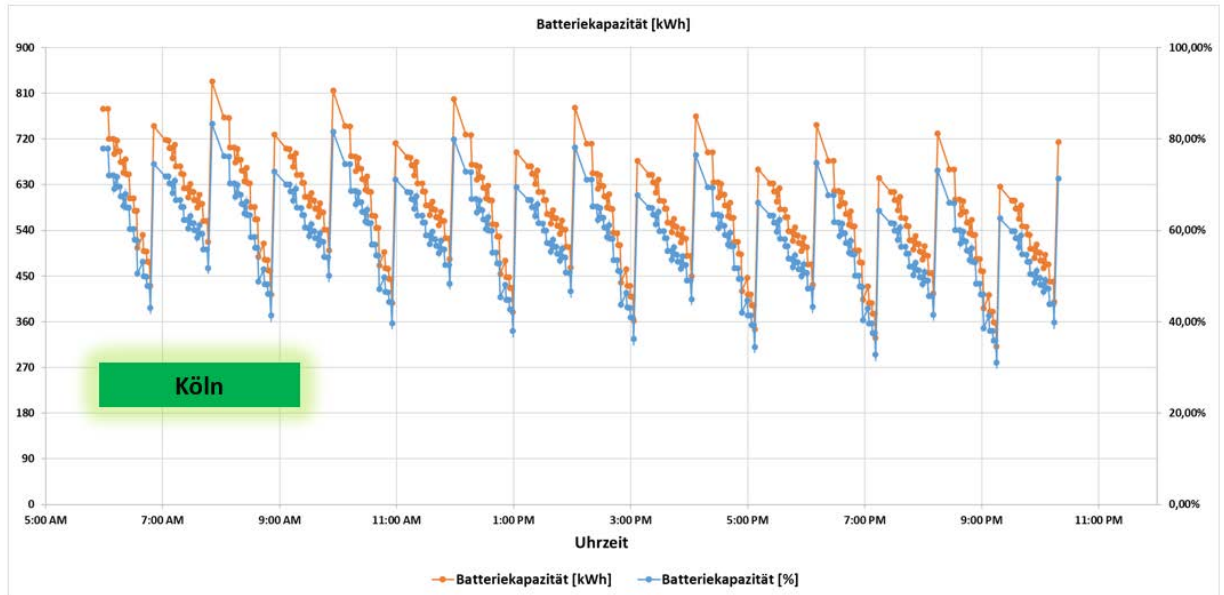


Abbildung 28, Batteriekapazität auf kWh und Prozent in Abhängigkeit der Uhrzeit in Köln

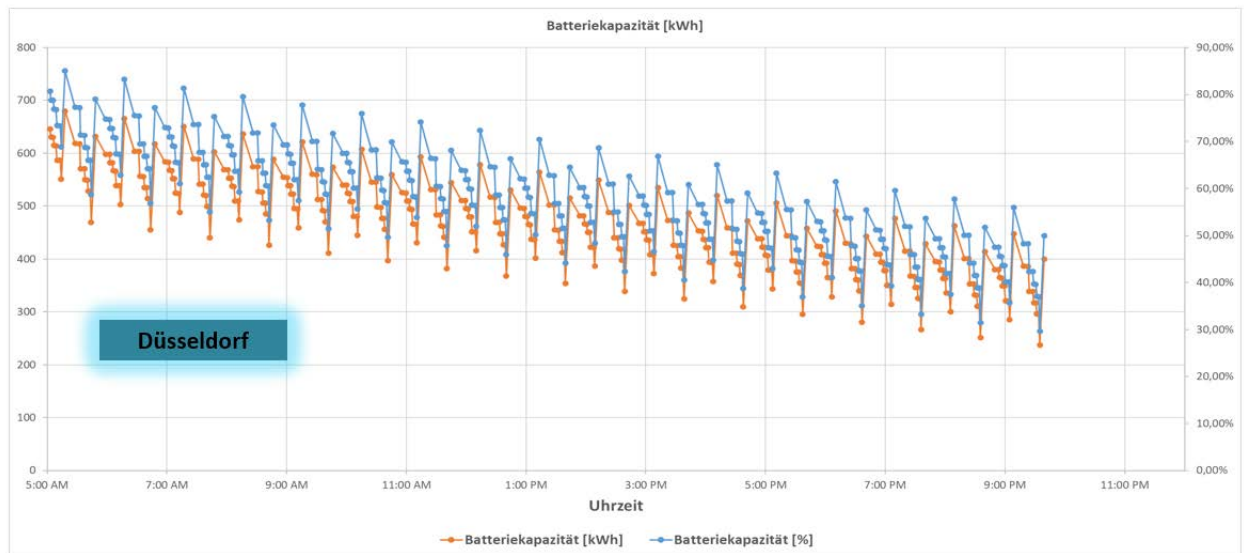


Abbildung 29, Batteriekapazität auf kWh und Prozent in Abhängigkeit der Uhrzeit in Düsseldorf

8.9. Städtischer Verkehrsvergleich

Mit Blick auf den öffentlichen Stadtverkehr in Deutschland ermittelte der VDV für 2009 den durchschnittlichen Verbrauch aller spurgebundenen Elektrofahrzeuge und setzte diesen in Relation zur erbrachten Verkehrsleistung (kWh pro 100 Personenkilometer).

Abhängig von dem jeweils betrachteten Verkehrssystem variiert der betreffende Wert zwischen 8,9 kWh/100 Pkm (Trolleybusse) und 12,5 kWh/100 Pkm (Stadtbahnen beziehungsweise Straßenbahnen) (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 08.11.2019). Die Übersicht über den transportleistungsspezifischen durchschnittlichen Energieverbrauch (folgendes Diagramm) eines elektrisch betriebenen Wasserbusses zeigt 16,00 kWh/100 Pkm.

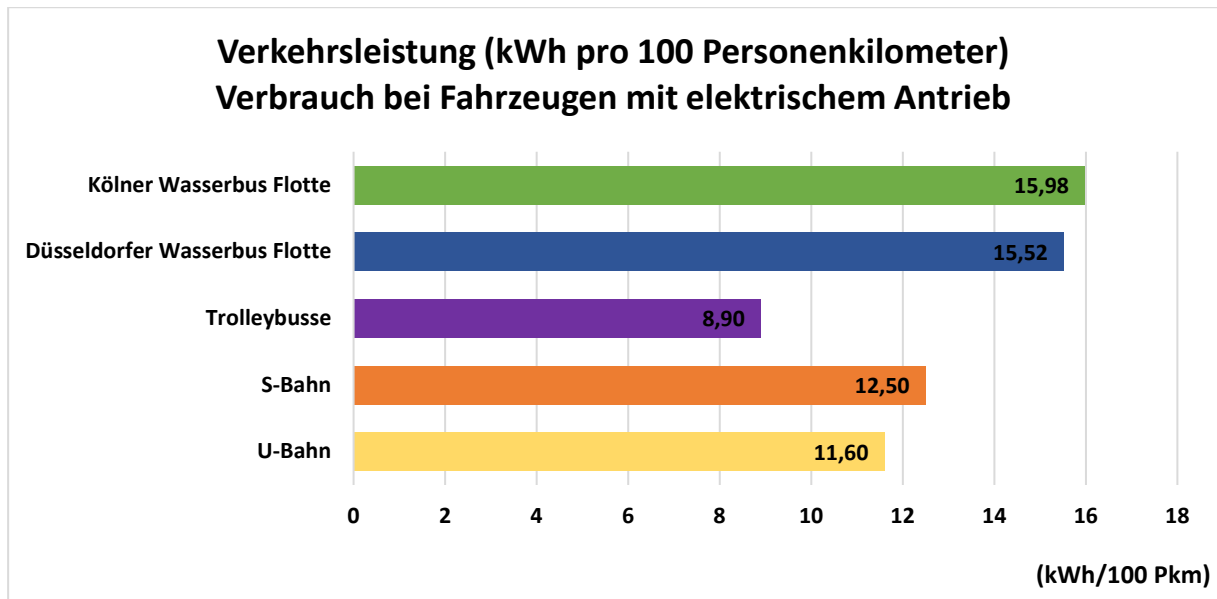
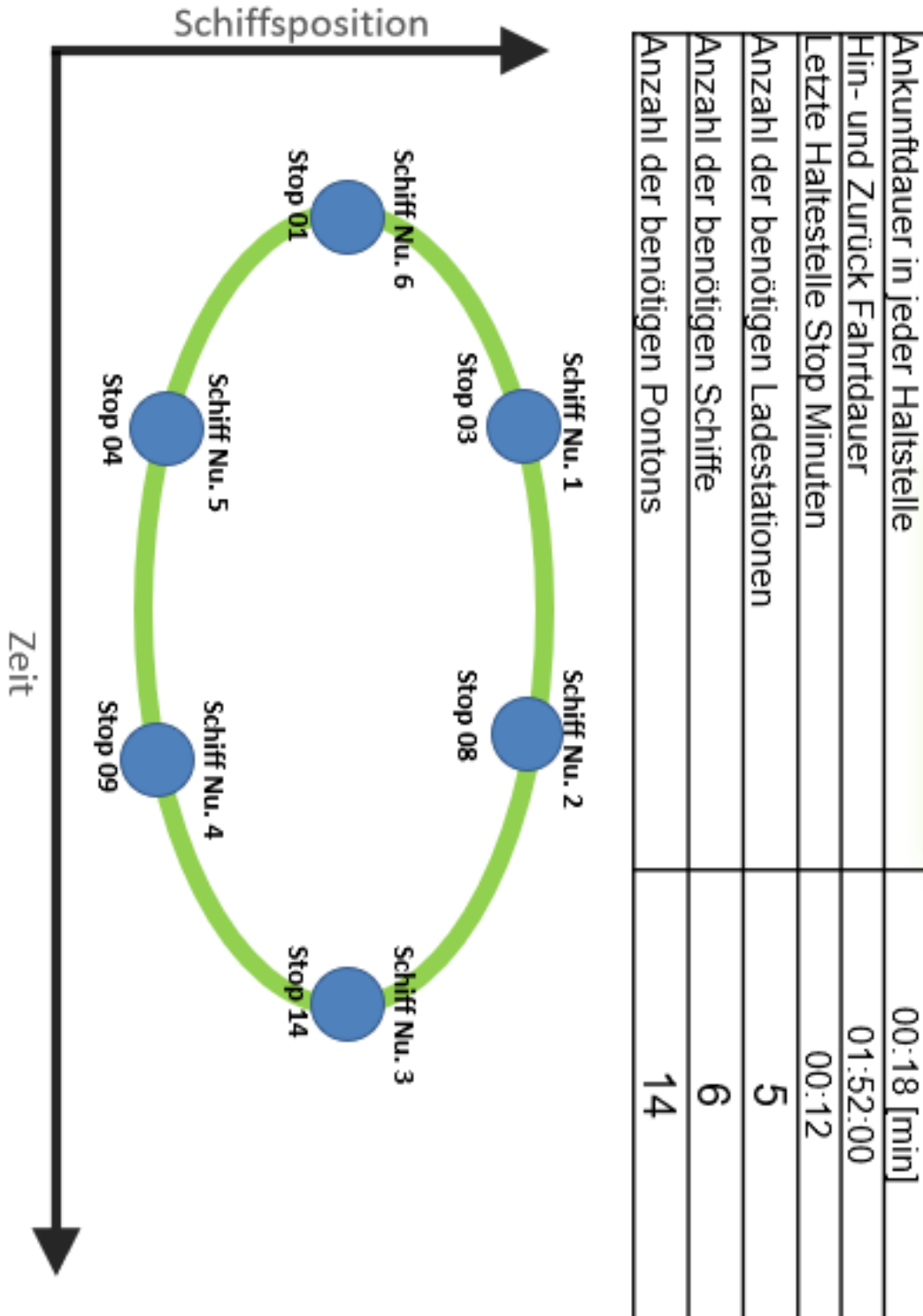


Abbildung 30, Durchschnittsenergieverbrauch im öffentlichen Stadtverkehr mit elektrischem Antrieb (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 08.11.2019) in Deutschland, verglichen mit dem Wasserbus

9. Kostenschätzung

9.1. Fahrzeug- und Haltestellenanzahl

In Bezug auf die Reisezeit und die Entfernung von 18 Minuten zwischen zwei Schiffen auf jeder Route werden sechs Schiffe als Flotte in Köln und drei Schiffe in Düsseldorf bestimmt. Die folgenden Tabellen und Diagramme zeigen die Konfiguration in jedem Ort und die Fahrtdauer.



Köln

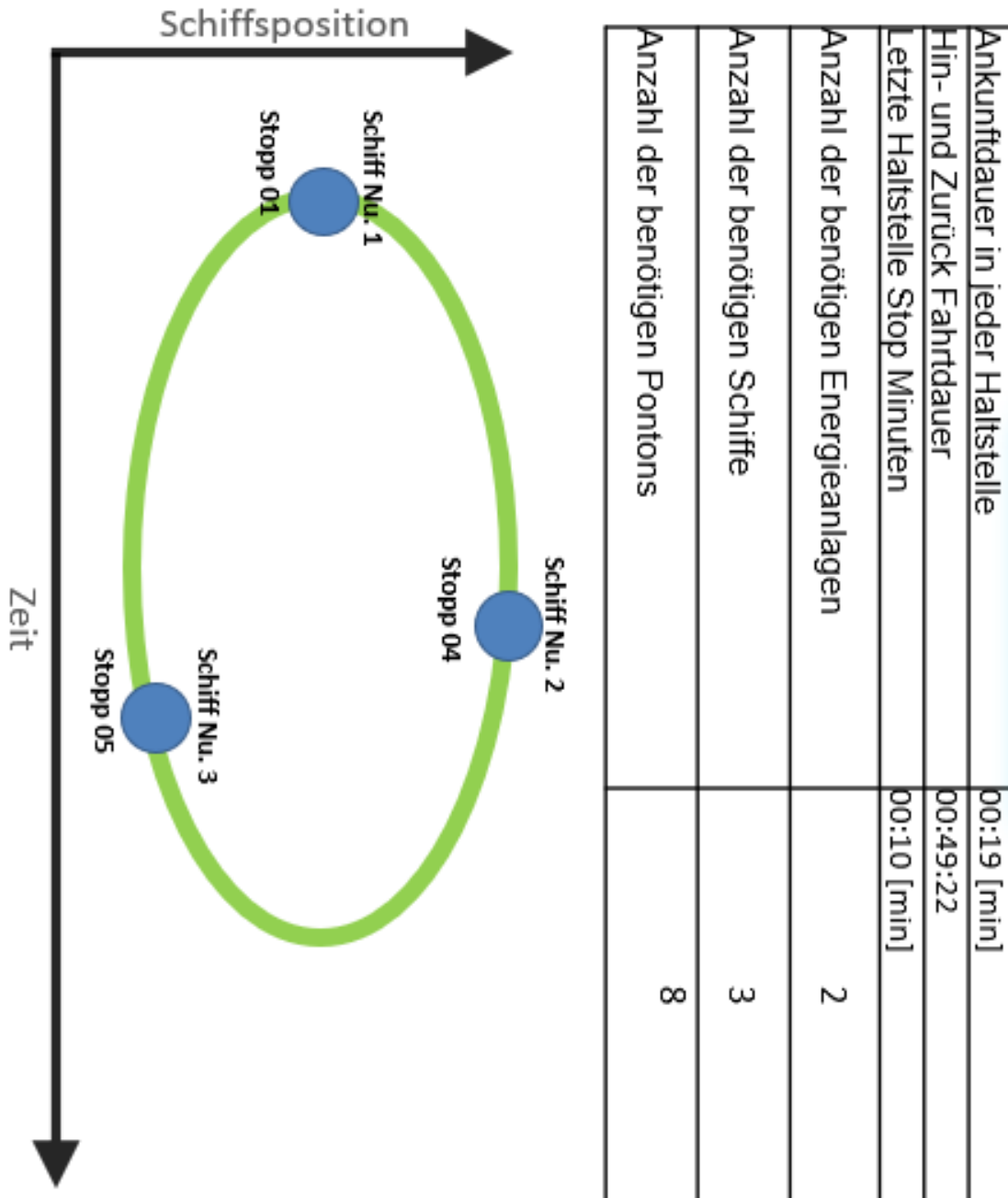
Abbildung 31, Flottenanzahl und Schiffsposition auf der Reise in Köln

Tabelle 6, Flotte Fahrtdauer in Köln

	Fahrtdauer													
Stop	Körperstraße (Weiss)	Hauptstraße (Zündorf)	Friedrich-Ebert-Ufer (Köln Porz)	Erkerstraße (Westhoven)	Weidenweg (Grünzug Poll)	Heinrich-Lübke-Ufer (Marienburg)	Schönhauserstraße (Bayenthal)	Alfred-Schütte-Allee (Deutzer Hafen)	Imhoff-Stollwerck Museum (Altstadt-Süd)	Hermann-Pürder-Straße (Deutz)	Konrad-Adenauer-Ufer (Köln Hauptbahnhof)	Trankgäsenwerft (Agnestertel)	Mülheimer Ufer (Mülheim)	Stammheimer Hauptstraße (Stammheim)
Körperstraße (Weiss)	00:03	00:06	00:09	00:15	00:18	00:22	00:25	00:28	00:31	00:34	00:37	00:42	00:47	
Hauptstraße (Zündorf)	00:03	00:03	00:06	00:11	00:14	00:19	00:22	00:25	00:28	00:31	00:34	00:39	00:44	
Friedrich-Ebert-Ufer (Köln Porz)	00:06	00:03	00:03	00:08	00:11	00:16	00:19	00:22	00:25	00:28	00:31	00:36	00:41	
Erkerstraße (Westhoven)	00:09	00:06	00:03	00:05	00:08	00:12	00:15	00:18	00:21	00:24	00:28	00:32	00:38	
Weidenweg (Grünzug Poll)	00:15	00:11	00:08	00:05	00:03	00:07	00:10	00:13	00:16	00:19	00:22	00:27	00:32	
Heinrich-Lübke-Ufer (Marienburg)	00:18	00:14	00:11	00:08	00:03	00:04	00:07	00:10	00:13	00:16	00:19	00:24	00:29	
Schönhauserstraße (Bayenthal)	00:22	00:19	00:16	00:12	00:07	00:04	00:03	00:06	00:09	00:12	00:15	00:20	00:25	
Alfred-Schütte-Allee (Deutzer Hafen)	00:25	00:22	00:19	00:15	00:10	00:07	00:03	00:03	00:06	00:09	00:12	00:17	00:22	
Imhoff-Stollwerck Museum (Altstadt-Süd)	00:28	00:25	00:22	00:18	00:13	00:10	00:06	00:03	00:03	00:06	00:09	00:14	00:19	
Hermann-Pürder-Straße (Deutz)	00:31	00:28	00:25	00:21	00:16	00:13	00:09	00:06	00:03	00:03	00:06	00:11	00:16	
Konrad-Adenauer-Ufer (Köln Hauptbahnhof)	00:34	00:31	00:28	00:24	00:19	00:16	00:12	00:09	00:06	00:03	00:03	00:08	00:13	
Trankgäsenwerft (Agnestertel)	00:37	00:34	00:31	00:28	00:22	00:19	00:15	00:12	00:09	00:06	00:03	00:04	00:10	
Mülheimer Ufer (Mülheim)	00:42	00:39	00:36	00:32	00:27	00:24	00:20	00:17	00:14	00:11	00:08	00:04	00:05	
Stammheimer Hauptstraße (Stammheim)	00:47	00:44	00:41	00:38	00:32	00:29	00:25	00:22	00:19	00:16	00:13	00:10	00:05	

Köln





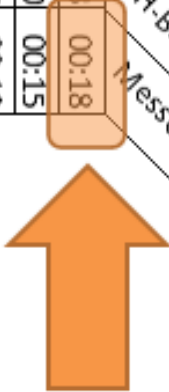
Düsseldorf

Abbildung 32, Flottenanzahl und Schiffsposition auf der Reise in Düsseldorf

Tabelle 7, Flotte Fahrtdauer in Düsseldorf

Stop	Fahrtdauer						
	Drususstraße (Heerdt)/Hafen (Hamm)	Medienhafen (Carlstadt)	Altstadt (Stadtmitte)	Tonhalle (Altstadt)/Luegplatz (Niederkassel)	T-H-Brücke (Golzheim)	Messe (Stockum)	
Drususstraße (Heerdt)/Hafen (Hamm)	00:03	00:03	00:06	00:09	00:13	00:18	
Medienhafen (Carlstadt)	00:03	00:03	00:03	00:06	00:10	00:15	
Altstadt (Stadtmitte)	00:06	00:03	00:03	00:03	00:07	00:12	
Tonhalle (Altstadt)/Luegplatz (Niederkassel)	00:09	00:06	00:03	00:03	00:04	00:09	
T-H-Brücke (Golzheim)	00:13	00:10	00:07	00:04	00:04	00:04	
Messe (Stockum)	00:18	00:15	00:12	00:09	00:04		

Düsseldorf



9.2. Baukostenschätzung

Die unteren Abbildungen zeigen sehr deutlich die unterschiedlichen Investitionssummen, die nötig sind, um ein Schiff und eine Haltestelle zu bauen.

Die Baukosten wurden für die einzelnen Baugruppen des Schiffes und der Haltestelle geschätzt. Insgesamt werden die Baukosten für ein Schiff und eine Haltestelle auf 3,6 Mio. Euro bzw. 1 Mio. Euro geschätzt.

9.2.1. Baukosten Schiff

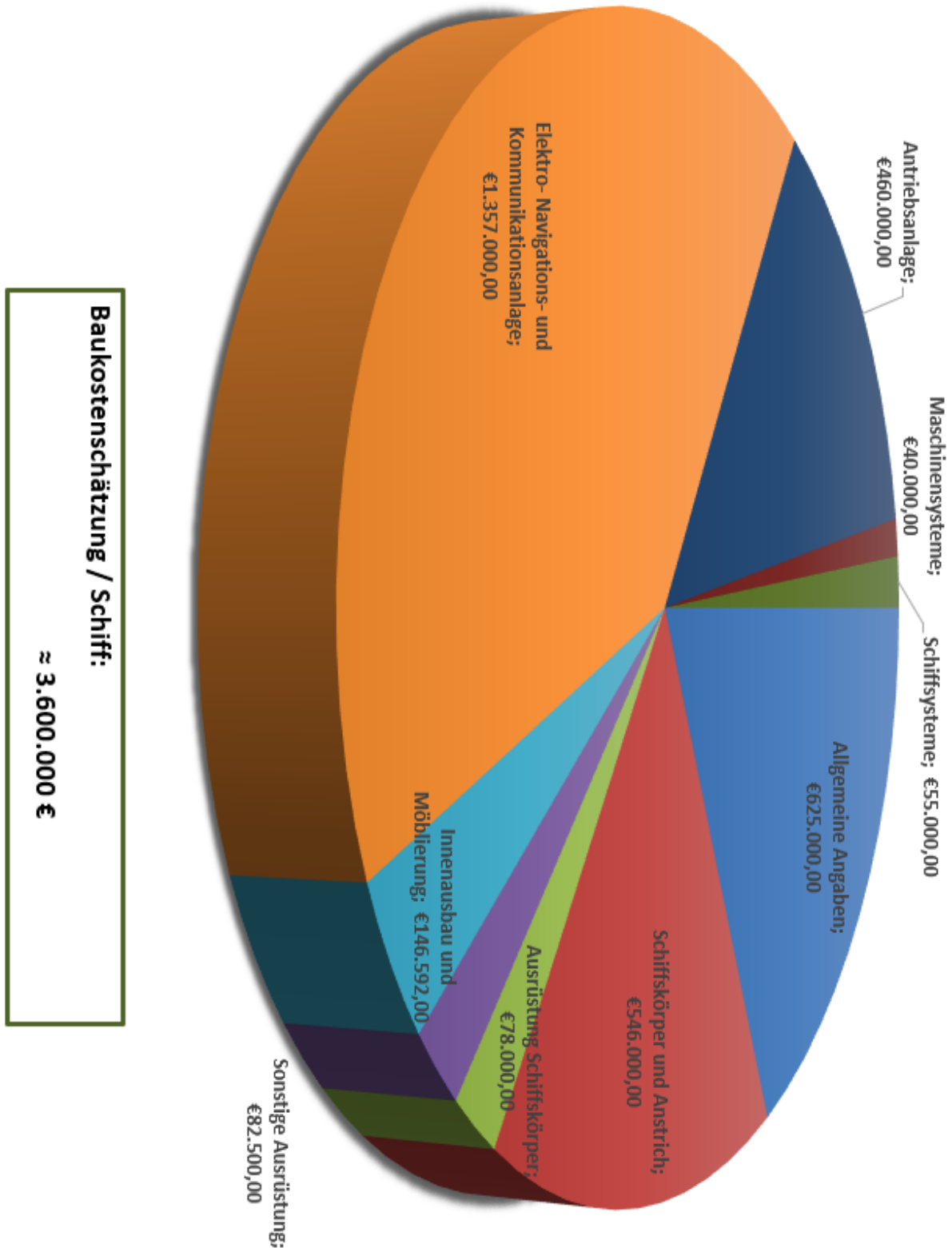


Abbildung 33, Baukostenschätzung pro Schiff

9.2.2. Baukosten Haltestelle

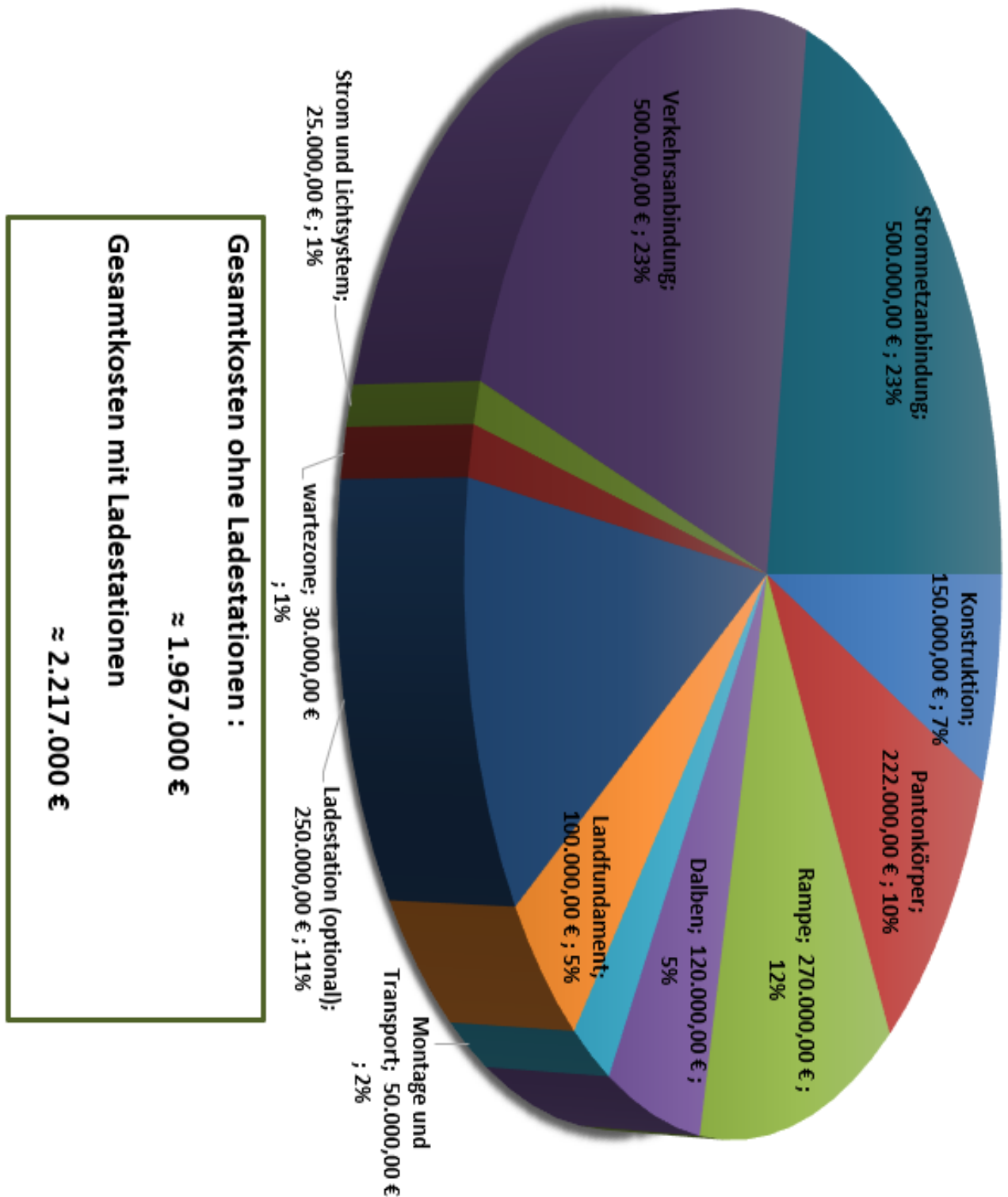


Abbildung 34, Baukostenschätzung pro Haltestelle

9.3. Betriebskostenschätzung

Die Betriebskosten setzen sich hauptsächlich aus den Energiekosten, Wartung, Versicherung und Personalkosten zusammen. Die Betriebskosten für die Batterie basieren auf der Annahme, dass alle 10 Jahre der Batteriesatz erneuert werden muss. Hinsichtlich der Energiekosten wurde mit 0,17 €/kWh gerechnet.

9.3.1. Betriebskosten Schiff

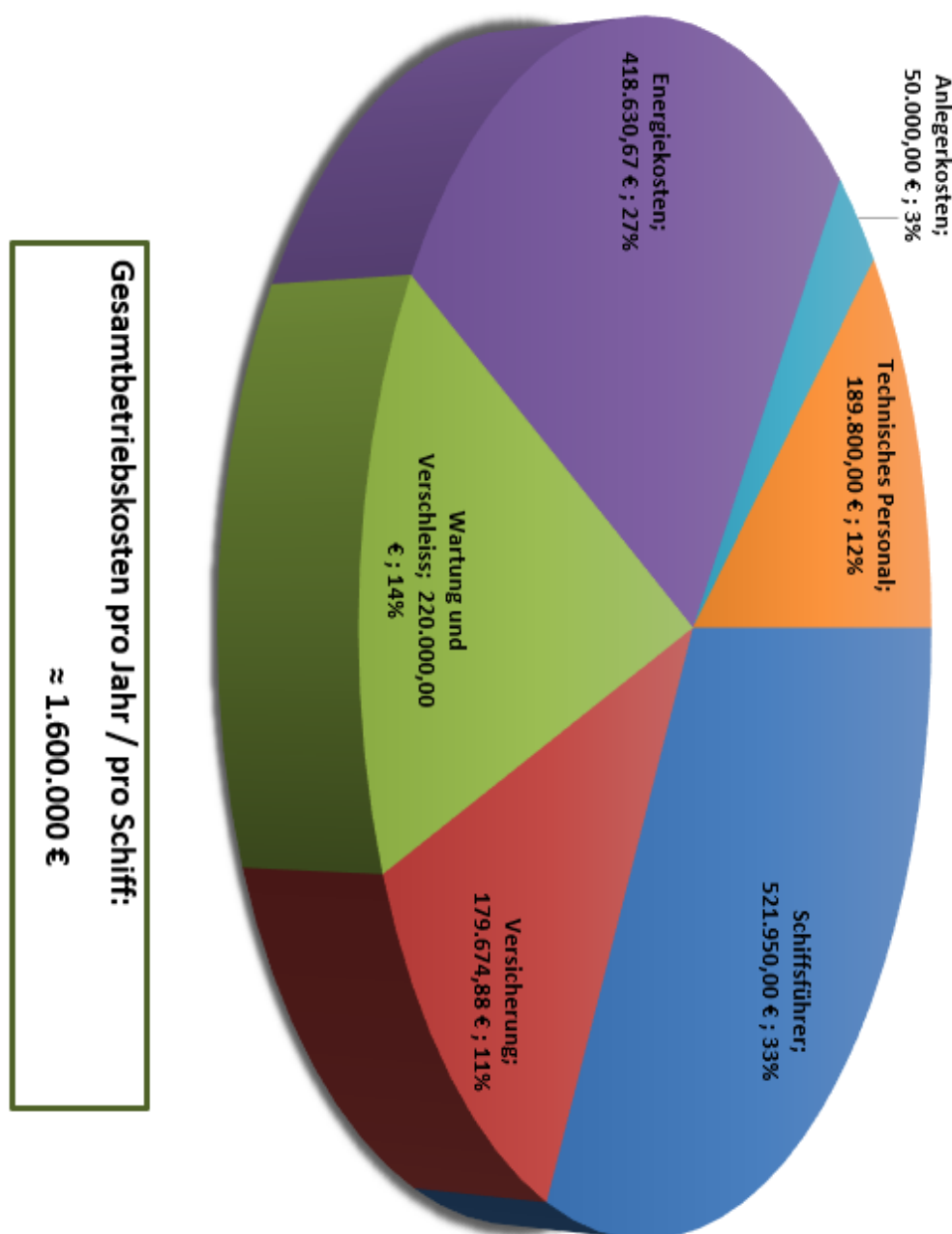


Abbildung 35, Betriebskostenschätzung Schiff (Köln)

9.3.2. Betriebskosten Haltstelle

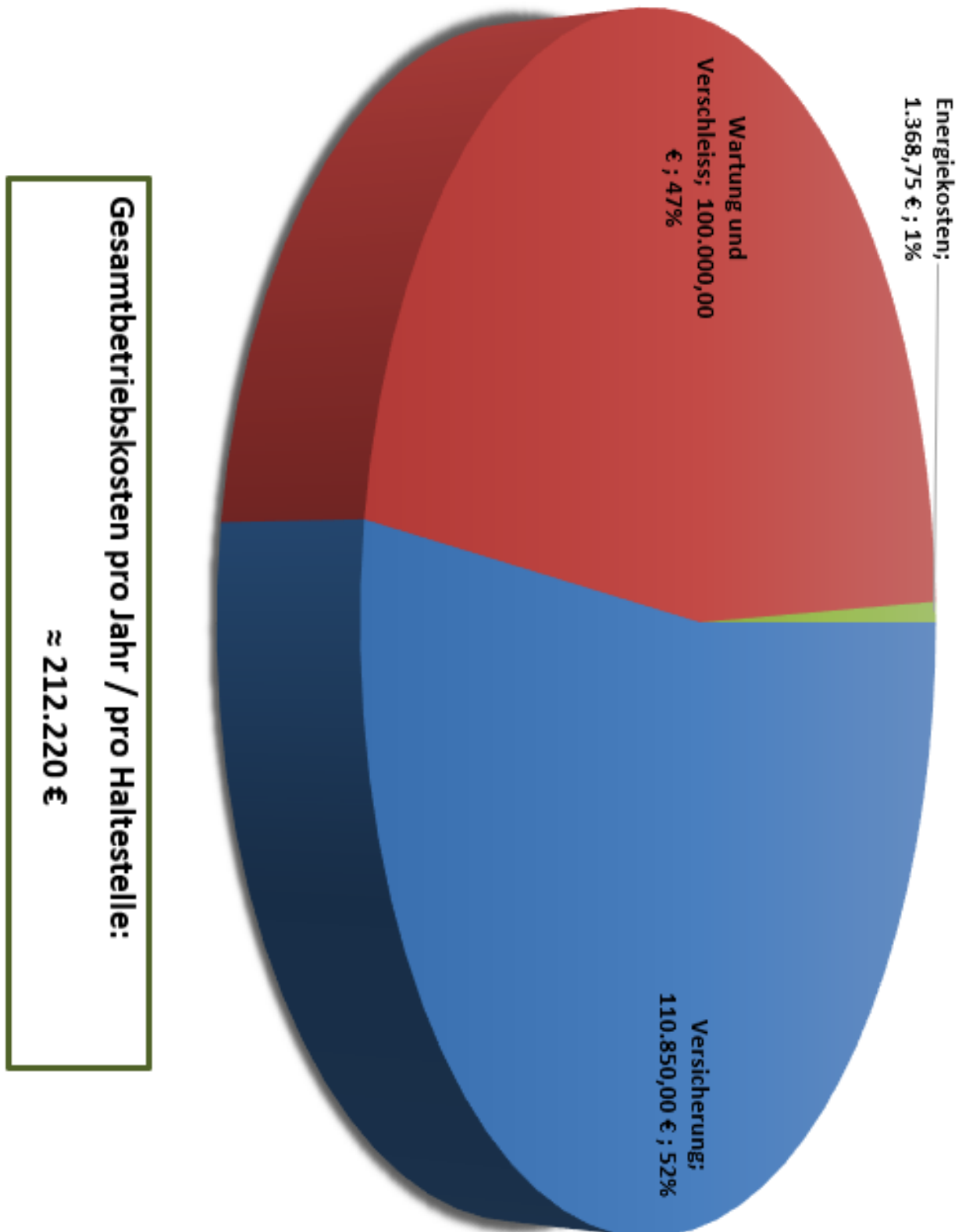


Abbildung 36, Betriebskostenschätzung Haltstelle

9.4. Gesamt

Die Gesamtkosten für den Flottenbau in Köln und Düsseldorf sind in den folgenden Diagrammen dargestellt. Zusätzlich wurden im Vergleich dazu die Baukosten für Dieselschiffe geschätzt. Die Gesamtkosten der Elektroflotte sind um 12 Prozent höher. Der gesamte Flottenbau kostet in Köln und Düsseldorf 50 Mio € bzw. 26 Mio €.

Haltestellenanzahl			Schiffsanzahl	
Elektrik mit Ladestationen	Elektrik ohne Ladestationen	Diesel	Elektrik	Diesel
5	9	14	6	6

Baukostenschätzung

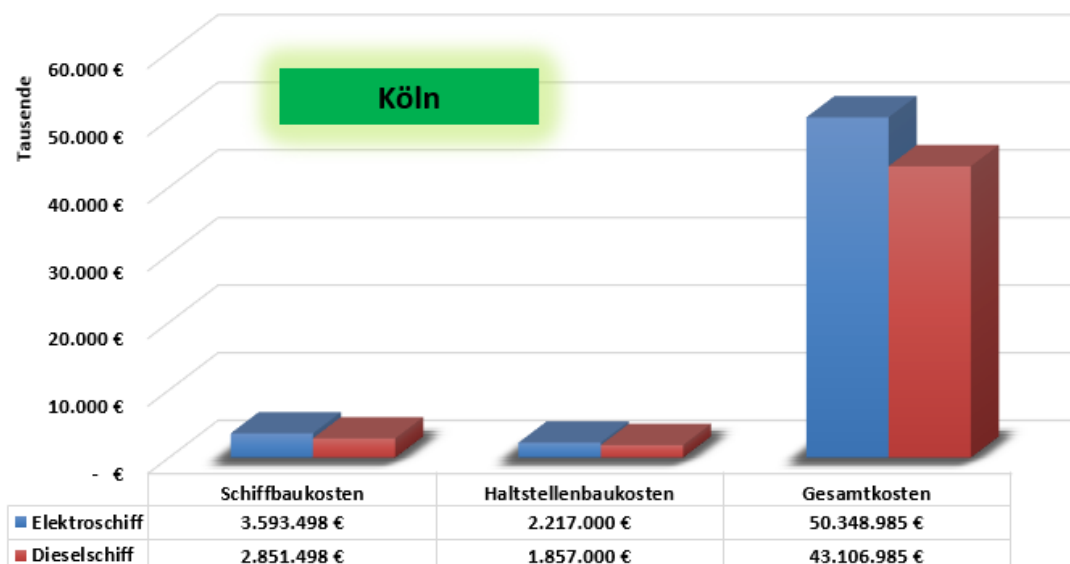


Abbildung 37, Gesamtkosten für den Flottenbau in Köln

Haltestellenanzahl			Schiffsanzahl	
Elektrik mit Ladestationen	Elektrik ohne Ladestationen	Diesel	Elektrik	Diesel
2	6	8	3	3

Baukostenschätzung

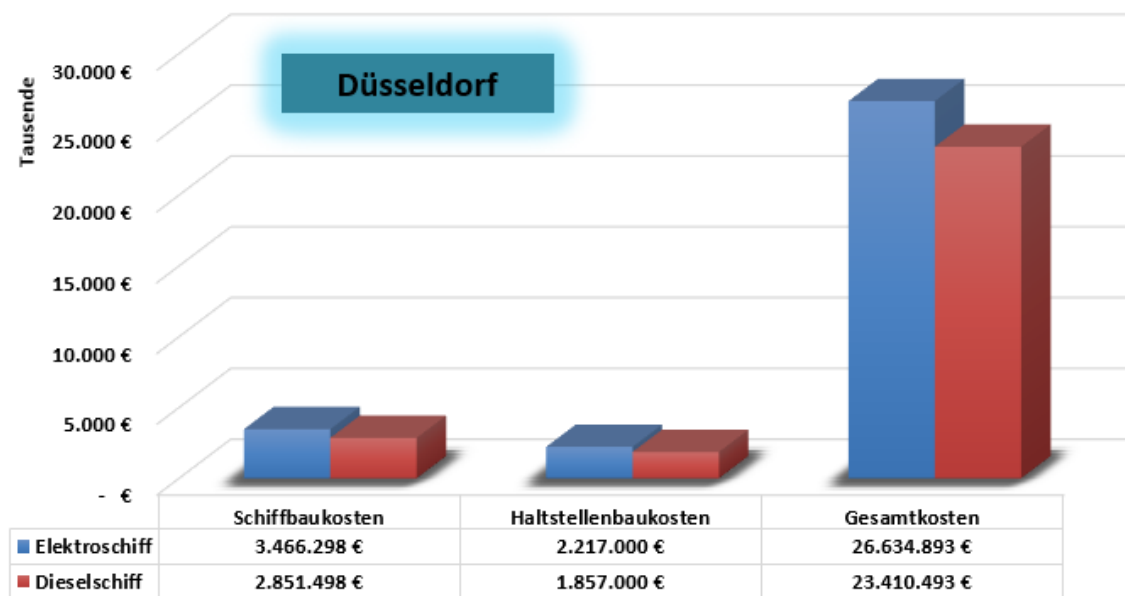


Abbildung 38, Gesamtkosten für den Flottenbau in Düsseldorf

Die folgenden Diagramme zeigen die kumulierten Kosten in jedem Jahr für die Dauer von 25 Jahren. Die Diagramme vergleichen die Lebenszykluskosten für eine Diesel betriebene Flotte mit denen einer elektrischen Flotte. Es wurde berücksichtigt, dass nach 10 Jahren die Batteriesätze zu heutigen Konditionen erneuert werden müssen. Die Kosten für einen neuen Dieselmotor wurden nach 15 Betriebsjahren angesetzt. Die Investments sind als Ausschläge in den jeweiligen Jahren in den Diagrammen erkennbar.



Abbildung 39, Flotte Kostenschätzung in jedem Jahr bis 25 Jahren in Köln

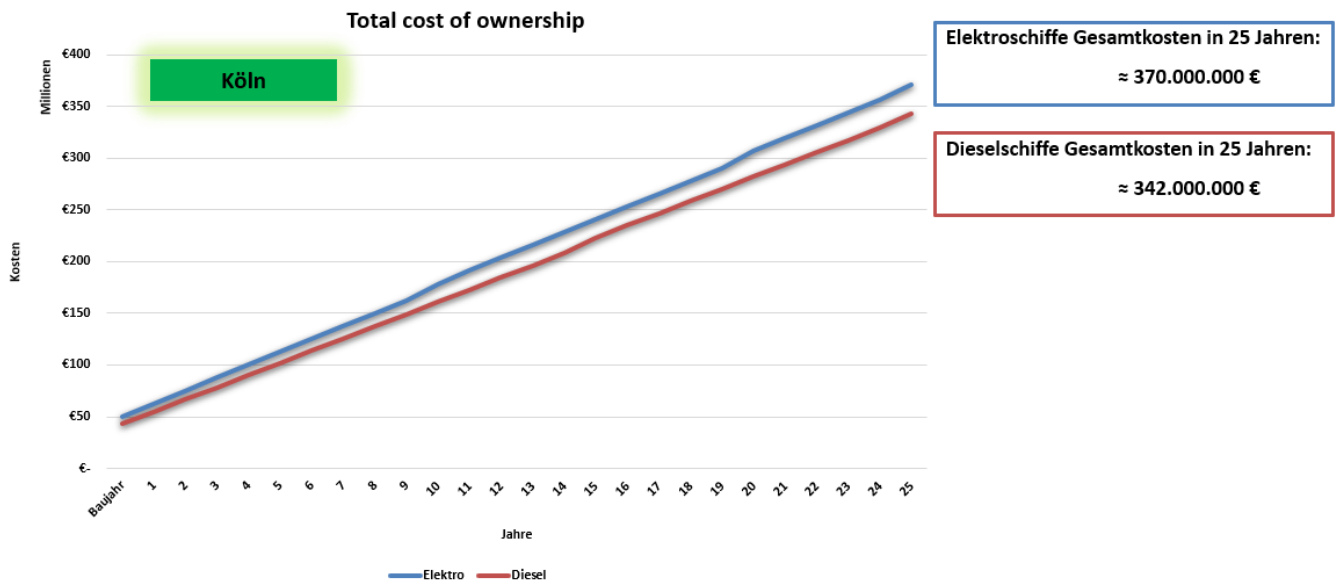


Abbildung 40, Gesamtkosten bis zu 25 Jahren in Köln

In Anbetracht der Diagramme in Köln werden die Betriebskosten der Flotte auf 12,5 Millionen € pro Jahr geschätzt. Im zehnten Jahr steigen die Betriebskosten der Flotte mit dem Austausch der neuen Batterien auf 16 Millionen €. Im Vergleich dazu kostet die Dieselflotte 11,7 Millionen € pro Betriebsjahr. Die Betriebskosten für die Dieselflotte werden im fünfzehnten Jahr mit 14,9 Mio. € veranschlagt. In diesem Jahr würden die Hauptmotoren durch neue ersetzt. Die Lebenszykluskosten werden für die Elektroflotte

auf etwa 370 Millionen € geschätzt, verglichen mit 342 Millionen € für die Dieselflotte in einem Zeitraum von 25 Jahren.

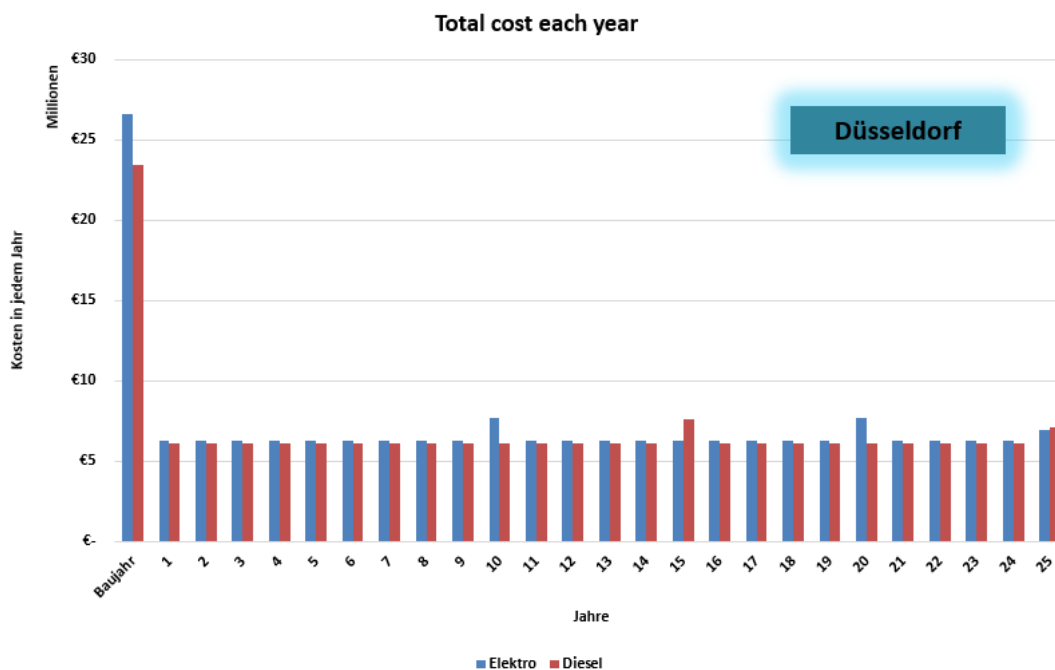


Abbildung 41, Flotte Kostenschätzung in jedem Jahr bis 25 Jahren in Düsseldorf

Die Düsseldorfer Flotte ist halb so groß wie die Kölner Flotte mit acht Stationen und drei Schiffen. In Bezug auf die folgenden Diagramme werden die Betriebskosten auf 6,2 Millionen € pro Jahr geschätzt, mit Ausnahme des zehnten Jahres auf 7,7 Millionen € beim Austausch der Batterien. Die gesamte Flotte kostet in 25 Jahren rund 186 Millionen €

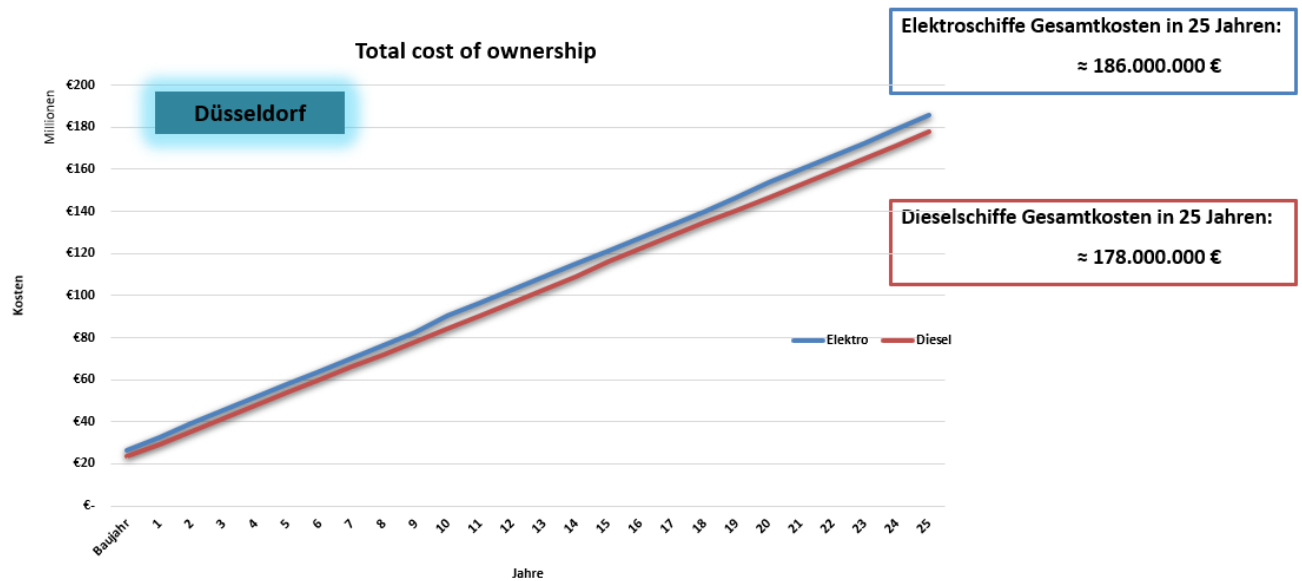


Abbildung 42, Gesamtkosten bis zu 25 Jahren in Düsseldorf

10. Fazit

Eine Wasserbuslinie ist eine kostengünstige, schnell verfügbare und flexible Möglichkeit, den öffentlichen Nahverkehr in Städten, die an schiffbaren Flüssen liegen, zu ergänzen.

Im Hinblick auf den Energiebedarf pro transportiertem Fahrgast ist eine Wasserbuslinie anderen Verkehrswegen unterlegen. Jedoch fließt in diese Betrachtung nicht die notwendige Energie zum Erbauen der Infrastruktur ein.

Als nächsten Schritt empfehlen wir weiterführende technischen Studien, die in verschiedene Bereiche reichen.

Netzseitige Bereitstellung der Ladeenergie

Es ist wichtig in Erfahrung zu bringen, ob die angenommenen Energiemengen direkt oder aber über Zwischenspeicher aus dem Netz entnehmbar sind. Dies wird große Einflüsse auf die Kostenstruktur haben.

Ausarbeitung eines Streckennetzes unter Berücksichtigung der wasserbaulichen, nautischen und auch verkehrstechnischen Aspekte bezüglich der Anbindung an das Streckennetz.

Es ist zwingend nötig, eine landseitige Planung mit in die Planungsphase einzubinden, um eine optimale Verknüpfung der landseitigen Infrastruktur und der Verkehrsmittel garantieren zu können.

Verkehrssimulationen des gesamten Kölner Raums mit verschiedenen Ausbaustufen des Wasserbusnetzes

Um die wahren Effekte und Einflüsse des Wasserbusses im Verkehrssystem betrachten zu können, ist es notwendig, dies in einer ganzheitlichen Simulation abzubilden. Dazu zählt nicht nur der Verkehr, der innerhalb von Köln stattfindet, sondern es sollten auch Probanden betrachtet werden, welche in die Stadt pendeln und ggf. für die „letzte Meilen“ das Verkehrsmittel wechseln.

Entwicklung einer überregionalen Wasserverbindung zwischen Bonn, Köln und Düsseldorf.

Im Bereich höherer Geschwindigkeiten wird ein Wasserfahrzeug dem Zug hinsichtlich der Effizienz zwangsläufig unterlegen bleiben. Jedoch ermöglicht die Formgebung des Fahrzeugs völlig andere Konzepte als selbige in einem Zug möglich wären. Es können deutlich attraktivere Bedingungen für den Fahrgast zur Nutzung der Pendelzeit geschaffen werden.

Einbindung von „Hubs“ zum Wechsel zwischen überregionalem und innerstädtischem Verkehr.

Eine überregionale Verkehrslinie muss zwangsläufig effizient in eine innerstädtische Linie eingebunden werden. Dazu zählen die entsprechenden Stellen, an denen ein Umstieg zwischen den Linien stattfinden kann. Diese gilt es zu entwickeln.

11. Ausblick

Wir messen dem wasserseitigen Stadtverkehr und Regionalverkehr eine große Bedeutung bei. Das steigende Verkehrsaufkommen, der Ausbau von schnellen mobilen Datenverbindungen stellen die Notwendigkeit und die Möglichkeit für attraktive Konzepte für Pendler im überregionalen Verkehr entlang der Rheinlinie vom Mittelrhein bis hin ins Ruhrgebiet. Dies ließe sich auch für nicht am Gewässer wohnende Pendler über P+R Lösungen wie auch Knotenpunkte an Bahnhöfen realisieren.

Die Nutzung von Wasserstoff wird in den nächsten Jahren einen deutlichen Schub erleben, was hoffentlich einen Anstoß gibt, die regulatorischen Defizite im Hinblick auf Wasserstoff in der Schifffahrt zu beheben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1, Bahnen in Köln (links), Stadtteilkarte-Köln (rechts) (Kölner Rathaus „Kölner Wand“ von Ernst Wille , 2005)	7
Abbildung 2, Fahrplan in Düsseldorf	8
Abbildung 3, Kölner Fahrstrecken, (Google Maps).....	8
Abbildung 4, Düsseldorfer Fahrstrecken, (Google Maps)	9
Abbildung 5, empfohlene Stationen auf dem Fahrplan in Köln	10
Abbildung 6, empfohlene Stationen auf dem Fahrplan in Düsseldorf.....	11
Abbildung 7, Streckenplan in Köln.....	13
Abbildung 8, Streckenplan in Düsseldorf	14
Abbildung 9, empfohlene Stationen auf Google Maps in Köln.....	16
Abbildung 10, empfohlene Stationen auf Google Maps in Düsseldorf	17
Abbildung 11, entworfenes Katamaran-Schiff auf dem Wasser	18
Abbildung 12, Geschwindigkeitsprofil	20
Abbildung 13, Lageplan	21
Abbildung 14, Haltestelle Design Rendering.....	22
Abbildung 15, Grafisch vereinfachtes Single-Line Diagramm zur Darstellung des Systemaufbaus (Baumüller Anlagen-Systemtechnik GmbH & Co. KG, 2019)	23
Abbildung 16, ChargingPANTO für Elektrobusse (Faiveley Stemmann-Technik GmbH)	24
Abbildung 17, Pantograph am Anleger.....	25
Abbildung 18, Pantograph am Anleger.....	26
Abbildung 22, Generalplan	29
Abbildung 23, Eine Ansicht vom Schiff	30
Abbildung 24, Auslegung der Batteriesysteme (EST-Floattech B.V.)	31
Abbildung 25, CFD Rechnung Eingaben.....	33
Abbildung 26, Stromlinienkontur auf 33 km/h	34
Abbildung 27, Stromlinienkontur auf 40 km/h	35
Abbildung 28, Rumpfstress bei 40 km/h.....	36
Abbildung 29, Kumulierter Energiebedarf über einen repräsentativen Tag in Köln.....	37
Abbildung 30, Kumulierter Energiebedarf über einen repräsentativen Tag in Düsseldorf	37
Abbildung 31, Batteriekapazität auf kWh und Prozent in Abhängigkeit der Uhrzeit in Köln	41
Abbildung 32, Batteriekapazität auf kWh und Prozent in Abhängigkeit der Uhrzeit in Düsseldorf	41
Abbildung 33, Durchschnittsenergieverbrauch im öffentlichen Stadtverkehr mit elektrischem Antrieb (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 08.11.2019) in Deutschland, verglichen mit dem Wasserbus	42
Abbildung 34, Flottenanzahl und Schiffsposition auf der Reise in Köln.....	43
Abbildung 35, Flottenanzahl und Schiffsposition auf der Reise in Düsseldorf.....	45
Abbildung 36, Baukostenschätzung pro Schiff.....	48
Abbildung 37, Baukostenschätzung pro Haltestelle	49
Abbildung 38, Betriebskostenschätzung Schiff (Köln).....	50
Abbildung 39, Betriebskostenschätzung Haltestelle	51
Abbildung 40, Gesamtkosten für den Flottenbau in Köln	52
Abbildung 41, Gesamtkosten für den Flottenbau in Düsseldorf.....	53
Abbildung 42, Flotte Kostenschätzung in jedem Jahr bis 25 Jahren in Köln	54
Abbildung 43, Gesamtkosten bis zu 25 Jahren in Köln	54
Abbildung 44, Flotte Kostenschätzung in jedem Jahr bis 25 Jahren in Düsseldorf.....	55



Abbildung 45, Gesamtkosten bis zu 25 Jahren in Düsseldorf.....	56
Tabelle 1, Hauptabmessungen, Köln und Düsseldorf	
Tabelle 2, Strombedarf Eingabe Daten in Köln (rechts), Düsseldorf (links)	
Tabelle 3, Hinfahrt Daten in Köln.....	
Tabelle 4, Zurückfahrt Datentabelle in Köln.....	
Tabelle 5, Hin- und Zurückfahrt Datentabelle in Düsseldorf.....	
Tabelle 6, Flotte Fahrtdauer in Köln	
Tabelle 7, Flotte Fahrtdauer in Düsseldorf.....	
Tabelle 8, Machbarkeitsstudie Datenblatt	