

Tunnelkraftwerk

Erzeugung von elektrischer Energie aus natürlich gene-rierten Luftströmungen in Tunnelbauwerken

Programm / Ausschreibung	Mobilität der Zukunft, Mobilität der Zukunft, MdZ - 2021 Verkehrsinfrastruktur	Status	abgeschlossen
Projektstart	01.06.2022	Projektende	30.06.2023
Zeitraum	2022 - 2023	Projektlaufzeit	13 Monate
Keywords	Tunnellüftung, Energieerzeugung, Luftströmungen		

Projektbeschreibung

Die Erzeugung von elektrischer Energie im eigenen Wirkungsbereich ist Wunsch und Notwendigkeit eines jeden großen Stromverbrauchers, wie dies z. B. Betreiber von Tunnelanlagen sind. Neben dem weit verbreiteten Einsatz von Photovoltaik ist auch die Nutzung von Geothermie (meist für Raumwärme) von Interesse. In den Fokus rückte bereits vor einiger Zeit aber auch die Möglichkeit in Straßentunneln vorherrschende, natürlich generierte Luftströmungen zur Erzeugung von Strom zu nutzen. Die Idee begründet sich darin, dass vorhandene mechanische Lüftungssysteme eigentlich den Großteil der Zeit im Standby Betrieb laufen, da vor allem in Tunnels mit Richtungs-verkehr der Betrieb einer mechanische Lüftung zur Erzielung des notwendigen Luftwechsels im Tunnel nicht mehr erforderlich ist. Andererseits erfordert die Nutzungssicherheit für Sonderfälle wie Stau oder sogar ein Brandereignis im Tunnel eine Lüftungsanlage.

Oft kommt es jedoch durch unterschiedliche meteorologische Bedingungen an den Portalen, oder thermisch getriebener Auftriebsströmungen zu Luftbewegungen im Tunnel. Die so generierte kinetische Energie könnte mittels geeigneter Maschinen in elektrische Energie umgewandelt werden. Eine vorhandene mechanische Lüftungsanlage ist prinzipiell in der Lage nicht nur eine Luftströmung zu erzeugen, sondern (bei entsprechender elektrischer Ausstattung) auch im Turbinen/Generator Betrieb aus einer Luftströmung wiederum elektrische Energie zu generieren (vgl. Windrad).

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die Idee der Stromgewinnung aus Luftströmungen in Tunnelanlagen nicht neu ist. Überschlägige Abschätzungen haben erbracht, dass das Potenzial einer Umwandlung von kinetischer in elektrische Energie in geringen Größenordnungen liegt. Im Zuge der Notwendigkeit der Erzeugung von elektrischer Energie aus nachhaltigen Quellen sind aber derartige Konzepte einer detaillierten Überprüfung auf Machbarkeit zu unterziehen.

Das gegenständliche Forschungsvorhaben gliedert sich wie folgt:

- Theoretische Potenzialabschätzung der zur Verfügung stehenden Energie in Bezug auf die in der Ausschreibung genannten Rahmenbedingungen von bis zu 10 m/s Luftgeschwindigkeit im Tunnelfahrraum sowie bis zu 20 m/s in Abluftschächten.
- Definition der notwendigen elektrotechnischen und maschinenbaulichen Erfordernissen zum Betrieb der Lüftungsanlage sowohl im Ventilator- als auch im Turbinenmodus.
- Erhebung der natürlich auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten im Fahr-raum und in Abluftschächten relevanter Tunnel im österreichischen Straßen-netz auf Basis bestehender Information.
- Beurteilung des real zu erwartenden Potenzials einer Nutzung der natürlich erzeugten Luftströmung zur Gewinnung

elektrischer Energie.

- Optimierungsvorschläge in Bezug auf Maschinentechnik (Elektrotechnik und Ventilator) und bauliche Ausgestaltung von Kanälen

Zur Klarstellung sei hier angeführt, dass eine Luftströmung im Tunnel, welche ausschließlich durch den Fahrzeugschub generiert wird, energetisch nicht nachhaltig genutzt werden kann, da diese Luftströmung erst mittels Energieeinsatz durch die Fahrzeuge (mit einem relativ schlechten Wirkungsgrad) erzeugt wird. Jeglicher Versuch der Nutzung dieser Energie würde fahrzeugseitig einen Mehrverbrauch von Energie hervorrufen und somit energetisch zu einem Nettoverlust führen.

Abstract

The generation of electrical energy in one's own sphere of activity is the desire and necessity of every big electricity consumer, such as operators of large transport infra-structures. In addition to the widespread use of photovoltaic, the use of geothermal energy (mostly for space heating) is of interest. For some time now, however, the focus has also been on the possibility of using naturally generated air flows in road tunnels to generate electricity. The idea is based on the fact that existing mechanical ventilation systems actually run most of the time in standby mode, since mechanical ventilation is no longer required to achieve the necessary air exchange in the tunnel, especially in tunnels with unidirectional traffic. On the other hand, safety considerations for special cases such as traffic jams or even a fire in the tunnel require a ventilation system.

However, different meteorological conditions at the portals or buoyancy forces often lead to air movements in the tunnel. The kinetic energy generated in this way could be converted into electrical energy by means of suitable turbines. The existing mechanical ventilation system is in principle not only able to generate an air flow, but also (with the appropriate electrical equipment) in turbine / generator operation to generate electrical energy from an air flow (e.g. like a wind turbine).

Basically, it should be noted that the idea of generating electricity from air flows in tunnels is nothing new. Rough estimates have shown that the potential for converting kinetic energy into electrical energy is only in a small order of magnitude. However, in the course of the necessity of generating electrical energy from sustainable sources, such concepts are worth to be subjected to a detailed check for feasibility.

The proposed research project is structured as follows:

- Assessment of the theoretical potential of the available energy based on the boundary conditions as given in the tender: of up to 10 m / s air speed in the traffic room and up to 20 m / s in exhaust air ducts.
- Definition of the necessary electrical and mechanical engineering requirements for the operation of the ventilation system, both in fan and turbine mode.
- Survey of the naturally occurring air flow velocities in the traffic room and in the exhaust air shafts of relevant tunnels in the Austrian road network on the basis of available information.
- Assessment of the expected potential of using the naturally generated air flow to generate electrical energy.
- Suggestions for optimization with regard to machine technology (electrical engineering and fan) and structural design of ducts

To clarify, it should be mentioned here that an air flow in the tunnel that is generated exclusively by vehicle thrust cannot be classified as sustainable for energy generation, since this air flow is generated by the energy consumed by the vehicles (with

relatively poor efficiency). Any attempt to use this energy would result in the vehicle consuming more energy and thus leading to a net energy loss.

Endberichtkurzfassung

Grundlegende Anmerkungen

Im Rahmen des Forschungsprojektes Tunnelkraftwerk (Förderprogramm Mobilität der Zukunft MdZ-VIT, FFG Projekt 893655) waren Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von meteorologisch oder thermisch bedingten Luftströmungen in Straßentunneln zur Stromproduktion zu untersuchen. Als Variationsparameter wurden unterschiedliche Längsgeschwindigkeiten der Luft im Tunnel bzw. einem Schacht vorgegeben. Nachdem nun jedoch der Wert der Längsgeschwindigkeit in einem Kanal (Tunnel bzw. Schacht) von vielen Faktoren abhängt, wurde die Fragestellung im Rahmen des Projektes unter Einbindung der Vertreter:innen der Fördergeber so erweitert, dass in einem ersten Schritt eine Potenzialanalyse für Standardtunnel (2-streifiger Querschnitt) mit unterschiedlichen Längen und meteorologischen Druckdifferenzen durchgeführt wurde. In einem zweiten Schritt wurden dann für österreichische Tunnelanlagen die treibenden Druckdifferenzen zwischen Portalen bzw. über Schächte erhoben und für ausgewählte Anlagen die mögliche nutzbare Jahresenergie berechnet.

Vorweg ist anzumerken, dass Luftströmungen, die durch den sogenannten Kolbeneffekt von fahrenden Fahrzeugen bewirkt werden, nicht berücksichtigt wurden. In so einem Fall würde es lediglich zu einer Umwandlung von mit Fahrzeugantrieben generierten Luftströmungen in elektrische Energie kommen. D.h. das Fahrzeug muss – mit im Allgemeinen schlechtem Wirkungsgrad – eine Luftströmung erzeugen, die in weiterer Folge dann wieder mit Verlusten in elektrische Energie umgewandelt werden würde. Somit würde letztendlich nur Exergie vernichtet bzw. in Anergie umgewandelt werden.

Die Leistung einer Turbine ist proportional zum diese Maschine durchströmenden Volumenstrom und der über die Maschine abgebauten Druckdifferenz. Somit ergibt sich bei einer Kanalströmung ein kubischer Zusammenhang zwischen Luftgeschwindigkeit und Leistung bzw. ein Zusammenhang zwischen Leistung und anstehender Druckdifferenz sowie einem vom Strömungswiderstand im Tunnel abhängigen Proportionalitätsfaktor. Aus dieser Beziehung lässt sich ableiten, dass je höher die Druckdifferenzen zwischen den Portalen bzw. über Schächte und je kürzer der Tunnel/Kanal ist, desto höher ist die mögliche generierbare elektrische Leistung.

Dies steht im Widerspruch zur Realität, da hohe meteorologisch bedingte Druckdifferenzen ausschließlich bei Tunneln auftreten, die einen größeren Gebirgszug unterqueren. Bei thermisch getriebenen Strömungen bedarf es Schächte mit entsprechenden Höhen, um eine relevante Energiemenge umwandeln zu können.

Weiters ist anzumerken, dass der Leistungsbedarf der bestehenden Ventilatoren (bei Strahlventilatoren im Bereich von 30 bis 90 kW, bei Axialmaschinen im Bereich von 100 bis 800 kW) um ein bis zwei Zehnerpotenzen höher liegt als jener, der bei Turbinenbetrieb (zwischen wenigen Watt und wenigen 10 kW) anfällt. Somit wäre der derzeit vorhandene elektrische Maschinenteil (Motor, Umrichter etc.) aufgrund der Eigenverluste in dessen Teillastbereich für einen Generatorbetrieb ungeeignet.

Generierbare Jahresenergiemenge

Die Berechnung der Jahresenergiemengen erfolgte auf Basis real vorherrschender Druckdifferenzen bei Tunnelanlagen im österreichischen Autobahn- und Schnellstraßennetz. Anhand der vorliegenden Messdaten wurden jene Tunnelanlagen für eine weitere Betrachtung ausgewählt, die eine höhere bis hohe meteorologisch bedingte Druckdifferenz aufweisen.

Betrachtet wurde die Nutzung der Luftströmung für folgende Szenarien:

- Turbinen im Fahrraum mit gleichem Durchmesser und in gleicher Anzahl wie Strahlventilatoren im Bestandstunnel
- Turbinen an den Enden eines über die gesamte Tunnellänge durchgehenden Luftkanals in den Abmaßen bestehender Kanäle bei Querlüftungen
- Turbinen am Schachtfuß oder Schachtkopf von Abluftschächten

Aufgrund der Tatsache, dass das Leistungsangebot aus meteorologisch bedingten Strömungen im unteren Prozentbereich der Nennleistung der bestehenden Lüftungsmaschinen liegt, ist bei allen Anlagen von gänzlich neuen, an das Leistungsspektrum angepassten elektromaschinellen Bauteilen (Generator, Umrichter usw.) auszugehen. Unter Berücksichtigung der aerodynamischen Bedingungen sowie der zu erwartenden Wirkungsgrade bei der Verstromung kann mit einer Jahresenergiemenge gem. folgender Tabelle gerechnet werden.

Erwartbare Jahresenergiemengen in [kWh]

Tunnel
SV im Fahrraum*
Luftkanal
Schacht

Kalcherkogel
260

Semmering
252

Arlberg/Albonaschacht

521

1943

19272

Bosruck

3440

5323

Gleinalm/Nordschacht

5390

5079

5545

Karawanken

1985

1645

Plabutsch Nordschacht

24538

* gemäß Betzschem Gesetz ist aufgrund der Ausweichströmungen bei frei angeströmten Windrädern mit einer maximalen Stromausbeute von 60% des angegebenen Wertes zu rechnen.

Erwartungsgemäß ist bei der Nutzung der Schachtströmung der Anteil der in Strom umwandelbare Jahresenergie gegenüber den anderen Formen der höchste. Naturgemäß sind da aber auch die baulichen Eingriffe am höchsten. Beim Albona Schacht des Arlbergtunnels stehen zwar die höchsten Druckdifferenzen an, die Nutzbarkeit dieses Schachtes für eine Stromerzeugung ist jedoch aufgrund des notwendigen Lüftungsbetriebes nur eingeschränkt. Somit wirkt sich das auf die Jahresenergiemenge negativ aus. Interessanterweise ergibt sich für den Plabutschtunnel Nordschacht ein hohes Potenzial, was auf die hohe Querschnittsfläche (hoher Volumenstrom) und die hohe Verfügbarkeit des Schachtes zurückzuführen ist.

Anzumerken ist jedoch, dass die Berechnung der Jahresenergiemenge beim Plabutsch aber auch beim Gleinalmtunnel aufgrund des eingeschränkten Datenmaterials größeren Unsicherheiten unterworfen ist.

Resümee

Die in diesem Projekt gestellte Forschungsfrage zur Nutzung der druckindizierten Luftströmung einer Tunnel- bzw. Kanalströmung zur Umwandlung in elektrische Energie wurde anhand von Anwendungen an realen Tunnelanlagen untersucht.

Betrachtet wurden ausschließlich Strömungszustände, die sich aufgrund meteorologischer und/oder thermischer Differenzen zwischen Ein- und Austritt einstellen. Nicht berücksichtigt wurden Strömungszustände, die sich aufgrund von Fahrzeugbewegungen im Tunnel einstellen, da dies nur einen Energietransfer vom Fahrzeug über die Luftströmung zu einer Nutzung in einer Turbine darstellt und somit gesamtheitlich betrachtet immer ein Exergieverlust eintritt.

Aus den angeführten Betrachtungen kann wie folgt geschlossen werden:

Elektro- und maschinentechnische Einrichtungen: Die derzeit vorhandenen Lüftungstechnischen Einrichtungen sind nicht für einen Betrieb zur Erzeugung von Strom geeignet. Derzeitige in den Tunneln installierte Strahlventilatoren haben einen elektrischen Leistungsbedarf im Bereich von 30 bis 90 kW. Dem steht gegenüber, dass bei Nutzung als Turbine eine elektrische Leistung im Bereich von einigen Watt bis ca. 1 kW anfallen würde. Bei Nutzung der bestehenden Querlüftungsanlagen (Axialventilatoren) liegt derzeit der Leistungsbereich (Nennleistung) der Abluftventilatoren zwischen 100 und 800 kW. Bei generatorischem Betrieb würde hier Leistungen im Bereich von < 1kW bis wenigen 10 kW anfallen. Somit ist der bestehende elektrische Teil (Motor, Umrichter, etc.) für einen generatorischen Betrieb überdimensioniert, wodurch die Verlustleistungen das vorhandene Energieangebot zu den meisten Zeiten übersteigen würde.

Längsgelüftete Tunnel: Meteorologisch bedingte Druckdifferenzen zwischen Portalen bewirken zwar Luftströmungen in Tunneln, will man diese energetisch nutzen, so sind im Bestfall der untersuchten Tunnel Jahresenergiemengen von ca. von ca. 260 kWh und nur im Fall der alpenquerenden langen Tunnel zwischen 3000 bis 5400 kWh zu erwarten. Dies entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von in etwa einem Zweipersonen-Haushalt. Der zur energetischen Nutzung dieser Energie notwendige elektro- und maschinentechnische Aufwand überschreitet diesen Nutzen.

Tunnel mit Zwischendecke und durchgehendem Lüftungskanal: Bei diesen Tunnelanlagen steht theoretisch eine größere Querschnittsfläche und somit ein höherer Volumenstrom zur Nutzung zur Verfügung. Die Analysen zeigten, dass dadurch die jährliche Energiemenge auf rund 5300 kWh gesteigert werden könnte. Da für derartige Anlagenkonfigurationen nicht auf Bestandsanlagen zurückgegriffen werden kann und zudem auch relevante bauliche Aufwände anfallen würden, erscheint eine Weiterverfolgung dieser Idee derzeit nicht zielführend.

Nutzung von Luftschächten (quergelüftete Tunnel): Bei diesen Anwendungen ist das Potenzial merklich höher. Zu beachten ist jedoch inwieweit ein Lüftungsschacht für derartige Nutzungen überhaupt zur Verfügung steht. Bei hohen Verfügbarkeiten, wie dies bei Abluft-Halbquerlüftungen in der Regel der Fall ist – könnten z.B. beim Plabutschunnel Nordschacht bei Nutzung des Abluftschachtes ca. an die 24500 kWh jährlich umgesetzt werden. Zu beachten ist jedoch, dass in derartigen

Anwendungsfällen der bauliche Aufwand wahrscheinlich am höchsten ist. Eine Nutzung der Bestandsventilatoren im Turbinenbetrieb scheint nicht machbar.

Vergleichsbasis: Nimmt man den Stromverbrauch eines durchschnittlichen 2-Personenhaushalts (inkl. Warmwasseraufbereitung) rund 3000 kWh pro Jahr (www.stromliste.at , Zugriff 9.2.2023) her, so lässt sich das Potenzial der durch Kanalströmungen generierbaren Jahresstrommenge einordnen.

Sicherheits- und steuerungsrelevante Aspekte :

Bei einer weiteren Verfolgung dieser Idee bei quergelüfteten Tunneln sind sicherheitstechnische Aspekte in die Betrachtung mit einzubeziehen. Gemäß österreichischer Vorschriften ist das Lüftungsziel bei einem Brandfall innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens ab Branderkennung zu erreichen. Dieser kurze Zeitraum ist notwendig, um während der Selbstrettungsphase eine undefinierte Rauchausbreitung im Tunnel weitestgehend zu vermeiden. Wird nun ein Lüftungselement und oder ein Schacht bzw. Kanal für andere Zwecke benötigt, so ist der notwendige Zeitraum zur Herstellung der notwendigen Ausgangssituation für einen Brandbetrieb sicherheitstechnisch in der Risikoanalyse zu betrachten und bewerten.

Sollte eine Nutzung der Längsströmung im Tunnel zur Stromproduktion weiterverfolgt werden, so ist steuerungs- und messtechnisch sicherzustellen, dass nur die „Überschussenergie“, d.h. jener Anteil, der über den durch den Fahrzeugschub erzeugtem, liegt, abgeschöpft wird.

Bei Weiterverfolgung der Idee einer Energienutzung aus Tunnelströmungen wäre zu allererst die Datenbasis zu vervollständigen. Des Weiteren wären tiefergehende Untersuchungen über die Umsetzung von druckindizierten Strömungen in elektrische Energie bei Kanalströmungen in einem großen Variations- bzw. Drehzahlbereich einer Maschine notwendig.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die Idee einer Verstromung druckindizierter Luftströmungen in einem Tunnel mit ausschließlicher Längslüftung beim Großteil der Straßentunnel nicht sinnvoll umsetzbar erscheint. Bei hohen Vertikalschächten, die ausschließlich im Brandfall genutzt werden, ist das theoretische Potenzial zur Nutzung der Auftriebsströmungen merklich höher. Will man diesen Pfad weiterverfolgen, wäre eine vertiefende strömungstechnische Untersuchung unter Einbeziehung realer Luftwege von Tunnelfahrraum bis Schachtaustritt sowie über die notwendigen baulichen und maschinentechnischen Einrichtungen – inklusive Betrachtung sicherheitstechnischer Aspekte – im Rahmen einer konkreten Pilotuntersuchung notwendig.

Projektkoordinator

- Technische Universität Graz