



Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln

Amélioration de l'efficacité énergétique des tunnels routiers

Improving the Energy Efficiency of Road Tunnels

Amstein + Walthert Progress AG
Samuel Frey, Dipl. Umwelt-Natw. ETH
Ingo Riess, Dr. sc. techn. Dipl. Masch.-Ing. TU
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Brüniger AG
Peter Wildi, Dipl. El. Ing. FH

**Forschungsprojekt AGT 2014/005_ENG auf Antrag der
Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln

Amélioration de l'efficacité énergétique des tunnels routiers

Improving the Energy Efficiency of Road Tunnels

Amstein + Walthert Progress AG
Samuel Frey, Dipl. Umwelt-Natw. ETH
Ingo Riess, Dr. sc. techn. Dipl. Masch.-Ing. TU
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH

Brüniger AG
Peter Wildi, Dipl. El. Ing. FH

**Forschungsprojekt AGT 2014/005_ENG auf Antrag der
Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Urs Welte, Amstein + Walthert Progress AG

Mitglieder

Samuel Frey, Amstein + Walthert Progress AG

Ingo Riess, Amstein + Walthert Progress AG

Peter Wildi, Brüniger AG

Begleitkommission

Präsident

Christoph Lehmann, HDZ Elektroingenieure AG

Mitglieder

Cedric Joseph (bis 2015), ASTRA, Bern

Eugen Fuchs (ab 2016), ASTRA, Bern

Roman Meier, ASTRA, Winterthur

Werner Furrer, Amt für Betrieb Nationalstrassen Uri

Daniel Schuler, BBS Ingenieure AG

Christian Scholer, Scholer Projektpartner GmbH

Heinz Dudli, selbständiger Berater Lichttechnik

Patrick Bachofner (ab 2016), Bachofner & Partner AG

Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	9
	Résumé	11
	Summary	13
1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage.....	15
1.2	Ziel.....	15
1.3	Energieeffizienz und Sicherheit.....	16
1.4	Eingrenzung	16
1.5	Hypothesen	17
2	Vorgehen	19
3	Umfrage	21
3.1	Ziel.....	21
3.2	Methode	21
3.3	Resultate	21
3.4	Schlussfolgerungen.....	24
4	Grundlagen	25
4.1	Grundlagen Schweiz	25
4.1.1	Erste systematische Erhebung 1994	25
4.1.2	Zweite systematische Erhebung 2011	25
4.1.3	Energieverbrauch Gotthardtunnel.....	25
4.2	Grundlagen international.....	26
4.2.1	Recherche	26
4.2.2	Deutschland	26
4.2.3	Österreich.....	26
4.2.4	Frankreich	27
4.2.5	Holland	27
4.2.6	Belgien	27
4.2.7	Spanien	27
4.2.8	Norwegen.....	27
4.2.9	Schlussfolgerung.....	27
5	Analyse Energieverbrauchsdaten	29
5.1	Energieverbrauchsdaten	29
5.2	Analyse.....	29
5.2.1	Grundsätzliche Fragestellung	29
5.2.2	Vergleich GV/RV-Tunnel.....	29
5.2.3	Regressionsanalysen	29
5.2.4	Relative Anteile der BSA.....	32
5.3	Vergleich Energieverbrauchswerte 1994 - 2011	33
5.4	Vergleich national / international	33
5.5	Schlussfolgerungen.....	34
6	Benchmarking	35
6.1	Definition	35
6.2	Benchmarking im Energiebereich	35
6.3	Benchmarking Energieverbrauch Strassentunnel.....	36
6.3.1	Messgrösse (Kennwert)	36

6.3.2	Tunnelkategorien	36
6.3.3	Energiekategorien	36
6.3.4	Übersicht Benchmarking	38
6.4	Kritische Auseinandersetzung	39
7	Optimierungsmassnahmen.....	41
7.1	Typen von Optimierungsmassnahmen	41
7.1.1	Energetische Betriebsoptimierung	41
7.1.2	Ersatz von Anlagen	41
7.1.3	Anpassung von Normen und Richtlinien.....	41
7.2	Identifikation des Optimierungspotenzials	42
7.3	Energieversorgung.....	43
7.3.1	Transformatoren	43
7.3.2	USV-Anlage	45
7.3.3	Lokalsteuerung	46
7.3.4	Notstrom Dieselgeneratoren	46
7.3.5	Sicherheitsstollen	46
7.3.6	Photovoltaik	46
7.4	Beleuchtung	48
7.4.1	Umfang der Beleuchtung	48
7.4.2	Anforderungen Leuchtdichte.....	48
7.4.3	Leuchtmittel.....	49
7.4.4	Helle Oberflächen im Tunnel	51
7.4.5	Dunkle Annäherungsstrecke.....	52
7.4.6	Beleuchtungssteuerung	52
7.4.7	Optische Leiteinrichtung	53
7.4.8	Fluchtwegbeleuchtung	54
7.4.9	Alternative Konzepte.....	54
7.5	Lüftung	55
7.5.1	Energieevaluation	55
7.5.2	Effizienzpotential Lüftung.....	56
7.5.3	Einsatz der Lüftung: Betriebslüftung.....	60
7.5.4	Einsatz der Lüftung: Ereignislüftung	60
7.5.5	Einsatz der Lüftung: Portalluftabsaugung.....	61
7.5.6	Einsatz der Lüftung gegen Geruchsbelastung.....	62
7.5.7	Einsatz der Lüftung: Taupunktlüftung.....	62
7.5.8	Einsatz der Lüftung: Sicherheitsstollen.....	63
7.6	Signalisation.....	64
7.7	Überwachungsanlage	64
7.8	Kommunikation & Leittechnik	64
7.9	Kabelanlage (Infrastruktur)	65
7.10	Nebeneinrichtung	65
8	Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln	67
8.1	Beschreibung	67
8.1.1	Energiewert/Plausibilisierung.....	67
8.1.2	Kategorisierung.....	68
8.1.3	Detailanalyse	68
8.1.4	Energetische Optimierungsmassnahmen.....	68
8.2	Validierung	69
8.2.1	Milchbuckeltunnel	69
8.2.2	Uetlibergtunnel	69
8.2.3	Gebietseinheit V.....	69
8.2.4	Schlussfolgerung	69
9	Anpassung von Normen und Richtlinien	71
10	Energiemesskonzepte	73

11	Schlussfolgerungen und Ausblick	75
11.1	Hypothesen	75
11.2	Quantifizierung des Effizienzpotentials	75
11.3	Empfehlungen	76
11.4	Weiterer Forschungsbedarf.....	77
	Anhänge	79
	Glossar	93
	Literaturverzeichnis	95
	Projektabschluss	97
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	101

Zusammenfassung

Als Resultat dieser Forschungsarbeit wurde ein Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln erstellt. Mit Hilfe des Konzepts werden Tunnel basierend auf ihrem Energieverbrauch in Energiekategorien eingeteilt und Untersuchungen der massgeblichen Verbraucher durchgeführt. Es resultieren Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Das Konzept ist ein praxisnahes Werkzeug und leistet einen Beitrag zur Zielerreichung der Energiestrategie 2050 im Bereich der Nationalstrassen.

Viele Tunnel weisen ein Effizienzpotential von 25-45% durch Erneuerung von Anlagen auf. Das grösste Potential liegt im Ersatz von herkömmlichen Beleuchtungen durch LED-Technologie. Diverse Versuche bestätigen den energetischen Nutzen der LED-Beleuchtung für die Durchfahrtsbeleuchtung wie auch für die Adaptationsbeleuchtung. Auch im Bereich der Nebeneinrichtung sind massgebliche Verbesserungen möglich. Das grosse Effizienzpotential von 25-45% lässt sich jedoch nur langfristig im Zuge von Gesamtsanierungen ausschöpfen. Das Effizienzpotential durch energetische Betriebsoptimierung dagegen ist eher gering (meist kleiner 3%, nur in Spezialfällen grösser). Weitere Effizienzsteigerung kann durch Anpassung von Normen und Richtlinien erzielt werden, ohne dabei die Sicherheit zu verringern.

Es resultierten weitere Erkenntnisse aus den Untersuchungen:

- Die Autoren haben festgestellt, dass die Energiemesskonzepte für Strassentunnel nach wie vor grosses Verbesserungspotential aufweisen. Für viele Objekte wird der Energieverbrauch nicht spezifisch erhoben, sondern verbirgt sich in einem Streckenwert. Auch werden zum Teil grosse Verbraucher, welche mit dem Tunnel nichts zu tun haben, über die gleiche Einspeisung versorgt. Daher ist es oft nicht möglich, Tunnel energetisch zu bewerten.
- Die Lebenszykluskosten eines Tunnels werden mehrheitlich in der Planung bestimmt und sind im Betrieb nur noch wenig beeinflussbar. In der Planung soll die Energieeffizienz daher stärker gefordert und geprüft werden. Im Moment fehlen Vorgaben an die Planer, energieeffiziente Lösungen zu entwickeln.
- Im Bereich der Nationalstrassen scheinen kaum Anreize für einen effizienteren Umgang mit Energie vorhanden zu sein. Der Eigentümer hat im Moment keine Handhabe, um den Betreiber in diesem Bereich zu steuern. Auch erscheinen die Verantwortlichkeiten und Prozesse des Eigentümers noch nicht ausreichend geregelt.
- Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beim Eigentümer Handlungsbedarf im Bereich Energiemanagement vorhanden ist. Im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 sollte ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001 eingeführt werden.

Résumé

Le résultat de ce travail de recherche consiste en un concept d'amélioration de l'efficacité énergétique de tunnels routiers. A l'aide de ce concept, les tunnels sont classés en catégories énergétiques et les postes de consommation significatifs sont analysés. Il en résulte la formulation de mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. Ce concept est un outil pratique et contribue à l'atteinte de l'objectif d'Energie 2050 dans le domaine des routes nationales. De nombreux tunnels présentent un potentiel d'amélioration de 25 à 45 % par le biais de renouvellement d'installations. Le plus fort potentiel réside dans le remplacement de l'éclairage conventionnel par une technologie LED. Divers essais confirment l'avantage de l'éclairage LED pour l'éclairage de traversée et d'adaptation. Des améliorations sont également possibles dans le domaine des installations auxiliaires. Le plus fort potentiel d'amélioration n'est cependant atteignable que dans le cadre d'une remise en état complète d'un tunnel. L'amélioration obtenue par des optimisations énergétiques d'exploitations est revanche réduit (généralement inférieur à 3%, seuls quelques cas spéciaux sont supérieurs à cette valeur). D'autres augmentations de l'efficacité sont atteignables grâce à la modification de normes et de directives, sans pour autant en affecter la sécurité.

Les autres conclusions :

- Les auteurs constatent que les concepts de mesure de l'énergie des tunnels routiers présentent toujours un fort potentiel d'amélioration. La consommation spécifique d'un objet est souvent noyée dans celle d'un secteur entier. Dans certains cas, des gros consommateurs, n'ayant pas de relation avec le tunnel considéré, sont connectés sur la même alimentation. Il n'est de ce fait pas possible d'évaluer ces tunnels énergétiquement.
- Les coûts du cycle de vie d'un tunnel sont majoritairement déterminés en phase de planification, et ne peuvent plus vraiment être optimisés en phase d'exploitation. De ce fait, l'efficacité énergétique devrait être davantage encouragée et vérifiée durant la phase de planification. Actuellement, les planificateurs n'ont pas d'exigence de recherche de solution optimisées énergétiquement.
- Il ne semble pas que les acteurs des routes nationales soient stimulés en vue d'une consommation d'énergie optimisés. Le propriétaire n'a actuellement pas de levier pour piloter les exploitants dans ce sens. De plus, les responsabilités et processus du propriétaire ne semblent pas suffisamment établies.
- En résumé, on constate que des mesures sont à prendre dans le domaine de la gestion de l'énergie par les propriétaires. Un système de gestion de l'énergie selon la norme ISO 50001 devrait être considéré, en relation avec la stratégie d'Energie 2050.

Summary

As a result of this research project a concept for improving the energy efficiency of road tunnels was developed. With the help of this concept, tunnels are categorised based on their energy consumption and the major energy consumers are analysed. As a result, measures for the improvement of energy efficiency are identified. The concept is a practical tool contributing to achieve the objectives specified in the federal energy strategy 2050 in the area of national roads.

The efficiency potential due to renewal of systems is in the range of 25-45% for many tunnels. The exchange of conventional lighting systems with state of the art LED technology bares the largest energy saving potential. A number of field tests prove that the use of LED lighting is beneficial in terms of energy efficiency (for traffic corridor lighting and adaptation lighting). Significant improvements are also possible for the ancillary tunnel facilities. The large energy efficiency potential in the range of 25-45% can only be tapped in a long term perspective in the course of refurbishment projects. The efficiency potential that could be achieved via optimisation of systems (regulation, control, adjustment of operation) is rather small (for most tunnels less than 3%, only in special cases more). By adjustments of guidelines and standards further efficiency improvements are possible without reducing the safety of tunnels.

Further findings:

- The authors could see that the energy measuring concepts still show large potential for improvement. For many tunnels the energy consumption is not measured specifically. Often only a road section is measured disguising the actual consumption of a single tunnel object. In many cases large consumers that have nothing to do with the tunnel are supplied via the tunnel feed, making it impossible to assess the tunnel energetically.
- The life cycle costs of a tunnel are mostly defined in the stage of planning. In the stage of operation they can hardly be influenced. Therefore more focus shall be given to energy efficiency in the stage of planning. At the moment, requirements for the planners to develop energy efficient solutions are missing.
- It seems that in the field of federal roads there are hardly any incentives to use energy in an efficient way. The owner does not have a system or tool to lead the operator. Furthermore, the owners' own responsibilities and processes are not yet defined in a sufficient manner.
- We conclude that in the light of the federal energy strategy 2050 there is a certain need for action with regard to the owners' energy management approach. An energy management system according to ISO 50001 should be taken into consideration.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 soll der Gesamtenergieverbrauch der Schweiz massgeblich reduziert werden. Auch die Nationalstrasse muss ihren Beitrag leisten, um die angestrebten Energieziele zu erreichen. Die Strassentunnel sind die wesentlichen Energieverbraucher auf der Nationalstrasse, was ein gewisses Energieeffizienzpotential vermuten lässt. Das vorliegende Forschungsprojekt hat das Energieeffizienzpotential der Strassentunnel untersucht und ein Werkzeug zur Beurteilung und Verbesserung der Energieeffizienz erarbeitet.

Das Forschungsprojekt wirkt im Rahmen der Energiestrategie 2050 im Bereich Mobilität / G7 Verbesserung der Energieeffizienz der Verkehrsinfrastruktur / M7.3 Reduktion des Energieverbrauchs für den Betrieb der Nationalstrasse. Folgende Abbildung zeigt die Massnahmen im Bereich Mobilität mit dem Wirkungsbereich des vorliegenden Projekts [1]:

Massnahmengruppen	Massnahmen
G6 Verstärkte Nutzung der Verkehrsinfrastruktur zur Energieerzeugung	M6.1 Geothermische Energiegewinnung aus Nationalstrassentunnels
	M6.2 Nutzung von Lärmschutzwänden der Nationalstrassen zur Installation von Photovoltaikanlagen (Abklärungsmassnahme)
	M6.3 Pilotprojekt Überdachung Nationalstrasse zur Installation von Photovoltaikanlagen
	M6.4 Energieproduktion öV-Infrastruktur (erneuerbare Energien) mit Pilotprojekt
G7 Verbesserung der Energieeffizienz der Verkehrsinfrastruktur	M7.1 Energieeffiziente Bauweise im Nationalstrassenbau
	M7.2 Energieeinsparung beim Betrieb der öV-Infrastruktur
	M7.3 Reduktion des Energieverbrauchs für den Betrieb der Nationalstrasse
G8 Verschärfung der Vorschriften und Verstärkung der Anreize zur Erhöhung der Energieeffizienz von Strassenfahrzeugen	M8.1 Verschärfung der (bestehenden) CO ₂ -Zielwerte für Personenwagen
	M8.2 Reifenetikette zur Förderung von sicheren, leisen und energieeffizienten Reifen
	M8.3 Energieetikette für weitere Fahrzeugkategorien
	M8.4 CO ₂ -Zielwerte für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)
	M8.5 LED Tagfahrlichter
G9 Verbesserung der Energieeffizienz des öffentlichen Verkehrs (Betrieb)	M9.1 Anreiz-Mechanismen
	M9.2 Einsatz energieeffizienter Schienenfahrzeuge (Abklärungsmassnahme)
	M9.3 Sensibilisierung der Unternehmen des öffentlichen Verkehrs
G10 Förderung des effizienten Einsatzes der Transportmittel	M10.1 Nachhaltige und energieeffiziente Mobilität (Allgemein und spezifisch aus Sicht der Infrastrukturbetreiber und Mobilitätsanbieter)
	M10.2 Güterumschlag Strasse / Schiene (Forschungsprogramm)

Abb. 1 Massnahmen der Energiestrategie 2050 im Bereich Mobilität

1.2 Ziel

Das vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Grundlagen für die Verbesserung der Energieeffizienz von bestehenden Strassentunneln zu schaffen. Durch Analyse der Energieverbrauchsdaten von Strassentunneln und deren Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) wird ein Benchmark zur energetischen Tunnelbewertung erstellt. Es werden Optimierungsmassnahmen zur Ausschöpfung des Effizienzpotenzials vorgeschlagen. Benchmark und Optimierungsmassnahmen werden in einem Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Einzeltunneln integriert. Das Konzept wird an exemplarischen Tunneln angewendet und validiert.

Energieeffizienz ist gemäss ISO 50001 [3] eine Komponente der Energy Performance eines Unternehmens oder einer Organisation. Das vorliegende Forschungsprojekt will einen Beitrag zur Verbesserung der Energy Performance des ASTRA leisten, in dem es ein Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln zur Verfügung stellt.

Folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Elemente der Energy Performance gemäss ISO 50001:

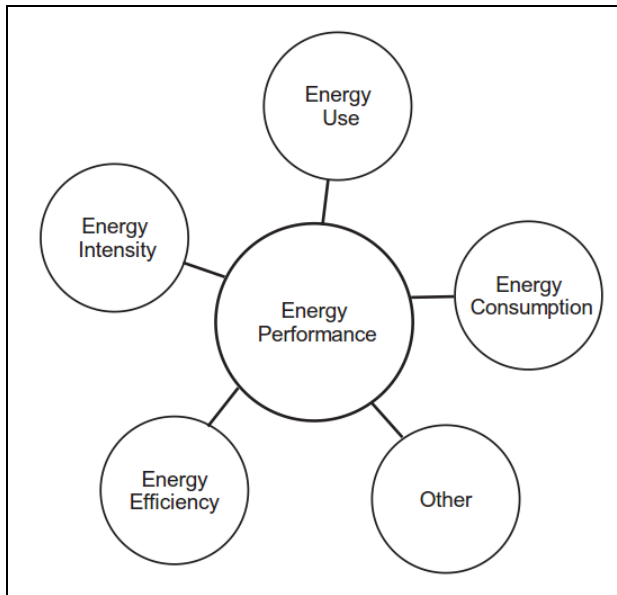


Abb. 2 Konzeptuelle Darstellung der Energy Performance gemäss [3]

1.3 Energieeffizienz und Sicherheit

Die Sicherheit auf der Strasse wird grundsätzlich vom Lenker, dem Fahrzeug sowie der baulichen und technischen Infrastruktur beeinflusst. Infrastruktureitig tragen im Strassentunnel diverse Anlagen der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) zur Sicherheit bei. Beleuchtung, Lüftung, Signalisation, Überwachungsanlagen, sowie diverse weitere BSA leisten ihren Beitrag zur Sicherheit im Tunnel. Der minimale Sicherheitslevel ist in Normen und Richtlinien beschrieben.

Die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) in Strassentunneln hat zum Ziel, die Sicherheit und Verfügbarkeit der Tunnelobjekte zu gewährleisten. Neben verschiedener Instandhaltungstätigkeiten benötigt die BSA aber auch erhebliche Mengen an elektrischer Energie. Der Energieverbrauch von Strassentunneln entfällt zu 100% auf die BSA. Die Frage, ob die BSA ihr Ziel auch mit weniger Energieeinsatz erreichen könnte, drängt sich im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 auf. Oder anders formuliert: Wie viel Energie kann eingespart werden, ohne dabei die Sicherheit unter das normativ geforderte Niveau sinken zu lassen?

1.4 Eingrenzung

Das vorliegende Forschungsprojekt befasst sich mit der Verbesserung der Energieeffizienz von bestehenden Strassentunneln, welche im ordentlichen Betrieb sind. Es geht dabei ausschliesslich um die elektrische Energie. Folgende Aspekte sind nicht Bestandteil der Betrachtung:

- Energie zur Erstellung oder Sanierung eines Tunnelbauwerks, graue Energie
- Energieproduktion (z.B. über Nutzung von Bergwasser)
- Kommerzielle Aspekte der Energiebeschaffung

1.5 Hypothesen

Für die Forschungsarbeit wurden im Projektantrag folgende Hypothesen aufgestellt:

- Unterschiede im längenspezifischen Energieverbrauch sind auch innerhalb der Tunnelkategorien (Gegenverkehr, Richtungsverkehr) zum Teil erheblich, was auf unterschiedliche Betriebspraxis hindeutet.
- Der Energieverbrauch kann je nach Ist-Zustand um 5-20% gesenkt werden.
- Das Sparpotential kann bis 2020 durch effiziente Massnahmen ausgeschöpft werden.

Diese Hypothesen werden im Kapitel 11.1 beantwortet.

2 Vorgehen

Umfrage

Es wurde eine internationale Umfrage zum Thema Energieeffizienz von Strassentunneln durchgeführt. Ziel der Umfrage war, die Wichtigkeit der Thematik im internationalen Umfeld zu ermitteln und abzuklären, ob im Ausland bereits Methoden zur energetischen Bewertung bzw. Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln existieren.

Grundlagen

Nationale wie auch internationale Daten zum Energieverbrauch von Tunneln wurden gesammelt. Die Datengrundlage der Schweizer Tunnel für die weitere Betrachtung wurde plausibilisiert und bereinigt. Das Ziel dieses Schrittes war die Erzeugung einer sauberen Datengrundlage für die Analysen.

Analyse Energieverbrauchsdaten

Die Energieverbrauchsdaten der Schweizer Tunnel wurden vertieft analysiert. Die internationalen Daten wurden ebenfalls analysiert, jedoch nicht für das Benchmarking verwendet. Das Ziel der Analyse der Energieverbrauchsdaten war, ein Zusammenhang zwischen Objekteigenschaften und Energieverbrauch zu ermitteln. Ebenfalls wurden die Tunnelkategorien und die Messgrösse für das Benchmarking ermittelt.

Benchmarking

Es wurde ein Benchmarking zur energetischen Tunnelbewertung erstellt (in Anlehnung an den Gebäudebereich). Tunnel werden gemäss ihrer Verkehrsführung (Gegenverkehr, Richtungsverkehr), Länge und ihrem Energieverbrauch in unterschiedliche Kategorien eingeteilt. Das Ziel des Benchmarkings ist, Tunnel in Bezug auf den Energieverbrauch vergleichen zu können.

Optimierungsmassnahmen

Die Gesamtheit der BSA wurde bezüglich Optimierungspotenzial analysiert und die Optimierungsmassnahmen abgeleitet. Die Anlagen wurden anhand ihrer Leistung und Betriebsdauer bewertet. Der Bericht enthält ein Kapitel pro Anlage gemäss der AKS-Richtlinie des ASTRA [18].

Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz

Das Benchmarking sowie die Optimierungsmassnahmen wurden in einem Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz zusammengefasst. Das Konzept ist ein kompaktes Dokument von wenigen Seiten. Es stellt eine Arbeitshilfe zur energetischen Bewertung von einzelnen Strassentunneln dar.

Weitere Erkenntnisse z.B. zu Messkonzepten und Energiemanagement wurden ebenfalls festgehalten.

3 Umfrage

3.1 Ziel

Die Umfrage hatte das Ziel, die Wichtigkeit des Themas "Energieeffizienz von Strassentunneln" im internationalen Kontext zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden Betreiber/Eigentümer sowie Experten/Planer zu verschiedenen Aspekten der Energieeffizienz befragt.

3.2 Methode

Es wurde ein Fragebogen erstellt, dessen Auswertung einen Überblick der vorherrschenden Expertenmeinungen ermöglichen soll. Im Fragebogen wurden die Tunnelbetreiber und -experten gebeten, ihre Einschätzung verschiedener Aussagen zur Energieeffizienz von Strassentunnel abzugeben.

Zu den Bereichen Energieverbrauch, Optimierungspotential, Richtlinien und Massnahmen wurden Thesen formuliert, deren Gültigkeit die Befragten in fünf Stufen zwischen "stimmt gar nicht" bis zu "stimmt völlig" einschätzen konnten.

3.3 Resultate

Insgesamt wurden 28 Personen aus elf Ländern befragt. Alle angefragten Personen haben sich an der Umfrage beteiligt. Einige haben die Fragebogen weitergeleitet, um zusätzliche Daten zur Verfügung stellen zu können. Das Thema Energieeffizienz ist bei den Befragten auf grosses Interesse gestossen.

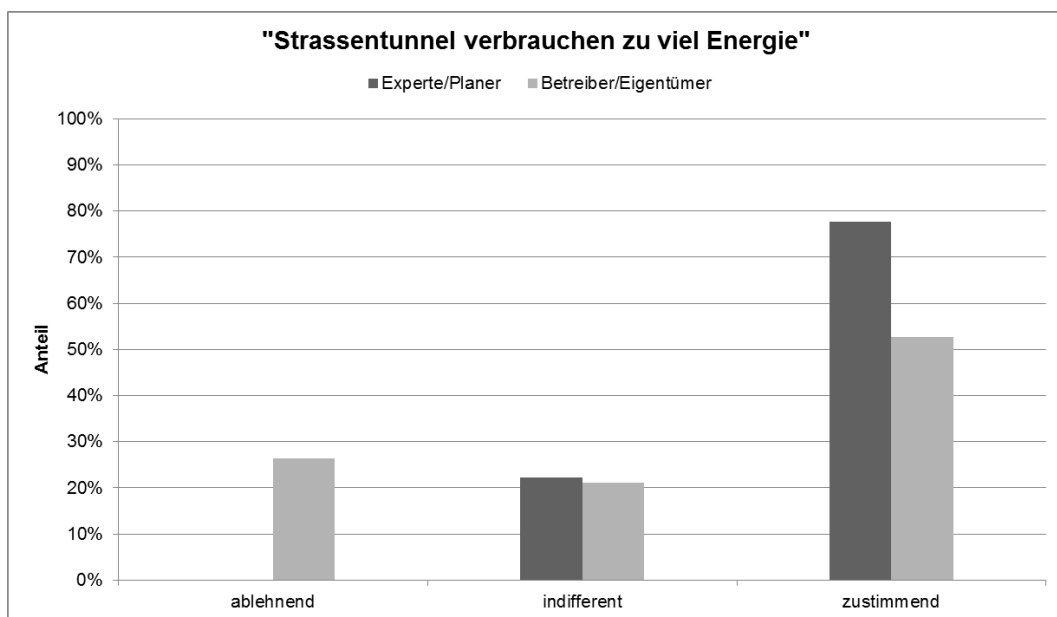


Abb. 3 Einschätzung des Energieverbrauchs der Strassentunnel

Die Experten/Planer sind sich fast geschlossen einig: Der Energieverbrauch von Strassentunneln ist generell hoch. Auch bei den Betreibern wird der Energieverbrauch als hoch eingeschätzt. 61% der befragten Personen sind dieser Ansicht. Die Zustimmung der Experten/Planer ist dabei noch höher als jene der Betreiber. Als bedeutende Energieverbraucher werden genannt: die Beleuchtung, die Tunnellüftung und die Klimatisierung der Nebenräume.

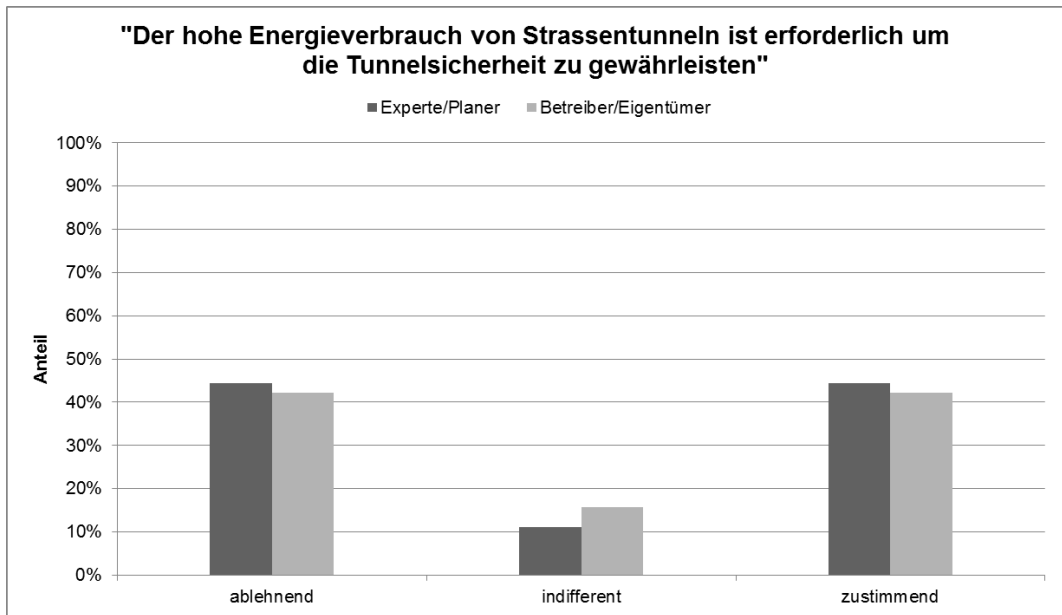


Abb. 4 Einschätzung zu Verbrauch und Sicherheit

Weniger einheitlich ist die Einschätzung, wenn in der Frage die Tunnelsicherheit und der Energieverbrauch in Beziehung zueinander gestellt werden. Scheinbar besteht bei knapp der Hälfte der befragten Betreiber und Planer die Befürchtung, dass eine Optimierung des Energieverbrauchs nicht ohne eine Einschränkung der Tunnelsicherheit möglich sei.

Andererseits besteht wiederum Einigkeit, dass es ein grosses betriebliches Potential zur Erhöhung der Energieeffizienz gibt. 68% aller Befragten stimmen dieser Aussage zu. Als betriebliche Massnahmen werden organisatorische Massnahmen und eine verbesserte Anlagenregelung genannt.

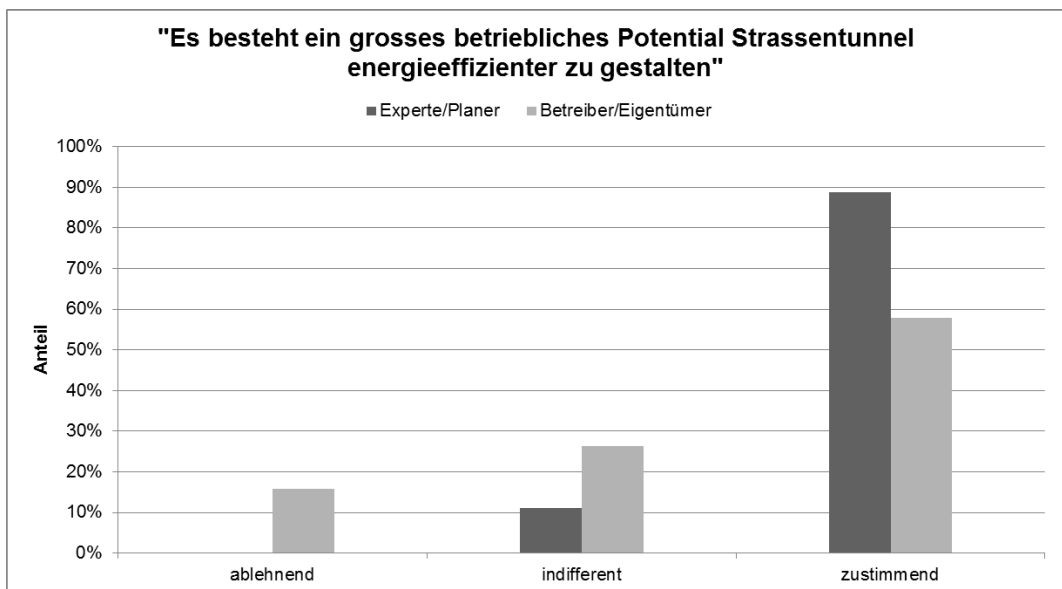


Abb. 5 Einschätzung des betrieblichen Optimierungspotentials

Ähnlich ist die Einschätzung des technologischen Optimierungspotentials. 75% der Befragten stimmen zu, dass durch neue Technologien, wie z.B. eine Umstellung der Tunnelbeleuchtung auf LED, die Energieeffizienz erhöht werden kann.

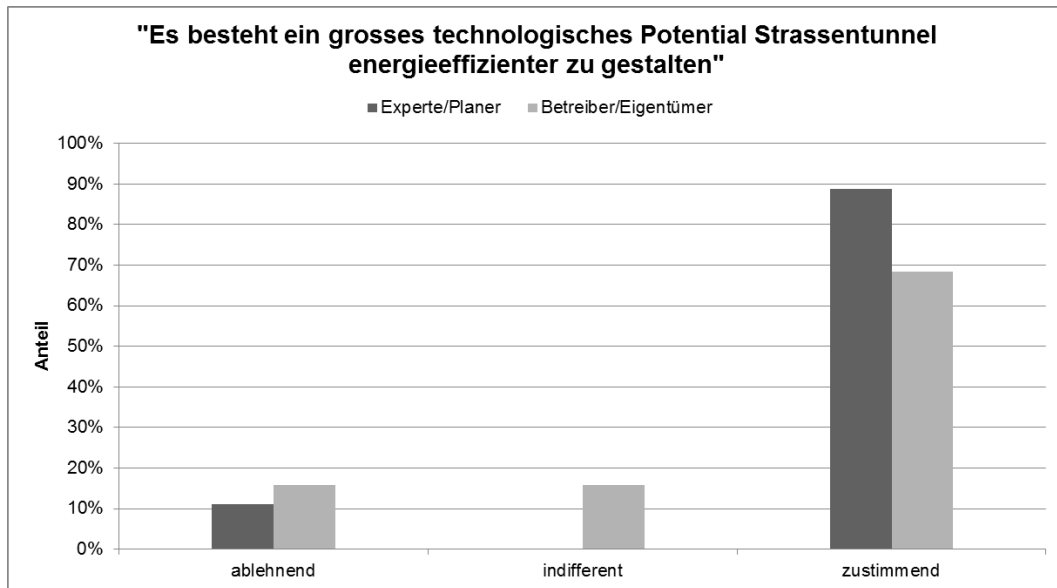


Abb. 6 Einschätzung des technologischen Optimierungspotentials

Nach den ersten vier Fragen ist zu schliessen, dass ein betriebliches und technisches Einsparpotential gesehen wird und dass der Energieverbrauch allgemein als hoch eingeschätzt wird.

Die folgende Frage zielt auf den Zusammenhang zwischen den Richtlinien und der Energieeffizienz. 71% der befragten Personen sehen in den geltenden Normen und Richtlinien keine genügende Berücksichtigung der Energieeffizienz. Der Fokus von Richtlinien ist generell auf der Tunnelsicherheit. Auch wenn in den letzten 15 Jahren wiederholt Überarbeitungen und Anpassungen der Richtlinien erfolgten, gehen sie auf den effizienten Einsatz von Energie kaum ein.

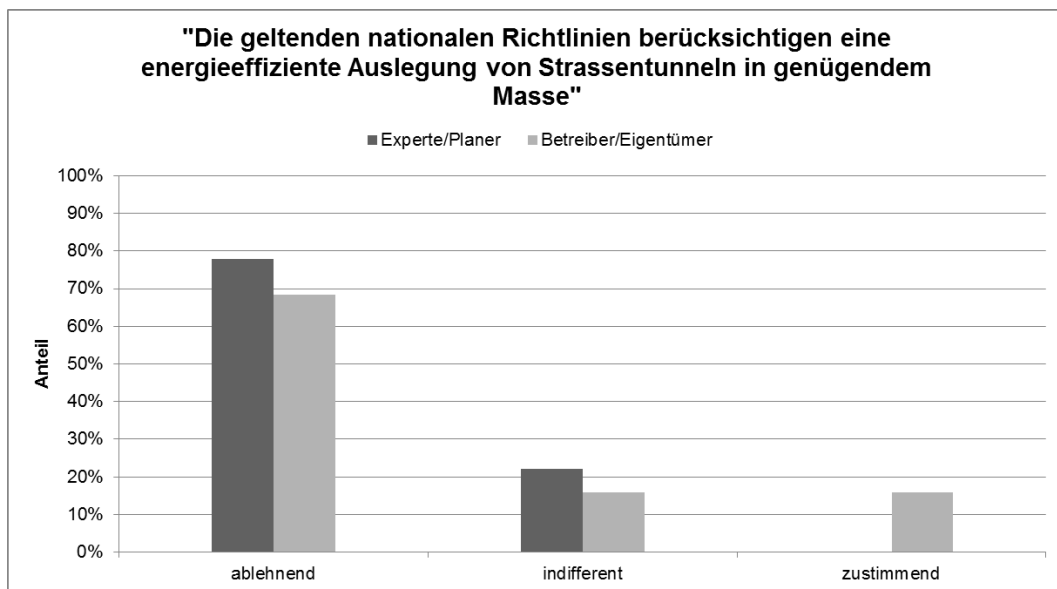


Abb. 7 Berücksichtigung der Energieeffizienz in geltenden Richtlinien

Die Betreiber sind sich uneinig, ob bei Neubau- und Sanierungsprojekten das Energieeinsparpotential ausgeschöpft wird. Bei der Beantwortung dieser Frage wird auf die geltenden Richtlinien verwiesen, in denen Energieeffizienz wenig thematisiert wird. Zudem kann eine wiederholte Erhöhung der Anforderungen dazu führen, dass Anlagen konser-

vativ ausgelegt werden. Zum Teil werden sogar Reserven angelegt, um eine zukünftige Erhöhung der Anforderungen zu antizipieren.

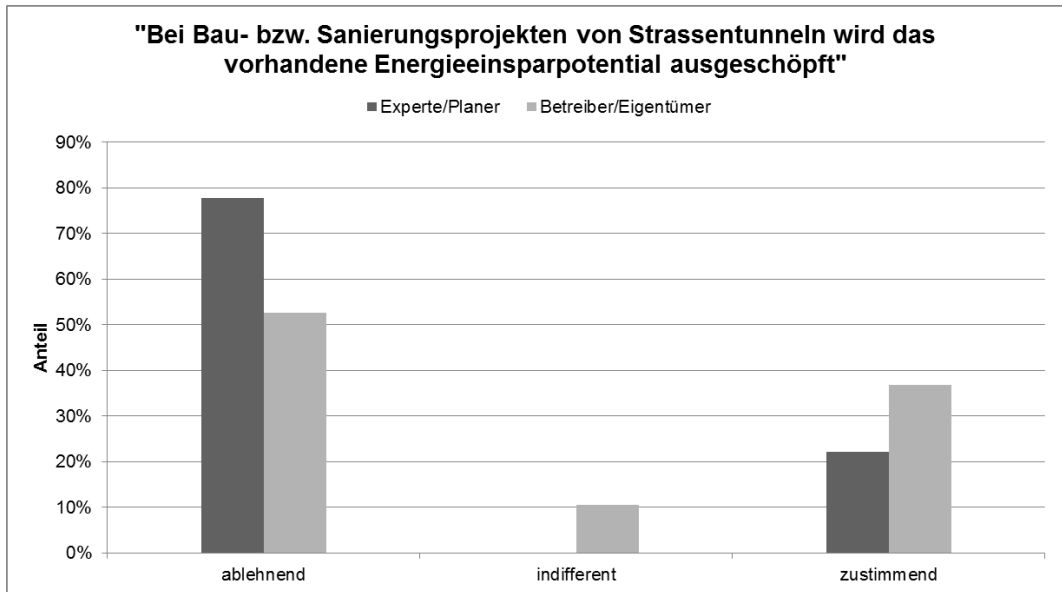


Abb. 8 Berücksichtigung des Energieeinsparpotentials in der Projektierung

3.4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Umfrage können in Form von fünf Thesen zusammengefasst werden:

- Strassentunnel verbrauchen zu viel Energie.
- Es ist umstritten, ob der grosse Energieverbrauch für die Gewährleistung der Tunnel-sicherheit erforderlich ist.
- Es bestehen technologische und betriebliche Einsparpotentiale.
- Die geltenden Richtlinien berücksichtigen die Energieeffizienz zu wenig.
- Energieeinsparpotentiale werden in Projekten nicht ausreichend ausgeschöpft.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Bereich Energieeffizienz von Strassentunneln in diversen europäischen Ländern Handlungsbedarf über den ganzen Lebenszyklus besteht.

4 Grundlagen

4.1 Grundlagen Schweiz

4.1.1 Erste systematische Erhebung 1994

Im Jahr 1994 wurden die Energieverbrauchsdaten der Schweizer Strassentunnel des Nationalstrassennetzes erstmals systematisch erhoben [4]. Die Erhebung erfolgte für rund 80% der damals auf dem Nationalstrassennetz vorhandenen Tunnelstrecken. Die Resultate zeigten, dass sowohl für Tunnel im Richtungsverkehr wie auch für Tunnel im Gegenverkehr die normalisierten Energieverbräuche (aufgelöst nach Beleuchtung, Lüftung und Nebenanlagen) stark variieren. Es wurden Kenngrössen zur energetischen Beurteilung der Beleuchtung und der Lüftung ermittelt.

In der Folge der grossen Tunnelbrände (Montblanc, Tauern, Gotthard) wurden die Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) national wie auch international verschärft. Die vor rund zwanzig Jahren erhobenen Energieverbräuche entsprechen daher nicht mehr dem heutigen Zustand, da viele Tunnel baulich, technisch oder betrieblich verändert wurden.

4.1.2 Zweite systematische Erhebung 2011

Das ASTRA hat im Energiebericht 2011 die Energieverbrauchsdaten von 152 Strassentunneln ausgewertet [2]. Diese 152 Tunnel decken rund 90% der Tunnelstrecke auf dem Nationalstrassennetz ab. Im Jahr 2011 waren auf dem Netz der Nationalstrassen 228 Tunnel mit einer Streckenlänge von 233 km in Betrieb. Die Strassentunnel verbrauchen ca. 85% der elektrischen Energie für den Betrieb des gesamten Nationalstrassennetzes. Der durchschnittliche Energieverbrauch der Nationalstrassentunnel betrug 2011 0.54 Gigawattstunden pro Streckenkilometer. Auf dem Nationalstrassennetz werden zukünftig rund 270 Tunnelobjekte mit insgesamt rund 290 Streckenkilometer vorhanden sein [8]. Basierend auf diesen Zahlen wird vermutet, dass insgesamt ein grosses Energieeinsparpotential vorhanden ist. Geht man von 10% möglicher Energieeinsparung aus, so ergeben sich jährliche Energieeinsparungen von 15 bis 16 Gigawattstunden. Dies entspricht dem jährlichen Elektrizitätsverbrauch von ca. 3'500 Haushalten in der Schweiz.

4.1.3 Energieverbrauch Gotthardtunnel

Der Gotthardtunnel ist der grösste Energieverbraucher auf dem Nationalstrassennetz. Zu seinem Energieverbrauch existieren gute Aufzeichnungen. Aus der Begleitkommission (GE XI) wurden dem Projektteam Energieverbrauchszahlen des Gotthardtunnels von 1981 bis 2015 zugestellt:

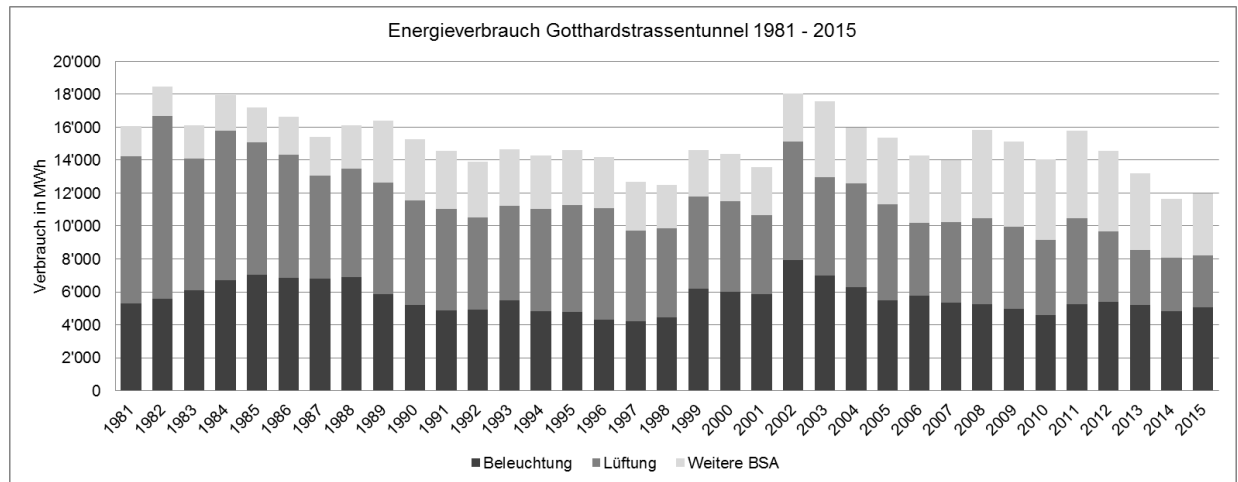


Abb. 9 Energieverbrauch des Gotthardtunnels

Der Gotthardtunnel wies kurz nach seiner Eröffnung einen Spitzenwert von über 18'000 MWh auf. In den folgenden Jahren konnte der Energieverbrauch durch Betriebsoptimierung reduziert werden. Nach dem Brand im Jahr 2001 wurde der Tunnel sicherheitstechnisch aufgerüstet. Der dadurch entstandene Mehrverbrauch konnte über die folgenden Jahre erneut durch Betriebsoptimierung reduziert werden. Gemäss den Aussagen der Gebietseinheit XI ist mit einem Energieverbrauch von ca. 12'000 MWh das Potential für Betriebsoptimierung praktisch ausgeschöpft. Beim Gotthardtunnel ist der hohe Anteil der Lüftung am Gesamtverbrauch auffallend. Im Gegensatz zu kurzen Gegenverkehrstunneln oder Richtungsverkehrstunneln im Allgemeinen muss die Lüftung im Gotthardtunnel praktisch permanent im Betrieb sein, um eine ausreichende Luftqualität im Fahrraum sicherzustellen. Aus der Grafik geht hervor, dass gerade der Anteil der Lüftung durch Betriebsoptimierung über die Jahre am meisten reduziert werden konnte, wobei die "weitere BSA" (also alle BSA ausser Beleuchtung und Lüftung) über die Jahre mehr Energie verbraucht. Bei der Beleuchtung scheint kein Trend ableitbar.

4.2 Grundlagen international

4.2.1 Recherche

Als Resultat der internationalen Abklärungen wurden dem Projektteam aus diversen europäischen Ländern Energieverbrauchswerte zugestellt. Die Datenqualität sowie der Umfang der zugestellten Daten variieren stark. Die Daten wurden dazu verwendet, die Energieverbrauchsdaten der Schweizer Tunnel zu verifizieren. Das Benchmarking wurde mit den offiziell bekannten Schweizer Werten durchgeführt.

4.2.2 Deutschland

Aus Deutschland wurden Energieverbrauchswerte (kWh/Monat) für zehn Tunnelobjekte über die Jahre 2011 bis 2014 zugestellt. Mit der Übermittlung der Daten wurden zusätzliche Informationen angegeben, die einer ersten Plausibilisierung der Daten entsprechen. So wurde angegeben, dass einzelne Tunnel in Abweichung von der Richtlinie auf ein tieferes Beleuchtungsniveau ausgelegt wurden. Bei anderen Tunneln sind Nebenanlagen, wie eine Autobahnmeisterei in den Verbrauchsdaten enthalten. Da der Betrieb der Strassentunnel nicht von einer zentralen Stelle aus erfolgt, sind die Daten nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Tunnel in Deutschland.

4.2.3 Österreich

Aus Österreich wurde eine Gesamtauswertung aller 158 von der ASFiNAG betriebenen Tunnel zugestellt. Darin werden fünf Tunnelkategorien unterschieden. Die Kategorien werden je nach Lüftungssystem (natürliche Lüftung, Längslüftung und Querlüftung) und

nach Verkehrsart (Richtungs- und Gegenverkehr unterschieden. Der Begriff Querlüftung wird in Österreich im Allgemeinen anders verwendet als in der Schweiz: Gemeint sind allgemein Lüftungssysteme mit Absaugung im Ereignisfall.

4.2.4 Frankreich

In einer Studie aus dem Jahr 1998 wurden etwa sechzig Strassentunnel in Bezug auf den Energieverbrauch analysiert [7]. Die Tunnel wurden gemäss Lüftungskonzept in drei Gruppen eingeteilt (natürliche Lüftung, Längslüftung, Absaugung). Innerhalb jeder Gruppe wurde der Energieverbrauch als Funktion der Tunnellänge linear approximiert.

4.2.5 Holland

In Holland wurden visionäre Überlegungen zum energieautarken Tunnel der Zukunft angestellt (Zero Energy Tunnel) [6]. Das Fernziel dieses Ansatzes ist, dass Tunnel in der Zukunft ihren eigenen Energieverbrauch durch Energieerzeugung decken. Die Studie befasst sich primär mit der Energiegewinnung aus dem Tunnel bzw. seiner Umgebung und macht nur untergeordnet Empfehlungen zur Steigerung der Energieeffizienz.

4.2.6 Belgien

Aus Belgien wurden Energieverbrauchswerte für zwei innerstädtische Tunnel zugestellt.

4.2.7 Spanien

Aus Spanien wurde ein Datensatz mit den Energieverbrauchswerten für ca. 200 Tunnel bzw. Tunnelröhren zugestellt.

4.2.8 Norwegen

Aus Norwegen wurden Energieverbrauchswerte für 18 Tunnel für die Jahre 2014 und 2015 zugestellt.

Zudem wurde von einem Projekt für den Kjøladalstunnel berichtet. In dem abgelegenen Tunnel, für den derzeit keine Stromversorgung existiert, soll die Tunnelbeleuchtung lokal über Photovoltaik versorgt werden. Die Beleuchtung wird dabei nur eingeschaltet, wenn die Verkehrsüberwachung die Annäherung von Fahrzeugen meldet.

4.2.9 Schlussfolgerung

Die Energieeffizienz von Strassentunneln scheint in den betrachteten Ländern von unterschiedlicher Bedeutung zu sein. In einigen Ländern wurden breit angelegte Analysen des Energieverbrauchs durchgeführt. Ein Benchmarkingansatz oder ein Prozess zur Verbesserung der Energieeffizienz scheint jedoch in keinem der betrachteten Länder zu existieren.

5 Analyse Energieverbrauchsdaten

5.1 Energieverbrauchsdaten

Der Energiebericht 2011 [2] dient als Datengrundlage für die Analysen in diesem Bericht. Für die Analyse wurde der Datensatz folgendermassen bereinigt:

- Es wurden nur Tunnel einbezogen, welche in den Geltungsbereich der SIA 197/2 fallen (Tunnel über 300 Meter Länge).
- Es wurden nur Tunnel einbezogen, für welche der Energieverbrauch individuell erfasst wurde (keine Tunnelketten oder Abschnitte mit offenen Strecken).
- Es wurden keine Galerien einbezogen.

Es resultierte eine Datengrundlage mit 102 Objekten.

Die im Energiebericht 2011 publizierten Energieverbrauchswerte wurden nicht weiter hinterfragt. Es ist grundsätzlich möglich, dass spezielle Umstände wie Sanierungen, Tests oder Unfälle in einzelnen Objekten zu einem abnormalen Energieverbrauch geführt haben könnten. Solche Fälle bringen eine gewisse Unsicherheit in die Betrachtung, welche jedoch aufgrund der vielen Tunnelobjekte akzeptiert werden kann.

5.2 Analyse

5.2.1 Grundsätzliche Fragestellung

Welche Faktoren (z.B. Länge, Anzahl Röhren, Anzahl Fahrspuren, Verkehrsaufkommen) bestimmen den Energieverbrauch eines Tunnels? Die durchgeführte Datenanalyse hatte zum Ziel, einen möglichst einfachen und logisch begründbaren Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und tunnelspezifischen Faktoren zu finden. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Regressionsanalysen durchgeführt.

5.2.2 Vergleich GV/RV-Tunnel

Die Mittelwerte der auf den Kilometer normalisierten jährlichen Energieverbrauchswerte (Kilowattstunden pro Kilometer und Jahr) von Gegenverkehrstunneln und Richtungsverkehrstunneln unterscheiden sich signifikant. Dies wurde mit einem t-Test nachgewiesen. Folgende Tabelle enthält die Mittelwerte für die beiden Verkehrsarten:

Verkehrsart	Mittelwert [kWh/(km*a)]
Gegenverkehrstunnel	298'000
Richtungsverkehrstunnel	584'000

5.2.3 Regressionsanalysen

Es wurden folgende linearen Regressionen untersucht:

- Energieverbrauch aus Tunnellänge
- Energieverbrauch aus Fahrzeugkilometer (Tunnellänge x DTV)
- Energieverbrauch aus Röhrenkilometer
- Energieverbrauch aus Fahrstreifenkilometer

Die Analysen erfolgten jeweils für alle Tunnel gesamthaft und gesondert pro Tunnelkategorie gemäss [2]. Die Regressionsanalysen haben ergeben, dass der Energieverbrauch primär durch die Tunnellänge bestimmt wird. Die übrigen Regressionsanalysen ergaben keine brauchbaren Zusammenhänge. Beispielsweise hat das Verkehrsaufkommen keinen erkennbaren Effekt auf den Energieverbrauch. Dies hängt damit zusammen, dass die Lüftung auch bei Objekten mit hohem Verkehrsaufkommen in der Regel nur selten läuft.

Folgende Abbildungen zeigen die lineare Regression Länge vs. Energieverbrauch für Gegenverkehrstunnel und Richtungsverkehrstunnel. Die Kenngrösse R^2 wird Regressionskoeffizient genannt und gibt an, welcher Teil der Varianz des Energieverbrauchs durch die Tunnellänge erklärt wird. Ein R^2 von 0.7971 sagt aus, dass 79.71% der Varianz des Energieverbrauchs durch die Tunnellänge erklärt wird.

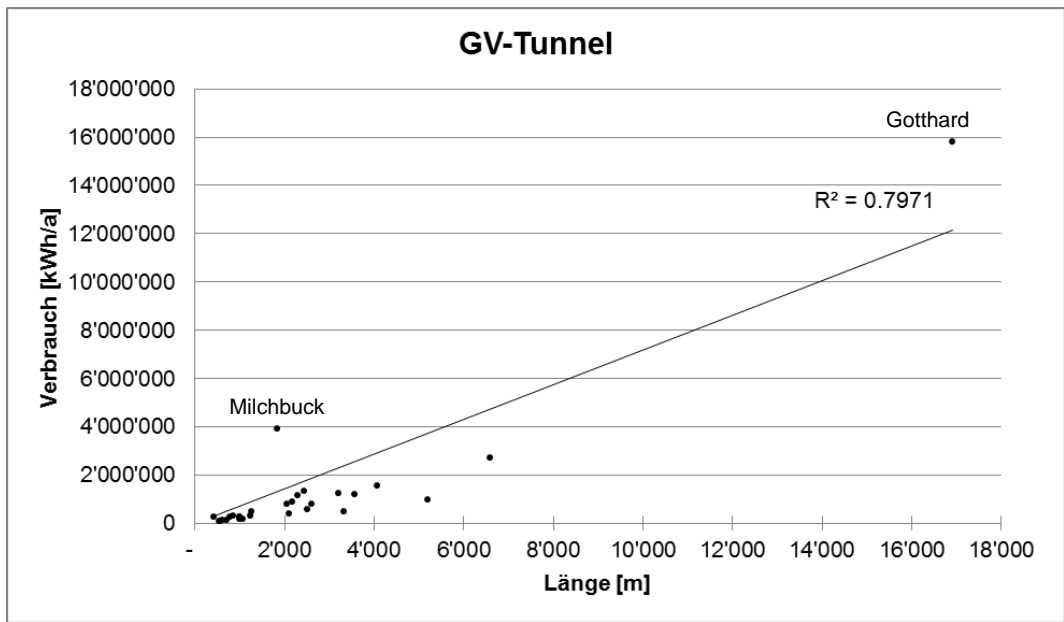


Abb. 10 Länge vs. Energieverbrauch für Tunnel mit Gegenverkehr

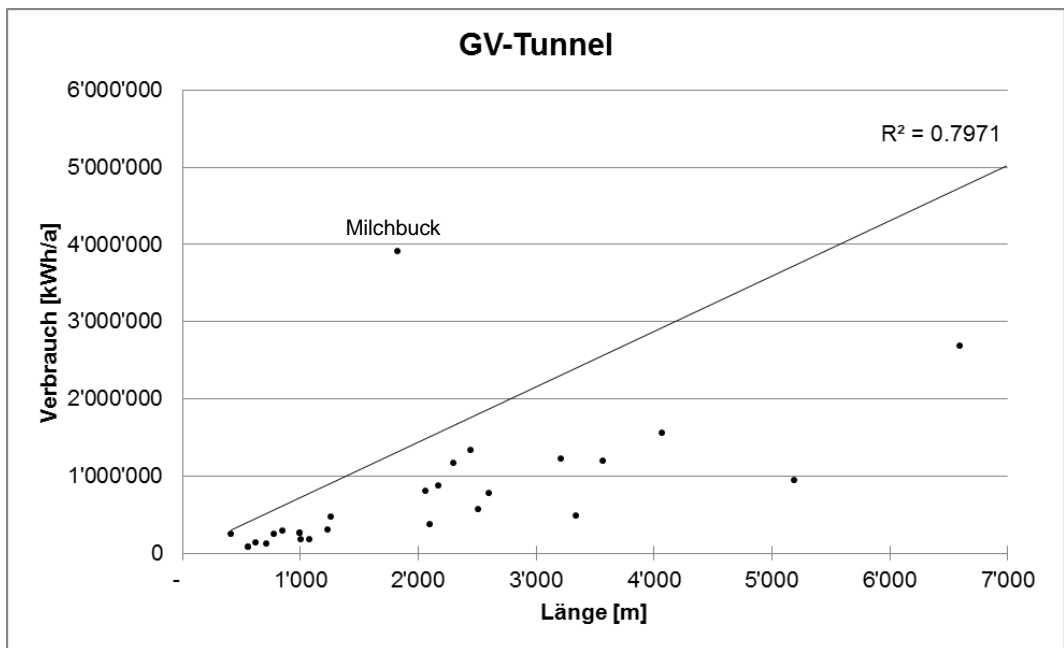


Abb. 11 Länge vs. Energieverbrauch für Tunnel mit Gegenverkehr (Ausschnitt < 7'000 m)

Die lineare Regression in Abb. 10 und Abb. 11 wird massgeblich von den Daten des Gotthard-Tunnels beeinflusst. Die Tunnel Gotthard und Milchbuck weisen einen vergleichsweise hohen spezifischen Energieverbrauch auf. Sie können in der Statistik als Ausreisser eingestuft werden. Aus diesem Grund ist in Abb. 12 die Regressionskurve zusätzlich ohne Berücksichtigung dieser beiden Tunnel dargestellt.

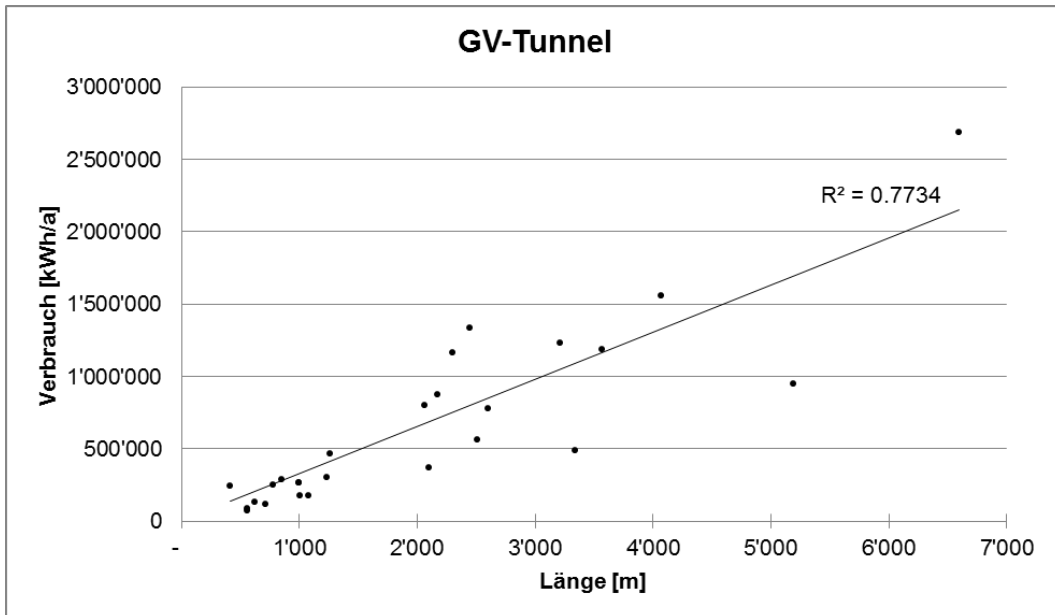


Abb. 12 Länge vs. Energieverbrauch für Tunnel mit Gegenverkehr (Ausschnitt < 7'000 m, ohne Gotthard/Milchbuck)

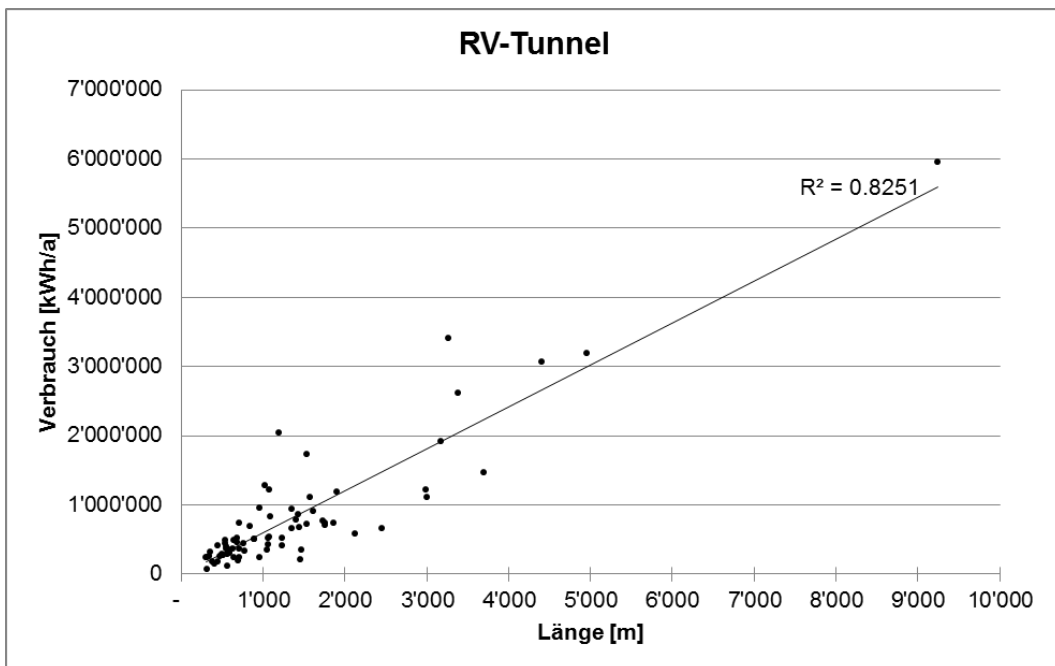


Abb. 13 Länge vs. Energieverbrauch für Tunnel mit Richtungsverkehr

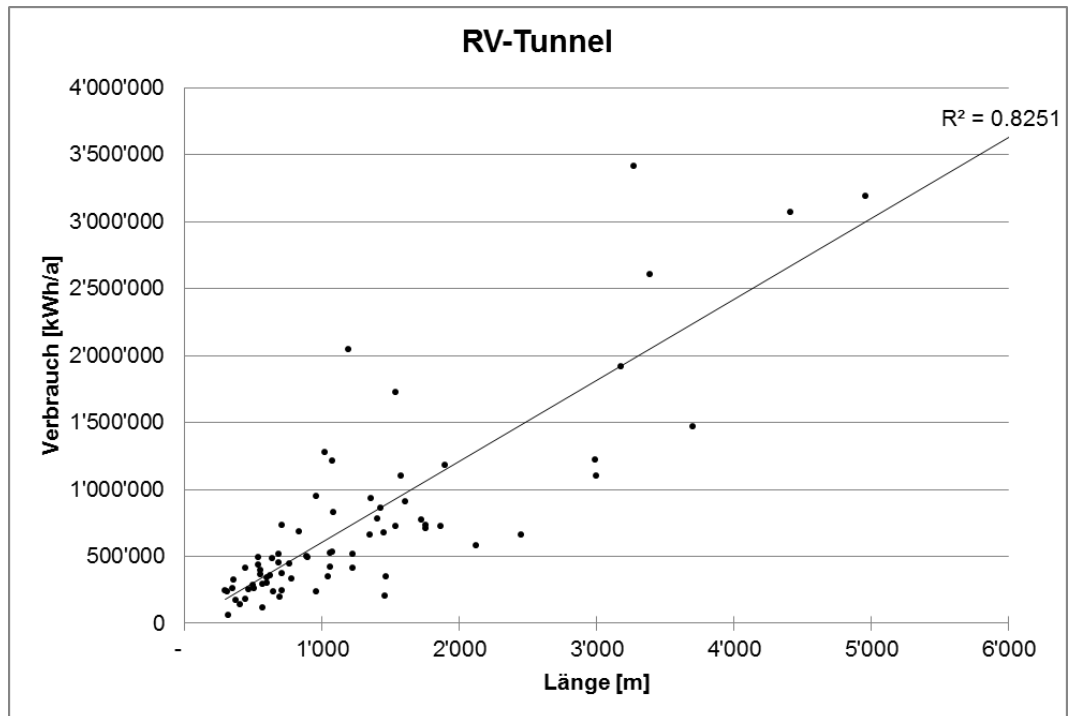


Abb. 14 Länge vs. Energieverbrauch für Tunnel mit Richtungsverkehr (Ausschnitt < 6'000 m)

5.2.4 Relative Anteile der BSA

Die BSA ist gemäss AKS Richtlinie des ASTRA [18] in acht verschiedene Anlagen aufgeteilt. In Bezug auf die Verbesserung der Energieeffizienz interessiert, wie die relativen Anteile dieser acht Anlagen am Gesamtenergieverbrauch eines Tunnels aussehen. Folgende Abbildung zeigt die typische Verteilung des Energieverbrauchs auf die Anlagen der BSA für einen Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung (aus [2], [4], [6] und Projektdaten der Autoren):

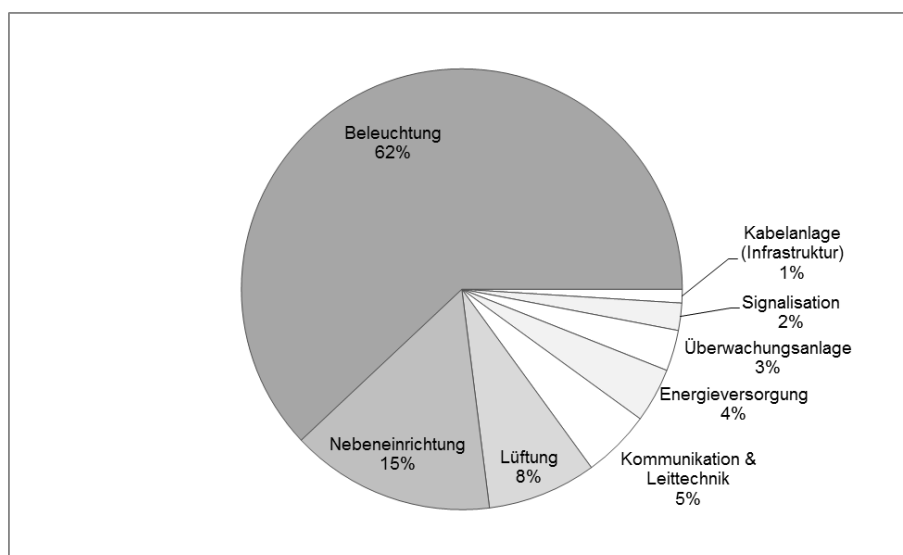


Abb. 15 Verteilung des Energieverbrauchs auf die Anlagen der BSA

Die Beleuchtung verbraucht in diesem Fall mehr als die Hälfte der Energie, gefolgt von der Nebeneinrichtung und der Lüftung. Die übrigen fünf Anlagen verbrauchen zusammen ca. 15% der Energie. Es gilt zu bemerken, dass dies eine typische Verteilung des Ener-

gieverbrauchs in einem Richtungsverkehrstunnel ist. Speziell bei längeren Gegenverkehrstunneln nimmt der Anteil der Lüftung markant zu.

5.3 Vergleich Energieverbrauchswerte 1994 - 2011

Ein Vergleich der Energieverbrauchsdaten der Erhebung aus dem Jahr 1994 [4] und dem Jahr 2011 [2] zeigt folgendes Bild:

Tab. 2 Vergleich Energieverbrauch 1994 - 2011

	1994	2011
Betrachtete Tunnelstrecke	118 km	233 km
Energieverbrauch für Tunnel der Nationalstrasse	81 GWh	126 GWh
Energieverbrauch pro Kilometer Tunnelstrecke	686'440 kWh	540'773 kWh
Aufteilung Beleuchtung (B), Lüftung (L), Nebeneinrichtung und weitere BSA (N)	B=61% L=15% N=24%	B=55% L=15% N=30%

In der Auswertung aus dem Jahr 1994 war die betrachtete Tunnelstrecke nur beinahe halb so lang wie in der Auswertung aus dem Jahr 2011. Es erstaunt daher nicht, dass der absolute Energieverbrauch damals mit rund 81 GWh deutlich tiefer lag als in der aktuellen Erhebung mit rund 126 GWh.

Der Vergleich zeigt, dass der Energieverbrauch pro Kilometer Tunnelstrecke in der Auswertung aus dem Jahr 1994 höher lag als in derjenigen von 2011. Die Tunnel verbrauchen 2011 trotz eines höheren Ausrüstungsgrades im Durchschnitt pro Kilometer weniger Energie als 1994.

Die Aufteilung des Energieverbrauchs auf Beleuchtung, Lüftung sowie Nebeneinrichtung und weitere BSA scheint sich von der Beleuchtung etwas in Richtung der Nebeneinrichtungen verschoben zu haben. Dies ist vermutlich durch den höheren Ausrüstungsgrad der Tunnel in jüngerer Zeit zu erklären. Den Effekt von LED-Beleuchtung sehen wir in diesem Zusammenhang noch nicht, da zum Betrachtungszeitpunkt des Energieberichts 2011 noch keine Tunnelobjekte mit LED-Beleuchtung ausgerüstet waren. Der Anteil der Lüftung blieb mit 15% gleich.

5.4 Vergleich national / international

Tab. 3 Bandbreite des spezifischen Energieverbrauchs in europäischen Tunneln

Land	Zahlen
Schweiz	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Einzelobjekte 120'000-2'100'000 kWh/(km*a)
Deutschland	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Einzelobjekte 240'000-900'000 kWh/(km*a)
Österreich	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Tunnelkategorien (keine Werte für Einzelobjekte) 350'000-470'000 kWh/(km*a)
Frankreich	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Einzelobjekte 160'000-1'200'000 kWh/(km*a) Regressionsanalysen (Länge vs. Energieverbrauch)
Holland	Keine plausiblen Energieverbrauchswerte
Belgien	Daten für 2 städtische Richtungsverkehrstunnel zwischen 1'600'000-1'800'000 kWh/(km*a)
Spanien	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Einzelobjekte sehr gross und zum Teil nicht plausibel. 80% der Werte liegen im Intervall von 250'000-1'800'000 kWh/(km*a) Flächenbezogene Energieverbrauchswerte der Beleuchtung
Norwegen	Bandbreite Energieverbrauchswerte der Einzelobjekte 17'000-230'000 kWh/(km*a)

Der Vergleich national - international zeigt, dass die Energieverbrauchswerte der Tunnel in den betrachteten Ländern in einer ähnlichen Bandbreite liegen wie die Schweizer Tunnel. Die meist grosse Bandbreite der Energieverbrauchswerte deutet auf objektspezifische Besonderheiten in der Ausrüstung sowie im Betrieb hin. Dies gilt in der Schweiz wie auch in den betrachteten Ländern.

Die Regressionsanalysen (Frankreich [7]) zeigen vergleichbare Bestimmtheitsmasse wie die Regressionsanalysen mit den Schweizer Daten. In Spanien wurde eine Bewertung des Energieverbrauchs der Beleuchtung anhand der beleuchteten Fläche durchgeführt (kWh/m^2). Inwiefern die Länder aus den Analysen Methoden zur Verbesserung des Energieverbrauchs abgeleitet haben, ist nicht bekannt.

Als Sonderfall ist Norwegen zu erwähnen. Die Energieverbrauchswerte der Tunnel liegen deutlich tiefer als in den anderen Ländern. Dies trifft nicht nur auf kurze Tunnel oder auf Tunnel mit wenig Verkehr zu. Auch lange Tunnel mit JDTV-Werten über 30'000 Fahrzeuge weisen vergleichsweise geringe Energieverbrauchswerte auf.

5.5 Schlussfolgerungen

Die Datenanalyse ergab, dass der Energieverbrauch eines Tunnels zu ca. 75% durch die Tunnellänge erklärt werden kann. Das Beiziehen anderer Kenngrössen wie zum Beispiel Verkehrsaufkommen, Fahrspuren oder Lüftungstypen sowie Kombinationen davon ergaben schlechtere Regressionen. Insofern erscheint die Kenngrösse "Energie pro Kilometer und Jahr" als die beste Grösse für das Benchmarking.

6 Benchmarking

6.1 Definition

Benchmarking bezeichnet ganz allgemein die vergleichende Analyse von Kenngrössen mit Bezugsgrössen. Benchmarking wird in den unterschiedlichsten Bereichen angewendet. Kenngrössen von Produkten, Systemen oder Prozessen werden mit Bezugswerten verglichen. In der Regel ist das Ziel, eine fundierte Aussage über die Qualität, Güte oder Effizienz des Untersuchungsobjekts zu erhalten und dieses je nach Klassierung zu optimieren.

6.2 Benchmarking im Energiebereich

Das Benchmarking im Energiebereich wird häufig in Form von sogenannten Energieetiketten dargestellt. Typische Beispiele im Energiebereich sind unter anderen folgende:

- Gebäude
- Haushaltsgeräte
- Leuchten
- Personenwagen

Für Gebäude existiert der Gebäudeenergieausweis der Kantone, welcher Gebäude gemäss ihrer Energieeffizienz in verschiedene Kategorien einteilt. Folgende Abbildung zeigt die verwendete Energieetikette:

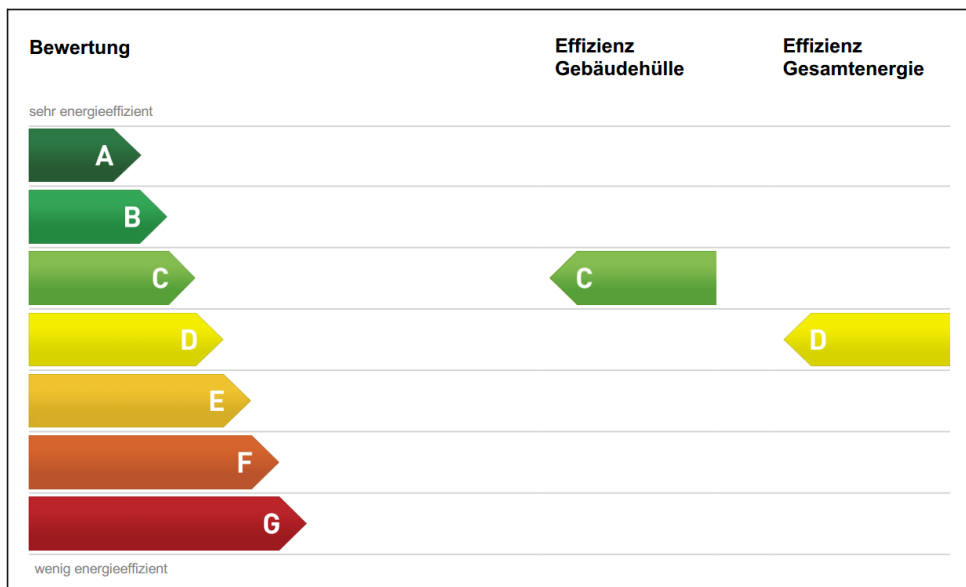


Abb. 16 Kategorien gemäss Gebäudeenergieausweis der Kantone

Für den Benchmark der Strassentunnel wird eine ähnliche Darstellungsform gewählt.

6.3 Benchmarking Energieverbrauch Strassentunnel

Das Benchmarking erfolgt nach folgendem Prinzip:

1. Basierend auf der Datenanalyse werden eine geeignete Messgrösse sowie geeignete Tunnelkategorien definiert.
2. Für die definierte Messgrösse werden in Anlehnung an den Gebäudebereich Energiekategorien A bis G festgelegt.

6.3.1 Messgrösse (Kennwert)

Die Datengrundlage für Energieverbrauchswerte zeigt, dass für viele Tunnel lediglich ein pauschaler Energieverbrauchswert vorliegt und keine detaillierten Messwerte (Beleuchtung, Lüftung, übrige BSA) vorhanden sind. Es drängt sich daher auf, den Kennwert auf Basis des pauschalen Energieverbrauchs zu ermitteln. Die verwendete Messgrösse ist daher Kilowattstunden pro Kilometer und Jahr als Kennwert pro Tunnel, ohne Aufteilung nach Anlagen. Dabei werden Streckenkilometer verwendet und nicht Röhrenkilometer. Zweiröhriige Tunnel weisen daher grundsätzlich höhere Werte auf als einröhriige Tunnel. Der Baregg als 3-röhriiger Tunnel stellt einen Spezialfall innerhalb der Gruppe der Richtungsverkehrstunnel dar.

Messgrösse für den Energieverbrauch (Kennwert): kWh/(km*a)

Beispiel: Der Tunnel Belchen wies in der Betrachtungsperiode gemäss [2] einen jährlichen Energieverbrauch von 1'915'689 kWh auf. Die durchschnittliche Länge beider Röhren beträgt laut der Liste der Nationalstrassentunnels des ASTRA [9] 3.180 km, womit ein Kennwert von 602'418 kWh/(km*a) resultiert.

Bemerkung Tunnellänge: Für die Berechnung des Kennwerts ist die Tunnellänge aus einer offiziellen ASTRA Quelle wie z.B. der Liste der Nationalstrassentunnels [8] zu verwenden. Tunnel mit längeren Zu- bzw. Abfahrtstunneln, welche in der Tunnellänge nicht enthalten sind, weisen tendenziell einen höheren Kennwert auf. Diesem Umstand ist im Einzelfall Rechnung zu tragen.

6.3.2 Tunnelkategorien

Im Energiebericht des ASTRA [2] wurden insgesamt sieben Tunnelkategorien unterschieden. Die Kategorien wurden aufgrund der Anzahl Fahrspuren sowie der Lüftungstypen definiert. Es wurde in Betracht gezogen, für das Benchmarking die gleichen Tunnelkategorien zu übernehmen. Der Ansatz wurde jedoch verworfen, da pro Tunnelkategorie zu wenige Objekte resultieren würden, um eine ausreichende Datenbasis zu erhalten.

Die Gesamtheit der Tunnel wurde in zwei Gruppen aufgeteilt: Gegenverkehrstunnel und Richtungsverkehrstunnel. Die Mittelwerte der Energieverbrauchswerte pro Kilometer und Jahr dieser beiden Gruppen unterscheiden sich signifikant. Dies wurde mit einem t-Test überprüft.

6.3.3 Energiekategorien

Die Energiekategorien wurden in Anlehnung an die Methodik im Gebäudebereich definiert. Der Übergang von Kategorie D zu E wurde auf den Bestandsdurchschnitt gelegt. Als Zielwert für einen Neubautunnel wurde der Übergang von Kategorie B zu C definiert. Der Zielwert für einen Neubautunnel beträgt die Hälfte des Bestandsdurchschnitts.








Energiekategorie	Gegenverkehrstunnel* [kWh/(km*a)]	Richtungsverkehrstunnel [kWh/(km*a)]
	< 100'000	< 200'000
	100'000-150'000	200'000-300'000
Zielwert Neubautunnel		
	150'000-200'000	300'000-400'000
Bestandsdurchschnitt		
	200'000-300'000	400'000-600'000
	300'000-400'000	600'000-800'000
	400'000-500'000	800'000-1'000'000
	> 500'000	> 1'000'000

Abb. 17 Energiekategorien / * ohne Gotthard- und Milchbuckeltunnel

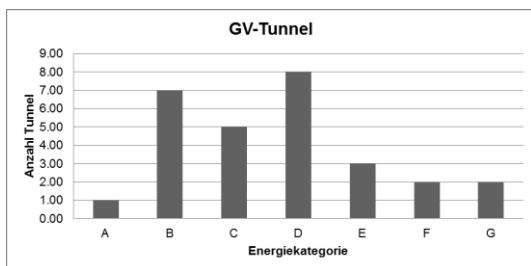
Die Kategorie A wird derart gewählt, dass sie in der Praxis durch Neubautunnel mit starkem Fokus auf Energieeffizienz erreicht werden kann. Dazu sind neue Technologien und ein möglichst schlankes Design umzusetzen. Bauwerk sowie Betriebs- und Sicherheitsausrüstung müssen zusammen betrachtet und optimiert werden. Eine rein richtlinienkonforme 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) und 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 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 Kategorie E definiert. Die Kategorien E, F und G sind per Definition des Benchmarkings Tunnel, welche überdurchschnittlich viel Energie verbrauchen. Der für die Einordnung verwendete Energieverbrauchswert ist zu plausibilisieren. Dazu ist das Messkonzept kritisch zu hinterfragen. Auch ist zu analysieren, ob in der betrachteten Zeit Umbauten stattgefunden haben oder Ereignisse vorgefallen sind. Das Projektteam empfiehlt, jene Tunnel, die aufgrund einer Ersteinschätzung in die Energiekategorien E, F oder G fallen, einer vertieften Analyse zu unterziehen.

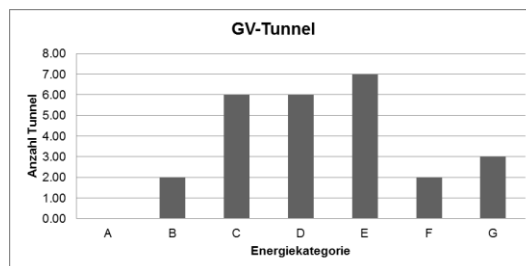
6.3.4 Übersicht Benchmarking

Gegenverkehrstunnel

Bei den GV-Tunneln haben die beiden Objekte Gotthard und Milchbuck einen starken Effekt auf die Definition der Energiekategorien. Beide Objekte weisen einen Energieverbrauch auf, welcher stark über dem Durchschnitt liegt. Beim Gotthard ist der Grund bei der praktisch permanent laufenden Lüftung zu finden. Beim Milchbuck liegt es an der Vielzahl von Räumen, welche über die gleiche Einspeisung wie der Tunnel versorgt werden. Im Folgenden wird dargestellt, wie die Verteilung der GV-Tunnel sich für die Fälle "mit/ohne Gotthard/Milchbuck" verändert:



Mit Gotthard- und Milchbucktunnel
(28 Objekte)



Ohne Gotthard- und Milchbucktunnel
(26 Objekte)

Abb. 18 Verteilung der Energieklassen GV-Tunnel

Wenn der Gotthard- und der Milchbucktunnel bei der Definition der Energiekategorien eingeschlossen werden, so resultiert eine weniger strenge Bewertung und rund ein Drittel der Tunnel rangiert in den Kategorien A und B. Wenn der Gotthard- und der Milchbucktunnel ausgeschlossen werden verändert sich das Bild deutlich. Es wurde im Rahmen einer Begleitkommissionssitzung entschieden, die Variante ohne die Tunnel Gotthard und Milchbuck zu verwenden, da diese beiden Objekte das Gesamtbild und das Benchmarking zu sehr verfälschen würden.

Richtungsverkehrstunnel

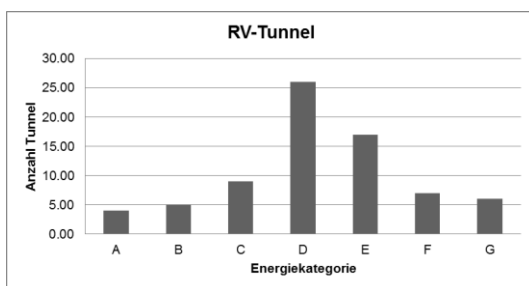


Abb. 19 Verteilung der Energieklassen RV-Tunnel

Bei den RV-Tunneln waren keine Spezialfälle vorhanden, welche das Gesamtbild verfälschen würden. Alle Tunnel, für welche ein Energieverbrauchswert vorlag, wurden in die Betrachtung einbezogen. Es wurden total 74 RV-Tunnel betrachtet.

6.4 Kritische Auseinandersetzung

Folgende Punkte erscheinen im Zusammenhang mit dem Benchmarking wichtig:

- Es können nur Tunnel beurteilt werden, für welche ein jährlicher Energieverbrauchswert vorliegt.
- Die Effizienzklasse eines Tunnels hat ohne die objektspezifische Plausibilisierung kaum Aussagekraft. Die Plausibilisierung ist von grosser Wichtigkeit.
- Tunnel mit Sicherheitsdefiziten können fallweise besser abschneiden als Tunnel, welche die Richtlinien erfüllen. Beispielweise schneiden Tunnel, welche zu dunkel betrieben werden, tendenziell besser ab als richtlinienkonform beleuchtete Tunnel. Auf Sicherheitsdefizite ist daher immer hinzuweisen.
- Die Effizienzklasse soll als Hilfsmittel für die Priorisierung von vertieften Analysen zum Energieverbrauch genutzt werden. Sie dient aus Sicht des Projektteams nicht als Kommunikationsmittel gegenüber der Öffentlichkeit.

7 Optimierungsmassnahmen

7.1 Typen von Optimierungsmassnahmen

7.1.1 Energetische Betriebsoptimierung

Die energetische Betriebsoptimierung im Gebäudebereich zeigt Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf, die für Gebäudenutzer keine merklichen Komforteinbussen bewirken [5]. Energetische Betriebsoptimierung umfasst steuerungs- und regelungstechnische Massnahmen an bestehenden Anlagen. Dies setzt grundsätzlich mängelfreie Anlagen voraus, welche sich entsprechend steuern und regeln lassen. Die energetische Betriebsoptimierung im Gebäudebereich zeichnet sich gemäss [5] durch folgende Eigenschaften aus:

- Keine merklichen Komforteinbussen
- Kurze Pay-Back-Dauer (in der Regel kürzer als 2 Jahre)
- Kostengünstig, in der Regel ohne ordentlichen Planungsprozess
- Resultat ist die Summe der erfolgreich und dauerhaft umgesetzten Massnahmen

Für die energetische Betriebsoptimierung im Strassentunnel gibt es keine normativen Grundlagen. In Anlehnung an den Gebäudebereich könnte die energetische Betriebsoptimierung im Tunnelbereich folgendermassen definiert werden:

Die energetische Betriebsoptimierung im Tunnelbereich zeigt Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz auf, die für den Tunnelnutzer keine merklichen Sicherheitseinbussen bewirken und die Verfügbarkeit des Tunnels nicht negativ beeinflussen.

7.1.2 Ersatz von Anlagen

Der Ersatz einer energetisch suboptimalen Anlage kann merkliche Effizienzgewinne bringen. Im Gebäudebereich kann als Beispiel der Ersatz einer Elektroheizung durch eine Wärmepumpe genannt werden. Durch diese Massnahme resultiert ein Effizienzgewinn um den Faktor 3 bis 5, je nach Güte der Wärmepumpe und des Temperaturniveaus der Wärmequelle.

Im Tunnelbereich ist der Ersatz von herkömmlichen Leuchten durch LED-Leuchten eine vielgenannte Massnahme aus diesem Bereich. Die erzielbaren Effizienzsteigerungen werden im Kapitel "Beleuchtung" genauer diskutiert.

Bei einem Ersatz ist immer die mögliche Restnutzungsdauer der Anlage in die Betrachtung einzubeziehen. In der Regel werden nur Anlagen ersetzt, welche am Ende der prognostizierten Lebensdauer angekommen sind oder diese schon überschritten haben. In Fällen mit erheblicher Energieeinsparung kann von diesem Grundsatz abgewichen werden.

7.1.3 Anpassung von Normen und Richtlinien

Im Zusammenhang mit der Energieeffizienz stellt sich die Frage, ob gewisse Normen und Richtlinien zugunsten der Energieeffizienz angepasst werden könnten, ohne die Sicherheit in kritischer Weise zu verringern. Das vorliegende Forschungsprojekt identifiziert vermutetes Effizienzpotential in Bezug auf die Anpassung von Normen und Richtlinien in Kapitel 9. Es werden nur sicherheitstechnisch zulässige Anpassungen vorgeschlagen (Sicht der Autoren).

7.2 Identifikation des Optimierungspotenzials

Anlagen, welche viel Energie verbrauchen, weisen tendenziell auch ein grosses Optimierungspotenzial auf. Von Interesse ist das absolute Optimierungspotenzial in Bezug auf ein Tunnelobjekt als Ganzes und nicht das relative Potenzial pro Anlage.

Zunächst werden die Anlagen identifiziert, welche viel Energie verbrauchen. Diese Anlagen ergeben sich aus einer Betrachtung der Leistung und der Betriebszeit. Als Betrachtungseinheit dient ein 1 km langer Tunnel, wobei die Verkehrsart nicht massgebend ist. Der Begriff "Anlagen" wird hier für Anlagen, Teilanlagen oder Aggregate gemäss der AKS Richtlinie [18] benutzt.

$$\text{Energie [kWh]} = \text{Leistung [kW]} \times \text{Betriebszeit [h]}$$

		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">Abluft Längslüftung Zuluft</div>		
Leistung	hoch (> 5 kW)		Adaptationsbeleuchtung (6 kW) Rohrbegleitheizung Fahrbahnheizung	Mittelspannung (Trafo)* Durchfahrtsbeleuchtung (8-10 kW) Heizung, Klima, Lüftung Zentrale
	mittel (1-5 kW)	Krananlagen / Hebezeug Löscheinrichtungen	Pumpwerke, Oelabscheider, Rückhaltebecken	Niederspannung (Trafo)* Notstrom (USV)* Zentrale Einrichtungen (Summe alle Anlagen)
	tief (< 1 kW)	Brandnotbeleuchtung Beleuchtung Zentralen		Optische Leiteinrichtung Fluchtwegbeleuchtung Fluchtwegbelüftung Signalisation Überwachungsanlage Kommunikation & Leittechnik Kabelanlage (Infrastruktur) Brandmeldeanlage Gebäude
		Selten oder nur im Ereignisfall	Regelmässig	Dauerbetrieb
Betriebszeit				
Potenzial				
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 5px;">Effizienzpotenzial vorhanden</div>				
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-bottom: 5px;">Effizienzpotenzial nicht vorhanden</div>				
* Verlustleistung				

Abb. 20 Identifikation des Optimierungspotentials

Für folgende Anlagen wird grundsätzlich ein grosses Energieeffizienzpotenzial erwartet. Die Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz beziehen sich demnach primär auf diese Anlagen:

- Durchfahrtsbeleuchtung
- Adaptationsbeleuchtung
- Heizung, Klima, Lüftung Zentrale
- Transformator Mittelspannung
- Transformator Niederspannung
- Notstrom (USV-Anlage)
- Längslüftung
- Zuluft/Abluft
- Zentrale Einrichtungen (Summe aller Anlagen)
- Rohrbegleitheizung, Fahrbahnheizung

Im Folgenden werden die Anlagen gemäss AKS-Richtlinie [18] in Bezug auf ihr Optimierungspotential analysiert.

7.3 Energieversorgung

Tab. 4 Zusammenfassung Energieversorgung

Effizienzpotenzial	Tief	Mittel	Hoch	Massnahmen
Betriebsoptimierung	X			• Keine
Technologie/Ersatz			X	• Bei Erneuerungen von Transformatoren und USV-Anlagen Optimierung von Leistungsgrössen, Betriebspunkten und Wirkungsgraden
Anpassung Richtlinien		X		• Vorgabe für das Energiemesskonzept erstellen

Im Bereich der Energieversorgung kann praktisch nur zum Zeitpunkt einer Erneuerung wesentlich Energie gespart werden, indem das Energieversorgungskonzept als Ganzes optimiert wird.
Als wichtige Basis für das Energiemanagement sollte eine Vorgabe für das Energiemesskonzept erstellt werden.

Die Energieversorgung eines bestehenden Tunnels weist nur ein geringes Optimierungspotential beim Energieverbrauch auf. Eine Betriebsoptimierung ist bei einem bestehenden System kaum möglich, da die Effizienz des Gesamtsystems von der Konzeption der Anlage abhängig ist.

Beim Ersatz von Anlagen ergibt sich jedoch ein grosses Optimierungspotential durch den Einsatz von effizienten Aggregaten und einer Auslegung der Aggregate aufgrund der Betriebserfahrung. Dies gilt insbesondere für die USV Anlage, die bei einigen Tunneln mit grossen Reserven ausgelegt wurden. Eine schlechte Effizienz der einzelnen Aggregate wirkt verstärkt auf den Gesamtenergieverbrauch, da Leistungsverluste zu Abwärme in der Elektrozentrale führen, die wiederum mit der Klimatisierung abgeführt werden muss.

7.3.1 Transformatoren

Bei der Beurteilung von Trafoverlusten wird meist von Leerlauf- und Lastverlusten bzw. von Eisen- und Kupferverlusten gesprochen. Die Leerlaufverluste werden bei Nennspannung ohne Last gemessen. Sie werden vor allem durch die Eisenverluste (Magnetisierung des Eisenkerns) bestimmt. Die Lastverluste werden aus der im Kurzschlussversuch mit Nennstrom gemessenen Impedanz berechnet. Sie werden durch die Kupferverluste (Ohm'scher Widerstand der Kupferwicklungen) dominiert.

Die technische Entwicklung konnte die Verluste in den letzten Jahrzehnten markant senken. Dabei ist zu beachten, dass eine Erhöhung des Wirkungsgrades sich direkt im Aufwand für Auslegung, Material und Konstruktion des Transformators niederschlägt. Effiziente Transformatoren weisen höhere Investitionskosten auf. Folgende Abbildung zeigt

den Zusammenhang zwischen Auslastung, Wirkungsgrad und Verlustleistung gemäss [9]:

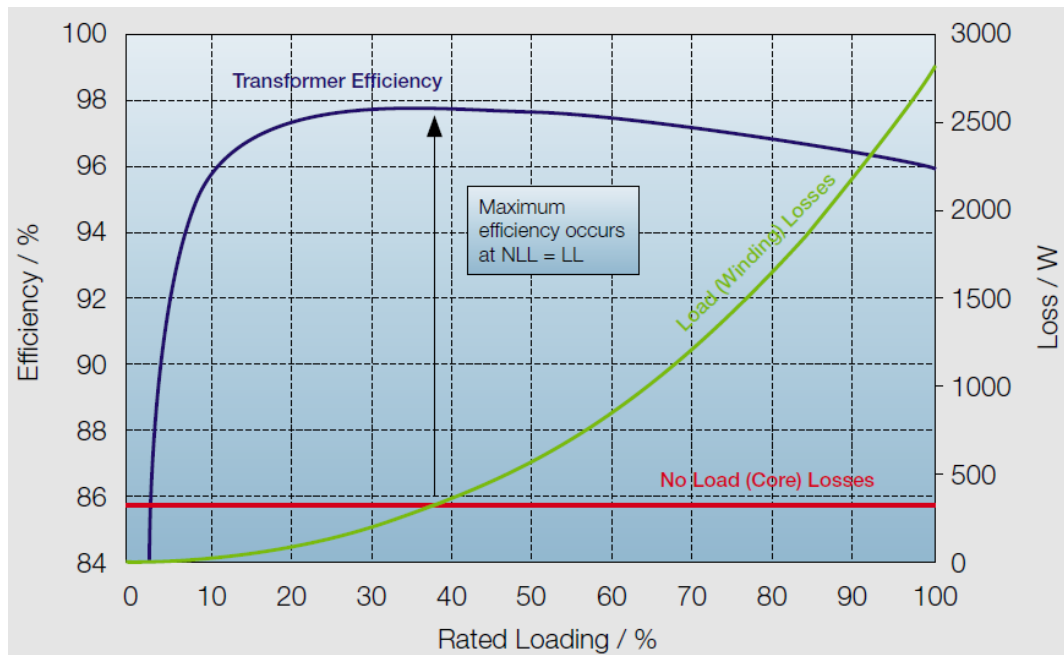


Abb. 21 Transformatorenverluste und -Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad eines Transformators ist von seiner Auslastung abhängig. Bei geringer Auslastung sinkt der Wirkungsgrad deutlich. Dies wird in der Planung nicht berücksichtigt, da die Auslegung gemäss ASTRA Fachhandbuch BSA stets mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor 1 erfolgen muss [19].

Bei Neuanlagen und beim Ersatz von Transformatoren soll eine Gesamtbetrachtung von Investitions- und Betriebskosten vorgenommen werden. Daraus ergibt sich eine Optimierung der Lebenszykluskosten sowie des Energieverbrauchs. Die Berechnung des Lebensdauer-Energieverbrauchs ist in vielen Fällen einfach und erlaubt damit eine quantitative Beurteilung bei der Evaluation. Dabei erweist sich, dass die Lebensdauer-Energiekosten gefühlsmässig eher unterschätzt werden. In der Bewertung ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Abwärme der Transformatoren in den Zentralen zu einem erhöhten Investitions- und Energieaufwand bei der Klimatisierung führt. In der Gesamtbetrachtung kann es sich ergeben, dass es energetisch und wirtschaftlich lohnend erscheint, einen Transformator vor Ablauf seiner "natürlichen" Lebensdauer zu ersetzen.

Nach dem ASTRA Fachhandbuch BSA [19] genügt eine nicht redundante Ausführung der Transformatoren. Die Energieversorgung wird auf separate Transformatoren für "Lüftung" (400V oder 690V) und "Allgemein" (400V) aufgeteilt. Falls im Einzelfall Transformatoren redundant installiert sind, kann es vorteilhaft sein, sie nicht symmetrisch auszulasten, sondern den momentanen Energieverbrauch über einen Transformator bereitzustellen. Insgesamt kann so ein verbesserter Wirkungsgrad erreicht werden. Eine gleichmässige Nutzung der parallelen Transformatoren kann erreicht werden, indem z.B. wöchentlich der Betrieb gewechselt wird.

Es sollte geprüft werden, ob Lüftungstransformatoren bei ausgeschalteter Lüftung mittelspannungsseitig vom Netz getrennt werden können. Auf diese Weise liessen sich Verluste vermeiden. Die Steigerung der Komplexität der Energieversorgung (Risiko einer nicht funktionierenden Zuschaltung) sollte den erzielbaren Energieeinsparungen gegenübergestellt werden.

- Das Optimierungspotential der Transformatoren kann über den Wirkungsgrad identifiziert werden.
- Anhand der Berechnung der Lebensdauerkosten kann entschieden werden, ob sich ein vorzeitiger Ersatz lohnt. Bei der Berechnung der Lebensdauerkosten soll der Energieverbrauch für das Abführen der Abwärme einbezogen werden.

7.3.2 USV-Anlage

Die Leistung der USV-Anlage wird auf den Ereignisbetrieb ausgelegt. Ebenfalls sind die Abschaltbedingungen (Personenschutz) einzuhalten. Unabhängig davon wird die Leistung der USV-Anlage in Projekten oft zu hoch angesetzt. Dies dürfte damit zu tun haben, dass jeder Planer für sich einen Sicherheitszuschlag einrechnet, was in der Summe über alle Gewerke zu einer überdimensionierten Anlage führt. Dies führt zu suboptimalen Betriebspunkten, da der Wirkungsgrad einer USV-Anlage von ihrer Auslastung abhängig ist. Wie in folgender Abbildung dargestellt fällt der Wirkungsgrad bei tiefer Auslastung (<25%) stark ab:

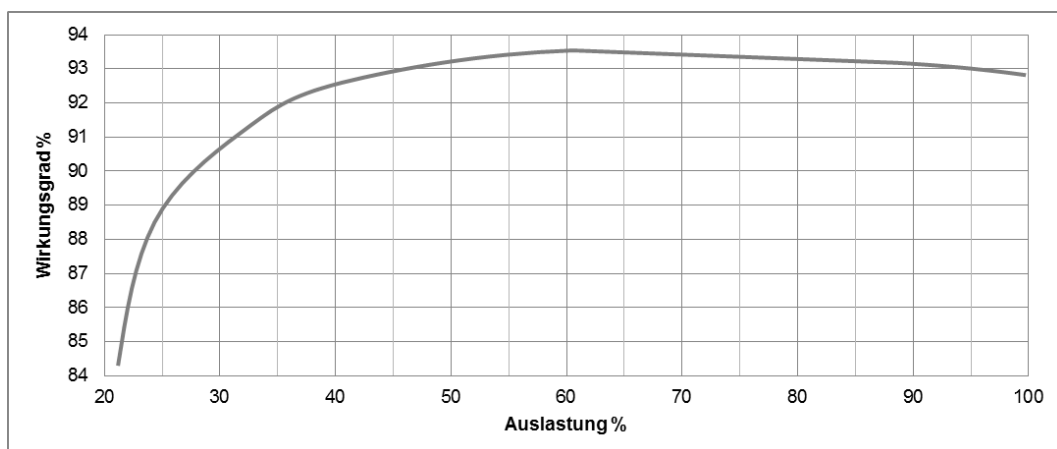


Abb. 22 Wirkungsgrad der USV Anlage in Abhängigkeit der Last (adaptierte Herstellerangaben für ein Modul 120 kVA)

Wenn eine USV-Anlage für den Ereignisbetrieb überdimensioniert ist, so ergeben sich für den normalen Tagbetrieb und noch mehr für den Nachtbetrieb suboptimale Betriebspunkte. Bei der Elektroplanung ist besonderes Augenmerk auf das Thema "Überdimensionierung der USV-Anlage" zu richten. Ein pragmatischer Ansatz ist die Verwendung einer modularen USV-Anlage, welche zunächst zurückhaltend bestückt wird. Bedarfsabhängig können Module erweitert werden und es entsteht keine unnötige Überdimensionierung.

Bemerkung der Autoren: Im Rahmen von Hauptinspektionen wurden schon Anlagen angetroffen, welche unter 10% ausgelastet waren. Es ist sicherlich nicht einfach, eine USV-Anlage exakt im optimalen Betriebspunkt zu betreiben, derart tiefe Auslastungen sollten jedoch vermeidbar sein.

Fallweise müssen USV-Anlagen wegen den Abschaltbedingungen mit höherer Leistung ausgelegt werden, als dies aufgrund der Verbraucher nötig wäre. Im Sinne der Energieeffizienz ist das Ziel für die Elektroplaner, die Sicherheit (Abschaltbedingungen) mit so wenig Zusatzleistung wie nötig zu gewährleisten. Dabei muss eine Abwägung zwischen Investitionskosten und Energieaufwand vorgenommen werden. Bei der Abwägung kann der Energieaufwand über die Erstellungskosten hinaus gewichtet werden.

Durch eine Verkürzung der Autonomiezeit und somit Verkleinerung der Batterieanlage können die Energiekosten wie auch die Lebenszykluskosten reduziert werden. Batterien sind meist nach ca. 10 Jahren zu ersetzen. Auch kann der Batterieraum, welcher im Idealfall 18-22°C aufweisen sollte, verkleinert werden. Höhere Temperaturen bewirken eine Verkürzung der Lebensdauer der Batterien. Durch eine zurückhaltende Auslegung können Kosten für Batterien und Klimatisierung eingespart werden.

Eine zentrale Kleinspannungsversorgung ab USV-Anlage wäre eine Möglichkeit, die Verluste durch den Wechselrichter der USV sowie die Netzgeräte der DC-Verbraucher zu minimieren. Die unterschiedlichen Spannungsanforderungen der DC-Verbraucher sowie das mögliche Absprechen von Garantien durch die Hersteller (bei Betrieb ohne Netzgeräte) sind Herausforderungen, welche im Anwendungsbereich der Strassentunnel noch nicht gelöst sind.

7.3.3 Lokalsteuerung

Für die Hersteller von Steuerungen lohnt sich eine Energieoptimierung der Aggregate in der Regel nicht. Im Energieverbrauch eines Tunnels ist das einzelne Gerät von geringer Bedeutung. Erst in der Summe einer Vielzahl von Einzelgeräten wirkt sich die Energieeffizienz auf den Gesamtenergieverbrauch aus. Technologische Entwicklungen hin zu weniger leistungsintensiven Steuerungen sind sicherlich zu befürworten, es wird jedoch bezweifelt, dass die Leistung von Steuerungen in naher Zukunft ein Entscheidungskriterium für die Beschaffung darstellen wird.

7.3.4 Notstrom Dieselgeneratoren

Notstrom Dieselgeneratoren werden im Regelfall in Schweizer Strassentunneln nicht vorgesehen. Im Bestand gibt es jedoch etwa 30 Anlagen auf dem Nationalstrassennetz. Sie können notwendig sein, wenn die Versorgung über zwei unabhängige lokale Netze nicht möglich ist oder nicht nachgewiesen werden kann. Auch werden Dieselgeneratoren eingesetzt, wenn Verkehrsleitzentralen der Polizei mit Tunnelanlagen kombiniert sind (z.B. Milchbuck Süd und VLZ). Wenn Dieselgeneratoren eingesetzt werden, muss die Auslegung abgestimmt auf die USV-Anlage (Batterien) erfolgen.

Bei einem Ausfall der öffentlichen Energieversorgung erfolgt die Versorgung der kritischen Verbraucher zunächst über die USV-Anlage bis die Dieselgeneratoren für die Energieversorgung zur Verfügung stehen. Die Vorlaufzeit der Dieselgeneratoren lässt sich z.B. durch elektrische Beheizung des Kühlwassers des Dieselmotors verringern. Es ist also eine Gesamtoptimierung zwischen der Heizung des Kühlwassers des Dieselmotors und der Kapazität der USV-Anlage abgestimmt auf den Verbrauch der Anlage vorzunehmen. Dieselgeneratoren sind lediglich für längere Tunnel eine prüfenswerte Option.

7.3.5 Sicherheitsstollen

Sicherheitsstollen weisen hohe Anforderungen an die Energieversorgung auf. Diese Anforderungen sind in einem nicht offiziellen ASTRA Papier festgehalten (BSA Philosophie für Sicherheitsstollen). Beispielsweise wird gefordert, dass die Energieversorgung des Sicherheitsstollens (Normalnetz und Notstrom) unabhängig von der Energieversorgung des Tunnels sein muss. Diese Sicherheitsanforderung führt gegenüber einer gemeinsamen Energieversorgung (Normalnetz und Notstrom) zu erhöhten Kosten in Erstellung und Betrieb und sollte aus Sicht des Projektteams hinterfragt werden.

7.3.6 Photovoltaik

Das Thema Photovoltaik wird im Energiebericht 2011 [2] in einem eigenen Abschnitt behandelt. Dem Bericht zu folge hat das ASTRA nicht den Auftrag, Energie zu produzieren. Deshalb ist das ASTRA nicht Ersteller und/oder Betreiber von Photovoltaikanlagen. Im Energiebericht wird eine Reihe von Photovoltaikanlagen entlang der Nationalstrassen aufgeführt. Die Energieproduktion machte damals nur etwa 0.4% des Energiebedarfs des betrieblichen Unterhalts der Nationalstrassen aus. In den letzten Jahren sind einige Anlagen hinzugekommen. Dennoch bleibt der Energiebeitrag gering.

Wenn der Tunnelbetreiber Photovoltaik zur Versorgung eines Tunnels einsetzt, kann die Nähe der Stromerzeugung zum Verbraucher genutzt werden. Insbesondere für die Durchfahrts- und für die Adaptionenbeleuchtung von Strassentunneln bietet sich die Nutzung einer lokalen Photovoltaikanlage an. Der grosse Vorteil einer solchen Anordnung ist

das zeitliche Zusammenfallen von grösstem Energiebedarf und maximaler Produktion. Die aufwendige Energiespeicherung entfällt. Gegenüber der Anordnung von Photovoltaikanlagen entlang der offenen Autobahn entfällt zudem der Nachteil der Distanz zwischen Stromerzeugung und Einspeisepunkt (lange Kabelwege und Leitungsverluste).

Für die Planung einer Photovoltaikanlage sind die Platzverhältnisse in der Umgebung der Portale entscheidend. Die Anordnung kann auf Land erfolgen, das für den Bau der Verkehrsanlage erworben wurde und aufgrund der Streckenführung kaum weiter genutzt werden kann. Ein Beispiel für eine solche Anordnung ist durch die Anlage am Ostportal des Tunnels Mont Sagne gegeben. Der Landstreifen zwischen der Strasse J20 und den untergeordneten Strassen kann mit der Photovoltaikanlage optimal genutzt werden.

Für die Anlagen kommen die folgenden Anordnungen in Frage:

- auf Freihalteflächen in Portalnähe
- integriert im Portalbauwerk
- Verkleidung von Portalzentralen, die im Tagbau erstellt wurden
- Integration in Lärmschutzwände



Abb. 23 Photovoltaikanlage am Tunnel Mont Sagne (Quelle: Google)

Der Tunnel Mont Sagne ist Bestandteil der Autostrasse H20 im Kanton Neuenburg. Die Photovoltaikanlage liefert Strom (max. 100 kW) für die Beleuchtung der Tunnel Mont Sagne und Vue-des-Alpes. Da die Anlage nicht an einer Nationalstrasse liegt, erscheint sie nicht im Energiebericht des ASTRA.



Abb. 24 Photovoltaikanlage integriert in eine Lärmschutzwand bei Zumikon (Quelle: naturschutz.ch)

- Photovoltaikanlagen erscheinen für eine anteilige Versorgung der Tunnelbeleuchtung sinnvoll. Die Installation einer Photovoltaikanlage am Tunnelportal soll insbesondere bei Neuanlagen geprüft werden.

7.4 Beleuchtung

Tab. 5 Zusammenfassung Beleuchtung

Effizienzpotential	Tief	Mittel	Hoch	Massnahmen
Betriebsoptimierung		X		<ul style="list-style-type: none"> • Messung Fahrbahnleuchtdichte und ggf. Dimmung • Dynamische (verkehrsabhängige) Steuerung (im Zusammenhang mit LED)
Technologie/Ersatz			X	<ul style="list-style-type: none"> • Helle Beläge und Wände • LED-Beleuchtung
Anpassung Richtlinien		X		<ul style="list-style-type: none"> • Kriterium Leuchtdichte Wand sollte mindestens 80% der Leuchtdichte der Fahrbahn betragen revidieren (SN 640 551-1)

Es wird geschätzt, dass durch einen Ersatz von konventioneller Beleuchtung durch LED-Beleuchtung ca. 50% der Energie für die Beleuchtung eingespart werden kann. Dies entspricht ca. 20-30% im Gesamtverbrauch. Durch helle Beläge und Wände sowie optimierte Steuerung sind weitere Einsparungen möglich.

7.4.1 Umfang der Beleuchtung

Die Beleuchtung im Strassentunnel umfasst die Adaptationsbeleuchtung, die Durchfahrtsbeleuchtung, die optische Leiteinrichtung, die Brandnotbeleuchtung (Seite Bankett, nur im Brandfall aktiv) und die Fluchtwegbeleuchtung (SOS-Nischen, Querschläge, Sicherheitsstollen, Teile der Adaptations- und Durchfahrtsbeleuchtung). In Bezug auf die Energieeffizienz sind vor allem die Adaptationsbeleuchtung und die Durchfahrtsbeleuchtung relevant. Die folgenden Kapitel beziehen sich auf die Adaptationsbeleuchtung sowie die Durchfahrtsbeleuchtung. Die anderen Anlagen der Beleuchtung sind separat behandelt.

7.4.2 Anforderungen Leuchtdichte

Eine gute Ausleuchtung des Fahrtraumes wird aus Sicherheitsgründen gefordert. In den meisten Strassentunneln ist die Beleuchtung aber der gewichtigste Energieverbraucher [2]. Somit ergibt sich bei der Beleuchtung grundsätzlich ein grosses Energiesparpotential. Die Norm "Öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen" [14] gibt die zu erreichenden Leuchtdichtewerte vor.

Folgende Abbildung zeigt den Leuchtdichteverlauf in qualitativer Form für eine Röhre eines Richtungsverkehrstunnels:

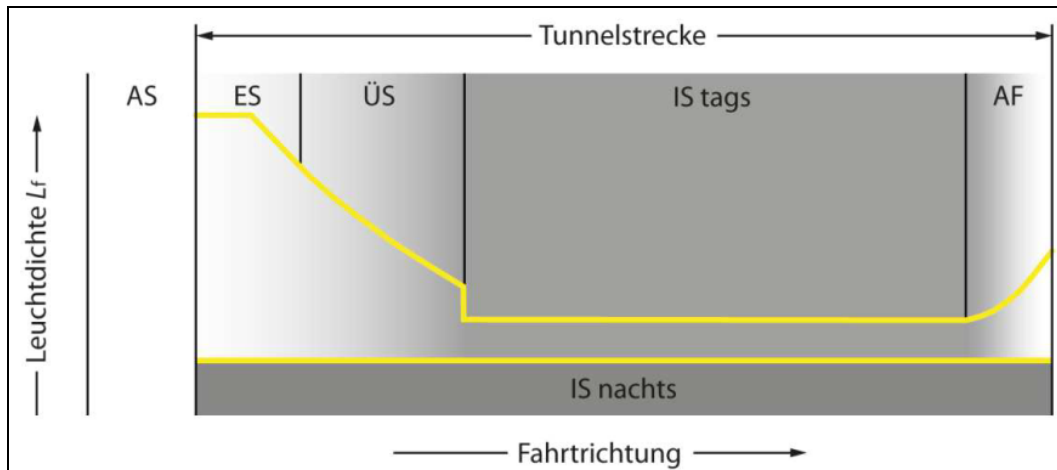


Abb. 25 Leuchtdichteverlauf tags und nachts, aus [11]

AS	Annäherungsstrecke
ES	Einfahrstrecke
ÜS	Übergangsstrecke
IS tags	Innenstrecke am Tag
IS nachts	Innenstrecke bei Nacht
AF	Ausfahrstrecke

In der Nacht kann die Beleuchtung im ganzen Tunnel herabgesetzt werden. Gemäss Norm sind 0.5 cd/m^2 (Tunnelklassen 1 und 2) bzw. 1 cd/m^2 (Tunnelklassen 3 bis 6) zulässig [14]. Nur in Objekten, welche gegenüber den Vorgabewerten zu hell ausgeleuchtet sind, können Energieeinsparungen durch Reduktion der Leuchtdichtewerte erzielt werden. Energieeinsparungen können jedoch auch durch folgende Massnahmen (bei unveränderten Leuchtdichtewerten) erzielt werden:

- Effiziente Leuchtmittel
- Helle Oberflächen
- Optimierte Steuerung

7.4.3 Leuchtmittel

Im Folgenden soll die Frage beantwortet werden, ob der Einsatz von LED-Leuchten in Bezug auf die Energieeffizienz zu befürworten ist. In der Schweiz werden LED-Tunnelleuchten seit ca. 2011 eingesetzt. Anfänglich wurden LED-Leuchten nur für die Durchfahrtsbeleuchtung eingesetzt, mittlerweile können ganze Beleuchtungssysteme in Strassentunneln (Adaptationsbeleuchtung wie auch Durchfahrtsbeleuchtung) in LED ausgeführt werden.

Ein Forschungsbericht aus dem Jahr 2012 nennt LED für die Durchfahrtsbeleuchtung nicht als die wirtschaftlich beste Wahl, wenn Erstellungskosten, Energie- und Wartungskosten eingerechnet werden [10]. Zwischenzeitlich hat sich die LED-Technologie für die Anwendung im Strassentunnel jedoch weiterentwickelt. Das Fachhandbuch BSA fordert seit Januar 2016 generell den Einsatz von LED-Leuchten sowohl für die Adaptations- wie auch für die Durchfahrtsbeleuchtung.

Feldversuche weisen auf eine verbesserte Energieeffizienz von LED basierten Beleuchtungskonzepten gegenüber herkömmlichen Konzepten (FL, NaH) hin [12], [13]. Im Folgenden wird auf diese Studien etwas vertiefter eingegangen.

Im Tunnel Tellplatte konnte durch den 1:1 Ersatz von NaH-Leuchten durch LED-Leuchten 15-30% der Energie für die Durchfahrtsbeleuchtung eingespart werden. Die Leuchtdichte auf der Fahrbahn wurde durch den 1:1 Ersatz um 26% erhöht. Dies lässt den

Schluss zu, dass durch den Ersatz eine zu hohe Leuchtdichte resultierte und das Energiesparpotential nicht konsequent ausgeschöpft wurde. Vom 1:1 Ersatz von konventionellen Leuchten durch LED-Leuchten ist generell abzuraten, da das Energiesparpotential nicht voll ausgeschöpft werden kann. Es braucht eine konsequente Neuauslegung der Beleuchtung.

Ein Vergleich der jährlichen Energieverbrauchswerte¹ von Objekten mit LED-Durchfahrtsbeleuchtung (3 Objekte) und Objekten mit konventioneller Durchfahrtsbeleuchtung (6 Objekte) zeigt folgendes Bild:

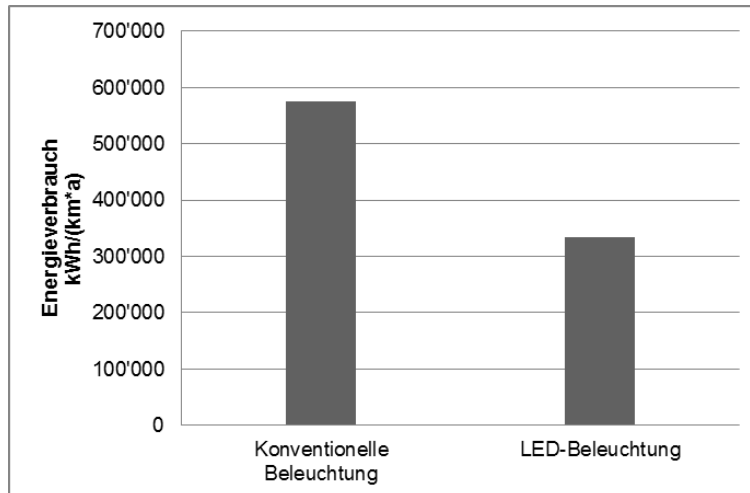


Abb. 26 Energieverbrauch von Tunneln mit konventioneller Beleuchtung und LED-Beleuchtung

Der Mittelwert des jährlichen Energieverbrauchs pro Kilometer für die Gruppe der konventionell beleuchteten Objekte ist signifikant höher als derjenige für die Gruppe der mit LED beleuchteten Objekte. Der starke Unterschied lässt sich aus Sicht der Autoren dieses Berichts jedoch nicht allein durch die LED-Beleuchtung erklären. Die Energieverbrauchswerte von einem anderen Tunnel, welcher während der Untersuchungsperiode auf LED-Durchfahrtsbeleuchtung umgerüstet wurde, zeigen, dass die Umrüstung zu einer Energieeinsparung von ca. 40% geführt hat. Es wird jedoch vermutet, dass noch weitere Massnahmen umgesetzt wurden und der Unterschied nicht allein durch die LED-Beleuchtung zu erklären ist.

Auf der N13 (Thuis - San Bernardino) wurde die Adaptationsbeleuchtung am Nordportal des Tunnels Traversa in LED ausgeführt. Das ASTRA hat Vergleichsmessungen mit der konventionellen NaH-Adaptationsbeleuchtung am Nordportal des Tunnels Rofla durchführen lassen. Erste Erkenntnisse zeigen ein hohes Energiesparpotential durch den Einsatz von LED-Leuchten für die Adaptationsbeleuchtung im Vergleich zu NaH-Leuchten. Der Hauptgrund liegt in der flexibleren Steuerung. Die LED-Beleuchtung kann schneller auf die Aussenverhältnisse reagieren [26].

Bei der Auslegung von LED-Beleuchtungen sind stark gedimmte Zustände zu vermeiden. Ein wichtiger Grund dafür ist die kapazitive Belastung des Netzes durch die stark gedimmten LED-Leuchten. Beim Lungern Versuch [12] wurde diese Problematik festgestellt. Beim Versuch Traversa/Rofla wurde diese Problematik nicht festgestellt.

Auf Basis der gesichteten Resultate von Feldversuchen sowie der eigenen Datenanalyse kommt das Autorenteam zum Schluss, dass LED-Beleuchtung aus Sicht der Energieeffizienz die beste Lösung darstellt. Dies trifft für die Adaptationsbeleuchtung wie auch die Durchfahrtsbeleuchtung zu.

¹ Daten aus Deutschland, zur Verfügung gestellt von BAST

7.4.4 Helle Oberflächen im Tunnel

Helle Oberflächen im Tunnel (Wände, Beläge) sind eine bauliche Massnahme zur Minimierung des Energieaufwands für die Beleuchtung.

Im Tunnel Lungern läuft seit 2012 ein 4-jähriger Versuch zur Minimierung der aktiven Beleuchtung im Zusammenhang mit den eingesetzten Belägen. Bei hellen und dunklen Belägen wurde der Energieverbrauch der Durchfahrtsbeleuchtung für die Varianten LED-Leuchten und FL-Leuchten verglichen (die Wände sind jeweils hell). Der "Bericht Monitoring" aus dem Jahr 2013 [12] enthält dazu folgende Zahlen:

Tab. 6 Ergebnisse des Beleuchtungstests Lungern

Durchfahrtsbeleuchtung	Belag dunkel	Belag hell
FL-Band 3er Pakete	275'000 kWh	170'300 kWh
LED	129'200 kWh	50'400 kWh

Das aufgezeigte Energiesparpotenzial durch helle Beläge beträgt für FL 38% und für LED 61%. Der Vergleich FL zu LED zeigt bei gleichen Belägen jeweils einen markant tieferen Energieverbrauch für die Variante LED. Beim dunklen Belag zeigt sich in etwa ein Faktor 2, beim hellen Belag in etwa ein Faktor 3. Diese Resultate sprechen für den Einsatz von LED gerade in Kombination mit hellen Belägen.

Eine Studie der Universität Rom hat ebenfalls die energetische Optimierung der Tunnelbeleuchtung im Zusammenhang mit hellen Oberflächen untersucht [24]. Es fand ein modellbasierter Vergleich der Gesamtkosten für folgende Varianten statt:

- Variante 1: NaH-Beleuchtung, normaler dunkler Belag
- Variante 2: LED-Beleuchtung, verstärkt mit NaH-Beleuchtung im Adaptationsbereich, normaler dunkler Belag
- Variante 3: NaH-Beleuchtung, heller Belag
- Variante 4: LED-Beleuchtung, verstärkt mit NaH-Beleuchtung im Adaptationsbereich, heller Belag

Variante 4 schnitt mit den tiefsten Gesamtkosten (Installation, Energie, Unterhalt) am besten ab. Die Mehrkosten für den hellen Belag wurden in der Betrachtung berücksichtigt. Auch beim Energieverbrauch schnitt Variante 4 am besten ab. Gegenüber der Variante 1 wurde für Variante 4 ein um ca. 45% tieferer Energieverbrauch modelliert.

Massnahmen bei Neubauten und ganzheitlichen Sanierungen:

- Fahrbahn und Wände mit hellen Oberflächen ausführen (helle Decken bringen keinen Nutzen)
- LED-Beleuchtung einsetzen

Im ersten Massnahmenpaket der Energiestrategie 2050 [1] wird im Bereich Reduktion des Energieverbrauchs für den Betrieb der Nationalstrasse folgende Aussage gemacht:

Massnahme 7.3 Reduktion des Energieverbrauchs für den Betrieb der Nationalstrassen:

Der Energieverbrauch für den Betrieb der Nationalstrassen soll hauptsächlich durch die Einführung von LED-Leuchten und helle Tunneloberflächen (Belag, Wände) reduziert werden. Die beiden Teilmassnahmen könnten durch entsprechende Spezifikationen in den Ausschreibungsunterlagen für Unterhalts- und Ausbauprojekte umgesetzt werden. Bei der Teilmassnahme "helle Tunnelwände" sind vorgängig die Ergebnisse mit Pilotprojekten auszuwerten.

Der Projektteam unterstützt die im Rahmen der Energiestrategie gemachten Aussagen, weist jedoch darauf hin, dass weitere Massnahmen existieren, um den Energieverbrauch von Strassentunneln zu senken.

7.4.5 Dunkle Annäherungsstrecke

Im Gegensatz zum Tunnel sollte die Annäherungsstrecke möglichst dunkel gestaltet werden. Durch eine tiefe Leuchtdichte auf der Annäherungsstrecke kann der Energieaufwand für die Beleuchtung minimiert werden. Die Architektur sollte im Portalbereich dunkle Materialien einsetzen.

7.4.6 Beleuchtungssteuerung

Grundsätzlich kann man die Beleuchtungssteuerung im Strassentunnel kurz zusammenfassen: Je heller aussen, desto heller innen. Die Leuchtdichte auf der Annäherungsstrecke (L_{20}) dient als Regelgrösse für die Fahrbahnleuchtdichten in der Einfahrt- und Übergangsstrecke. Gemäss Fachhandbuch BSA sind beide Tunnelportale mit einer Leuchtdichtemessung (LDM) auszurüsten. Die damit gemessene Leuchtdichte dient der Beleuchtungssteuerung.

In der Nacht kann die Adaptationsbeleuchtung ausgeschaltet und die Durchfahrtsbeleuchtung in Abhängigkeit zur Tunnelkategorie reduziert werden. Die Norm SN 640 551-1:2012 gibt die zu erreichenden Leuchtdichtewerte vor [14]. Sind die Aussenstrecken in der Nacht beleuchtet, so muss der Tunnel die gleiche Beleuchtung aufweisen. Das Lastprofil eines Strassentunnels weist in der Regel einen Tag-Nacht-Rhythmus auf. Folgende Abbildung zeigt das Lastprofil der Beleuchtung der Weströhre des Tunnels Blatt für zwei Tage Ende Dezember sowie zwei Tage Ende Juni:

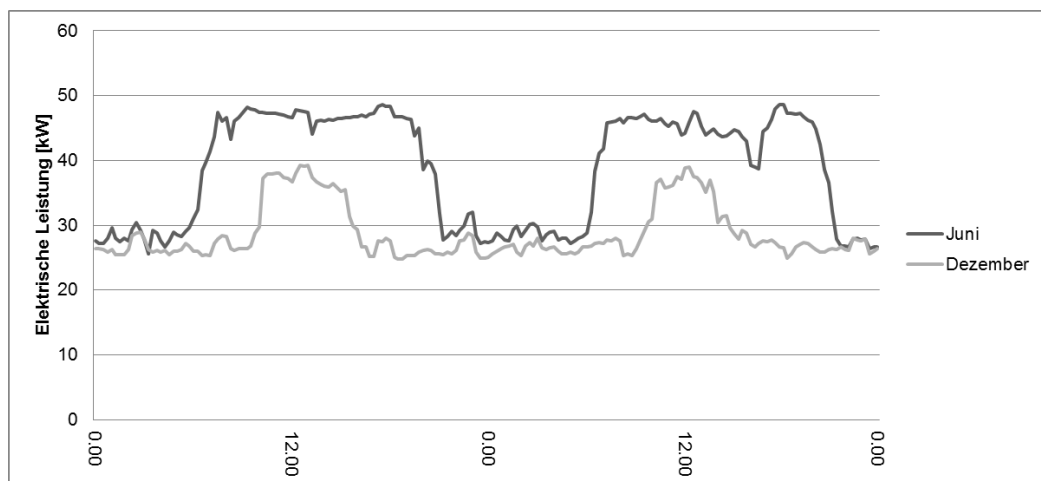


Abb. 27 Leistungsaufnahme eines Tunnels im Tagesverlauf

Der Tag-Nacht-Rhythmus ist sowohl im Sommer wie im Winter vorhanden, wobei er im Sommer aufgrund der höheren Aussenleuchtdichte viel ausgeprägter ist. In der Nacht senkt sich der Leistungsbedarf unabhängig von der Jahreszeit auf in etwa das gleiche Niveau ab. Der Effekt der längeren Tage im Sommer ist durch die breiteren Tagspitzen deutlich erkennbar. Im Winter, wenn die Leuchtdichte auf der Annäherungsstrecke geringer ist als im Sommer, kann die Adaptationsbeleuchtung auf einem tieferen Niveau betrieben werden, was sich im Energieverbrauch bemerkbar macht.

Folgende Abbildung zeigt die monatlichen Energieverbrauchswerte eines ca. 1 km langen Tunnels über die Aufzeichnungszeit 2011-2014:

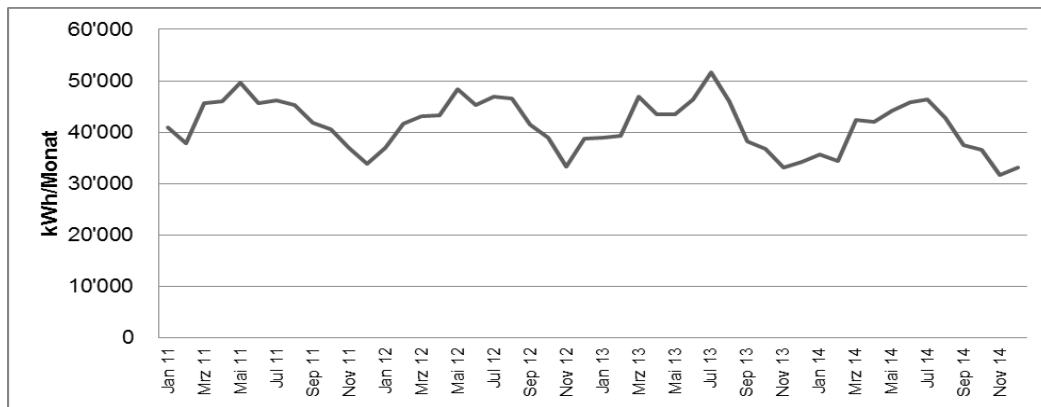


Abb. 28 Leistungsaufnahme eines Tunnels, Monatswerte im Jahresverlauf

Der Sommer-Winter-Rhythmus ist gut zu sehen, was auf eine korrekte Beleuchtungssteuerung hindeutet. Der Sommer-Winter-Rhythmus ist bei längeren Tunneln weniger ausgeprägt, da der relative Energieanteil der Adaptationsbeleuchtung geringer ausfällt als bei kürzeren Tunneln.

Beleuchtungssteuerung und LED-Beleuchtung

Folgende Eigenschaften der LED-Beleuchtung sind im Hinblick auf eine effiziente Beleuchtungssteuerung vorteilhaft:

- Hohe Schaltfestigkeit
- Fehlendes Anlaufverhalten
- Beliebige Dimmbarkeit
- Effizienz im gedimmten Zustand

Im Bereich der Beleuchtungssteuerung ist im Zusammenhang mit dem Einsatz von LED-Leuchten weiteres Optimierungspotential vorhanden. Dazu ein Beispiel:

Der massgebende stündliche Verkehr (MSV) ist für die Festlegung der Tunnelklasse gemäss [14] heranzuziehen. Über die errechnete Tunnelklasse werden die erforderlichen Leuchtdichtewerte (Tag und Nacht) vorgegeben. Mit LED-Beleuchtung könnte man ein dynamischeres Steuerungsprinzip anwenden, indem die Tunnelklasse und somit die erforderliche Leuchtdichte aufgrund von laufend erhobenen Verkehrsdaten definiert wird. Dieses Prinzip könnte derart ausgereizt werden, dass ein Tunnel in Abwesenheit von Fahrzeugen gar nicht mehr beleuchtet wird. Sobald sich ein Fahrzeug dem Tunnel nähert, könnte die erforderliche Mindestbeleuchtung erzeugt werden. Aufgrund der hohen Schaltfestigkeit und des fehlenden Anlaufverhaltens könnte mittels LED-Beleuchtung somit noch mehr Energie eingespart werden.

7.4.7 Optische Leiteinrichtung

Optische Leiteinrichtungen sind beidseitig der Fahrbahn am Rand des Banketts angeordnete Lichtpunkte zur optischen Leitung der Verkehrsteilnehmer. Sie sind regulierbar auszuführen, wobei die maximale Intensität im Ereignisfall geschaltet wird [19]. Eine Tag-Nacht-Regelung findet ebenfalls statt. Optische Leiteinrichtungen sind gemäss Fachhandbuch BSA in LED-Technik auszuführen. Unterscheiden kann man die drahtgebundenen Systeme sowie die induktiven Systeme. Bei den induktiven Systemen werden die Leuchtkörper über einen im Bankett eingelegten Generator versorgt. Sie bieten bei einer etwas schlechteren Energieeffizienz den Vorteil, dass defekte Lichtpunkte einfach und rasch ersetzt werden können. Das Energieeffizienzpotenzial ist bei der optischen Leiteinrichtung gering.

7.4.8 Fluchtwegbeleuchtung

Die Fluchtwegbeleuchtung ist im Gegensatz zur Brandnotbeleuchtung meist permanent in Betrieb. Die Fluchtwegbeleuchtung ist in SOS-Nischen, Querschlägen und Sicherheitsstollen installiert. Die Leuchten der Durchfahrtsbeleuchtung, welche an der USV angeschlossen sind, gehören ebenfalls zur Fluchtwegbeleuchtung. Eine Verringerung der Leistung der Fluchtwegbeleuchtung resultiert in einer entsprechenden Energieeinsparung, welche durch konsequente Anwendung von LED-Leuchten erzielt wird. Die Fluchtwegbeleuchtung von Sicherheitsstollen ist gemäss Fachhandbuch BSA im Normalbetrieb ausgeschaltet [19]. Das Energieeffizienzpotenzial ist bei der Fluchtwegbeleuchtung gering.

7.4.9 Alternative Konzepte

Grundsätzlich kann man die Beleuchtungssteuerung im Strassentunnel (wie im Kapitel Beleuchtungssteuerung bereits erwähnt) kurz zusammenfassen: Je heller aussen, desto heller innen. Dieser Zusammenhang legt nahe, die Sonne für die Adaptationsbeleuchtung zu verwenden, denn scheint die Sonne (Leuchtdichte der Annäherungsstrecke hoch), so muss auch die Adaptationsbeleuchtung höher betrieben werden.

Der Einsatz von Spiegeln zur Umlenkung des Sonnenlichts in die Einfahrtsstrecke (sog. Sonnenreflexbeleuchtungssystem) wurde in einem Forschungsprojekt des ASTRA untersucht [22]. Das System eignet sich zur Unterstützung (nicht zum gänzlichen Ersatz) der Adaptationsbeleuchtung für ca. 100 Tunnelportale von Richtungsverkehrstunnel in der Schweiz. Für Gegenverkehrstunnel ist das System nicht anwendbar, da die Blendung unvermeidbar ist. Die Systeme werden als zuverlässig und wartungsarm beschrieben. Die genannten Nachteile (Schlagschatten, Blendwirkung, Reflexion in Rückspiegeln und Leuchtdichtesprünge im Tunnel) werden als gering bzw. lösbar eingestuft [23]. Gemäss der Studie sind solche Systeme in Italien in 9 Tunneln bereits seit längerer Zeit im Einsatz. In der Schweiz hat sich die Anwendung jedoch noch nicht durchgesetzt.



Abb. 29 Spiegel zur Tunnelbeleuchtung mit Sonnenlicht [22]

Die Studie schätzt das jährliche Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz solcher Spiegel an den ca. 100 identifizierten Portalen auf total 3'150'000 kWh. Dies entspricht in etwa dem elektrischen Energiebedarf von 800 Haushalten.

7.5 Lüftung

Tab. 7 Zusammenfassung Lüftung

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

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

Für die Optimierungsmassnahmen im Energieverbrauch von Strassentunneln ist die Tunnellüftung mit Anschlussleistungen von mehreren hundert Kilowatt als grosser potentieller Energieverbraucher zu betrachten. Dennoch trägt die Tunnellüftung bei den meisten Anlagen nur wenig zum tatsächlichen Energieverbrauch bei.

Dies ist auf die unterschiedlichen Einsatzgebiete der Lüftung zurückzuführen. Für die installierte Leistung ist in der Regel der Ereignisbetrieb massgebend, d.h. Rauchabsaugung oder einseitiger Rauchabtrieb mit hoher Längsströmung. Für den Verbrauch sind die Betriebsarten der Lüftung zu beachten:

- Normalbetrieb
- Ereignisbetrieb
- Sonderformen der Lüftung:
 - Portalluftabsaugung
 - Geruchslüftung
 - Taupunktlüftung
 - andere

Für den Normalbetrieb wird die Lüftung in vielen Tunneln praktisch nicht mehr benötigt.

Diese Arbeit zielt auf die Optimierung des Energieverbrauchs. Die installierte Leistung, die für einen Ereignisfall bereitgestellt wird, ist hierbei nicht von Bedeutung.

Sonderformen der Lüftung können einen beträchtlichen Energieverbrauch aufweisen. Da diese Betriebsarten häufig nicht durch Richtlinien reglementiert sind, ergibt sich hier das grösste Optimierungspotenzial.

7.5.1 Energieevaluation

Der Energieverbrauch der Lüftungsanlagen wird in den meisten Tunneln nicht separat erfasst. Um den tatsächlichen Verbrauch abzuschätzen, können die Betriebsstunden der einzelnen Ventilatoren herangezogen werden. Diese werden in der Regel zu Unterhaltungszwecken im Leitsystem erfasst und aufgezeichnet. Aus dem Alter des jeweiligen Ventilators und den aufgelaufenen Betriebsstunden kann der Energieverbrauch abgeschätzt werden. Vor allem bei Axialventilatoren verbleibt die Unsicherheit, ob der Ventilator im Teillastbetrieb eingesetzt wurde.

- Getrennte Erfassung der Betriebsstunden der Lüftungselemente (Strahlventilatoren, Zuluft- und Abluftventilatoren) für die weitere Auswertung
- Energieverbrauch/Jahr = Betriebsstunden [h] * installierte Leistung [kW] / Alter [a]

7.5.2 Effizienzpotential Lüftung

Strahlventilator

Strahlventilatoren, die sehr nahe an der Tunnelwand oder -decke installiert sind, erfahren beträchtliche Einbussen des wirksamen Schubes durch einen ungünstigen Einbauwirkungsgrad. Dieser Einbauwirkungsgrad kann von 90% bei Montage im Tunnelgewölbe bis zu 60% bei Installation in einer ungünstig gestalteten Ventilatornische abnehmen.

Bei Strahlventilatoren kann in erster Linie der Einbauwirkungsgrad verbessert werden, indem Strahlableiter oder gekröpfte Schalldämpfer eingesetzt werden. Bei einer günstigen Anordnung des Ventilators im Tunnelprofil kann der Einbauwirkungsgrad bis auf 100% erhöht werden. Bei der Nachrüstung eines bestehenden Tunnels sollte geometrisch geprüft werden, ob eine aerodynamisch günstigere Installation möglich ist.

Die Ausrüstung eines Tunnels mit geometrisch optimierten Strahlventilatoren scheiterte in der Vergangenheit häufig daran, dass die Ausführungen patentiert sind. Eine bestimmte Ausführung wurde nur von jeweils einem Hersteller angeboten. Eine Direktvergabe widerspricht der Forderung, dass Ausrüstungsverträge dieser Grössenordnung offen ausgeschrieben werden müssen.



Abb. 30 Beispiel von Strahlventilatoren mit gekröpften Schalldämpfern

Axialventilator

Grundsätzlich ist bei der Energieeffizienz der Axialventilatoren geringes Verbesserungspotential zu erwarten. Die aerodynamischen Wirkungsgrade von Ventilatoren haben sich in den letzten Jahren nicht wesentlich verbessert. Auch die Wirkungsgrade von Systemen der Ventilatorlieferanten, die in der Schweiz Lüftungssysteme installiert haben, unterscheiden sich nur wenig. Ventilatoren mit geringen Wirkungsgraden haben aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen auf dem Schweizer Markt praktisch keine Bedeutung.

Bei der Submission von Neuanlagen kann der Wirkungsgrad des Ventilators berücksichtigt werden, indem für Vergleich der Angebote der Energieverbrauch über die geschätzte Betriebsdauer kapitalisiert und zu der offerierten Summe addiert wird. Dies ist nur sinnvoll, wenn die Anlage über einen signifikanten Zeitraum in Betrieb ist, z.B. für eine Portal-luftabsaugung.

In Einzelfällen kann es sein, dass Ventilatoren in einem ungünstigen Betriebspunkt, d.h. mit geringem Wirkungsgrad, gefahren werden. Dies tritt vor allem auf, wenn ein Abluftventilator für unterschiedliche Anforderungen in Betriebs- und Ereignislüftung genutzt wird. Ein Abluftventilator kann sowohl für eine Portalluftabsaugung (grosse Luftmenge und geringe Druckerhöhung) und für eine Rauchabsaugung (kleine Luftmenge und grosse Druckerhöhung) ausgelegt sein. Weil der Betriebspunkt mit grosser Druckerhöhung in der Regel für die Auswahl des Ventilators massgebend ist, würde ein solcher Abluftventilator im Dauerbetrieb als Portalluftabsaugung mit schlechtem Wirkungsgrad betrieben.

Abb. 31 zeigt die Situation im Kennlinienfeld des Ventilators. Dargestellt ist die Druckerhöhung als Funktion des geförderten Volumenstroms. Das Kennlinienfeld wird nach oben durch die Abrissgrenze beschränkt. Die übrigen Linien sind Ventilator-Charakteristiken mit konstantem Schaufelwinkel. Die gestrichelten Linien deuten den Wirkungsgrad η des Ventilators für die unterschiedlichen Betriebspunkte an.

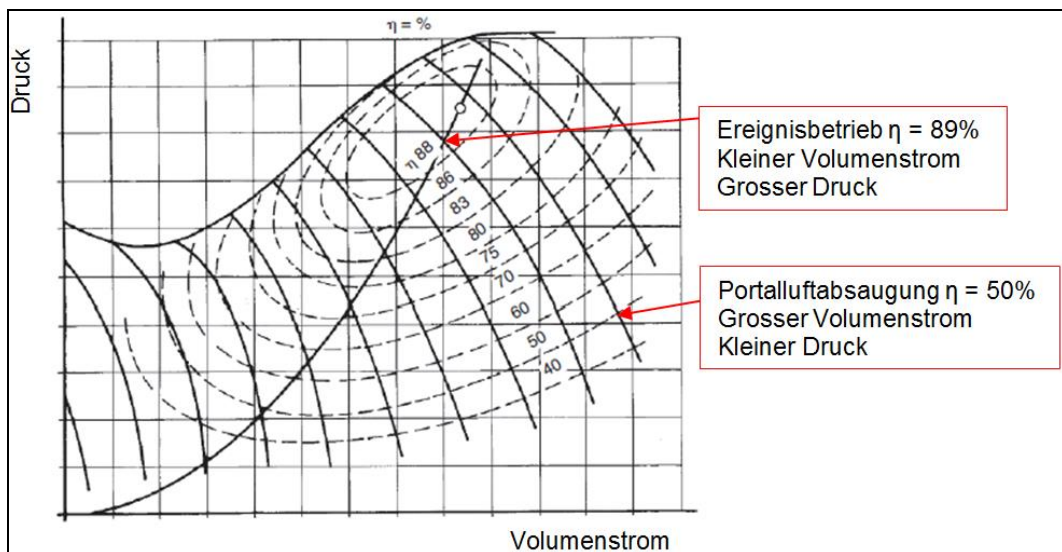


Abb. 31 Kennlinienfeld eines Axialventilators mit Laufschauflerverstellung [15]

Eine ähnliche Situation liegt bei der Belüftung von Sicherheitsstollen vor, bei der sich aus dem Normalbetrieb und in unterschiedlichen Betriebsarten im Ereignisbetrieb (geschlossene bzw. offene Fluchttüren) sehr unterschiedliche Betriebspunkte ergeben. Der Ventilator muss in erster Linie für den Ereignisbetrieb ausgewählt werden. Für den Normalbetrieb, in dem die Anlage zumeist läuft, wird so meist ein schlechter Wirkungsgrad erreicht.

Wenn eine Lüftungsanlage auf ungünstige Betriebspunkte ausgelegt ist, lässt sich die Situation mit betrieblichen Massnahmen kaum verbessern. Ein solcher Betrieb muss bereits während der Planung vermieden werden. Bei einer Auslegung gemäss Abb. 31 ist zu prüfen, ob separate Ventilatoren für Portalluftabsaugung und Ereignisbetrieb vorgesehen werden können. Dabei muss eine Abwägung zwischen Investitionskosten und Energieaufwand vorgenommen werden. Bei der Abwägung kann der Energieaufwand über die Erstellungskosten hinaus gewichtet werden.

Ansteuerung: Frequenzumrichter

Während Ventilator- und Motorwirkungsgrade meist nur ein geringes Verbesserungspotential aufweisen, können der Betrieb über Frequenzumrichter (Einsparung) und die damit verbundene Abwärme (Mehrverbrauch) in den Zentralen einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

Durch einen gezielten Teillastbetrieb ergeben sich Einsparungen beim Leistungsbedarf für die Lüftung. Mit dem Einsatz von Frequenzumformern können Stromspitze und Spannungsabfall beim Start eines Ventilators deutlich reduziert werden (Stromspitze vom 5-fachen des Nennstroms auf das 1.3-fache, Spannungsabfall von 12% auf 1.1% der Nennspannung). Andererseits hat der Frequenzumrichter einen Wirkungsgrad, der zu Verlusten und zu Abwärme in der Lüftungszentrale führt. Als energetisch beste Lösung erscheint häufig der Betrieb über einen Frequenzumrichter mit Bypass, bei dem der Umrichter bei Vollastbetrieb überbrückt wird. Der Bypass steht aufgrund zusätzlicher Elemente ggf. im Zielkonflikt mit einer sicheren und robusten Anlage.

Bei einer energetischen Optimierung der Ansteuerung ist stets der Einzelfall zu betrachten. Andere Aspekte, wie die beschränkte Lebensdauer des Umrichters und Rückwirkungen des Frequenzumrichters auf das Stromnetz etc., sind dabei zu berücksichtigen.

- Der Leistungsbedarf eines Axialventilators sinkt in erster Näherung mit der dritten Potenz des Volumenstroms. Beim Teillastbetrieb eines Axialventilators mit 75% des nominellen Volumenstroms sinkt der Leistungsbedarf des Ventilators auf 42%.

Frequenzumrichter vs. Schaufelverstellung

Der Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Leistungsbedarf gilt grundsätzlich auch für Ventilatoren, bei denen der Volumenstrom statt über die Drehzahl mit einer Einstellung der Laufschaufeln eingestellt wird. [15] zeigt einen Vergleich der beiden Systeme.

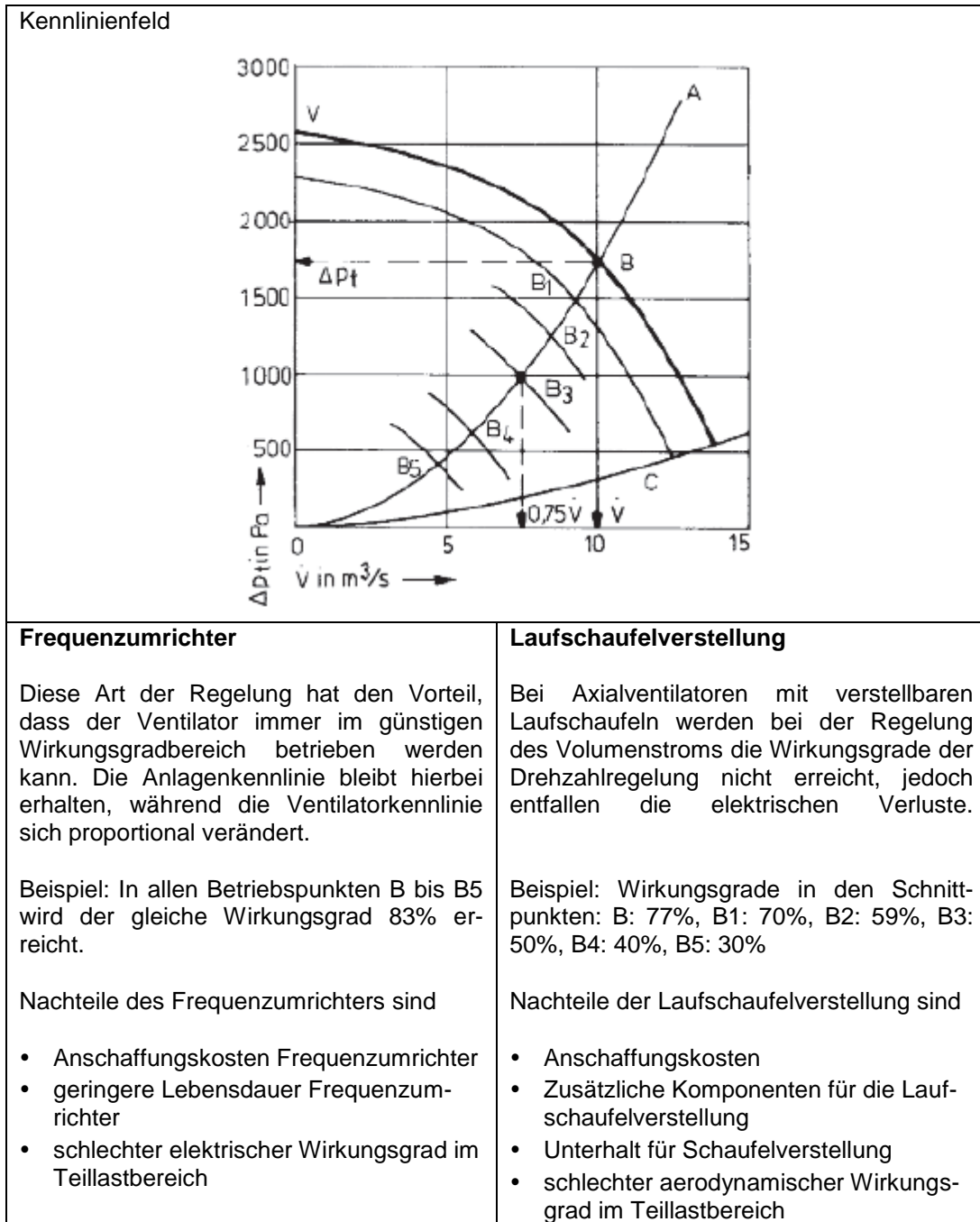


Abb. 32 Vergleich zwischen Ventilatoren mit Frequenzumrichter und mit Schaufelverstellung [15]

Beide Systeme erlauben eine Optimierung nach der Inbetriebsetzung (z.B. unter Berücksichtigung der effektiv vorherrschenden Reibungskoeffizienten und Leckagen). Es besteht also generell die Möglichkeit, dass eine Lüftung nachträglich einjustiert werden kann. Dies hat dann einen Einfluss auf die Energieeffizienz, wenn bei der Auslegung der Lüftung zu grosse Reserven eingeplant wurden.

Aus Sicht der Energieeffizienz kann nicht grundsätzlich die Ansteuerung der Ventilatoren über Frequenzumrichter oder Schaufelverstellung (hydraulisch oder elektrisch) empfohlen werden. Für die Energieeffizienz sind die Betriebszustände massgebend, in denen die Anlage über längere Zeit betrieben wird. Bei der Auswahl eines Verfahrens sind weitere Aspekte zu berücksichtigen, die über den Rahmen dieses Forschungsprojekts hinausgehen. Dies sind zum Beispiel Netzverträglichkeit, Lebensdauer, Unterhalt und ggf. Temperaturfestigkeit.

7.5.3 Einsatz der Lüftung: Betriebslüftung

Um eine ausreichende Luftqualität zu gewährleisten, muss der Fahrraum mit Frischluft versorgt werden. In den meisten Tunneln wird die Lüftung im Normalbetrieb kaum eingesetzt. Die Abnahme der Emissionen der Fahrzeuge hat zu einer deutlichen Verringerung der erforderlichen Frischluftmenge geführt. Zudem werden stark belastete Streckenabschnitte in der Regel mit zweiröhriigen Tunneln und Richtungsverkehrsbetrieb ausgebaut. Bis zu einer Tunnellänge von etwa 6 km genügt bei flüssigem Richtungsverkehr >40 km/h die Luftmenge, die von den Fahrzeugen selbst durch den Tunnel gefördert wird.

Die Vorgaben für die Auslegung der Betriebslüftung sind in der ASTRA Richtlinie 13001 [16] formuliert. Die Auslegung erfolgt anhand der Leitschadstoffe CO (Bemessungswert 70ppm) und Sichttrübe (Bemessungswert 5 /km). Die Richtlinie gibt für diese Leitschadstoffe Bemessungswerte und Grenzwerte vor. Für die Steuerung der Anlage sind die Einschaltwerte derart festzulegen, dass der Dimensionierungswert für CO im Mittel über die Tunnellänge und der Dimensionierungswert für die Sichttrübung an jedem Ort im Tunnel eingehalten werden. In den meisten Schweizer Strassentunneln wird die Lüftung bereits bei deutlich geringeren Konzentrationen der Leitstoffe in einer tiefen Lüftungsstufe eingeschaltet. Bei Einschaltwerten der Sichttrübe unter 1.5 /km kann es vorkommen, dass die Betriebslüftung eingeschaltet wird, weil ein falsch positives Signal der Messung erfasst wird. Solche Konzentrationen können gerade bei ungenügend gewarteten Messgeräten im Bereich der Messgenauigkeit liegen. Die ASTRA Richtlinie 13001 verlangt eine Messgenauigkeit von ± 1 /km.

In langen Tunneln, die mit einem Abluftschacht und einer lokalen Absaugung über steuerbare Klappen ausgestattet sind, kann der natürliche Auftrieb im Schacht für die Betriebslüftung genutzt werden. Diese Betriebsart wird derzeit in einzelnen Tunneln eingesetzt. Eine Automatisierung ist indes anspruchsvoll. Zudem ist zu beachten, dass sich die Ventilatoren in der Strömung unkontrolliert drehen, was keinen gewünschten Betriebszustand darstellt.

- Ein Optimierungspotential der Betriebslüftung kann über die Auswertung der Betriebsstunden der Ventilatoren identifiziert werden.

Bei einer hohen Anzahl Betriebsstunden ist zu prüfen:

- Ist der Zustand der Messeinrichtungen hinreichend für die Lüftungssteuerung?
- Ist die Lüftungssteuerung plausibel (Einschaltwerte, Lüftungsstufen)?

7.5.4 Einsatz der Lüftung: Ereignislüftung

Die Ereignislüftung ist in Bezug auf die Energieoptimierung nur zu betrachten, wenn im Betrachtungszeitraum aussergewöhnliche Ereignisse, wie z.B. Grossübungen oder tatsächliche Brände aufgetreten sind. In diesem Fall ist der Energieverbrauch über die Betriebsdauer und die geschätzte bezogene Leistung abzuschätzen und vom Gesamtenergieverbrauch abzuziehen (im Rahmen der Plausibilisierung des Energieverbrauchswerts gemäss Konzept im Anhang).

7.5.5 Einsatz der Lüftung: Portalluftabsaugung

Bei der Projektierung von Lüftungsanlagen für Strassentunnel ist gemäss der Richtlinie ASTRA 13001 [16] die Umweltbelastung in der Umgebung der Portale zu beachten. Das Umfeld der Portale ist vor übermässigen Schadstoffimmissionen durch Tunnelabluft zu schützen.

Im Regelfall werden Lüftungsanlagen so betrieben, dass die Abluft aus den Portalen in die Umgebung abströmt. Ausnahmen bilden lange Tunnel mit einer Querlüftung (z.B. Gotthardtunnel), bei denen die schadstoffbelastete Luft über Lüftungskanäle aus dem Fahrraum abgesaugt und über Abluftbauwerke abgegeben wird.

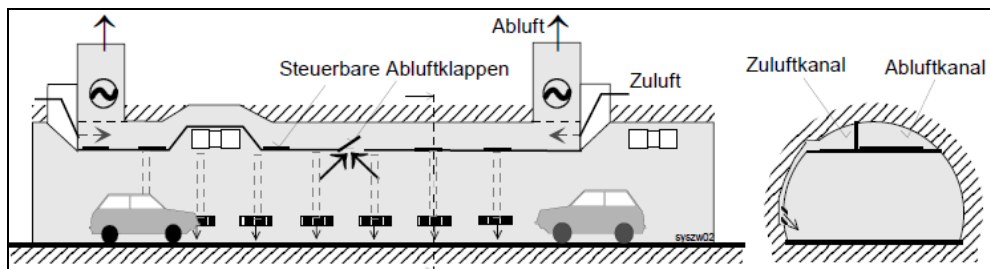


Abb. 33 Schema einer Querlüftung [16]

Eine Portalluftabsaugung (Richtungsverkehrstunnel, z.B. A3 Uetlibergtunnel Nordröhre) bzw. Mittenabsaugung (Gegenverkehrstunnel, z.B. Chienbergtunnel, Tunnel Leissigen) ist dann vorzusehen, wenn sich aus dem Umweltverträglichkeitsbericht eine Auflage für die Projektgenehmigung ergibt, die Portalbereiche vor erhöhter Schadstoffbelastung zu schützen (Abb. 34). Dies kann bei langen, stark befahrenen innerstädtischen Tunneln der Fall sein. Wird die schadstoffbelastete Tunnelluft über ein Abluftbauwerk mit hoher Ausblasgeschwindigkeit vertikal in die Atmosphäre abgegeben, so kann von einer starken Verdünnung der Abgase ausgegangen werden. Bei korrektem Betrieb kann in der Umgebung die Zusatzbelastung durch eine Portalluftabsaugung messtechnisch nicht nachgewiesen werden.

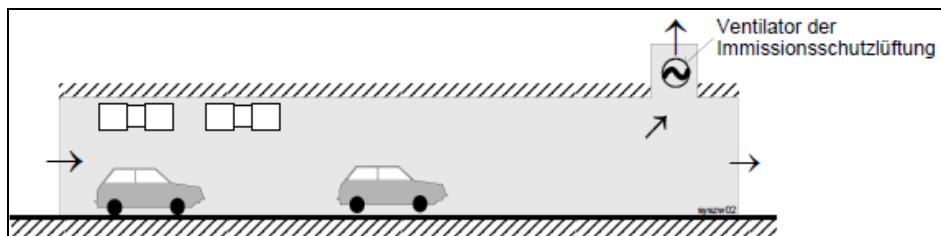


Abb. 34 Schema einer Längslüftung mit Portalluftabsaugung [16]

Absauglüftungen werden meist darauf ausgelegt, die gesamte vom Verkehr durch den Tunnel geförderte Luftmenge zu erfassen und über ein Abluftbauwerk abzugeben. Dabei ergeben sich grosse Luftmengen (typisch $>400 \text{ m}^3/\text{s}$) mit geringen Schadstoffkonzentrationen. Eine solche Abluftanlage weist einen Leistungsbedarf von etwa 450 kW auf und kann während 16 Stunden täglich in Betrieb sein [20].

Ziel der Portalluftabsaugung ist das Abführen einer möglichst grossen Schadstoffmenge über das Abluftbauwerk. Energetisch ist es also interessant, die Abluftanlage bei hohem Verkehrsaufkommen und geringer Fahrgeschwindigkeit, d.h. geringer Abluftmenge, zu betreiben. Bei den Voruntersuchungen für die Einhausung Schwamendingen wurden derartige Überlegungen ausgeführt. Sie sind dokumentiert in der Studie zur Reinigung von Abluft aus Strassentunneln [20]. Dort wird empfohlen, die Absaugung nicht für die maximale Luftmenge auszulegen, sondern für wiederkehrende Stausituationen, bei denen die mittlere Fahrgeschwindigkeit unter 40 km/h sinkt.

Im Umweltverträglichkeitsbericht wird die prognostizierte Schadstoffsituation für das Eröffnungsjahr des Tunnels untersucht. Es ist möglich, dass sich in den Jahren nach Tunnelöffnung Emissionen der Fahrzeuge sowie die Schadstoffbelastung in der Umgebung des Tunnels derart verändern, dass ein Betrieb der Abluftanlagen nicht länger notwendig ist. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs sollte geprüft werden, ob der Abluftbetrieb unterbleiben kann, auch wenn dies ein ergänzendes Genehmigungsverfahren erforderlich machen kann. Die Richtlinie ASTRA 13001 verlangt eine periodische Überprüfung von Immissionsschutzanlagen durch Messungen [16].

- Ein Optimierungspotential der Portalluftabsaugung kann über die Auswertung der Betriebsstunden der Ventilatoren identifiziert werden.

Bei einer hohen Anzahl Betriebsstunden ist zu prüfen:

- Ist die Notwendigkeit der Portalluftabsaugung noch immer gegeben?
- Ist eine geringere Betriebsdauer zum Erreichen der Lüftungsziele ausreichend?
- Kann der Betrieb der Portalluftabsaugung aufgrund der tatsächlichen Verkehrsdaten optimiert werden, so dass die geforderte Schadstoffmenge bei kleinerem Energieaufwand abgeführt werden kann?

7.5.6 Einsatz der Lüftung gegen Geruchsbelastung

In einzelnen Strassentunneln ist in der Lüftungssteuerung ein Programm vorgesehen, in dem die Lüftung nach Datum und Uhrzeit betrieben wird. Zeitprogramme können für automatisierte Testläufe der Lüftungsinstallationen genutzt werden. Diese Nutzung ist aufgrund der kurzen Betriebszeiten für den Energieverbrauch nicht kritisch.

Zeitprogramme können zudem genutzt werden, um die Lüftung im Normalbetrieb zu unterstützen, z.B. bei Fehlfunktionen der Überwachungseinrichtungen. Wenn dies über längere Zeit der Fall ist, kann der Energieverbrauch merklich erhöht sein. Zeitprogramme werden zudem eingesetzt, wenn besondere Geruchsbelastungen im Tunnel gemeldet werden, z.B. durch anaerobes Bergwasser. Nicht immer lassen sich die Quellen einer Geruchsbelastung eindeutig bestimmen (z.B. A13 Tunnel Isla Bella in den ersten Jahren nach Eröffnung). Wenn die Lüftung gegen Geruchsbelastung in Betrieb ist, sollte regelmässig geprüft werden, ob das Problem noch besteht oder ob die Betriebszeiten der Lüftung verringert werden können.

- Ein Optimierungspotential der Lüftung gegen Gerüche kann über die Auswertung der Betriebsstunden der Ventilatoren identifiziert werden.

Bei einer hohen Anzahl Betriebsstunden ist zu prüfen:

- Ist die Notwendigkeit des Lüftungsbetriebs noch immer gegeben?
- Ist eine geringere Betriebsdauer zum Erreichen der Lüftungsziele ausreichend?

7.5.7 Einsatz der Lüftung: Taupunktlüftung

Das Lüftungskonzept eines Strassentunnels kann einen entscheidenden Einfluss auf das Risiko beschlagender Windschutzscheiben haben. Mit einer Mittenabsaugung kann erreicht werden, dass durch alle Tunnelportale Frischluft in den Tunnel gezogen wird. Damit wird das Risiko beschlagender Scheiben deutlich vermindert [21]. Andererseits ist der Betrieb einer Mittenabsaugung als Taupunktlüftung äusserst energieaufwendig. Die Luftmenge wird durch die Aerodynamik der Fahrzeuge und nicht durch die Schadstoffkonzentration bestimmt. Bei einer Taupunktlüftung sind die Luftmengen ähnlich gross wie bei einer Portalluftabsaugung. Da die Absaugung in Tunnelmitte liegt, muss die Luft in der Regel durch Kanäle bzw. Schächte abgeführt werden. Dies erhöht den Energieverbrauch gegenüber einer Portalluftabsaugung. Folgende Abbildung zeigt ein Lüftungskonzept mit Absaugung in der Tunnelmitte:

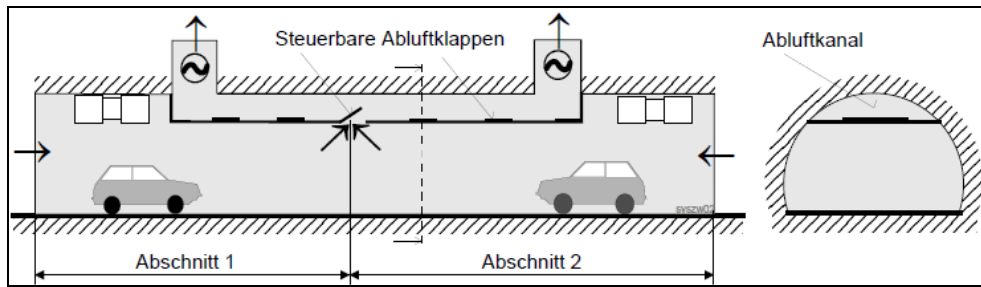


Abb. 35 Schema einer Längslüftung mit Absaugung in Tunnelmitte [16]

In einzelnen Tunneln mit Mittenabsaugung wurde eine Taupunktsteuerung in die Lüftungssteuerung integriert, z.B. Nationalstrasse A8 Tunnel Leissigen, A13 Tunnel Isla Bella. Bei einem erhöhten Energieverbrauch der Lüftung soll geprüft werden, ob dieses Lüftungsprogramm aktiv ist. Alternative Massnahmen zur Senkung des Unfallrisikos sollen erwogen werden, z.B. die Installation von Hinweistafeln "Scheibenwischer einschalten".

- Ein Optimierungspotential der Taupunktlüftung kann über die Auswertung der Betriebsstunden der Ventilatoren identifiziert werden.

Bei einer hohen Anzahl Betriebsstunden ist zu prüfen:

- Ist eine Taupunktlüftung in der Lüftungssteuerung implementiert und aktiv?
- Kann das gleiche Sicherheitsniveau mit alternativen Massnahmen erreicht werden?

7.5.8 Einsatz der Lüftung: Sicherheitsstollen

Die Lüftung von Sicherheitsstollen wird nach den Vorgaben für Normal- und Ereignisbetrieb ausgelegt [17]. Die Anforderungen für den Ereignisbetrieb sollen im Folgenden nicht analysiert werden, da der Ereignisbetrieb für den Energiebedarf der Lüftung von geringer Bedeutung ist.

Im Normalbetrieb wird die Lüftung im Dauerbetrieb eingesetzt, um im Sicherheitsstollen einen Überdruck gegenüber dem Fahrraum einzustellen [17]. Die Luftmenge ergibt sich aus Leckagen der Notausgangtüren bzw. Stollenabschlüsse. Da die Lüftung ständig in Betrieb ist, wirkt sich bereits eine geringe Leistungsoptimierung stark auf den Energieverbrauch aus.

Die Auslegung der Lüftungsanlage erfolgt separat für die Bedingungen des Ereignisbetriebs und des Normalbetriebs. Häufig ist es möglich, die Bedingungen Normal- und Ereignisbetrieb mit dem gleichen Ventilator zu erfüllen. Dabei wird der Ventilator im Normalbetrieb mit reduzierter Drehzahl betrieben. Nach der Einführung des Fachhandbuchs BSA [19] darf der Ventilator zu diesem Zweck nicht mehr über eine Drehzahlregelung mit Frequenzumrichter betrieben werden. Stattdessen sind feste Drehzahlen vorzusehen. Alternativ kann ein separater Ventilator ausschliesslich für den Normalbetrieb eingesetzt werden. Die Variante mit zwei Ventilatoren wird in den meisten Situationen die energieeffizienteste Lösung darstellen, da eine unabhängige Optimierung für Normal- und Ereignisbetrieb möglich ist.

Die Auslegung der Ventilatoren erfolgt aufgrund von Annahmen zu den Leckagen. Diese können je nach Qualität der Bausauführung stark schwanken. Häufig führen Sicherheitszuschläge dazu, dass im Normalbetrieb Überdruck und Luftmenge grösser sind als gefordert. Durch eine Anpassung des Ventilatorbetriebs kann eine Energieeinsparung erreicht werden. Aus einer Einsparung von 300 W ergibt sich eine Reduktion des Jahresverbrauchs von 2'600 kWh.

Für die Verringerung des Energieverbrauchs kann zudem geprüft werden, ob ein Dauerbetrieb der Lüftungsanlage im Normalbetrieb notwendig ist. Die Vorgaben diesbezüglich sind in der Schweiz besonders streng. In Deutschland und Österreich wird auf einen

dauerhaften Überdruck gegenüber dem Fahrraum verzichtet. Sicherheitsstollen werden intermittierend belüftet.

7.6 Signalisation

Geringes Optimierungspotential.

Die elektrischen Verbraucher, welche zur Signalisation gehören, weisen wegen ihrer geringen Leistungsaufnahme (etwa 10 W je Einheit) und beschränkter Anzahl im Tunnel (< 50 Einheiten) kein signifikantes Optimierungspotential auf. Bei Neuanlagen werden generell LED Leuchten eingesetzt [19]. Dies betrifft Wechselsignale ebenso wie Ampeln, Blinker und Fahrstreifensignale.

7.7 Überwachungsanlage

Geringes Optimierungspotential.

Die elektrischen Verbraucher, welche zur Überwachungsanlage gehören, weisen wegen ihrer geringen Leistungsaufnahme (etwa 10 W je Einheit, Rauchmelder 25 W je Einheit) und beschränkter Anzahl im Tunnel kein signifikantes Optimierungspotential auf. Da die Beheizung der Rauchmelder für die Funktion wesentlich ist, kann hier kaum Energie eingespart werden.

Eine Ausnahme stellt die Videoanlage dar. Hier werden meist Kameras mit einem Wetterschutzgehäuse und einer integrierten Heizung eingesetzt.

- Kameras im Tunnel werden mit einer Energieversorgung 230 V ausgestattet.
- Die Leistungsaufnahme der Kamera selbst ist eher gering (< 10 W).
- Es kann etwa von einer Kamera je 100 m Tunnellänge ausgegangen werden. Beispiele: Tunnel Leissigen 18, Tunnel Visp 60, Tunnel Eyholz 76 Kameras im Tunnel und in den Vorportalbereichen.
- CCTV im Wetterschutzgehäuse mit Heizung bis ca. 40 W (im Tunnel und in den Vorzonen)
- Auswerteeinheiten ca. 150 W Leistung

Wenn für die Heizung der Kameras ungerichtet eine Leistung von 30 W je Kamera erbracht wird, ergibt dies für einen Tunnel mit 50 Kameras eine Leistung von 1.5 kW. Im Dauerbetrieb werden jährlich 13'000 kWh verbraucht. Eine gewisse Einsparung an diesem Energieverbrauch wäre möglich und über die Jahre betrachtet signifikant. Es ist dies jedoch ein Spezialfall und grundsätzlich weist die Überwachungsanlage nur geringes Optimierungspotential auf.

7.8 Kommunikation & Leittechnik

Geringes Optimierungspotential.

Anzahl Datenpunkte prüfen und minimieren, um die Rechenleistung zu verringern.

Es wird davon ausgegangen, dass die Rechenleistung und damit der Energieverbrauch der Leittechnik etwa proportional zur Anzahl Datenpunkte des Systems sind. Für eine Energieoptimierung ist zu prüfen, ob die Anzahl Datenpunkte reduziert werden kann. Bei der Bewertung des Energieverbrauchs ist zu berücksichtigen, dass die Abwärme der Geräte in den Zentralen zu einem erhöhten Investitions- und Energieaufwand bei der Raumlüftung bzw. Klimatisierung führt.

7.9 Kabelanlage (Infrastruktur)

Geringes Optimierungspotential.

Leistungsverluste nehmen mit zunehmendem Kabelquerschnitt ab.

Das Einsparpotential der Kabelanlage bezieht sich auf die Kabellängen und auf die Querschnitte. Beides hat einen direkten Einfluss auf den Ohm'schen Widerstand und damit auf die Leistungsverluste. Die Kabellängen können bei einem bestehenden Objekt ohne Konzeptanpassungen kaum beeinflusst werden.

Bei einem Ersatz der Kabel nach ihrer Lebensdauer kann es sich lohnen, das Konzept zu überprüfen um ggf. Kabellängen zu optimieren, sowie die Querschnitte grösser zu wählen als das technisch erforderliche Minimum. Über die Lebensdauer der Verteilungen und Kabel von 30 Jahren können sich Energieeinsparungen ergeben. In der Planung sollte der optimale Leitungsquerschnitt über eine Lebensdauerkostenrechnung ermittelt werden.

7.10 Nebeneinrichtung

Tab. 8 Zusammenfassung Nebeneinrichtung

Effizienzpotential	Tief	Mittel	Hoch	Massnahmen
Betriebsoptimierung		X		<ul style="list-style-type: none"> • Regeltemperaturbereiche und Luftwechsel überprüfen • Erfordernis Räume mit Überdruck überprüfen • Regelung grosser Verbraucher wie Rohrbegleitheizungen und Fahrbahnheizungen überprüfen
Technologie/Ersatz			X	<ul style="list-style-type: none"> • HLK Konzept ganzheitlich optimieren • Temperieren statt heizen • Einsatz von Wärmepumpen, Wärmerückgewinnung
Anpassung Richtlinien		X		<ul style="list-style-type: none"> • Diverse gemäss Kapitel 9

Für die Beleuchtung der Zentralen und Nebenräume werden Leuchtstofflampen eingesetzt. Diese erreichen eine Lichtausbeute von 50 bis 100 Lumen pro Watt (zum Vergleich: Glühlampe ca. 15 Lumen pro Watt) und haben somit eine vergleichsweise hohe Energieeffizienz. Moderne LEDs können eine noch höhere Effizienz als Leuchtstoffröhren erreichen (>100 Lumen pro Watt). Insgesamt ist das Optimierungspotential bei der Beleuchtung der Nebenräume als gering einzustufen, wenn bereits moderne Leuchtstoffröhren eingesetzt werden.

Es ist zu beobachten, dass in der Planung von HLK-Anlagen für Elektrozentralen oft keine HLK-Spezialisten beigezogen werden. Stattdessen werden oft Unternehmerlösungen eingesetzt, was zu suboptimalen Standardlösungen führt.

Bei bestehenden HLK-Anlagen kann ein beträchtliches Optimierungspotential bestehen. Für die Energieeffizienz massgebend sind das Gesamtkonzept (Luftwechsel, Regeltemperaturen, Raumkonzepte) und der Zustand der Anlagen. Aus den erforderlichen Kühlleistungen kann zudem ein Optimierungspotential der Installationen abgeleitet werden. In der Elektrozentrale fällt 30-40 % des gesamten Kühlbedarfs für den Niederspannungsraum an. Die übrigen Kühlleistungen teilen sich etwa zu gleichen Teilen auf: Leittechnik, USV, Batterieraum, Mobilfunk und Trafo/Mittelspannungsraum. Eine Verminderung der Kühlleistungen senkt den Energiebedarf sowohl bei den Installationen als auch bei der Klimatisierung der Zentrale.

Bei einer Anpassung der Raumlüftung sind konzeptionelle Verbesserungen zu prüfen:

- Ersatz von Elektroheizungen durch Wärmepumpen
- Wärmerückgewinnung aus der Zentralenabluft

- Vorkonditionierung von Aussenluft über Erdregister
- Individuelle Temperatur- und Feuchteregulierung der einzelnen Räume
- Energieoptimierung der Temperatur- und Feuchtevorgaben gemäss den Anforderungen der einzelnen Räume.

Im Fachhandbuch BSA erscheint die Wärmepumpe in keiner Weise. Wärmepumpenbasierte Konzepte entsprechen heute dem Stand der Technik. Luft-Luft Wärmepumpen, welche die Aussenluft über ein Erdregister vorkonditionieren, erscheinen dem Projektteam als prüfenswerte Option, zumal diese leicht in das Raumlüftungskonzept integriert werden können. Bei der Submission von Neuanlagen kann der Wirkungsgrad der Raumlüftung berücksichtigt werden, indem für Vergleich der Angebote der Energieverbrauch über die geschätzte Betriebsdauer kapitalisiert und zu der offerierten Summe addiert wird. Dies ist bei einer Raumlüftung besonders sinnvoll, da die Anlagen dauerhaft in Betrieb sind.

Bei den sanitären Einrichtungen der Zentralen kommen Durchlauferhitzer für die Warmwasserbereitung zum Einsatz. Die Warmwasserbereitung trägt mit Leistungen von einigen Kilowatt zum Energieverbrauch bei. Bei einer Überprüfung des Energieverbrauchs ist zu prüfen, ob eine Warmwasserversorgung wirklich notwendig ist.

Bei der Wasserversorgung kann eine beträchtlicher elektrische Leistung für Pumpen aufgewendet werden. Da die Pumpleistung stark von den örtlichen Rahmenbedingungen abhängt, kann keine generelle Aussage zum Leistungsbedarf gemacht werden. Leistung und Betriebsdauer der Pumpen sind objektspezifisch zu beurteilen. Bei einem Ersatz von Pumpen, die eine bedeutende Betriebsdauer aufweisen, soll der Energieverbrauch bei der Auswahl des Produkts einbezogen werden (Monetarisierung des Energieaufwandes über die Lebensdauer).

Rohrbegleitheizungen der Wasserversorgung bzw. der Entwässerung weisen eine Leistung von etwa 30 W/m auf. Es sollen selbstregelnde Heizbänder eingesetzt werden, deren Kunststoffkern einen elektrischen Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizienten aufweist. So kann durch die Wahl des Heizbandtyps eine Haltemperatur in Abhängigkeit von Wärmedämmung (bei Rohrleitungen) und Umgebungstemperatur erreicht werden. Um anwendungsgerecht den Energieverbrauch zu minimieren, ist eine zusätzliche Steuerung (temperaturabhängig) erforderlich. Dabei wird der Fühler (PTC-Widerstand) am kältesten Punkt der Leitung angebracht. Ab einer verbrauchsoptimierten Temperatur wird die Heizung automatisch aktiviert und verhindert so ein Einfrieren.

In den Zentralen ist jeweils zumindest ein Telefonanschluss vorzusehen. Bei Nationalstrassentunneln werden die Telefonanschlüsse integriert in die Telefonanlage der zuständigen Gebietseinheit. Für eine Verringerung des Energieverbrauchs sollten kabelgebundene Telefone bevorzugt werden (keine DECT-Stationen).

In der Schweiz sind einige Tunnel mit einer elektrisch betriebenen Fahrbahnheizung ausgestattet. Die Fahrbahnheizung erstreckt sich über eine Distanz von einigen 10 m vor den Portalen. Sie erleichtert die Schneeräumung, indem der Schneeflug vor dem Portal ausscheren kann und so keinen Schnee in den Tunnel verschleppt. Andererseits ist eine Fahrbahnheizung mit einer Anschlussleistung von 50 bis 150 kW ein bedeutender Strombezüger. In den Wintermonaten kann der Energiebedarf dieser Heizung den Energiebedarf einer Lüftungsanlage um ein Mehrfaches übersteigen. Bei der Energiebewertung eines Tunnels sollte ein solcher Verbraucher nach Möglichkeit separat ausgewiesen werden.

Eine Optimierung des Energiebedarfs einer Fahrbahnheizung ist im Einzelfall mit dem SERSO Verfahren möglich. SERSO steht für Sonnen-Energie-Rückgewinnung aus Strassen-Oberflächen. Dabei wird im Sommer dem Fahrbahnbelag Energie entzogen. Die Energie wird in einem Felsspeicher gespeichert und im Winter zur Eisfreihaltung in den Fahrbahnbelag rückgeführt. Eine Pilotanlage wurde an einer Autobahnbrücke der A8 bei Därligen realisiert [25].

8 Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln

8.1 Beschreibung

Es wurde ein Konzept zur Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von in Betrieb stehenden Strassentunneln erstellt (Anhang). Ein einzelnes Tunnelobjekt wird in folgenden Schritten bearbeitet:

1. Daten zum Objekt, Energieverbrauch
2. Plausibilisierung Energieverbrauch
3. Kategorisierung
4. Detailanalyse
5. Energetische Optimierungsmassnahmen

Anhand des plausibilisierten Energieverbrauchs findet die Kategorisierung statt. Aufgrund der Kategorisierung wird über die Notwendigkeit der Detailanalyse entschieden. Aus der Detailanalyse folgen die Optimierungsmassnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Das Konzept erlaubt die Bewertung und Dokumentation des Ist-Zustandes sowie die Abschätzung des Effizienzpotentials.

Das Konzept zur Bewertung und Verbesserung der Energieeffizienz von Einzelobjekten wurde in Form einer Berichtvorlage erstellt (im Anhang). Das Konzept dient als Hilfestellung und Werkzeug. Auf objektspezifischen Besonderheiten ist zusätzlich zu den aufgeführten Inhalten und Prüfpunkten einzugehen. Folgende Kapitel beschreiben die einzelnen Schritte des erstellten Konzepts.

8.1.1 Energiewert/Plausibilisierung

In einem ersten Arbeitsschritt wird der Gesamtenergieverbrauch auf seine Aussagekraft hin analysiert. Dafür sind z.B. Fragen zum Betrieb sowie zum Messkonzept zu beantworten.

Zu betrieblichen Besonderheiten wird abgefragt, ob der Jahresenergieverbrauch für die Anlage repräsentativ ist. Besondere Ereignisse, wie z.B. Umbaumasnahmen, Unfälle oder Umweltereignisse, können einen deutlich erhöhten oder verringerten Energieverbrauch zur Folge haben. Wenn die energetischen Auswirkungen quantifiziert werden können, ist eine Plausibilisierung des Energieverbrauchs möglich.

Beim Messkonzept interessiert, ob weitere Objekte (Tunnel oder andere) an der gleichen Energiemessung angeschlossen sind? Dies würde zu einer Verzerrung der Betrachtung führen. Falls ja, kann der zusätzliche Energieverbrauch abgeschätzt werden?

Tunnel mit langen Zu- bzw. Abfahrtstunneln sind speziell zu plausibilisieren. Sie dürften in der Energiekategorie tendenziell schlechter abschneiden als unverzweigte Systeme, da die effektive Länge des Systems länger ist als die in offiziellen Quellen angegebene Tunnellänge, welche von Portal zu Portal gemessen wird. Eine allgemeine Anwendungsregel für verzweigte Tunnelsysteme kann an dieser Stelle nicht gemacht werden. Die Situation ist im einzelnen Anwendungsfall zu analysieren.

Wenn eine Plausibilisierung des Energieverbrauchs möglich ist, kann die Einstufung in eine Energiekategorie erfolgen. Fällt der Tunnel in eine der Kategorien E, F oder G, so ist

die Detailanalyse vorzunehmen. Ist eine Plausibilisierung des Energieverbrauchs nicht möglich, so ist zunächst das Messkonzept zu verbessern.

8.1.2 Kategorisierung

Sofern ein plausibler Energieverbrauchswert vorliegt, wird der Tunnel kategorisiert. Dafür werden die folgenden Eingangsdaten ausgewertet:

- Tunnellänge
- Verkehrsart (Richtungs- oder Gegenverkehr)
- Energieverbrauch gesamt (kWh/a)

Aufgrund der Verkehrsart und des Energieverbrauchs pro Tunnelkilometer wird der Tunnel einer Effizienzklasse A bis G zugeordnet (vgl. Kapitel 6). Fällt der Tunnel in die Energieklassen E, F oder G, so ist die Detailanalyse durchzuführen.

8.1.3 Detailanalyse

In der Detailanalyse sind spezifische Fragen zu einzelnen Systemen zu beantworten. Die Auflistung der Systeme orientiert sich am Anlagenkennzeichnungssystem AKS des AST-RA. Die Fragen zielen auf die Systeme, für die ein signifikantes Optimierungspotential erwartet wird (gemäss den Analysen in Kapitel 7). Konkret sind dies die Energieversorgung, Beleuchtung, Lüftung und Nebeneinrichtung. Für die übrigen Anlagen sind keine vordefinierten Fragen enthalten, da das Optimierungspotential als tief eingeschätzt wird.

Die Detailanalyse erfordert umfassendes objektspezifisches Wissen sowie generelles Fachwissen aus den Bereichen Energie/Beleuchtung, Lüftung und HLK. Im Bereich Beleuchtung ist eine professionelle Leuchtdichtemessung erforderlich (z.B. durch METAS). Aus Sicht der Autoren dieser Studie hat die Detailanalyse in der Form eines Kleinprojekts zu erfolgen.

8.1.4 Energetische Optimierungsmassnahmen

Aus der Detailanalyse folgen die energetischen Optimierungsmassnahmen. Im Konzept müssen diese Massnahmen objektspezifisch ausformuliert werden. Die Optimierungsmassnahmen haben unterschiedliche zeitliche Dimensionen:

- Massnahmen im Bereich "Energetische Betriebsoptimierung" können tendenziell kurzfristig umgesetzt werden. Sie erfordern keine Projektierung und können durch Steuerung und Regelung der bestehenden Anlagen erfolgen. Sie erfolgen losgelöst von Erhaltungsprojekten.
- Massnahmen im Bereich "Ersatz von Anlagen" erfolgen im Rahmen eines Erhaltungsprojekts. Es kann sich hierbei um einen Ersatz einer einzelnen Anlage handeln oder um eine Gesamtanierung. Der Umsetzungshorizont ist langfristig.

8.2 Validierung

8.2.1 Milchbucktunnel

Am Beispiel des Milchbucktunnels wurde die Schwierigkeit der Plausibilisierung deutlich. Der Energieverbrauchswert des Milchbucktunnels enthält den Energieverbrauch vieler Räume, welche mit dem Tunnelbetrieb nichts zu tun haben (Lager, Archive, Hobbyräume, welche an Dritte vermietet werden). Den Verbrauch dieser Räume zu berechnen ist nicht leicht, bzw. ist er mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Zum Teil ist zwar die Ausrüstung der Räume in der Datenbank FA BSAS erfasst, der effektive Energieverbrauch lässt sich jedoch kaum verlässlich abschätzen. Eine Abschätzung über die Fläche bzw. Kubatur ist ebenfalls mit grossen Unsicherheiten behaftet. Das Beispiel Milchbucktunnel zeigt die Wichtigkeit eines tunnelspezifischen Messkonzepts.

8.2.2 Uetlibergtunnel

Am Beispiel des Uetlibergtunnels wurde überprüft, ob die Fragen der Detailanalyse im Anwendungsfall beantwortbar wären. Es hat sich gezeigt, dass bei der GE VII die Angabe der Betriebsstunden von Ventilatoren erschwert ist. Für den Uetlibergtunnel sind die Betriebsstunden jedenfalls nicht im übergeordneten Leitsystem (UeLS) abrufbar. Im Bereich HLK sind die Raumkonditionen der Zentralen in der Regel nicht auf dem UeLS einsehbar. Dies bedeutet, dass im Anwendungsfall der Detailanalyse entsprechende Arbeit vor Ort (Lokalsteuerungen) nötig wird, um die Informationen zusammenzutragen. Gesamthaft erscheint das Konzept als anwendbar, jedoch relativ aufwändig.

8.2.3 Gebietseinheit V

Mit der Gebietseinheit V wurde das Konzept allgemein auf Anwendbarkeit überprüft. Dabei wurde für jede Frage im Konzept hinterfragt, wie und mit welchem Aufwand die Beantwortung erfolgen kann. Energieverbrauchswerte sind für alle Objekte im UeLS verfügbar. Die Plausibilisierung der Energieverbrauchswerte ist für alle Objekte der Gebietseinheit V möglich. Die meisten Fragen der Detailanalyse sind ebenfalls direkt aus dem UeLS beantwortbar. Das Konzept wäre für die Gebietseinheit V relativ einfach anwendbar, da praktisch alle Angaben im UeLS einsehbar sind.

8.2.4 Schlussfolgerung

Es zeigt sich nur schon in der Betrachtung zweier Gebietseinheiten, dass die Unterschiede im Bereich Datenumfang und UeLS relativ gross sind. Da die Schweiz in 11 Gebietseinheiten aufgeteilt ist, dürfte der Anwendungsfall des Konzepts zur Verbesserung der Energieeffizienz in jeder Gebietseinheit einen unterschiedlichen Aufwand (pro Objekt) erzeugen. Auch kann es sein, dass innerhalb einer Gebietseinheit der Aufwand je nach Objekt unterschiedlich ausfällt, da die Datenlage von Objekt zu Objekt unterschiedlich ist. Im Rahmen der getätigten Abklärungen wird die Anwendbarkeit des erstellten Konzepts zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln bestätigt. Die Anwendung des Konzepts an einigen Testobjekten in unterschiedlichen Gebietseinheiten wird empfohlen.

9 Anpassung von Normen und Richtlinien

Im Rahmen der Abklärungen wurden folgende Punkte aus dem Massnahmenbereich "Anpassung von Normen und Richtlinien" ermittelt:

Tab. 9 Anpassung von Normen und Richtlinien

Herkunft	Anpassung
Richtlinie 13002 Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln	Die Notwendigkeit eines permanenten Überdrucks für jeden Sicherheits- und Fluchtstollen sollte hinterfragt werden.
Fachhandbuch BSA Merkblatt Allgemeine Projektierungsleistungen 20001-00003	Ergänzung bei den Planungsleistungen für die Phasen MK und AP für Projektierung/Analyse: Die Passage "Zusammenstellen technischer Varianten mit Vorschlag für die Variantenwahl (z.B. Kosten-Nutzen-Analyse)." ist mit dem Begriff "Energieeffizienz" zu ergänzen.
Fachhandbuch BSA Merkblatt Energieversorgung 23001-11100	Derzeit sind im Fachhandbuch BSA Energiemessungen vorgegeben. Gemäss dem Merkblatt 23001-11100 wird der Energieverbrauch zumindest für Beleuchtung, Lüftung und übrige Verbraucher separat erfasst. Das Messkonzept ist weiter zu detaillieren. Auch ist vorzugeben, in welcher Form die Daten abgerufen werden können.
Fachhandbuch BSA Merkblatt Leittechnik Energieversorgung 23001-11110	
Fachhandbuch BSA Merkblatt Längslüftung 23001-11330	Ergänzung: "Bei der Beschaffung der Ventilatoren ist der erwartete Energieverbrauch zu kapitalisieren und beim Vergleich der Angebote zu bewerten, um den Einsatz energieeffizienter Lösungen zu fördern."
Fachhandbuch BSA Merkblatt Abluftsystem 23001-11340	
Fachhandbuch BSA Merkblatt Elektrische Hausinstallationen 23001-11810	Für die Beleuchtung sind derzeit Raumschalter vorgegeben. Anstelle von Raumschaltern (Handschaltern) sollten nach Möglichkeit Bewegungsmelder vorgesehen werden (derzeit bereits auf Treppen und in Korridoren zulässig).
Fachhandbuch BSA Merkblatt Heizung, Lüftung und Klima von Zentralen 23001-11820	Ergänzung: "Der Einsatz energieeffizienter Lösungen für die HLK der Zentralen ist zu prüfen." Dies betrifft beispielsweise den Einsatz von Wärmepumpen. Die Notwendigkeit eines Überdruckbetriebs ist zu prüfen. Anlagen, die nicht direkt mit dem Tunnel verbunden sind, müssen meist keinen ständigen Überdruck gegenüber dem Aussenbereich aufweisen.
Fachhandbuch BSA Merkblatt Inhaltsverzeichnis Dossiers MK-AP 23001-20301	Ergänzung des BSA Projekts Phase MK-AP um ein Kapitel "4.9 Massnahmen zur Energieeffizienz"
SN 640 551-1 (2012) bzw. ASTRA 13015 Richtlinie Beleuchtung und ggf. weitere	Die Erkenntnisse aus dem Versuch im Tunnel Lungern sollen in den Normen und Richtlinien berücksichtigt werden. Beispielsweise ist die Forderung, dass die Leuchtdichte der Wände mindestens 80% der Leuchtdichte der Fahrbahn aufweisen sollen, für helle Fahrbahnbeläge schwierig zu erfüllen. Die Norm sollte diesbezüglich angepasst werden.
Vorgaben aus der Projektgenehmigung, z.B. UVB Teil Luft.	Wird ein Tunnelprojekt mit der Auflage genehmigt, das nur eingeschränkt Tunnelabluft aus den Portalen austreten darf, ergibt sich ein Lüftungsbetrieb mit grossem Energieaufwand (Mittenabsaugung oder Portalluftabsaugung). In regelmässigen Zeitabständen sollte geprüft werden, ob die Umweltauflage noch sinnvoll ist. Bei geringerem Schadstoffausstoss des Tunnels kann das Abschalten der Lüftung die umweltverträglichere Lösung sein.

10 Energiemesskonzepte

Als Voraussetzung für die Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln sind Messkonzepte nötig. Im Rahmen der getätigten Analysen wurde folgendes festgestellt:

- Für viele Tunnel wird der Energieverbrauch nicht spezifisch gemessen. Zum Teil existiert nur ein Messwert für einen Streckenabschnitt, auf welchem sich mehrere Tunnel befinden. Aus Sicht des Projektteams ist dieser Zustand nicht zeitgemäss. Tunnel sind grosse Energieverbraucher und objektspezifische Energiemesswerte sind für zukünftige Verbesserungen unerlässlich. Ein Gegenverkehrstunnel von 1 Kilometer Länge braucht gleichviel Energie wie ein Bürogebäude mit 250 Arbeitsplätzen. In einem zeitgemäss betriebenen Gebäude dieser Grössenordnung existieren detaillierte Energiemesswerte z.B. für Heizung, Warmwasser, Büronutzung und Küche als Basis für das Energiecontrolling.
- Messungen nach Anlagen, z.B. nach der Aufteilung "Beleuchtung, Lüftung, übrige BSA" sind oft nicht vorhanden. Dies war dem Projektteam bereits bekannt und Grund dafür, dass das Benchmarking nur über den Gesamtenergieverbrauch, und nicht über den Verbrauch einzelner Anlagen erfolgt.
- Bereits im RAVEL Bericht aus dem Jahr 1994 [4] heisst es in der Zusammenfassung: "Es wird vorgeschlagen, die Erhebung über den Elektrizitätsverbrauch von Strassentunneln künftig regelmässig durchzuführen, und die Kenngrössen zu analysieren. Dazu müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, um die interessierenden Verbrauchswerte messtechnisch zu erfassen." Aus Sicht des Projektteams ist es erstaunlich, dass im Jahr 2011 (zum Zeitpunkt der zweiten grossen Erhebung) keine massgeblich verbesserte Situation in Bezug auf die Messkonzepte vorzufinden war.
- Es scheinen keine expliziten ASTRA Vorgaben zum Energiemesskonzept in Strassentunneln vorzuliegen. Das Fachhandbuch BSA (Technisches Merkblatt Bauteile Energieversorgung 23 001-11100) enthält zwar folgende Abbildung:

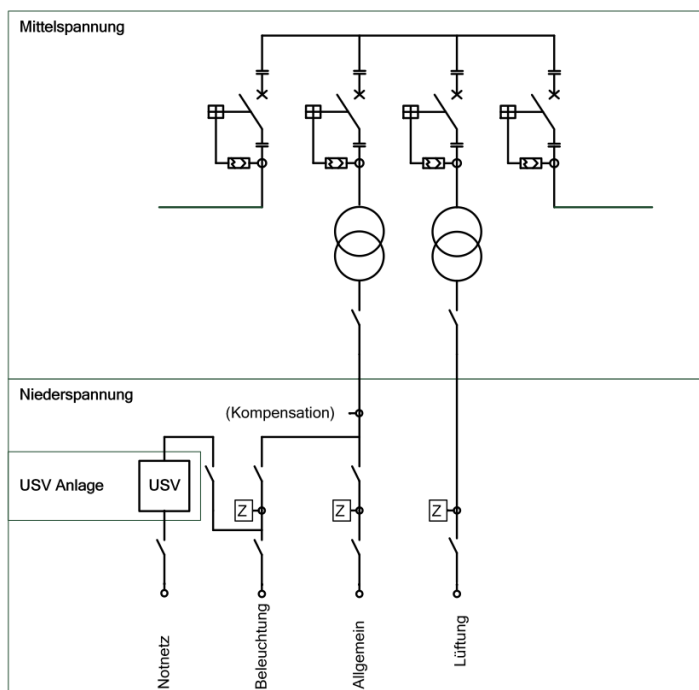


Abb. 36 Auszug aus Fachhandbuch BSA zum Thema Messkonzept

Gemäss dieser Abbildung sollte für die Verbrauchergruppen "Allgemein", "Beleuchtung" und "Lüftung" jeweils ein Stromzähler vorhanden sein. Konkretere oder detailliertere Vorgaben existieren gemäss dem Wissen des Projektteams nicht.

11 Schlussfolgerungen und Ausblick

11.1 Hypothesen

Die für die Forschungsarbeit aufgestellten Hypothesen können wie folgt beantwortet werden:

1. Unterschiede im längenspezifischen Energieverbrauch sind auch innerhalb der Tunnelkategorien (Gegenverkehr, Richtungsverkehr) zum Teil erheblich, was auf unterschiedliche Betriebspraxis hindeutet.

Die Hypothese kann bestätigt werden. Die Unterschiede sind auf die unterschiedliche Betriebspraxis, Unterschiede in der Ausrüstung sowie im Bau (z.B. Grösse und Anzahl der Zentralen) zurückzuführen. Weitere Faktoren wie die Höhe über Meer und die Ausrichtung des Tunnels (Energieverbrauch Adaptationsbeleuchtung) haben ebenfalls einen Einfluss. Dieser ist jedoch kaum quantifizierbar.

2. Der Energieverbrauch kann je nach Ist-Zustand um 5-20% gesenkt werden.

Die Hypothese kann eindeutig bestätigt werden. Der Gesamtenergieverbrauch kann durch den Ersatz einer NaH/FL-basierten Tunnelbeleuchtung durch LED-Beleuchtung um 20-30% gesenkt werden. Weiteres Effizienzpotential existiert im Bereich Energieversorgung sowie Nebeneinrichtungen. Im Einzelfall kann auch die Lüftung signifikantes Effizienzpotential aufweisen.

3. Das Sparpotential kann bis 2020 durch effiziente Massnahmen ausgeschöpft werden.

Die Hypothese kann nicht bestätigt werden. Das Effizienzpotential im Bereich der kurzfristig umsetzbaren energetischen Betriebsoptimierung ist eher gering. Viel grösser ist das Potential im Bereich "Ersatz von Anlagen". Diese Massnahmen können jedoch nur langfristig umgesetzt werden. Daher kann das gesamte Sparpotential bis 2020 nicht ausgeschöpft werden.

11.2 Quantifizierung des Effizienzpotentials

Das Effizienzpotential ist von der Ausrüstung, des Alters und der Betriebspraxis des jeweiligen Objekts abhängig. Für ein neueres Objekt, welches zeitlich noch weit weg von einer Sanierung ist, kommen nur Massnahmen aus dem Bereich "Energetische Betriebsoptimierung" in Frage. Das Effizienzpotential in diesem Bereich wird (bis auf Einzelfälle mit speziellen Lüftungssystemen oder zu heller Beleuchtung) als klein eingeschätzt (<3%). Grund dafür ist, dass die grossen Verbraucher der BSA meist effizient gesteuert und geregelt werden.

Für ein typisches Tunnelobjekt, welches im Zeitraum 1980-1990 erstellt wurde, und für welches sich eine grössere Sanierung aufdrängt, wird das Effizienzpotential durch Erneuerung von Anlagen (in Bezug auf den Gesamtenergieverbrauch) wie folgt abgeschätzt:

- Energieversorgung: Ganzheitliche Optimierung (Transformatoren, USV-Anlagen): 1-3%
- Beleuchtung: Heller Belag, helle Wände, LED-Beleuchtung: 20-30%
- Lüftung: Keine allgemeine Aussage möglich, im Einzelfall zu klären
- Nebeneinrichtung: Ganzheitliche Optimierung HLK-Konzept plus weitere Kleinmassnahmen: 5-10%
- Total: 25-45%

Das Effizienzpotential im Bereich "Anpassung von Normen und Richtlinien" ist theoretisch hoch. Es stellt sich jedoch bei Anpassungen von Normen und Richtlinien immer die Frage nach der sicherheitstechnischen Zulässigkeit der Anpassung. Es dürfte beispielsweise anspruchsvoll sein, aus Gründen der Energieeffizienz die Anforderungen an das Beleuchtungsniveau zu lockern. Im Kapitel 9 wurden mögliche Anpassungen von Normen und Richtlinien aufgelistet, welche bei gleichbleibender Sicherheit zu einer verbesserten Energieeffizienz führen.

11.3 Empfehlungen

1. Messkonzepte flächendeckend implementieren

Für viele Tunnel fehlen objektspezifische Energiemesskonzepte. Dieser Mangel wurde bereits in der Erhebung aus dem Jahr 1994 erkannt. Es fehlt somit die Basis für die Bewertung der Energieeffizienz von diversen Tunneln. Dieser Zustand ist aus Sicht der Autoren nicht zeitgemäss, wenn man bedenkt, dass im Gebäudebereich das Thema Energiemanagement viel weiter fortgeschritten ist. Wir empfehlen, objektspezifische Energiemesskonzepte flächendeckend zu implementieren.

2. Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz anwenden

Das im Rahmen dieser Forschungsarbeit erstellte Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln soll im Folgenden für ausgewählte Tunnel angewendet werden. Es sollen möglichst Objekte aus jeder Gebietseinheit untersucht werden. Basierend auf den Erkenntnissen kann das Konzept allenfalls noch angepasst bzw. detaillierter ausgearbeitet werden.

3. Energieeffizienz in der Planung stärker fordern und prüfen

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass massgebliches Potential zur Verbesserung der Energieeffizienz in den Erhaltungsprojekten steckt. Gleichzeitig erscheint das Thema "Energieeffizienz in der Planung" (abgesehen vom Umsetzen des Fachhandbuchs) auf Seite der Planer wie auch auf Seite des ASTRA nicht ausreichend präsent zu sein. Wir empfehlen, die in Kapitel 9 aufgelisteten Anpassungen von Normen und Richtlinien (inkl. Fachhandbuch) vorzunehmen. Die Energieeffizienz soll in den Phasen MK und AP sowie MP und DP stärker überprüft werden.

4. Anreizsysteme einführen

Es ist hinlänglich bekannt, dass die Energieeffizienz Anreize braucht, um nachhaltig gefördert zu werden. Auf Seite des Eigentümers sollten Anreize zur energieeffizienten Planung geschaffen werden. Auf Seite des Betreibers sollte ein finanzieller Anreiz (integriert in die Leistungsvereinbarung) zu einem energieeffizienteren Betrieb der Tunnel führen. Wenn der Betreiber einen Anreiz sieht, wird er beispielsweise durch Schulungen des Betriebspersonals und nachfolgende Betriebsoptimierungen eine Verbesserung der Energieeffizienz erreichen. Gemäss unserer Einschätzung bestehen derzeit zu wenige Anreize, welche zu aktivem und sichtbarem Handeln im Bereich Energieeffizienz führen.

5. Energiemanagement gemäss ISO 50001 einführen

Das ASTRA ist als Eigentümerversprecherin für ein enorm grosses und heterogenes Objektportfolio zuständig. Die Objekte in diesem Portfolio verbrauchen bereits heute viel elektrische Energie und mit dem Hinzukommen grosser Objekte wird der Energieverbrauch in Zukunft nochmals signifikant ansteigen. Im Rahmen der Energiestrategie 2050 sollte das ASTRA ein Energiemanagementsystem gemäss ISO 50001 einführen und den darin enthaltenen kontinuierlichen Verbesserungsprozess laufend weiterführen.

11.4 Weiterer Forschungsbedarf

Aus Sicht der Autoren stellt sich die Frage, ob die Massnahmen gemäss der Energiestrategie 2050 im Bereich Verkehrsinfrastruktur bereits ausreichend bearbeitet sind. Folgende Abbildung zeigt die Massnahmengruppen inkl. der entsprechenden Massnahmen gemäss der Energiestrategie 2050:

Massnahmengruppen	Massnahmen
G6 Verstärkte Nutzung der Verkehrsinfrastruktur zur Energieerzeugung	M6.1 Geothermische Energiegewinnung aus Nationalstrassentunnels
	M6.2 Nutzung von Lärmschutzwänden der Nationalstrassen zur Installation von Photovoltaikanlagen (Abklärungsmassnahme)
	M6.3 Pilotprojekt Überdachung Nationalstrasse zur Installation von Photovoltaikanlagen
	M6.4 Energieproduktion öV-Infrastruktur (erneuerbare Energien) mit Pilotprojekt
G7 Verbesserung der Energieeffizienz der Verkehrsinfrastruktur	M7.1 Energieeffiziente Bauweise im Nationalstrassenbau
	M7.2 Energieeinsparung beim Betrieb der öV-Infrastruktur
	M7.3 Reduktion des Energieverbrauchs für den Betrieb der Nationalstrasse
G8 Verschärfung der Vorschriften und Verstärkung der Anreize zur Erhöhung der Energieeffizienz von Strassenfahrzeugen	M8.1 Verschärfung der (bestehenden) CO ₂ -Zielwerte für Personewagen
	M8.2 Reifenetikette zur Förderung von sicheren, leisen und energieeffizienten Reifen
	M8.3 Energieetikette für weitere Fahrzeugkategorien
	M8.4 CO ₂ -Zielwerte für leichte Nutzfahrzeuge (LNF)
	M8.5 LED Tagfahrlichter
G9 Verbesserung der Energieeffizienz des öffentlichen Verkehrs (Betrieb)	M9.1 Anreiz-Mechanismen
	M9.2 Einsatz energieeffizienter Schienenfahrzeuge (Abklärungsmassnahme)
	M9.3 Sensibilisierung der Unternehmen des öffentlichen Verkehrs
G10 Förderung des effizienten Einsatzes der Transportmittel	M10.1 Nachhaltige und energieeffiziente Mobilität (Allgemein und spezifisch aus Sicht der Infrastrukturbetreiber und Mobilitätsanbieter)
	M10.2 Güterumschlag Strasse / Schiene (Forschungsprogramm)

Das vorliegende Forschungsprojekt wirkt im Bereich G7/M7.3, es gibt jedoch aus Sicht der Autoren weiteren Forschungsbedarf in den Massnahmengruppen zur Verkehrsinfrastruktur (G6 und G7).

Anhänge

I	Datengrundlage.....	80
I.1	Daten Gegenverkehrstunnel	80
I.2	Daten Richtungsverkehrstunnel.....	81
II	Anhang: Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln.....	83

I Datengrundlage

I.1 Daten Gegenverkehrstunnel

Geordnet nach aufsteigendem Energieverbrauch pro Kilometer und Jahr.

Tab. 1 Daten Gegenverkehrstunnel

Tunnel	Länge [m]	Energieverbrauch pro Jahr [kWh/a]	Energieverbrauch pro km und Jahr [kWh/(km*a)]
Tunnel Soliwald	560	74'451	132'948
Tunnel Giessbach	3'340	489'328	146'505
Neufeldtunnel	556	85'056	152'978
Mositunnel	1'080	174'229	161'323
Tunnel Simmenfluh	710	119'754	168'668
Taubenloch-Tunnel n° 8	1'010	174'566	172'838
Tunnel Leissigen	2'100	371'975	177'131
Tunnel Sachseln	5'190	949'310	182'911
Tunnel de La Rochette	620	132'048	212'981
Tunnel de Gléresse	2'510	560'440	223'283
Tunnel Cassanawald	1'230	302'045	245'565
Tunnel Bärenburg	1'000	263'526	263'526
Tunnel Rofla	995	262'483	263'802
Tunnel Umfahrung Flüelen	2'600	776'018	298'468
Tunnel Viamala	780	249'560	319'949
Tunnel Mont Russelin	3'570	1'188'362	332'875
Tunnel Chlus	850	286'098	336'586
Tunnel Cholfirst	1'260	462'638	367'173
Tunnel de Mont Terri	4'070	1'555'218	382'117
Tunnel du Raimeux	3'210	1'227'060	382'262
Tunnel Giswil	2'066	798'812	386'647
Tunnel Crapteig	2'170	876'809	404'059
Tunnel San Bernardino	6'600	2'688'461	407'343
Chienberg	2'300	1'163'452	505'849
Tunnel Isla Bella	2'450	1'332'906	544'043
Tunnel Zollhaus	417	245'639	589'062
Gotthardtunnel	16'920	15'790'410	933'239
Tunnel Milchbuck	1'830	3'903'293	2'132'947

I.2 Daten Richtungsverkehrstunnel

Geordnet nach aufsteigendem Energieverbrauch pro Kilometer und Jahr.

Tab. 2 Daten Richtungsverkehrstunnel

Tunnel	Länge [m]	Energieverbrauch pro Jahr [kWh/a]	Energieverbrauch pro km und Jahr [kWh/(km*a)]
Schorentunnel	1'100	137'012	124'556
Rosenbergtunnel (St. Fiden)	1'460	205'518	140'766
Singer	320	61'434	191'981
Stephanshorntunnel	570	112'545	197'448
Tunnel Pieterlen	1'470	349'880	238'014
Tunnel Allmend	960	237'213	247'097
Tunnel/Tranchée couv. de Sierre (60)	2'450	662'792	270'527
Tunnel de Pierre Pertuis	2'129	577'769	271'380
Überdeckung Breite (Nord)	695	194'446	279'778
Tunnel Gamsen (64)	1'050	349'464	332'823
Galerie de St Maurice (56)	1'230	412'832	335'636
Tunnel de Flonzaley	710	240'456	338'670
Tunnel de l'Arzilier	410	143'312	349'541
Tunnel Maroggia	650	232'250	357'308
Tunnel de Pomy	3'000	1'103'988	367'996
Tunnel Bruyères-Châbles	1'870	727'957	389'282
Brünnentunnel	1'060	418'908	395'196
Bözberg	3'700	1'465'270	396'019
Girsbergtunnel	1'760	705'390	400'790
Schinznacherfeld	450	183'160	407'022
Tunnel d'Arrissoules	2'990	1'220'326	408'136
Witi	1'760	732'728	416'323
Lüsslingen	1'230	514'098	417'966
Tunnel Rugen	780	330'124	423'236
Tunnel Melide	1'730	770'100	445'145
Tunnel Rinderweid	380	172'294	453'405
Tunnel de Confignon	1'450	673'424	464'430
Habsburg	1'540	725'460	471'078
Tunnel de Glion	1'350	659'434	488'470
Tunnel de Banné	1'080	530'220	490'944
Tunnel de Perche	1'060	520'402	490'945
Tranchée de Saconnex-d'Arve	600	303'770	506'283
Tranchée des Palettes	570	289'703	508'251
Schänzli	510	263'121	515'924
Galerie de Champsec/Sion (60)	710	368'568	519'110
Buchberg-Tunnel (Zubringer)	470	248'810	529'383
Galerie de Beuchille	900	495'221	550'246
Tunnel Ceneri	1'410	780'810	553'766
Tunnel Eich	890	499'051	560'731
Tranchée du Bachet de Pesay	500	280'776	561'552
Tunnel Piumogna	1'610	909'210	564'727
Tranchée d'àArare	630	355'967	565'027
Tunnel Gentilino	600	340'390	567'317
Galerie de Develier	770	443'445	575'903
Belchen	3'180	1'915'689	602'418
Birchi	1'430	861'816	602'669
Tunnel de Vernier	1'900	1'180'134	621'123
Tunnel Isisberg	4'960	3'186'653	642'470

Tab. 2 Daten Richtungsverkehrstunnel

Tunnel	Länge [m]	Energieverbrauch pro Jahr [kWh/a]	Energieverbrauch pro km und Jahr [kWh/(km*a)]
Seelisbergtunnel	9'250	5'961'492	644'486
Tunnel Pardorea	560	363'560	649'214
Überdeckung Neuenhof	689	451'349	655'078
Arisdorf	1'360	933'156	686'144
Tunnel Uetliberg	4'410	3'067'689	695'621
Tunnel Spier	1'580	1'103'354	698'325
Schwarzwald	560	399'460	713'321
Ebenrain	350	256'830	733'800
Tunnel Rathausen	690	513'240	743'826
Tunnel Stalvedro	318	236'902	744'975
Tunnel Reussport	640	486'089	759'514
Horbürg	1'090	832'092	763'387
Tunnel de Gorgier	3'390	2'607'370	769'136
Tunnel Montlingen	300	242'623	808'743
Tunnel Biaschina	540	439'480	813'852
Tunnel Piottino	840	684'050	814'345
Tunnel Taverne	360	322'340	895'389
Spitalhof	540	491'888	910'904
Tunnel Rüteli	450	412'824	917'387
Tunnel Schlund	960	950'380	989'979
Tunnel Schöneich	710	735'850	1'036'408
Tunnel Gubrist	3'270	3'413'244	1'043'806
Baregg	1'080	1'210'156	1'120'515
Tunnel Sonnenberg	1'540	1'728'090	1'122'136
Schweizerhalle	1'028	1'275'646	1'240'901
St. Johann	1'200	2'042'705	1'702'254

II Anhang: Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Strassen ASTRA
Filiale Winterthur

Winterthur, 30.06.2016

MUSTER Bewertung Energieeffizienz

Tunnelname

Impressum

Erstelldatum / Revisionsdatum:	30.06.2016
Ersteller/in:	Muster AG Beat Beispiel
Verzeichnis / Dateiname:	20160816_Konzept_Verbesserung_Energieeffizienz.docx
Anzahl Seiten:	10
Genehmigt am:	30.06.2016
Genehmigt von:	Max Muster, ASTRA Filiale Winterthur

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Ersteller	Bemerkungen
1.0	30.06.2016	Beat Beispiel	Erstellung

Bundesamt für Strassen ASTRA

Max Muster
Grüzefeldstrasse 41, 8404 Winterthur
Tel. +41 58 480 47 11
max.muster@astra.admin.ch
www.astra.admin.ch

INHALTSVERZEICHNIS

MUSTER Bewertung Energieeffizienz	1
1. Daten zum Objekt	3
2. Plausibilisierung Energieverbrauch	4
3. Kategorisierung	5
4. Detailanalyse	6
5. Massnahmen.....	9
6. Beilagenverzeichnis	10

1. Daten zum Objekt








1.1	Tunnelname	
1.2	Länge Die Länge des Tunnels wird aus der Liste der Nationalstrassentunnels oder einer anderen offiziellen Quelle übernommen (nicht selber aus Plänen ausgemessen).	km
1.3	Verkehrsart Gegenverkehr Richtungsverkehr	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
1.4	Baujahr	
1.5	Letzte Instandsetzung BSA	
1.6	Energieverbrauch gesamt Der Energieverbrauch kann bei der zuständigen Gebietseinheit eingeholt werden.	kWh/a
1.6.1	Energieverbrauch Beleuchtung	kWh/a
1.6.2	Energieverbrauch Lüftung	kWh/a
1.6.3	Energieverbrauch weitere BSA	kWh/a
1.7	Gültigkeit Energieverbrauch für das Jahr	

2. Plausibilisierung Energieverbrauch

2.1	Sicherheit Weist der Tunnel sicherheitstechnische Mängel auf, welche den Energieverbrauch massgeblich vermindern? Beispiel: Tunnel hat keine Lüftung, sollte jedoch eine haben.	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.1.1	Falls 2.1 ja, kann der Energieverbrauch abgeschätzt werden?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.1.2	Falls 2.1.1 ja, Abschätzung Energieverbrauch:	kWh/a	
2.2	Betrieb Fanden im Jahr, für welches der Energieverbrauch ermittelt wurde, Aktivitäten oder Ereignisse statt, welche zu einem signifikant veränderten Energieverbrauch geführt haben könnten (z.B. Umbauten, Tests, Unfälle, Umweltereignisse)?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.2.1	Falls 2.2 ja, kann der Energieverbrauch für diese Aktivitäten abgeschätzt werden?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.2.2	Falls 2.2.1 ja, Abschätzung Energieverbrauch:	kWh/a	
2.3	Messkonzept Sind weitere Objekte (Tunnel oder andere Objekte) an der gleichen Energiemessung angeschlossen?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.3.1	Falls 2.3 ja, kann der zusätzliche Energieverbrauch für diese weiteren Objekte abgeschätzt werden?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.3.2	Falls 2.3.1 ja, Abschätzung Energieverbrauch:	kWh/a	
2.4	Plausibilisierung Ist basierend auf den Abklärungen eine Plausibilisierung des Energieverbrauchs möglich?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
2.4.1	Falls 2.4 nein, Grundlagen für eine Kategorisierung sind nicht gegeben, zunächst ist eine Verbesserung des Messkonzepts erforderlich => Abbruch der Kategorisierung, Beschreibung der nötigen Massnahmen im Kapitel Massnahmenvorschläge		
2.4.2	Falls 2.4 ja, plausibilisierter Energieverbrauch angeben: (Berechnung aus den Werten 1.6, 2.1.2, 2.2.2 und 2.3.2)	kWh/a	
2.4.3	Kennwert ausrechnen (Wert von 2.4.2 dividiert durch Wert von 1.2): => Dieser Wert ist auf der nächsten Seite für die Kategorisierung zu verwenden	kWh/(km*a)	

3. Kategorisierung

Die Kategorisierung ergibt sich aus dem plausibilisierten Kennwert und der Verkehrsart gemäss folgender Tabelle:

sehr energieeffizient	Kat.	Gegenverkehr [kWh/(km*a)]	Richtungsverkehr [kWh/(km*a)]	
	<input type="checkbox"/>	< 100'000	< 200'000	
	<input type="checkbox"/>	100'000-150'000	200'000-300'000	
	<input type="checkbox"/>	150'000-200'000	300'000-400'000	
	<input type="checkbox"/>	200'000-300'000	400'000-600'000	
	<input type="checkbox"/>	300'000-400'000	600'000-800'000	Detailanalyse
	<input type="checkbox"/>	400'000-500'000	800'000-1'000'000	
	<input type="checkbox"/>	> 500'000	> 1'000'000	
wenig energieeffizient				

3.1	Der Tunnel fällt in die Energiekategorie:		
3.2	Detailanalyse erforderlich? Fällt der Tunnel in die Energiekategorien E, F oder G, so ist die Detailanalyse durchzuführen (nächste Seite).	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>

4. Detailanalyse

Die Detailanalyse orientiert sich an der BSA-Struktur gemäss AKS-Richtlinie des ASTRA.

4.1 Energieversorgung			
4.1.1	Auslastung USV-Anlage Ereignisbetrieb		%
4.1.2	Erscheint die Leistung der USV-Anlage als angemessen (nicht überdimensioniert)?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.1.3	Wie lange ist die Autonomiezeit?		Minuten
4.1.4	Erscheint die Autonomiezeit als angemessen? (SIA 197/2:2004 fordert 60 Minuten)	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.1.5	Auslastung Transformatoren im Ereignisbetrieb: Erscheint die installierte Baugrösse des Transformators angemessen (nicht überdimensioniert)?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.1.6	Wird die Energieversorgung ganzheitlich als energieeffizient beurteilt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2 Beleuchtung			
4.2.1	Tunnelklasse gem. SN 640 551-1:2012 bestimmen		(Wert von 2 bis 6)
4.2.2	Geforderte Leuchtdichte der Innenstrecke Tag gem. SN 640 551-1:2012		Cd/m ²
4.2.3	Geforderte Leuchtdichte der Innenstrecke Nacht gem. SN 640 551-1:2012		Cd/m ²
4.2.4	Gemessene Leuchtdichte Innenstrecke Tag (METAS Messung)		Cd/m ²
4.2.5	Gemessene Leuchtdichte Innenstrecke Nacht (METAS Messung)		Cd/m ²
4.2.6	Adaptationsbeleuchtung in der Nacht ausgeschaltet?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.7	Durchfahrtsbeleuchtung im Bereich der Adaptationsbeleuchtung am Tag ausgeschaltet?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.8	Leuchtdichte Innenstrecke in der Nacht auf zulässigen Wert abgesenkt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.9	Adaptationsbeleuchtung	LED <input type="checkbox"/> NaH <input type="checkbox"/> FL <input type="checkbox"/>	

6/10

20160816_Konzept_Verbesserung_Energieeffizienz.docx

4.2.10	Durchfahrtsbeleuchtung	LED <input type="checkbox"/> NaH <input type="checkbox"/> FL <input type="checkbox"/>	
4.2.11	Heller Belag vorhanden (Klasse R1)?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.12	Helle Wände vorhanden?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.13	Beleuchtung Sicherheitsstollen	LED <input type="checkbox"/> NaH <input type="checkbox"/> FL <input type="checkbox"/>	n.z. <input type="checkbox"/>
4.2.14	Beleuchtungssteuerung Sicherheitsstollen	Licht bei Ereignis <input type="checkbox"/> Permanently beleuchtet <input type="checkbox"/>	n.z. <input type="checkbox"/>
4.2.15	Schaltet die Beleuchtung der Technikräume automatisch aus wenn keine Personen anwesend sind (Bewegungsmelder oder Minuterie)?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.2.16	Wird die Beleuchtung ganzheitlich als energieeffizient beurteilt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.3	Lüftung		
4.3.1	Betriebsstunden Axialventilatoren überprüfen		h/a
4.3.2	Betriebsstunden Strahlventilatoren überprüfen		h/a
4.3.3	Summe Betriebsstunden pro Jahr < 200	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.3.4	Falls 4.3.3 nein, Ursachenabklärung durch Experte Tunnellüftung in Betracht ziehen. Mögliche Ursachen Portalluftabsaugung, Geruchslüftung, Taupunktlüftung, Steuerung und Schaltwerte (CO, Sichttrübe) Falls vorhanden: Belüftung Werkleitungskanal, Belüftung Sicherheitsstollen überprüfen	Separater Bericht	
4.4	Signalisation		
	Keine Massnahmen		
4.5	Überwachungsanlage		
	Keine Massnahmen		
4.6	Kommunikation & Leittechnik		
	Keine Massnahmen		
4.7	Kabelanlagen		
	Keine Massnahmen		

4.8	Nebeneinrichtung		
4.8.1	Ist der Regeltemperaturbereich in den Technikräumen (MS-Schaltanlage, NS/Steuerungsräume, USV-Raum) angemessen? Fachhandbuch BSA 23001-11820 (V1.10 01.01.2015): 12-28°C	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.2	Ist der Regeltemperaturbereich im Batterieraum angemessen? Fachhandbuch BSA 23001-11820 (V1.10 01.01.2015): 18-22°C	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.3	Erfolgt die mechanische Kälteerzeugung (Kältemaschine, Klimage- rät) mit effizienten Geräten?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.4	Sind nur die Räume mit Überdruck betrieben, für welche dies not- wendig ist?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.5	Ist der Luftwechsel auf das nötige Minimum begrenzt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.6	Ist der Einsatz von Heizregistern auf das nötige Minimum begrenzt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.7	Sind spezielle Verbrauchern (z.B. Rohrbegleitheizung, Fahrbahnhei- zung, Deckenheizung, weitere) effizient gesteuert/geregelt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>
4.8.8	Wird das HLK-Konzept ganzheitlich als energieeffizient beurteilt?	Ja <input type="checkbox"/>	Nein <input type="checkbox"/>

Weitere Prüfpunkte

Weitere Prüfpunkte anfügen, welche sich aus Besonderheiten des Tunnels ergeben (im Ermessen des Erstellers).

5. Massnahmen

5.1. Energetische Betriebsoptimierung

5.2. Ersatz von Anlagen

6. Beilagenverzeichnis

Nr.	Bezeichnung	Autor	Datum
1	Messbericht Beleuchtung	METAS	15.05.2016
2	Analysebericht Lüftung	Air AG	13.04.2016
3	...		

Glossar

Begriff	Bedeutung
AKS	Anlagenkennzeichnungssystem
AP	Ausführungsprojekt
ASFiNAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (Österreich)
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAST	Bundesanstalt für Strassenwesen
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
CCTV	Closed circuit television
cd	Candela
CO	Kohlenmonoxid
DECT	Digital enhanced cordless telecommunications
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
FL-Leuchte	Fluoreszenzleuchte
GE	Gebietseinheit
GV	Gegenverkehr
HLK	Heizung, Lüftung, Klimatisierung
LDM	Leuchtdichtemessung
LED	Light-emitting diode
MK	Massnahmenkonzept
MSV	Massgebender stündlicher Verkehr
NaH-Leuchte	Natriumdampf-Hochdruckleuchte
ppm	Parts per million
RV	Richtungsverkehr
UeLS	Übergeordnetes Leitsystem
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Energie, Energiestrategie 2050: Erstes Massnahmenpaket, 2012
- [2] Bundesamt für Strassen, Energiebericht zu den Nationalstrassen in Betrieb, Jahresbericht 2011
- [3] ISO 50001 Energy management systems, 2011
- [4] U. Steinemann, J.-P. Borel, Erhebung des Elektrizitätsverbrauchs bestehender Strassentunnel, Materialien zu RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, 1994
- [5] SIA-Merkblatt 2048:2015, Energetische Betriebsoptimierung
- [6] R. Dzhusupova, J.F.G. Cobben, W.L. Kling, Zero Energy Tunnel: Renewable Energy Generation and Reduction of Energy Consumption Eindhoven University of Technology, 2012
- [7] C. Tremeaux, Analyse statistique des consommations électriques des tunnels routiers, 1998
- [8] Bundesamt für Strassen, Liste der Nationalstrassentunnels, 2005
- [9] B. Vogel, Trafos haben noch Effizienzpotenzial, Technologie Energieeffizienz, Bulletin 6/2015
- [10] D. Tschudy et al., Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung, Forschungsauftrag VSS 2008/204, August 2012
- [11] H. Lehmann, Beleuchtung von Strassentunnels, SISTRA Fachtagung vom 20. November 2014
- [12] Bundesamt für Strassen, Minimierung der aktiven Beleuchtung in Tunnels (MaBT), Tunnel Lungern, 2013
- [13] Bundesamt für Strassen, LED Beleuchtung im Praxistest, Tunnel Tellsplatte, 2011
- [14] SN 640 551-1 (2012), Öffentliche Beleuchtung in Strassentunneln, Galerien und Unterführungen, Teil 1: Lichttechnische Anforderungen, Begriffe und Gütemerkmale
- [15] Trox/TLT, Grundlagen der Ventilatorentechnik, 2013
- [16] Bundesamt für Strassen, Richtlinie ASTRA 13001 Lüftung der Strassentunnel, Ausgabe 2008, V2.03
- [17] Bundesamt für Strassen, Richtlinie ASTRA 13002 Lüftung der Sicherheitsstollen von Strassentunneln, Ausgabe 2008, V1.06
- [18] Bundesamt für Strassen, Richtlinie ASTRA 13013, Anlagenkennzeichnungssystem Schweiz (AKS-CH), 2009
- [19] Bundesamt für Strassen, Fachhandbuch BSA, Januar 2016
- [20] Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Zürich, Reinigung von Abluft aus Strassentunneln, Stand der Technik, Detailbericht der Arbeitsgruppe, März 2008
- [21] Gruner AG, Beschlagende Scheiben in Strassentunneln, Synthese, Forschungsprojekt, 2004

- [22] Éclairage des tunnels avec miroirs (SLSR) - Étude de faisabilité, Forschungsauftrag ASTRA, Oktober 2009
- [23] C. Joseph, Beleuchtung der Strassentunneleinfahrten mittels Spiegel, Abschlussarbeit CAS Projektmanager Bau KBOB, 2010
- [24] F. Salata et al., Energy Optimization of Road Tunnel Lighting Systems, Sustainability, 2015
- [25] DMT, Schüssler-Plan, PDE: Geothermie sorgt für Verkehrssicherheit, Studie für das Ministerium für Verkehr, Energie und Landesplanung des Landes Nordrhein-Westfalen, Juni 2005
- [26] Brüniger + Co. AG, N13 Thusis - San Bernardino, Tunnel Traversa (385 m) und Tunnel Rofla (1'079 m) Beleuchtungsanlage Energiekostenvergleich Adaptationsbeleuchtungen in LED- zu Nah-Technologie (Kurzfassung erste Ergebnisse), 13.04.2016

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 26.10.2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2014/005_ENG

Projekttitel: Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln

Enddatum: 31.12.2016

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Als Resultat dieser Forschungsarbeit wurde ein Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln erstellt. Mit Hilfe des Konzepts werden Tunnel basierend auf ihrem Energieverbrauch in Energiekategorien eingeteilt und Untersuchungen der massgeblichen Verbraucher durchgeführt. Es resultieren Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz. Das Konzept ist ein praxisnahes Werkzeug und leistet einen Beitrag zur Zielerreichung der Energiestrategie 2050 im Bereich der Nationalstrassen. Viele Tunnel weisen ein Effizienzpotential von 25-45% durch Erneuerung von Anlagen auf. Das grösste Potential liegt im Ersatz von herkömmlichen Beleuchtungen durch LED-Technologie. Diverse Versuche bestätigen den energetischen Nutzen der LED-Beleuchtung für die Durchfahrtsbeleuchtung wie auch für die Adaptationsbeleuchtung. Auch im Bereich der Nebeneinrichtung sind massgebliche Verbesserungen möglich. Das grosse Effizienzpotential von 25-45% lässt sich jedoch nur langfristig im Zuge von Gesamtanierungen ausschöpfen. Das Effizienzpotential durch energetische Betriebsoptimierung dagegen ist eher gering (meist kleiner 3%, nur in Spezialfällen grösser). Weitere Effizienzsteigerung kann durch Anpassung von Normen und Richtlinien erzielt werden, ohne dabei die Sicherheit zu verringern. Es resultierten weitere Erkenntnisse aus den Untersuchungen:

- Die Autoren haben festgestellt, dass die Energiemesskonzepte für Strassentunnel nach wie vor grosses Verbesserungspotential aufweisen. Für viele Objekte wird der Energieverbrauch nicht spezifisch erhoben, sondern verbirgt sich in einem Streckenwert. Auch werden zum Teil grosse Verbraucher, welche mit dem Tunnel nichts zu tun haben, über die gleiche Einspeisung versorgt. Daher ist es oft nicht möglich, Tunnel energetisch zu bewerten.
- Die Lebenszykluskosten eines Tunnels werden mehrheitlich in der Planung bestimmt und sind im Betrieb nur noch wenig beeinflussbar. In der Planung soll die Energieeffizienz daher stärker gefordert und geprüft werden. Im Moment fehlen Vorgaben an die Planer, energieeffiziente Lösungen zu entwickeln.
- Im Bereich der Nationalstrassen scheinen kaum Anreize für einen effizienteren Umgang mit Energie vorhanden zu sein. Der Eigentümer hat im Moment keine Handhabe, um den Betreiber in diesem Bereich zu steuern. Auch erscheinen die Verantwortlichkeiten und Prozesse des Eigentümers nicht ausreichend geregelt.
- Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beim Eigentümer Handlungsbedarf im Bereich Energiemanagement vorhanden ist. Im Zusammenhang mit der Energiestrategie 2050 sollte ein Energiemanagementsystem nach ISO 50001 eingeführt werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das vorliegende Forschungsprojekt hatte das Ziel, die Grundlagen für die Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln zu schaffen, indem ein Konzept mit Benchmarking-Ansatz erarbeitet wird.

Mit der Erstellung des Konzepts zur Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln wurde dieses Ziel erreicht. Als Grundlage für das Konzept wurden Energieverbrauchsdaten von Schweizer Tunneln ausgewertet und das energetische Optimierungspotential der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung analysiert. Es wurde wie gefordert ein Benchmarking-Ansatz entwickelt, anhand dessen Tunnel in Energiekategorien eingeteilt werden können. Aktuelle Studien wie z.B. Tunnel Lungern, Tellspitze, Rofla und weitere wurden berücksichtigt. Anhand einer internationalen Umfrage (11 Länder) wurde die Wichtigkeit des Themas sowie diverse Teilaspekte der Energieeffizienz für Strassentunnel für zahlreiche europäische Länder erkannt. Teilweise existieren umfassende Erhebungen, jedoch kein Konzept mit Benchmarking-Ansatz wie er im vorliegenden Projekt erarbeitet wurde. Mit dem Konzept wurde ein Werkzeug für das ASTRA erstellt, um den Energieverbrauch von existierenden Tunneln zu bewerten und zu optimieren.

Folgerungen und Empfehlungen:

Mit diesem Forschungsprojekt liegt ein Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz vor. Es wird empfohlen, dieses Konzept nun auf möglichst viele Tunnelobjekte anzuwenden.

Weitere Empfehlungen sind:

- Energiemesskonzepte für Strassentunnel verbessern
- Stärkere Forderung und Überprüfung von energieeffizienten Lösungen in der Planungsphase
- Anreize für den energieeffizienten Tunnelbetrieb schaffen (Betreiber) sowie Steuerungsmechanismen auf Seite Eigentümer
- Ganzheitliche Verbesserung des Energiemanagements beim Eigentümer, Energiemanagementsystem nach ISO 50001 einführen

Publikationen:

Frey, S., Riess, I., Welte, U., Wildi, P. (2016): Verbesserung der Energieeffizienz von Strassentunneln, Forschungsprojekt AGT 2015/0085_ENG auf Antrag der Arbeitsgruppe Tunnel (AGT), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Welte Vorname: Urs

Amt, Firma, Institut: Amstein + Walthert Progress AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Projektteam hielt sich mit den Arbeiten eng an die Vorgaben gemäss Formular 2 sowie den vorgegebenen Projektzielen.

Im Rahmen der frühzeitig geplanten BK-Sitzungen wurde jeweils der aktuelle Stand des Forschungsprojektes sowie die Ressourcensituation (Budget und Termine) transparent präsentiert und anschliessend protokolliert. Während den Diskussionen hatten die Mitglieder der BK die Möglichkeit, Anmerkungen einzubringen sowie auf auffälligen Anpassungsbedarf hinzuweisen.

Ein erster Berichtsentwurf wurde bereits im Vorfeld der dritten BK-Sitzung (April 2016) zum Review verteilt. Auf diese Weise konnte die Beschleunigung (Abschluss September 2016 anstatt Dezember 2016) realisiert werden, was im Interesse aller Beteiligten war.

Umsetzung:

Das vom Projektteam gewählte Vorgehen (Internationale Umfrage, Grundlagenstudium, Analyse Energieverbrauchsdaten, Benchmarking, Optimierungsmassnahmen, Konzept) war der Aufgabe angemessen und im Hinblick auf die Zielerreichung zweckdienlich. Sämtliche gesetzten Meilensteine wurden dabei fristgerecht erreicht und der BK an den entsprechenden Terminen präsentiert. Der Schlussbericht führt den Leser systematisch zum Produkt der Forschungsarbeit, dem Konzept zur Verbesserung der Energieeffizienz und beschreibt das Vorgehen detailliert. Es resultierten zudem interessante Erkenntnisse im Bereich der Energiemesskonzepte, der Planung, des Betriebs sowie des Energiemanagements generell.

weitergehender Forschungsbedarf:

Das vorliegende Forschungsprojekt wirkt im Bereich G7/M7.3 der Energiestrategie 2050 des Bundes. Es gibt aus Sicht der Autoren weiteren Forschungsbedarf in den Massnahmengruppen zur Verkehrsinfrastruktur (G6 und G7).

Einfluss auf Normenwerk:

Es wurden im Kapitel "Anpassung von Normen und Richtlinien" diverse Anpassungen vorgeschlagen, welche die Energieeffizienz verbessern würden, ohne die Sicherheit zu vermindern.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Lehmann Vorname: Christoph

Amt, Firma, Institut: HDZ Elektroingenieure AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.“