

# Bewertung der Energieeffizienz von Straßentunneln

Als Resultat einer Forschungsarbeit wurde ein Konzept und Werkzeug zur Verbesserung der Energieeffizienz von Straßentunneln erarbeitet. Tunnel werden basierend auf ihrem Energieverbrauch in Kategorien eingeteilt und Untersuchungen der maßgeblichen Verbraucher durchgeführt. Es resultieren Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Das entwickelte Werkzeug ist praxisnah und leistet einen Beitrag zur Zielerreichung der in der Schweiz vom Volk genehmigten Energiestrategie 2050. Mit den Untersuchungen wurde gezeigt, dass viele Tunnel ein Effizienzpotenzial von 25 bis 45 % durch Erneuerung von Anlagen, wie den Ersatz herkömmlicher Beleuchtung durch LED-Technik, aufweisen. Das größte Effizienzpotenzial lässt sich jedoch nur langfristig durch Gesamtanierungen ausschöpfen. Das Effizienzpotenzial von Betriebsoptimierungen dagegen ist eher gering und meist < 3 %. Nicht zu unterschätzen ist eine Überprüfung von Normen und Richtlinien, die zum Teil rein sicherheitstechnisch fokussiert sind.

## 1 Einleitung

Die Steuerung der Energieeffizienz im Tunnel beginnt mit der Beschaffung von Grundlagen, die für die Beurteilung der Energieeffizienz nötig sind. Das sind vorerst Energieverbrauchsdaten von Straßentunneln und deren Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA), die in einer sinnvollen Differenzierung vorhanden sind. Auf Basis derartiger Grundlagen erscheint es sinnvoll, einen Benchmark zu definieren, der, bei Erkennen eines Potenzials, eine Priorisierung der Maßnahmen zulässt.

Der vorliegende Beitrag zeigt am Beispiel des Schweizer Tunnelparks, wie ein Benchmark erstellt und genutzt werden kann, der auf der Grundlage einer Forschungsarbeit [1] für ein Konzept und Werkzeug zur Verbesserung der Energieeffizienz von Straßentunneln durchgeführt wurde.

## 2 Energieeffizienz und Sicherheit

Die Sicherheit auf der Straße wird grundsätzlich vom Fahrzeugführer, dem Fahrzeug und der baulichen und technischen Infrastruktur beeinflusst. Infrastrukturseitig tragen im Straßentunnel Beleuchtung, Lüftung, Beschilderung, Überwachungsanlagen und diverse weitere BSA zur Sicherheit im Tunnel bei. Das minimale Sicherheitsniveau ist in Normen und Richtlinien beschrieben.

Der Energieverbrauch von Straßentunneln entfällt praktisch zu 100 % auf die installierten Anlagen, ohne Betrachtung der

## Assessment of the Energy Efficiency of Road Tunnels

As the result of a research project, a concept and tool have been developed for the improvement of the energy efficiency of road tunnels. Tunnels are categorised according to their energy consumption and investigations are carried out of the significant consumers. The result is measured to improve the energy efficiency. The new tool is practical and can make a contribution to the achievement of the aims of the energy strategy 2050 approved by the Swiss people. The investigations showed that many tunnels have an energy efficiency potential of 25 to 45 % through the renewal of plant such as the replacement of conventional lighting by LED technology. The largest efficiency potential however can only be gained in the long term through overall refurbishment. The efficiency potential of operational optimisations, on the other hand, is slight and mostly < 3 %. What should not be underestimated is a revision of standards and guidelines, which are mostly aimed solely at safety measures.

Fahrzeuge. Die Frage, ob die BSA ihr Ziel auch mit weniger Energieeinsatz erreichen könnte, drängt sich auf. Wie viel Energie kann also eingespart werden, ohne dabei die Sicherheit unter das geforderte Niveau sinken zu lassen?

## 3 Analyse der Energieverbrauchsdaten

Die Analyse der Energieverbrauchsdaten ist eine wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung der Effizienz. Es muss hinreichend genau bekannt sein, wieviel Energie ein durchschnittlicher Tunnel verbraucht und von welchen Faktoren der Verbrauch mehrheitlich abhängt.

In der Schweiz wurde erstmals eine systematische Erhebung im Jahre 1994 durchgeführt, die 80 % des Tunnelbestands umfasste. Die Resultate zeigten schon damals, dass sowohl für Tunnel im Richtungsverkehr (RV) als auch für Tunnel im Gegenverkehr (GV) die normalisierten Energieverbräuche, aufgelöst nach Beleuchtung, Lüftung und Nebenanlagen, stark variieren. Tabelle 1 basiert auf einer Erhebung von 2011.

Verkehrsart	Mittelwert [MWh/(km · a)]
GV-Tunnel	298
RV-Tunnel	584

Tabella 1 Priorisierung am Beispiel einer Beleuchtungsanlage: Vergleich von Verbrauchswerten in GV- und RV-Tunneln

Die Durchführung von Regressionsanalysen zeigt, dass der Energieverbrauch wenig überraschend primär durch die Tunnellänge bestimmt wird. Beispielsweise hat das Verkehrsaufkommen keinen erkennbaren Effekt auf den Energieverbrauch.

Bild 1 zeigt die lineare Regression Länge vs. Energieverbrauch für GV- und RV-Tunnel. Der Regressionskoeffizient  $R^2$  zeigt, dass der Energieverbrauch mit hoher Signifikanz durch die Tunnellänge bestimmt wird.

In Bezug auf die Verbesserung der Energieeffizienz interessiert zudem, wie sich die relativen Anteile der Systeme am Gesamtenergieverbrauch eines Tunnels unterscheiden (Bild 2). Die Beleuchtung verbraucht mehr als die Hälfte der Energie, gefolgt von Nebeneinrichtungen und der Lüftung. Die übrigen fünf Anlagen verbrauchen zusammen etwa 15 % der Energie.

Die in Bild 2 dargestellte Verteilung des Energieverbrauchs basiert auf einem Tunnel mittlerer Länge. Bei längeren GV-Tunneln ist die Darstellung nicht mehr typisch, da der Anteil der Lüftung zunimmt.

Ein Vergleich von Energiewerten zwischen 1994 und 2011 ergibt ein interessantes Bild: Die spezifischen Energieverbräuche haben trotz Zunahme der verbauten Technik abgenommen (Tabella 2).

Die Datenanalyse ergibt, dass der variierende Anteil des Energieverbrauchs eines Tunnels zu etwa 75 % durch die Tunnel-

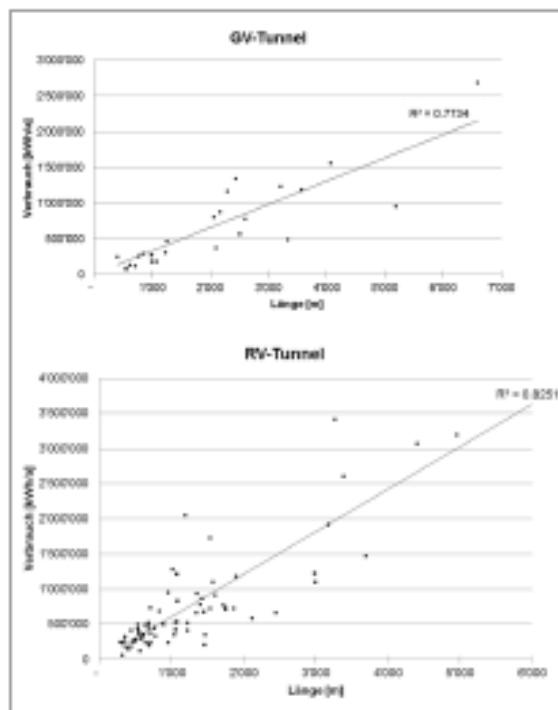


Bild 1 Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Tunnellänge

## Bewertung der Energieeffizienz von Straßentunneln

	1994	2011
Betrachtete Tunnelstrecke	118 km	233 km
Energieverbrauch für Tunnel der Nationalstraße	81 GWh	126 GWh
Energieverbrauch pro Kilometer Tunnelstrecke	690 MWh	540 MWh
Aufteilung Beleuchtung (B), Lüftung (L), Nebeneinrichtung und weitere BSA (N)	B = 61 % L = 15 % N = 24 %	B = 55 % L = 15 % N = 30 %

Tabella 2 Vergleich des Energieverbrauchs in den Jahren 1994 und 2011 nach [2], [3]



Bild 2 Anteile der Systeme am Gesamtenergieverbrauch eines Tunnels

länge erklärt werden kann. Das Hinzuziehen anderer Kenngrößen, wie z. B. Verkehrsaufkommen, Fahrspuren oder Lüftungstypen sowie Kombinationen davon, ergibt schlechtere Regressionen. Insofern erscheint die Kenngröße „Energie pro Kilometer und Jahr“ als die beste Größe für das Benchmarking.

## 4 Benchmarking

Benchmarking im Energiebereich ist weit verbreitet und wird für verschiedene Objekte verwendet, z. B. für Gebäude, Haushaltsgeräte, Leuchten und Fahrzeuge. Für Gebäude gibt es sogar ein Benchmarking-System, das die Bauten nach deren Energieeffizienz in Kategorien einteilt. Es erscheint sinnvoll, dieses bekannte Verfahren auch für Straßentunnel anzuwenden.

Als Messgröße ist der Energieverbrauch in kWh/(km · a) zweckmäßig; und zwar auf Basis der pauschalen, gesamten Energiemenge, da nur selten differenzierte Energiewerte vorliegen. Die Energie pro Kilometer und Jahr wird dann auf Strecken, nicht auf Röhrenkilometer, bezogen.

In Anlehnung an die Methodik im Gebäudebereich können damit Energiekategorien definiert werden. Der Übergang von Kategorie D zu E in Tabella 3 wurde auf den Bestandsdurchschnitt gelegt. Als Zielwert für einen Neubautunnel wurde der Übergang von Kategorie B zu C definiert. Der Zielwert für den Energieverbrauch eines Neubautunnels beträgt somit lediglich die Hälfte des Bestandsdurchschnitts.

Die Kategorie A (Tabella 3) wurde so gewählt, dass sie in der Praxis durch Neubautunnel mit starkem Fokus auf Energieeffizienz erreicht werden kann. Dazu sind neue Technologien und ein möglichst schlankes Design umzusetzen. Bauwerk und BSA müssen zusammen betrachtet und optimiert werden. Eine rein richtlinien-

## Bewertung der Energieeffizienz von Straßentunneln

Energiekategorie	GV-Tunnel [kWh/(km · a)]	RV-Tunnel [kWh/(km · a)]
A	< 100.000	< 200.000
B	100.000 – 150.000	200.000 – 300.000
C	150.000 – 200.000	300.000 – 400.000
D	200.000 – 300.000	400.000 – 600.000
E	300.000 – 400.000	600.000 – 800.000
F	400.000 – 500.000	800.000 – 1.000.000
G	> 500.000	> 1.000.000

Tabella 3 Energiekategorien

konforme Planung reicht nicht aus, um die Einstufung in Kategorie A zu erreichen. Auch wird ein effizienter Betrieb vorausgesetzt.

Die BSA wird nahe an der zulässigen Grenze betrieben (z. B. Beleuchtung, Lüftung); es existieren keine unnötigen Reserven. Fällt ein Bestandstunnel in die Kategorie A, so muss seine Konformität in Bezug auf Normen und Richtlinien überprüft werden. Auch muss im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung ausgeschlossen werden können, dass Teile des Objekts über eine nicht bekannte Einspeisung versorgt werden.

Ein Neubautunnel sollte mindestens den Übergang von Kategorie C zu Kategorie B erreichen. Auch Bestandstunnel können Kategorie B erreichen, sofern sie effizient betrieben werden und keine Besonderheiten aufweisen, wie z. B. überdimensionierte Zentralen oder viele Betriebsstunden der Lüftung.

Die Kategorien C und D sind per Definition besser als der Durchschnitt. Der Bestandsdurchschnitt ist als Übergang der Kategorie D zu E definiert. Die Kategorien E, F und G sind per Definition des Benchmarkings Tunnel, die überdurchschnittlich viel Energie verbrauchen. Der für die Einordnung verwendete Ener-

gieverbrauchswert ist zu plausibilisieren. Dazu ist das Messkonzept kritisch zu hinterfragen. Auch ist zu analysieren, ob in der betrachteten Zeit Umbauten stattgefunden haben oder besondere Ereignisse vorgefallen sind. Tunnel, die aufgrund einer Ersteinschätzung in die Energiekategorien E, F oder G fallen, sind einer vertiefenden Analyse zu unterziehen.

Mit diesem Vorgehen können Bestandstunnel einer energetischen Bewertung unterzogen werden. Es ist allerdings zu beachten, dass die Energieverbrauchswerte plausibel sind, eventuelle Spezialfaktoren wie Baustellen oder Schließungen berücksichtigt wurden und der Tunnel keine Sicherheitsdefizite aufweist und nur deshalb gut bei der Bewertung abschneidet.

## 5 Bewertung der Energieeffizienz

Für die Bewertung der Energieeffizienz von Bestandstunneln bietet sich ein standardisiertes Verfahren an. Darin sollten mindestens folgende Elemente vorkommen (Bild 3):

The image shows two pages from a survey report. The left page is the cover page, titled 'MUSTER Bewertung Energieeffizienz Tunnelname'. It includes a header with logos and contact information, a section for 'MUSTER Bewertung Energieeffizienz Tunnelname', and a table for 'Bewertungskriterien' with columns for 'Kriterium', 'Bewertung', 'Bewertung', and 'Bewertung'. The right page is titled '3. Kategorisierung' and contains a table with columns for 'Energiekategorie', 'GV-Tunnel', and 'RV-Tunnel'. It also includes a section for 'Zusätzliche Informationen' and a table for 'Zusätzliche Informationen' with columns for 'Kategorie', 'Bewertung', and 'Bewertung'.

Bild 3 Zwei Seiten aus dem Erhebungsbericht: Deckblatt und Kategorisierung



- Daten zum Objekt,
- Plausibilisierung des Energieverbrauchs,
- Kategorisierung,
- Detailanalyse,
- Maßnahmen,
- Beilagenverzeichnis.

Ein wichtiges Element in der Bewertung ist die Plausibilisierung. Die erhobenen Daten müssen stets mit aktuellen Ereignissen im Objekt abgeglichen werden, z. B. besondere Unterhaltungsmaßnahmen und Baustellen, Sperrungen infolge von Ereignissen, Umleitungen oder Tests.

## 6 Priorisierung und Optimierung

Die Optimierung orientiert sich vorerst an den unterschiedlichen Prozessen Betrieb, Ersatz von Anlagen, Anpassung an Normen und Richtlinien und vor allem an der Identifikation des Potenzials. Hier gilt die einfache Regel Energie = Leistung x Zeit, was bedeutet, dass Anlagen mit hohen Anschlussleistungen und langen Betriebszeiten das größte Potenzial aufweisen, aber auch sogenannte Dauerläufer mit kleineren Leistungen im Fokus stehen.

Ausgehend von der energetischen Beurteilung ist danach jede typische Anlage im spezifischen Objekt bezüglich des Potenzials zu bewerten: Ist das Effizienzpotenzial hoch, mittel, tief? Eine derartige Bewertung wird in den Tabellen 4 und 5 beispielhaft dargestellt.

Ergibt die Priorisierung einen ausgewiesenen Handlungsbedarf, kann mittels detaillierter Analyse eine Maßnahme formuliert werden.

## 7 Handlungsanweisungen

Zusammenfassend werden folgende Empfehlungen als zielführend betrachtet:

- Messkonzepte flächendeckend implementieren, damit die Grundlagen für die Güte des Objekts ermittelt werden können,
- Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz anwenden, denn ohne Umsetzung von erarbeiteten Prozessen erfolgt keine Veränderung,
- Energieeffizienz in der Planung stärker fordern und auch überprüfen,
- Anreizsysteme einführen: Planer sollten z. B. für ihren Einsatz zugunsten der Energieeffizienz vergütet werden,
- Eventuelles Energiemanagement nach überprüfbareren Prozesssystemen einführen (z. B. ISO 50001).

## Literatur

[1] Frey, S., Riess, I., Walte, U.: Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln. Forschungsbericht 1581 der Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT). Amstein + Walthert Progress AG, 2016.  
 [2] Bundesamt für Strassen Schweiz: Energiebericht zu den Nationalstrassen in Betrieb. Jahresbericht 2011.  
 [3] Steinmann, U., Boral, J.-P.: Erhebung des Elektrizitätsverbrauchs bestehender Strassentunnel. Materialien zu RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1994.

Effizienzpotenzial	Tief	Mittel	Hoch	Maßnahmen
Betriebsoptimierung			x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsoptimierung ist bei großen Betriebszeiten erforderlich,</li> <li>• Prüfung der Mess- und Schaltwerte der Betriebslüftung,</li> <li>• Prüfung der Notwendigkeit bei Sonderformen der Lüftung (z. B. Taupunktlüftung).</li> </ul>
Technologie/Ersatz		x		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ersatz von Strahlventilatoren durch energieeffiziente Einheiten (z. B. gekröpfte Schalldämpfer),</li> <li>• Regelung von Axialventilatoren mit Frequenzumrichter oder Laufschaufelverstellung.</li> </ul>
Anpassung Richtlinien		x		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überprüfung von Vorgaben aus der Projektgenehmigung, z. B. Absaugung zur Vermeidung von Portalabluft,</li> <li>• Auf Dauerbetrieb (Überdruck) der Lüftung von Sicherheitsstollen verzichten.</li> </ul>

Die Überprüfung der Betriebsstunden der Ventilatoren ist die entscheidende initiale Maßnahme im Bereich der Lüftung. Basierend auf den Betriebsstunden ist über das Erfordernis einer Detailanalyse zu entscheiden.

Tabella 4 Priorisierung am Beispiel einer Lüftungsanlage

Effizienzpotenzial	Tief	Mittel	Hoch	Maßnahmen
Betriebsoptimierung		x		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung Fahrbahnleuchtdichte, ggf. Dimmen,</li> <li>• Dynamische (verkehrsabhängige) Steuerung (im Zusammenhang mit LED).</li> </ul>
Technologie/Ersatz			x	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Helle Beläge und Wände,</li> <li>• LED-Beleuchtung.</li> </ul>
Anpassung Richtlinien		x		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kriterium Leuchtdichte Wand sollte mindestens 80 % der Leuchtdichte der Fahrbahn betragen.</li> </ul>

Es wird geschätzt, dass durch den Ersatz konventioneller durch LED-Beleuchtung ca. 50 % der Energie eingespart werden kann. Dies entspricht ca. 20 bis 30 % des Gesamtverbrauchs. Durch helle Beläge und Wände sowie optimierte Steuerung sind weitere Energieeinsparungen möglich.

Tabella 5 Priorisierung am Beispiel einer Beleuchtungsanlage