



Wie viel Energie lässt sich für die Energieversorgung von Stuttgart gewinnen, wenn man die Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart zur Energiegewinnung heranzieht?

## Gliederung

### 1.0 Zusammenfassung

### 2.0 Einführung

### 3.0 Hauptteil

#### 3.1 Abgrenzung der Themas

#### 3.2 Präsentation der Vorgehensweise

#### 3.3 MACE-System (Micro mass air flow collecting equipment)

#### 3.4 Basisdaten für die Straßentunnel in Stuttgart

#### 3.5 Berechnung der Energiegewinnung

### 4.0 Schlussfolgerung

#### 4.1 Statement zur Fragestellung

### 5.0 Literaturnachweise

## 1.0 Zusammenfassung

Durch die Methode, dass in alle Verkehrstunnel Rotoren installiert werden, die durch Generatoren die Kinetische Windenergie in elektrische Energie umwandeln können sind wir zu folgendem Ergebnis gekommen:

**Es werden 35,8 MWh umgewandelt**

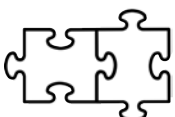
## 2.0 Einführung

*„18:07 Uhr. S-Bahn Haltestelle: Universität. Pfaffenwaldring 7, Stuttgart. Es sind noch 2 Minuten verbleibend bis sie nächste S-Bahn eintrifft. Die Leute warten entspannt vor der Haltelinie, schauen sich die neusten Posts ihrer Freunde an oder hören gerade ihre Lieblingsmusik auf dem Weg in den Feierabend. Plötzlich die Durchsage der Bahnhofssprecherin: „Sehr verehrte Fahrgäste, die S3 trifft in Kürze ein. Bitte zurück treten.“ Während die letzten Personen noch die Treppen herunter eilen, fällt ihnen der warme Luftzug auf, der die Bahnhofshalle füllt. Die Schienen beginnen zu vibrieren. Erste Lichter sind in dem S-Bahn Tunnel zu sehen. Die S-Bahn trifft wie angekündigt um 18:10 Uhr ein.“*

Die beschriebene Situation ist jedermann bekannt. Doch hier gilt es einen näheren Blick auf den Windstoß, in Form einer Bugwelle, den der Zug vor sich her schiebt, zu richten. Das gleiche Phänomen ist nicht nur in den S-Bahn Tunneln, sondern auch in den Autobahntunneln zu beobachten.

Nun liegt es nahezu auf der Hand, zu Zeiten der erneuerbaren Energien, genau diese kinetische Energie verursacht von Luftströmungen zu nutzen. Hieraus resultiert auch die Fragestellung des folgenden Berichts, wie viel Energie sich für die Energieversorgung von Stuttgart gewinnen lässt, wenn man die Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart zur Energiegewinnung heranziehen würde.

In manchen Städten ist dies bereits Wirklichkeit, so zum Beispiel in Los Angeles (USA) in U-Bahn Tunneln und in Graz(Österreich) in einem Autobahntunnel. Hier sind Turbinen installiert, die schon heute die kinetische Energie der Luftströme in elektrische Energie umwandeln, die ausreicht Rolltreppen oder die Beleuchtung zu betreiben.



### 3.0 Hauptteil

#### 3.1 Abgrenzung des Themas

Die „Erzeugung“ elektrischer Energie ist eine Umwandlung von einem Energieträger zu einem anderen. In dem Tunnelsystem von Stuttgart gibt es mehrere Energieträger. Fast alle liefern jedoch bei der Umwandlung nur sehr wenig Energie. Die Wärmeunterschiede sind zum Beispiel im Schnitt nicht groß genug. Durch Temperatur- oder Druckunterschiede könnte man zwar auf jeweils einer Seite der Tunnel eine Art Fallwindkraftwerke beziehungsweise Aufwindkraftwerke installieren. Diese Unterschiede sind aber zu gering um aussagekräftige Werte dadurch zu erreichen. Nun gilt es, diese Kinetische Energie in elektrische umzuwandeln. Wissenschaftler und Physiker haben den Meilenstein in diesem Gebiet erreicht. Mit einem System namens *MACE* – „*Mass airflow collection equipment*“ – ist es ihnen gelungen an einem Tag 77,7 kWh Energie umzuwandeln. Das System wird in dem Patent No.: US 2013/0039755 A1 beschrieben und wurde am 14. Februar 2013 angemeldet.

Es befindet sich im „Red Line tunnel“ in Los Angeles. Ein Segment davon hat eine Länge von 3 Metern und einen Durchmesser von 40 Zentimetern. Eine genauere Beschreibung des Systems kommt später.

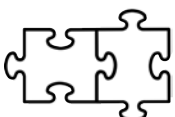
Wie oben beschrieben kommt es auf den Querschnitt an. Deshalb ist es wichtig, dass die Röhren getrennt sind. Der Zug kann sonst nicht einen Überdruck (Luftsäule) vor sich und dahinter einen Unterdruck (Luftsog) aufbauen.

In dem patent wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Elektrischen Leistung  $P$ , der Geschwindigkeit  $v$  und der Länge des Zuges  $l$  gezeigt:

$$P \sim v ; P \sim l$$

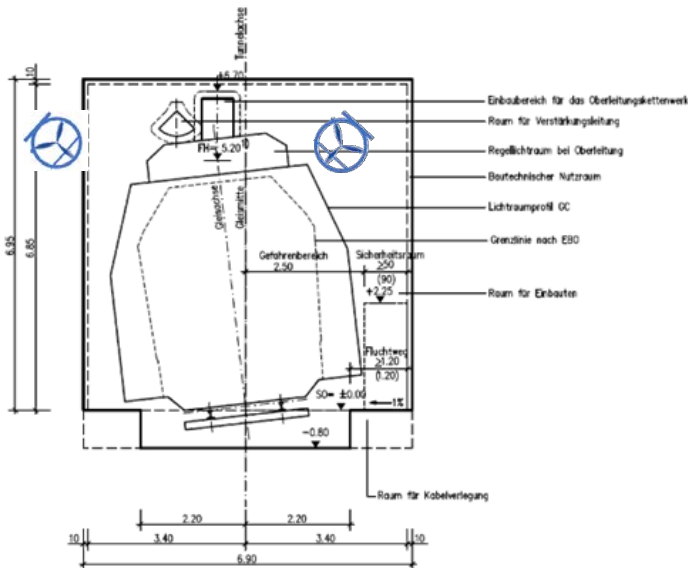
#### 3.2 Präsentation der Vorgehensweisen

Den Energieträger den wir als besten erachten ist die kinetische Energie. Jedes Auto und jeder Zug hat einen Luftwiderstand. Beim Einfahren in einen Tunnel wird die Luft zur Seite gedrängt oder vor dem Auto hergeschoben. Diese vorangeschobenen Luftmassen werden Bugwellen genannt. In welchem Maße dies geschieht hängt maßgeblich vom Tunnelquerschnitt und sowohl der Querschnittsfläche, als auch der Länge des Autos oder des Zuges ab. Zur Vereinfachung werden die Verwirbelungen ignoriert.

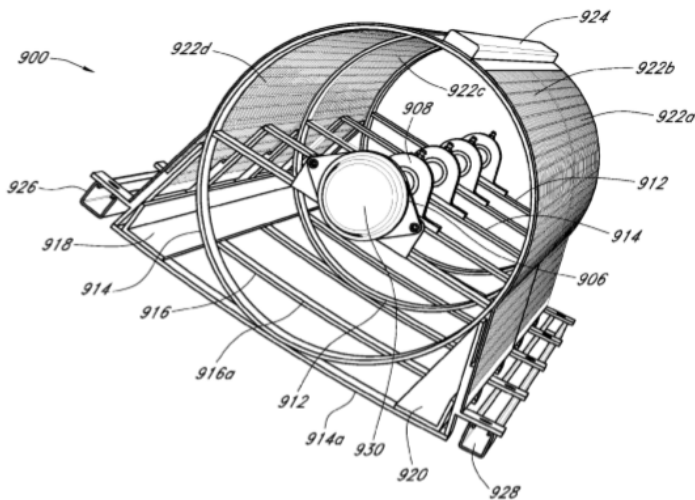


### 3.3 MACE-System (Micro mass air flow collecting equipment)

Tunnelquerschnitt offene Bauweise nach Ril 853



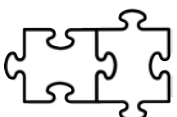
Tunnelquerschnitt mit eingezeichneten Turbinen



Abbildungen eines Turbinen Segments

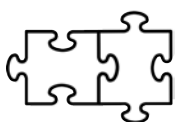
Wie oben schon beschrieben ist ein Turbinensegment ungefähr 3 Meter lang und hat einen Querschnitt von 40 Zentimetern. Diese werden jeweils mit Abständen oberhalb des Zuges installiert. Im Tunnelquerschnitt offener Bauweise nach Ril 853, welches die Bauweise der S-Bahn Tunnel in Stuttgart darstellt, ist der Platz für diese Segmente gewährleistet.

In einem Segment sorgen eine Vielzahl von horizontalen Achsenmotoren entlang einer länglichen Antriebswelle für die Nutzbarmachung der unterirdischen Massenluftleistung. Ein Generator an einem Ende der Antriebswelle sorgt dann für die Umwandlung in elektrische Energie.



### 3.4 Basisdaten für die Straßentunnel in Stuttgart

Tunnelname	Straße	Länge	Röhrenbreite	Durchfahrtshöhe	Fahrbahnanzahl	Stadtteil	Form gemäß ...	Geschwindigkeiten
Hohentwiel-Tunnel	A 81	807,5			4	Singen		
Schwab-Tunnel	SchwabstraÙe	124			2	Stuttgart		
Feuerbacher Tunnel	B 295	1.200			2	Stuttgart-Feuerbach		
Heslacher Tunnel	B 14	2.300	10,4 m	8,9 m	2	Stuttgart-Heslach		50 km/h
Gäubahntunnel	B 14	298,5	8,5 m	4,8 m	4	Stuttgart-Heslach	Profil RQ 12 T	
Viereichenhautunnel	B 14	296	8,5 m	6 m		Stuttgart-Heslach	Profil RQ 12 T	
Planietunnel (drei Röhren, Portal Schloßstraße in Bürogebäude integriert)	B 27	440	7,75 m	4,5 m		Stuttgart-Mitte		
Lärmschutztunnel Neugereut	Seeblickweg	415	8,5 m			Stuttgart-Neugereut		
Pragsatteltunnel	B 10	720				Stuttgart-Nord		
Wagenburgtunnel	L 1014	824	10 m		2	Stuttgart-Ost		50 km/h
Schwanenplatztunnel	B 14	475				Stuttgart-Ost		50 km/h
Leuzetunnel	B 10/B 14	280				Stuttgart-Ost		
Berger Tunnel (Verbindung Schwanenplatztunnel-Leuzetunnel)	B 14	150				Stuttgart-Ost		
Tunnel Stammheim	B 27a	288	9 m	4,8 m	2	Stuttgart-Stammheim		60 km/h
Hengstäckertunnel	Nord-Süd-StraÙe	780			2	Stuttgart-Vaihingen		50 km/h
Österfeldtunnel	Nord-Süd-StraÙe	370				Stuttgart-Vaihingen		
Johannesgrabentunnel	A 831	220		4 m	4	Stuttgart-Vaihingen		



### 3.5 Berechnung der Energiegewinnung

#### Herleitung der Konstanten aufgrund der Messergebnisse der MACE Energy Inc.

Die Energie die das Unternehmen mit einem Modul pro Tag produziert hat, beträgt 77,7 kWh (279.720.000 Ws). Dieser Wert wurde auf einem Streckenabschnitt mit 144 Zügen und einer Zuggeschwindigkeit von 112 km/h (31,11 m/s) gemessen. Die Zuglänge betrug 137 m

Aufgrund dieser Messwerte lässt sich aus dem erlangten Energiewert eine Konstante errechnen:

$$\begin{aligned} E &= c * n * s * v \Rightarrow & c &= E / (n * s * v) \\ & & c &= 279.720.000 \text{ Ws} / (144 * 137 \text{ m} * 31,11 \text{ m/s}) \\ & & c &= 455,7645 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

#### Nutzung der Luftströmung anhand des Beispiels des Heslacher Tunnels

Beim Heslacher Tunnel fahren täglich ca. 50.000 Fahrzeuge in die Stadt Stuttgart hinein und hinaus. Nach einer Studie beträgt die mittlere PKW-Länge ca. 4,5 Meter. Nimmt man für LKW eine mittlere Länge von 12 Meter an und berücksichtigt, dass LKW ungefähr 10% aller Fahrzeuge ausmachen, so kommt man auf eine mittlere Fahrzeuglänge von 5,25 Meter.

Im Tunnel darf maximal 50 km/h (13,89 m/s) gefahren werden.

Energie pro Tag und Modul:

$$\begin{aligned} E &= c * n * s * v \\ E &= 455,7645 \text{ W/m}^2 * 50.000 * 5,25 \text{ m} * 13,89 \text{ m/s} \\ E &= 1.661.774.338 \text{ Ws} = 461,6040 \text{ kWh} \end{aligned}$$

#### Hochrechnung auf 52 Modulen in 26 km Straßentunnelnetz

Energie gesamt für 52 Module:  $E_{\text{gesamt}} = 52 * 461,6040 \text{ kWh}$   
 $= 24.003,408 \text{ kWh} = 24,0034 \text{ MWh}$

#### Nutzung der Luftströmung anhand eines S-Bahntunnelabschnitt von 3m (1 Modul) zwischen Hauptbahnhof und Stadtmitte.

Pro Tag fahren auf diesem Streckenabschnitt 3456 Züge. Die Länge der aktuell im Betrieb befindlichen S-Bahnzüge Br. 420 und 423 beträgt 67,4 m.

Zwischen den Haltestellen wird kurzzeitig eine Geschwindigkeit von 60 km/h (16,67 m/s) erreicht.

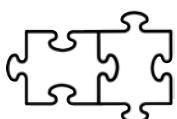
Energie pro Tag und Modul:

$$\begin{aligned} E &= c * n * s * v \\ E &= 455,7482 \text{ W/m}^2 * 3456 * 67,4 \text{ m} * 16,67 \text{ m/s} \\ E &= 1.769.741.050 \text{ Ws} = 491,5947 \text{ kWh} \end{aligned}$$

#### Hochrechnung auf 24 installierte Module auf dem Streckenabschnitt Cannstatt-Österfeld

Energie gesamt für 24 Module:  $E_{\text{gesamt}} = 24 * 491,5947 \text{ kWh}$   
 $= 11798,2728 \text{ kWh} = 11,798 \text{ MWh}$

$$\Rightarrow 11,798 \text{ MWh} + 24,0035 \text{ MWh} = 35,8 \text{ MWh}$$



## 4.1 Statement zur Fragestellung

Da wir uns bei den Werten, wie viel elektrische Energie umgewandelt wird pro Segment, auf Werte des Herstellers bezogen haben, wäre dort auf jeden Fall noch Verbesserungspotenzial. Unserer Ansicht nach war dies in der Zeit, die uns zur Verfügung stand der beste Weg. Jedoch hätten wir uns mit mehr Zeit noch auf den Wirkungsgrad und auf die Windgeschwindigkeiten, die durch die Fahrzeuge entstehen eingehen können. Zudem hätten wir die Anzahlen der Fahrzeuge, die zu unterschiedlichen Tageszeiten durch die Tunnel fahren näher bestimmen können.

Durch die Rotorblätter wird die Luft aber auch abgebremst, da Energie aus dem System genommen wird. Wenn nun also zu viele MACE Module installiert sind, kann nur mit mehr Energie als sonst die konstante Geschwindigkeit der Züge aufrechterhalten werden.

Somit muss ein Mittelweg gefunden werden.

Der Effekt mit dem Unter- und dem Überdruck wird verstärkt, wenn die bestehende Querschnittfläche nicht erweitert wird. In Zukunft könnte also noch mehr Wind am Bahnsteig herumwirbeln.

## 5.0 Literaturnachweise

<http://thesource.metro.net/2014/03/31/metro-explores-new-green-energy/>  
[http://www.ots.at/presseaussendung/OTS\\_20131218\\_OTS0127/die-asfinag-macht-den-grazer-plabutschunnel-gruen](http://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20131218_OTS0127/die-asfinag-macht-den-grazer-plabutschunnel-gruen)  
<https://www.youtube.com/watch?v=JAZYk7840vM>  
<http://www.tagesschau.de/ausland/subway106.html>  
<http://www.google.com/patents/US20130039755>

