

# Hyperloop

## Science or Fiction?

*Eine wissenschaftliche Annäherung*

06. Oktober 2021

Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes



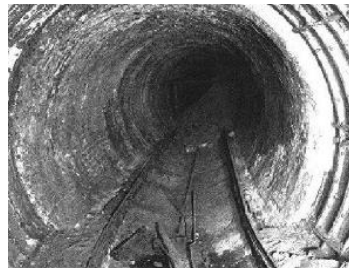
Wissen für Morgen



# Historie

## Beach Pneumatic Transit

(New York, USA. Betrieb: 1870-1873)

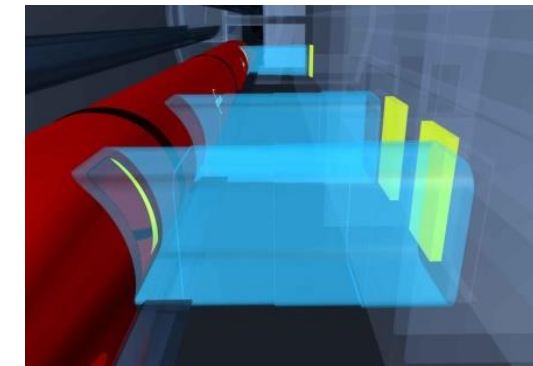
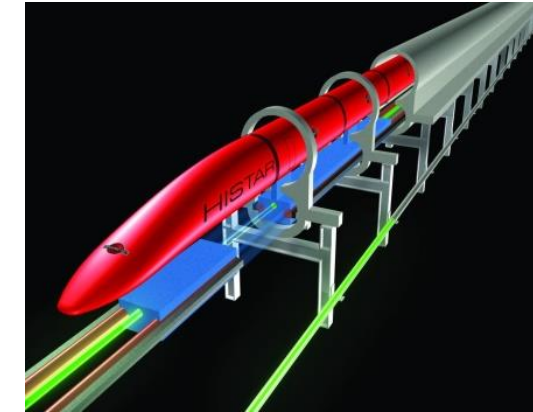
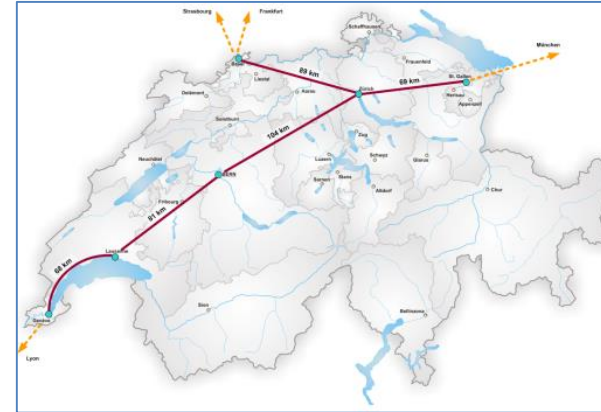


- Streckenlänge: 95m
- Durchmesser: 2,4 m
- Antrieb: pneumatisch
- Geschwindigkeit: 10km/h
- Fahrzeugkapazität: 22 Personen
- Transportkapazität: 360 Pas./h

Quelle: Prof. J. Brennan „Beach Pneumatic“. Columbia University. 2005.

## Swissmetro

(Schweiz, Planung: 1974-2003)



- Streckenlänge: 411km
- Durchmesser: 6,5 m
- Antrieb: elektromagnetisch
- Geschwindigkeit: 520km/h
- Fahrzeugkapazität: 208 Personen
- Transportkapazität: 2000 Pas./h

Quelle: Swissmetro Hauptstudie 94-98. Swissmetro AG. 5/1999.

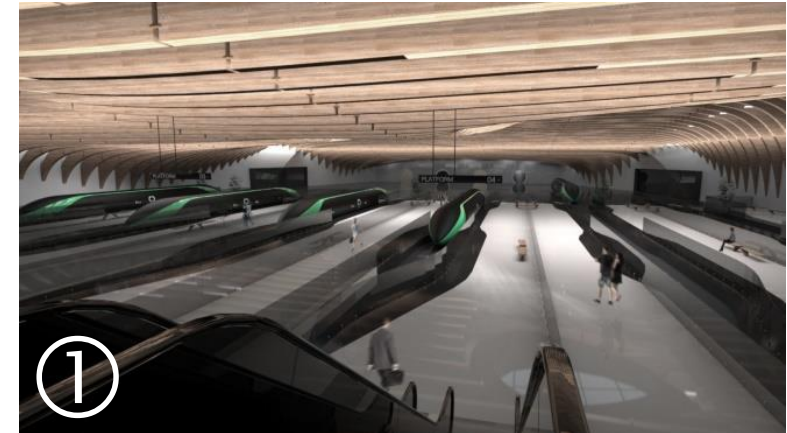
# Hyperloop Transport System

## ➤ Dreiteilige Streckenkonstruktion

1. Bahnhof mit mehreren Gleisen (Normalatmosphäre)
2. Ein- und Ausfahrtsschleusen
3. Teilvakuumisierte Röhre

## ➤ Druckfestes, fensterloses Fahrzeug (4. & 5.)

- Business-Jet ähnliche Bestuhlung
- Keine sanitären Anlagen
- Nur Handgepäck
- Für Cargofahrzeuge: Luftfahrtcontainer



# Hyperloop Transport System

## Fahrzeugkonzepte (I)

- Hyperloop TT (28 Passagiere, Gesamtlänge = 32 m, Kabinenlänge: 21m, Durchmesser: 1,23m)



- Virgin Hyperloop One (28 Passagiere, Gesamtlänge = 8,7 m, Kabinenlänge: 7,2m, Durchmesser: 2,4m)

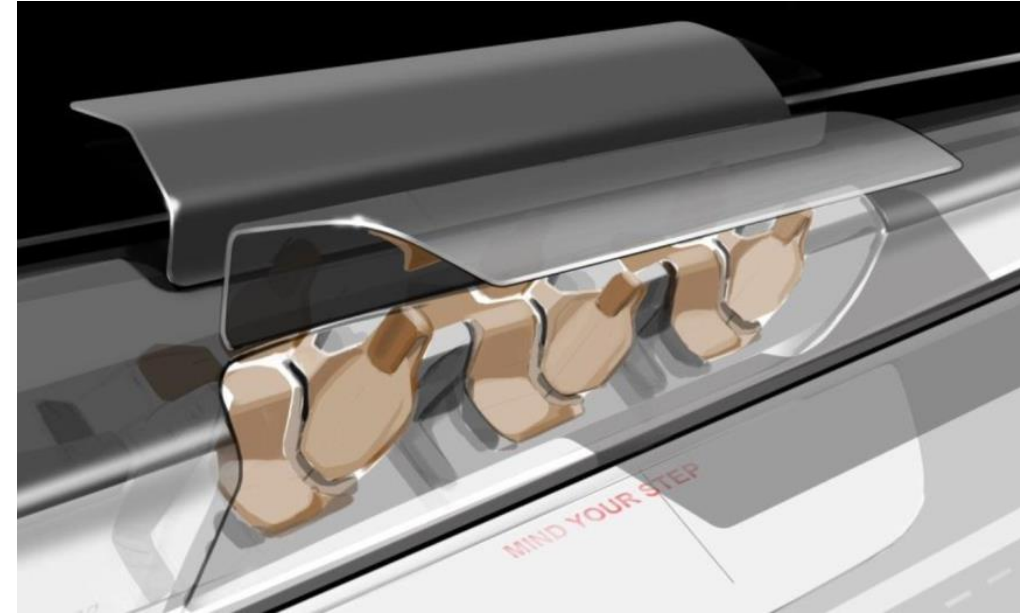


- Hardt Hyperloop (40 Passagiere, Gesamtlänge = 47,6 m, Kabinenlänge: 39m, Durchmesser: 1,7m)



# Sicherheit und Komfort

- Fluchtsystem mit druckdichten Türen in der Röhre erforderlich
- Hochpräzise Ausrichtung der Röhre
- Fluchtwege und -türen nach vorne und nach hinten in dem Fahrzeug erforderlich
- Ein- und Ausstieg in den engen Fahrzeugen nicht für Menschen mit reduzierter Mobilität
- Keine Toiletten, d.h. begrenzte Reisezeit
- Reisekrankheit aufgrund fehlender Fenster möglich
- Sauerstoffsysteme
- On-board Energieversorgung Li-Ion Batterie
  - Linearmotor (Geschwindigkeitshaltesystem)
  - Kühlung der Permanentmagnete
  - Magnetschienenbremse (Notfallbremse)
  - Klimatisierung
  - E/E-Versorgung



# Analysen\*

## Vier Fahrzeugtypen im Vergleich



**Hyperloop**



**Transrapid 08**



**ICE3**



**B787-8**

Alle Untersuchungen beziehen sich auf eine  
Referenz-Streckenlänge von ca. 500km  
pro Sitzplatz



# Energie-Analyse (I)

## Beschleunigung des Fahrzeugs

$$E_{\text{kin.}} = \frac{1}{2} * m * v^2$$



	Hyperloop	Transrapid 08	ICE3	B787-8
Masse [kg]	24.200	188.500	1.040.000	227.930
Geschwindigkeit [m/s]	333	117	93	242
Anzahl Sitze	40	310	900	360
Masse pro Sitz [kg]	605	608	1.156	633
$E_{\text{kin}}$ absolut [kWh]	4.840	4.618	16.017	23.961
$E_{\text{kin}}$ pro Sitz [kWh]	121,0	14,9	17,8	66,6
Wirkungsgrad beim Rekuperieren	93%	85%	77%	0%
$E_{\text{kin}}$ (Rest) absolut [kWh]	339	693	3.684	23.961
$E_{\text{kin}}$ (Rest) pro Sitz [kWh]	8,5	2,2	4,1	66,6

Ein Teil der nicht rekuperierten Energie wird als Wärme im Fahrzeug gespeichert. Energieabfuhr ist nicht geklärt.

# Energie-Analyse (II)

## Aerodynamik des Fahrzeugs

$$E_{\text{Aerodyn.}} = \frac{1}{2} * c_w * A * \rho * v_{\text{Relativ}}^2 * s$$



	Hyperloop	Transrapid 08	ICE3	B787-8
Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	7,1	15,5	10,6	47,2
Geschwindigkeit [m/s]	333	117	93	242
Luftdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	0,0012	1,2100	1,2100	0,0024
C <sub>w</sub>	0,15	0,26	0,20	0,08
E <sub>aero</sub> (500km) [kWh]	125	59.889	19.828	440
Anzahl Sitze	40	310	900	360
E <sub>aero</sub> (500km) pro Sitz [kWh]	3,1	193,2	22,0	1,2

Bei konstanter Geschwindigkeit und Luftdruck

Das Teilvakuum ist der nennenswerte Vorteil des Hyperloop in Bezug auf den Energieverbrauch.



# Weitere wesentliche Energie-Analysen

## Temperierung der Stahlröhre

- Kühlung der Röhre um thermische Längenänderung zu vermeiden\*

Temperierenergie für die Röhre ist erforderlich, bisher aber nicht berücksichtigt (zusätzlicher Kostenfaktor).



Bild: Bilfinger SE

## Vakuum

- Einmaliges Teilvakuumieren und Dauerbetrieb separat zu betrachten

Um die Röhre in 30 Tagen auf 100Pa zu bringen, muss alle 12 Meter eine Pumpe installiert werden.  
Wartungsaufwand ist zu überprüfen



Bild: Oerlikon Leybold Vacuum

\* Röhre ist nicht direkter Sonnenstrahlung ausgesetzt

# Energieverbrauch

## Zusammenfassung



Energie(500km)/Sitz [kWh]	Hyperloop	Transrapid 08	ICE3	B787-8
Geschwindigkeit [m/s]	333	117	93	242
Massebeschleunigung	8,47	2,23	4,09	66,56
Aerodynamik	3,13*	193,19	22,03	1,22
Vakuum	2,44	0	0	0
Kühlung/Klima	0,62	0,40	0,55	0,40
<b>Summe</b>	<b>14,66</b>	<b>195,82</b>	<b>26,67</b>	<b>68,18</b>

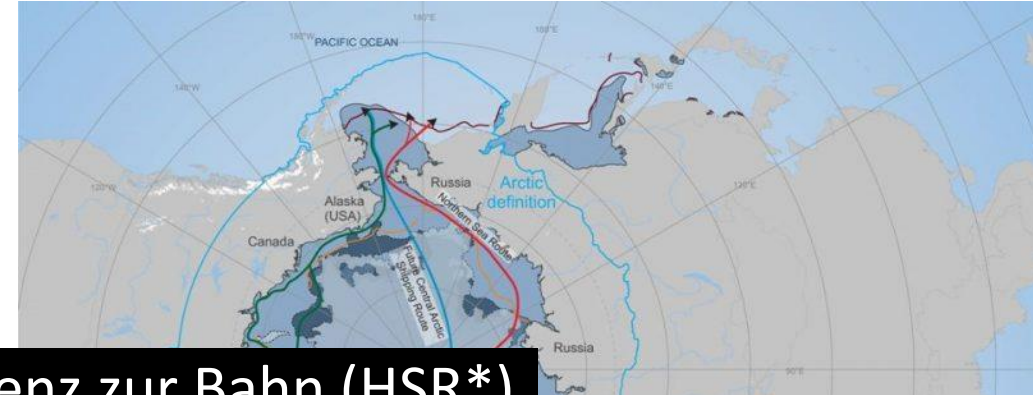
Hyperloop benötigt ca. die Hälfte der Energie eines Hochgeschwindigkeitszuges pro Sitzplatz

\* Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Röhre sind hier nicht berücksichtigt

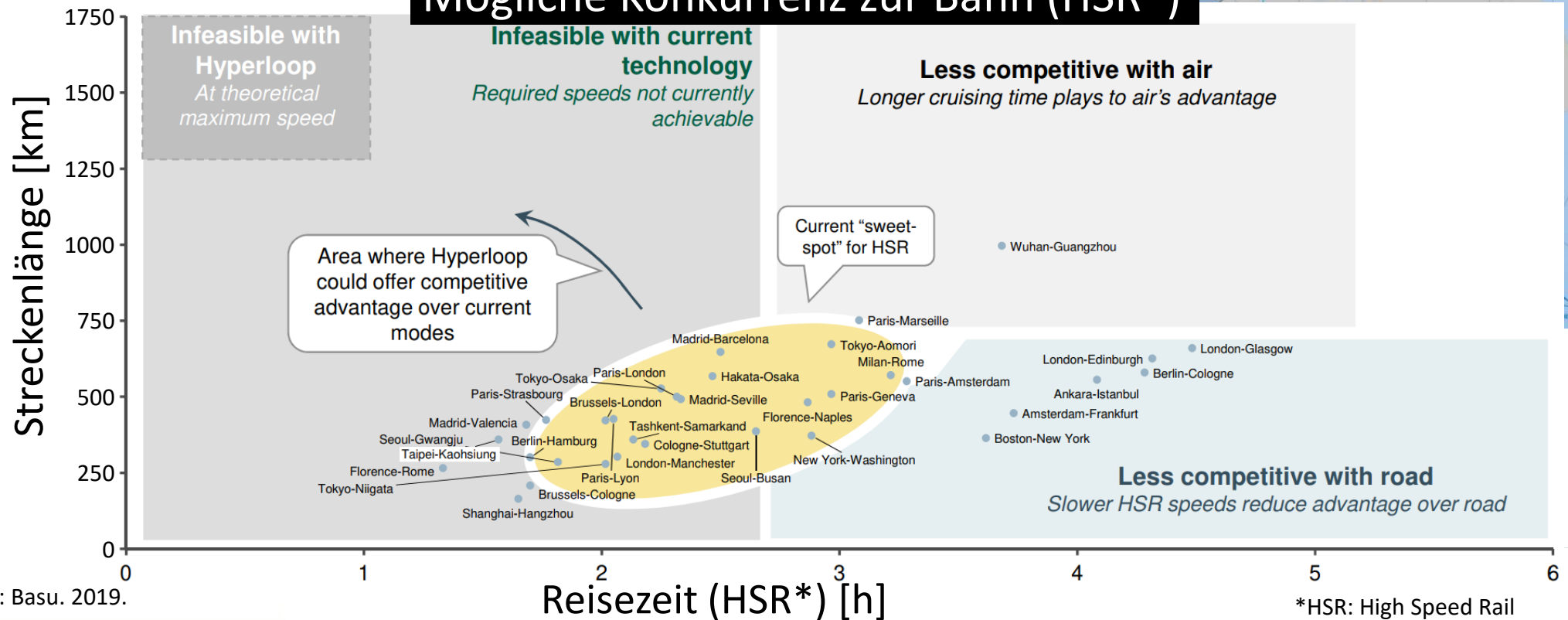


# Hyperloop Streckenführung

- Die vorgestellten Streckenführungen sind mannigfaltig (Liste mit mehr als 5000 Routen)
- Nur einige sind mit belastbaren Daten hinterlegt:
  - ✓ Chicago – Cleveland-Pittsburgh (TEMS, 2019)
  - ✓ Schweizer Netz (TU Delft, 2019)
  - ✓ Dubai – Abu Dhabi (2018)
  - ✓ Stockholm – Helsinki (Regierungsstudie, 2016)
  - ✓ Los Angeles – San Francisco (TU Delft, 2016)



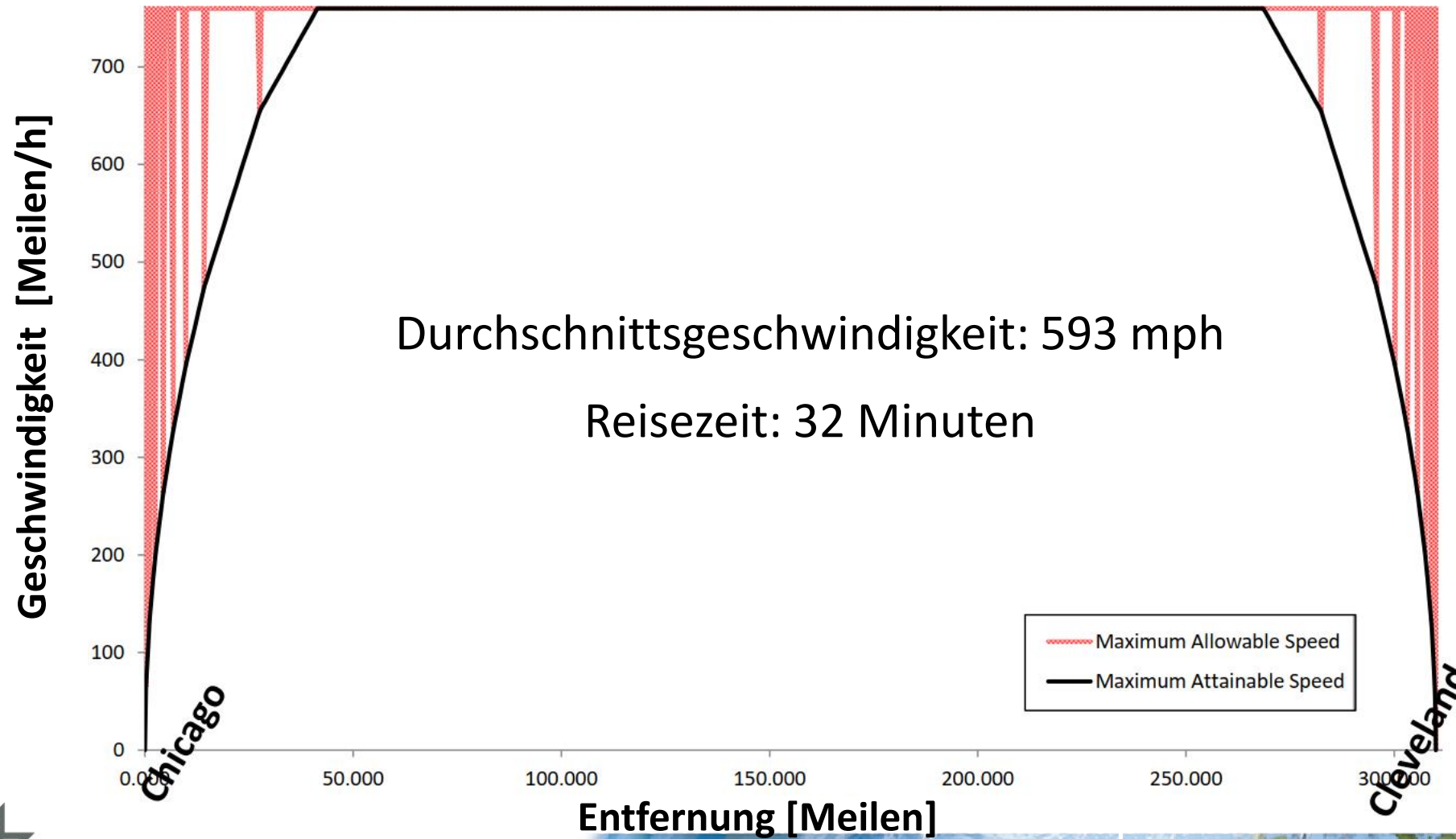
## Mögliche Konkurrenz zur Bahn (HSR\*)



# Reisezeit

## Beispiel Chicago - Cleveland

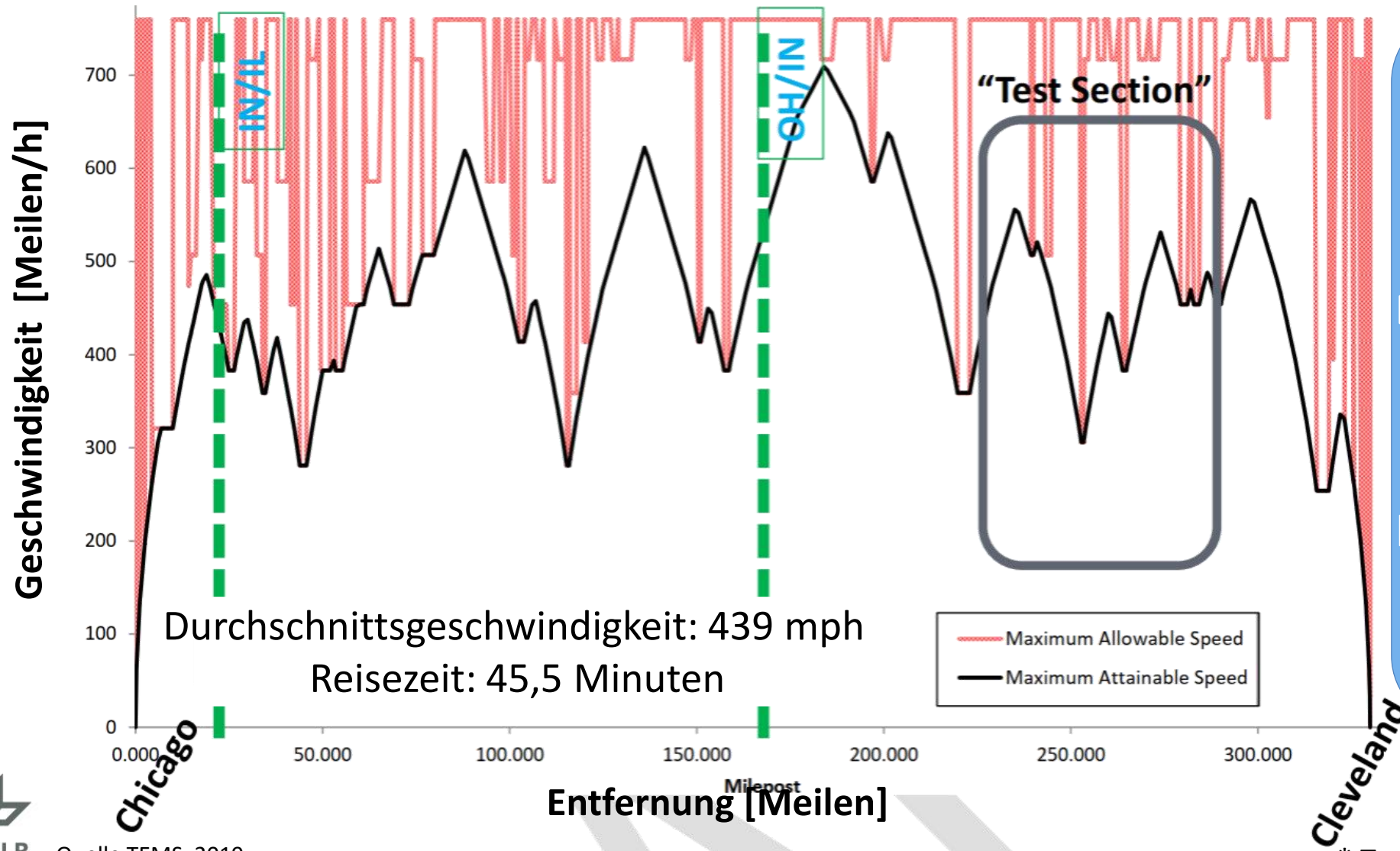
### 1. Idealer Verlauf (gerade Strecke)



# Reisezeit

## Beispiel Chicago - Cleveland

2. Entlang der Autobahn (0,1 g Seiten-, 0,3 g Längs\*- und Vertikalbeschleunigung)



Reisezeit ist trotz der relativ geraden Autobahn um 42% erhöht.

Einsatz in Ländern mit kurviger Infrastruktur und aufwendiger Grundstücksbeschaffung erscheint nicht sinnvoll.

\* Transrapid: 0,13g; ICE3: 0,06g

# Transportkapazität

## Beispiel Chicago - Cleveland

### 1. Not-Bremszeit

- Verzögerung bei Notbremse: 1g; -> Bremszeit 34 Sekunden
- **105 Fahrten/h (4200 Personen/h)\***

### 2. Schleusenzeit (mindestens)

Vorgang	Zeit
Fahrzeug in der Schleuse	-
Schließen der Schleuse bahnhofseitig	10 s
Abpumpen auf 100Pa (3 Pumpen)	11 s
Öffnen der Schleuse röhrenseitig	10 s
Ausfahrt des Fahrzeugs	2 s
Schließen der Schleuse röhrenseitig	10 s
Befüllen mit Luft	4 s
Öffnen der Schleuse bahnhofseitig	10 s
Einfahrt des nächsten Fahrzeugs	7 s
<b>Gesamtzeit</b>	<b>64 s</b>

- **56 Fahrten/h (2240 Personen/h)\***



Schleusenzeit bestimmt die Kapazität

\* 40 Personen Fahrzeug voll besetzt

# Reisezeit & Transportkapazität

## Beispiel Chicago - Cleveland

### 3. Vergleich Transportmodi (Innenstadt zu Innenstadt)

	Hyperloop	HighSpeed Rail	Flugzeug	PKW
Reisezeit [h]	00:46	01:36	02:46	05:24
Max. Kapazität [Pers./h]	2240	10800	3360	8640

#### Annahmen:

Hyperloop: Eine Röhre je Fahrtrichtung

PKW: Zufluss von 24 PKW pro Minute in die Innenstadt á 4 Personen

Flugzeug: Transferzeiten eingerechnet; 12 Flüge pro Stunde á 280 Passagiere

Hochgeschwindigkeitszug: 12 Fahrten pro Stunde á 900 Passagiere

Hyperloop bietet die geringste Transportkapazität bei kürzester Reisezeit.



# Reisezeit & Transportkapazität

## Beispiel Chicago - Cleveland

### 4. Vergleich von Randbedingungen

	Hyperloop	Transrapid	Hochgesch. Zug	Flugzeug	Straßenfahrzeug
Netzbildungsfähigkeit	--	—	0	—	+
Vorhandene Infrastruktur (Passagier)	--	--	+	+	++
Vorhandene Infrastruktur (Güter)	--	--	—	0	0
Potentielle Strecken in D (Passagier)	--	--	+	0	0
Potentielle Strecken in D (Güter)	—	—	+	—	—
Potentielle Strecken in EU (Passagier)	—	—	++	0	0
Potentielle Strecken in EU (Güter)	0	0	+	0	0

Hyperloop fehlt die Netzbildungsfähigkeit  
und die Infrastruktur





# Kosten

## Investitionskosten - Strecke

Mio € / km

Studie/Strecke	HL Alpha	HL TEMS	HL TU Delft & ETH Zürich	HL Siefkes	Transrapid	Transrapid	ICE Neubaustrecke
Route	SanFrancisco	Detroit	Netz Schweiz	Detroit	München	Shanghai	Berlin
	Los Angeles	Cleveland		Cleveland	Flughafen	Pudong	Hannover
Jahr	2013	2019	2019	2019	2007*	2015*	1998*
Streckenlänge	563	530	1026	530	37,5	30	264
Ständer	7,7	15,9	8,8	8,8	30,1	45,3	16,5
Röhre/Fahrweg	2,0		12,6	13,3**			
Vacuum Pumpen	o.A.		0,2	10,0	entfällt	entfällt	entfällt
Antriebs- & Führungssystem; Betriebsleittechnik	0,3	14,9	0,4	15,0	13,1	in oben enthalten	in oben enthalten
<b>Gesamt</b>	<b>10,0</b>	<b>30,9</b>	<b>22,0</b>	<b>47,1</b>	<b>43,2</b>	<b>45,3</b>	<b>16,5***</b>

\* Kosten auf 2019 mit einer jährlichen Inflationsrate von 2,5% hochgerechnet

\*\* Fluchtsystem mit 1,9 M€/km; Kühlung mit 720 T€/km

\*\*\* Eine Neubaustrecke ohne Tunnelanlagen wird heute auf ca. 25 Mio €/km geschätzt



Hyperloop Strecke hat ähnliche Kosten wie ein Transrapid



# Gesamtkosten

## Detroit – Cleveland (530 km)

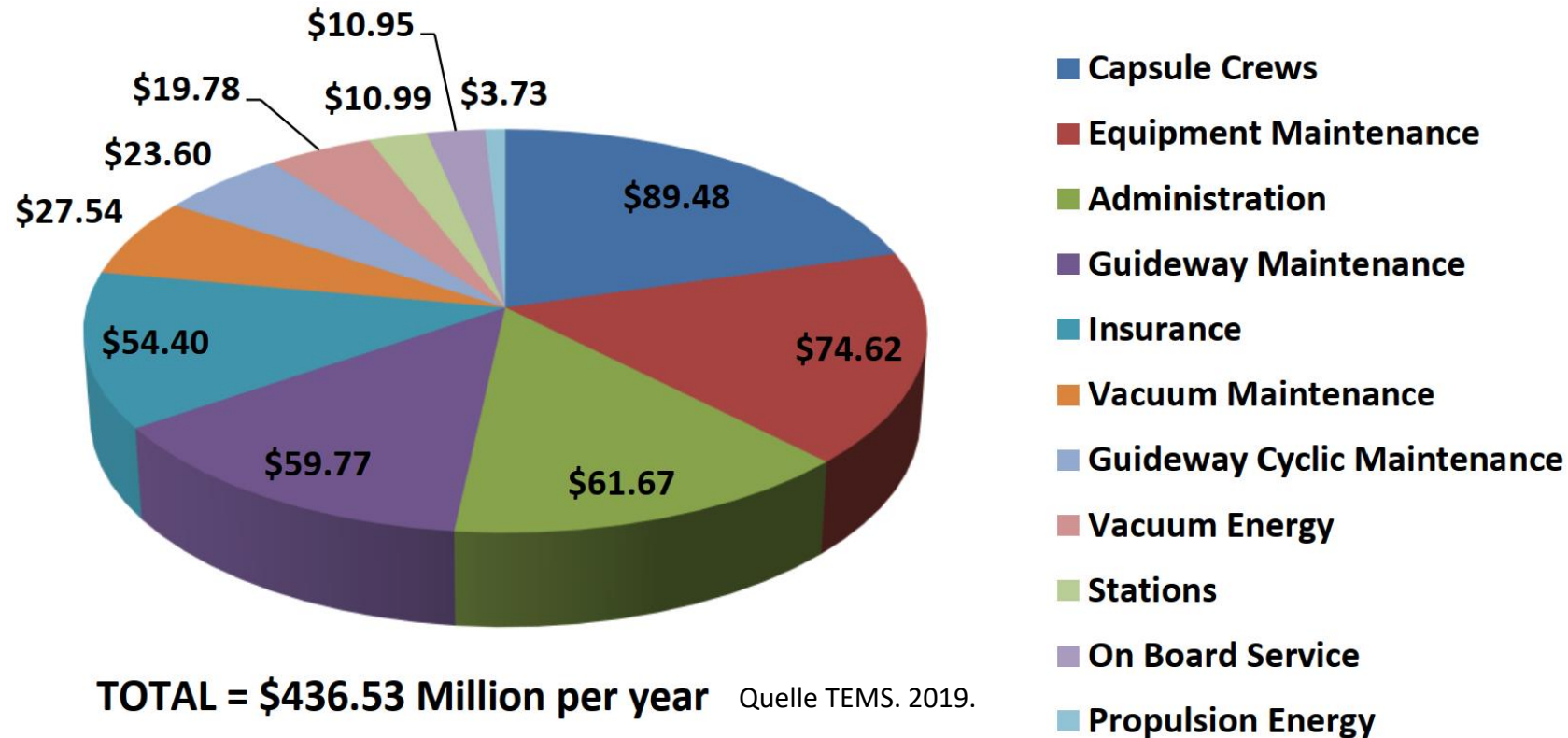
- Strecke: 25,0 Mrd€
- 2 Bahnhöfe mit Betriebsleitstelle: 0,9 Mrd€
- 129 Fahrzeuge à 3 Mio€: 0,4 Mrd€
  
- **Gesamt:** **26,3 Mrd€**

Sehr knapp berechnet.  
Landkäufe nicht enthalten



# Betriebskosten Passagierbetrieb

## Beispiel Chicago - Cleveland



Bei 10,8 Mio Passagiere/Jahr: 32,31 €/Passagier

Plus Abschreibung: (25 Jahre nach AfA): 97,21 €/Passagier

**Gesamtkosten: 129,52 €/Passagier**

Hyperloop Betriebskosten liegen leicht oberhalb eines ICE3

# Betriebskosten Cargo Betrieb

## Value of Time\*

Frachtverkehr	Passagierverkehr
0,5 bis 5,0	5 bis 50
<i>€ pro Tonne und Stunde</i>	<i>€ pro Passagier und Stunde</i>

Wenn überhaupt, dann macht der Cargo Transport durch einen Hyperloop nur Sinn für zeitkritische Güter (z.B. Ersatzteillogistik; Haute Couture Kleidung; etc.)



# Zusammenfassung

## Hyperloop : ICE3

**Energie:** 1,0 : 2,2

**Investitionskosten:** 1,9 : 1,0

**Transportkapazität:** 1,0 : 4,8

**Transportzeit:** 1,0 : 1,6

### **Technische Herausforderungen sehr hoch**

- Abführen der Wärmeenergie des Fahrzeugs
- Sicherheitsmanagement
- Fahrkomfort

### **Betriebsanforderungen**

- Einsatzmöglichkeiten nur für lange gerade Strecken entlang bestehender Infrastruktur (d.h. nicht Zentraleuropa)
- Vorwiegend Punkt-zu-Punkt Verbindungen
- Lange Stillstandszeiten nach Störfall

### **Wirtschaftlichkeit**

- ROI der Entwicklung sehr lang; Sehr hohes Risiko durch Landbeschaffung
- Crowd Sourcing bei geringer Integrationskompetenz in der Entwicklung erhöht das Risiko



# Hyperloop

## Science oder Fiction?

Hyperloop hat das Potential für viel Science.

In der Passagieranwendung liefert Hyperloop eine sehr geringe Transportkapazität

In der Passagieranwendung ist Hyperloop für Zentraleuropa Fiction.

In der Passagieranwendung ist Hyperloop für andere Gebiete auf der Erde vor 2040 Fiction.

Cargo Anwendungen als Ersatz für Luftverkehr sind vor 2030 technisch machbar aber wirtschaftlich sehr fraglich.



# Literatur (I)

Basu, B.: "Hyperloop: Coming Soon to a Station Near You?". L.E.K. Consulting. In: Proceedings of 'The Future of Transportation World Conference 2019'. Vienna. 2019.

Brennan, J. A.: "Beach Pneumatic. Alfred Beach's Pneumatic Subway and the Beginnings of Rapid Transit in New York". Columbia University. New York. 2005.

Crunchbase. <https://www.crunchbase.com/organization/hyperloop-technologies#section-overview>. Abgerufen am 03.02.2020.

Doppelbauer, J.: "HYPERloop". European Railway Agency. 5th Railway Forum. Berlin. 2017.

Francis, S.: "Into the Hyperloop - The role of composites in the fifth mode of transport". <https://www.compositesworld.com/blog/post/into-the-hyperloop>. Januar 2019. Abgerufen am 09.02.2020.

Gautier, P.-E.: "Hyperloop". Systra. 4th UIC Conference on 'Energy Efficiency of Future Trains'. Rome. 2017.

Majchrzak, A.; Griffith, T. L.; Reetz, D. K.: Catalyst Organizations as a New Organization Design for Innovation: The Case of Hyperloop Transportation Technologies. University of Southern California. 2018.

Shah, K.: "Hyperloop Network Design: The Swiss Case". Delft University of Technology. Delft. November 2019.

Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX): "2018 SpaceX Hyperloop Pod Competition Rules and Requirements". Revision 1.0. September 2017.

Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX); Tesla, Inc. (Ed.): "Hyperloop Alpha". 2013.

Swissmetro AG: "Studien Schlussbericht Swissmetro". May 1999.



# Literatur (II)

Taylor, C. L.; Hyde, D. I.; Barr, L. C.: "Hyperloop Commercial Feasibility Analysis: High Level Overview". DOT-VNTSC-NASA-16-01. U.S. Department of Transportation. Cambridge, Ma. 2016.

Transportation Economics & Management Systems Inc. (TEMS); Hyperloop Transportation Technologies Inc. (HTT) (Ed.): "Great Lakes Hyperloop Feasibility Study". 2019.

van Goeverden, K., Milakis, D., Janic, M., & Konings, R.: "Performances of the HL (Hyperloop) transport system". In: M. Cools , & S. Limbourg (Eds.), Proceedings of the BIVEC-GIBET Transport ResearchDays 2017: Towards an Autonomous and Interconnected Transport Future (pp. 29-43). BIVEC-GIBET. 2017."

van Goeverden, K.; Milakis, D.; Janic, M.; Konings, R. : "Analysis and modelling of performances of the HL (Hyperloop) transport system". In: European Transport Research Review. June 2018.

Vieregg, M.: „Ermittlung der wahrscheinlichen Baukosten der geplanten Transrapid-Strecke München Hbf - Flughafen München“. Vieregg-Rössler GmbH. München. 2007.

Vieregg, M.: „Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit des Transrapid-Vorhabens Hamburg - Berlin“. Vieregg-Rössler GmbH. München. 1997.

Walker, R.: "Hyperloop: cutting through the hype". ISBN: 978-1-912433-43-8. TRL. Berkshire, UK. 2018.

Wong, F. T. H.: "Aerodynamic Design and Optimization of a Hyperloop Vehicle". Delft University of Technology, Delft. May. 2018.

