Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften

School of
Engineering

IDP Institut für Datenanalyse
und Prozessdesign

Bachelorarbeit Wirtschaftsingenieur

Bewertung eines Hyperloop-Systems für den Gütertransport im Vergleich zur Luftfracht

Autor	Chayan Pinto Yepez
Hauptbetreuung	Valerio De Martinis
Industriepartner	Swissloop
Externe Betreuung	Roberto Molinari
Datum	09.06.2023

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit an der School of Engineering

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat. (Bei Gruppenarbeiten gelten die Leistungen der übrigen Gruppenmitglieder nicht als fremde Hilfe.)

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle zitierten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt nachgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten die Paragraphen 39 und 40 (Unredlichkeit und Verfahren bei Unredlichkeit) der ZHAW Prüfungsordnung sowie die Bestimmungen der Disziplinarmassnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum: **Name Studierende:**

Zürich, 09.06.2023 Chayan Pinto Yepez

Zusammenfassung

Der Hyperloop ist ein rein theoretisches Konzept, eines neuen Hochgeschwindigkeitsverkehrsmittel. In der vorliegenden Arbeit wird der Hyperloop als Güterverkehrsmittel bewertet. Dabei wird konkret untersucht, ob ein solches System als alternativer Verkehrsträger für die Luftfracht rentabel ist. Um diese Frage zu beantworten, wird in einem ersten Schritt die Ausgangslage untersucht, um diese später mit dem Hyperloop-Potenzial zu vergleichen. Als erstes wurde das Marktpotenzial eingestuft. Zu diesem Zweck wurde beim Flughafen Zürich ein umfangreicher Datensatz mit dem Luftfrachtaufkommen angefordert. Dieser wurde analysiert und nach den Städten mit den meisten Frachtaufkommen sortiert. Die Städte Basel, Paris und Frankfurt, wurden fortan für die weitere Arbeit genauer betrachtet. Die Umsatzzahlen, welche mit der Luftfracht zu diesen Städten eingenommen werden, konnten aus öffentlichen Quellen abgeschätzt werden. Für die Streckenplanung wurden Streckenmodelle aufgestellt, welche Zürich mit den jeweiligen Städten verbinden soll. Es zeigte sich, dass eine eigenständige Verbindung zwischen Zürich und Basel zu kurz wäre, aber als Zwischenstopp auf der Strecken Zürich – Paris sowie als Zwischenstopp auf der Strecke Zürich – Frankfurt durchaus realisierbar wäre. Nach dieser Untersuchung waren die Routen und somit auch die Durchlaufzeiten definiert. Anhand der Streckenplanung und Durchlaufzeiten, konnten nachfolgend die Investition- und Betriebskosten abgeschätzt werden, wobei die Gesamtkilometer der Routen und die insgesamt gefahrenen Kapselkilometer entscheidende Parameter waren. Zum Schluss wurden diese Kosten in einer Rentabilitätsanalyse, den Einnahmen gegenübergestellt. Es stellte sich heraus, dass ein Hyperloop-System, das ausschliesslich als Alternative zur Luftfracht eingesetzt wird, nicht rentabel ist.

Abstract

The Hyperloop is a purely theoretical concept, of a new high-speed transportation system. In this paper, the Hyperloop is evaluated as a means of freight transportation. Specifically, it investigates whether such a system is cost-effective as an alternative mode of transportation for air freight. To answer this question, the first step is to examine the baseline situation to later compare it with the Hyperloop potential. The first step was to classify the market potential. For this purpose, a comprehensive data set with air freight volumes was requested from Zurich Airport. This was analyzed and sorted by the cities with the most freight volumes. The cities of Basel, Paris, and Frankfurt were henceforth considered in more detail for further work. The revenue figures, which are taken with the air freight to these cities, could be estimated from public sources. For the route planning, route models were set up, which should connect Zurich with the respective cities. It was found that a standalone connection between Zurich and Basel would be too short but would be feasible as a stopover on the Zurich - Paris route and as a stopover on the Zurich - Frankfurt route. After this investigation, the routes and thus also the throughput times were defined. Based on the route planning and throughput times, the investment and operating costs could subsequently be estimated, with the total kilometers of the routes and the total Hyperloop-pod kilometers driven being key parameters. Finally, these costs were compared with the revenues in a rentability analysis. It turned out that a Hyperloop system used exclusively as an alternative to air freight would not be profitable.

Vorwort

Der Hyperloop als neues Verkehrsmittel ist ein so beeindruckendes Konzept, dass ich Ihnen mit grosser Freude meine Bachelorarbeit präsentiere.

Schon seit Beginn meines Studiums hat mich dieses faszinierende Thema interessiert. Bereits lange vor dieser Arbeit erfuhr ich von einem Freund, dass an der ZHAW School of Engineering die Möglichkeit besteht, seine Bachelorarbeit zum Thema Hyperloop zu verfassen. Seitdem hat mich dieses Thema nicht mehr losgelassen, und als ich dann bei der Themenwahl für die Bachelorarbeit tatsächlich die Möglichkeit sah, die Arbeit über den Hyperloop zu schreiben, stand die Entscheidung für mich fest.

Im Verlauf meiner Arbeit habe ich mich intensiv mit dem Hyperloop auseinandergesetzt und dabei eine Vielzahl von Quellen genutzt, um ein umfassendes Verständnis für dieses innovative Transportsystem zu erlangen. Es war spannend zu erfahren, wie die verschiedenen Ansätze aussehen, um dieses Konzept zu verwirklichen.

Die Möglichkeit, meine Bachelorarbeit zum Thema Hyperloop als alternative zur Luftfracht zu schreiben, hat mir die Gelegenheit gegeben, mich eingehend mit den Herausforderungen und Chancen zu befassen, die mit der Implementierung eines Hyperloop-Systems im Güterverkehr verbunden sind. Dabei habe ich nicht nur die theoretischen Aspekte des Hyperloops betrachtet, sondern auch die Messbaren Daten der aktuellen Luftfracht.

Die gesamte Arbeit hat meine Fähigkeit gestärkt, theoretisch und innovativ, aber auch zielorientiert zu denken.

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei meinem Betreuer, Herr De Martinis, bedanken, der mich während des gesamten Prozesses unterstützt und wertvolle Ratschläge gegeben hat. Auch bei der Studentenvereinigung der ETH Zürich "Swissloop", durch die diese Arbeit ermöglicht wurde.

Abschliessend hoffe ich, dass diese Arbeit einen Beitrag zur weiteren Erforschung des Hyperloops im Güterverkehr leistet und dazu beiträgt, das Verständnis für dieses revolutionäre Transportkonzept zu vertiefen. Es hat das Potenzial, die Art und Weise des Warentransportes, grundlegend zu verändern, und es freut mich, einen kleinen Teil zu dieser spannenden Entwicklung beizutragen.

Für etwaige Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung. Sie können mich unter der folgenden E-Mail-Adresse kontaktieren: chayan.pinto@gmx.ch

Zürich, 09.06.2023

Chayan Pinto

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 3
Abstract 4
Vorwort 5
1. Einleitung 8
1.1. Ausgangslage 8
1.2. Zielsetzung 8
1.3. Vorgehen und Methoden 9
1.4. Outline 9
2. Theoretische Grundlagen 10
2.1. Grundkonzept 11
3. Wirtschaftliche Analyse und Bewertung des Hyperloop-Potenzials 12
3.1. Marktpotenzial 12
3.1.1. Nachfrage und Marktgrösse 13
3.1.2. Potenzieller Umsatz 16
3.2. Streckenplanung 20
3.2.1. Strecke Zürich nach Paris 21
3.2.2. Strecke Zürich nach Frankfurt 31
3.2.3. Strecke Zürich nach Amsterdam 39
3.2.4. Streckenzeiten zusammengefasst 40
3.3. Investitionskosten 41
3.3.1. Lineare Infrastruktur 41
3.3.2. Kapitalkosten 41
3.3.3. Zusammenfassung der Kapitalkosten 44
3.4. Betriebskosten 45
3.4.1. Variable Kosten 45
3.4.2. Fixkosten 45
3.4.3. Aufteilung der Betriebskosten 46
3.5. Rentabilität 49
3.5.1. Rentabilitätsanalyse der Strecke Zürich - Paris 49
3.5.2. Rentabilitätsanalyse der Strecke Zürich – Frankfurt 50
3.5.3. Rentabilität der Lufthansa Group 50
3.6. Wettbewerbsanalyse 51
4. Resultate 53
5. Diskussion und Ausblick 55

6. Verzeichnisse 56
6.1. Literaturverzeichnis 56
6.2. Abbildungsverzeichnis 58
6.3. Tabellenverzeichnis 59
7. Anhang 60
Anhang A: Weltweites Luftfrachtaufkommen aus Kapitel 3.1.1. 60
Anhang B: Detaillierte Rechenschritte aus Kapitel 3.2.1.1 61
Anhang C: Tabelle der Streckenverbindung Methode 2: Zürich - Paris 63
Anhang D: Tabelle der Streckenverbindung Methode 2: Zürich - Frankfurt 64
Anhang E: Tabelle der Streckenverbindung Methode 3: Zürich - Frankfurt 64
Anhang F: Investitionskosten der TEMS-Studie 65
Anhang G: Betriebskosten der TEMS-Studie 66

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Der Hyperloop ist ein rein theoretisches Konzept und es gibt zum jetzigen Zeitpunkt (Stand 2023), keine kommerzielle Hyperloop Verbindung. Allerdings gibt es viele Forschungsinstitute und Universitäten, die sich mit dem Thema Hyperloop befassen. Eine Organisation ist die Studentenverbindung der ETH Zürich namens «Swissloop». Swissloop befasst sich mit der Erforschung, Weiterentwicklung und praktische Anwendung der Hyperloop-Technologie. Das Team entwickelt und baut betriebliche Prototypen von Transportkapseln. Swissloop hat diese Arbeit der ZHAW School of Engineering vorgeschlagen, damit auch an dieser Hochschule an dem Hyperloop-Konzept geforscht wird.

Neben diversen studentischen Initiativen gibt es auch grössere Firmen, die sich mit dem Bau und der Entwicklung vom Hyperloop beschäftigen. Eines der prominentesten Unternehmen ist Virgin Hyperloop One, das erste Testfahrten mit Personen durchgeführt hat [1]. Ein weiteres Hyperloop Unternehmen ist HyperloopTT (Hyperloop Transportation Technologies), welches 2019 die «Great Lakes Hyperloop Feasibility Study» veröffentlichte. Diese Studie kostete 1,2 Millionen US-Dollar und ist nach eigenen Aussagen die umfassendste Studie zum Thema Hyperloop, welche für die Öffentlichkeit zugänglich ist. Diese Studie wird im Verlauf dieser Arbeit immer wieder als «TEMS-Studie» Referenziert [2].

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine umfassende Bewertung des Hyperloops im Gütertransport zu haben, als Vergleich zur Luftfracht. Die Stadt Zürich wird als Ausgangspunkt definiert und anschliessend werden verschiedene Untersuchungsfragen untersucht. Dabei steht die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

- Marktpotenzial: Wie ist die Nachfrage und Marktgrösse für ein Hyperloop-System im Gütertransport als alternative zur Luftfracht. Welche Potenzielle Umsätze könnte ein solches System einnehmen
- Streckenplanung: Wie könnte eine Route von Zürich ausgehend aussehen und wie sind die Durchlaufzeiten
- Investitionskosten: Wie viel kostet der Bau und die Inbetriebnahme eines Hyperloop-Systems
- Betriebskosten: Welche jährlichen kosten, könnten bei einem Hyperloop-System anfallen
- Rentabilität: Ist ein Hyperloop-System als alternative zur Luftfracht rentabel
- Wettbewerbsanalyse: Welche Vor- und Nachteile hat ein Hyperloop-System im Gütertransport als Vergleich zur Luftfracht

Am Ende der Arbeit sollte die Frage beantwortet werden, ob ein Hyperloop-System als Alternative zum Flugzeug für den Transport von Luftfracht wirtschaftlich tragfähig ist oder nicht.

1.3. Vorgehen und Methoden

Für das Marktpotenzial wird ein Datensatz vom Zürcher Flughafen, der das Luftfrachtaufkommen aufzeigt, analysiert und ausgewertet. Dabei ergeben sich die Städte mit den meisten Frachtaufkommen. Die Potenziellen Umsätze orientieren sich an den Umsätzen der Luftfracht Unternehmen. Dafür werden die Umsätze der Lufthansa Group in Bezug auf Luftfracht berücksichtig. Für die Streckenplanung werden die Städte mit den höchsten Luftfrachtaufkommen analysiert und für eine mögliche Streckenführung genauer untersucht. Auf Grundlage der Streckenführung und Kostenparameter der «TEMS-Studie» können die Investitionskosten und Betriebskosten abgeschätzt werden [2]. Die Rentabilität ergibt sich dann aus der Differenz der Potenziellen Einnahmen und den Ausgaben. Für die Wettbewerbsanalyse werden die Vor- und Nachteile eines Hyperloop-Systems aufgelistet, basierend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen und der Literaturrecherche zum Thema Hyperloop.

1.4. Outline

Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen des Hyperloop behandelt. In diesem Kapitel wird ein erster Einblick in die Hyperloop Technologie gewährleistet. Nach diesen theoretischen Grundlagen geht es im nächsten Kapitel 3, direkt zur Analyse des Hyperloop-Potenzials mit Fokus auf wirtschaftlicher und finanzieller Bewertung. Die Resultate der Untersuchungen, werden in den jeweiligen Unterkapiteln direkt publiziert und beschrieben. In Kapitel 4, werden die gesamten Resultate nochmals zusammengefasst und gegenübergestellt. Im abschliessenden Kapitel 5 werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf weitere Untersuchungen gegeben.

2. Theoretische Grundlagen

Der Hyperloop ist ein Konzept, eines neuen Hochgeschwindigkeitsverkehrsmittel. Das Konzept sieht vor, dass sich sogenannte Hyperloop-Pods, oder zu Deutsch «Kapseln», in einem beinahe luftleeren Tunnel bewegen. Diese Kapseln werden von elektromagnetischen Antriebskraftwerken angetrieben und können Geschwindigkeiten von bis zu 1.200 km/h erreichen. Das Ziel ist es, die Reisezeit zwischen Städten erheblich zu verkürzen. Das Hyperloop-Konzept hat 2013, durch die Veröffentlichung der Machbarkeitsstudie „Hyperloop Alpha“ von Elon Musk, dem CEO von Tesla und SpaceX, neue Popularität erlangt. In dieser Studie untersuchten die Ingenieure von Tesla und SpaceX, die Machbarkeit eines Hyperloop-System auf der Strecke San Francisco und LA von rund 560 Kilometern. Sie kamen zum Ergebnis, dass die Reisezeit mit dem Hyperloop auf lediglich 30 Minuten reduziert werden kann, im Vergleich zu den aktuell mehr als 6 Stunden mit dem Auto [3].

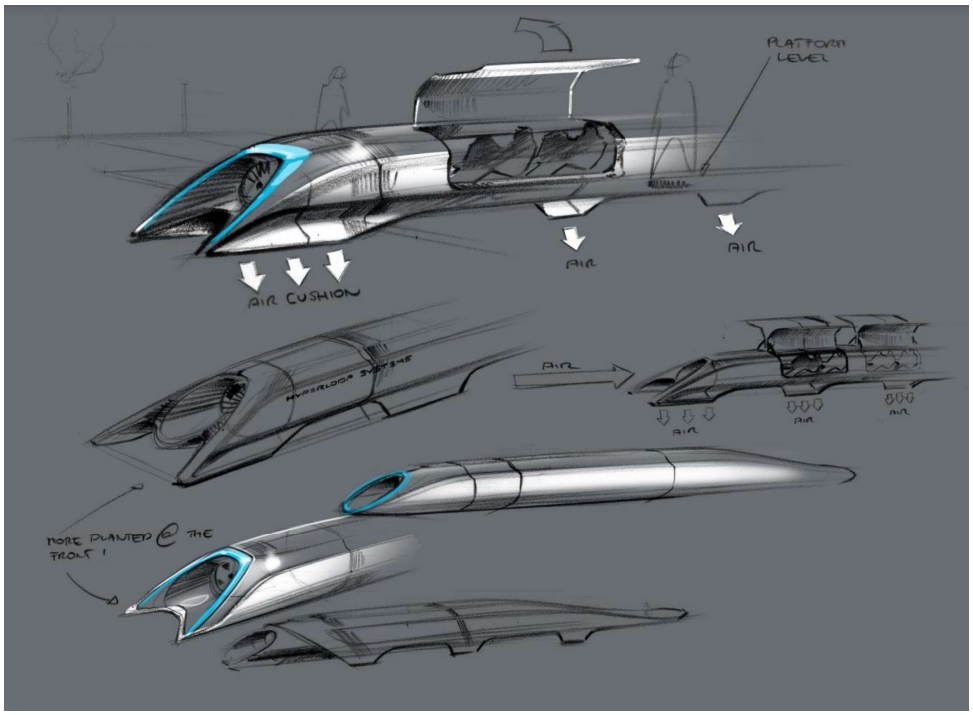


Abbildung 1: Designvorschlag, Skizze aus dem Hyperloop Alpha Report [3]

Der Hyperloop kann aber nicht nur als Passagiertransport genutzt werden, sondern auch im Güterverkehr. Durch seine enormen Geschwindigkeiten und damit kurze Reisezeiten, ist das Konzept auch bei der Lieferung von Gütern interessant. Mit speziell entwickelten Frachtkapseln könnten Waren und Güter mit hoher Geschwindigkeit und Effizienz über lange Strecken transportiert werden, was neue Möglichkeiten für die globale Logistik eröffnet. Die Entwicklung und Umsetzung des Hyperloop-Konzepts befindet sich noch in einem frühen Stadium. Verschiedene Unternehmen und Organisationen weltweit arbeiten an der Weiterentwicklung der Technologie und der Realisierung von Pilotprojekten. Durch Forschung, Testläufe und internationale Kooperationen wird die Vision eines funktionsfähigen Hyperloop-Systems vorangetrieben.

2.1. Grundkonzept

Der Hyperloop basiert auf mehreren grundlegenden Prinzipien. Das Herzstück des Systems sind die Kapseln, die in einer Vakuumröhre schweben und durch elektromagnetische Kräfte angetrieben werden. Dieses Konzept ermöglicht eine äusserst geringe Reibung und ermöglicht es den Kapseln, nahezu ohne Luftwiderstand mit hoher Geschwindigkeit zu reisen. Während der Beschleunigung der Hyperloop-Kapseln wird Energie benötigt und Strom verbraucht. Diese Energie geht jedoch nicht verloren, sondern wird im bewegten Objekt als kinetische Energie gespeichert. Sobald die Kapsel ihre maximale Geschwindigkeit erreicht hat, erfordert es aufgrund des nahezu luftleeren Zustands der Röhre nur noch sehr wenig zusätzliche Energie, um diese Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Ein entscheidender Aspekt der Energieeffizienz im Hyperloop-System, ist die Nutzung regenerativer Bremsen. Beim Abbremsen der Kapsel wird ein Grossteil des zuvor verbrauchten Stroms zurückgewonnen. Dies geschieht durch die Umwandlung der kinetischen Energie der Kapsel in elektrische Energie, die zurück in das System eingespeist werden kann. Durch dieses System wird der Gesamtenergieverbrauch des Hyperloop-Systems erheblich reduziert und eine effiziente Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen gewährleistet [2].

Die Sicherheit ist ein zentraler Aspekt beim Aufbau eines Hyperloop-Systems. Neben der robusten Konstruktion der Röhren und Kapseln werden verschiedene Sicherheitssysteme eingeplant, um Unfälle zu verhindern und im Falle eines Notfalls eine schnelle Evakuierung zu ermöglichen. Dazu gehören unter anderem Notbremsen, Überwachungssysteme, Brandbekämpfungsmechanismen und Evakuierungswege.

Am Ende jedes Streckenabschnittes werden Stationen aufgebaut sein, an denen die Passagiere ein- und aussteigen können. Diese Stationen dienen auch als Knotenpunkte für den Güterumschlag im Hyperloop-Netzwerk. Der Zugang zu den Kapseln erfolgt über spezielle Ein- und Ausstiegsbereiche, in denen die Kapseln sicher zum Stehen kommen und die Passagiere oder Güter ein- und ausgeladen werden können.

Es gibt jedoch auch einige Herausforderungen, die es zu überwinden gilt, bevor das Hyperloop-Konzept vollständig realisiert werden kann. Dazu gehören die Entwicklung von Technologien die es ermöglichen, die Kapseln sicher und zuverlässig in einem luftleeren Tunnel zu betreiben, die Finanzierung des Baus von Hyperloop-Systemen und die Regulierung und Zulassung vom Hyperloop.

Insgesamt ist der Hyperloop ein faszinierendes Transportkonzept, das das Potenzial hat, die Art zu reisen und Güter zu transportieren, grundlegend zu verändern. Mit den Geschwindigkeiten, der Energieeffizienz und dem Potenzial für nachhaltige Mobilität könnte der Hyperloop ein wichtiger Bestandteil des Verkehrssystems der Zukunft werden. Es bleibt abzuwarten, wie sich diese innovative Technologie entwickeln.

3. Wirtschaftliche Analyse und Bewertung des Hyperloop-Potenzials

Um die wirtschaftliche Machbarkeit des Hyperloop im Gütertransport zu bewerten, werden im Folgenden sechs Faktoren untersucht. Zunächst ist eine Marktanalyse notwendig, um das Potenzial des Hyperloop im Gütertransport-Markt zu bestimmen. Da es in dieser Arbeit um die Bewertung eines Hyperloop als Gütertransportmittel im Vergleich zur Luftfracht geht, wird auch nur der Luftfrachtmarkt betrachtet. Die Potenziellen Einnahmen eines Hyperloop-Systems im Gütertransport, können Anhand der Einnahmen der Lufthansa Group im Frachttransport geschätzt werden. Für die genauen Streckenangaben und Durchlaufzeiten, werden Streckenmodelle aufgezeigt. Als nächstes braucht es eine Schätzung der Investitionskosten. Hierbei wird untersucht, was der Bau und die Implementierung eines Hyperloop-Systems kosten könnte. Anschliessend braucht es ebenfalls eine Schätzung der Betriebskosten. Hierbei werden alle Kosten berücksichtigt, die beim Betrieb eines Hyperloop System benötigt werden, wie Stromverbrauch, Wartungskosten und Verwaltungskosten. Mit diesen Parametern kann dann eine Rentabilitätsanalyse durchgeführt werden. Zum Schluss wird eine Wettbewerbsanalyse aufgestellt, wo die Vor- und Nachteile eines Hyperloop-Systems im Gütertransport als Vergleich zur Luftfracht dargestellt werden.

3.1. Marktpotenzial

Der Hyperloop als Gütertransportmittel wäre in einem fertig ausgebauten System fähig, zusätzliche Märkte des Gütertransports zu erschliessen. Märkte wie der Schienenverkehr oder Lkw-Markt. In der Transportbranche von Lebensmitteln wird nach wie vor vieles mit dem Lkw transportiert. Züge werden häufig eingesetzt, um grosse Warenmengen zu transportieren. Dieser viel grössere Markt wäre für den Hyperloop im Warentransport ebenfalls attraktiv.

Wie eingangs erwähnt, wird sich diese Arbeit aber ausschliesslich auf den Luftfrachtmarkt konzentrieren, da diese Güter im Durchschnitt teurer sind und häufig schneller am Zielort ankommen sollten [4]. Um möglichst genaue Informationen über den Frachtumschlag am Flughafen Zürich zu erhalten, wurde ein umfangreicher Datensatz bei der zuständigen Abteilung angefordert, welcher den gesamten Luftfracht Umschlag am Zürcher Flughafen aufzeigt. Die folgenden Auswertungen basieren auf dem Originaldatensatz des Flughafens Zürich und die damit gezeigten Grafiken sind selbstständig erstellt.

3.1.1. Nachfrage und Marktgrösse

Einen Überblick davon, wie viele Tonnen Luftfracht jährlich am Flughafen Zürich umgeschlagen werden, bietet die folgende Grafik (siehe Abb. 2).

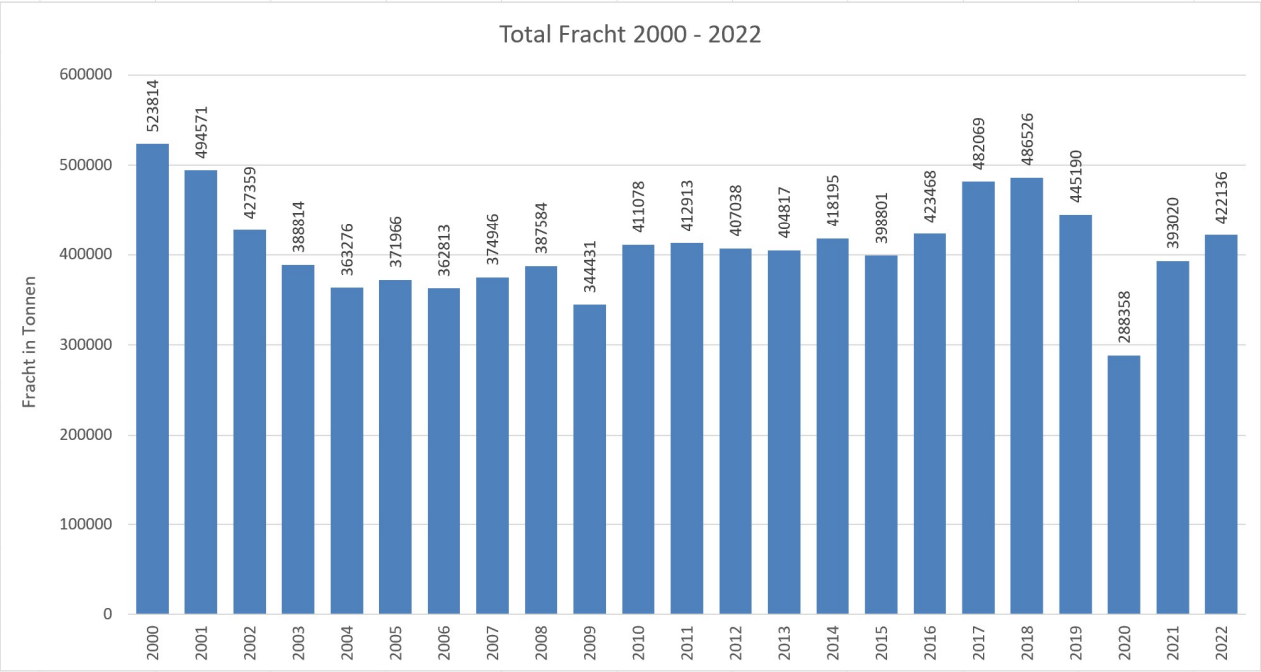


Abbildung 2: Jährliche Frachttonnen. Umgeschlagen am Zürcher Flughafen (eigene Darstellung anhand vom Datensatz).

Die Tonnage in dieser Grafik beinhalten Import sowie Export Güter aus aller Welt. Für das weitere Vorgehen wird der Frachttonnen Umschlag aus dem Jahr 2021 etwas genauer untersucht. Wie aus der Abbildung 2 erkennbar, wurden im Jahr 2021 fast 0.4 Millionen Tonnen Import- sowie Exportluftfracht aus der ganzen Welt am Zürcher Flughafen umgeschlagen. Für das weitere Vorgehen, beschränkt sich die Untersuchung des Datensatzes, lediglich auf die Fracht, die aus Europa stammt. Eine Übersicht über das weltweite Luftfrachtaufkommen findet sich im Anhang unter *Anhang A.*

Wie gross der Hyperloop Frachtmarkt von Zürich ausgehend ist, hängt ab von der Frage, wie weit eine maximal ausgebaute Hyperloop Strecke sein kann. Zum jetzigen Forschungsstand gibt es keine Regelung für eine maximale Länge der Hyperloop-Strecke. Diese Länge hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie die Geschwindigkeitsanforderungen, Topografie oder technische Einschränkungen. Die Geschwindigkeitsanforderung spielt eine wichtige Rolle, weil der Hyperloop mit hoher Geschwindigkeit auf geraden Strecken fahren muss. Je länger die Strecke, desto schwieriger wird es kurven oder Steigungen zu umfahren, welche Einschränkungen in der Geschwindigkeit mit sich bringt. Umgebungsfaktoren wie Gebirgszüge oder Seen können ebenfalls Faktoren sein, welche eine maximale Länge der Hyperloop Strecke bestimmen.

Um eine Abschätzung der Länge der Hyperloop Strecke machen zu können, wird das White Paper «Hyperloop Alpha» (veröffentlicht 2013 von Elon Musk) zur Hilfe gezogen. In dieser Studie untersuchten die Ingenieure von Tesla und SpaceX das Hyperloop-Konzept. Eine Route zwischen San Francisco (Kalifornien US) und LA (Kalifornien US), mit einer Luftlinie von etwa 560 Kilometer, wurde als Fallstudie bewertet [3]. Diese Streckendimension wird als Referenz genommen und auf 650 Kilometer

erhöht. Für die weitere Untersuchung des Marktpotenzials wird nochmals das Frachtaufkommen des Datensatzes analysiert, diesmal aber etwas konkreter. Um herauszufinden, welche Städte theoretisch mit dem Hyperloop erreichbar wären, braucht es Abgrenzungen. Deshalb wird von Zürich aus ein Luftdistanzradius von 650 Kilometer gezogen. Dies sollte aufzeigen welche Städte von Zürich aus theoretisch mit dem Hyperloop erreichbar wären. In der folgenden Grafik (siehe Abb. 3) wird zudem ersichtlich, wie viel Frachttonnen im Jahre 2021, von den Städten entweder importiert oder exportiert wurden.

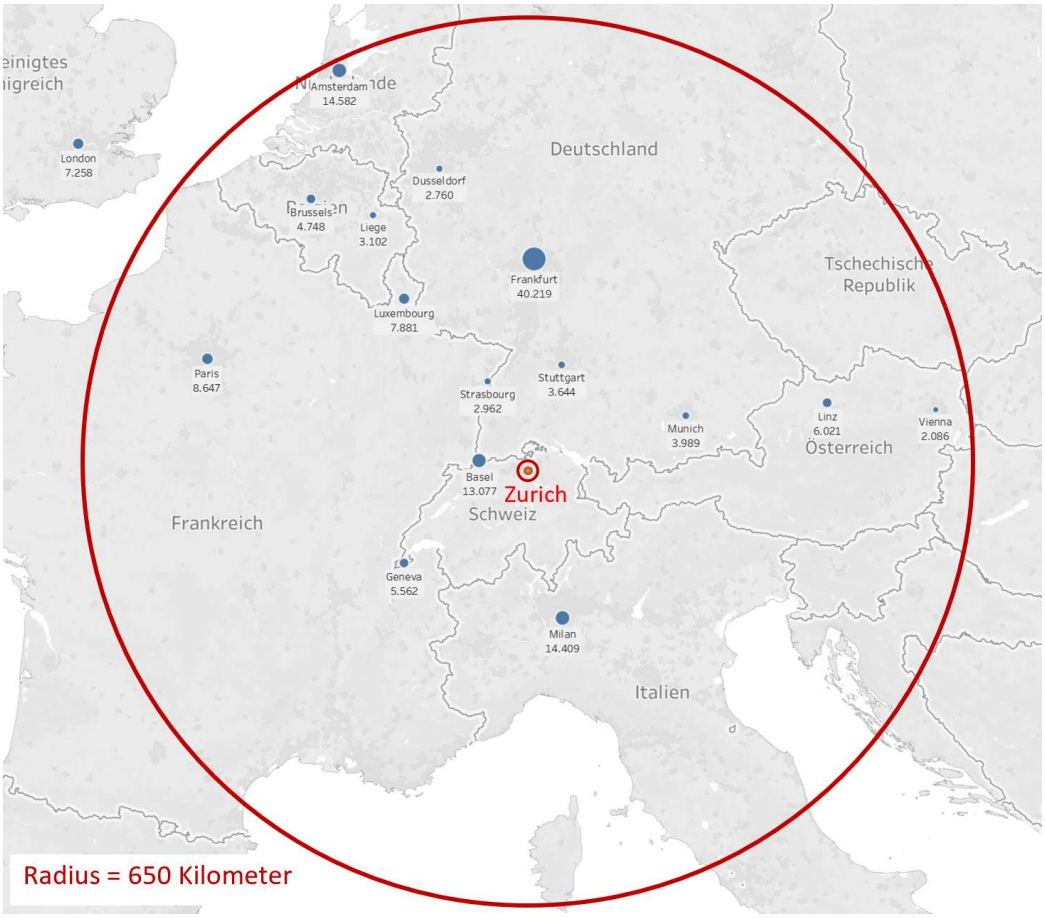


Abbildung 3: Frachtaufkommen im Umkreis von 650 Kilometer von Zürich ausgehend (eigene Darstellung basierend auf Datensatz)

Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass die Städte Amsterdam, Paris, Mailand, Basel und vor allem Frankfurt grosse Frachtaufkommen vorweisen. Mit diesen Erkenntnissen wäre der erste Schritt der Routenplanung in Bezug auf Marktpotenzial durchgeführt. Natürlich spielen viele anderer Faktoren eine Rolle bei der Festlegung der Hyperloop-Routen, die Illustration dient lediglich dazu, den theoretischen Markt zu zeigen.

Die angezeigten Städte in der Abbildung 3 sind nur die, die ein Frachttonnenvolumen von mindestens zweitausend Tonnen aufweisen. Neben den angezeigten Städten gibt es demnach weitere, mit einem niedrigeren Volumen. Vollständigkeitshalber werden alle 43 Städte in einem Radius 650 Kilometern, die gemäss des Datensatzes, Frachttonnen aufweisen, in der untenstehenden Tabelle 1 aufgelistet. Sortiert nach dem Gesamtfrachtaufkommen, mit einer zusätzlichen Spalte für die Luftdistanz. Die Distanzen wurden ausgewertet mit Hilfe von Google und dem Luftlinienrechners «luftlinie.org» oder ausgemessen über Google Earth. Diese Angaben sind nur ungefähre Angaben und dienen lediglich zur Orientierung.

Country	City	Inbound 2021	Outbound 2021	Total freight tons	Distance km
Germany	Frankfurt	20.253	19.966	**40.219**	305
Netherlands	Amsterdam	3.718	10.865	**14.582**	615
Italy	Milan	9.638	4.772	**14.409**	215
Switzerland	Basel	7.113	5.964	**13.077**	75
France	Paris	3.478	5.169	**8.647**	490
Luxembourg	Luxembourg	3.450	4.431	**7.881**	305
Austria	Linz	4.352	1.669	**6.021**	440
Switzerland	Geneva	2.336	3.225	**5.562**	225
Belgium	Brussels	2.571	2.177	**4.748**	490
Germany	Munich	2.215	1.774	**3.989**	245
Germany	Stuttgart	2.340	1.305	**3.644**	165
Belgium	Liege	1.139	1.963	**3.102**	420
France	Strasbourg	449	2.513	**2.962**	150
Germany	Dusseldorf	1.627	1.133	**2.760**	450
Austria	Vienna	1.426	660	**2.086**	590
France	Lyon	830	1.053	**1.883**	280
Switzerland	Berne	920	269	**1.188**	95
Italy	Firenze	1.159	0	**1.159**	455
Germany	Hamburg	176	920	**1.096**	695
France	Nice	1.035	29	**1.064**	420
Austria	Innsbruck	348	414	**763**	215
Austria	Salzburg	712	0	**712**	340
Switzerland	Lugano	495	0	**495**	155
Germany	Cologne	310	137	**446**	415
Netherlands	Maastricht	43	257	**301**	445
Netherlands	Rotterdam	276	9	**285**	585
Germany	Hahn	96	37	**133**	300
Croatia	Zagreb	19	101	**120**	595
Germany	Bremen	0	85	**85**	635
Germany	Leipzig	21	51	**72**	520
France	Lille	0	63	**63**	540
Germany	Munster	28	0	**28**	100
France	Chalons	0	22	**22**	355
Germany	Hanover	2	18	**20**	565
Austria	Graz	14	1	**14**	520
Austria	Hohenems	14	0	**14**	85
Germany	Nuremberg	0	14	**14**	300
Italy	Bologna	0	10	**10**	385
Italy	Venice	0	8	**8**	360
Croatia	Pula	0	6	**6**	590
Belgium	Ostend	3	2	**5**	590
Germany	Dresden	3	2	**5**	555
Slovenia	Ljubljana	0	2	**2**	480

Tabelle 1: Städte und deren Frachtaufkommen im Umkreis von 650 Kilometer ab Zürich (eigene Tabelle basierend auf Datensatz)

3.1.2. Potenzieller Umsatz

In diesem Unterkapitel wird auf den potenziellen Umsatz eines Hyperloop-Systems im Gütertransport eingegangen. Es ist wichtig zu erwähnen, dass dies nur die potenziellen Einnahmen sind und noch nicht die Ausgaben, die ein Hyperloop-System hat. Diese werden später analysiert und gegenübergestellt (vgl. Kap. 3.5). Hier wird erneut angemerkt, dass es sich in dieser Studie um den Hyperloop als Güterverkehrsmittel im Vergleich zur Luftfracht handelt. Andere Transportmittel wie Lastwagen oder Zug sind generell günstiger, jedoch langsamer als das Flugzeug. Der Mehrpreis für die Luftfrachtmethode hängt damit zusammen, dass die Lieferung in der Regel schneller am Zielort eintrifft. Die Luftfracht transportiert Güter mit kleinem Volumen und hohem Wert. So verliessen im Jahr 2019 nach Wert 50% aller Exporte (CHF 157 Mrd.) die Schweiz per Luftfracht. Durchschnittlich waren es pro Kilogramm im Export 1413 Schweizer Franken. Zugleich ist der Tonnenanteil der Luftfracht an den gesamten Exporten und Importen mit weniger als 1% sehr gering [4]. Ziel ist es, dieses Segment des Gütertransports künftig durch den Hyperloop abzuwickeln. Ganz nach dem Motto «low volume high value» [2].

Einen ersten Anhaltspunkt, wie teuer die derzeitigen Verkehrsmittel beim Transport von Gütern sind, liefert folgende Grafik (siehe Abb. 4). Diese Grafik zeigt die Kosten der verschiedenen Transportarten in den USA im Jahr 2002. Obwohl diese Angaben nicht mehr ganz aktuell sind, und es sich um den Gütertransport der USA und nicht Europa handelt, liefert die Grafik dennoch gute Grundlagen und zeigt die unterschiedlichen Kosten der verschiedenen Verkehrsmittel [5].

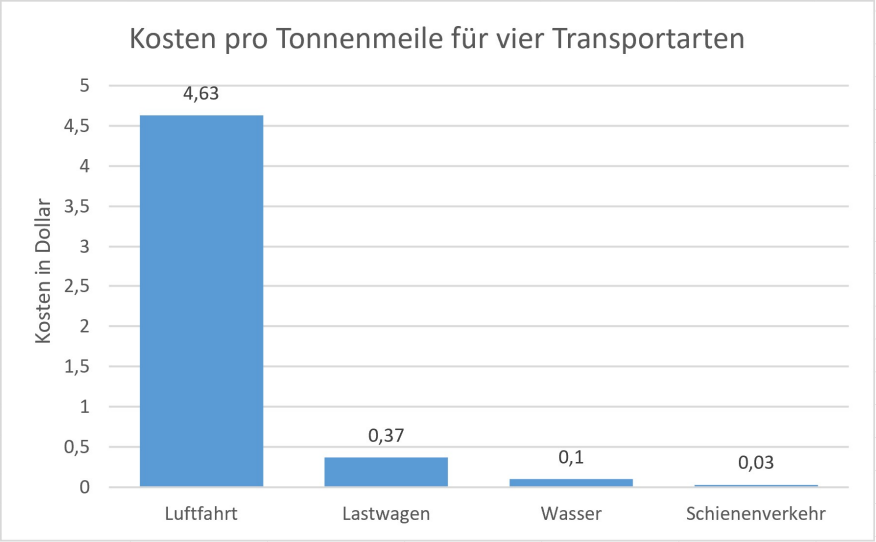


Abbildung 4: Kosten pro Tonnenmeile für vier Transportarten (Daten aus [4]).

Aus dieser Grafik geht deutlich hervor, dass der Transport von Gütern mittels Flugzeugs mit 4.63 US-Dollar am teuersten ist. Die 4.63 USD beziehen sich auf die Tonnenmeile. Da diese Arbeit mit dem metrischen System durchgeführt wird, wird dieser Wert anschliessend durch den Faktor 1.609 geteilt, um die Dollar Angabe pro Tonnenkilometer zu erhalten. Daraus resultiert

$$\frac{4.63\ Dollar}{1.609} = 2.88\ Dollar, \tag{1}$$

pro Tonnenkilometer.

Aus dem Jahresbericht der Lufthansa Group lässt sich ausrechnen, wie viel Umsatz die Lufthansa durchschnittlich pro Tonnenkilometer im Jahr 2021 mit dem Transport von Waren gemacht hat. So hat die

Lufthansa im Segment des Warentransportes, im Jahr 2021 einen totalen Umsatz von 3'644 Millionen Euro erwirtschaftet. Mit 7'198 Millionen Tonnenkilometer, ergibt dies einen Umsatz von

$$\frac{3644 * 10^6\ Euro}{7198 * 10^6\ Tonnenkilometer} = 0.506\ Euro, \tag{2}$$

pro Tonnenkilometer [6].

Wie im Vorherigen Unterkapitel (vgl. Kap. 3.1.1) dargestellt, zeigen die Städte Frankfurt, Amsterdam, Basel und Paris grosse Frachtvolumen auf. Die Städte Frankfurt, Amsterdam, Basel und Paris werden im weiteren Verlauf als Fallbeispiele genutzt, um den potenziellen Umsatz eines Hyperloop Gütertransport zu schätzen. Die Luftdistanz zwischen Zürich und Basel beträgt ungefähr 75 Kilometer und ist demnach für eine eigenständige Hyperloop Strecke zu kurz.

<u>Zürich – Frankfurt, 305 Kilometer</u>

Die Strecke Zürich Frankfurt wird als Erstes analysiert, da sie mit 40'219 Fracht Tonnen (vgl. Tab. 1) das grösste Fracht Volumen hat. Bei einer Strecke von ca. 305 Kilometer und dem oben errechneten Durchschnittswert von 0.506 Euro pro Tonnenkilometer, ergibt dies einen Umsatz der Airline von

$$305 * 0.506 = 154\ Euro, \tag{3}$$

pro Tonne. Die 154 Euro sind aber nicht die Preise, welche der Endverbraucher pro Tonne Transportgut bezahlt. Diese 154 Euro sind lediglich die Kosten der Airline. In unserem Fall der Lufthansa. Die totalen Kosten, um eine Tonne per Luftfracht zu senden, sind weitaus höher. An dieser Stelle wird sich wieder auf die Statistik von den US-Daten (vgl. Abb. 4) bezogen. Aus der Gleichung (1) geht hervor, dass eine Tonne pro Kilometer im Jahre 2002 in den USA per Luftfracht im Durchschnitt 2.88 Dollar kostete. Angewandt auf unser erstes Fallbeispiel ergibt dies

$$305 * 2.88 = 878\ Dollar. \tag{4}$$

Die Gesamtkosten, um eine Tonne Luftfracht nach Frankfurt zu senden, wären nach diesen Angaben bei 878 Dollar. Um diese Kosten der Luftfracht zu überprüfen und zu Vergleichen, wird eine zweite Quelle hinzugezogen. Das Internet Tool von «Freightos». Laut eigenen Angaben ist es gestützt auf das grösste digitale Frachtnetz der Welt [7]. In diesem Tool kann der Startort, Zielort und das Gewicht der Ladung eingegeben werden und es schätzt den Preis. Für die Strecke vom Zürich Flughafen nach Frankfurt Flughafen für eine Tonne Frachtgut, schätzt der Rechner einen Preis von 759-966 Dollar (vgl. Abb. 5). Mit einem Mittelwert von 863 Dollar liegt diese Schätzung sehr nahe an der Schätzung aus Gleichung (4) von 878 Dollar.

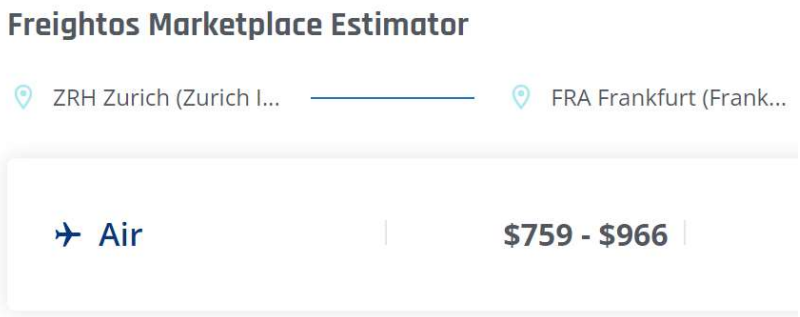


Abbildung 5: Frachtkosten Schätzer von «Freightos» [7].

Für das weitere Vorgehen wird jeweils der Mittelwert der Freighthos Werte verwendet. Diese Dollar Angaben müssen dann noch in Euro umgerechnet werden. Dafür wird der Wechselkurs von einem Dollar zu 0.91 Euro verwendet [Stand: 04.04.2023] [8]. In diesem Fallbeispiel bestimmt von 863 Dollar zu 785 Euro. Als nächstes wird der prozentuale Anteil der Airline Kosten an den Gesamtkosten berechnet. Ausgerechnet ergibt dies

$$\frac{154\ €}{785\ €} = 0.196 \tag{5}$$

und somit 19.6 %. Es ist somit prozentual ersichtlich, dass der grösste Teil der Kosten nicht bei der Airline liegt, sondern aufgeteilt in andere Kosten Träger, wie die Abfertigungskosten am Flughafen, Versicherungskosten oder die Verzollungskosten.

Bevor wir zu den abschliessenden Prognosen des Umsatzpotenzials eines Hyperloop-Systems im Güterverkehr kommen, werden die oben für die Fallstudie der Strecke Zürich-Frankfurt berechneten Werte auf zwei weitere Fallbeispiele ausgedehnt.

<u>Zürich – Amsterdam, 615 Kilometer | Zürich – Paris, 490 Kilometer</u>

Nach derselben Vorgehensweise, wurde auch die Kosten für die Strecken von Zürich nach Amsterdam und nach Paris berechnet.

Fallbeispiele	**Zürich – Amsterdam**	**Zürich – Paris**	*Zürich – Frankfurt*
Kosten der Airline	311 €	248 €	*154 €*
Gesamtkosten	2449 €	1946 €	*785 €*
%-Anteil	12.7 %	12.7 %	*19.6 %*

Tabelle 2: Kosten und Prozentuelle Anteile der Fallbeispiele

Wie bereits erwähnt gibt es diverse Kostenträger, welche die Gesamtkosten stark beeinflussen. Seit 2008 erhebt die Schweiz eine CO_2 Abgabe auf fossile Brennstoffe. Die sogenannte Lenkungsabgabe [9]. Diese würden beim Hyperloop als Verkehrsmittel wegfallen, da dieser mit Strom betrieben wird. Generell kann davon ausgehen werden, dass viele Kostenpunkte wegfallen würden, die beim derzeitigen Transport per Flugzeug anfallen. Dies kann nicht belegt werden, da wir derzeit noch kein Hyperloop-System haben, ein Blick auf den Autoverkehr zeigt jedoch, dass zum Beispiel die Motorfahrzeugsteuer für Elektroautos in Zürich komplett wegfällt [10].

Um den Hyperloop als Güterverkehrsmittel attraktiv zu gestalten, wird vorausgesetzt, dass die Gesamtkosten gleichbleiben oder niedriger werden. Für die Abschätzung der potenziellen Einnahmen wird deshalb angenommen, dass der Endverbraucher die gleichen Preise bezahlt, welche heute schon in der Luftfracht Logistik bestehen. Mit der Anmerkung, dass potenzielle Subventionen dem Endkunden zugutekommen würden. Das bedeutet, dass die verschiedenen Kostenträger, wie z.B. die Abfertigung am Flughafen oder die Zollabfertigungskosten, gleichbleiben, lediglich das Transportmittel durch den Hyperloop ersetzt wird. Auch hier ist zu beachten, dass der Wechsel des Transportmittels verschiedene Optimierungsmöglichkeiten eröffnet, die in der folgenden Berechnung nicht berücksichtigt werden.

Für die Strecke von Zürich nach Frankfurt, wäre ein Potenzieller Umsatz nach einem Jahr wie folgt errechnet: Mit einem Umsatz von 0.506 Euro pro Tonnenkilometer (vgl. Gleichung {2}), einer Strecke von ca. 305 Kilometer und Gesamtumschlagsvolumen von 40'219 Frachttonnen, ergibt dies einen Umsatz in Höhe von

$$0.506€ * 305km * 40'219t = 6'206'998\ Euro. \tag{6}$$

Den potenziellen Umsatz aller drei Fallbeispiel Routen ohne Zwischenstopp sind in der untenstehender Tabelle 3 aufgelistet.

Wie am Anfang des Unterkapitels erwähnt, weisst die Stadt Basel hohes Frachtvolumen auf. Für eine eigenständige Hyperloop-Strecke wäre die Distanz jedoch zu kurz. Daher wird für die drei Fallstrecken eine zusätzliche Option aufgeführt, die den potenziellen Umsatz darstellt, mit einem Zwischenstopp in Basel. Somit werden die 13'077 Frachttonnen von Basel ebenfalls berücksichtigt (vgl. Tabelle 1).

Potenzieller Umsatz nach einem Jahr, in Millionen Euro	**Zürich – Amsterdam**	**Zürich – Paris**	**Zürich – Frankfurt**
Ohne Zwischenstopp	4.538 €	2.144 €	6.207 €
Mit Zwischenstopp in Basel	5.034 €	2.640 €	6.703 €

Tabelle 3: Potenzieller Umsatz aller Fallbeispiele

3.2. Streckenplanung

In diesem Kapitel wird auf die Streckenführung von möglichen Hyperloop Strecken eingegangen. Untersucht werden die Verbindungen der verschiedenen Städte aus dem Kapitel 3.1 *Marktpotenzial*. Also Verbindungen der Städte Zürich nach Paris, Zürich nach Frankfurt und Zürich nach Amsterdam. Es wird ermittelt, ob eine Strecke überhaupt gebaut werden kann oder es schlicht nicht vorstellbar ist. Im weiteren Verlauf wird ebenfalls aufgezeigt, wie viel Zeit eine einzelne Hyperloop-Kapsel braucht, um die jeweilige Strecke abzufahren.

Für alle Strecken werden drei verschieden Methoden der Verbindungen untersucht.

1. Eine gerade Linie zur Verbindung der zwei Städte
2. Eine Verbindung die an das Autobahnnetz angelehnt ist
3. Eine Hybrid Route die das Autobahnnetz, Zugstrecken und Grünflächen vereinigt

In Europa gibt es viele Bergketten und Unebenheiten, topologische schwierige Voraussetzungen für einen Hyperloop, welcher kaum Radien noch Höhenunterschiede bei hoher Geschwindigkeit gut meistern kann. Zudem haben wir in Europa eine dichte Überbauung. Eine oberirdische Hyperloop Strecke kommt deshalb kaum in Frage. Was bleibt, sind unterirdische Verbindungen. Die erste Methode der Verbindung (gerade Linie) ist mehr ein theoretisches Konzept und wird in der Praxis kaum umgesetzt, da diese Streckenführung keinerlei Umfahrungen zulässt. Diese Methode dient lediglich, um das theoretische Potenzial aufzuzeigen. Die zweite Methode nutzt die bestehende Infrastruktur der Autobahnen. Autobahnen werden meist so geplant, dass sie möglichst effizient und sicher sind. Daher wird in der Regel versucht, bergiges Gelände zu vermeiden und grössere Höhenunterschiede zu umgehen. Das kann als grosser Vorteil für den Hyperloop gesehen werden. In Europa gehören die meisten Autobahnen dem Staat [11]. Der Bau einer unterirdischen Röhre in der Nähe der Autobahn, würde somit weniger Landrechtliche Probleme bereitstellen, sofern der Staat beim Bau eines Hyperloop-Projektes dahintersteht. Die dritte Alternative ist eine Kombination aus bestehendem Autobahnnetz, Zugstrecken die meist mit grossen Radien gebaut wurden, und flache Grünflächen. Diese Methode wäre (neben der geradlinigen Methode) optimal für die Geometrie des Hyperloops. Jedoch können bei dieser Methode diverse Probleme wegen Landrechte eingreifen.

3.2.1. Strecke Zürich nach Paris

Als Erstes wird die Strecke zwischen Zürich und Paris von ca. 490 Kilometer Luftdistanz untersucht.

3.2.1.1. Methode 1: Gerade Linie

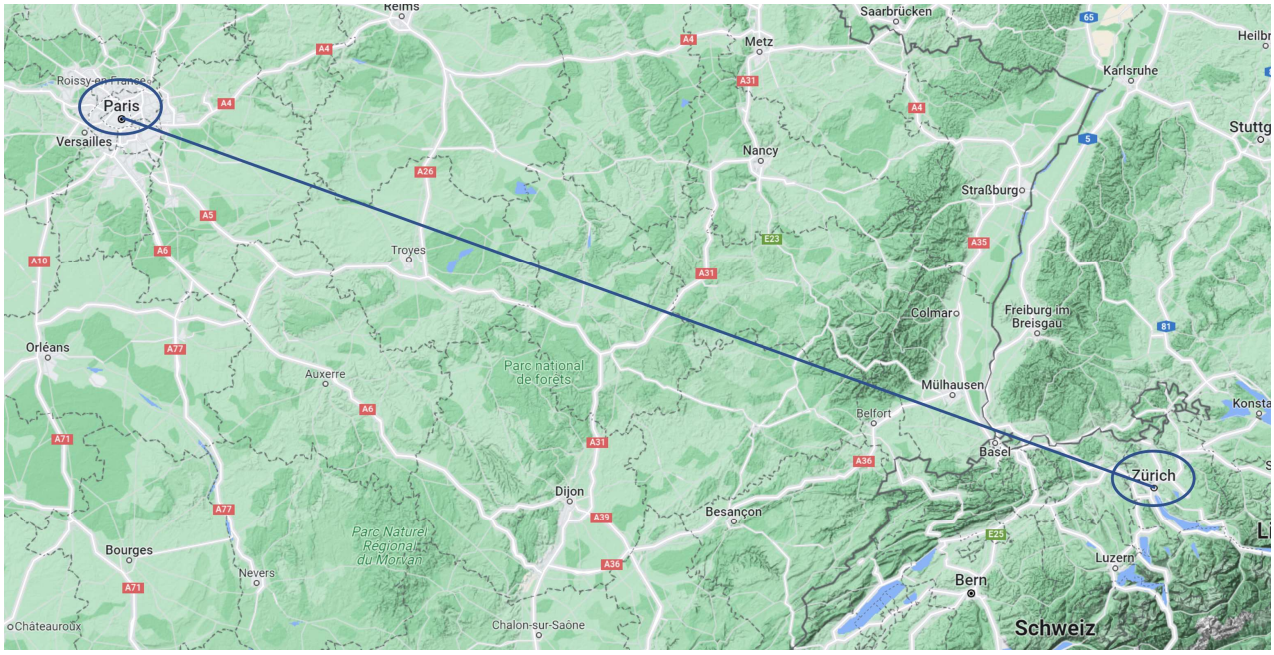


Abbildung 6: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Paris.

Die Route von Zürich nach Paris durch eine gerade Verbindung zeigt auf, dass die Strecke durch die drei Länder Schweiz, Deutschland und Frankreich verläuft. Die Stadt Basel wird knapp umfahren und oberhalb von Belfort führt die Strecke durch bergiges Gelände. Wie eingangs erwähnt (vgl. Kap. 3.2), ist diese Strecke nur eine konzeptuelle Darstellung, und sollte in künftigen Studien ausführliche untersucht werden, falls Interesse darin besteht.

Das Prinzip des Hyperloops ist ein sehr Energie und Strom effizientes Konzept. Durch die Beschleunigung der Hyperloop-Kapseln wird Energie benötigt und Strom verbraucht. Diese Energy ist jedoch nicht verloren. Sie ist im bewegten Objekt als kinetische Energie gespeichert. Sobald die Kapsel eine maximale Geschwindigkeit erreicht, braucht es durch das beinahe Vakuum in der Röhe, kaum zusätzliche Energie, um diese Geschwindigkeit aufrecht zu erhalten. Durch regenerative Bremsen wird später ein Grossteil des verbrauchten Stromes beim Abbremsen zurückgewonnen. Der minimale Luftwiderstand ist die «friction», also die Reibung in dem System. Die Energie, die dadurch verloren wird, wird als Wärme sichtbar und kann (zum jetzigen Forschungsstand) nicht zurückgewonnen werden [2]. Eine im International Journal of Mechanical Sciences veröffentlichte Studie ergab, dass ein Hyperloop System eine Energieeffizienz von 84% erreichen könnte [12]. Diese Angaben empfindet unser Institut für Datenanalyse an der ZHAW aber für optimistisch eingeschätzt. Die geradlinige Verbindung der Städte Zürich und Paris wäre allerdings für die Hyperloop-Kapseln zusätzlich energieeffizient, da es die Notwendigkeit des Beschleunigens und Bremsens an Zwischenpunkten und vor Radien minimiert.

Es gibt bislang keine Norm für Höchstgeschwindigkeiten eines Hyperloop-Systems, in vielen Studien ist aber von Geschwindigkeiten unterhalb Mach 1 (∽1235 km/h) die Rede [13]. Durch diese Verbindung, könnte ein Hyperloop, Höchstgeschwindigkeiten von bis zu 1200 km/h oder 333.33 m/s erreichen und diese fast über die gesamte Strecke halten. Gemäss der «TEMS-Studie», soll der Hyperloop eine Beschleunigung von 0.981 m/s^2 haben [2]. Zum Vergleich: Ein Schnellzug mit einer Höchstgeschwindigkeit von 330 km/h wird mit 1.1 m/s^2 beschleunigt [14]. Zur Vereinfachung wird von einer konstanten Beschleunigung bzw. Entschleunigung (bremsen) ausgegangen. Zusammenfassend ist somit bekannt, dass der Hyperloop in dieser theoretischen Strecke mit V_0 = 0 m/s startet, mit a = 0.981 m/s^2 beschleunigt bis er bei Kilometerstand [S_1], V_1 = 333.33 m/s erreicht. Diese Geschwindigkeit bis zum nächsten Kilometerstand [S_2] konstant hält, dann rechtzeitig mit -0.981 m/s^2 abbremst, um bei Kilometerstand 490 [S_{Total}] wieder still zu stehen. Die untenstehende Tabelle (4), fasst alle Ergebnisse der Strecke Zürich – Paris mit der geradlinigen Methode zusammen.

Strecke Zürich - Paris	**Strecke in m [s]**	**Geschwindigkeit in m/s [v]**	**Beschleunigung oder bremsen in m/s^2 [a]**	**Zeit in s [t]**	**Kumulierte Zeit in Minuten**
S_0	0	0	0,981	0	0
S_1	56630	333,33	0	339,785	5,663
S_2	433370	333,33	0	1470,015	24,5
S_{Total}	490000	0	-0,981	1809,8	30,163

Tabelle 4: Methode 1: Strecke: Zürich - Paris

Die mathematischen Berechnungen dieser Werte wurden mit Hilfe der SUVAT-Gleichungen durchgeführt und sind aus Gründen der Transparenz im Anhang unter *Anhang B* aufgeführt [15].

Visuelle Darstellung

Um die Ergebnisse grafisch darzustellen, wird nachkommend ein v-s-Diagramm (Geschwindigkeit-Strecke) präsentiert. Anders als beim klassischen v-t-Diagramm (Geschwindigkeit-Zeit) muss beachtet werden, dass die Geschwindigkeit nicht linear mit der Strecke wächst. Die Geschwindigkeit ist eine Funktion in Abhängigkeit der Strecke und definiert durch:

$$v(s) = \sqrt{2 * 0.981 * s}\,. \tag{7}$$

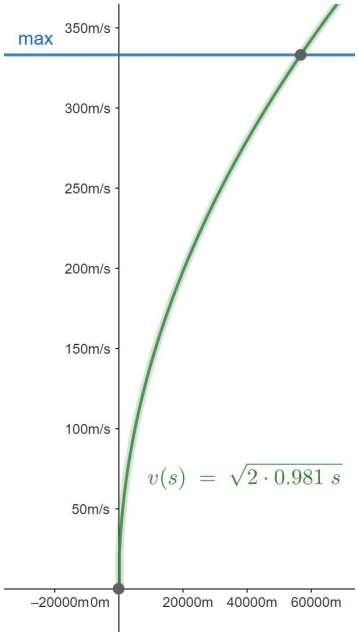


Abbildung 7: Graph der Funktion v(s)

Die folgenden v-s Diagramme werden nicht in Meter bzw. m/s, sondern in Kilometer bzw. km/h angegeben. Da es angenehmer ist, die Grafiken zu intepretieren.

Das v-s Diagramm für die Werte der Tabelle 4 sieht wie folgt aus:

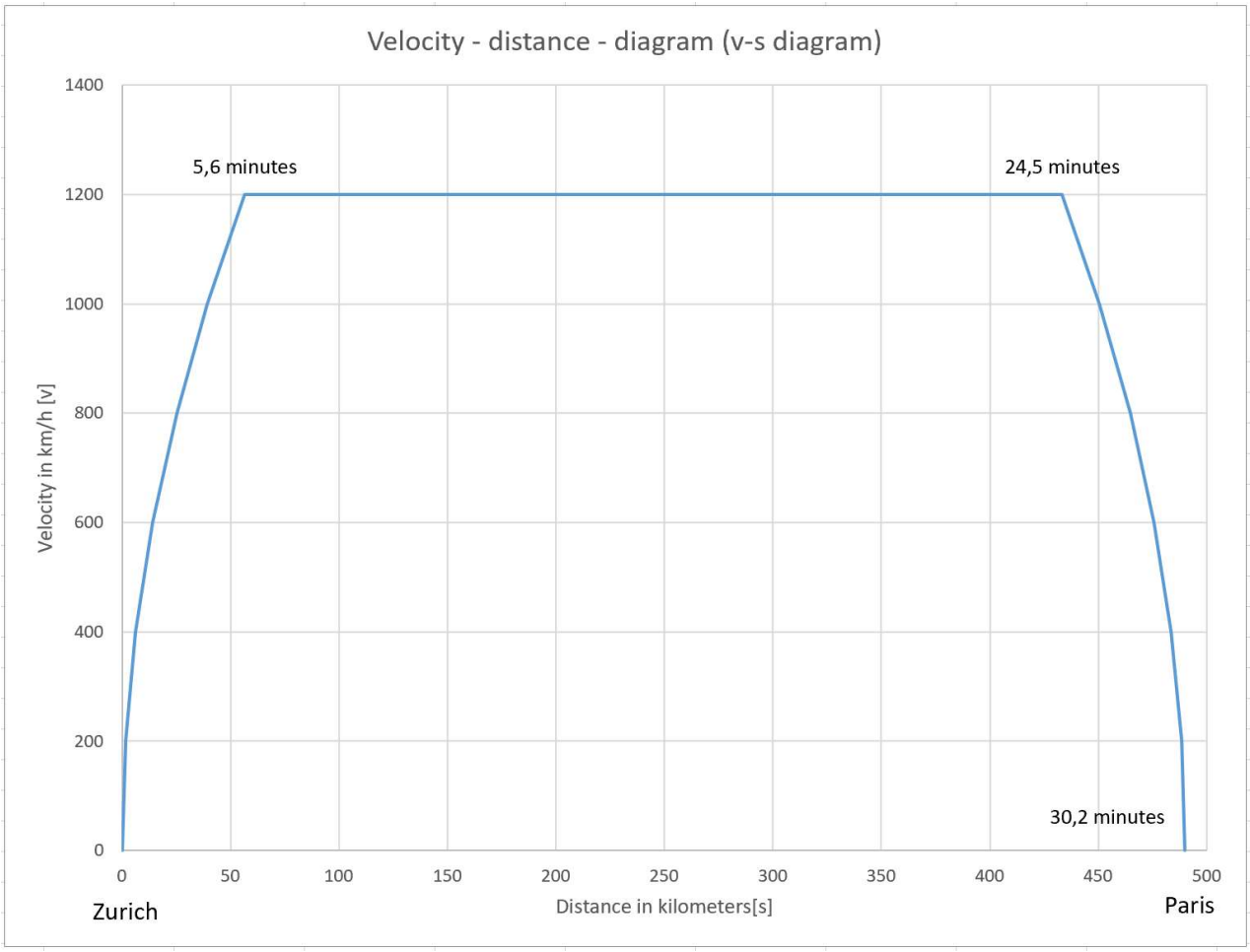


Abbildung 8: Methode 1: Zürich – Paris, Geschwindigkeit-Strecke-Diagramm (eigene Darstellung).

Die Gesamtreisezeit der Methode 1 der Strecke Zürich nach Paris würde sich auf 30,2 Minuten belaufen.

3.2.1.2. Methode 2: Verbindung in Anlehnung an das Autobahnnetz

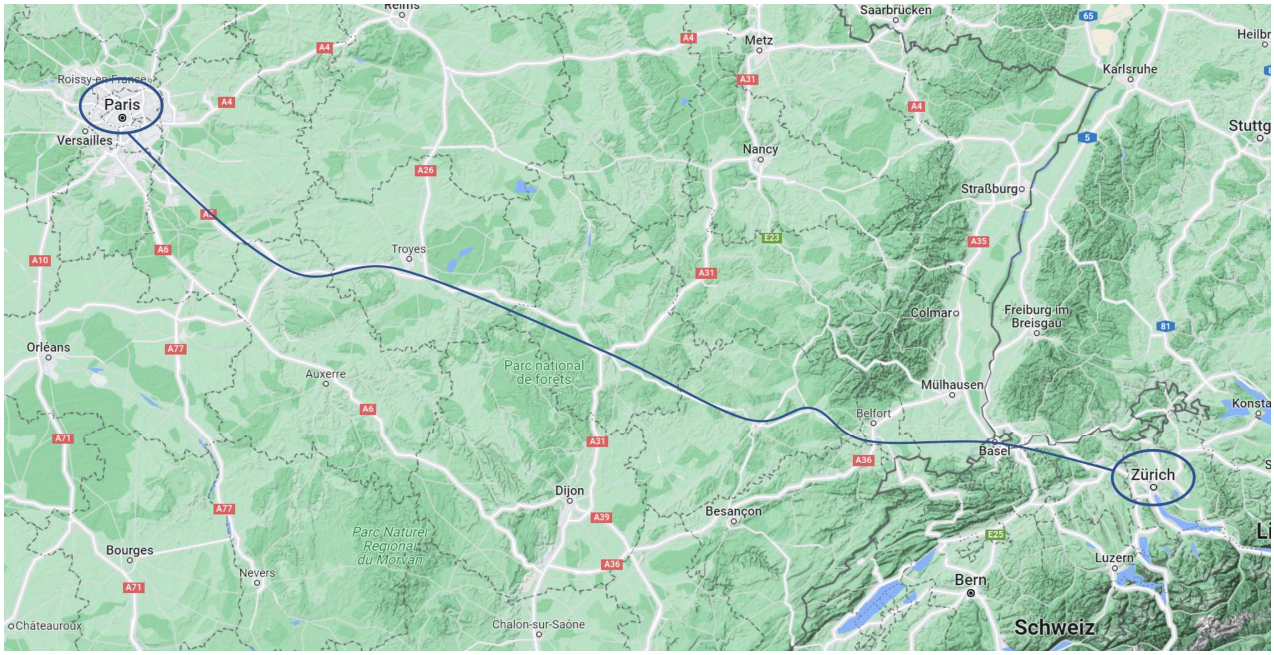


Abbildung 9: Methode 2: Verbindung zwischen Zürich und Paris, angelehnt an das Autobahnnetz.

Mit dieser Art von Verbindung, könnte das Eindringen nach Deutschland knapp umgangen werden. Einen zusätzlichen Stopp am Punkt Basel, würde diverse Vorteile mit sich bringen. Wie aus Kapitel 3.1.1. hervorgeht, gibt es reichlich Luftfracht vom Standort Basel. Mit über 13 Tausend Frachttonnen ist Basel der viertgrösste Standort für Luftfracht, gefolgt von Paris. Diese Route würde beide Standorte mit einer Verbindung vereinigen.

Anders als bei der vorherigen Methode der geradlinigen Verbindung, weisst die Route Radien und einen Zwischenstopp auf. Von Zürich ausgehend wäre der erste vollständige Stopp, bei dem die Kapsel (mathematisch) auf v = 0 m/s abbremsen muss, nach etwa 75 Kilometern in Basel. Für die Weiterfahrt, wird mit einer 5-minütigen Verzögerung gerechnet. Nach Basel muss die Kapsel erneut von v = 0 m/s beschleunigen und wird dann bald mit diversen Radien konfrontiert. Ein Hyperloop kann theoretisch Radien fahren, je kleiner diese sind, desto langsam muss die Kapsel aber sein. In der folgenden Abbildung 10 wird deshalb, dieselbe Route etwas genauer untersucht. Auf dieser Strecke gibt es fünf relevante Radien (C1-C5). Die dazwischen liegenden Streckenteile, werden für diese Untersuchung als gerade Strecken angenommen. Die Länge der jeweiligen Streckenabschnitte, sind in Kilometer angegeben und der Abbildung 10 zu entnehmen.

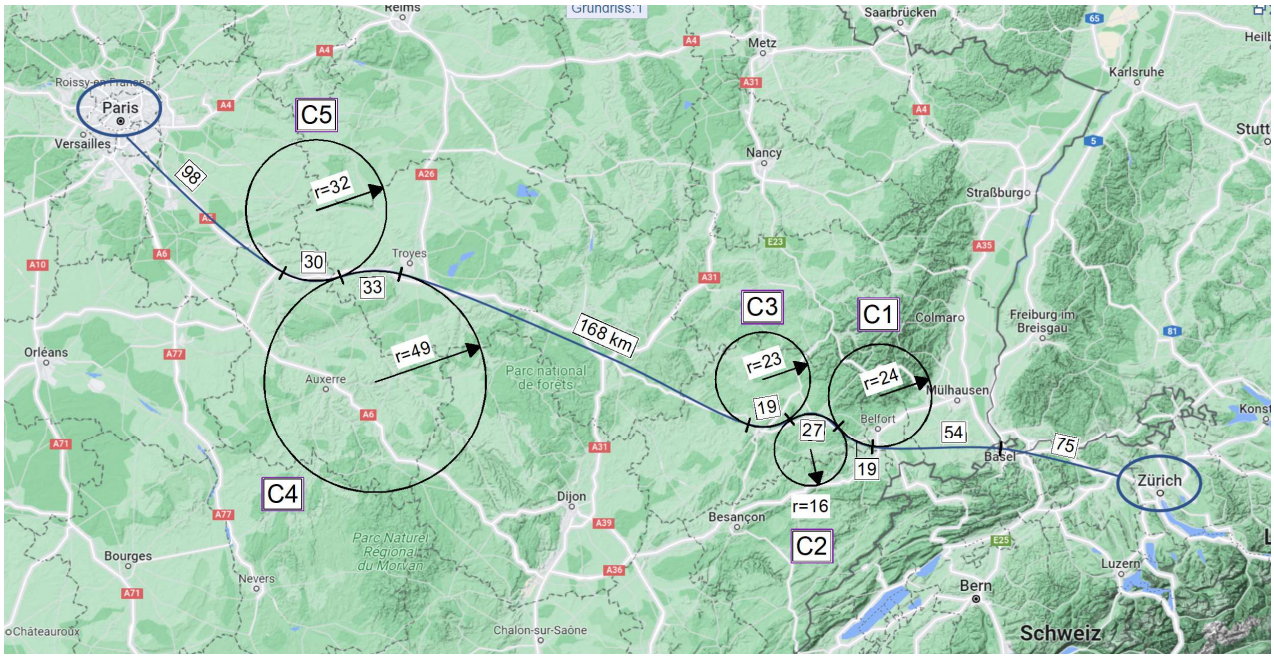


Abbildung 10: Methode 2: Verbindung Zürich - Paris. Streckenabschnitte detaillierter Untersucht (eigene Darstellung)

Die Höchstgeschwindigkeit bei einer geradlinigen Verbindung wurde im vorherigen Kapitel erklärt und mit v_{Max} = 333.33 m/s definiert (vgl. Kap 3.2.1.1). Mit Personal an Bord, muss bei Kurven die Zentrifugalkraft, welche auf die Kapsel wirkt, aus Komfort Gründen berücksichtigt werden. Bei Waren- und Gütertransport könnte dieser Punkt theoretisch vernachlässigt werden. Wird die Infrastruktur jedoch zu einem anderen Zeitpunkt mit dem Personenverkehr geteilt, muss die gesamte Anlage an die Komfortbedingungen und damit an die Geschwindigkeitsbegrenzungen angepasst werden. Diese Arbeit untersucht das Hyperloop-Konzept ausschliesslich als alternative zur Luftfracht. Die Berechnungen der Geschwindigkeiten sind jedoch so definiert, dass sie auch für den Personenverkehr anwendbar sind. Deshalb wird bei dieser Untersuchung, der Faktor der Zentrifugalkraft berücksichtigt.

Die Zentrifugalkraft F_Z wird berechnet durch

$$Fz = \frac{m * v^2}{r}, \tag{8}$$

wobei:

F_Z = Zentrifugalkraft [in Newton]

m = Masse [in kg],

v = Geschwindigkeit [in m/s] und

r = Radius [in m], ist.

Um die maximale Geschwindigkeit in einer Kurve zu bestimmen, müssen wir die Zentrifugalkraft mit der Beschleunigung vergleichen. Unter der Annahme, dass die maximale Beschleunigung bei a = 0.981 m/s^2 liegt, lässt sich die Geschwindigkeit in einer Kurve, durch Newtons zweites Gesetz der Bewegung, berechnen.

Das zweite Newtonsche Gesetz lautet

$$F = m * a\,. \tag{9}$$

Werden diese zwei Kräfte nun gegenübergestellt, ergibt dies:

$$m * a = \frac{m * v^2}{r}\,. \tag{10}$$

Die Masse [m] kürzt sich weg. Durch Umformung lässt sich die maximale Geschwindigkeit definieren als

$$v_{Max} = \sqrt{a * r}\,. \tag{11}$$

Die fünf Kurven sind durch die folgenden Radien definiert:

C1: r1 = 24'000 m

C2: r2 = 16'000 m

C3: r3 = 23'000 m

C4: r4 = 49'000 m

C5: r5 = 32'000 m.

Die maximale Geschwindigkeit der jeweiligen Kurven ergeben somit:

C1: 153.44 m/s bzw. 552 km/h

C2: 125.28 m/s bzw. 451 km/h

C3: 150.21 m/s bzw. 541 km/h

C4: 219.25 m/s bzw. 789 km/h

C5: 177.18 m/s bzw. 638 km/h.

Diese theoretischen maximalen Geschwindigkeiten der jeweiligen Streckenabschnitte im v-s-Diagramm zusammengefasst, ergibt folgende Grafik (11):

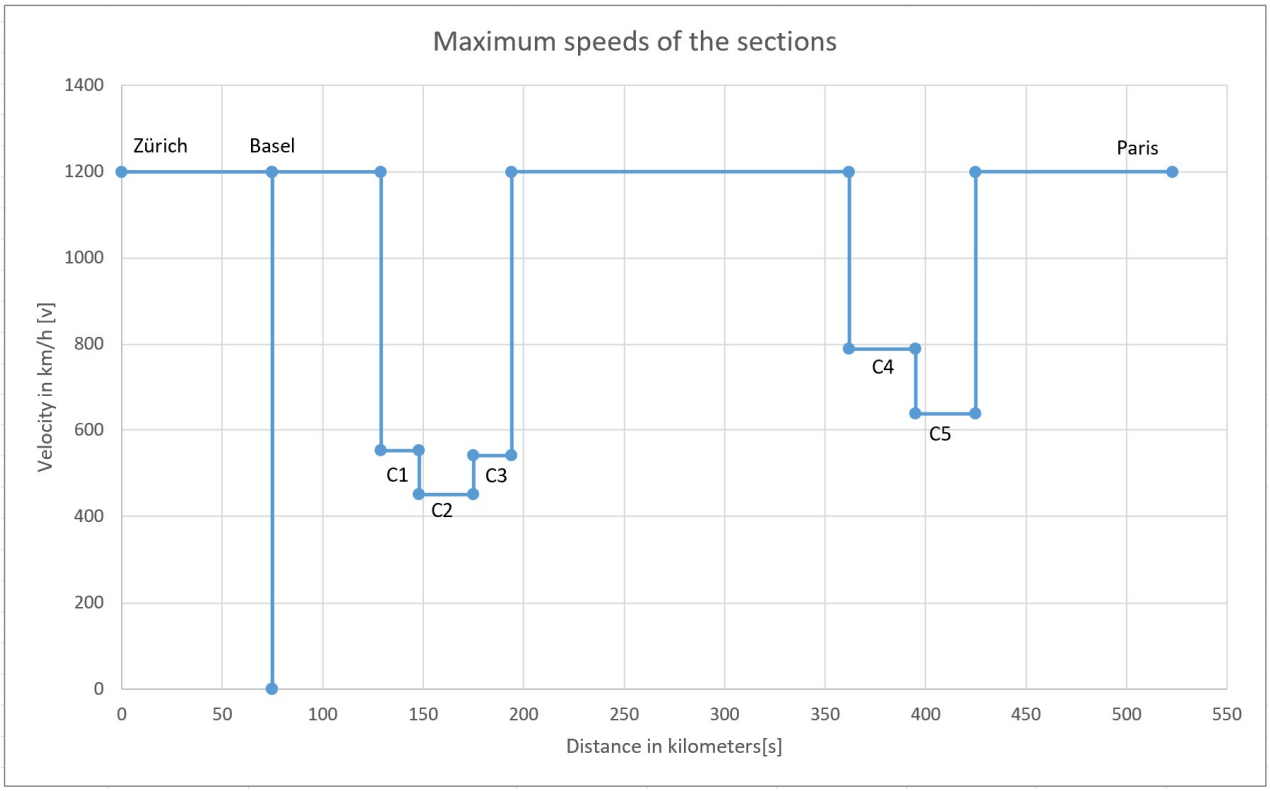


Abbildung 11: Methode 2: Maximale Geschwindigkeit der Verbindung Zürich – Paris (eigene Darstellung)

Der Hyperloop braucht jedoch Zeit und Strecke während der Beschleunigung, um diese theoretischen maximalen Geschwindigkeiten zu erreichen. Es ist auch zu beachten, dass diese Höchstgeschwindigkeiten nicht überschritten werden dürfen. Das bedeutet, dass die Bremsen früh genug betätigt werden müssen, damit die Höchstgeschwindigkeiten beim nächsten Abschnitt, nicht überschritten werden. Somit kann es vorkommen, dass der Hyperloop auf gewiesen Streckenabschnitte nie, maximal zulässige Geschwindigkeiten erreicht.

Dieses Problem lässt sich nummerisch oder geometrisch lösen. In diesem Zusammenhang wird das Problem geometrisch gelöst. Dafür werden die Funktionen im CAD (Computer Aided Design) übertragen. Später lassen sich die Geschwindigkeiten geometrisch auslesen. Für die maximalen Geschwindigkeiten wird die Abbildung 11 als Referenz hinterlegt. Für die Beschleunigung und der Bremsvorgang wird die vorgängig erklärte Funktion $v(s) = \sqrt{2 * 0.981 * s}$, verwendet (siehe Abb. 7).

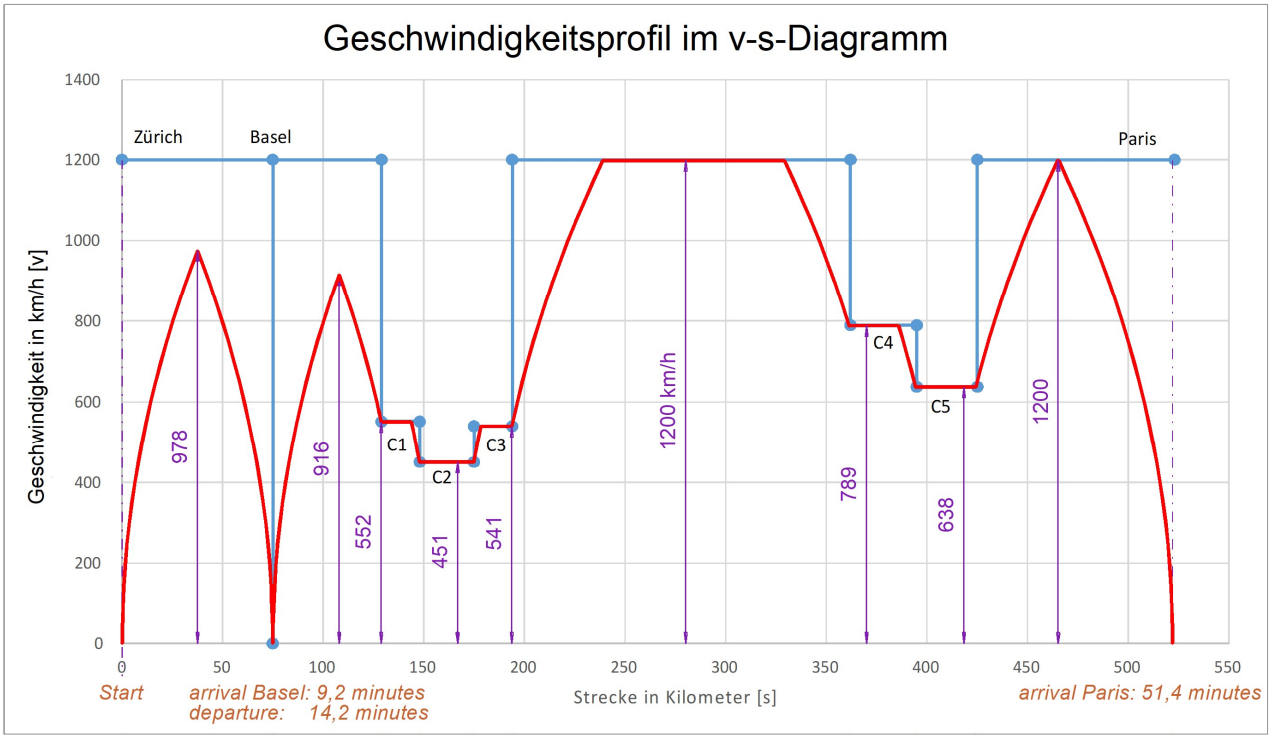


Abbildung 12: Methode 2: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Paris (eigene Darstellung)

Wie aus der Abbildung 12 hervorgeht, würde ein Hyperloop bei dieser Art der Verbindung (Methode 2) von Zürich aus starten, nach 9,2 Minuten Basel erreichen und nach einer fünfminütigen Verzögerung weiterfahren, um Paris schliesslich nach 51,4 Minuten zu erreichen. Die vollständige Tabelle, mit allen Streckenabschnitten, Geschwindigkeiten und dazugehörigen Zeiten sind im Anhang unter *Anhang C* zu finden.

3.2.1.3. Methode 3: Hybridroute (Mischung aus Autobahn, Zugnetz und Grünflächen)

Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, wäre diese Route sicherlich interessant, wenn es in einem flachen Gebiet keine Autobahnen, sondern Bahnstrecken oder unbewohnte Grünflächen gibt. Diese Art der Verbindung würde alle drei Möglichkeiten kombinieren. Einen Auszug aus dem Europäischen Bahnnetz bildet die folgende Abbildung 13 ab.

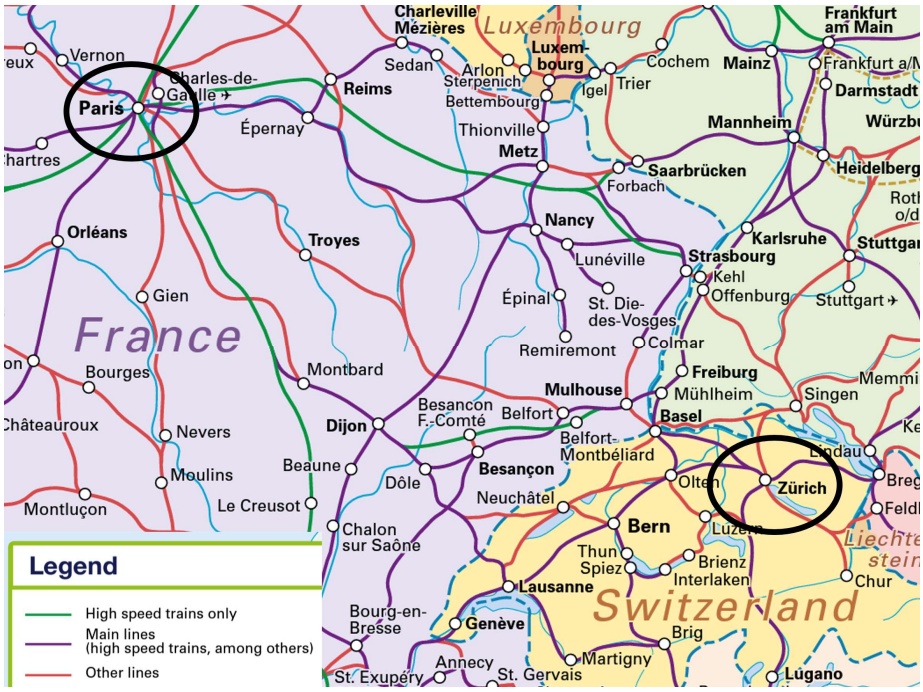


Abbildung 13: Auszug aus dem Europäischen Bahnnetz [16].

Es ist zu erkennen, dass verschiedene Zugstrecken von Zürich nach Paris führen. Auf den ersten Blick scheint es jedoch, dass diese Kurven mit kleineren Radien verlaufen als im vorherigen Unterkapitel für Methode 2 gezeigt. Um Sicherheit zu bekommen, werden die zwei Bilder als Layer aufeinandergelegt.

Abbildung 14: Zugnetz und Autobahnverbindung verglichen.

Durch diesen Vergleich wird deutlich, dass die Einbeziehung der Zugstrecken in Bezug auf Streckenführung, der zuvor untersuchte Strecke aus Methode 2, keine grossen Vorteile bietet. Deshalb wird dieses Konzept der Verbindung (Methode 3) für die Strecke von Zürich nach Paris, in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

3.2.2. Strecke Zürich nach Frankfurt

Als nächstes wird die Strecke von Zürich nach Frankfurt mit einer Luftdistanz von ca. 305 Kilometer, näher betrachtet.

3.2.2.1. Methode 1: Gerade Linie

Wie in der vorherigen Verbindung von *Zürich nach Paris*, wird nun auch bei dieser Strecke als erstes die konzeptuelle Verbindung als geradlinige Methode aufgezeigt.

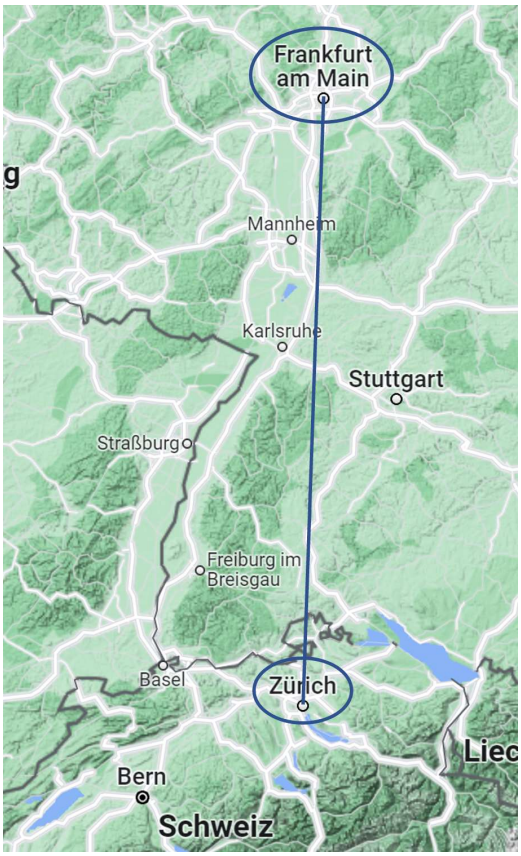


Abbildung 15: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt

Diese Route würde den Schwarzwald im Süden sowie den Odenwald im Norden knapp umfahren. Da die Strecke ausserhalb Mannheims verläuft, würde dies zusätzliche Vorteile bringen, da die Schwierigkeiten beim Passieren einer Stadt umfahren werden.

Mit denselben Rahmenbedingungen wie im Vorherigen Kapitel (vgl. 3.2.1.1), sieht das v-s Diagramm der Strecke Zürich nach Frankfurt wie folgt aus (vgl. Abb. 16):

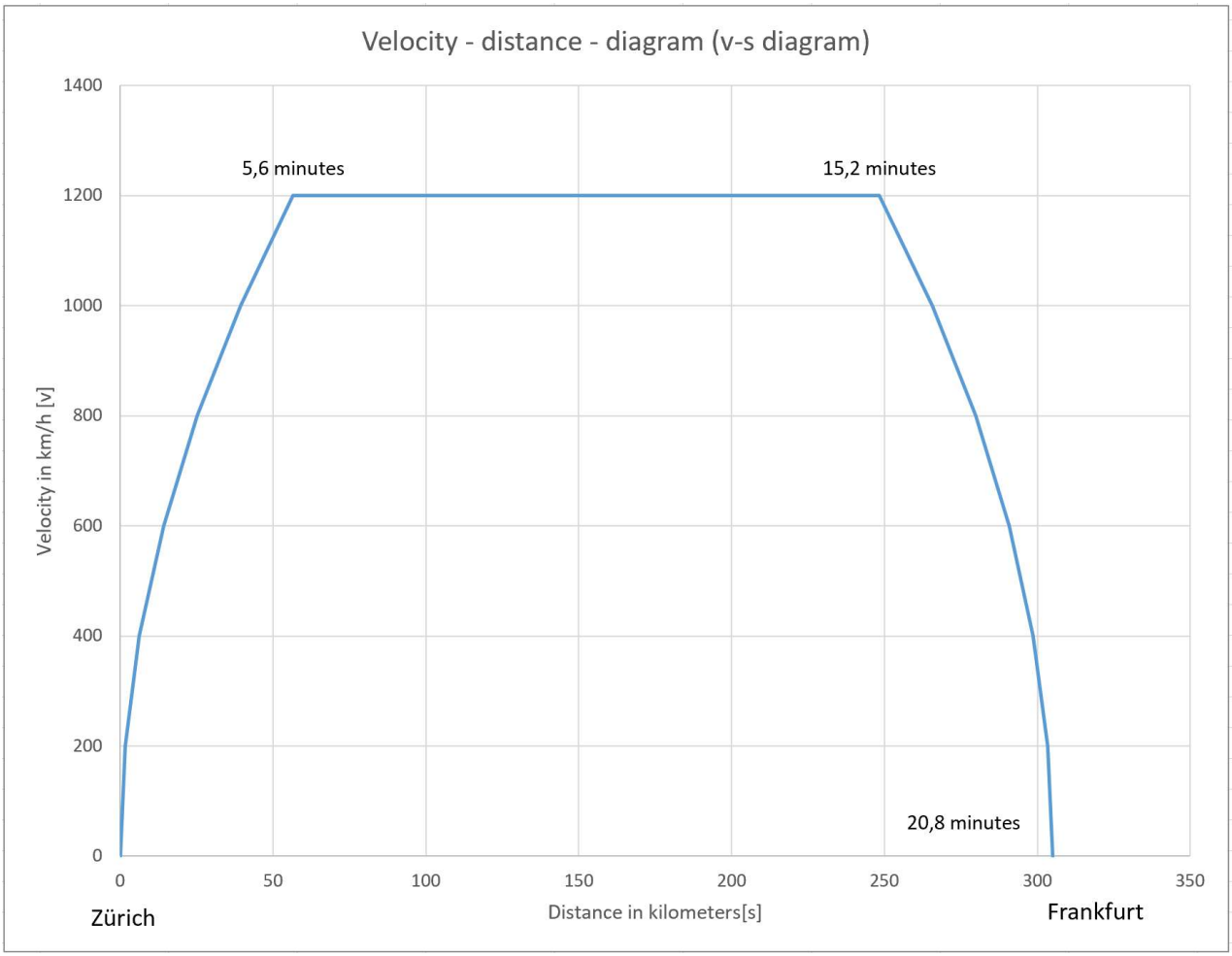


Abbildung 16: Methode 1: Strecke Zürich - Frankfurt, v-s-Diagramm (eigene Darstellung).

Die Gesamtreisezeit der Methode 1 der Strecke Zürich nach Frankfurt würde sich auf 20,8 Minuten belaufen.

3.2.2.2. Methode 2: Verbindung in Anlehnung an das Autobahnnetz

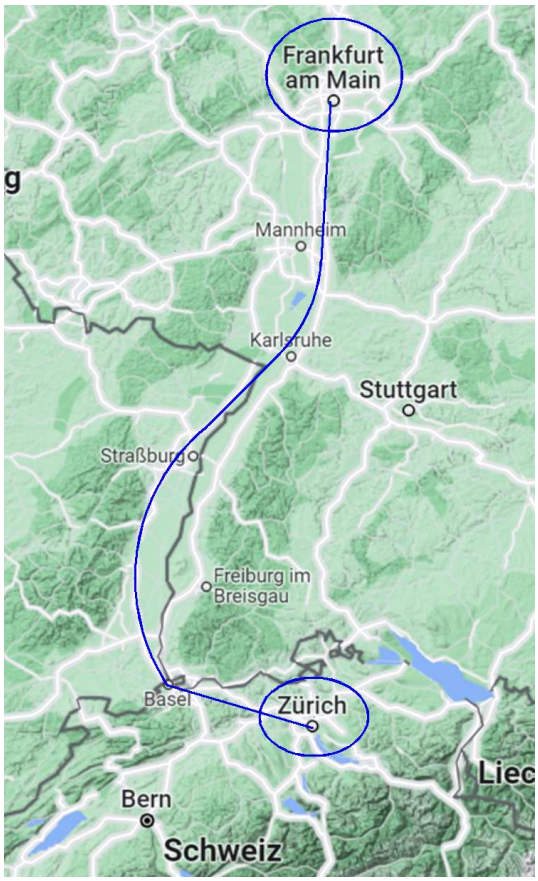


Abbildung 17: Methode 2: Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt, angelehnt an das Autobahnnetz

Mit dieser Art der Verbindung, könnte Basel ebenfalls miteinbezogen werden. Von Zürich ausgehend, wäre der erste Vollständige stopp demnach wieder nach ca. 75 Kilometer in Basel. Zwei Kurven und gerade Verbindungsstücke dazwischen, bilden die restliche Route ab. Die Strecke wird in der folgenden Abbildung (vgl. Abb. 18) ausführlicher mit den Radien und Kilometerangaben gezeigt.

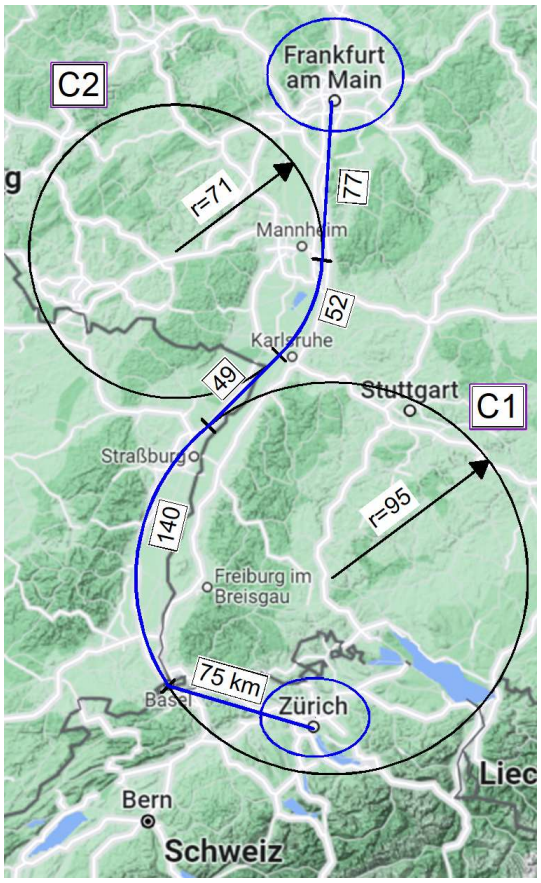


Abbildung 18: Methode 2: Verbindung Zürich - Frankfurt detailliert (eigene Darstellung)

Die Höchstgeschwindigkeit auf geraden Streckenabschnitten beträgt auch auf dieser Route V_{Max} = 333.33 m/s oder 1200 km/h. Für die Berechnung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten in den Kurven wird das gleiche Verfahren wie im vorherigen Unterkapitel (vgl. Kap. 3.2.1.2) beschrieben, mit $v_\max = \sqrt{a * r}$, angewendet. Demnach ergibt dies die maximalen Geschwindigkeiten von:

Radius	Maximale Geschwindigkeit
C1: 95'000 m	305 m/s bzw. 1099 km/h
C2: 71'000 m	264 m/s bzw. 950 km/h

Diese Angaben lassen sich nun ins Geschwindigkeitsprofil übertragen und ergeben folgende Grafik (vgl. Abb. 19).

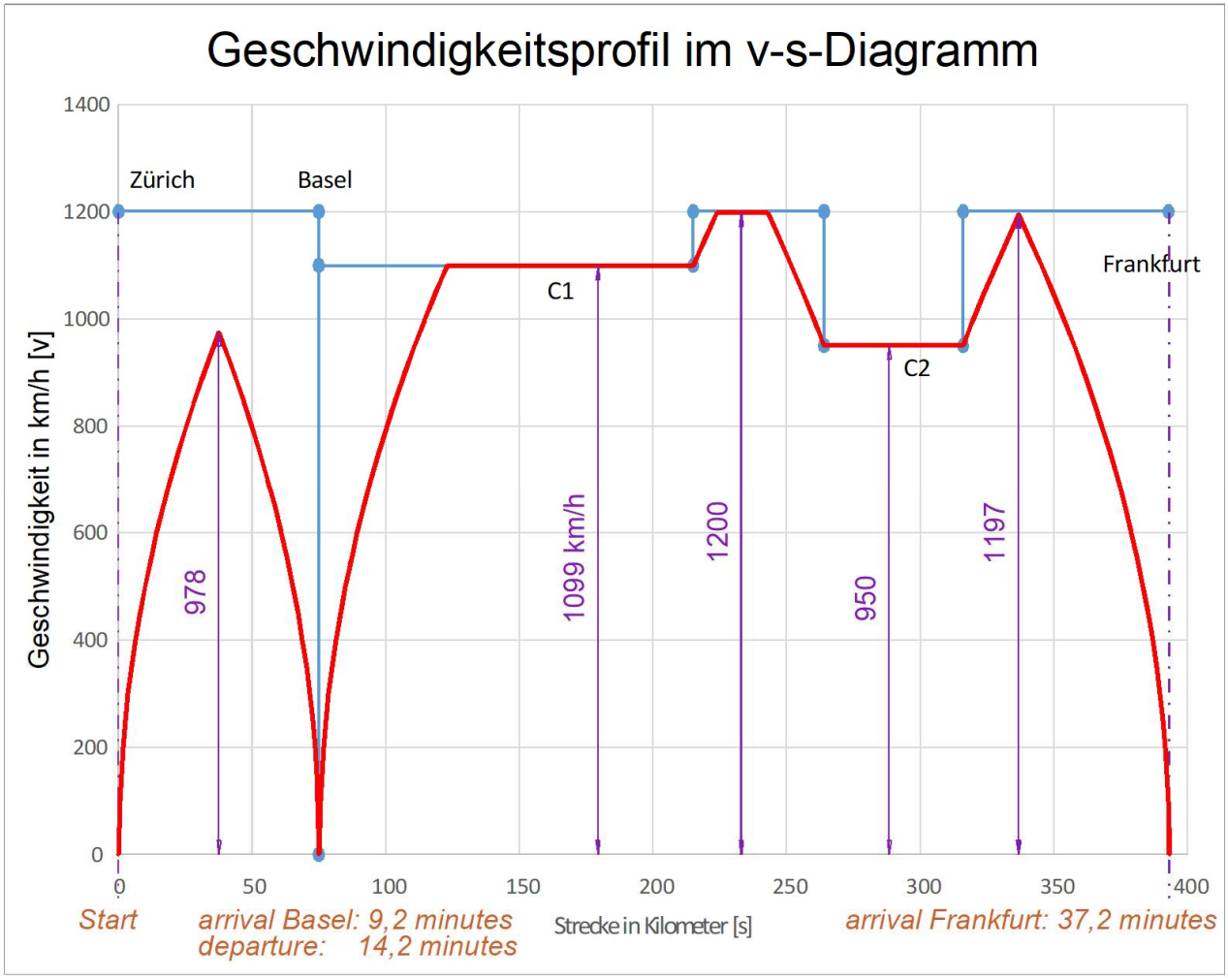


Abbildung 19: Methode 2: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Frankfurt (eigene Darstellung).

Wie in Abbildung 19 dargestellt, würde ein Hyperloop bei dieser Art der Verbindung (Methode 2) von Zürich aus starten, nach 9,2 Minuten Basel erreichen und nach einer fünfminütigen Verzögerung weiterfahren, um Frankfurt schliesslich nach 37,2 Minuten zu erreichen. Die vollständige Tabelle, mit allen Streckenabschnitten, Geschwindigkeiten und zugehörigen Zeiten findet sich im Anhang unter *Anhang D*.

3.2.2.3. Methode 3: Hybridroute (Mischung aus Autobahn, Zugnetz und Grünflächen)

Für die Strecke Zürich nach Frankfurt gibt es diverse Bahnverbindungen. Ähnlich wie im vorherigen Unterkapitel (vgl. Kap. 3.2.1.3) wird wieder das Europäische Bahnnetz zur Hilfe gezogen. Einen Auszug zwischen Zürich und Frankfurt, zeigt eine spannende Verbindung auf (siehe Abb. 20 *grün markiert*). In Referenz an diese Verbindung, plus Autobahnabschnitte und Grünflächen, ergibt sich eine neue Trasse der Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt (siehe Abb. 20 *rechtes Bild*).

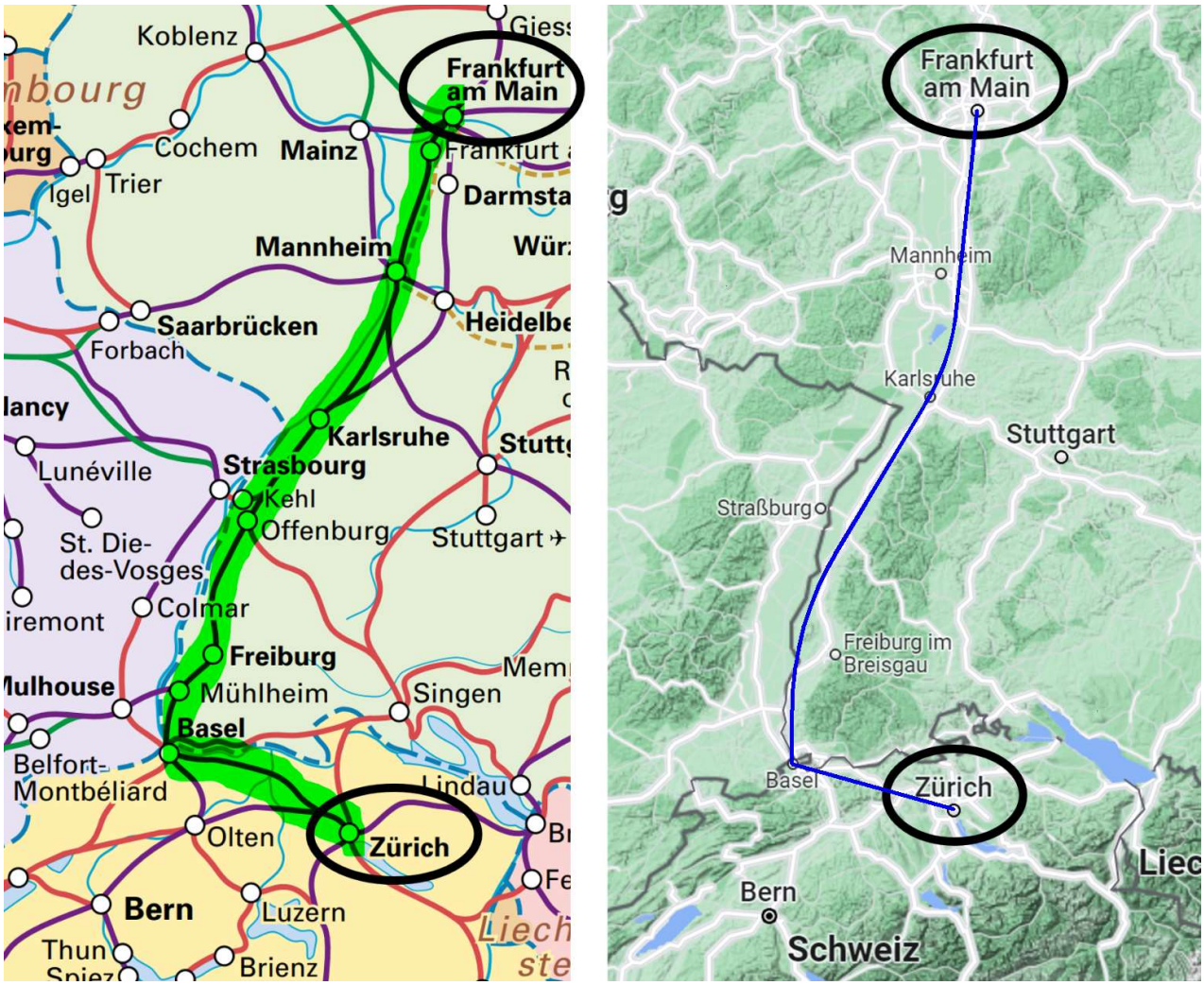


Abbildung 20: Auszug aus dem Europäischen Bahnnetz | Methode 3: Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt

Diese Verbindung würde Basel ebenfalls miteinbeziehen und danach knapp ausserhalb vom Schwarz- und Odenwald verlaufen. Diese Route ist ähnlich wie bei der vorangegangenen Methode 2 (vgl. Kap. 3.2.2.2), mit dem Unterschied, dass die Kurven mit grösseren Radien verlaufen. Dieser Umstand ermöglicht es, länger mit höheren Geschwindigkeiten zu fahren und so, die Gesamtlaufzeit zu verkürzen. In der folgenden Abbildung (vgl. Abb. 21), wird diese Route wieder etwas ausführlicher untersucht.

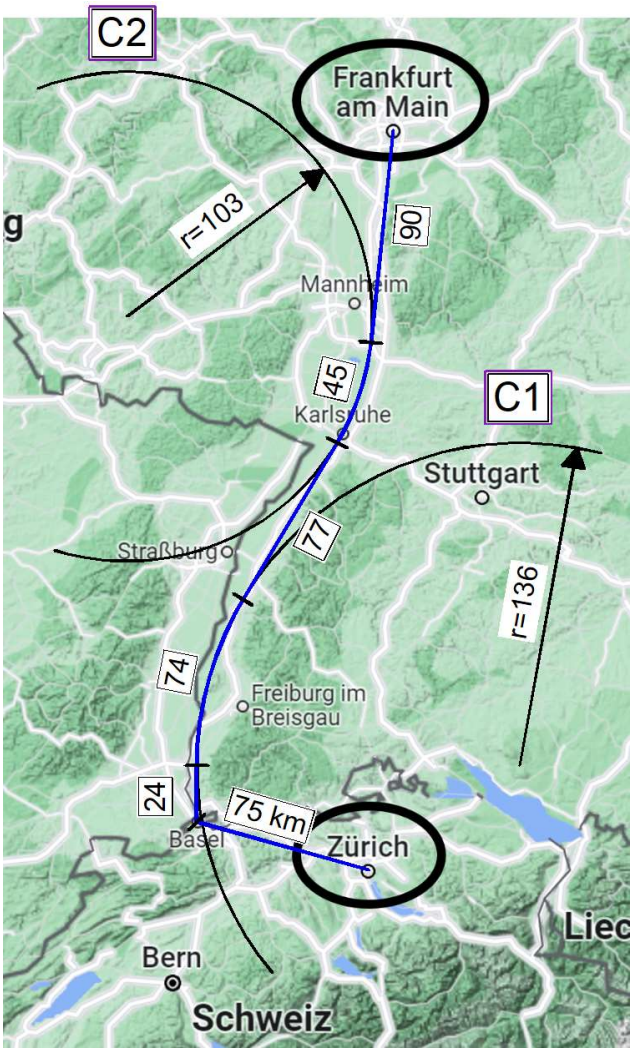


Abbildung 21: Methode 3: Verbindung Zürich - Frankfurt detailliert (eigene Darstellung).

Die Höchstgeschwindigkeiten in den Kurven ergeben sich durch $v_\max = \sqrt{a * r}$. Wobei der Wert bei Radius C1 die allgemein definierte Höchstgeschwindigkeit des Hyperloops überschreitet und somit durch 333,33 m/s bzw. 1200 km/h ersetzt wird.

Radius	**Maximale Geschwindigkeit**
C1: 136'000 m	(365 m/s bzw. 1315 km/h) | **v_max = 1200 km/h**
C2: 103'000 m	318 m/s bzw. 1144 km/h

Diese Angaben übertragen im Geschwindigkeitsprofil, ergibt folgende Grafik (vgl. Abb. 22).

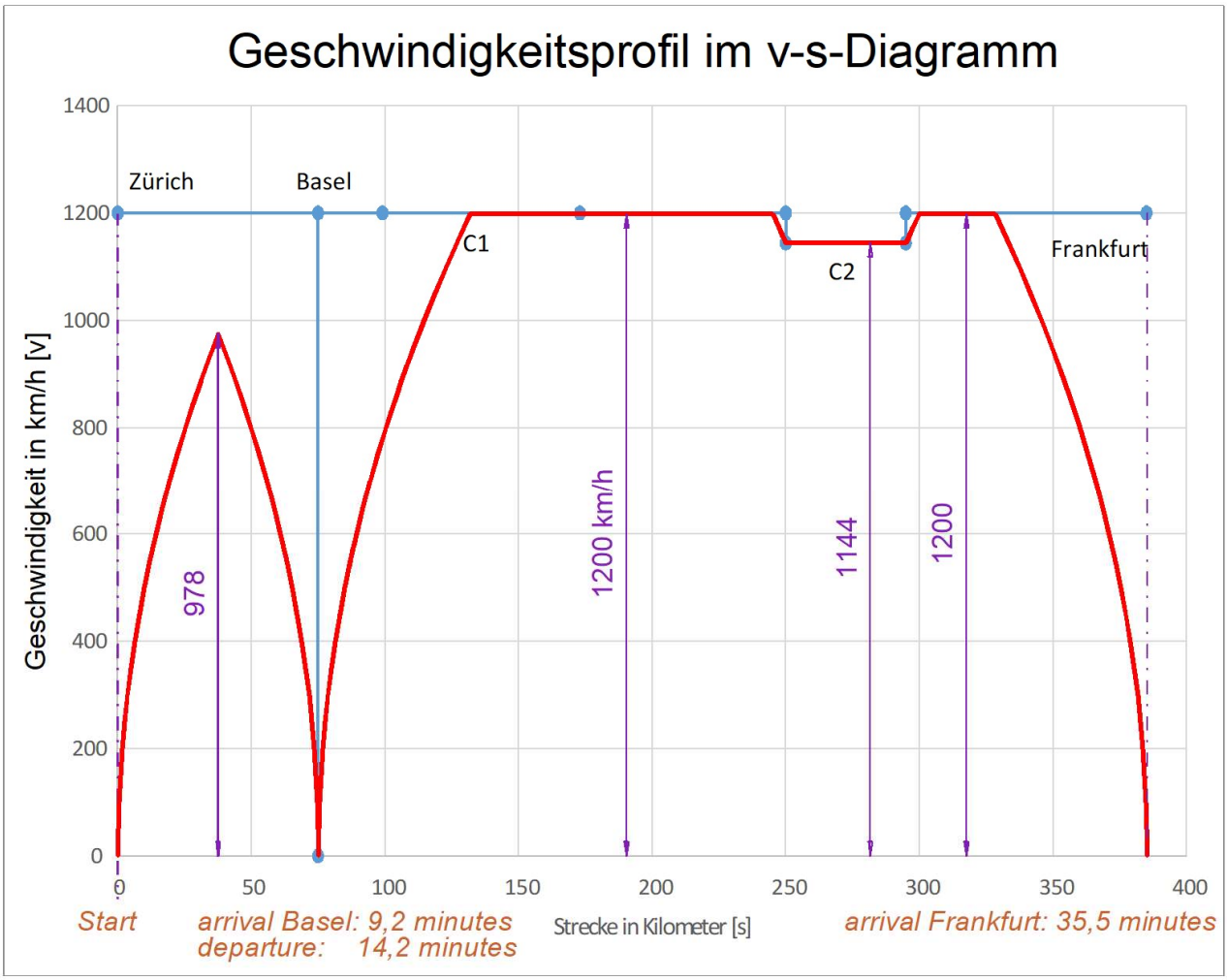


Abbildung 22: Methode 3: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Frankfurt (eigene Darstellung)

Bei der vorherigen Verbindung (Methode 2) würde der Hyperloop Frankfurt nach 37,2 Minuten erreichen. Im Gegensatz dazu, könnte hier bei Methode 3, der Hyperloop aber länger mit höheren Geschwindigkeiten fahren. Die gesamte Reisedauer würde 35,5 Minuten dauern und somit 1,7 Minuten schneller als bei der Methode 2. Die vollständigen Angaben zu den Streckenabschnitten und den jeweiligen Zeiten der Methode 3, finden sich im Anhang unter *Anhang E.*

3.2.3. Strecke Zürich nach Amsterdam

Als letztes wird die Strecke von Zürich nach Amsterdam mit einer Luftdistanz von ca. 615 Kilometer untersucht.

3.2.3.1. Methode 1: Gerade Linie

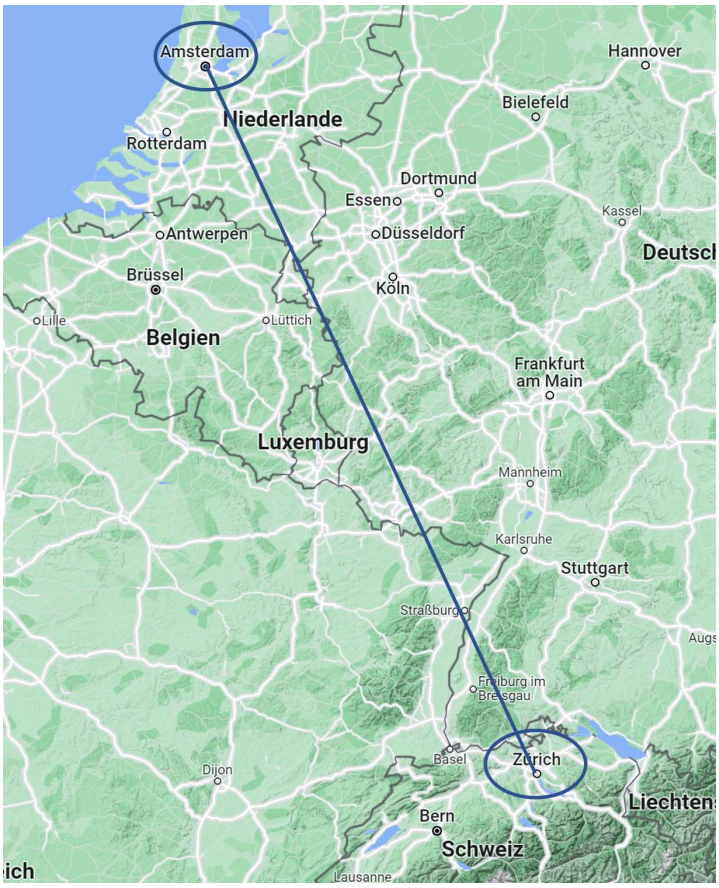


Abbildung 23: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Amsterdam

Wie in Abbildung 23 dargestellt, ist das Gebiet zwischen Zürich und Amsterdam durch viele Hindernisse gekennzeichnet. Grosse Waldgebiete, bergiges Terrain oder grosse Städte sind schwierige topographische Bedingungen für eine Hyperloop-Strecke. Die Untersuchung der beiden anderen Methoden (Methode 2 & 3), werden unter diesen Bedingungen als sehr schwierig und kaum umsetzbar eingestuft. Deshalb wird die Analyse der Verbindung zwischen Zürich und Amsterdam in dieser Arbeit nicht fortgeführt. Diese Verbindung kann bei Bedarf in einer weiterführenden Studie untersucht werden.

Für die Methode 1, als theoretische Verbindung, kann ein v-s Diagramm aufgestellt werden, und sieht wie folgt aus (vgl. Abb. 24):

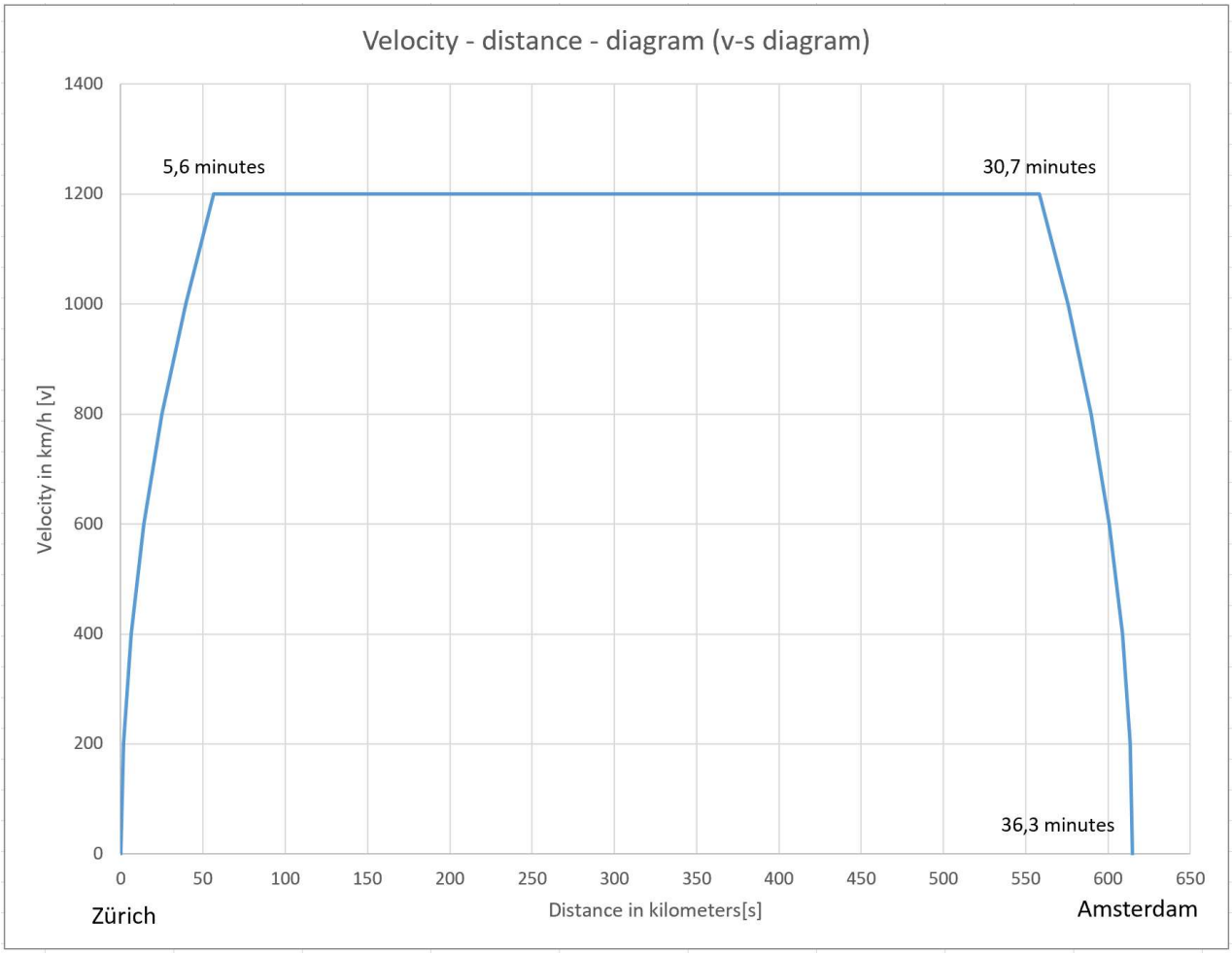


Abbildung 24: Methode 1: Strecke Zürich - Amsterdam, v-s Diagramm (eigene Darstellung).

Die Gesamtreisezeit der konzeptuellen Verbindung der Methode 1, von Zürich nach Amsterdam würde 36,3 Minuten betragen.

3.2.4. Streckenzeiten zusammengefasst

Zum Abschluss dieses Kapitels, werden in der folgenden Tabelle (vgl. Tabelle 5) alle untersuchten Zeiten der jeweiligen Strecken und deren Methoden aufgelistet und gegenübergestellt. Die leeren Zellen sind Zeiten, welche nicht ermittelt wurden. Die Gründe dafür sind in den jeweiligen Unterkapiteln beschrieben. Zürich-Paris *Methode 3* (vgl. Kap. 3.2.1.3). Zürich-Amsterdam *Methode 2/3* (vgl. Kap. 3.2.3).

Zusammenfassung der Zeiten in Minuten	Zürich - Paris	Zürich - Frankfurt	Zürich - Amsterdam
Methode 1	30,2	20,8	36,3
Methode 2	51,4	37,2	-
Methode 3	-	35,5	-

Tabelle 5: Die Fahrtzeiten zusammengefasst

3.3. Investitionskosten

In diesem Kapitel werden die Investitionskosten der Hyperloop-Strecken behandelt. Die Untersuchten Strecken sind die gleichen wie im vorangegangenen Kapitel (vgl. Kap. 3.2. *Streckenplan*). Als Basis der Kalkulationen wurden Angaben aus der «TEMS-Studie» entnommen, die in engen Kontakt mit Hyperloop TT diverse Kosten abgesprochen haben [2]. Die Investitionskosten können grob in drei Kategorien aufgeteilt werden. Die Kosten für die lineare Infrastruktur der Verbindung, die Kosten der Stationen und die Kosten der Kapseln.

Die Kosten der linearen Infrastruktur machen den grössten Teil aus. Diese Kosten umfassen Röhren, das Schwebesystem, das Antriebssystem, die Steuerung, die Kommunikation und das Verkehrsmanagement. Die Stationskosten umfassen die Räume und die Ausstattungen. Die Kosten der Kapseln enthalten die Kosten des Fahrzeugs, Schwebeausrüstung und Motor. Die Kosten werden je nach Kategorie unterschiedlich berechnet. Für die lineare Infrastruktur werden die Kosten pro Kilometer und die Kosten für die Stationen pro Station berechnet. Die Kosten für die Kapseln werden pro 100 Kilometer potenzieller Strecke berechnet, da für eine längere Hyperloop-Strecke mehr Kapseln benötigt werden als für kürzere Strecken. Die Anzahl der benötigten Hyperloop-Kapsel werden später in dieser Arbeit genauer untersucht (vgl. Kap. 3.4.3).

3.3.1. Lineare Infrastruktur

Eine Hyperloop-Röhre als Verbindung zweier Städte kann entweder oberirdisch oder unterirdisch gebaut werden. Da in Europa eine Dichte Überbauung herrscht, kommt eine oberirdische Verbindung kaum infrage. Die Verbindung muss somit unterirdisch erfolgen und dazu gibt es zwei Methoden. Bei der ersten Methode handelt es sich um ein unterirdisches Tunnelsystem, während bei der zweiten Methode ein Graben ausgehoben, die Hyperloop-Röhren verlegt und der Graben anschliessend wieder verschlossen wird.

Beim unterirdischen Tunnelsystem werden in Abstände von etwa 8 Kilometer unterirdische Kammern verbaut, die die Röhren jeweils passieren. Diese dienen im Notfall als Evakuierung und als Zugang zu den Röhren durch das Wartungspersonal. Die Tunnelbaukosten wurden bei der «TEMS-Studie» in Zusammenarbeit mit der Firma Robbins Company durchgeführt. Ein weltweit führendes Unternehmen beim Bau von Tunnelbohrmaschinen. Diese Bauweise wird in- und ausserhalb von Städten angewendet. Bei der zweiten Methode, durch die offene Bauweise können Kosten eingespart werden. Diese Methode wird eher in ländlichen Gebieten umgesetzt. Die in der TEMS-Studie geschätzten Investitionskosten, die hier als Referenz herangezogen werden, sind in Anhang F aufgeführt.

Die Hyperloop-Röhren werden tief genug verbaut werden, um Gebäudefundamente und Versorgungsleitungen zu umgehen. Die Röhren werden auch keinen Einfluss auf die Oberfläche oder die Statik der Häuser haben.

3.3.2. Kapitalkosten

Die Kosten der linearen Infrastruktur werden pro Kilometer berechnet und unterscheiden sich je nach Bauweise. So belaufen sich die Kosten für die erste Methode des Tunnelbaus auf 41,445 Millionen Euro pro Kilometer, während die Kosten für die offene Bauweise 22,179 Millionen Euro betragen. Die Kosten der

Stationen betragen 235,69 Millionen Euro pro Station. Die Kosten der Kapseln belaufen sich auf 5,3428 Millionen Euro pro 100 Kilometer potenzieller Strecke.

3.3.2.1. Strecke Zürich – Paris

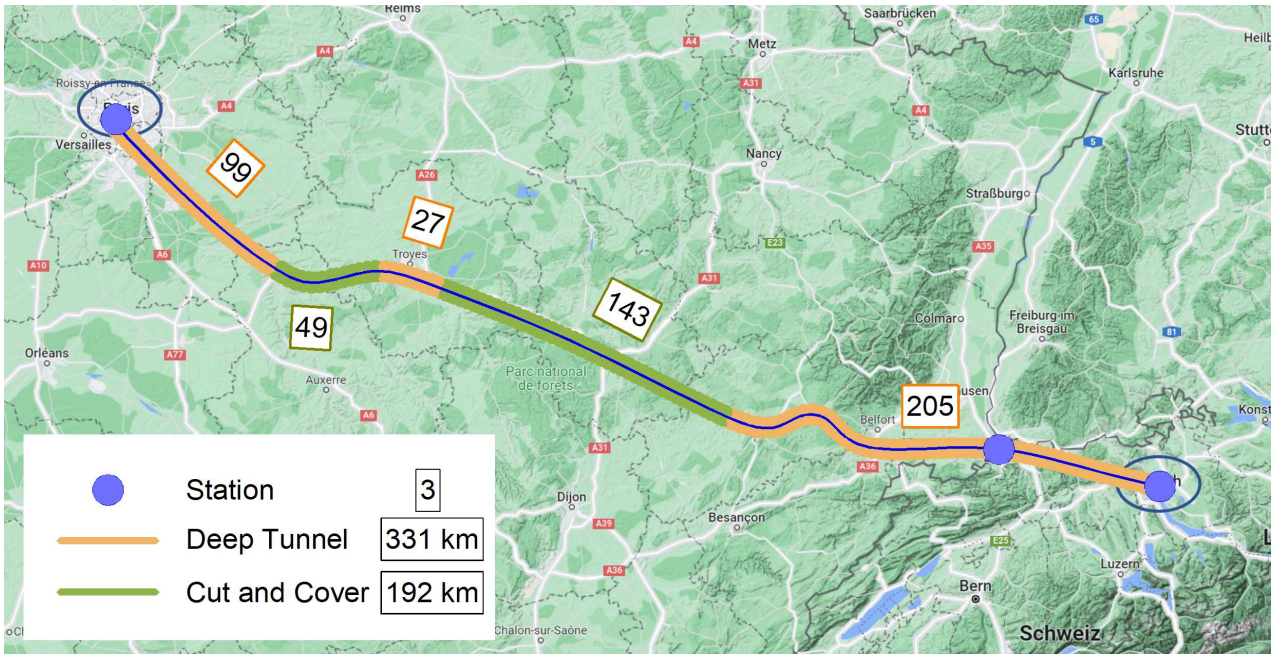


Abbildung 25: Strecke Zürich nach Paris, Verlegung der Röhren (eigene Darstellung)

Die Abbildung 25 zeigt dieselbe Route zwischen Zürich und Paris welche im vorherigen Unterkapitel genauer erläutert wurde (vgl. Kap. 3.2.1.2. *Methode 2*). Aus der Abbildung geht hervor, dass ein Grossteil der Strecke mit der Tunnelmethode gebaut werden muss. Diese Kosten werden in der untenstehenden Tabelle (vgl. Tabelle 6) aufgelistet. Daneben stehen ebenfalls die Kosten der Konzeptuellen Verbindung durch eine Geradlinige Verbindung. Bei dieser theoretischen Methode 1, wird davon ausgegangen, dass die gesamte Strecke als Tunnel gebaut werden muss.

Alle Kosten in Millionen Euro	**Methode 2: Autobahnnetz**	**Methode 1: Geradlinig**
Tunnelbau	13’718,3	*20’308,1*
Offene Bauweise	4’258,37	-
Stationen und Kapseln	735,013	*497,56*
Total	18’711,7	*20’805,7*

Tabelle 6: Die Investitionskosten der Strecke Zürich nach Paris

3.3.2.2. Strecke Zürich – Frankfurt

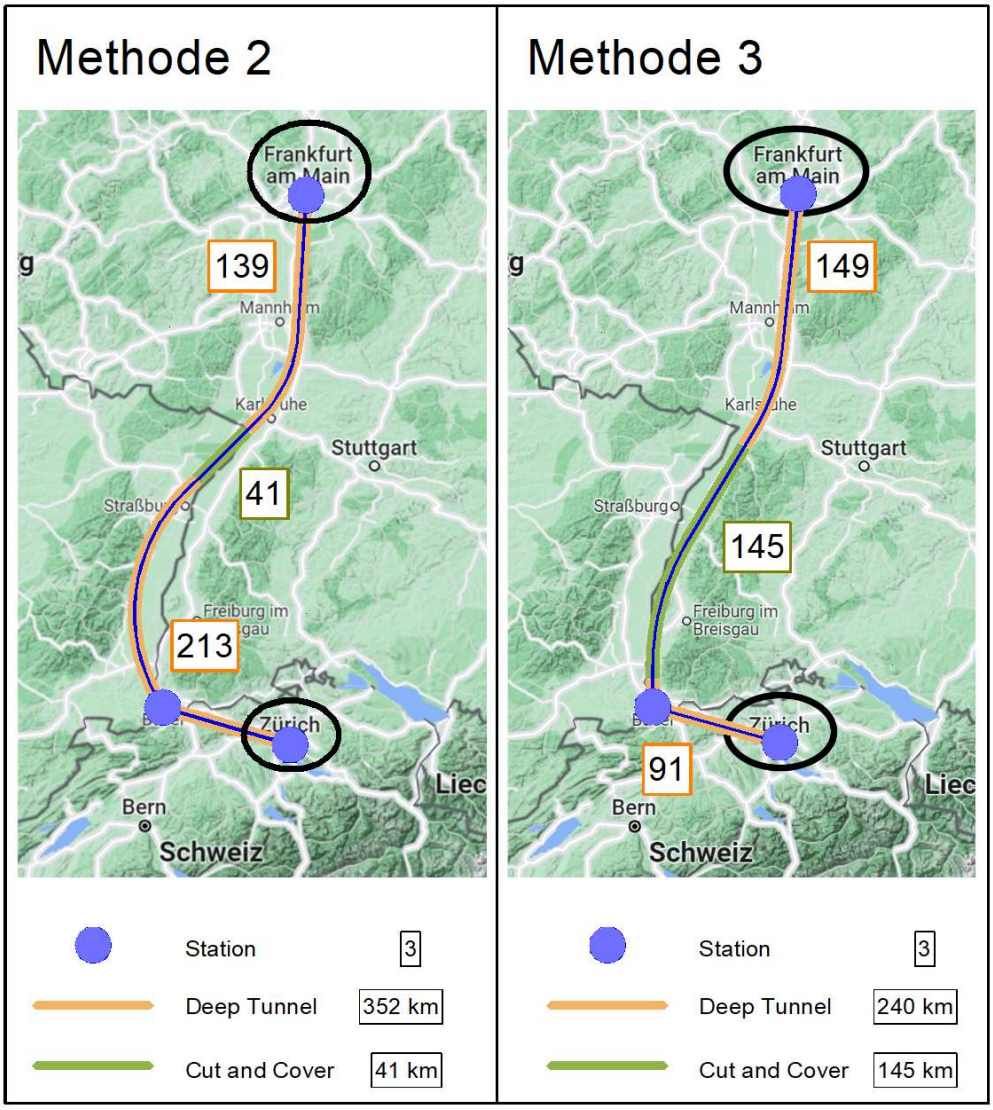


Abbildung 26: Strecke Zürich nach Frankfurt, Verlegung der Röhren (eigene Darstellung)

In der Abbildung 26 werden gleich beide Methoden der Verbindungsmöglichkeiten untersucht. Da die Trasse der Methode 2 durch viele städtische Gebiete führt, kann die Rohrverlegung durch die offene Bauweise verhältnismässig wenig geplant werden. Bei der untenstehenden Vergleichstabelle (vgl. Tabelle 7) wird die Methode 1 (Route Geradlinig) ebenfalls mitaufgeführt. Es sei jedoch nochmals erwähnt, dass diese Kalkulationen rein theoretisch sind und in die Bauweise nach Methode 1 in der Praxis wahrscheinlich nicht umsetzbar wäre oder die Kosten viel höher ausfallen würden.

Alle Kosten in Millionen Euro	**Methode 2: Autobahn**	**Methode 3: Hybrid**	**Methode 1: Geradlinig**
Tunnelbau	14'588,8	9'946,9	*12640,8*
Offene Bauweise	909,355	3'216,01	-
Stationen und Kapseln	728,067	727,64	*487,676*
Total	16'226,2	13'890,6	*13'128.5*

Tabelle 7: Die Investitionskosten der Strecke Zürich nach Frankfurt

3.3.3. Zusammenfassung der Kapitalkosten

Die untenstehende Tabelle 8, fasst alle untersuchten Investitionskosten der jeweiligen Strecken mit den verschiedenen Methoden zusammen.

Alle Kosten in Millionen Euro	**Methode 2: Autobahn**	**Methode 3: Hybrid**	**Methode 1: Geradlinig**
Zürich - Paris	18’712	-	*20’806*
Zürich - Frankfurt	16'226	13'891	*13'129*

Tabelle 8: Investitionskosten der Strecken zusammengefasst.

3.4. Betriebskosten

In diesem Kapitel werden die Betriebskosten untersucht. Da im Moment, kein Hyperloop-System aktiv in Betrieb ist, gibt es keine Messbaren Daten oder reale Betriebskosten zu einem Hyperloop. Die Kosten in diesem Kapitel werden somit grösstenteils geschätzt.

Die Betriebskosten lassen sich grob in zwei Unterkategorien aufteilen. Die variablen Kosten und die Fixkosten. Zu den variablen Kosten gehören Wartungen der Kapseln sowie dessen Stromverbrauch. Diese Kosten hängen eng mit der Häufigkeit der Nutzung zusammen. Zu den Fixkosten gehören die allgemeinen Verwaltungskosten, die Instandhaltung der Strecken, die Wartung der Vakuumsysteme, die Stromkosten für die Aufrechterhaltung des Vakuums über die gesamte Strecke und die Betriebskosten an den Stationen.

Als Grundlage für die Hyperloop spezifischen Kosten wurde die «TEMS-Studie» berücksichtigt, die ihre Angaben wiederum in Absprache mit HyperloopTT entwickelten. Diese Kosten wurden dann auf die Untersuchten Strecken in dieser Arbeit angepasst und mit anderen öffentlichen Studien verglichen.

3.4.1. Variable Kosten

Zu den variablen Kosten gehören, wie eingangs erwähnt, die Wartung der Ausrüstung sowie die Stromkosten für den Betrieb der Kapseln. Die direkt von der Anzahl gefahrenen Kapselkilometer abhängen.

<u>Wartung der Ausrüstung</u>

Die Kosten für die Wartung der Ausrüstung umfassen Ersatzteile und die für die Wartung jeder Kapsel erforderlichen Arbeitskosten. Darüber hinaus, die Überprüfung der Sicherheit jeder in Betrieb befindlichen Kapsel.

<u>Antriebsstromkosten</u>

Die für den Antrieb der Kapseln erforderliche Energiemenge wird sehr effizient genutzt. Wie in Kapitel 3.2.1.1 beschrieben, wird ein grosser Teil der für den Antrieb der Kapsel benötigten Energie als kinetische Energie in der Kapsel gespeichert. Ein erheblicher Teil dieser Energie kann dann später durch regeneratives Bremsen zurückgewonnen werden. Somit sind die damit gebundenen Stromkosten im Verhältnis niedrig.

3.4.2. Fixkosten

Die hier beschriebenen Fixkosten werden zwar als Betriebskosten verbucht, unterscheiden sich aber bei vermehrter oder geringer Nutzung des Hyperloop Systems kaum. Diese Kosten entstehen unabhängig von der Anzahl gefahrenen Kapselmeilen.

<u>Verwaltungskosten</u>

Als Verwaltungskosten werden die Kosten bezeichnet, die benötigt werden, um das gesamte System aus Management Sicht am Laufen zu erhalten. Hier runter fallen auch alle Kosten des Beschaffungswesen, des Personalwesen, die Buchhaltung und das Finanzwesen.

Instandhaltung der Strecken

Die Kosten, die anfallen bei der Instandhaltung der Fahrstrecken, darunter fallen auch Kosten durch Beschädigungen an den Röhren.

Wartung des Vakuumsystems

Regelmässige Wartungskosten bei den Systemen die für das Vakuum zuständig sind.

Stromkosten für das Vakuum

Die Kosten für den Strom der benötigt wird, um das Vakuum auf gesamter Strecke aufrecht zu erhalten.

Stationen

Abschliessend die Kosten, die für den Betrieb der Hyperloop-Stationen erforderlich sind.

3.4.3. Aufteilung der Betriebskosten

Die Verteilung der Kosten für jede der oben beschriebenen Kategorien ist in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst. Die in der TEMS-Studie geschätzten Betriebskosten, die hier als Referenz herangezogen werden, sind in Anhang G aufgeführt.

Verteilung der Betriebskosten

Variable Kosten in Euro	Pro Kapselkilometer
Wartung der Ausrüstung	0,59305148
Antriebskosten	0,029644626

Fixe Kosten in Millionen Euro	Pro Jahr für eine Strecke von 100 Kilometer
Instandhaltung der Strecke	6,937589286
Wartung des Vakuumsystem	3,196607143
Stromkosten für das Vakuum	2,295892857

Fixe Kosten in Millionen Euro	Für 3 Stationen
Stationen	4,2861

Fixe Kosten in Millionen Euro	Über das gesamte System
Verwaltungskosten	28,05985

Tabelle 9: Betriebskosten

Die Verwaltungskosten wurden im Vergleich zu dem in der TEMS-Studie prognostizierten Wert verringert, da sich diese Arbeit nur mit der Bewertung eines Hyperloop als Gütertransportmittel und nicht mit der Personenbeförderung befasst. Diese Tatsache spart einige Verwaltungskosten und wurde daher für diese Schätzung halbiert. Dieser Wert kann in künftigen Studien eingehender untersucht werden.

Die Taktzeit jeder Kapsel bzw. die Abfahrtszeiten, die das System bewältigen kann, wurden mit 7,1978 Minuten im Durchschnitt festgelegt [2]. Für die Berechnung der Gesamtkapselkilometer pro Strecke, wird zunächst definiert, wie viele Kapseln im Durchschnitt sich im System befinden. Hierfür wird das Little's law

angewendet. Wenn die Durchlauf- und Taktzeit gegeben ist, kann Little's law genutzt werden, um die durchschnittliche Anzahl der Objekte im System zu definieren [17].

Die Fallbeispiel Strecken sind dieselben wie im vorherigen Kapitel (vgl. Kap. 3.2) und betreffen die Strecke Zürich-Paris sowie Zürich-Frankfurt, jeweils mit Zwischenstopp in Basel.

Um die Betriebskosten für die Strecke Zürich nach Paris zu schätzen, wird die Untersuchte Verbindung der Methode 2 (vgl. Kap. 3.2.1.2) als Grundlage genommen. Für die Strecke Zürich nach Frankfurt wird die Methode 3 (vgl. Kap. 3.2.2.3) als Grundlage genommen, da sie sehr ähnlich der Methode 2 (vgl. Kap. 3.2.2.2) ist, aber im gesamten mehr Vorteile bietet.

Anzahl Hyperloop Kapseln mit Little's law

$$L = \lambda * W \,. \tag{12}$$

L = Anzahl der Hyperloop Kapseln

λ = Abfahrtsrate

W = Durchlaufzeit

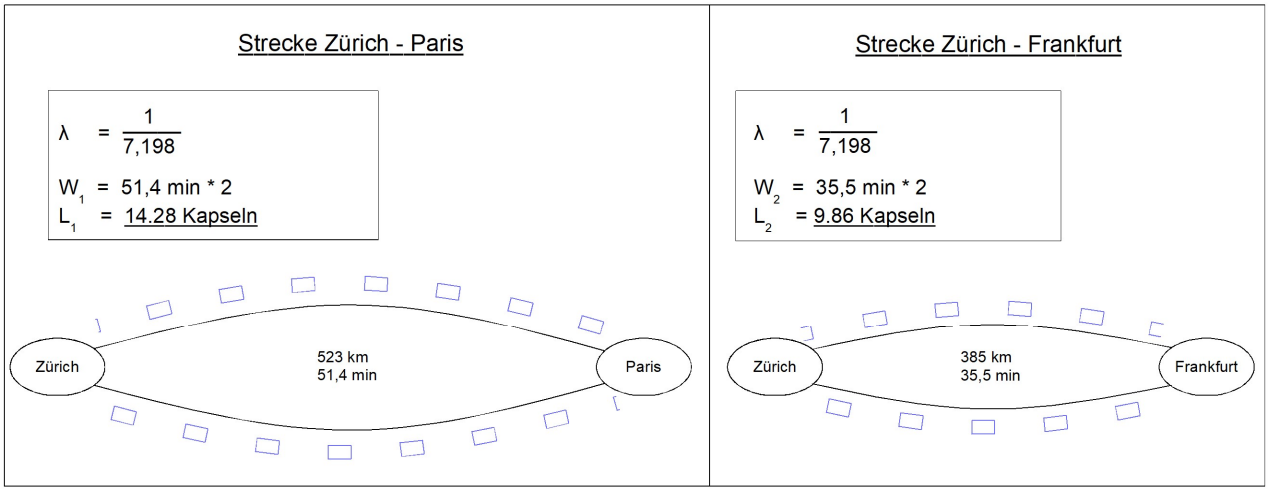


Abbildung 27: Anzahl Hyperloop Kapseln mit Little's law (eigene Darstellung)

Durch diese Berechnung ist nun bekannt, dass durchschnittlich zu jedem beliebigen Zeitpunkt 14,28 Kapseln auf der Strecke Zürich-Paris und 9,86 Kapseln auf der Strecke Zürich-Frankfurt im Umlauf sind.

Totale Kapselkilometer pro Jahr Zürich - Paris

$$\left(\frac{523\ km}{51{,}4\ min} * 14.28\right) * 60 * 24 * 365 = 76{,}3699\ Millionen\ Kapselkilometer \tag{13}$$

Totale Kapselkilometer pro Jahr Zürich - Frankfurt

$$\left(\frac{385\ km}{35{,}5\ min} * 9{,}86\right) * 60 * 24 * 365 = 56{,}2037\ Millionen\ Kapselkilometer \tag{14}$$

Betriebskosten Zürich - Paris

Zürich - Paris (523 km)	*Pro Jahr* ***(in Millionen Euro)***
Wartung der Ausrüstung	45,29
Instandhaltung der Strecke	36,28
Verwaltungskosten	28,06
Wartung des Vakuumsystem	16,72
Stromkosten für das Vakuum	12,01
Stationen	4,29
Antriebskosten	2,26
Summe	144,91

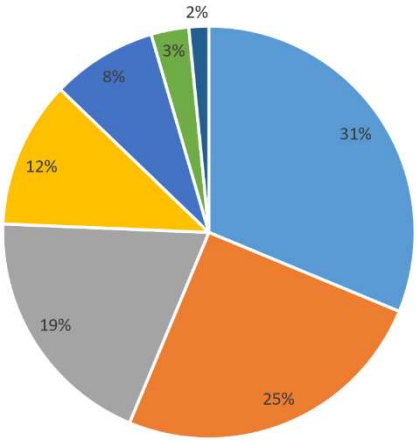


Tabelle 10: Betriebskosten Zürich - Paris pro Jahr (eigene Darstellung)

Betriebskosten Zürich - Frankfurt

Zürich - Frankfurt (385 km)	*Pro Jahr* ***(in Millionen Euro)***
Wartung der Ausrüstung	33,33
Instandhaltung der Strecke	26,71
Verwaltungskosten	28,06
Wartung des Vakuumsystem	12,31
Stromkosten für das Vakuum	8,84
Stationen	4,29
Antriebskosten	1,67
Summe	115,20

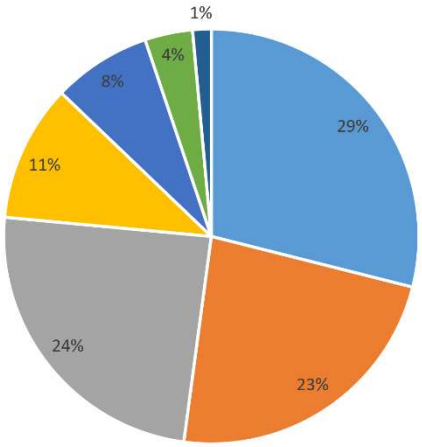


Tabelle 11: Betriebskosten Zürich - Frankfurt pro Jahr (eigene Darstellung)

Diese Kostenaufstellung zeigt, dass Wartung und Instandhaltung der Anlagen den grössten Anteil an den jährlichen Betriebskosten ausmachen. Dagegen machen die eigentlichen Antriebskosten den kleinsten Teil aus. Grund dafür sind die regenerativen Bremsen, durch die ein Grossteil des verbrauchten Stromes zurückgewonnen werden kann. Die Verwaltungskosten wurden für beide Linien aufgeführt, da die Kostenverteilung unabhängig von der anderen Linie für sich stehen kann. Würden jedoch beide Linien betrieben werden, so würden die Verwaltungskosten nur einmal anfallen.

Zum Abschluss dieses Kapitels sei angemerkt, dass diese Berechnungen für ein voll beladenes Hyperloop-System mit einer durchschnittlichen Taktzeit von 7,2 Minuten, einer Frachtkapazität von 14 Tonnen pro Kapsel oder 50 Passagiersitzen durchgeführt wurden [2].

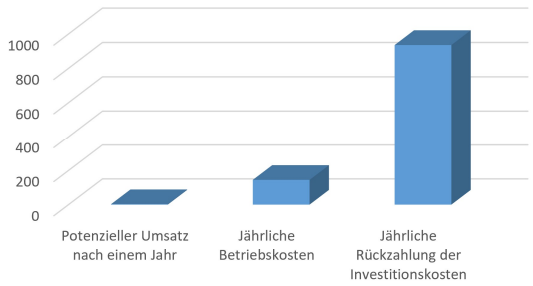
3.5. Rentabilität

In diesem Kapitel wird die Rentabilität eines Hyperloop-System im Güterverkehr als Ersatz der Luftfracht untersucht. Die Parameter in dieser Rentabilitätsanalyse, sind aus den vorgängigen Kapiteln zu entnehmen. Die Rentabilitätsanalyse wird für die Strecken Zürich nach Paris, sowie Zürich nach Frankfurt mit jeweiligem Zwischenstopp in Basel untersucht. Das Volumen der Luftfracht dieser Städte, sowie die Potenziellen Umsätze dieser Verbindung finden sich in Kapitel 3.1 *Marktpotenzial* wieder. Die Investitionskosten sind im Kapitel 3.2 *Investitionskosten* zu finden, und sind für Rentabilitätsanalyse so eingeplant, dass eine Rückzahlung von 20 Jahren erfolgt. Diese jährlichen Kosten werden zu den jährlichen Betriebskosten addiert, die in Kapitel 3.4 *Betriebskosten* zu finden sind. Die jährliche Verzinsung sowie die Inflation, werden bei diesen Rechnungen vernachlässigt.

3.5.1. Rentabilitätsanalyse der Strecke Zürich - Paris

Rentabilität Zürich - Paris	***Jährlich in Millionen Euro***
Potenzieller Umsatz nach einem Jahr	2,64
Jährliche Betriebskosten	144,91
Jährliche Rückzahlung der Investitionskosten	935,6

Tabelle 12: Rentabilität Zürich - Paris (eigene Darstellung)



Gemäss den vorliegenden Informationen ergibt sich für die Strecke Zürich nach Paris mit Zwischenstopp in Basel ein potenzieller Umsatz von 2,64 Millionen Euro pro Jahr. Die Investitionskosten für dieses Projekt belaufen sich auf 18,712 Milliarden Euro, wobei die Rückbezahlung dieser Investition auf 20 Jahre aufgeteilt 935,6 Millionen Euro pro Jahr ergibt. Die jährlichen Betriebskosten betragen 144,91 Millionen Euro.

Um die Rentabilität dieser Strecke zu analysieren, ist es wichtig, die Ertragslage im Verlauf von 20 Jahren zu betrachten, da dies die vorgesehene Zeitspanne ist, in der die Investitionskosten abbezahlt werden sollen. Der Gewinn oder Verlust nach einem Jahr ergibt sich aus der Differenz zwischen dem potenziellen Umsatz, den jährlichen Rückzahlungen der Investitionskosten sowie den jährlichen Betriebskosten. In diesem Fall führt diese Berechnung nach einem Jahr zu einem erheblichen Negativsaldo.

Das negative Ergebnis zeigt, dass das Projekt im ersten Jahr einen Verlust verzeichnen würde. Dies ist auf die hohen Investitionskosten und die jährlichen Betriebskosten zurückzuführen, die den potenziellen Umsatz übersteigen. Um die Rentabilität über einen Zeitraum von 20 Jahren zu bewerten, müssen wir den kumulativen Gewinn bzw. in diesem Fall die Verluste berechnen. Diese werden durch Addition der jährlichen Ertragslage über den gesamten Zeitraum ermittelt.

Nach einem Zeitraum von 20 Jahren beläuft sich die Ertragslage mit diesem Parameter auf

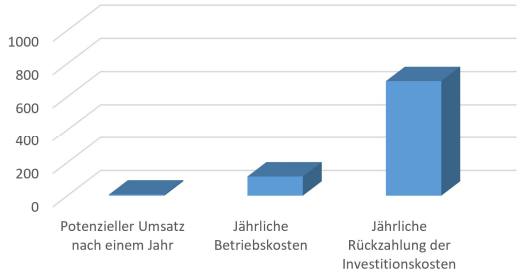
$$\big(2.64 - (144.91 + 935.6)\big) * 20 = -21557.4, \tag{15}$$

Millionen Euro. Dieser negative kumulative Ertrag weisst auf anhaltende Verluste hin.

3.5.2. Rentabilitätsanalyse der Strecke Zürich – Frankfurt

Rentabilität Zürich - Frankfurt	***in Millionen Euro***
Potenzieller Umsatz nach einem Jahr	6,70
Jährliche Betriebskosten	115,2
Jährliche Rückzahlung der Investitionskosten	694,55

Tabelle 13: Rentabilität Zürich - Frankfurt (eigene Darstellung).



Ähnlich wie bei der Untersuchung der Strecke Zürich nach Paris (vgl. Kap. 3.5.1) sind die potenziellen Einnahmen im Verhältnis zu den jährlichen Betriebskosten sowie den Rückzahlungen der Investitionen sehr gering.

Nach einem Zeitraum von 20 Jahren beläuft sich die Ertragslage bei der Verbindung Zürich nach Frankfurt mit Zwischenstopp in Basel bei

$$\big(2.64 - (144.91 + 935.6)\big) * 20 = -16061, \tag{16}$$

Millionen Euro. Dieser negative kumulative Ertrag weisst demnach auch bei dieser Strecke auf anhaltende Verluste hin.

3.5.3. Rentabilität der Lufthansa Group

Als Vergleich zu diesen Kennzahlen, wird die Rentabilität der gesamten Lufthansa Group für die Jahre 2021 sowie 2020 angeschaut. Dabei werden die Umsatzerlöse den Operativen Aufwendungen gegenübergestellt [6].

Kennzahlen Lufthansa Group ***in Millionen Euro***	2021	2020
Umsatzerlöse	16‘811	13‘589
Operativen Aufwendungen	20‘773	20‘846

Tabelle 14: Kennzahlen der Lufthansa Group (Daten der Tabelle aus dem Jahresbericht der Lufthansa [6]).

Diese Auflistung soll nur einen Anhaltspunkt für die Dimension der Ertragslage eines ganzen Luftfahrtunternehmens geben.

3.6. Wettbewerbsanalyse

In diesem Kapitel werden einige Wettbewerbsvor- sowie Nachteile aufgezeigt, eines Hyperloop-System im Güterverkehr als Ersatz der Luftfracht. Im Vergleich zur herkömmlichen Transportmethoden der Luftfracht bietet der Hyperloop potenzielle Vorteile wie schnellere Lieferzeiten, grössere Frachtkapazität und einen geringeren CO_2 - Ausstoss. Es gibt aber auch Herausforderungen wie die hohen jährlichen Kosten (vgl. Kap. 3.5), die mit aktuell bestehenden Luftfrachtpreisen (vgl. Kap. 3.1.2) nicht gedeckt werden können. Allgemeines Vertrauen und Akzeptanz einer Hyperloop-Strecke für den Gütertransport muss bestehen, damit die Logistik Unternehmen es in Erwägung ziehen, die Fracht per Hyperloop zu senden.

Geschwindigkeit und Lieferzeiten

Der Hyperloop hat das Potenzial, herkömmliche Luftfrachtsysteme in Bezug auf Geschwindigkeit, Lieferzeiten und Flexibilität zu übertreffen. Durch seine Fähigkeit, hohe Geschwindigkeiten von bis zu 1.200 km/h zu erreichen, könnte der Hyperloop Frachtgüter schneller an ihr Ziel liefern als Flugzeuge. Dies könnte insbesondre für den Transport von hochwertigen Gütern oder dringenden Sendungen attraktiv sein, bei denen eine schnelle Lieferung von entscheidender Bedeutung ist.

Grössere Frachtkapazität

Ein Hyperloop-System als Gütertransportmittel mit einer Taktzeit von 7,198 Minuten pro Kapsel und einer Frachtkapazität von 14 Tonnen pro Kapsel [2], wäre in der Lage wesentlich mehr Frachttonnen zu transportieren als die in dieser Arbeit untersuchte Luftfracht (vgl. Kapitel 3.4.3). Das Angebot und der Markt, den ein Hyperloop im Gütertransport abdecken könnte, ist somit weitaus grösser.

Umweltbilanz

Ein weiterer Aspekt ist die Umweltbilanz der beiden Transportmöglichkeiten. Der Einsatz von Flugzeugen für die Luftfracht und der damit verbundene Treibstoffverbrauch führt zu CO_2 - Ausstoss. Der Hyperloop hingegen würde als elektrisches Transportsystem anders angetrieben werden. Der Hyperloop, der mit erneuerbaren Energiequellen betrieben wird, könnte eine umweltfreundliche Alternative zur Luftfracht bieten und dazu beitragen, den CO_2 - Fussabdruck der Logistikbranche zu verringern.

Herausforderungen

Dagegen stehen einige Herausforderung bei der Implementierung eines Hyperloop-System im Güterverkehr:

Kosten

Die Kosten stellen eine bedeutende Herausforderung für ein Hyperloop-System dar, das sich ausschliesslich auf die Luftfracht beschränkt. Die Errichtung der Hyperloop-Infrastruktur erfordert erhebliche Investitionen, und die Rentabilität des Systems hängt von einer ausreichenden Auslastung ab. Bei begrenzter Nutzung durch ausschliesslich Luftfracht könnte es schwierig sein, die hohen Kosten für den Bau und den Betrieb des Hyperloops zu decken.

Akzeptanz und Vertrauen

Um erfolgreich zu sein, müsste der Hyperloop das Vertrauen und die Akzeptanz der Logistikbranche und der Unternehmen gewinnen. Die Einführung einer solch neuen Technologie erfordert Zeit, um Zweifel zu überwinden. Es müssten ausreichende Beweise für die Effizienz, Sicherheit und Zuverlässigkeit des Hyperloops im Güterverkehr erbracht werden, um die Akzeptanz zu erhöhen.

Die Wettbewerbsanalyse des Hyperloop im Güterverkehr im Vergleich zur Luftfracht zeigt das Potenzial des Hyperloops als Alternative für den schnellen und kostengünstigen Luftfrachttransport. Der Hyperloop bietet Vorteile wie höhere Liefergeschwindigkeiten, grössere Frachtkapazität, Flexibilität und eine differenzierte Umweltbilanz. Jedoch stehen dem Hyperloop im Güterverkehr, als alternative zur Luftfracht noch einige Herausforderungen im Weg. Darunter primär die Kosten und den vergleichsweisen niedrigen Einnahmen. Sowie die Gewinnung von Akzeptanz und Vertrauen seitens der Industrie und der Verbraucher.

4. Resultate

Die vorliegende Bachelorarbeit untersuchte das Potenzial des Hyperloops als Güterverkehrsmittel im Vergleich zur Luftfracht. Durch eine umfassende Analyse wurden verschiedene Aspekte des Hyperloops und seiner Anwendung im Gütertransport betrachtet. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse und Resultate dieser Arbeit zusammengefasst.

Marktpotenzial (vgl. Kap. 3.1)

Im ersten Kapitel wurde das Marktpotenzial des Hyperloops im Güterverkehr analysiert. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein umfassender Datensatz vom Zürich Flughafen angefordert, der das gesamte Luftfrachtaufkommen am Zürcher Flughafen darstellt. Die Analyse dieses Datensatzes ergab, dass die Städte Frankfurt, Amsterdam, Basel und Paris grosses Frachtvolumen aufweisen. Diese Städte wurden daraufhin als Basis für weitere Untersuchungen und Analysen ausgewählt. Die Potenziellen Einnahmen, welche ein Hyperloop im Güterverkehr als alternative zur Luftfracht einnehmen könnte, wurden ebenfalls in diesem Kapitel ermittelt und auf der Grundlage vom Jahresreport der Lufthansa, abgeschätzt.

Potenzieller Umsatz nach einem Jahr, in Millionen Euro	**Zürich – Amsterdam**	**Zürich – Paris**	**Zürich – Frankfurt**
Mit Zwischenstopp in Basel	5,034	2,640	6,703

Tabelle 3: Potenzieller Umsatz aller Fallbeispiele

Streckenplanung (vgl. Kap. 3.2)

Im darauffolgenden Kapitel wurde die Streckenplanung näher betrachtet. Dabei wurden Verbindungen von Zürich aus, mit den vorhin identifizierten Städte geprüft. Es stellte sich heraus, dass die Anbindung mit der Stadt Basel als alleinige Verbindung zu kurz wäre, aber als Zwischenstopp einer längeren Strecke durchaus machbar wäre. So wurden die weiteren Strecken von Zürich nach Paris, sowie Zürich nach Frankfurt, jeweils mit Zwischenstopp in Basel eingeplant. Die Verbindung von Zürich nach Amsterdam, erwies sich als schwierig und wurde aus diesem Grund für die weitere Untersuchung nicht mehr fortgesetzt. In diesem Kapitel wurden ebenfalls die jeweiligen Fahrtzeiten der Verbindungen ermittelt, die eine Hyperloop-Kapsel benötigen würde.

Zusammenfassung der Fahrzeiten in Minuten	Zürich - Paris	Zürich - Frankfurt
1. Geradlinige Verbindung	30,2	20,8
2. Autobahn angelehnt, mit Zwischenstopp in Basel	51,4	37,2
3. Hybridmethode: Autobahn, Zuglinien und Grünflächen, mit Zwischenstopp in Basel	-	35,5

Tabelle 5: Die Fahrtzeiten zusammengefasst

Investitionskosten (vgl. Kap. 3.3)

Das Kapitel zur Investitionskostenanalyse basiert auf den vorherigen Erkenntnissen der Streckenplanung. Aufgrund der exakten Kilometerangaben und der Bekanntheit des topographischen Umfeldes, konnten die Investitionskosten analysiert werden. Die «TEMS-Studie» wurde als Grundlage für die Kosten herangezogen [2].

Investitionskosten in Millionen Euro	**Methode 2: Autobahn**	**Methode 3: Hybrid**
Zürich - Paris	18’712	-
Zürich - Frankfurt	16'226	13'891

Tabelle 8: Investitionskosten der Strecken zusammengefasst

Betriebskosten (vgl. Kap. 3.4)

Die Berechnung der Betriebskosten bildete den Schwerpunkt des vierten Kapitels. Zunächst wurden die Kostenfaktoren definiert, die während des Gebrauchs eines Hyperloop-System im Güterverkehr entstehen. Anschliessend wurde mit Hilfe vom Little’s law und der Durchlaufzeit, welche im vorgängigen Kapitel der Streckenplanung definiert wurde, die Anzahl Hyperloop Kapseln in Betrieb errechnet. Dadurch konnten die gesamten Kapselkilometer eines Jahres bestimmt werden, und damit die Gesamtbetriebskosten der jeweiligen Hyperloop-Strecken.

Betriebskosten in Millionen Euro	**Summe**
Zürich - Paris	144,91
Zürich - Frankfurt	115,20

Tabelle 15: Betriebskosten zusammengefasst

Rentabilität (vgl. Kap. 3.5)

Die anschliessende Rentabilitätsanalyse ergab, dass ein Hyperloop-System, das sich ausschliesslich auf die Luftfracht konzentriert, nicht rentabel wäre. Die potenziellen Einnahmen würden nicht ausreichen, um die hohen Ausgaben zu decken. Insbesondere die hohen Investitionskosten, die über einen Zeitraum von 20 Jahren zu tilgen sind, machen eine positive Ertragslage nahezu unmöglich.

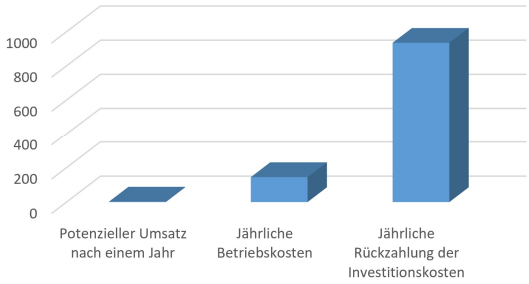


Abbildung 28: Rentabilität, Zürich – Paris

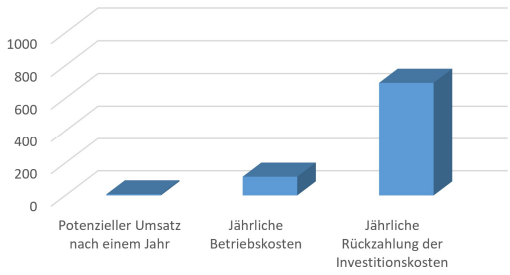


Abbildung 29: Rentabilität, Zürich - Frankfurt

Wettbewerbsanalyse (vgl. Kap. 3.6)

Die Wettbewerbsanalyse zeigt die Vor- und Nachteile eines Hyperloop-System im Güterverkehr als alternative zur Luftfracht auf. Es wird deutlich, dass Vorteile wie schnellere Lieferzeiten, grössere Frachtkapazität und geringerem CO_2-Ausstoss vorhanden sind, jedoch stellen die hohen jährlichen Kosten eine Herausforderung dar.

5. Diskussion und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der Analyse des Hyperloop im Güterverkehr als alternative zur Luftfracht befasst. Dabei verschieden Aspekte wie Rentabilität, Kostenherausforderungen und alternative Nutzungsmöglichkeiten betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Hyperloop-System, welches sich ausschliesslich auf den Güterverkehr der Luftfracht konzentriert, nicht rentabel wäre. Die hohen Investitions- und Betriebskosten im Verhältnis zu den potenziellen Einnahmen machen deutlich, dass alternative Ansätze erforderlich sind, um die Rentabilität zu verbessern. Damit ist die Untersuchungsfrage, dieser Arbeit beantwortet.

Durch die umfassende Bewertung des Hyperloops in dieser Arbeit, ergeben sich auch alternative Lösungen. Es wäre wichtig, die Rentabilität des Hyperloop-Systems zu überprüfen und zu erwägen, sich nicht ausschliesslich auf die Luftfracht zu konzentrieren, um die Kostenherausforderungen zu bewältigen. Eine mögliche Lösung ist die Ausweitung des Hyperloop-Frachtdienstes auf andere bestehende Märkte, wie den Lastwagen- oder Schienenverkehrsmarkt. Der Hyperloop im Güterverkehr hätte das Potenzial, Teile des viel grösseren Marktes zu erschliessen, wie aus Kapitel 3.6 hervorgeht. Die Kombination aus den verschiedenen Märkten des Güterverkehrs, könnte dazu beitragen die Kostenherausforderungen zu bewältigen und eine nachhaltige Strategie zu entwickeln.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, den Hyperloop primär als Tool für den Passagiertransport einzusetzen. Die Passagiere könnten den grössten Teil der Ausgaben decken, während der Güterverkehr zusätzliche Einnahmen generieren würde. So wie es bei den Fluggesellschaften gehandhabt wird. Dieser hybride Ansatz würde die gesamte Ertragslage, des Hyperloops anders gestalten. Die Umstellung des Hyperloop-Systems vom reinen Gütertransport auf Güter- und Personentransport wäre mit der Streckenführung dieser Arbeit vereinbar. Die auf die Kapsel wirkende Zentrifugalkraft, die sich aufgrund des Komforts der Personenbeförderung in Grenzen hält, wurde bei der Berechnung der Höchstgeschwindigkeiten in Kurven berücksichtigt (vgl. Kap. 3.2.1.2).

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Alternativen weitere Untersuchungen und Durchführbarkeitsstudien erfordern, um ihre Machbarkeit und Kosteneffizienz zu bewerten.

Insgesamt zeigt diese Diskussion, dass der Hyperloop als innovatives Transportmittel das Potenzial hat, den Güterverkehr zu revolutionieren. Es bedarf jedoch weiterer Untersuchungen und strategischer Entscheidungen, um die Rentabilität des Hyperloops im Güterverkehr zu maximieren. Die kontinuierliche Entwicklung und Zusammenarbeit von Forschungsinstituten, Unternehmen und Regierungen sind entscheidend, um die Vision des Hyperloops im Gütertransport, als nachhaltige und effiziente Transportlösung voranzutreiben.

6. Verzeichnisse

6.1. Literaturverzeichnis

[1] T. Jahn, „Durch die Röhre mit 172 Stundenkilometern: Virgin Hyperloop schließt erste bemannte Testfahrt ab," Handelsblatt, 09 11 2020. [Online]. Available: https://www.handelsblatt.com/technik/forschung-innovation/hochgeschwindigkeitsverkehr-durch-die-roehre-mit-172-stundenkilometern-virgin-hyperloop-schliesst-erste-bemannte-testfahrt-ab/26603924.html. [Zugriff am 03 06 2023].

[2] TEMS (Transportation Economics & Management Systems, Inc.), „Great Lakes Hyperloop Feasibility Study," July 2020. [Online]. Available: https://www.hyperlooptt.com/hyperlooptt/wp-content/uploads/2022/11/Great-Lakes-Feasibility-Study.pdf. [Zugriff am 23 02 2023].

[3] Tesla, SpaceX, „Hyperloop Alpha," August 2013. [Online]. Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_image/hyperloop-alpha.pdf. [Zugriff am 13 Februar 2023].

[4] L. Häberle und W. Stölzle, „Luftfrachtlogistik-Studie Schweiz 2020," *Cuvillier Verlag,* Nr. 1, p. 6, August 2020.

[5] R. Torian, „Graphs for Decision Making," 6 Januar 2012. [Online]. Available: http://richardtorian.blogspot.com/2012/01/cost-per-ton-mile-for-four-shipping.html. [Zugriff am 02 04 2023].

[6] Lufthansa Group, „Annual Report 2021," 03 März 2022. [Online]. Available: https://www.lufthansagroup.com/de/themen/jahresergebnis-2021.html. [Zugriff am 2023 04 04].

[7] Freightos, „Freightos," 2023. [Online]. Available: https://www.freightos.com/. [Zugriff am 04 04 2023].

[8] Exchange-rates, „Wechselkurse Dollar zu Euro," 04 04 2023. [Online]. Available: https://de.exchange-rates.org/Rate/USD/EUR/04.04.2023. [Zugriff am 04 04 2023].

[9] Bundesamt für Umwelt BAFU, „bafu.admin," 29 12 2020. [Online]. Available: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/co2-abgabe.html. [Zugriff am 06 04 2023].

[10] AutoScout24, „Welche Förderungen gibt es für Elektroautos in der Schweiz?," 14 09 2022. [Online]. Available: https://www.autoscout24.ch/de/c/d/information/verkehrsabgaben-alternative-antriebe-nach-kanton?a=27781. [Zugriff am 06 04 2023].

[11] Blick, „BLICK zeigt, wer all die Maut kassiert," 13 03 2019. [Online]. Available: https://www.blick.ch/auto/service/europas-grosse-autobahn-betreiber-blick-zeigt-wer-all-die-maut-kassiert-id8737122.html. [Zugriff am 06 05 2023].

[12] X. Ma, Y. Xu, F. Chen und J. Wang, „Optimal Design and Energy Analysis of the Hyperloop System," *Journal of Mechanical Sciences,* 2019.

[13] G. Hebermehl und M. Sommer, „auto motor sport," München - Berlin in 30 Minuten, 03 08 2022. [Online]. Available: https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/mobilitaetsservices/hyperloop-erster-bemannter-test-gelungen/#:~:text=Hyperloop%20nennt%20sich%20ein%20Hochgeschwindigkeitszug,km%2Fh%20durch%20R%C3%B6hren%20schie%C3%9Fen.. [Zugriff am 06 05 2023].

[14] mein-lernen.at, „Beschleunigung Zug erreicht Höchstgeschwindigkeit," 2023. [Online]. Available: https://www.mein-lernen.at/mathematik/mathematik-grundlagen/geschwindigkeit/beschleunigung/aufgaben/8989-beschleunigung-zug-erreicht-hoechstgeschwindigkeit#:~:text=Ein%20Schnellzug%20mit%20einer%20H%C3%B6chstgeschwindigkeit,1%2C1%20m%2Fs%C2%B2.. [Zugriff am 07 05 2023].

[15] studywell, 2023. [Online]. Available: https://studywell.com/kinematics/suvat-equations/. [Zugriff am 05 06 2023].

[16] Eurail, „eurail_2022-map," 2022. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.rail-pass.com/user/images/eurail_2022-map.pdf. [Zugriff am 14 05 2023].

[17] Kanbanzone, „kanbanzone," [Online]. Available: https://kanbanzone.com/resources/lean/littles-law/. [Zugriff am 06 06 2023].

6.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Designvorschlag, Skizze aus dem Hyperloop Alpha Report [3]. 10
Abbildung 2: Jährliche Frachttonnen. Umgeschlagen am Zürcher Flughafen (eigene Darstellung anhand vom Datensatz). 13
Abbildung 3: Frachtaufkommen im Umkreis von 650 Kilometer von Zürich ausgehend (eigene Darstellung basierend auf Datensatz) 14
Abbildung 4: Kosten pro Tonnenmeile für vier Transportarten (Daten aus [4]). 16
Abbildung 5: Frachtkosten Schätzer von «Freightos» [7]. 17
Abbildung 6: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Paris. 21
Abbildung 7: Graph der Funktion v(s) 23
Abbildung 8: Methode 1: Zürich – Paris, Geschwindigkeit-Strecke-Diagramm (eigene Darstellung). 24
Abbildung 9: Methode 2: Verbindung zwischen Zürich und Paris, angelehnt an das Autobahnnetz. 25
Abbildung 10: Methode 2: Verbindung Zürich - Paris. Streckenabschnitte detaillierter Untersucht (eigene Darstellung) 26
Abbildung 11: Methode 2: Maximale Geschwindigkeit der Verbindung Zürich – Paris (eigene Darstellung) 28
Abbildung 12: Methode 2: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Paris (eigene Darstellung). 29
Abbildung 13: Auszug aus dem Europäischen Bahnnetz [16]. 30
Abbildung 14: Zugnetz und Autobahnverbindung verglichen. 30
Abbildung 15: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt 31
Abbildung 16: Methode 1: Strecke Zürich - Frankfurt, v-s-Diagramm (eigene Darstellung). 32
Abbildung 17: Methode 2: Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt, angelehnt an das Autobahnnetz . 33
Abbildung 18: Methode 2: Verbindung Zürich - Frankfurt detailliert (eigene Darstellung) 34
Abbildung 19: Methode 2: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Frankfurt (eigene Darstellung). 35
Abbildung 20: Auszug aus dem Europäischen Bahnnetz|Methode 3: Verbindung zwischen Zürich und Frankfurt 36
Abbildung 21: Methode 3: Verbindung Zürich - Frankfurt detailliert (eigene Darstellung). 37
Abbildung 22: Methode 3: Geschwindigkeitsprofil der Strecke Zürich nach Frankfurt (eigene Darstellung) 38
Abbildung 23: Methode 1: Geradlinige Verbindung zwischen Zürich und Amsterdam 39
Abbildung 24: Methode 1: Strecke Zürich - Amsterdam, v-s Diagramm (eigene Darstellung). 40
Abbildung 25: Strecke Zürich nach Paris, Verlegung der Röhren (eigene Darstellung) 42
Abbildung 26: Strecke Zürich nach Frankfurt, Verlegung der Röhren (eigene Darstellung) 43
Abbildung 27: Anzahl Hyperloop Kapseln mit Little's law (eigene Darstellung) 47
Abbildung 28: Rentabilität, Zürich – Paris Abbildung 29: Rentabilität, Zürich - Frankfurt 54
Abbildung 30: Fracht im Weltweiten Vergleich (eigene Darstellung anhand vom Datensatz). 60

6.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Städte und deren Frachtaufkommen im Umkreis von 650 Kilometer ab Zürich (eigene Tabelle basierend auf Datensatz) 15
Tabelle 2: Kosten und Prozentuelle Anteile der Fallbeispiele 18
Tabelle 3: Potenzieller Umsatz aller Fallbeispiele 19
Tabelle 4: Methode 1: Strecke: Zürich - Paris 22
Tabelle 5: Die Fahrtzeiten zusammengefasst 40
Tabelle 6: Die Investitionskosten der Strecke Zürich nach Paris 42
Tabelle 7: Die Investitionskosten der Strecke Zürich nach Frankfurt 43
Tabelle 8: Investitionskosten der Strecken zusammengefasst. 44
Tabelle 9: Betriebskosten 46
Tabelle 10: Betriebskosten Zürich - Paris pro Jahr (eigene Darstellung) 48
Tabelle 11: Betriebskosten Zürich - Frankfurt pro Jahr (eigene Darstellung) 48
Tabelle 12: Rentabilität Zürich - Paris (eigene Darstellung) 49
Tabelle 13: Rentabilität Zürich - Frankfurt (eigene Darstellung) 50
Tabelle 14: Kennzahlen der Lufthansa Group (Daten der Tabelle aus dem Jahresbericht der Lufthansa [6]). 50
Tabelle 15: Betriebskosten zusammengefasst 54
Tabelle 16: Methode 2: Strecke: Zürich - Paris 63
Tabelle 17: Methode 2: Strecke: Zürich – Frankfurt 64
Tabelle 18: Methode 3: Strecke: Zürich - Frankfurt 64
Tabelle 19: Chicago Cleveland Verbindung (Daten aus [2]) 65
Tabelle 20: Capital Cost der TEMS-Studie (Daten aus [2]) 65
Tabelle 21: Prognostizierte Betriebskosten in der TEMS-Studie (Daten aus [2]) 66

7. Anhang

Anhang A: Weltweites Luftfrachtaufkommen aus Kapitel 3.1.1.

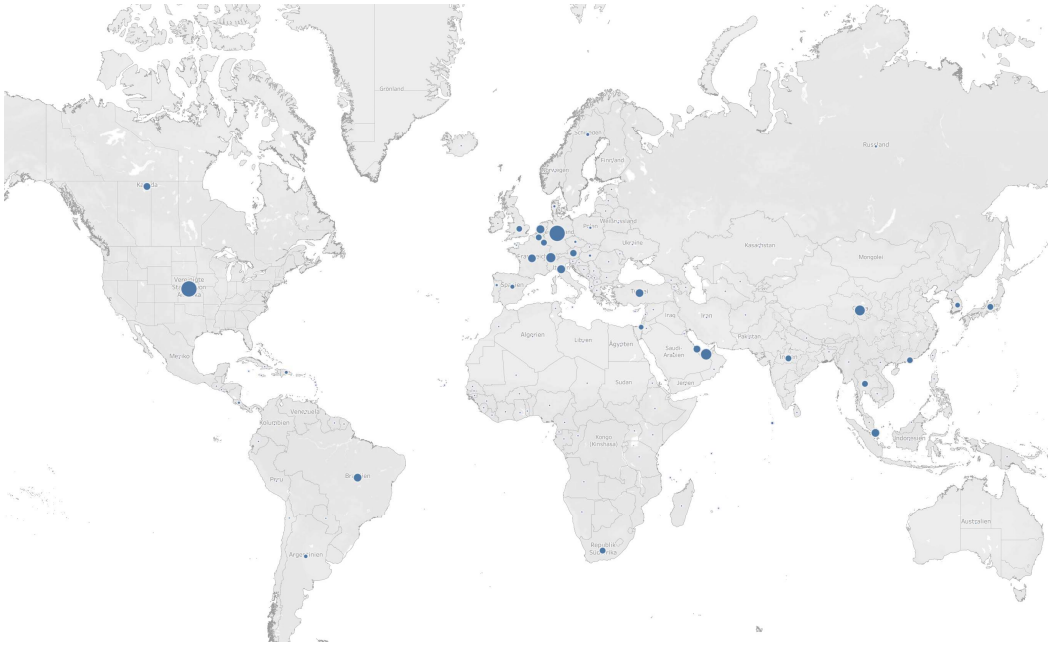


Abbildung 30: Fracht im Weltweiten Vergleich (eigene Darstellung anhand vom Datensatz).

Aus der Abbildung 30 geht hervor, dass grosse Teile an Fracht auch von Übersee kommen, wie zum Beispiel den USA und China. Da das Hyperloop-Konzept im derzeitigen Forschungsstadium eher Kurzstreckenflüge ersetzen soll, kommen diese Länder und der damit verbundene Markt nicht in Frage.

Anhang B: Detaillierte Rechenschritte aus Kapitel 3.2.1.1

Für die Berechnung der fehlenden kinematischen Grössen, werden die SUVAT-Gleichungen verwendet [15].

Gegeben sind folgende Werte:

V_0 = 0 m/s

S_0 = 0 m

a = 0.981 m/s^2

V_1 = 333.33 m/s

S_{Total} = 490'000 m

S_1 = X

S_2 = 490'000 – X

Um nun die fehlende Strecke S_1 zu ermitteln, wird die konstante Beschleunigungs-Formel der Kinematik nach S (Strecke) aufgelöst. Da die Anfangsgeschwindigkeit, sowie Startstrecke = 0 ist, kann dies nach der Umformung weggelassen werden.

$$v^2 = v0^2 + 2a(s1 - s0) \tag{17}$$

$$s1 = \frac{v^2}{2a} \tag{18}$$

$$56630.4\,m = \frac{333.33^2}{2 * 0.981\frac{m}{s^2}} \tag{19}$$

Somit lässt sich nun auch S_2 bestimmen

$$s2 = s(total) - s1 \tag{20}$$

$$433369.6\,m = 490000 - 56630.4 \tag{21}$$

Als nächstes werden die jeweiligen Zeiten ermittelt. Dazu wird die Formel der gleichmässig beschleunigten Bewegung verwendet. Dadurch lässt sich die Zeit [t_1] ermitteln die benötigt wird, um vom Startpunkt S_0 bis zum Streckenabschnitt S_1 zu gelangen.

$$s = s0 + v0t + \frac{1}{2}at^2 \tag{22}$$

Diese Formel (22), wird nach t (Zeit) aufgelöst. Auch hier kann S_0 sowie V_0t nach der Umformung ignoriert werden.

$$t1 = \sqrt{\frac{2s}{a}} \tag{23}$$

$$339.785\ s = \sqrt{\frac{2 * 56630.4\ m}{0.981\ \frac{m}{s^2}}} \tag{24}$$

Die Zeit [t_2] die bei der gleichförmigen Bewegung (konstante Geschwindigkeit von V_1) benötigt wird, errechnet sich durch

$$t2 = \frac{s2 - s1}{v1} \tag{25}$$

$$1130.23\ s = \frac{433369.6\ m - 56630.4\ m}{333.33\ m/s}. \tag{26}$$

Anhang C: Tabelle der Streckenverbindung Methode 2: Zürich - Paris

Methode 2: Strecke Zürich - Paris	**Streckenabschnitt in m [s]**	**kumulierter Streckenabschnitt in m**	**Geschwindigkeit in m/s [v]**	**Beschleunigung oder bremsen in m/s^2 [a]**	**Zeit in s [t]**	**kumulierte Zeit in Minuten**
S0 (Zürich)	0	0	0	0,981	0,00	0,0
S1	37500	37500	271,67	-0,981	276,93	4,6
S2 (Basel)	37500	75000	0	0,981	276,93	14,2
S3	33000	108000	254,44	-0,981	259,37	18,6
S4 (start C1)	21000	129000	153,33	0	103,07	20,3
S5 (start brakes)	15010	144010	153,33	-0,981	97,89	21,9
S6 (start C2)	3990	148000	125,28	0	28,59	22,4
S7 (start acceleration)	27000	175000	125,28	0,981	215,52	26,0
S8 (C3)	3520	178520	150,28	0	25,48	26,4
S9 (start acceleration)	15480	194000	150,28	0,981	103,01	28,1
S10	45130	239130	333,33	0	186,60	31,2
S11 (start brakes)	90650	329780	333,33	-0,981	271,95	35,8
S12 (start C4)	32220	362000	219,17	0	116,37	37,7
S13 (start brakes)	24530	386530	219,17	-0,981	111,92	39,6
S14 (start C5)	8470	395000	177,22	0	42,76	40,3
S15 (start acceleration)	30000	425000	177,22	0,981	169,28	43,1
S16	40630	465630	333,33	0	159,13	45,7
S17 (start brakes)	740	466370	333,33	-0,981	2,22	45,8
S_total (Paris)	56630	523000	0	0	339,79	51,4

Tabelle 16: Methode 2: Strecke: Zürich - Paris

Anhang D: Tabelle der Streckenverbindung Methode 2: Zürich - Frankfurt

Methode 2: Zürich - Frankfurt	**Streckenabschnitt in m [s]**	**kumulierter Streckenabschnitt in m**	**Geschwindigkeit in m/s [v]**	**Beschleunigung oder bremsen in m/s^2 [a]**	**Zeit in s [t]**	**kumulierte Zeit in Minuten**
S0 (Zürich)	0	0	0	0,981	0,00	0,0
S1	37500	37500	271,67	-0,981	276,93	4,6
S2 (Basel)	37500	75000	0	0,981	276,93	14,2
S3	47851	122851	305,28	0	311,19	19,4
S4	92000	214851	305,28	0,981	301,36	24,4
S5	8810	223661	333,33	0	28,59	24,9
S6	19148	242809	333,33	-0,981	57,44	25,9
S7	21026	263835	263,89	0	70,78	27,1
S8	52000	315835	263,89	0,981	197,05	30,3
S9	20762	336597	332,5	-0,981	69,94	31,5
S_Total (Frankfurt)	56403	393000	0	0	338,94	37,2

Tabelle 17: Methode 2: Strecke: Zürich – Frankfurt

Anhang E: Tabelle der Streckenverbindung Methode 3: Zürich - Frankfurt

Methode 3: Zürich - Frankfurt	**Streckenabschnitt in m [s]**	**kumulierter Streckenabschnitt in m**	**Geschwindigkeit in m/s [v]**	**Beschleunigung oder bremsen in m/s^2 [a]**	**Zeit in s [t]**	**kumulierte Zeit in Minuten**
S0 (Zürich)	0	0	0	0,981	0,00	0,0
S1	37500	37500	271,67	-0,981	276,93	4,6
S2 (Basel)	37500	75000	0	0,981	276,93	14,2
S3	56662	131662	333,33	0	339,79	19,9
S4	113348	245010	333,33	-0,981	340,05	25,6
S5	4811	249821	318	0	15,63	25,8
S6	45000	294821	318	0,981	141,51	28,2
S7	4834	299655	333,33	0	15,63	28,4
S8	28663	328318	333,33	-0,981	85,99	29,9
S_Total (Frankfurt)	56682	385000	0	0	339,79	35,5

Tabelle 18: Methode 3: Strecke: Zürich - Frankfurt

Anhang F: Investitionskosten der TEMS-Studie

Die untenstehende Tabelle fasst einige Investitionskosten zusammen, die in der TEMS-Studie für den Great Lake Korridor prognostiziert wurden [2].

Chicago-Cleveland	Mileage
Deep Tunnel	103
Cut and Cover	227
Total Miles	330

Tabelle 19: Chicago Cleveland Verbindung (Daten aus [2])

Capital costs	In Millions of dollars
Guideway Infrastructure	8446
Stations + Vehicles	549
Guidance + Propulsion	7912
Total Cost	16907

Tabelle 20: Capital Cost der TEMS-Studie (Daten aus [2])

Anhang G: Betriebskosten der TEMS-Studie

Die untenstehende Tabelle fasst einige Betriebskosten zusammen, die in der TEMS-Studie für den Great Lake Korridor prognostiziert wurden [2].

Kostenaufteilung der TEMS-Studie, für den Great Lake Korridor	Jährliche Kosten in Millionen Dollar
Wartung der Ausrüstung	74,62
Verwaltungskosten	61,67
Instandhaltung der Strecke	59,77
Wartung des Vakuumsystem	27,54
Stromkosten für das Vakuum	19,78
Stationen	10,99
Antriebskosten	3,73

Tabelle 21: Prognostizierte Betriebskosten in der TEMS-Studie (Daten aus [2])