Team 17

PlaNeT SimTech

7. März 2015

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

Zusammenfassung

In Zeiten, in denen Energie immer teurer wird, ist das Vermindern von Energieverlusten sehr wichtig und von zentralem Interesse. Die vorliegende Ausarbeitung beschäftigt sich daher mit der Frage, wie viel Energie man durch die Ausnutzung der Luftströmungen in den Tunneln Stuttgarts einsparen kann.
Hierzu wurden zwei verschiedene Ansätze näher betrachtet. Zum einen können Luftströmungen durch Temperaturdifferenzen innerhalb und außerhalb eines Tunnels zustande kommen und zum anderen durch den Tunnel durchquerende Fahrzeuge, die eine Luftströmung durch Schieben von Luftpaketen erzeugen. Die Energie der Luftströmungen durch Temperaturdifferenzen können durch die Anwendung der Poiseuille'schen Gleichung sowie der allgemeinen Gasgleichung berechnet werden. Durch beide Gleichungen lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz und der Leistung der Ausgleichsströmung herstellen.
Die zweite Art der Strömung wurde mittels der Formel für den Störmungswiderstand abgeschätzt, indem die Fahrtgeschwindigkeit sowie die Anzahl der Fahrzeuge, welche sich gleichzeitig im Tunnel befinden, berücksichtigt wurden.
Die Angaben zu den Tunneln im Gebiet Stuttgart wurden aus frei zugänglichen *Openstreetmap*-Datenbanken mittels SQL-Anweisungen extrahiert.
Durch diese Überlegungen und ein Aufintegrieren der Leistungswerte für alle relevanten Tunnel Stuttgarts über ein Jahr ergibt sich eine Jahresgesamtenergie von 62,49 TJ.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

In Zeiten, wo Erdöl teurer wird, wo die Klimaerwärmung die menschliche Existenz gefährdet, wird eines immer wichtiger: Den Energieverbrauch zu senken. Da aber nur ein kleiner Teil der Bevölkerung bereit wäre, dafür auf Luxusgüter – allen voran die Mobilität – zu verzichten, muss anderweitig vorgegangen werden. Eine zentrale Rolle ist hierbei, dass nicht so viel Energie ungenutzt verloren geht. Insbesondere mechanische Strömungsenergie ließe sich mittels Turbinen oder Propellern leicht in die besser nutzbare elektrische Energie umwandeln. Eine Möglichkeit, genau dies zu erreichen, wäre die Nutzung der Luftströmungen innerhalb von Auto-, S-Bahn- und U-Bahn- Tunneln. Gerade in Zeiten des steigenden Verkehrsaufkommens scheint es sehr sinnvoll, diese Möglichkeit näher zu betrachten um abzuschätzen, wie viel Energie die effiziente Nutzung der Luftströmungen nicht ungenutzt verloren geht.

Im Folgenden soll daher näher betrachtet werden, wie viel Energie sich für die Energieversorgung von Stuttgart gewinnen lässt, wenn man die Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart zur Energiegewinnung heranzieht.

2 Mathematisches Modell

2.1 Modellierung der Luftströmungen

Im Folgenden nehmen wir an, dass Tunnelströmungen auf zwei Weisen zustande kommen können: Durch Fahrzeuge, die Luftmassen bewegen und durch Ausgleichsströmungen infolge von Temperaturdifferenzen außerhalb und innerhalb von Tunneln.

Betrachten wir zunächst den ersten Fall: Ein Fahrzeug besitze eine Querschnittsfläche A_f, eine Geschwindigkeit v_f und einen Strömungswiderstandsbeiwert c_w. Vor sich schiebt es dann ein Luftpaket mit dem Volumen:

$$\mathrm{d}V = c_w \cdot A_f \mathrm{d}s = c_w \cdot A_f \cdot v_f \, \mathrm{d}t$$

In einem Tunnel der Länge L fahren Fahrzeuge mit einem Front-Front-Abstand l. Die Anzahl n der Fahrzeuge im Tunnel beträgt:

$$n = \frac{L}{l} \tag{1}$$

Für das ingesamt abtransportierte Luftvolumen gilt dann:

$$\mathrm{d}V = n \cdot c_w \cdot A_f v_f \, \mathrm{d}t = \frac{L}{l} \cdot c_w \cdot A_f \cdot v_f \, \mathrm{d}t$$

Für den Volumenstrom $\dot{V} = \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}$ gilt somit:

$$Q = \frac{L}{l} \cdot c_w \cdot A_f \cdot v_f$$

Den Massenstrom $\dot{m}$ erhält man durch Multiplikation mit der Luftdichte ρ. Für die Leistung $P = \frac{1}{2}\dot{m}v_f^2$ gilt somit:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{L}{l} \cdot c_w \cdot A_f \cdot v_f \cdot v_f^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{L}{l} \cdot c_w \cdot A_f \cdot v_f^3 \tag{2}$$

Betrachten wir nun eine Luftströmung, die durch eine Temperaturdifferenz außerhalb und innerhalb des Tunnels entsteht. Die Außentemperatur sei T_0, die Temperatur im Innern des Tunnels T_1. Außen sei der Luftdruck p_0. Der Tunnel habe eine Länge L und sei näherungsweise ein Rohr mit dem Radius R. Im Folgenden nehmen wir an, dass das Medium Luft für normale Temperaturen inkompressibel ist. Dann gilt nach der idealen Gasgleichung:

$$\frac{p}{T} = const.$$

Für den Luftdruck im Tunnel p_1 gilt dann:

$$p_1 = \frac{T_1}{T_0} \cdot p_0$$

und für die Druckdifferenz:

$$|p_1 - p_0| = p0 \cdot |\frac{T_1}{T_0} - 1|$$

Wir nehmen an, dass die Luft zur Mitte des Tunnels wie durch ein Rohr der Länge $\frac{L}{2}$ und dem Radius R strömt. Nach der Poiseuille'schen Gleichung[1] gilt dann für den Volumenstrom:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot |p_1 - p_0|}{8 \cdot \nu \cdot \frac{L}{2}} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot p_0 \cdot |\frac{T_1}{T_0} - 1|}{4 \cdot \eta \cdot L}$$

Dabei ist η die dynamische Viskosität von Luft. Mit $\dot{V} = A \cdot v = \pi \cdot R^2 \cdot v$, wobei A den Rohrquerschnitt und v die Fluidgeschwindigkeit darstellt, erhält man:

$$v = \frac{R^2 \cdot p_0 \cdot |\frac{T_1}{T_0} - 1|}{4 \cdot \eta \cdot L}$$

Für die Leistung $P = \frac{1}{2}\rho A v^3$ gilt dann:

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi \cdot R^2 \left(\frac{R^2 \cdot p_0 \cdot |\frac{T_1}{T_0} - 1|}{4 \cdot \eta \cdot L}\right)^3$$

Im Folgenden sollen die Außen- und Innentemperaturen T_0 und T_1 modelliert werden. Da die Außentemperatur im Jahresverlauf schwankt, haben wir die mittleren Temperaturen für Stuttgart recherchiert[1], vgl. Abb. 1, und mit einer sinusförmigen Funktion gefittet.

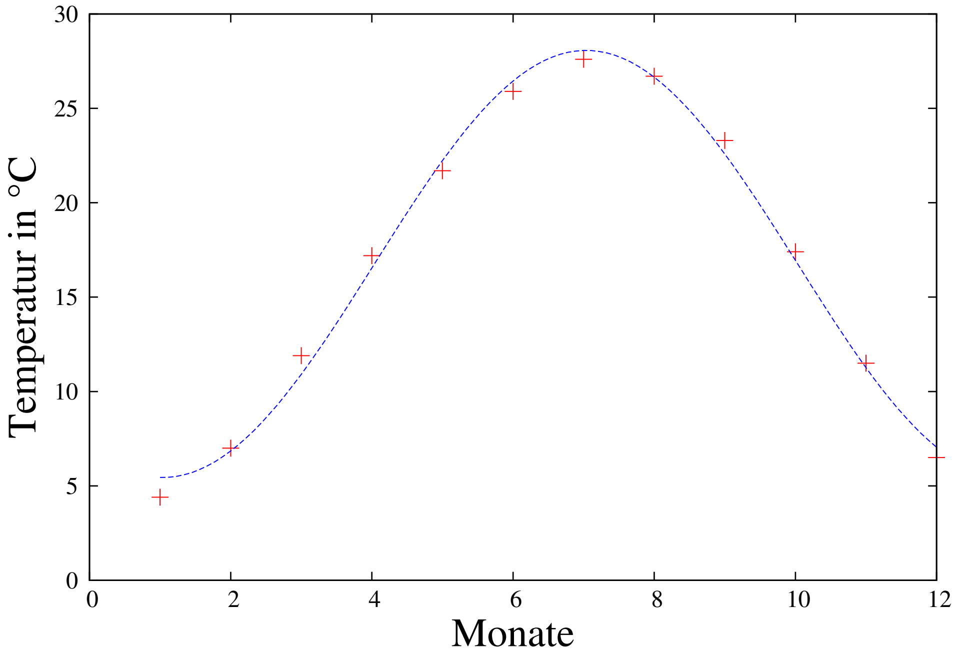

Abbildung 1: Temperaturwerte für Stuttgart mit sinusförmigem Fit

Für den Fit ergibt sich durch die Methode der kleinsten Quadrate mit dem Computer-

[1] http://de.climate-data.org/location/129555/

Algebra-System *Maple*

$$T_0(x) = -11,313 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{12} + 12,022\right) + 16,758 \tag{3}$$

mit x in Monaten und $T_0(x)$ in °C.

Für die Temperatur T_1 im Tunnel nehmen wir an, dass sie in guter Näherung konstant ist, und dem Mittelwert der Außentemperatur entspricht. Dafür spricht, dass Beton eine hinreichend guter Wärmespeicher ist und die Tunnelsysteme von Stuttgart nicht tief genug liegen, dass eine Berücksichtigung von Geothermie notwendig wäre. Also gilt $T_1 = 17\,°C$.

2.2 Stuttgarts Tunnel

Um genauere Angaben über die Tunnel Stuttgarts zu erhalten, wurden die freizugänglichen *Open-Streetmap* Daten verwendet. Diese schließen den gesamten Regierungsbezirk Stuttgart mit ein und sind täglich aktualisiert[2]. Die Daten beinhalten alle Straßen, sowie alle Schienentrassen die in dem genannten Gebiet verlaufen. Mit Hilfe einer SQL-Abfrage ließen sich jeweils alle Straßentunnel und alle Schienentunnel aus dieser Datenbank extrahieren. Somit liegen nun genaue Angaben über die Anzahl sowie die jeweils im Tunnel erlaubte Höchstgeschwindigkeit sowie die Länge des Tunnels vor. Untenstehende Tabelle zeigt die aus dem OSM-Raw-Daten extrahierten Daten.

Typ	v_{Max} $[ms^{-1}]$	Länge $[m]$	Typ	v_{Max} $[ms^{-1}]$	Länge $[m]$
Auto	13.9	780	Zug	27.8	200
Auto	19.4	30	Zug	27.8	500
Auto	16.7	800	Zug	27.8	200
Auto	13.9	900	Zug	27.8	300
Auto	19.4	200	Zug	27.8	258
Auto	13.9	450	Zug	36.1	400
Auto	13.9	500	Zug	27.8	579
Auto	13.9	330	Zug	27.8	680
Auto	13.9	200	Zug	27.8	350
Auto	13.9	900	Zug	27.8	8788
Auto	16.7	120	Zug	36.1	1000
Auto	19.4	200			
Auto	13.9	2300			
Auto	19.4	130			
Auto	19.4	800			
Auto	19.4	100			
Mittelwert	16.3	546	Mittelwert	29.3	1205

Tabelle 1: Ergebnisse der OSM-Analyse

[2]http://download.geofabrik.de/europe/germany/baden-wuerttemberg/stuttgart-regbez.html#

2.3 Verkehrsanalyse

Für die Berechnung der von den Fahrzeugen im Tunnel verursachten Strömung durch das Vor-sich-Herschieben von Luftpaketen muss die Anzahl n der Fahrzeuge im Tunnel bekannt sein. Diese ist stark von den Tageszeiten abhängig, sodass man für die Autos folgendes annehmen kann:

- Zur Rush-Hour (07:00 Uhr - 09:00 Uhr und 15:00 Uhr - 18:00 Uhr) die insgesamt 5 Stunden am Tag dauert, fahren die Fahrer im Mittel mit dem halben vorgeschriebenen Sicherheitsabstand. Dies entspricht in etwa dem üblichen Drägeln auf den vollen Straßen.
- Zu Zeiten mit normalem Verkehrsaufkommen (10 h / d) fahren die Fahrer mit dem doppelten Mindestsicherheitsabstand.
- Früh morgens und spät Abends (4h /d) fahren die Fahrer mit dem zehnfachen Mindestsicherheitsabstand.
- Zwischen 1 Uhr Nachts und 6 Uhr morgens fährt kaum jemand Auto → hundertfacher Sicherheitsabstand.

Aus diesen Annahmen ergibt sich, abhängig von der Geschwindigkeit und der Tunnellänge, durchschnittliche Fahrzeuganzahl n im Tunnel. Für den Mindestabstand d („Tacho halbe“) zweier Fahrzeugfronten ergibt sich mit der Fahrzeuglänge l:

$$d = \frac{v \cdot 3.6}{2} + l$$

Somit fahren in einem Tunnel der Länge L Fahrzeuge deren Anzahl n beträgt. Mit dem Faktor k, der angibt, ob der Sicherheitsabstand eingehalten wird (Annahmen siehe oben) gilt:

$$n = \frac{L}{d \cdot k}$$

Da die Anzahl der Spuren einer Straße nicht bei allen Tunneln in dem *Open-Streetmap*-Datensatz vermerkt war, muss hier ein Schätzwert angenommen werden. Da es sich bei Stuttgart um eine größere Stadt handelt, und nur Hauptverkehrstunnel (keine Fahrradunterführungen, Bahnunterführungen) berücksichtigt wurden, wird angenommen, dass jeweils zwei Fahrspuren in jede Richtung verlaufen. Zuletzt wird angenommen, dass es keine Staus gibt und sich alle Fahrzeuge stets mit der maximal erlaubten Geschwindigkeit fortbewegen. Diese Annahme ist strittig und wird in Kapitel 4 näher beleuchtet.
Über die verschiedene Gewichtung (entsprechend der Zeiten in denen das Verkehrsaufkommen herrscht) kann man eine mittlere Automenge die sich in einem Tunnel befindet berechnen.
Für Schienenfahrzeuge müssen andere Annahmen getroffen werden. Die Stuttgarter Verkehrsbetriebe verfügen über etwa 160 Fahrzeuge[3]. Es wird folgendes angenommen:

- In jede Richtung einer Bahnstrecke fahren gleich viele Züge.
- Jede Linie bedient eine Strecke gleich häufig.
- Durch den zentralen Verbindungstunnel fahren alle Linien
- In den Hauptverkehrszeiten fahren die Züge jeder Linie in jede Richtung alle 15 Minuten, sonst alle 30 Minuten[1].

[3] http://de.wikipedia.org/wiki/S-Bahn_Stuttgart#Fahrzeugbestand

Im längsten Tunnel des Netzes, dem Verbindungstunnel (8.8 km), können die Züge in einem Abstand von etwa 500 m fahren[4]. Somit befinden sich maximal 17 Züge gleichzeitig in diesem Tunnel. Weiterhin wird angenommen, dass die Strecke zu den Hauptverkehrszeiten voll ausgelastet ist, zu den Nebenverkehrszeiten demnach nur zur Hälfte.
Für die restlichen Streckenabschnitte und Tunnel sind keine genauen Angaben zu der Verteilung der Züge zu finden. Da das Netz insgesamt 214 km umfasst und 160 Züge enthält, wird davon ausgegangen, dass sich diese gleichmäßig verteilen. Die Anzahl n der Fahrzeuge die sich auf einem Abschnitt der Länge l befinden, lässt sich dann mit Formel 1 berchnen.

[4]http://de.wikipedia.org/wiki/Verbindungsbahn_%28Stuttgart%29

3 Ergebnisse

Um mittels Gleichung 2.1 die Leistung, die fahrende Autos und Züge im Tunnel auf Grund der Luft, die sich vor sich herschieben verlieren, berchnen zu können, müssen einige Konstanten bekannt sein.
Es wird folgendes angenommen:

ρ_{Luft}	$1.29\ kgm^{-3}$ [5]
η_{Luft}	$17.1 \cdot 10^{-6}\ Pa \cdot s$ [6]
Auto: c_w	0.3 [7]
Auto: A_{Front}	$2.29\ m^2$ [8]
Zug: c_w	0.2 [9]
Zug: A_{Front}	$10.55\ m^2$ [10]

Berechnet man nun mit Hilfe dieser Angaben, sowie den vorher erläuterten vereinfachenden Annahmen, die Leistung, die die Luftpakete, welche Fahrzeuge vor sich herschieben, haben, erhält man als Summe für alle Tunnel Stuttgarts eine Leistung von 1.11 Megawatt. Da die Leistung einen Mittelwert über alle Verkehrslagen darstellt, kann die jährlich erzeugte Leistung mit:

$$W = P \cdot t = 35TJ \tag{4}$$

berechnet werden.
Für Schienenfahrzeuge kann selbiges gemacht werden, sodass man eine Leistung von 22 kW erhält. Über ein Jahr hin aufsummiert, führt dies anschließend du einer Energiemenge von 0.69 TJ. Die Leistung der Züge fällt damit deutlich geringer als die der Autos aus.
Vier Autotunnel sind so lang, dass eine zusätzliche Ausgleichsströmung infolge Temperaturdifferenzen entsteht. Dabei sprechen wir von Tunneln von 800 m bis 8800 m Länge. Um hier die Jahresenergiemenge zu berechnen, muss für jeden dieser vier Tunnel die durch Temperaturdifferenz resultierende Leistung über 12 Monate integriert werden. Die Leistung hatten wir bereits zu

$$P = \frac{1}{2}\rho\pi \cdot R^2 \left(\frac{R^2 \cdot p_0 \cdot |\frac{T_1}{T_0} - 1|}{4 \cdot \eta \cdot L} \right)^3$$

errechnet, wobei T_1 eine Funktion von x war. Diese Leistung muss an beiden Enden jedes Tunnels berücksichtigt werden, was für jeden der Tunnel zu einer Jahresenergie von

$$W = \int_{12\,\text{Monate}} 2 \cdot P \,\mathrm{d}x$$

führt. Führt man diese Rechnung mit *Maple* aus, so ergibt sich als Summe jedes Jahr für diese vier Tunnel zusätzlich 26,8 TJ.
Insgesamt kann man also aus den Luftströmungen in den Tunneln von Stuttgart nach unserer Modellierung 62,49 TJ herausholen.

[5] http://de.wikipedia.org/wiki/Luftdichte
[6] http://de.wikipedia.org/wiki/Viskosit%C3%A4t
[7] http://www.motor-talk.de/blogs/all-about/vw-passat-variant-b7-luftwiderstand-t3937804.html
[8] http://www.motor-talk.de/blogs/all-about/vw-passat-variant-b7-luftwiderstand-t3937804.html
[9] http://www.ice-treff.de/index.php?id=45444
[10] http://de.wikipedia.org/wiki/DB-Baureihe_481

4 Diskussion und Schlussfolgerung

Einige der vereinfachenden Annahmen, sind als strittig anzusehen, da sie keine gute Übereinstimmung mit der Realität zeigen. Im Folgenden soll daher kurz darauf eingegangen werden:

- Der Verkehr fließt zu allen Zeiten mit maximaler Geschwindigkeit: In der Realität kommen häufig Staus vor, sodass diese Annahme sehr vereinfachend ist. Eine Abschätzung der Staumenge innerhalb der Tunnel würde die Genauigkeit der Simulation deutlich erhöhen, lag uns allerdings nicht vor. Es wird demnach ein zu hoher Wert abgeschätzt.
- Ein Auto schiebt Luftmassen in alle Richungen: Dies ist eindeutig der Fall und Gleichung 2.1 berechnet daher die Leistung, die frei wird, wenn das Auto die Luftmassen verschiebt. Dabei ist praktisch und technisch, wenn überhaupt, nur die Luft, die parallel zur Fahrtrichtung verschoben wird, für die Energiegewinnung zu nutzen. Somit wird ein zu hoher Wert abgeschätzt.
- Züge in Tunneln: Hier ist die Verdrängung der Luft zu den Seiten des Zuges eher gering und somit der eben beschriebene Fehler auch.
- Abwärme durch Staus/Verkehr: Die Berechnung der Tunneltemperatur in langen Tunneln beruht auf dem Jahresmittel der Außentemperatur. Diese Temperatur dürfte zwar eine gute Näherung darstellen (besonders in den S-Bahn-Tunneln), jedoch müsste auch noch die Abwärme des Verkehrs berücksichtigt werden. Hierzu könnte man beispielsweise den Ansatz verfolgen, über die Wärmeableitung nach außen durch die Luft im Tunnel sowie den Bergstollen die Temperatur im Tunnel zu berechnen. Die zugeführte Energie ließe sich beispielsweise aus dem Spritverbrauch der Fahrzeuge und dem Heizwert von Benzin errechnen.
- Die Geothermiewärme spielt keine Rolle. Ob diese Annahme so stimmt, müsste mittels einzelner Messungen der Temperatur der Tunnelwände und deren Vergleich mit dem Jahresmittel bzw. dem Jahresmittel mit berücksichtigter Wärmezufuhr (siehe oben) geprüft werden.

Auch wenn die vorgestellten Ergebnisse hoffnungsvoll klingen, dass eine Rückgewinnung der Strömungsenergie in Tunneln sinnvoll ist, muss dies hinterfragt werden. Der Energiewert von vielen Terrajoule pro Jahr, welche wir genutzt werden könnten, ist deutlich zu hoch. Es ist technisch äußerst anspruchsvoll, wenn nicht gar unmöglich, einen schwachen, sehr turbulenten und ungerichteten Luftstrom für die Energiegewinnung zu nutzen. Eine Turbine wäre keine praktikable Möglichkeit, da diese erst bei gebündelten Strömungen, welche eine hohe Fließgeschwindigkeit haben, effizient einsetzbar ist. Einzig in U-Bahnröhren müsste man an Hand weiterer Messungen, wie hoch die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft wirklich sind, genauer analysieren, ob sich eine Zusammenarbeit mit Ingenieuren lohnen könnte, um diese kinetische Energie in elektrische Umzusetzen.
Es zeigt sich also, dass die Strömungen in den Tunneln Stuttgarts zwar eine Energie von 62.49 TJ beinhalten, ihre Energie jedoch nur schwer nutzbar ist.

Literatur

[1] GIANCOLI, D. C.: *Physik Lehr- und Übungsbuch*. 3., aktualisierte Auflage. Hallbergmoos : Pearson, 2010. – 474 S.