

Hochgeschwindigkeitsverkehr in Vakuumröhren Ist Hyperloop machbar?

Hansen, Ingo

Publication date

2019

Document Version

Final published version

Published in

Eisenbahntechnische Rundschau

Citation (APA)

Hansen, I. (2019). Hochgeschwindigkeitsverkehr in Vakuumröhren: Ist Hyperloop machbar? *Eisenbahntechnische Rundschau*, 11(november 2019), 22-29.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Hochgeschwindigkeitsverkehr in Vakuumröhren: Ist Hyperloop machbar?

Die Machbarkeit des Hyperloop-Konzeptes des Promotors E. Musk (SpaceX) hinsichtlich Zielsetzung, Verkehr, Betrieb, Sicherheit, Energiebedarf, Linienführung, Umwelt und geschätzten Kosten wird untersucht. Die Restriktionen für Betriebs- und Verkehrssteuerung, Sicherheit, Trassierung, räumliche Einpassung, Konstruktion luftleerer Röhren einschließlich Druckluftschleusen sowie Bau- und Betriebskosten des Hyperloop-Systems werden beschrieben.



1. Einleitung

Hyperloop soll eine neue, fünfte Verkehrsart neben Flugzeugen, Eisenbahnen, Straßenfahrzeugen und Schiffen werden, welche sicherer, schneller, billiger, komfortabler, wetterunabhängig, umweltfreundlich angetrieben und erdbebenbeständig sein und als Alternative für ein landesweites Massenverkehrssystem zum Luft- und Straßenverkehr über Entfernungen bis zu 1500 km dienen soll (Musk, 2013 p. 2).

Das Hyperloop-Konzept und die nachfolgenden Testwettbewerbe 2016, 2017, 2018 bzw. 2019 in einer 1,6 km langen luftleeren Stahlröhre mit 1,83 m Durchmesser auf dem Gelände des Raketentechnologieunternehmens von E. Musk in Hawthorne/Kalifornien haben viele neue Forschungs- und Entwicklungsarbeiten von Studenten, Wissenschaftlern, Consultants und Start-Up Unternehmen stimuliert. Studenten der TU München haben im Juli 2018 und 2019 gezeigt, dass ihr Fahrzeug eine maximale Geschwindigkeit von 467 km/h in der kurzen luftleeren Röhre erreichen kann und damit den Geschwindigkeitswettbewerb gewonnen. Die Planung und der Bau von Hyperloop Teststrecken in Kalifornien und Frankreich, kommerziell nutzbarer Strecken in Dubai und China sowie die Präsentation eines Prototyp-Fahrzeuges in Spanien haben sehr hohe Erwartungen an die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit eines Hochgeschwindigkeits-Verkehrssystems in Vakuumröhren geweckt.

Zeitschriftenveröffentlichungen über Hyperloop beschränken sich überwiegend auf einzelne Aspekte wie den Entwurf und die Optimierung des Fahrzeuges (Braun et al., 2017; Opgenoord & Caplan, 2018; Wang et al., 2017; Janzen, 2017; Chin et al., 2015; Decker et al., 2017), während Van Goeverden et al. (2018) bzw. Doppelbauer (2018) die Leistungsfähigkeit, Umwelteffekte und Kosten des Verkehrssystems beurteilen.

Weder in (Musk, 2013), noch in den meisten anderen Artikeln wurde das in den vorhergehenden Jahren seit 1974 in der Schweiz entwickelte Konzept „Swissmetro“ für eine Magnetschwebbahn in Tunnelröhren mit partiellem Vakuum (Pot & Trotter, 1999; Cassat & Jufer, 2002; Swissmetro AG, 2003; Cassat & Bourquin, 2011) erwähnt. Dieses wurde 2009 wegen fehlender Finanzierungsmittel definitiv aufgegeben, nachdem die Behandlung des Konzessionsgesuches für die Pilotstrecke Genf–Lausanne (3,5 Milliarden Schweizer Franken) im Nationalrat aufgrund des fehlenden Finanzierungsnachweises abgelehnt worden war (Wikipedia, 2018; wordpress, 2013). Weitere Gründe für das Scheitern des „Swissmetro“-Projektes sind in einer Europäischen Marktstudie von Verkehrswissenschaftlern der ETH Zürich nachzulesen (Weidmann et al., 2006). Selbst unter sehr optimistischen Annahmen würden die erwartbaren Einnahmen aus dem „Swissmetro“-Projekt die Investitions- und Instandhaltungskosten für die Strecke und Fahrzeuge bei Weitem nicht decken können.



**Prof. em. Dr.-Ing.
Ingo A. Hansen**

Department of Transport & Planning,
University of Technology,
Delft, The Netherlands
i.a.hansen@tudelft.nl

Das wesentliche Problem des Hochgeschwindigkeitsverkehrs in (nahezu) luftleeren Röhren besteht darin, dass eine neue Technologie für den Langstreckenverkehr auf/in/unter der Erde bzw. im Wasser entwickelt werden muss, die einerseits mit dem Luftverkehr hinsichtlich Reisezeit und Komfort konkurrieren kann, deutlich weniger Energie verbraucht, die Umwelt und das Klima geringer belastet, und andererseits eine hinreichende Leistungsfähigkeit mit niedrigeren Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten als Hochgeschwindigkeitseisenbahnen erzielt.

Die zu klärenden wesentlichen technischen, wirtschaftlichen, sozialen und Umweltfragen sind:

- Welche Verkehrsnachfrage und Kapazität ist mittel- bzw. langfristig für Hochgeschwindigkeitsverkehr über lange Entfernungen auf der Erde zu erwarten?
- Welche technischen Hindernisse bestehen für die Einführung neuer Personen-

verkehrstechnologien mit Geschwindigkeiten zwischen 500 und 1200 km/h?

- Welche Auswirkungen können Hochgeschwindigkeitsverkehrssysteme wie Hyperloop auf die Raum-/Flächennutzung, den Verbrauch von Naturräumen, Energie, fossilen Energievorräten, das natürliche Klima, die Sicherheit und die Umwelt haben?
- Können die zu erwartenden Entwicklungs- und Infrastrukturinvestitionskosten, Betriebs- und Instandhaltungskosten für Hyperloop deutlich niedriger sein als für Flugzeuglinien, Hochgeschwindigkeitseisenbahnen bzw. Magnetschwebbahnen, und durch Einnahmen gedeckt werden?
- Welches sind die wichtigsten technischen, wirtschaftlichen und sozialen Herausforderungen für die zukünftige Forschung und Entwicklung von neuen Verkehrstechnologien mit Hochgeschwindigkeit in (partiell) luftleeren Röhren?

2. Systemanalyse

2.1. Abschätzung der Nachfrage für Hochgeschwindigkeitsverkehr

Das potentielle Verkehrsnachfragevolumen im Langstreckenverkehr mit Geschwindigkeiten zwischen 500 und 1500 km/h könnte anhand des Verkehrsaufkommens, der Reisezeit und Reisekosten des Linienflugverkehrs zwischen größeren Flughäfen bzw. entlang Strecken des Hochgeschwindigkeitseisenbahnverkehrs mit Hilfe von Simulationsmodellen ermittelt werden, wenn die Volumina, Reisegeschwindigkeit und Preiselastizität der Nachfrage bekannt wären. Da diese Daten von Unternehmen des Linienflugverkehrs und der Eisenbahn aus Konkurrenzgründen nicht bekannt gemacht werden und jüngere wissenschaftliche Untersuchungen über dieses Marktsegment nicht vorliegen, sind grobe Schätzungen der Verkehrsnachfrage für eine zukünftige Verkehrstechnologie wie Hyperloop derzeit nur anhand spärlicher Daten des Linienflugverkehrs der amtlichen Statistik und Annahmen über den möglichen Anteil des Hochgeschwindigkeitsverkehrs von Hyperloop möglich.

In den USA betrug das gesamte nicht-private nationale Linienflugverkehrsaufkommen 720 Million Reisende im Jahr 2016 (77,3%) und die durchschnittliche Reiseweite 1476 km/Passagier (BTS, 2017). Bezogen auf die Verbindung z. B. zwischen

Hyperloop soll eine neue, fünfte Verkehrsart neben Flugzeugen, Eisenbahnen, Straßenfahrzeugen und Schiffen werden.



den Flughäfen Los Angeles und San Francisco liegen keine spezifischen amtlichen Angaben über die Anzahl der Linienflüge und Passagiere vor. Der Promotor von Hyperloop nannte ein Verkehrsaufkommen von 6 Millionen Passagieren/Jahr für diese Flugverbindung¹⁾ und 70% Marktanteil des Hyperloop in den Spitzenverkehrsstunden (Musk, 2013 p. 11 und 52). Seine Erwartung scheint interessengeleitet und sehr übertrieben, wobei Musk von einem äußerst niedrigen Fahrpreis von US\$ 20 für eine Hyperloop-Strecke von 563 km ausgeht (Musk, 2013 p. 57).

Das nationale Aufkommen im Linienflugverkehr in Deutschland betrug 2016 demgegenüber nur 23,7 Millionen (8,4% Anteil) und die durchschnittliche Reiseweite 439 km/Passagier (BMVI, 2017), während der internationale Charterflugverkehr hier eine viel größere Bedeutung als in den USA hatte. Zwischen den größeren Flughäfen in Deutschland selbst und zu den großen internationalen Flughäfen wie London bzw. Paris über eine Entfernung zwischen den Flughäfen zwischen 400 und 1000 km lag das Linienflugverkehrsvolumen zwischen 1 und 2 Million Passagieren/Jahr und Richtung (Eurostat, 2017). Daraus folgt ein maximales Fluggastaufkommen zwischen diesen Flughäfen von ungefähr 10000 Passagieren/Tag und Richtung, je nachdem welcher Faktor im Verhältnis zum Jahresverkehrsvolumen angesetzt wird. Für die projektierte Strecke Zürich–Genf der „Swissmetro“-Magnetschwebbahn wurde ein Verkehrsaufkommen von 4000 Fahrgästen/Tag geschätzt (Weidmann et al., 2006).

Falls eine Hyperloop-Verbindung zwischen zwei der größeren Flughäfen in Deutschland bestünde, deren Bahnhöfe in der Nähe der Flughäfen liegen, wäre m. E. die Schätzung eines höheren Marktanteils von mehr als 20% am gegenwärtigen Flugverkehrsaufkommen für Hyperloop sehr

unrealistisch. Das hieße, für eine solche Hyperloop-Verbindung zwischen zwei Großstädten im Abstand von mehr als 400 km sollte man mittelfristig höchstens mit einem Verkehrsvolumen von 2000 Fahrgästen/Tag und Richtung rechnen, selbst ohne dabei den Einfluss der Höhe des Fahrpreises und der Differenz zum Preis des Flugtickets bzw. der Eisenbahnfahrkarte zu berücksichtigen.

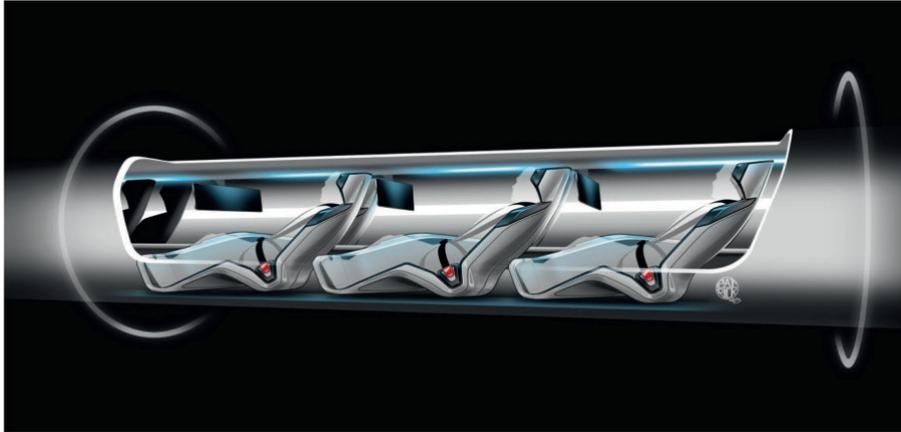
2.2. Alternative Technologien für Hochgeschwindigkeitsverkehr

Derzeit bestehende Systeme für öffentlichen Personenverkehr über mittelgroße Entfernungen mit sehr hoher Geschwindigkeit sind Düsenflugzeuge und Hochgeschwindigkeitszüge im Linienverkehr. Obwohl die Höchstgeschwindigkeit kommerziell genutzter Flugzeuge ungefähr 900 km/h beträgt, liegt die mittlere Beförderungsgeschwindigkeit der Linienflüge über Entfernungen von 400 bis 1000 km zwischen den Flughäfen wegen Zeitverlusten während des Aufstiegens, der Landeanflüge und auf den Flughäfen selbst laut Flugplan nur zwischen 400 bis 500 km/h.

Hochgeschwindigkeitseisenbahnzüge haben bei speziellen Testfahrten in Frankreich eine maximale Geschwindigkeit von 575 km/h erreicht; im Linienbetrieb werden jedoch bislang maximal 250 bis 350 km/h je nach Ausbaustandard der Strecken erreicht. Die mittlere Beförderungsgeschwindigkeit von Hochgeschwindigkeitszügen hängt sehr stark von der Entfernung zwischen den Haltepunkten, der Haltezeit auf den Zwischenbahnhöfen, der Trassenbelegung sowie Fahrplansynchronisierung ab und liegt i. Allg. zwischen 150 und 250 km/h.

Magnetschwebbahnzüge haben bei Testfahrten in Japan eine Höchstgeschwindigkeit von 603 km/h erzielt (Central Japan Railway Company, 2014). Auf der noch im Bau befindlichen 286 km langen Magnetschwebbahnstrecke des Chuo Shinkansen zwischen Tokyo Shinagawa und Nagoya, deren Betriebsaufnahme im Jahr 2027 geplant ist, soll die maximale und mittlere Beförderungsgeschwindigkeit 500 km/h bzw. 429 km/h betragen (Uno, 2016). Der in Deutschland entwickelte Transrapid Magnetschwebzug wurde für etwa die gleichen Geschwindigkeiten entworfen, wird allerdings im praktischen Linienverkehr auf dem 30 km kurzen Flughafenzubringer in Shanghai zwecks Energieeinsparung nur bis 300 km/h beschleunigt.

1) Ohne Quellenangabe



1: Hyperloop-Fahrzeugkabine (Musk, 2013)

Der Magnetschwebezug für die geplante Swissmetro sollte für eine Höchstgeschwindigkeit von 500 bis 700 km/h im partiellen Vakuumbetrieb ausgelegt werden (Cassat & Jufer, 2002; Cassat & Bourquin, 2011) und auf der Strecke von Zürich nach Genf mit Zwischenhalt in Bern und Lausanne eine mittlere Geschwindigkeit von circa 320 km/h erreichen. Die Swissmetro-Züge sollten im Vergleich zum Transrapid schmaler (3,2 m) und kürzer (78 m) sein, weniger Sitzplätze (200–350) erhalten sowie im Abstand von 3 min eingesetzt werden. Letzteres wurde jedoch in der Marktstudie der ETH Zürich in Zweifel gezogen, da der Zeitbedarf für den Ein-/Ausstiegsprozess durch das An-/Abdocken der Fahrzeuge, Öffnen/Schließen der Luftschleusen, Absaugen/Einpumpen der Luft zwischen dem Fahrzeug und den Bahnsteigräumen, Schließen/Öffnen der hermetischen Fahrzeugtüren und Sicherheitskontrollen erheblich verlängert würde (Weidmann et al., 2006). Daher müsse für Swissmetro mit einer minimalen Zugfolge-

zeit von 5–6 min gerechnet werden (Tabelle 1).

Das ursprünglich vorgestellte Fahrzeugkonzept für Hyperloop besteht aus 1,35 m schmalen Kabinen mit einer Höhe von nur 1,1 m, einer Länge zwischen 15 und 20 m und einer Kapazität von 28 Personen, welche durch vertikal hochklappbare Ein-/Ausstiegstüren von beiden Seiten zu den einzelnen Sitz- bzw. Halbliegeplätzen erreichbar sind (Bild 1). Daneben wurde eine weitere Kabine für den kombinierten Transport von Personen und bis zu 3 elektrisch angetriebenen Personenwagen vorgestellt, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Der erstmals im Oktober 2018 von dem Konsortium Hyperloop Transportation Technologies präsentierte Fahrzeugprototyp ist 30 m lang, höher, besitzt 28–40 Sitzplätze und 2 Ein-/Ausstiegstüren (Bild 2).

Die von Musk (2013 p. 6) angegebenen Fahrzeugfolgezeiten des Hyperloop von nur 30 sec in Spitzenverkehrszeiten bzw. 2 min in Normalverkehrszeiten, als auch diejenige



2: Hyperloop-Fahrzeugprototyp (Hyperloop Transportation Technologies, 2019)

von 40 sec (Hyperloop Transportation Technologies, 2019) sind jedoch unrealistisch und halten keiner seriösen Sicherheitsprüfung stand (siehe auch Abschnitt 2.3).

In Anbetracht des sehr komplizierten, sicherheitsrelevanten Bremsvorganges vor und in den Luftschleusen, der notwendigen Zeit zum Öffnen/Schließen der doppelten Luftschleusen-kammern in den Röhren vor/nach jeder Haltestelle, der Langsamfahrt durch jede einzelne Luftschleuse mit Zwischenhalt wegen des Öffnens/Schließens der hermetischen Schleusentore, dem sukzessiven Herstellen des Vakuums in jeder einzelnen Luftschleuse, Fahrt bis zur Ein-/Ausstiegsplattform, Öffnen/Schließen der hermetischen Fahrzeugtüren, Sicherheitskontrollen im Fahrzeug und an den Bahnsteig-/Warteraumtüren sowie für den Ein- und Ausstieg der Fahrgäste und An-schnallen des Sicherheitsgurtes muss mit einer Fahrzeugfolgezeit des Hyperloop von mindestens 5 Minuten zur Ermittlung der Streckenleistungsfähigkeit an den Haltestellen und damit auch in jeder Vakuumröhre gerechnet werden (siehe Bild 3 und Abschnitt 2.3).

Die in Tabelle 1 aufgeführten betrieblichen Leistungsmerkmale bestehender Systeme für den Hochgeschwindigkeitslinienverkehr über mittelgroße Entfernungen zwischen 500 und 1500 km unterscheiden sich nicht wesentlich hinsichtlich der in der Praxis bewiesenen bzw. in Zukunft möglichen Bedienungshäufigkeit. Die Beförderungsgeschwindigkeit des Hyperloop in diesem Entfernungsbereich könnte allerdings deutlich höher sein als im gegenwärtigen Linienverkehr von Flugzeugen, Hochgeschwindigkeitseisenbahnen und Magnetschwebebahnen, während die Fahrzeug- und Streckenkapazität des Hyperloop nur ungefähr 30 bzw. 340 Personen/h und Richtung, d.h. 3–5% der anderen Verkehrssysteme, erreichen würde.

2.3. Hyperloop Antrieb, Abstandssicherung, Betriebsführung und Energieversorgung

Der Antrieb der Hyperloop-Fahrzeuge soll durch Linearmotoren erfolgen, die auf begrenzter Länge vor/nach den Haltepunkten und im Abstand von circa 70 Meilen in den Röhren zur Beschleunigung bzw. zum Bremsen installiert werden (Musk, 2013 p. 4). Der Auftrieb zur Überwindung der Schwerkraft soll durch einen leistungsstarken Luftkompressor und Ventilator an Bord des Fahrzeuges erzeugt werden, der den verbleibenden sehr niedrigen Luftdruck

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für University of Technology, Delft / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

(100 Pascal bzw. 1/1000 des Luftdruckes auf Meereshöhe) in den Röhren von der Fahrzeugspitze absaugt und ein Luftkissen bei höheren Geschwindigkeiten unter dem Fahrzeug erzeugt. Für die Gewichtsübertragung, das Anfahren bei niedrigen Geschwindigkeiten und im Notfall soll ein batteriegespeicherter elektrischer Hilfsmotor mit kleinen Rädern unter dem Fahrzeug eingesetzt werden.

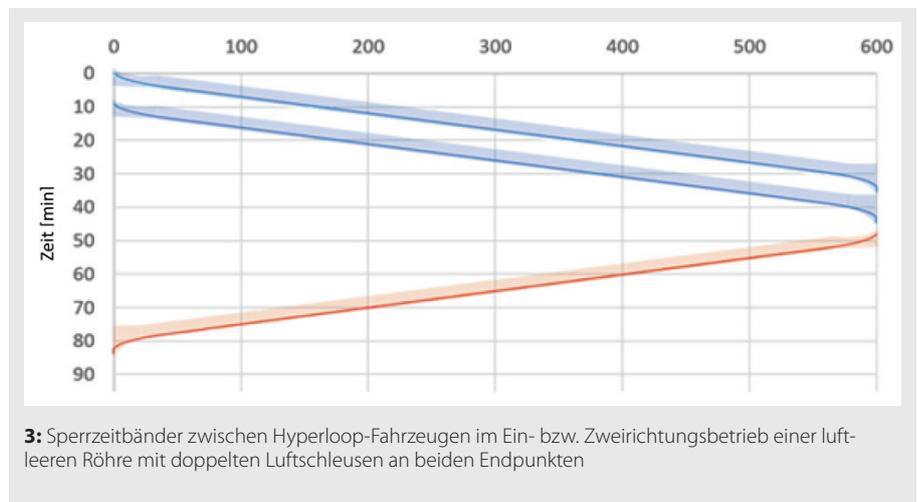
Unklar ist, wie eine sichere vertikale und laterale Abstandshaltung in den Röhren bei sehr hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten, in Kurven und Übergangsbögen sowie die zuverlässige Positionsermittlung, Gefahrpunktstandsberechnung und Überwachung der Bremskurven für Hyperloop in Längsrichtung (FahrzeuginTEGRITÄT) gewährleistet werden soll (siehe Abschnitt 2.3). Diese Anforderungen könnten theoretisch allerdings durch ein automatisches Betriebssteuerungssystem auf der Grundlage eines durchgehenden elektromagnetischen Antriebs- und Schwebbahnsystems wie beim Transrapid erfüllt werden.

Die Leistungsfähigkeit des Hyperloop würde durch einen Zweirichtungsbetrieb in einzelnen Röhren im Vergleich zum Einrichtungsbetrieb in Doppelröhren wegen der Abhängigkeit von der Fahrzeit zwischen und der Wendezeit an den Haltepunkten sehr stark eingeschränkt werden. Ein sicheres Betriebsführungssystem für ein einziges Fahrzeug mit sehr hoher Geschwindigkeit, das in einer luftleeren Röhre abwechselnd hin und zurück fährt, lässt sich allerdings einfacher beherrschen und müsste experimentell erprobt werden.

Die Erweiterung/Verlängerung einer ersten Hyperloop-Röhre zu einem Netz von Doppelröhren mit Zwischen- und verschiedenen Endhaltepunkten ist äußerst schwierig, da Verbreiterungen/Verzweigungen von luftleeren Röhren bautechnisch und physikalisch nicht (dauerhaft) möglich sind. Das Überholen von Hyperloop-Fahrzeugen an Zwischenhalten ist nur an Knotenpunkten mit mehreren Fahrspuren, Weichen und Stellwerken außerhalb der durch doppelte Luftschleusenammern beidseitig angeordneten Vakuumröhren mit entsprechend großem Zeitverlust (und Kosten) denkbar (Doppelbauer, 2018). Der Zeitaufwand für Fahrstraßeneinstellung und -auflösung, Ein-/Ausfahrten, Öffnen/Schließen der Luftschleusen, Vakuumherstellung, Rangieren und Abstellen von Hyperloop-Fahrzeugen an den Linienenden ist nicht zu unterschätzen. Direkte, schnelle

Typ	Geschwindigkeit		Fahrzeug Länge [m]	Anzahl Sitzplätze	Prakt. Frequenz	Min. Folgezeit [s]	Streckenkapazität [Pass./h Richtung]
	Max. [km/h]	Betrieb [km/h]					
Flugzeug	900 900	600 400	60–70 40	400 200	15/h 20/h	180 180	6,000 4,000
HGV Zug	380 250	250 150	410 200	1000 450	10/h 12/h	180 180	10,000 5,400
Transrapid	500	225–250	125	438	12/h	300	5,250
SC Maglev	600	245		1000	10/h	180	10,000
Swissmetro	500	323	78	200 (350)	10/h	360	2,000 (3500)
Hyperloop	1200	1000	25–30	28–40	12/h	300	336–480

Tabelle 1: Betriebsdaten und geschätzte praktische Leistungsfähigkeit von typischen Linienflugzeugen, Hochgeschwindigkeits- und Magnetschwebzügen im Vergleich zu Swissmetro und Hyperloop



3: Sperrzeitbänder zwischen Hyperloop-Fahrzeugen im Ein- bzw. Zweirichtungsbetrieb einer luftleeren Röhre mit doppelten Luftschleusen an beiden Endpunkten

Hyperloop-Verbindungen zwischen mehr als zwei Endhaltepunkten erfordern eigene zusätzliche Trassen und komplexe Knotenpunktbaugeräte einschließlich Stellwerken!

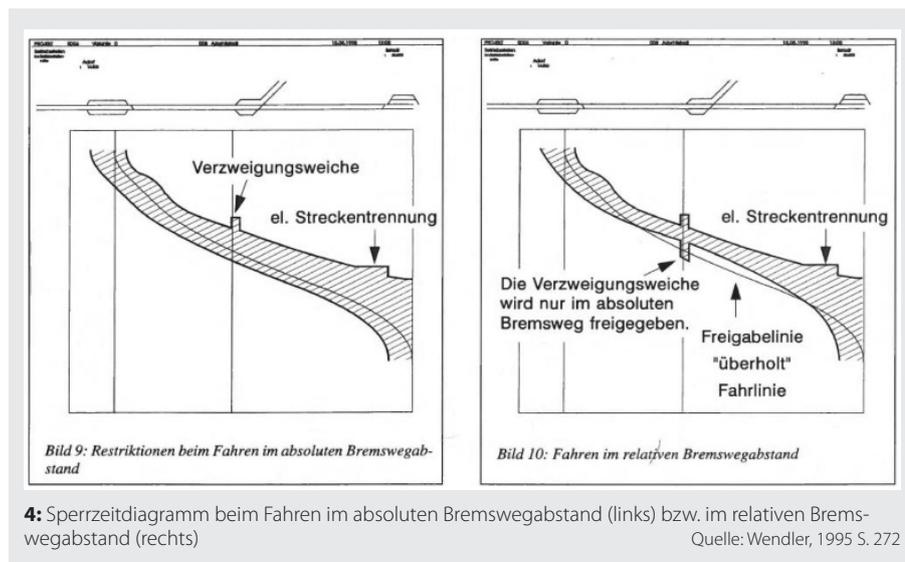
Die sichere kontinuierliche Betriebskontrolle der zulässigen Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit, Verzögerung und Gefahrpunktstände mehrerer Hyperloop-Fahrzeuge gleichzeitig in einer Vakuumröhre sowie der Überwachung der Energieversorgungsanlagen, der Temperatur und des Luftdruckes in der Röhre stellt selbst im Normalfall eine extreme technische Herausforderung dar. Die sichere Beherrschung von technischen Störungen, Unterbrechungen der Stromversorgung für das streckenseitige Antriebssystem, die Unterwerke oder Kompressoren an der Strecke sowie Funktionsunterbrechungen im automatischen Betriebsführungssystem der Hyperloop-Fahrzeuge insbesondere in Notfällen ist derzeit noch völlig ungeklärt.

Die durch die Hyperloop-Entwickler behauptete inhärent höhere Sicherheit

gegenüber Flugzeugen und Eisenbahnen ist unwahr, da die Risiken eines möglichen Ausfalls der sehr hohen kontinuierlichen Notbremsverzögerung der Fahrzeuge von mehr als 1,5 m/s² (entsprechend dem unterstellten Mindestbremsabstand von 37 km (Musk, 2013 p. 37)) nicht für einen unter allen Umständen sicheren Betriebsbremsabstand ausreichend ist.

Für spurgeführte Verkehrssysteme mit kontinuierlicher Positionsbestimmung, Geschwindigkeits- und Bremskurvenüberwachung sowie Integritätsprüfung gelten grundsätzliche Sicherheitsanforderungen, wie für das ERTMS/ETCS Level 3 festgestellt (EC, 2019). Auch bei modernsten Signalsystemen behalten die Restriktionen für das Fahren im absoluten Bremswegabstand Gültigkeit, damit das Fahrzeug vor Gefahrpunkten rechtzeitig zum Stillstand gebracht werden kann. Wie von Wendler bereits 1995 untersucht, würde das Fahren im relativen Sicherheitsabstand z.B. bei Streckenverzweigungen oder vor Halte-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für University of Technology, Delft / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019



4: Sperrzeitdiagramm beim Fahren im absoluten Bremswegabstand (links) bzw. im relativen Bremswegabstand (rechts)
 Quelle: Wendler, 1995 S. 272

stellen zu einer unzulässigen „Überholung“ der Fahrlinie führen (siehe Bild 4).

Sofern eine Betriebsbremsverzögerung von der Höchstgeschwindigkeit (1220 km/h) des Hyperloop bis zum Stillstand von $1,0 \text{ m/s}^2$ überhaupt realisiert werden kann, wäre ein absoluter Mindestbremswegabstand von 58 km notwendig (Van Goeverden et al., 2018). Dies ist allerdings in Anbetracht fehlender Linearmotoren zwischen den im Abstand von circa 100 km angeordneten „Booster“ äußerst fraglich. Weiterhin fehlt bei Hyperloop auf diesen Zwischenabschnitten ein sicheres Spurhaltungssystem, das bei plötzlicher Unterbrechung der Energieversorgung oder Luftdruckzunahme gefährliche Turbulenzen des Fahrzeuglaufes oder Berührungen zwischen Fahrzeughülle und Röhreninnenwand bei sehr hoher Geschwindigkeit ausschließt.

Die Integration des Linearmotorantriebes in die Konstruktion der luftleeren Röhren und das sehr vage beschriebene Geschwindigkeitsüberwachungssystem des Hyperloop in Verbindung mit der unterstellten äußerst hohen Beschleunigung von bis zu $9,8 \text{ m/s}^2$ kann entgegen der Behauptung des Entwicklers (Musk, 2013 p. 33 und 55) keine Sicherheit in jedem Röhrenabschnitt gewährleisten. Dafür wäre ein sicheres automatisches Betriebssteuerungssystem vergleichbar dem der Magnetschwebbahn des Transrapid in Shanghai oder in Japan bzw. den gleichen Anforderungen wie für vollautomatische Betriebssysteme der Eisenbahn (ATO) entsprechend der Sicherheitsstufe SIL4 (Charlwood et al., 2004) notwendig.

Die Stromversorgung für die Unterwerke der Linearmotoren, Aufladen der Batterien für die Beleuchtung, Lüftung der Kabinen, Kompressoren, Telekommunikation und Fahrzeugsteuergeräte an Bord und für die Betriebssteuerung, -überwachung und Notfallbeleuchtung in und außerhalb der Hyperloop-Röhren soll durch Solarzellen erzeugt werden, die auf den Röhren angeordnet sind. Die von den Entwicklern erwartete, durch Solarzellen (im sonnigen Kalifornien) erzeugte Energie (57 MW/Jahr) würde angeblich den prognostizierten mittleren Energiebedarf für die gesamte Hyperloopstrecke von Los Angeles nach San Francisco (21 MW/Jahr) bei weitem überschreiten. Strombedarfsspitzen würden durch Batterien bei den Unterwerken abgedeckt, welche die Linearmotorabschnitte mit Strom versorgen bzw. überschüssige Energie während der Nebenverkehrszeiten speichern (Musk, 2013 p. 34). Die Anbindung und Stromversorgung von Unterwerkstationen an regionale Stromversorgungsnetze sei nur für Betriebszeiten notwendig, in denen die Solarzellen auf den Röhren keine bzw. zu wenig Energie erzeugen, z.B. nachts oder bei schlechtem Wetter.

Die vom Hyperloop-Promotor präsentierten Leistungsdaten für die Solarenergieerzeugung und Antriebsenergiebedarfswerte sind nicht durch eine nachvollziehbare Berechnung des gesamten Systems für die Erzeugung und den Verbrauch von elektrischer Energie einschließlich Vakuumpumpen unterbaut. Der vom Projektentwickler vorgestellte Vergleich des Primärenergieverbrauchs

für eine Personenfahrt von Los Angeles nach San Francisco (Musk, 2013 Fig. 1) verschiedener Verkehrsarten (Pkw, Krad, Flug, Eisenbahn, Hyperloop) erscheint jedoch einerseits wegen der recht kleinen Unterschiede zwischen Pkw, Krad, Flugzeug und Eisenbahn und wegen des großen Unterschiedes zu Hyperloop (Faktor 10) andererseits unglauwbüdig.

2.4. Linienführung, Bau, Bahnhöfe und räumliche Integration

Die sehr hohe Geschwindigkeit des Hyperloop erfordert eine Trassierung mit extrem flachen Ausrundungsradien (30 km für 480 km/h bzw. annähernd 200 km für 1200 km/h), lange Rampen bei Änderung der Längsneigung und sehr lange horizontale Kurvenradien (ca. 7 km für 480 km/h bzw. 45 km für 1200 km/h bei einer idealen Überhöhung von circa 400 mm), um einen Fahrkomfort wie bei Eisenbahnen bieten zu können. Die in der Vorstudie genannten viel kleineren horizontalen Kurvenradien würden die Fahrgäste, das Fahrzeug und die Befestigung der Antriebsmagnete in Kurvenfahrten mit Höchstgeschwindigkeit einer sehr hohen Seitenbeschleunigung ($> 2 \text{ m/s}^2$) aussetzen.

Die automatische Steuerung und sichere Überwachung der gewichts- und geschwindigkeitsabhängigen Seitenüberhöhung sowie des Luftspaltes zwischen den Antriebs-, Trage- und Führungsmagneten einerseits sowie zwischen dem Hyperloop-Fahrzeug und der Innenrohrwand andererseits dürfte äußerst schwierig sein. Darüber hinaus sind der Bau, die Herstellung und Aufrechterhaltung des Vakuums von hunderten Kilometer langen, ca. 3 cm dicken Hyperloop-Stahlrohrleitungen enorme technische Herausforderungen.

Die Behauptung hinsichtlich des geplanten Einbaus speziell entworfener Verbindungen zur Kompensation temperaturbedingter Dehnungen an Stationen (Musk, 2013 p. 28) ist nicht weiter erklärt. Wie können vakuumresistente Dichtungen an Dehnungsfugen zwischen einzelnen Rohrabschnitten (z.B. an den Übergängen zwischen aufgeständerten, ebenerdigen und unterirdischen Sektionen, Schweißnähten oder an Leitungsöffnungen für Elektrokabel, Pumpen, Luftdruckschotten und Notfälltoren) überhaupt hergestellt werden, die den Materialspannungen infolge Temperaturänderungen standhalten? Die Anlage gespreizter vakuumbeständiger Verbindungen von zwei Hyperloop-Röhren

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für University of Technology, Delft / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

mit sehr kleinem Winkel, großen Bogenradien und sehr großer Weichenlänge für die fahrbahnseitige Steuerung des Antriebes, Schwebens und der Seitenführung der Fahrzeuge mit Hochgeschwindigkeit ist gegenwärtig technisch nicht machbar. Daher sind „fliegende“ Linienverzweigungen und Überholungen für Geschwindigkeiten von mehr als circa 500 km/h bei Hyperloop auszuschließen!

Der Entwurf und die räumliche Integration der Haltepunktabschnitte für den Warteraum, Ein- und Ausstieg der Fahrgäste und den Batteriewechsel der Fahrzeuge, der Fahrwege von/zu den Fahrzeugabstell- und Wartungsanlagen in die gebaute Umgebung ist viel komplizierter als in virtuellen Zeichnungen (Bild 5) dargestellt. Die Konstruktion und der dauerhafte Betrieb von vakuumbeständigen, doppelten Luftdruckschleusen für Hyperloop müsste erst einmal erprobt werden. Dabei könnte dann auch der Energieverbrauch und die Zeit zum Öffnen/Schließen der Schleusentore, Herstellung des Vakuums bzw. des Normalluftdruckes sowie der Luftdruckverlust in

5: Endhaltestellenschleife (Hyperloop Transportation Technologies, 2019)



Abhängigkeit von der Bedienungshäufigkeit und über die Zeit gemessen werden.

Die städtebauliche Integration von insbesondere aufgeständerten Hyperloop-Röhren ist in dichter besiedelten Gebieten in Europa ein größeres sozialpolitisches und Umweltproblem, da Viadukte in der Nähe von Siedlungen wegen der physischen und optischen Barrierewirkung allgemein nicht akzeptiert werden. Die

Planung, Genehmigung des Zugangs für bodenmechanische Untersuchungen, Bohrungen, Bau und Instandhaltung von aufgeständerten Trassen bzw. der Verkauf von privatem oder öffentlichem Grund für die Anlage neuer Verkehrsinfrastruktur erfordert langwierige Bürgerbeteiligung und politische Beschlussfassung auf gesetzlicher Grundlage. Dazu ist der Nachweis des Bedarfs, der Umweltverträglichkeit,



SMART METRO

25-27 November 2019, Madrid, Spain

www.smartmetro.eu

Co-located with



CBTC WORLD CONGRESS

THE FUTURE OF URBAN MOBILITY

Produced by



A division of:



Supported by:



In association with:



Opening new windows for sharing ideas

Carlos Esquiroz, CEO
Metros Ligeros de Madrid



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für University of Technology, Delft / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DWW Media Group, 2019

Platinum Sponsor



Gold Sponsors



Bronze Sponsor



Exhibitors



Wirtschaftlichkeit und öffentlichen Sicherheit unerlässlich. In Anbetracht der gegenwärtig nicht abschätzbaren Risiken für den sicheren Bau und Betrieb von öffentlichen Verkehrsanlagen in luftleeren Röhren mit Höchstgeschwindigkeiten bis 1220 km/h ist eine Baugenehmigung und Betriebskonzession für Hyperloop in der Umgebung besiedelter Gebiete in Mitteleuropa gegenwärtig nicht absehbar.

2.5. Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit einer Hyperloopstrecke hängt von den Kosten für

- Finanzierung, Grunderwerb, Wegerecht, Bau der Infrastruktur einschließlich Stromversorgungs-, Sicherheits- und Telekommunikationsanlagen sowie Entwicklung, Erprobung und Beschaffung der Fahrzeuge
- Planung und Betrieb (Personal, Energie, Verwaltung, Werkstätten, Ersatzteile, Leasing usw.)
- Verträge, Konzessionen, Versicherungen

und den Einnahmen aus dem Fahrkartenverkauf und sonstigen Einnahmen wie Werbung und Lizenzgebühren ab. Die Attraktivität (Reisezeitgewinn, Komfort, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Fahrpreis) und Fahrpreisgestaltung des Hyperloop-Verkehrssystems im Vergleich zu anderen Hochgeschwindigkeitsverkehrssystemen beeinflussen den zu erzielenden Verkehrsmittelanteil (Modal Split), das Fahrgastvolumen, dessen zeitliche Verteilung und Reiseentfernung.

Die Baukosten für die Hyperloop-Infrastruktur hängen in erster Linie von der Anzahl der Röhren und Haltepunkte, der Länge der Linien, unterirdischen und aufgeständerten Strecken, Stromversorgungs-, Betriebssteuerungs- und Sicherheitsanlagen ab. Als Referenzen könnten die Baukosten von circa €40 Millionen je Gleiskilometer für die Transrapid Schwebbahnstrecke in Shanghai dienen (Van Goeverden et al., 2018 p. 10), während für die geplante 93 km lange Hyperloop-Strecke von Abu Dhabi nach Dubai \$4,8 Milliarden bzw. \$52 Millionen je 1,6 km (Konrad & Ohnsman, 2016) geschätzt wurden. Die von dem Hyperloop-Entwickler genannten Kosten von \$5,4 Milliarden oder \$10 Millionen/km für die Strecke von Los Angeles nach San Francisco (Musk, 2013 Tab. 8) erscheinen sehr unrealistisch und müssten vermutlich um 500–1000% erhöht werden.

Der Beitrag des Hyperloop-Konzeptes zur Entwicklung eines nachhaltigeren Verkehrssystems mit Hochgeschwindigkeit über mittelgroße Entfernungen ist gegenwärtig noch sehr fraglich.

Die vom Promotor geschätzten Kosten von \$1,5 Millionen je Hyperloop-Fahrzeug (Musk, 2013 Tab. 2) dürften ebenfalls viel zu gering angesetzt worden sein. Nimmt man vergleichbare Fahrzeuganschaffungskosten wie für den Transrapidzug an, müsste mit mindestens €170000/Sitzplatz für die Hyperloop-Fahrzeuge gerechnet werden (Van Goeverden et al., 2018), wobei die höheren Kosten für die Herstellung von vakuumresistenten Kapseln für extreme Beschleunigungen bis zu 9,81 m/s² und Höchstgeschwindigkeit bis 1200 km/h noch gar nicht berücksichtigt worden sind. Mit den genannten 40 Fahrzeugen für die Verbindung von Los Angeles nach San Francisco könnten darüber hinaus höchstens 336 Fahrgäste/h und Richtung durch eine luftleere Hyperloop-Röhre mit doppelten Luftdruckschleusen befördert werden (siehe oben Abschnitt 2.2).

Die Annahme von Musk, dass der gesamte Energiebedarf des Hyperloop durch Sonnenzellkollektoren ohne Einsatz fossiler Energieträger gedeckt werden könne, beruht bis zur Vorlage einer schlüssigen transparenten Berechnung auf Spekulation. Eine seriöse Schätzung der Betriebs- und Instandhaltungskosten eines Hyperloop-Systems ist gegenwärtig unmöglich. Die vom Promotor erwartete Amortisierung der Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten für die Hyperloop-Verbindung von Los Angeles nach San Francisco auf der Basis eines Fahrpreises von nur \$20/Fahrt muss daher als unglaublich angesehen werden.

Die Einstellung des Linienflugverkehrs mit Concorde-Überschallflugzeugen zwischen Paris und New York 2003 (Deffrie, 2018) und die Aufhebung der Swissmetro AG 2009 unterstreichen das äußerst hohe Risiko für Kapitalinvestitionen in neue Verkehrssysteme für Höchstgeschwindigkeiten bis zur Schallgrenze wie Hyperloop (Doppelbauer, 2018).

3. Schlussfolgerungen

Das Verkehrskonzept des Hyperloop kann am besten mit bestehenden alternativen Verkehrsmitteln für lange Strecken und sehr hohe Geschwindigkeiten wie Linienflugzeugen, Magnetschwebe- und Eisenbahnen verglichen werden, wobei das Konzept und die Erfahrungen mit dem gescheiterten Überschallflugzeug Concorde bzw. dem Swissmetro-Projekt in den vergangenen Jahrzehnten beachtet werden sollten. Linienflugzeuge bieten beinahe die gleichen Höchst- und Beförderungsgeschwindigkeiten wie Hyperloop, verbrauchen jedoch sehr viel fossile Energie und beeinträchtigen die Umwelt und das Klima sehr stark. Bewährte Magnetschwebbahntechnologien des Transrapid und SCMaglev stehen für umweltschonenden Antrieb und sichere Betriebssteuerung für Hochgeschwindigkeiten über 500 km/h zur Verfügung und könnten im Fahrzeugbetrieb auch in nahezu luftleeren Röhren eingesetzt werden.

Der größte Unterschied zwischen Hyperloop und alternativen Verkehrsmitteln für Hochgeschwindigkeit sind das sehr geringe Fassungsvermögen und die vergleichsweise geringe Leistungsfähigkeit im Verkehr des Hyperloop. Die geringe Anzahl von Sitzen je Fahrzeug, Zweirichtungsbetrieb in Einzelröhren, strikte Sicherheitsanforderungen und Umweltschutzaufgaben werden voraussichtlich die größten Hindernisse zur Steigerung der Leistungsfähigkeit sein, während die zu erwartenden äußerst hohen Investitionskosten einer wirtschaftlichen Nutzung des Hyperloop-Verkehrssystems entgegen stehen. Die zukünftige Verkehrsnachfrage für Hyperloop wird hauptsächlich von dem erfahrenen Reisezeitgewinn, Fahrpreis, Reisekomfort, der technischen Zuverlässigkeit und Sicherheit im Vergleich zu alternativen Verkehrsmitteln abhängen.

Die extrem hohen Beschleunigungs- und Bremsverzögerungsraten können ein wesentliches Hindernis für die Beförderung von nicht trainierten Reisenden sein. Ein optimales Verhältnis zwischen gleichmäßiger Beschleunigung und Verzögerung der Fahrzeuge ohne unangenehmen Ruck, der Energiebedarf im partiellen Vakuum und die sichere Betriebssteuerung der Fahrzeuge auf der Strecke, vor, in und durch die Luftdruckschleusen und an den Endhaltestellen müssen genauer untersucht und in der Öffentlichkeit diskutiert werden.

Die Erprobung und der praktische Betrieb eines Hyperloop-Fahrzeuges mit sehr

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für University of Technology, Delft / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DVV Media Group, 2019

hoher Geschwindigkeit in einer nahezu luftleeren Röhre könnte technisch gelingen, falls die Dichte und Beständigkeit von bis zu 100 Kilometer langen verschweißten Stahlröhren mit einem Durchmesser von mindestens 3,5 m gegen Setzungen, Temperatur- und Druckänderungen demonstriert wird. Jedoch würden erfolgreiche Testläufe eines einzigen Fahrzeuges auf einer der derzeit geplanten Anlagen in Kalifornien, Frankreich, Abu Dhabi oder China noch nicht genügen, um die Machbarkeit, Leistungsfähigkeit, Sicherheit, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrssystems Hyperloop nachzuweisen. Dafür sind umfangreiche praktische Erprobungen mehrerer Fahrzeuge mit hoher Geschwindigkeit auf der Strecke und an den Endhaltepunkten einschließlich der Luftschleusendurchfahrt im Normalbetrieb und auch bei technischen Störungen notwendig.

Es scheint, dass die Promotoren und Entwickler des Hyperloop im Wesen durch

ihre „Liebe zur Technik“ (Latour, 1996) angespornt werden. Diese war 1987 eine der wichtigsten Ursachen für das endgültige Scheitern des automatischen Betriebssteuerungssystem von elektronisch gekoppelten ARAMIS-Kleinfahrzeugen auf einem Rundkurs in Paris bei relativ niedrigen Geschwindigkeiten von 60 km/h. Kenntnis gewinnen und Lehren ziehen aus landgestützten unkonventionellen Automatisierungsprojekten wie ARAMIS, Kabinentaxi, Magnetbahnen im Verkehr und dem Concorde-Überschallflugbetrieb hilft sicherlich, Illusionen hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen für Betrieb, Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung zwischen bahngelassenen Fahrzeugen zu vermeiden.

Schließlich ist die Trassierung einer aufgeständerten Hyperloop-Strecke mit extrem großen Bogenradien und der Erwerb privaten Grundeigentums in dicht besiedelten Gebieten Europas und in

der Nähe von größeren Städten praktisch kaum bzw. nicht realisierbar. D.h. eine aufgeständerte Hyperloop-Verbindung zwischen Großstädten und Flughäfen in Europa ist allein aus politischen und rechtlichen Gründen illusorisch, während der Bau einer viele Kilometer langen unterirdischen Strecke für Hyperloop vielleicht in der Wüste am Arabischen Golf denkbar, aber in West-, Mittel- und Südeuropa ausgeschlossen erscheint.

Der Beitrag des Hyperloop-Konzeptes zur Entwicklung eines nachhaltigeren Verkehrssystems mit Hochgeschwindigkeit über mittelgroße Entfernungen zwischen 500 und 1500 km mit dem Ziel der Einsparung fossiler Energiequellen, zum Schutz der natürlichen Umwelt und Siedlungen vor Lärm, Luftverunreinigung und Klimaveränderung ist gegenwärtig noch sehr fraglich und bedarf weiterer nachvollziehbarer, unabhängiger Forschung und Entwicklung. ●

Literatur

- [1] BMVI Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018), Verkehr in Zahlen 2017–2018 https://www.bundesregierung.de/Content/Infomaterial/BMVBVS/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018_360900.html
- [2] Braun, J., Sousa, J., Pekardan, C. (2017), Aerodynamic Design and Analysis of Hyperloop, *AIAA Journal* 55(12), 4053–4060
- [3] BTS Bureau of Transportation Statistics (2018), T-100 Market data <https://www.transtats.bts.gov/Data-Elements.aspx?Data=1>
- [4] Cassat, A. & Jufer, M. (2002), MAGLEV projects technology aspects and choices, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 12(1):915–925
- [5] Cassat, A. & Bourquin, V. (2011), MAGLEV – Worldwide Status and Technical Review, https://www.researchgate.net/publication/236993225_MAGLEV_-_Worldwide_Status_and_Technical_Review
- [6] Central Japan Railway Company (2014), Superconducting Maglev http://linear-chuo-shinkansen.jp-central.co.jp/?utm_source=central.co.jp&utm_medium=referral&utm_campaign=own
- [7] Charlwood, M., Turner, S., Worsell, S. (2004), A methodology for the assignment of safety integrity levels (SILs) to safety-related control functions implemented by safety-related electrical, electronic and programmable electronic control systems of machines, HSE books, Research Report 216 <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr216.pdf>
- [8] Chin, J.C., Gray, J.S., Jones, S.M., Berton, J.J. (2015), Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger Pod, 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Aerospace Research Central <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2015-1587>
- [9] Decker, K., Chin, J., Peng, A., Summers, C., Nguyen, G., Oberlander, A., Sakib, G., Sharifrazi, N., Heath, C., Gray, J., Falck, R. (2017) Conceptual Feasibility Study of the Hyperloop Vehicle for Next-Generation Transport, AIAA SciTechForum 9-13 January 2017, Grapevine, Texas, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting
- [10] Deffrie, S. (2018), Concorde makes its final flight, November 26, 2003 <https://www.edn.com/electronic-blogs/edn-moments/4402001/Concorde-makes-its-final-flight-November-26-2003>
- [11] Doppelbauer, J. (2018), Hyperloop – eine Innovation für den globalen Verkehr?, *ZEVrail* 142(6-7), 218–224
- [12] EC (2019) ERTMS Levels and Modes, https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/ertms/what-is-ertms/levels_and_modes_en
- [13] Eurostat (2018), Air Transport Measurement <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [14] Hyperloop Transportation Technologies (2019) <https://www.hyperloop.global/about>
- [15] Janzen, R. (2017), TransPod ultra-high-speed tube transportation: dynamics of vehicles and infrastructure, *Procedia Engineering* 199:8–17 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.142>
- [16] Konrad, A. & Ohnsman, A. (2016), Leaked Hyperloop One Docs Reveal The Startup Thirsty For Cash As Costs Will Stretch Into Billions, <https://www.forbes.com/sites/alexkonrad/2016/10/25/hyperloop-one-seeks-new-cash-amid-high-costs/#6f9bc43125cc>
- [17] Latour, B. (1996), *ARAMIS or The Love of Technology*, Cambridge & London: Harvard University Press
- [18] Musk, E. (2013), Hyperloop Preliminary Design Study Technical Section https://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha-20130812.pdf
- [19] Opgenoord, M.M.J., Caplan, P.C. (2018), Aerodynamic Design of the Hyperloop Concept, *AIAA Journal* 56(11), 4261–4270
- [20] Pot, P., Trotter, Y. (1999), Hauptstudie 1994–1998, Niveau A, *Swissmetro Schlussbericht*, Swissmetro AG, Genf, 31. Mai 1999
- [21] Swissmetro AG (2003), Technische und ökonomische Machbarkeitsstudie der Swissmetro-Strecke Basel–Zürich, Kurzfassung des Schlussberichts, 10. April 2003
- [22] Uno, M. (2016), Chuo Shinkansen Project using Superconducting Maglev System, *Japan Railway & Transport Review* No. 68 <http://www.ejrcf.or.jp/jrtr/jrtr68/pdf/14-25.pdf>
- [23] Van Goeverden, K., Milakis, D., Janic, M., Konings, R. (2018), Analysis and modelling of performances of the HL (Hyperloop) transport system, *European Transport Research Review* <https://etr.springeropen.com/articles/10.1186/s12544-018-0312-x>
- [24] Wang, H., Yang, Y., Coleman, D., Benedict, M. (2017), Aerodynamic simulation of high-speed capsule in the Hyperloop system, 35th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 5-7 June 2017, Denver
- [25] Weidmann, U., Buchmüller, S., Rieder, M., Erath, A., Nash, A., Carrel, A. (2006), Europäische Marktstudie für das System Swissmetro Phase I, ETH Zürich <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/23503>
- [26] Wendler, E. (1995), Weiterentwicklung der Sperrzeitentreppe für moderne Signalsysteme, *Signal + Draht* 87, 268–273
- [27] Wikipedia https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_pod_competition
- [28] Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Swissmetro>
- [29] wordpress (2013) <https://wellpreparedmind.wordpress.com/2013/07/23/all-the-hype-for-hyperloop-but-they-forgot-swissmetro/>

Summary

High-speed transport in vacuum pipes: Is Hyperloop possible?

The feasibility of the Hyperloop concept of the promotor E. Musk (SpaceX) regarding objective, transport, operation, safety, energy demand, alignment, environment and estimated costs is being investigated. The constraints for operations and traffic control, safety, alignment, spatial accommodation, construction of vacuum tubes including airlocks, and construction and operating costs of the Hyperloop system are described.