

Hyperloop – eine Innovation für den globalen Verkehr?

Hyperloop – an Innovation for Global Transportation?

Dr. Josef Doppelbauer, Valenciennes (Frankreich)

Zusammenfassung

Seit der Ankündigung durch Elon Musk im Jahr 2013 wird regelmäßig über das vorgeschlagene neuartige Bodentransportsystem „Hyperloop“ berichtet – es handelt sich dabei um ein System, basierend auf Transportbehältern (Pods), die mit einer Geschwindigkeit von mehr als 1.000 km/h von Punkt zu Punkt durch eine fast luftleere Röhre geschossen werden. In diesem Artikel werden grundsätzliche Fragen zum System und zum Nutzen von Hyperloop diskutiert, es werden aber auch fundamentale Aspekte zum Thema Innovation in Infrastruktur-Netzwerken angesprochen.

Abstract

Since its announcement by Elon Musk in 2013, regular reports appear on the proposed novel system for ground transportation “Hyperloop” – a system based on transport containers (pods) that are shot point-to-point at speeds above 1.000 kph through a quasi-evacuated tube. This article intends to discuss a number of basic questions on the Hyperloop system and its practical application, in addition, some fundamental aspects related to innovation in infrastructure networks shall be discussed as well.

1 Einführung

In einer Pressekonferenz im August 2013 wurde durch den in Südafrika geborenen, weltweit aktiven Unternehmer Elon Musk (Gründer von PayPal, SpaceX, Tesla usw.) unter der Bezeichnung Hyperloop ein neuartiges Verkehrsmittel vorgeschlagen und in einem Konzeptpapier [1] im Detail beschrieben. Bemerkenswert ist, dass Elon Musk für die vorgeschlagenen Konzepte keine Lizenzgebühren verlangt (open source) – seit 2013 wurden daher mehrere Privatunternehmen gegründet [2, 3], die sich der Entwicklung und Vermarktung von Hyperloop-Systemen widmen.

Die Grundidee von Hyperloop ist, dass, ähnlich einer Rohrpost, Kapseln bei hohen Geschwindigkeiten (> 1.000 km/h) durch eine fast luftleer gepumpte Röhre geschossen werden. Es handelt sich dabei offensichtlich um ein öffentliches Verkehrsmittel (Hyperloop braucht spezielle Fahrzeuge in speziell zu errichtender Infrastruktur), das sowohl für den Personen- als auch für den Güterverkehr geeignet sein soll.

Seit der Erstveröffentlichung rankt sich um Hyperloop eine Ansammlung von

Mythen, von Science Fiction bis hin zur Vorstellung einer allumfassenden Lösung für alle Verkehrsprobleme dieser Welt. Dieser Artikel verfolgt nun einerseits die Absicht, einen hauptsächlich aus Eisenbahnfachleuten bestehenden Leserkreis mit den wesentlichen Fakten zu Hyperloop vertraut zu machen, andererseits die Kernfragen herauszuarbeiten, die vor einer Realisierung von Hyperloop einer ernsthaften Klärung bedürfen. Es ist nicht das Ziel dieses Artikels, Hyperloop in Frage zu stellen, im Gegenteil, es wird an den Promotoren von Hyperloop liegen, mögliche Investoren, zuständige Regierungsstellen und Behörden und letztlich potenzielle Kunden davon zu überzeugen, dass Hyperloop eine sichere, effiziente und wirtschaftliche Art sein kann, Mobilitätsbedürfnisse zu erfüllen.

Es soll an dieser Stelle noch angemerkt werden, dass spurgeführte Verkehrssysteme wie Hyperloop per se nicht in den Aufgabenbereich der Eisenbahngesellschaft der Europäischen Union (ERA) fallen, jedoch soll die Agentur gemäß ihrer Statuten zur Eisenbahnforschung beitragen und Innovationen fördern. Innovation lebt auf jeden Fall vom Wettstreit der Ideen, daher erscheint dem Autor jeder Vorschlag

willkommen, wie öffentlicher Verkehr attraktiver und das Verkehrssystem als ganzes nachhaltiger gemacht werden kann.

Nachahmenswert ist jedenfalls jene Vorgangsweise im Kontext von Hyperloop, für die Lösung bestimmter Schlüsselfragen öffentliche Wettbewerbe auszusprechen – beispielsweise für das Finden der besten für Hyperloop geeigneten Strecken [4], oder die sogenannte „Pod Competition“, bei der unterschiedliche Fahrzeugkonzeptionen miteinander in Wettstreit traten [5].

2 Physikalisch-technische Grundlagen von Hyperloop

Die Grundidee hinter Hyperloop ist es, den Luftwiderstand eines Oberflächenfahrzeugs dadurch praktisch zu eliminieren, indem man dieses Fahrzeug unter reduziertem Druck (in einem Quasi-Vakuum bei 100 Pa Luftdruck¹⁾ beinahe reibungslos in einer Röhre bewegt (Bild 1). So können höhere

Geschwindigkeiten (Ziel: 1.200 km/h) und damit äußerst kurze Reisezeiten erzielt werden (Tabelle 1). Die dort angegebenen Werte enthalten nicht die für Be- und Entladung erforderlichen Zeiten, Elon Musk nimmt dafür jeweils 5 min an. Die Antwort auf die Frage, was ist Hyperloop, lässt sich so zusammenfassen: Hyperloop ist ein horizontaler Aufzug, mit raketentypischer Beschleunigung, aber ohne Zwischenhalte.

Um die wesentlichen Merkmale und die Schlüsselparmeter eines Hyperloop-Systems zu untersuchen, genügt es, ein vereinfachtes Modell auf der Basis Newton'scher Mechanik zu betrachten. Wie in Bild 2 dargestellt, wird das Fahrzeug zunächst auf die Betriebsgeschwindigkeit beschleunigt, gleitet dann auf Grund des niedrigen Luftdrucks praktisch reibungslos (Tabelle 2) und wird dann in der letzten Phase bis zum Stillstand abgebremst.

Für die Beschleunigungsphase kommen Werte der linearen Beschleunigung zwischen 0,5 g und 5 g²⁾ in Frage, für die Brems- bzw. Verzögerungsphase erscheinen Verzögerungswerte im Bereich von 0,1 g bis 0,2 g realistisch (einige Vergleichswerte sind in Tabelle 2 angeführt). Studien der NASA [6] geben an, dass ein gesunder Mensch eine horizontale Beschleunigung von 3 g für 25 s ertragen kann.

Die endgültige Auslegung von Hyperloop steht noch nicht fest, der realistisch zu erwartende Wertebereich kann aber recht gut eingegrenzt werden (Tabelle 3). Es ist beispielsweise zu sehen, dass bei einer Beschleunigung von 1 g das Fahrzeug in etwas mehr als einer halben Minute über eine Strecke von 5,7 km auf 1.200 km/h beschleunigt werden kann – dafür wird eine Leistung von knapp 40 MW benötigt (bei einem angenommenen Gewicht des Fahrzeugs für 40 Passagiere von 24 t). Zu beachten ist, dass beim Abbremsen von 1.200 km/h auf Null gewaltige Energiemengen dissipiert werden müssen (und von den Fahrgästen ferngehalten werden sollten). Die kinetische Energie beträgt bei 1.200 km/h und einem Gewicht von 24 t 370 kWh. Das Abbremsen dauert im übrigen wesentlich länger als das Beschleunigen³⁾ mit ein Grund, warum Zwischenhalte nicht attraktiv sind.

1) 1 Pa = 1 N/m² - der normale Atmosphärendruck ist 101 325 Pa = 1013,25 hPa

2) 1 g = 9,81 ms⁻² (Gravitationsbeschleunigung)



Bild 1: Prinzip von Hyperloop: ein Transportcontainer (Pod) bewegt sich im Fast-Vakuum in einer Röhre

Strecke	Entfernung in km	Netto-Reisezeit in min
Bratislava–Wien	55	5
Dubai–AbuDhabi	130	9
Helsinki–Stockholm	396	22
Los Angeles–San Francisco	560	30

Tabelle 1: Erwartete Netto-Reisezeiten in der Hyperloop-Röhre für typische angedachte Hyperloop-Verbindungen (Höchstgeschwindigkeit 1.200km/h)

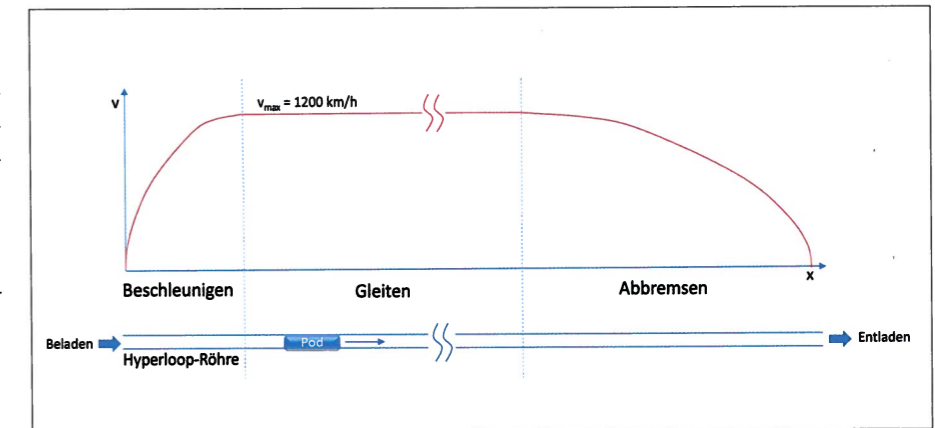


Bild 2: Vereinfachtes Modell für den Betrieb eines Hyperloop-Systems und Geschwindigkeits-Weg-Diagramm

Situation	Beschleunigung bzw. Verzögerung in g
Auto (in 5 s auf 100 km/h)	0,5
Saturn V Rakete	1,2
Spaceshuttle	3
ICE, Bremse	0,05 g (0,5 ms ⁻²)
Transrapid, Bremse	0,1
Formel 1, trockene Straße	0,8
Luftwiderstand bei 100 Pa (1.200 km/h, Fläche 10 m ² , Widerstandsbeiwert 0,25 m, 24 t)	10 ⁻⁴ *
Luftwiderstand bei Atmosphärendruck (Bedingungen wie oben)	0,8 ^{*)}

*) Um einheitliche Vergleichsgrößen zu haben, wurde die Luftwiderstandskraft gemäß $a = F/m$ in Verzögerung umgerechnet

Tabelle 2: Beschleunigungs- und Verzögerungswerte für typische Situationen

3 Hyperloop-Fahrzeuge und -Fahrweg

Die Größe bzw. Kapazität der Hyperloop-Fahrzeuge wird mit 25 bis 40 Passagieren pro Pod angegeben (um die Dimensionen der Röhre gering zu halten, wird der Platz im Fahrzeug beschränkt sein). Für den Antrieb werden verschiedene Verfahren, meist basierend auf linearer Induktion, vorgeschlagen. Ein wesentliches, für den sicheren Betrieb auf jeden Fall zu lösendes Problem ist das kontrollierte Abbremsen von hohen Geschwindigkeiten bis zum Stillstand – falls ein vorausfahrendes Fahrzeug außer Plan in der Röhre stehen bleibt. Es ist davon auszugehen, dass das Fahrzeug im Leichtbau ausgeführt wird; es muss einerseits luftdicht, andererseits Notversorgung mit Energie und Luft aufweisen, sowie für den Notfall leicht zugänglich sein. Der Fahrweg besteht aus mindestens einer luftdichten Röhre pro Fahrtrichtung (Durchmesser < 5 m), den Einrichtungen für Beschleunigen, Abbremsen (ohne Nebenwirkungen für die Fahrgäste)³⁾, sowie einem Leitsystem für das sichere

³⁾ Es ist bemerkenswert, dass das System Eisenbahn in den Anfängen der Dampflokotiven mit ähnlichen Problemen zu kämpfen hatte: es konnten recht bald Lokomotiven entwickelt werden, die höhere Geschwindigkeiten erreichten – bis zur Erfindung der Druckluftbremse war jedoch das Bremsen oft problematisch

Fernhalten der Fahrzeuge von den Wänden. Zudem muss diese Röhre auf niedrigen Luftdruck ausgepumpt und dieses Quasi-Vakuum ständig aufrecht erhalten werden.

Da die Fahrzeuge in einer festen Röhre eingeschlossen sind, ist jede Richtungsänderung schwierig und ein Ausweichen, beispielsweise von hängengebliebenen Fahrzeugen, nicht möglich. Da auch Zusammenstöße mit der Röhrenwand bei 1.200 km/h nicht tolerierbar sind, ist aus Gewichts-, Energie- und Steuerungsgründen die Fahrzeuggröße stark eingeschränkt. Gleichfalls ist es erforderlich, Kurven oder Gradienten weitgehend zu vermeiden. Um die beim ICE oder Transrapid zulässigen Querschleunigungen von < 0,1 g nicht zu überschreiten, wären für die Hyperloop-Höchstgeschwindigkeit Kurvenradien > 100 km vorzusehen. Weichen für einen Richtungswechsel bei Reisegeschwindigkeit sind aus diesem Grund schwierig zu realisieren.

Generell ergibt sich der minimale zeitliche Abstand aufeinander folgender Fahrzeuge aus dem Sicherheitssystem und dem Bremsvermögen. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein Hyperloop-Fahrzeug durch einen Unfall in der Röhre plötzlich zum Stillstand kommt, müssen nachfolgende Fahrzeuge sicher abgebremst werden können. Ein Not-

bremsystem für das Abbremsen aus 1.200 km/h mit einer Verzögerung von 0,3 g erscheint möglich (0,3 g ist die dreifache Bremsverzögerung des Transrapid [7]). Damit ergibt sich ein realistischer minimaler Abstand von 2 min zwischen zwei Hyperloop-Fahrzeugen. In *Tabelle 2* ist der Luftwiderstand bei Atmosphärendruck mit 0,8 g angegeben (ohne Berücksichtigung verstärkender fluid-dynamischer Effekte in der Röhre). Sollte die Röhre plötzlich belüftet werden, wird also mit 0,8 g innerhalb von 40 s bis zum Stillstand gebremst, dabei wäre 30 MW Leistung abzuführen – Schutz vor Vandalismus ist daher von vitaler Bedeutung.

Der zwangsläufig erforderliche Aufenthalt in einer abgeschlossenen, fensterlosen Kapsel in einer geschlossenen Röhre mag bei einigen Passagieren klaustrophobische Reaktionen hervorrufen, die Rettung eventuell eingeschlossener Passagiere im Notfall stellt jedenfalls ein ernsthaft zu lösendes Problem dar. Für die Rettung von eingeschlossenen Passagieren sind an der Röhre in regelmäßigen Abständen Sicherheitszugänge vorzusehen. Von Bedeutung ist auch, dass es der Betrieb unter extremem Niederdruck erforderlich macht, komplexe Eintritts- und Austrittssysteme zu konstruieren, inklusive Luftschleusen für den Übergang

von Atmosphärendruck auf Fast-Vakuum und umgekehrt, da die Passagiere nicht im luftleeren Raum einsteigen können. Die für das Auspumpen bzw. Belüften der Luftschleusen benötigte Zeit wirkt sich wieder auf die Zugfolgezeit aus.

Beschleunigung in g	Entfernung in km	Zeit in min	Leistung*) in MW	Verzögerung in g	Entfernung in km	Zeit in min
0,5	11,3	1,13	19,6	0,1	56,7	5,67
1	5,7	0,57	39,2	0,15	37,8	3,78
2	2,8	0,28	78,5			
3	1,9	0,19	118			
5	1,1	0,11	196			

*) Masse 24 t

Tabelle 3: Typische Parameter eines Hyperloop-Systems für die Beschleunigungsphase (links) und für die Bremsphase (rechts) bei einer Maximalgeschwindigkeit von 1.200 km/h

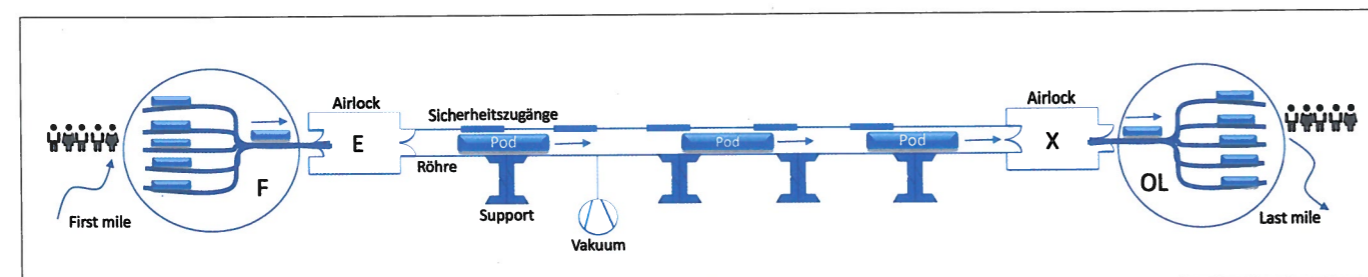


Bild 3: Schematische Darstellung eines Hyperloop-Systems F - Feeder-System, OL - Offloading-System, E, X - Luftschleusen für Eintritt und Austritt aus der Röhre (nicht dargestellt ist das Steuer- und Überwachungssystem)

Im Übrigen wird das Ein- und Aussteigen bei einem so engen Fahrzeug eine nicht zu vernachlässigende Zeit im Minutenbereich dauern. Um die durch die Zahl der Passagiere eines Fahrzeugs und die Zugfolge (Kadenz) bestimmte Kapazität des Verkehrssystems nicht weiter zu beschränken, werden Einrichtungen für das parallele Ein- und Aussteigen bzw. Be- und Entladen vorzusehen sein.

Aus dieser kurzen Betrachtung wird ersichtlich, dass, wie in *Bild 3* veranschaulicht, für den sicheren Betrieb eines Hyperloop-Systems eine Vielzahl an technischen Einrichtungen benötigt wird. Das Durchlaufen dieser Einrichtungen bedingt einerseits einen im Vergleich zur reinen Fahrzeit nicht unerheblichen Zeitverlust und andererseits muss auch auf den dafür benötigten Platz und die damit verbundenen Kosten für Errichtung und Betrieb hingewiesen werden.

In dieser Übersicht konnte nicht auf alle technischen Aspekte eingegangen werden. Bezüglich der Kostenfrage ist es möglich, eine grobe Abschätzung auf Basis des Transrapid-Systems vorzunehmen. Abgesehen vom für Hyperloop noch erforderlichen Entwicklungsaufwand, ist zu erwarten, dass Hyperloop erheblich teurer als ein Maglev-System sein wird, weil zusätzliche Systeme benötigt werden (luftdichte Röhre mit Rettungssystem, Luftschleusen, Vakuum-System usw.) und andere Systeme wesentlich höher spezifiziert sind (etwa das Antriebs- und das Bremssystem). Der Vergleich mit dem Transrapid zeigt auch, dass die Proponenten von Hyperloop nicht nur vor großen technischen, sondern vor allem auch vor enormen kommerziellen Herausforderungen stehen.

4 Hyperloop im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern

Um bewerten zu können, was eine potenzielle Innovation im Verkehrsbereich wie dieses neuartige Verkehrsmittel eigentlich bringt, muss eine Vision der eventuellen Anwendung entwickelt werden. Die Ausführungen der vorhergehenden Abschnit-

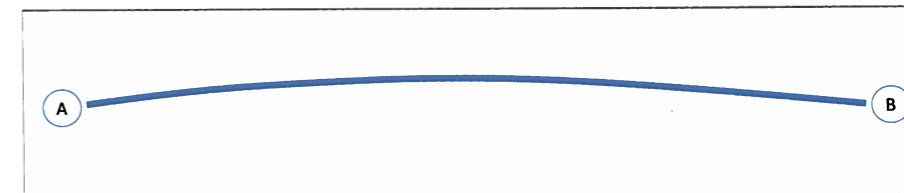


Bild 4: Schematische Darstellung einer Hyperloop-Verbindung von A nach B – die Röhre ist fix installiert, es gibt keine Zwischenhalte

	Zeit in min	Kapazität (Pass/Richtung und h)	Züge/Pods (beide Richtungen)
Hyperloop (1.200 km/h)	14,7	1.200 (40 Pass/Pod)	24
Konventioneller Zug (200 km/h)	20,9	40.000 (1.000 Pass/Zug)	26
People Mover / Stadtschnellverk. (90 km/h)	36,2	35.000 (900 Pass/Zug)	72
Maglev-System (500 km/h)	12,3	20.000 (500 Pass/Zug)	14

Tabelle 4: Reisezeit und Passagierkapazität für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung über 50 km (z.B. Flughafen – Flughafen) für verschiedene Verkehrsträger

te haben bereits die Möglichkeit geboten, die potenzielle Leistungsfähigkeit eines Hyperloop-Systems abzuschätzen und dessen Daten denen bereits bekannter Verkehrssysteme gegenüber zu stellen. Der große Vorteil von Hyperloop liegt in der kurzen Reisezeit – der „Preis“, der für die angepeilten kurzen Reisezeiten zu entrichten ist, besteht wie erwähnt darin, dass die Trajektorie (Bahnkurve) der Fahrzeuge eingehaust werden muss (Röhre), und dass sich daraus sehr komplexe technische Einrichtungen für den Betrieb und den Notfall ergeben.

Da die Lage, Länge und Geographie der Röhre nicht einfach kurzfristig dem Bedarf angepasst werden können, gibt es nur einen Hyperloop-Betrieb strikt von Punkt zu Punkt, wobei die Flexibilität der Streckenführung durch den Zwang zur Vermeidung größerer Gradienten und engerer Kurven stark eingeschränkt ist (*Bild 4*).

	Zeit in min	Kapazität (Pass/Richtung und h)	Züge/Pods (beide Richtungen)
Hyperloop (1.200 km/h)	37,2	1.200 (40 Pass/Pod)	46
HGV-Zug (300 km/h)	107	40.000 (1.000 Pass/Zug)	140
Maglev-System (500 km/h)	66,3	20.000 (500 Pass/Zug)	88

Tabelle 5: Intercity-Verbindung über 500 km für verschiedene Verkehrsträger

Der erste mögliche Anwendungsfall, der auch häufig in einschlägigen Publikationen angeführt wird, ist eine schnelle Verbindung über kürzere Strecken in der Größenordnung von 50 km, gedacht etwa für die Verbindung zwischen zwei Flughäfen. In *Tabelle 4* ist für diesen Anwendungsfall das Hyperloop-System einem konventionellen Zug, einem sogenannten „People Mover“ und einem Maglev-System nach Art des Transrapid, gegenübergestellt. Hier sind in die Reisezeiten jeweils die Zeiten des Ein- und Aussteigens mit eingerechnet, die angegebenen Werte sind also bei allen Verkehrsträgern von Bahnsteig zu Bahnsteig zu verstehen. Für Hyperloop wurden eine Beschleunigung von 1 g und eine Verzögerung von 0,15 g angenommen, die Zugfolge für Züge und Maglev-Fahrzeuge ist im besten Fall 90 s, für Hyperloop-Pods ist die Annahme 2 min.

Bemerkenswerterweise ergeben sich bei dieser Anwendung bei den Reisezeiten Bahnsteig zu Bahnsteig keine nennenswerten Vorteile für Hyperloop (Ein- und Aussteigen sowie die Luftschleusen benötigen entsprechende Zeit) – das Hauptproblem scheint aber in der eher geringen Beförderungskapazität von Hyperloop zu liegen. Selbst im Bestfall von voll ausgelasteten Pods, die im 2-min-Abstand in die Röhre geschossen werden, wird nur einen Bruchteil der Leistungsfähigkeit konventioneller Züge oder von Maglev erreicht. Anders ausgedrückt: ein konventioneller Zug befördert 1.000 Passagiere von A nach B in gut 20 min, mit Hyperloop braucht man dafür fast 1 h.

Die Daten für eine Strecke von 500 km (das entspricht in etwa Los Angeles-San Francisco, Paris-Amsterdam, oder Stockholm-Helsinki) sind in *Tabelle 5* zusammengestellt (hier wird angenommen, dass Hyperloop und Maglev genau wie die herkömmliche Eisenbahn ihre Stationen nahe der Stadtmitte errichten können, d.h. dass bezüglich dieses Aspekts keine Differenzierung erfolgt). Die Annahmen bezüglich Zugfolge und Beschleunigungswerte sind die gleichen wie oben.

Aus *Tabelle 5* ergibt sich hier eine doch signifikante Zeitersparnis durch Hyperloop, allerdings wieder mit signifikant niedrigerer Beförderungskapazität (fairerweise muss erwähnt werden, dass derzeit mit Hochgeschwindigkeitszügen im praktischen Betrieb nur in 3-min-Abständen gefahren wird, was z.B. für Paris-Lyon maximal 20.000 Passagiere pro Stunde und Richtung bedeutet). Die physikalischen Gegebenheiten bezüglich maximaler Passagierzahl pro Pod und minimalem Zeitabstand zwischen zwei Pods lassen erkennen, dass mit Hyperloop niemals eine hohe Beförderungsleistung erreichbar ist.

In der Realität müssen mindestens immer zwei unterschiedliche Einsatzfälle unterschieden werden: Anwendungen, wo vorher kein schnelles Massenverkehrsmittel vorhanden war (Green Field) und Anwendungen, bei denen Hyperloop ein vorhandenes Verkehrsmittel ersetzen oder ergänzen soll (Brown Field). In jeden Fall erweist sich als nachteilig, dass einerseits Zwischenhalte, andererseits Verzweigungen mit Hyperloop technisch kaum zu realisieren sind. Eine Einführung in Phasen, also Schritt für Schritt ist ebenfalls wenig zielführend; sie leidet au-

ßerdem erheblich daran, dass Hyperloop auf kürzeren Etappen kaum Vorteile bringen würde, wie die Zahlen in *Tabelle 3* zeigen. Würde hingegen Hyperloop in einer Brown-Field-Situation eine Teilstrecke in einem Hochgeschwindigkeits-Zugsnetz ersetzen, d.h. Passagiere müssten vom Zug auf Hyperloop-Fahrzeuge (und zurück) umsteigen, so würde das bedeuten, dass für die Weiterbeförderung der vom Zug kommenden 1.000 Passagiere 25 Pods und eine Wartezeit von bis zu 50 min erforderlich wären. Im Übrigen kann aus Platzgründen in ein Hyperloop-Fahrzeug nur Handgepäck mitgenommen und die Sitzplätze müssten aus Effizienzgründen fix zugeordnet werden – es wäre also ein Einchecken wie beim Flugzeug, mit dem damit verbundenen zusätzlichen Zeitverlust, erforderlich.

Da die Entwicklung eines über weite Strecken neuartigen Verkehrssystems naturgemäß erhebliche, insbesondere finanzielle Mittel, erfordert, wird für Hyperloop, u.a. in [2, 3], mit beeindruckenden Aussagen geworben:

- „Ein fünfter Verkehrsträger“ (nach Schifffahrt, Luftfahrt, Straße und Schiene),
- „Selbstversorgend mit Energie“ (Elon Musk schlägt vor, die Außenwände der Hyperloop-Röhren mit Solar-Panelen zu verkleiden und ggf. durch Windanlagen zu erweitern),
- „Schnell und billig - für Personen und Güter“ (Elon Musk),
- “Be anywhere, move everything, connect everyone”,
- „Breitband für den Verkehr“,
- „Mit der Geschwindigkeit eines Flugzeugs zum Preis einer Busfahrkarte“,
- „Bei Bedarf, energieeffizient, sicher“,
- „Vermeiden von Bahnübergängen und von Zusammenstößen mit Wildtieren“,
- „Vermeiden menschlicher Fehler und von Witterungsunbilden“,
- „Sanft wie eine Fahrt mit dem Aufzug – keine Turbulenzen“,
- „Hyperloop ist ein U-Bahn-System“,
- „Hyperloop wird unsere Art zu leben und zu arbeiten verändern“,
- „Wir haben ein sichereres System als die Eisenbahn“.

5 Entwicklungs- und Innovationsbedarf für Hyperloop

Bei komplexen Verkehrssystemen, die wie Hyperloop aus vielen Einzelkomponenten bestehen, stellt sich die Frage, wie in den technischen Teilbereichen, die einen hohen Neuigkeitsgrad aufweisen, die Lernkurve bewältigt wird. Zum Vergleich sei hier angeführt, dass beispielsweise für das autonome Fahren auf der Straße im wesentlichen Zusatzkomponenten zu einem ansonsten etablierten System erforderlich sind – Antrieb, Bremsen, Karosserie, Klimaanlage, usw. bleiben bei automatischem Betrieb gleich wie bei einem herkömmlichen Auto. Hyperloop hingegen bedarf neuer Entwicklungen oder Weiterentwicklungen bei fast allen Teilsystemen (*Tabelle 6*).

Erfahrungsgemäß braucht die Entwicklung komplexer Transportsysteme bis zur Reife für den kommerziellen Betrieb beträchtliche Zeit. Der französische Hochgeschwindigkeitszug TGV wurde schon in den 1960er-Jahren vorgeschlagen, der kommerzielle Betrieb auf der Strecke Paris-Lyon wurde schließlich 1981 aufgenommen. In diesem Zusammenhang ist auch eine interessante Parallelentwicklung zu erwähnen, der Aérotrain [8], ein Luftkissenfahrzeug mit Düsenantrieb, das in ernsthaftem Wettstreit mit dem TGV-Konzept stand. Wie der TGV wurde Aérotrain in den 1960ern erdacht, bis 1969 wurde sogar eine 18 km lange Teststrecke in der Nähe von Orléans errichtet, die Fahrzeuge (Leergewicht 11,25 t) konnten 80 Passagiere aufnehmen und erreichten eine Geschwindigkeit von 430 km/h. Dass sich der TGV gegenüber dem Aérotrain überzeugend durchsetzen konnte, lag vor allem auch daran, dass der TGV von Anfang an auch auf konventionellen Bahnstrecken verkehren, d.h. in ein funktionierendes Netzwerk gut integriert werden konnte und das TGV-Netz über die Jahre Schritt für Schritt ausgebaut werden konnte. Maglev-Systeme wie der Transrapid haben ebenfalls eine Jahrzehnte dauernde Entwicklung erfordert (die 2012 stillgelegte Testeinrichtung im Emsland wurde beispielsweise 1969 geplant), konnten sich aber bis jetzt nicht gegen das System Hochgeschwindigkeitszug durchsetzen.

6 Die Herausforderungen für Hyperloop

Beginnend mit allgemeinen Aspekten muss zunächst festgestellt werden, dass eine der größten Herausforderungen für Hyperloop die erforderliche Zeit für die Erlangung der Produktreife ist. In Analogie zum Hochgeschwindigkeitszug oder zum Maglev-System, ist mit einer Entwicklungszeit von mindestens 20 Jahren zu rechnen, d.h. die erste Hyperloop-Strecke im kommerziellen Betrieb wäre frühestens für 2033 zu erwarten. Dann wird allerdings der Verkehrsmarkt durch elektrisch angetriebene, autonom gesteuerte Automobile gänzlich anders aussehen als derzeit.

Erschwerend kommt für Hyperloop hinzu, dass gängige Methoden der Risikoreduzierung, etwa der stufenweise Ausbau, wegen der charakteristischen Eigenschaften von Hyperloop technisch nicht in Frage kommen. Das Risikoprofil und die lange Finanzierungsdauer könnten abschreckend auf potenzielle Investoren wirken. Zahlreich sind die noch zu bewältigenden technischen Herausforderungen – die bisherigen Demonstrationen bzw. Tests sind nicht annähernd an die erforderlichen Kennwerte herangekommen. So ist z.B. die maximale Geschwindigkeit, die im Rahmen der Hyperloop-Pod-Competition 2017 auf einer 1,6 km langen Teststrecke erreicht wurde, 323 km/h [5]. Dazu kommt, dass die Beschleunigung der Hyperloop-Fahrzeuge auf 1.200 km/h Antriebe mit Leistungen erfordert, die noch nicht Stand der Technik sind. Schwerwiegender erscheint das sichere Abbremsen

der Fahrzeuge und die entsprechende sichere Abführung der Bremsenergie. Diverse Versorgungssysteme im Fahrzeug für den Notfall brauchen Energie und damit Gewicht und reduzieren mithin die Nutzkapazität. Für einen zuverlässigen Betrieb ist es erforderlich, das Beinahe-Vakuum über lange Distanzen in der Röhre aufrecht zu erhalten, deshalb ist Schutz vor Vandalismus notwendig.

Wegen der aufwändigen Einstieg- und Ausstiegssysteme brauchen die Hyperloop-Stationen viel Platz. Die signifikante streckenseitige Infrastruktur (mit eingeschränkten Möglichkeiten für Verzweigungen und Zwischenstationen) macht es schwierig, auf Schwankungen der Nachfrage für bestimmte Reisedestrecken zu reagieren (Bus- und Flugverkehr sind hier wesentlich flexibler); eine Störung auf der Strecke führt bei Hyperloop zum Totalausfall der Verbindung.

Um die Kosten der Einrichtungen im Rahmen zu halten, wäre eine projektübergreifende Standardisierung erforderlich, Verkehrsunternehmen schätzen es außerdem nicht, an einen einzigen Lieferanten gebunden zu sein – Interoperabilität wäre hier von Vorteil.

Wie alle Verkehrssysteme wird auch Hyperloop eine behördliche Zulassung für den Passagierbetrieb brauchen – entsprechende Zulassungsverfahren müssen also entwickelt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Hyperloop hat einerseits noch eine Reihe technischer und prozessuraler Heraus-

forderungen vor sich, andererseits zeigt sich eine Reihe systemimmanenter Nachteile. Grundsätzlich wäre zu sagen, dass jede erfolgreiche Innovation eine positive Rückkopplungsschleife benötigt (Erfolg erzeugt Erfolg). Von solch einer positiven Rückkopplung (Feedback) ist Hyperloop derzeit noch weit entfernt: das Systemdesign ist noch nicht stabil, Schlüsselkonzepte wie das sichere Bremsen zum Stillstand sind noch nicht getestet, Kostengaben beruhen noch nicht auf belastbaren Grundlagen.

Einerseits brauchen aussagekräftige Tests relativ lange Teststrecken (bis zu 50 km Länge, um die volle Zielgeschwindigkeit zu erreichen), andererseits ist Hyperloop eher schlecht skalierbar. Trotz der beträchtlichen technischen Herausforderungen dürfte das Hauptproblem auf der wirtschaftlichen Seite liegen. Wie oben gezeigt wurde, bringt das System auf kurzen Strecken (50 bis 100 km) keine Vorteile in Bezug auf die Reisezeit, bei wesentlich geringerer Beförderungskapazität als bereits existierende herkömmliche Systeme. Zwischenstationen und Verzweigungen sind schwierig zu realisieren – die mangelnde Netzwerkfähigkeit wirkt sich negativ aus, zumal dort, wo es schon ein ausgebautes Eisenbahnnetz für mittlere Strecken bis etwa 500 km gibt. Auf langen Strecken (1.000 km und mehr) dürften die hohen Fixkosten, gepaart mit der nicht gegebenen Flexibilität, blockierend wirken. Solange das Konzept nicht betriebserprobt ist, wird niemand in eine mehrere hundert Kilometer lange Strecke investieren und solange kein ausreichender Markt dahinter-

	Fahrzeuge			Infrastruktur				Betriebsleitung	
	Fahrz.-kasten + Inneneinrichtung	Luftversorgung Lebens-Unterst.	Antrieb, Bremse	Röhre + Vakuum	Führungs- + Aufhängungs-System	Sicherheit/Leben Unterstütz. Evakuieren	Eingang Ausgang		Zubringer/ Ausladen
Hyperloop	kann auf Luftfahrt basieren	Basiert auf Luftfahrt	kann auf Maglev basieren LIMs	Von Rohrleitungen + Türen	kann auf Maglev basieren	von U-Booten	luftdicht	für Erhöhung der Kapazität	zu entwickeln
HSV-Zug	vorhanden	n/a*)	vorhanden	(Schiene)	(Schiene)	n/a	n/a	n/a	vorhanden
Maglev-System	vorhanden	n/a	vorhanden	Führungsbahn	vorhanden	n/a	n/a	n/a	vorhanden
Aérotrain	vorhanden	n/a	von Luftfahrt	Führungsbahn	Führungsbahn	n/a	n/a	n/a	

*) n/a - nicht anwendbar

I **Tabelle 6:** Technische Teilgebiete von Hyperloop mit Innovationsbedarf

steckt, wird auch niemand in die „Massenproduktion“ von Hyperloop-Komponenten investieren.

Hier ist ein Vergleich mit dem Überschallflugzeug „Concorde“ aufschlussreich. Ähnlich wie für Hyperloop erwartet, wurde mit diesem futuristischen Fluggerät auf eine drastische Verkürzung der Reisezeiten gezielt. Für London-New York war die Flugzeit mit der Concorde 3 h 20 min, im Vergleich zu 8 h mit herkömmlichen Flugzeugen. Allein nach 15 Jahre dauernder Entwicklung und 27 Jahren kommerziellem Einsatz wurde 2003 der Flugbetrieb mit der Concorde eingestellt – der Grund: die hohen Betriebs- und Wartungskosten und die aus Umweltschutzgründen verfügte Beschränkung auf ganz wenige Flugrouten. Die wesentlichen Beiträge, die die Concorde für die Weiterentwicklung der Flugzeugtechnik geleistet hat, können allerdings nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Es ist in Summe vermutlich nicht vermessen zu konstatieren, dass Hyperloop den traditionellen Eisenbahnsystemen nicht den Todesstoß versetzen wird. Als Verkehrssystem werden mit Hyperloop – wenn überhaupt – wohl eher wenige Anwendungen außerhalb bestimmter Nischen zu erwarten sein. Der von Hyperloop verfolgte, offene Innovationsansatz hingegen kann für andere

Systeme inspirierend wirken, die vielfältigen Marketing-Aktivitäten zu Hyperloop tragen gewiss auch zu einem größeren Interesse an Fragestellungen der Verkehrstechnik und der Verkehrspolitik bei. Elon Musk hat es bei all seinen Unternehmungen erreicht, eine Kultur zu schaffen, die Wert auf Experimentieren, rasches Lernen und inkrementelle Verbesserungen legt – es ist auch bei Hyperloop bemerkenswert, wie sich ein weltweites Netz an Experten und Enthusiasten für eine schwierige Herausforderung engagiert.

#440_A3

(Indexstichworte: Verkehrswesen, Hochgeschwindigkeitsverkehr, Forschung)

(Bildnachweis: 1 bis 4, Verfasser)

Literatur

- [1] Musk, E.: Hyperloop Alpha Document, veröffentlicht von SpaceX, August 2013.
- [2] Hyperloop One. <https://hyperloop-one.com/>, abgerufen 25.02.2018.
- [3] Hyperloop Transportation Technologies, HTT. <https://www.hyperloop.global/>, abgerufen 25.02.2018.
- [4] Hyperloop Global Challenge. <https://hyperloop-one.com/global-challenge>, abgerufen 25.02.2018.
- [5] Hyperloop pod competition. https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperloop_pod_competition, abgerufen 25.02.2018.
- [6] NASA Studie. https://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584739main_Wings-

ch5d-pgs370-407.pdf, abgerufen 25.02.2018.

- [7] Schach, R.; Jehle, P.; Naumann, R.: Transrapid und Rad-Schiene- Hochgeschwindigkeitsbahn: Ein gesamtheitlicher Systemvergleich (VDI Buch), Springer 2008.

- [8] Aérotrain. <https://en.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rotrain>, abgerufen 25.02.2018.



Dipl.-Ing. Dr. techn. Josef Doppelbauer (58). Studium der Technischen Physik an der Johannes Kepler Universität Linz (Österreich), Abschluss 1983, Promotion 1987. Ab 1987 beim Alcatel-ELIN Forschungszentrum in Wien, nach

mehreren technischen und Managementfunktionen bei Alcatel in Wien 2001 bis 2002 Chief Technical Officer von Alcatel Transport Automation Solutions in Paris (Frankreich) Ab Dezember 2002 bei Bombardier, zunächst in Stockholm (Schweden) und Reading (England) als Vice President und President der Division Rail Control Solutions. 2008 Wechsel in das Hauptquartier von Bombardier Transportation in Berlin, Chief Technical Officer und Vice President Project Management. Seit 1. Januar 2015 Executive Director der Europäischen Eisenbahngesellschaft in Valenciennes (Frankreich).

Anschrift: European Union Agency for Railways
120 rue Marc Lefrancq, BP 20392, FR-59307 Valenciennes Cedex, Frankreich.

E-Mail: josef.doppelbauer@era.europa.eu

ZEVrail Digital

sofort
überall
Beiträge
lesen

schon ab
40,00 EUR
pro Jahr für
Abonnenten*

Online
Archiv
Suche

www.zevrail.de