

PlaNeT SimTech

07. März 2015

TEAM 15

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

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Energiegewinnung mit Hilfe der Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart möglich ist. In unserer Berechnung kamen wir auf $18842457 \frac{J}{Woche}$. Allerdings mussten wir in unserer Rechnung viele Annahmen treffen und konnten beispielsweise die Geschwindigkeit der Züge, die Tunnelöffnung oder den Wirkungsgrad der Turbinen nur schätzen. Um ein besseres und realitätsnäheres Ergebnis zu bekommen, wären umfangreiche Tests und ggf. Optimierungen notwendig, die in der vorgegebenen Zeit jedoch nicht realisierbar sind. Dennoch haben wir gezeigt, dass eine Energiegewinnung aus den Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart prinzipiell möglich ist.

Einführung

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

Die zentrale Frage des 21. Jahrhunderts ist die der Energieversorgung: Wie kann man in Zukunft Strom gewinnen, ohne auf fossile Quellen oder Kernspaltung zurück zu greifen? Hierbei gibt es zusätzlich zu den erneuerbaren Energien wie Geothermie oder Solarkraft die Idee des „Energy Harvesting“ – Eine Idee, bei der kleinste Energiemengen, die normalerweise ungenutzt bleiben, genutzt werden. Ein Beispiel wäre, die Luftströmungen in Tunneln zur Energiegewinnung heran zu ziehen. Doch lohnt sich dies überhaupt für die Energieversorgung?

Unsere Fragen, um die Aufgabenstellung zu lösen, waren folgende:

- Welche Tunnel kommen in Frage und wie werden die Turbinen befestigt?
- Wie kann man von Geschwindigkeiten von bewegten Gegenständen in Tunneln auf die Energie von der dadurch bewegten Luft schließen?
- Wie viel Energie enthält bewegte Luft?

Hauptteil

Um zu einem Ergebnis zu gelangen, wurden erst die in der Einführung aufgelisteten Fragen beantwortet:

- Tunnel in Stuttgart
- Kinetische Energie von bewegter Luft
- Geschwindigkeit von Luft aufgrund von bewegten Gegenständen
- Hochrechnung und Betrachtung

1.) Tunnel in Stuttgart

Am Anfang dachten wir an alle Tunnel in Stuttgart, sprich für Autos und Lastwagen sowie auch für Züge (S-Bahn, U-Bahn und Fernzüge) und Fußgängerunterführungen.

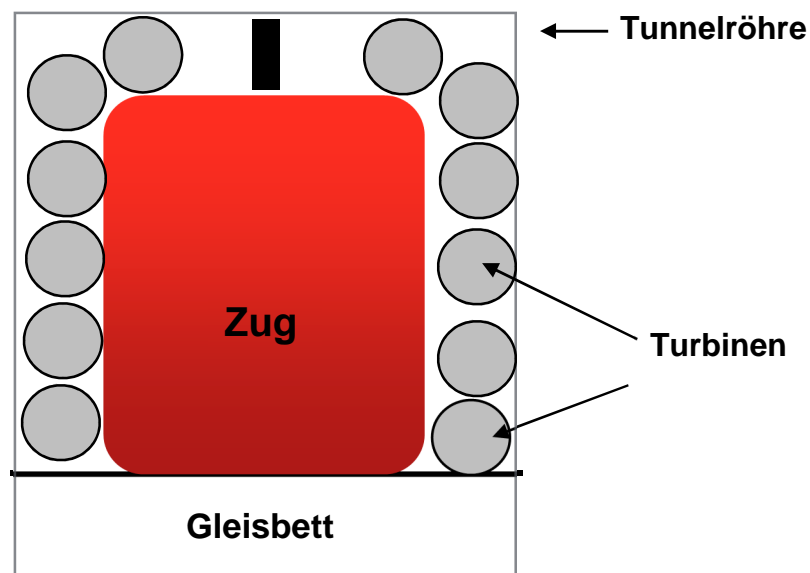
Autotunnel kann man vernachlässigen, da dort ja bereits Ventilatoren angebracht sind um eine Belüftung des Tunnels zu gewährleisten. Es wäre also sinnlos, dort Generatoren anzubringen. Bei Fußgängerunterführungen ergibt sich ein ähnliches Problem: da die Fußgänger in den Unterführungen eine vernachlässigbar kleine Luftströmung verursachen und die Länge der Unterführungen zu kurz für eine natürliche Luftzirkulation mittels Konvektion, fiel diese Art von Tunnel auch weg. Deshalb bleiben nur Fernzug-, U-, und S-Bahn-Tunnel übrig.

Fernzug-Tunnel kann man auch ausschließen, denn im Stadtgebiet Stuttgart halten diese noch Oberirdisch.

Aus den oben genannten Gründen beziehen wir uns nur noch auf den U- und S-Bahnen im Tunnel sowie die natürliche Luftbewegung durch Luftdruck- und Temperaturunterschiede in diesen Tunneln.

In Punkten der Befestigung der Turbinen wurden folgende Annahmen getroffen:

In Stuttgart sind hauptsächlich Züge mit den Außenmaßen¹ von $(b \times h)$ ca. $3m \times 4,2m$ im Einsatz. Angenommen wir eine Tunnelöffnung² von $4m \times 5m$. Somit bleiben rechts und links je ca. 50cm. Damit ist der Einbau von Turbinen mit 30cm Durchmesser realistisch. $5m : 0,3m = 16,6m$ da aber ein gewisser Abstand nötig ist kommt man auf je 15 Turbinen á 30cm Durchmesser rechts und links.



¹ http://de.wikipedia.org/wiki/DB-Baureihe_430 (Abgerufen am 07.03.2015)

² <http://horstbu.de/Top3Fund/tunnel.htm> (Abgerufen am 07.03.2015)

2.) Kinetische Energie bewegter Luft

Durch Stuttgarts Lage in einem Kessel umgeben von Bergen, gibt es bei fast allen Eisenbahntunneln Höhenunterschiede. Wesentlich, also mit einem relevanten Unterschied, sind nur 2 Tunnel. Vereinfacht gilt für den Luftdruck: pro 8m Höhenzunahme sinkt der Druck³ um 1hPa. Für 100m Höhenzunahme sinkt der Druck folglich um ca. 12hPa.

Um daraus auf die kinetische Energie ($E = \frac{1}{2} * m * v^2$) zu schließen, welche zur Energieversorgung von Stuttgart herangezogen werden kann, muss zuerst die Masse der Luft im Tunnel berechnet werden. Ein normaler S-Bahn-Tunnel hat ein Durchmesser⁴ von ca. 6m, die Querschnittsfläche beträgt dann

$$A = \pi * r^2 = \pi * (3m)^2 = 28m^2$$

Da jedoch der untere Teil des Tunnels „aufgefüllt“ ist beträgt die Querschnittsfläche nur ca. 20m². Die Masse eines Tunnelmeters beträgt bei einer angenommenen Dichte⁵ für Luft von $1,2kg * m - 3: 20m^2 * 1m * 1,2kg * m - 3 = 24kg$ pro Tunnelmeter.

Um die Geschwindigkeit der Luft, die aufgrund des Druckunterschieds aus dem Tal (Innenstadt) auf den Berg (Höhenlagen) strömt, muss der Druckunterschied bekannt sein (bzw. Angenommen werden). Dafür braucht man die Formel des hydrodynamischen Drucks⁶:

$$p_d = 0,5 * \rho * v^2$$

Aufgelöst nach der Geschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{p_d}{0,5 * \rho}}$$

Die Differenz zwischen den Dichten an den Tunnelenden kann vernachlässigt werden, denn nach der Formel für die Luftdichte⁷ (R_s = spezifische Gaskonstante)

$$\rho = \frac{p}{R_s * T}$$

³ http://de.wikipedia.org/wiki/Barometrische_H%C3%B6henformel (Abgerufen am 07.03.2015)

⁴ <http://horstbu.de/Top3Fund/tunnel.htm> (Abgerufen am 07.03.2015)

⁵ <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte> (Abgerufen am 07.03.2015)

⁶ http://de.wikipedia.org/wiki/Druck_%28Physik%29#Hydrodynamischer_Druck (Abgerufen am 07.03.2015)

⁷ <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte> (Abgerufen am 07.03.2015)

Ergibt sich bei zwei Extremwerten (trockene Luft) nur eine geringe Abweichung

$$\rho_1 = \frac{98000Pa}{287 \frac{J}{kg * K} * 293K} = 1,17 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_2 = \frac{102000Pa}{287 \frac{J}{kg * K} * 298K} = 1,19 \frac{kg}{m^3}$$

Da nun die Luftdichte an beiden Tunnelenden gleich ist, findet auch keine Konvektion statt bzw. wird der Temperaturunterschied vernachlässigt.

Beispielrechnung: Ein Tunnel der Länge 1000m mit Höhendifferenz 100m. Am unteren Ende ist der Druck bei 1020hPa. Der Druck oben liegt damit bei 1008hPa, eingesetzt in die Formel für v:

$$v = \sqrt{\frac{(1020hPa - 1008hPa)}{0,5 * 1,2 \frac{kg}{m^3}}} = 4,5 \frac{m}{s}$$

Eingesetzt in die Formel der kinetischen Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * \left(1,2 \frac{kg}{m^3} * 20m^2 * 1000m\right) * 4,5 \frac{m}{s} = 54000 J = 15Wh$$

In Stuttgart gibt es zwei Tunnel mit relevantem Höhenunterschied: Schwabstraße-Universität (S-Bahn, Länge ca. 5500m, Höhenunterschied 160m, Druckunterschied 20hPa) und Bopser-Waldau(U-Bahn, Länge ca. 3.000m, Höhenunterschied 152m, 19hPa), daraus folgt für die (theoretische) kinetische Energie⁸:

$$E_{schwab-uni} = \frac{1}{2} * \left(1,2 \frac{kg}{m^3} * 20m^2 * 5500m\right) * \sqrt{\frac{20hPa}{0,5 * 1,2 \frac{kg}{m^3}}} = 382800 J$$

$$E_{bopser-waldau} = \frac{1}{2} * \left(1,2 \frac{kg}{m^3} * 20m^2 * 3000m\right) * \sqrt{\frac{19hPa}{0,5 * 1,2 \frac{kg}{m^3}}} = 201600 J$$

⁸ <http://de-de.topographic-map.com/places/Stuttgart-600559/> (Abgerufen am 07.03.2015)

3.) Geschwindigkeit von Luft aufgrund von bewegten Gegenständen

Um einen sicheren und möglichst hohen Energiegewinn zu erzielen liegt der Fokus auf Bahn-Tunneln. Damit eine Bahn fährt benötigt diese Energie. Um nun einen Energiegewinn zu erhalten, muss aus den Nebeneffekten der Fahrt Energie gewonnen werden, ohne dass dabei mehr Energie für die Fahrt benötigt wird. Wenn nun die Luft die eine Bahn vor sich „herschreibt“ ihre Energie, die sie von der Bahn erhalten hat, an eine Turbine abgibt, wird diese langsamer und der Zug muss sie erneut anschieben. Für diesen Vorgang würde er also mehr Energie benötigen, als für eine Fahrt durch einen Tunnel ohne Turbine. Um also einen Energiegewinn zu erhalten, muss die Turbine an einer Stelle angebracht werden, an der die Bahn die Luft danach nicht direkt wieder anschieben muss. Dafür eignen sich Haltestellen am besten. Im Stuttgarter U- und S-Bahn-Netz befinden sich 15 unterirdische Haltestellen⁹. An diesen Haltestellen halten rund 78200 Bahnen die Woche¹⁰, also können durch die Bahn in einer Woche ganz genau so viele Energiegewinnungsprozesse pro Woche durchgeführt werden. Um eine realistische Turbine zu wählen muss diese stationär befestigt sein. Es bietet sich an mehrere kleinere Turbinen zu nehmen um eine möglichst große Tunnelfläche nutzen zu können. Damit beläuft sich in der Annahme der Tunnelmaße (Halbkreis mit Radius 3m) und der Bahnfläche (3 auf 4 Meter) die maximale Turbinenfläche¹¹ auf $2,12m^2$. Zur Berechnung der Energie muss die Geschwindigkeit der Luft ermittelt werden. Dazu dienen die Impulsgesetze¹²:

$$m_1 \times v_{1v} + m_2 \times v_{2v} = m_1 \times v_{1n} + m_2 \times v_{2n}$$

Hierbei bezieht sich „1“ auf Luft und „2“ auf die Bahn, „1v“ bedeutet vor dem Impuls und „1n“ danach. Gesucht ist also v_{1n} als Luftgeschwindigkeit nach dem Impuls. Hierhin aufgelöst ergibt sich:

$$v_{1n} = \frac{m_1 \times v_{1v} + m_2 \times v_{2v} - m_2 \times v_{2n}}{m_1}$$

Die Masse der Luft auf unserem Tunnelquerschnitt¹³ beträgt 34kg, ihre Geschwindigkeit vor dem Impuls beträgt $0 \frac{m}{s}$, die Masse der Bahn beträgt 120t und deren Geschwindigkeit¹⁴ im Schnitt $70 \frac{km}{h}$. Da der Zug theoretisch nach dem Impuls Geschwindigkeit verliert wird mit der Annahme gerechnet

⁹ http://de.wikipedia.org/wiki/Stadtbahn_Stuttgart (Abgerufen am 07.03.2015)

¹⁰ http://www2.vvs.de/vvs/XSLT_STT_REQUEST?language=de (eingabe der Haltestelle und durchzählen der Stops der einzelnen Linien) (Abgerufen am 07.03.2015)

¹¹ Siehe Tunnelsskizze

¹² <http://www.leifiphysik.de/themenbereiche/erhaltungssaetze-und-stoesse> (Abgerufen am 07.03.2015)

¹³ <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte> (Abgerufen am 07.03.2015)

¹⁴ http://de.wikipedia.org/wiki/DB-Baureihe_430 (Abgerufen am 07.03.2015)

$$v_{2n} = v_{2v} - 0,0001$$

Damit ergibt sich für die Geschwindigkeit der Luft $0,035 \frac{m}{s}$

4.) Hochrechnung und Betrachtung

Um daraus auf die Leistung der Turbine zu schließen wird die folgende Formel¹⁵ genutzt:

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

Dabei bezieht sich ρ und v auf die Luft, A ist die Fläche der Turbine. Daraus ergibt sich eine Leistung von

$$P = 0,00006W$$

Da allerdings Energie Leistung mal Zeit ist, muss die Zeitdauer des Turbinenbetriebs festgelegt werden. Die Zeit in der sich eine Turbinenfläche dreht hängt zusammen mit der Dauer eines Drehvorgangs, der Anzahl der Haltestellen die in Frage kommen und die Anzahl der täglich haltenden Züge je Haltestelle¹⁶¹⁷. Hochgerechnet ergibt sich daraus eine Zeitdauer von rund $5862750 \frac{s}{Woche}$. Multipliziert mit der Leistung ergibt dies einen Energiegewinn von:

$$E = 25527456 \frac{J}{Woche}$$

Geht man von einem Wirkungsgrad von 60% aus¹⁸ bleiben davon $15316473 \frac{J}{Woche}$.

Allerdings beinhaltet dieser Energiegewinn weder die verbrauchte Energie und den Zeitaufwand um die Turbinen in die Tunnel zu bauen, noch den Verlust an Geld und Verkomplizierung der Arbeitswege bzw. Verkehrsprobleme durch Stillstehen des Bahnverkehrs während der Einbauphase. Verglichen mit dem Energieverbrauch der Stadt würde der übrige Betrag wenig bis gar nicht ins Gewicht fallen. Außerdem besteht eine Problematik der Platzierung und Verkabelung der Turbinen und der Möglichkeit des Einbaus in den Tunneln, ggf. auch noch des nötigen Abstands zur Bahn wegen Gefahrenrichtlinien oder ähnlichem.

¹⁵ <http://www.braun-windturbinen.com/knowhow/theorie-zur-windkraft/> (Abgerufen am 07.03.2015)

¹⁶ http://www2.vvs.de/vvs/XSLT_STT_REQUEST?language=de (Eingabe der Haltestelle und durchzählen der Stops der einzelnen Linien) (Abgerufen am 07.03.2015)

¹⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=JAZYk7840vM> (Abgerufen am 07.03.2015)

¹⁸

http://www.rothaarwind.de/windenergie/mod_content_redpage/seite/Wirkungsgrad_der_Windenergie/cmshow/Energieertrag/index.html (Abgerufen am 07.03.2015)

Rechnet man hierzu die Energien, die durch die Druckunterschiede erzeugt werden, so erhält man einen gesamten Energiegewinn von $18842457 \frac{J}{Woche}$

Schlussfolgerung

Wenn man die Luftströmungen in den Tunneln Stuttgarts, die durch Bahnbewegungen oder Druckunterschied entstehen, zur Energiegewinnung heranziehen möchte, so lässt sich ein Gewinn von $18842457 \frac{J}{Woche}$ erwirtschaften. Bedenkt man allerdings den damit Verbundenen Aufwand, den zeitweiligen Zusammenbruch des Verkehrs und der dadurch entstehenden Energiebedürfnisse, Kosten und darüber hinaus die Verschmutzung der Umwelt durch verstärktes Nutzen des Automobils, außerdem die Fragwürdigkeit der technischen Verwirklichung im Tunnel und die dafür geltenden Vorschriften, so kann man dieses Vorhaben wohl als unwirtschaftlich bezeichnen, da die Investitionskosten und die obigen Konsequenzen in keinem Verhältnis zum Gewinn stehen.

Literaturverzeichnis

Keine Literatur verwendet außer den angegebenen Fußnoten