Transport costs

for different media.

Gas - liquids - solids.



Ja. Der Energieaufwand für den Gastransport in Pipelines wird oft unterschätzt. Das Gas bewegt sich nicht "von allein" durch die Leitung, sondern muss regelmäßig durch Verdichterstationen komprimiert werden, um die Druckverluste durch Reibung auszugleichen.

Bei der eigenen Infrastruktur kann dieser Aufwand vernachlässigt werden, da die Generierung von H_2 vollständig mithilfe erneuerbarer Energien erfolgt. Diese sind entweder direkt eingebunden oder werden durch ein Strommanagement mit der Energie vorhandener Solarstationen und „Parks" sowie aus Pumpspeicherkraftwerken kombiniert. Gleichzeitig wird die zehnfache Menge an Trinkwasser erzeugt.

Einige typische Größenordnungen:

- Fernleitungen für Erdgas arbeiten meist mit 50 bis 100 bar Druck.
- Verdichterstationen stehen je nach Leitungsdurchmesser und Betriebsweise etwa alle 100 bis 250 km.
- Für den Transport werden oft etwa **1 bis 5 % der im Gas enthaltenen Energie pro 1.000 km** verbraucht.
- Bei sehr langen Leitungen (z.B. Russland-Europa oder Transkontinentalleitungen) können die Transportverluste insgesamt **5 bis 15 % des Energieinhalts** erreichen.

Ein Beispiel:

- 1 MWh Erdgas soll 1.000 km transportiert werden.
- Wird dafür 2 % Verdichterenergie benötigt, sind das 20 kWh.
- Diese Energie wird häufig direkt durch Verbrennen eines kleinen Teils des transportierten Gases bereitgestellt.

Interessant ist der Vergleich mit dem Stromtransport:

Transportmedium	Typischer Verlust
Hochspannungsleitung (1000 km)	ca. 2–5 %
Erdgaspipeline (1000 km)	ca. 1–5 % Verdichterenergie
Wasserstoffpipeline (1000 km)	ca. 2–10 % Verdichterenergie

Wasserstoff benötigt deutlich mehr Verdichtungsarbeit, weil seine Dichte sehr gering ist. Deshalb steigt der Energieaufwand für den Transport gegenüber Erdgas erheblich.

Für Ihre Infrastrukturüberlegungen könnte eine noch interessantere Kennzahl sein: **Energieaufwand pro transportierter Tonne und Kilometer (kWh/tkm)**. Dort schneiden große Pipelines

überraschend gut ab und liegen oft günstiger als Lkw-, Bahn- oder sogar Schiffslogistik für vergleichbare Energiemengen.

Aus Sicht der Physik gilt näherungsweise:

$P \propto Q \cdot \Delta p$ |$propto Q$ |$cdot$ |$Delta p$

wobei:

- PP = Verdichterleistung
- QQ = Volumenstrom
- Δp |$Delta p$ = Druckverlust

Der Druckverlust steigt wiederum stark mit der Strömungsgeschwindigkeit und nimmt mit größerem Rohrdurchmesser deutlich ab. Deshalb sind große Hauptleitungen trotz höherer Baukosten langfristig oft energetisch wesentlich effizienter.

Für Ihre Trinity-Infrastruktur könnte es besonders spannend sein, den Energiebedarf einer Erdgaspipeline mit dem Energiebedarf eines Wasser-, Biomasse- oder CO_2-Transportsystems gleicher Transportkapazität zu vergleichen. Dort ergeben sich oft überraschende systemische Vorteile für flüssige Medien gegenüber gasförmigen Medien.

Ja. Für einen elektromagnetisch bewegten Container kann man eine erste Abschätzung aus der Physik ableiten. Der entscheidende Punkt ist: Bei einem Maglev-System wird Energie nicht benötigt, um die Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten, sondern hauptsächlich für:

1. Beschleunigung der Masse
2. Luftwiderstand
3. Magnetische Verluste
4. Elektrische Umwandlungsverluste

1. Beschleunigungsenergie eines 100-t-Containers

Masse:

$m = 100.000\ kg$ $m = 100.000$ |$;kg$

Kinetische Energie:

$E = 12mv2$ $E =$ |$frac12\ mv^2$

Bei 100 km/h (27,8 m/s)

$E=0,5 \cdot 100.000 \cdot 27,82E=0,5 \cdot 100.000 \cdot 27,8^2 E=38,6 MJE=38,6\,MJ$
$E=10,7 kWhE=10,7\,kWh$

Das heißt:

Ein 100-t-Container benötigt nur etwa 11 kWh, um von 0 auf 100 km/h beschleunigt zu werden.

Bei Rekuperation könnten 70-90 % dieser Energie beim Bremsen zurückgewonnen werden.

2. Bei 300 km/h (Transrapid-Bereich)

$v=83,3 m/sv=83,3\;m/s E=347 MJE=347\,MJ E=96 kWhE=96\,kWh$

Für einen 100-t-Container werden also rund:

96 kWh für die Beschleunigung auf 300 km/h

benötigt.

3. Luftwiderstand dominiert

Ab etwa 150 km/h wird die Beschleunigungsenergie nebensächlich.

Der Luftwiderstand wächst mit:

$v2v^2$

und die dafür erforderliche Leistung mit:

$v3v^3$

Deshalb benötigt ein Transrapid bei 500 km/h ein Vielfaches der Energie eines Systems bei 200 km/h.

4. Besonders interessant für Ihr Infrastrukturkonzept

Nehmen wir einen geschlossenen Kanal oder Tunnel mit reduziertem Luftdruck.

Der Widerstand sinkt direkt mit der Luftdichte:

Umgebungsdruck	Luftwiderstand
1 bar	100 %
0,5 bar	50 %
0,1 bar	10 %
0,01 bar	1 %

Deshalb verfolgen Hyperloop-ähnliche Konzepte einen Unterdruck.

Beispiel 500 km Strecke

100 t Container

Geschwindigkeit 300 km/h

Beschleunigung: 96 kWh

Bremsvorgang mit 80 % Rückgewinnung:

$96 \times 0{,}2 = 19 kWh$

Nettoverlust Beschleunigung/Bremsung:

$19 kWh$

Hinzu kommen Bahn-, Magnet- und Luftwiderstandsverluste.

Für eine gut ausgelegte Magnetschwebebahn ergibt sich grob:

$20 – 50 Wh/tkm$

Für 100 t und 500 km:

$100 \times 500 \times 20 – 50$

gesamter Transportaufwand.

Vergleich mit LKW

100 t Nutzlast:

- LKW: ≈ 15.000 bis 25.000 kWh für 500 km
- Eisenbahn: ≈ 2.000 bis 5.000 kWh
- Maglev-Fracht: ≈ 1.000 bis 2.500 kWh
- Maglev im Unterdruckkanal: potentiell < 1.000 kWh

Für Ihr Trinity-Konzept besonders spannend

Wenn ein 100-t-Container nicht auf einer offenen Maglev-Strecke, sondern in einem Rohrsystem mit reduziertem Luftdruck transportiert wird, nähert sich der Energiebedarf theoretisch dem reinen Beschleunigungsbedarf an.

Dann könnte ein 100-t-Container über 500 km mit wenigen hundert kWh bewegt werden.

Das entspricht energetisch ungefähr dem Inhalt von:

- 25-40 Liter Diesel oder
- einer kleinen PV-Anlage an einem sonnigen Tag

für den Transport von **100 Tonnen Nutzlast über 500 km**.

Das ist der Grund, weshalb Ihr Gedanke eines modularen Infrastrukturkanals physikalisch so interessant ist: Bei ausreichend großem Rohrdurchmesser und niedrigem Luftdruck werden nicht die Tonnen zum Problem, sondern fast ausschließlich der verbleibende Luftwiderstand und die Systemverluste. Dadurch entstehen Effizienzsprünge, die mit klassischer Straßenlogistik kaum erreichbar sind.

Ja, sehr wahrscheinlich sogar deutlich.

Der entscheidende Punkt ist: Der Energiebedarf für den Transport steigt bei Fahrzeugen und Kapseln im Freien nicht linear mit der Geschwindigkeit, sondern der Luftwiderstand wächst ungefähr mit dem Quadrat der Geschwindigkeit, während die dafür notwendige Leistung sogar mit der dritten Potenz steigt.

Vereinfacht:

- 40 km/h → Referenz
- 80 km/h → etwa 4-facher Luftwiderstand
- 120 km/h → etwa 9-facher Luftwiderstand

Die erforderliche Antriebsleistung steigt noch stärker an.

Für Ihr Konzept könnte das bedeuten:

1. **Niedrige Geschwindigkeit (40 km/h)**
    a. Sehr geringer Luftwiderstand.
    b. Geringere Anforderungen an Antrieb und Sicherheit.
    c. Hohe Lebensdauer der Infrastruktur.
    d. Kontinuierlicher Materialstrom statt Hochgeschwindigkeitstransport.
2. **Hohe Auslastung**
    a. Wenn die Container rund um die Uhr fahren, wird die Transportleistung über die Masse und den Takt erreicht, nicht über die Geschwindigkeit.
    b. Pipelines funktionieren nach demselben Prinzip: hohe Kontinuität, geringe Geschwindigkeit des Mediums.
3. **Rollwiderstand statt Luftwiderstand**
    a. Bei 40 km/h wird der Rollwiderstand oft wichtiger als der Luftwiderstand.
    b. Auf Stahlrädern und präzisen Führungsschienen sind die Verluste sehr klein.
    c. Deshalb sind Güterzüge energetisch so effizient.

Ein interessanter Vergleich:

- Ein Lkw transportiert typischerweise mit 80-90 km/h.
- Ein Güterzug bewegt sich oft mit 40-80 km/h.
- Eine Pipeline transportiert ihr Medium oft mit nur wenigen Metern pro Sekunde.

Alle drei Systeme nutzen letztlich dieselbe physikalische Erkenntnis:

Die höchste Energieeffizienz entsteht nicht durch maximale Geschwindigkeit, sondern durch einen kontinuierlichen Massenstrom mit möglichst geringen Reibungsverlusten.

Für Ihre Trinity-Idee könnte man das sogar als Designprinzip formulieren:

"Nicht Geschwindigkeit schafft Effizienz, sondern Kontinuität."

Noch spannender wird es, wenn Ihre Containerzüge in fest definierten Abständen fahren und aerodynamisch gekoppelt werden. Dann reduziert sich der Luftwiderstand der nachfolgenden Container ähnlich wie bei einem langen Güterzug oder einem Vogelschwarm. Der Energiebedarf pro transportierter Tonne kann dadurch nochmals deutlich sinken.

Aus physikalischer Sicht ist ein langsam fahrendes, hoch ausgelastetes Container-Rohr- oder Schienensystem oft näher an der Energieeffizienz einer Pipeline als an der eines klassischen Straßenverkehrssystems. Das ist wahrscheinlich einer der stärksten Hebel Ihres Ansatzes.

English version

Yes. The energy required to transport gas in pipelines is often underestimated. The gas does not move through the pipeline "by itself", but must be regularly compressed by compressor stations to compensate for the pressure losses caused by friction.

This effort can be neglected in the case of the company's own infrastructure, as the generation of H_2 is carried out entirely with the help of renewable energies. These are either directly integrated or combined with the energy of existing solar stations and "parks" as well as pumped storage power plants through electricity management. At the same time, ten times the amount of drinking water is produced.

Some typical orders of magnitude:

- Long-distance pipelines for natural gas usually operate at 50 to 100 bar pressure.
- Compressor stations are located about every 100 to 250 km, depending on the pipe diameter and mode of operation.
- Transport often consumes about **1 to 5% of the energy contained in the gas per 1,000 km** .
- In the case of very long pipelines (e.g. Russia-Europe or transcontinental pipelines), transport losses can reach a total **of 5 to 15% of the energy content** .

An example:

- 1 MWh of natural gas is to be transported 1,000 km.
- If 2% compressor energy is required for this, this is 20 kWh.
- This energy is often provided directly by burning a small part of the transported gas.

The comparison with electricity transport is interesting:

Transportmedium	Typical loss
High-voltage line (1000 km)	approx. 2–5 %
Natural gas pipeline (1000 km)	approx. 1–5 % compressor energy
Hydrogen pipeline (1000 km)	approx. 2–10 % compressor energy

Hydrogen requires significantly more compression work because its density is very low. This is why the energy required for transport increases significantly compared to natural gas.

For your infrastructure considerations, an even more interesting metric could be: **energy expenditure per transported ton and kilometer (kWh/tkm).** There, large pipelines perform surprisingly well and are often cheaper than truck, rail or even ship logistics for comparable amounts of energy.

From a physics point of view, the following is approximate:

$$P \propto Q \cdot \Delta p$$

where:

- P = Compressor capacity
- Q = Volumenstrom
- Δp = pressure loss

The pressure loss, in turn, increases sharply with the flow velocity and decreases significantly with a larger pipe diameter. This is why large main pipelines are often much more energy-efficient in the long term, despite higher construction costs.

For your Trinity infrastructure, it might be particularly exciting to compare the energy demand of a natural gas pipeline with the energy demand of a water, biomass or CO_2 transport system with the same transport capacity. There are often surprising systemic advantages for liquid media over gaseous media.

Yes. For an electromagnetically moving container, an initial estimate can be derived from physics. The crucial point is: In a maglev system, energy is not needed to maintain speed, but mainly for:

1. Acceleration of mass
2. Air resistance
3. Magnetic losses
4. Electrical conversion losses

1. Acceleration energy of a 100 t container

Dimensions:

$$m = 100{,}000 \text{ kg} = 100{,}000\ \text{kg}$$

Kinetic Energy:

$E=\frac{1}{2} mv^2$

At 100 km/h (27.8 m/s)

$E=0.5 \cdot 100.000 \cdot 27.8^2$ $E=38.6\,MJ$ $E=10.7\,kWh$

This means:

A 100 t container only needs about 11 kWh to be accelerated from 0 to 100 km/h.

With recuperation, 70-90% of this energy could be recovered during braking.

2. At 300 km/h (Transrapid range)

$v=83.3\; m/s$ $E=347\,MJ$ $E=96\,kWh$

For a 100 t container, therefore, the following are used:

96 kWh for acceleration to 300 km/h

.

3. Air resistance dominates

From about 150 km/h, the acceleration energy becomes secondary.

The air resistance grows with:

v^2

and the power required for this with:

v^3

Therefore, a Transrapid at 500 km/h requires many times the energy of a system at 200 km/h.

4. Particularly interesting for your infrastructure concept

Let's take a closed duct or tunnel with reduced air pressure.

The resistance decreases directly with the air density:

Ambient pressure	Air resistance
1 bar	100 %
0.5 bar	50 %
0.1 bar	10 %
0.01 bar	1%

This is why Hyperloop-like concepts pursue a negative pressure.

Example 500 km route

100 t Container

Speed 300 km/h

Acceleration: 96 kWh

Braking with 80% recovery:

$96 \times 0.2 = 19\,\mathrm{kWh}$

Net loss acceleration/braking:

$19\,\mathrm{kWh}$

In addition, there are orbital, magnetic and air resistance losses.

For a well-designed maglev train, the result is roughly:

$20–50\ \mathrm{Wh/tkm}$

For 100 t and 500 km:

$100 \times 500 \times 20–50 \quad 1.000–2.500\,\mathrm{kWh}$

total transport costs.

Comparison with trucks

100 t payload:

- Trucks: ≈ 15,000 to 25,000 kWh for 500 km
- Railway: ≈ 2,000 to 5,000 kWh
- Maglev freight: ≈ 1,000 to 2,500 kWh
- Maglev in the vacuum duct: potentially < 1,000 kWh

Particularly exciting for your Trinity concept

If a 100 t container is not transported on an open maglev route, but in a pipe system with reduced air pressure, the energy requirement theoretically approaches the pure acceleration requirement.

Then a 100 t container could be moved over 500 km with a few hundred kWh.

This corresponds energetically approximately to the content of:

- 25-40 liters of diesel or
- of a small PV system on a sunny day

for transporting **100 tons of payload over 500 km**.

This is the reason why your idea of a modular infrastructure sewer is so interesting from a physical point of view: With a sufficiently large pipe diameter and low air pressure, it is not the bins that become the problem, but almost exclusively the remaining air resistance and system losses. This results in leaps in efficiency that are hardly achievable with classic road logistics.

Yes, very likely even significantly.

The crucial point is that the energy required for transport does not increase linearly with speed in vehicles and outdoor capsules, but the air resistance increases approximately with the square of the speed, while the power required for this even increases with the third power.

Simplified:

- 40 km/h → reference

- 80 km/h → about 4 times the air resistance
- 120 km/h → about 9 times the air resistance

The required drive power increases even more.

For your concept, this could mean:

1. Low speed (40 km/h)

a. Very low drag.
b. Reduced propulsion and safety requirements.
c. Long service life of the infrastructure.
d. Continuous material flow instead of high-speed transport.

2. High occupancy rate

a. If the containers are running around the clock, the transport performance is achieved through mass and cycle, not speed.
b. Pipelines work on the same principle: high continuity, low speed of the medium.

3. Rolling resistance instead of air resistance

a. At 40 km/h, rolling resistance often becomes more important than air resistance.
b. On steel wheels and precise guide rails, the losses are very small.
c. That's why freight trains are so energy-efficient.

An interesting comparison:

- A truck typically transports at 80-90 km/h.
- A freight train often moves at 40-80 km/h.
- A pipeline often transports its medium at only a few meters per second.

All three systems ultimately use the same physical knowledge:

The highest energy efficiency is not achieved by maximum speed, but by a continuous mass flow with the lowest possible friction losses.

For your Trinity idea, you could even formulate this as a design principle:

"It is not speed that creates efficiency, but continuity."

It becomes even more exciting when your container trains run at fixed intervals and are aerodynamically coupled. This reduces the air resistance of the following containers, similar to that of a long freight train or a flock of birds. This can significantly reduce the energy requirement per tonne transported.

From a physical point of view, a slow-moving, high-capacity container pipe or rail system is often closer to the energy efficiency of a pipeline than to that of a classic road transport system. This is probably one of the strongest levers of your approach.