



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

Ereignisdetektion im Strassen-tunnel

Détection d'incidents dans les tunnels routiers

Incident Detection in Road Tunnels

Amstein + Walthert Progress AG
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH
Samuel Frey, Dipl. Umwelt-Natw. ETH
Andreas van Linn, Dr. Ing. (Bau) TH

**Forschungsauftrag VSS 2008/205 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

März 2011

1323

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten 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 l' (les) auteur(s) mandaté(s) par 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)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

The content of this report engages only the author(s) commissioned 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

Ereignisdetektion im Strassen-tunnel

Détection d'incidents dans les tunnels routiers

Incident Detection in Road Tunnels

Amstein + Walthert Progress AG
Urs Welte, Dipl. El. Ing. ETH
Samuel Frey, Dipl. Umwelt-Natw. ETH
Andreas van Linn, Dr. Ing. (Bau) TH

**Forschungsauftrag VSS 2008/2005 auf Antrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Urs Welte, Amstein + Walthert Progress AG

Mitglieder

Samuel Frey, Amstein + Walthert Progress AG

Dr. Andreas van Linn, Amstein + Walthert Progress AG

Federführende Fachkommission

Fachkommission 2.11: Tunnel

Begleitkommission

Präsident

Jean-Marc Jeanneret, AJS ingénieurs civils SA Neuchatel

Mitglieder

Peter Bürkel, Bürkel Baumann Schuler Ingenieure + Planer AG Winterthur

Heinz Dudli, Bern

Christian Gammeter, Bundesamt für Strassen, Bern

Peter Köhli, Ing.-büro Horgen

Christoph Lehmann, HDZ Elektroingenieure AG Urdorf

Dr. Arnd Rogner, METAPHYSICS Ste-Croix

Christian Scholer, TBA BL Liestal

Walter Steiner, Altdorf

Benoît Stempfeli, PERSS Ingénieurs-Conseils SA Fribourg

KO-Finanzierung des Forschungsauftrags

-

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, VSS

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	9
	Summary	11
1	Einleitung	13
2	Ereignisbegriff	14
2.1	Klassifizierung.....	14
2.2	Ereignisklasse 1.....	14
2.3	Ereignisklasse 2.....	14
2.4	Ereignisklasse 3.....	15
2.5	Ereignisphasen bei Tunnelbrand	15
2.6	Ereignishäufigkeiten.....	16
3	Ziel der Ereignisdetektionsanlagen	17
3.1	Grundsatz der Sicherheit im Strassentunnel	17
3.2	Ziel der Ereignisdetektionsanlagen	17
4	Typische Ereignisdetektionsanlagen	18
4.1	Allgemein.....	18
4.2	ED-Anlagen	18
4.2.1	Linienbrandmelder	18
4.2.2	Sichttrübungsmessung.....	19
4.2.3	Rauchmelder	19
4.2.4	Gassensoren	19
4.2.5	Infrarotdetektoren.....	19
4.2.6	Verkehrsdatenerfassung (VDE).....	19
4.2.7	Verkehrsfernsehen (VTV) mit Ereigniserkennung	20
4.2.8	Glatteisfrühwarnung	20
4.3	Erforderlichkeit von ED-Anlagen.....	21
4.4	Messprinzipien.....	22
4.5	Normative Anforderungen an ED-Anlagen	22
4.6	Redundanzen.....	23
5	Detektionsqualität	24
5.1	Definition.....	24
5.2	Fehlalarme vs. nicht detektierte Ereignisse.....	24
5.3	Optimierung der Detektionsqualität.....	25
5.4	Praxiserfahrungen Fehlalarme	25
5.5	Detektionszeit	25
5.5.1	Detektionszeit bei Linienbrandmelder.....	26
5.5.2	Detektionszeit bei Rauchmeldern	27
5.5.3	Detektionszeit CO-Messung.....	27
5.5.4	Ziel Detektionszeit 1 Minute	27
5.6	Verfügbarkeit von ED-Anlagen	28
5.6.1	Definition.....	28
5.6.2	Zielwert Verfügbarkeit ED-Anlagen.....	28
5.6.3	Abhängigkeit Verfügbarkeit von Stromversorgung	28
5.6.4	Steigerung der Verfügbarkeit bei Linienbrandmeldern	28
5.7	Unverfügbarkeit von ED-Anlagen	29
6	Testbarkeit von ED-Anlagen	30
6.1	Anforderung an Tests von ED-Anlagen	30
6.1.1	Problematik.....	30
6.1.2	Einzeltest, Systemtest	30
6.1.3	Integraler Test.....	30
6.1.4	Reflexmatrix als Grundlage für integralen Test	31
6.1.5	Klasse 1 und Klasse 2-Reflexe.....	32
6.1.6	Fazit Reflexmatrix und integraler Test	32
6.2	Tests für Brandmeldeanlagen.....	33
6.2.1	Übersicht	33
6.2.2	Testfeuer und Detektionszeiten	34

6.3	Statistische Betrachtung.....	35
6.3.1	Attributiver Test.....	35
6.3.2	Test gegen Vergleichswert.....	35
6.3.3	Stichprobentest.....	36
7	Risikoreduktion durch ED-Anlagen.....	39
7.1	Generelle Bemerkung.....	39
7.2	Risikoreduktion für Verkehrsteilnehmer.....	39
7.2.1	Menschliches Verhalten – Reaktionszeit im Brandfall.....	39
7.2.2	Abschätzung der Risikoreduktion.....	41
7.2.3	Ereignisbaumanalyse.....	41
7.2.4	Diskussion.....	42
8	Nutzwertanalyse für ED-Anlagen aus Anwendersicht.....	44
8.1	Methode.....	44
8.1.1	Beschreibung Nutzwertanalyse.....	44
8.1.2	Auswahl ED-Anlagen.....	44
8.1.3	Definition der Kriterien.....	44
8.1.4	Gewichtung der Kriterien.....	45
8.1.5	Durchführung der Bewertung.....	45
8.2	Resultate.....	46
8.2.1	Gewichtung der Kriterien.....	46
8.2.2	Bewertung der ED-Anlagen.....	47
8.2.3	Nutzwert.....	50
8.3	Diskussion.....	51
8.3.1	Gewichtung der Kriterien.....	51
8.3.2	Nutzwerte der ED-Anlagen.....	52
8.3.3	Vergleich mit Ereignisbaumanalyse.....	53
9	Bewertung der ED-Anlagen.....	54
9.1	Einleitung.....	54
9.2	Linienbrandmelder.....	54
9.3	Rauchmelder.....	55
9.4	Sichttrübungsmessung.....	55
9.5	Verkehrsdatenerfassung (VDE).....	56
9.6	Verkehrsfernsehen mit Ereignisdetektion.....	56
9.7	Glatteiswarnung.....	57
	Anhänge.....	58
	Abkürzungen.....	63
	Literaturverzeichnis.....	64
	Projektabschluss.....	65
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen.....	69

Zusammenfassung

Inhalt

Anlagen zur Ereignisdetektion (ED-Anlagen) sind integraler Bestandteil des Sicherheitskonzepts im Strassentunnel. Sie bilden das erste Glied in der Kette der Ereignisbewältigung und sind daher von grosser Wichtigkeit.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, die ED-Anlagen ganzheitlich zu analysieren und eine Aussage über die Vor- und Nachteile sowie die Wichtigkeit der einzelnen Anlagen innerhalb des Systems Strassentunnel zu machen.

Die Inhalte des vorliegenden Berichts sind folgende:

- Der Ereignisbegriff wird eingangs beleuchtet. Ereignisse werden in 3 Klassen eingeteilt. Das Wirken der einzelnen ED-Anlagen wird im Zusammenhang mit den Ereignisklassen dargestellt.
- Typische ED-Anlagen werden beschrieben (Aufbau, Messprinzipien, Normative Anforderungen).
- Die Detektionsqualität wird bezüglich Fehlalarmen und nicht detektierten Ereignissen beleuchtet. Fehlalarme und nicht detektierte Ereignisse unterliegen einem Optimierungsprozess, da die beiden Grössen in der Praxis voneinander abhängig sind. Es ist in der Praxis nicht möglich, 100% der Ereignisse korrekt zu bearbeiten. Der Faktor Mensch spielt dabei eine wichtige Rolle. Dies ist bei der Konzeption von Leitstellen zu berücksichtigen.
- Die Testbarkeit der Anlagen wird behandelt (Einzeltest, integraler Test). Die statistischen Probleme bei Stichprobentests werden abgehandelt. Es besteht Bedarf nach klar definierten Prüfverfahren (Prüfanweisungen) für die Abnahme von ED-Anlagen (Einzeltest).
- Die schweizweit gültige Reflexmatrix des ASTRA wird kritisch analysiert. Generell erscheint die Matrix als zweckdienlich. Man könnte in Erwägung ziehen, den Anlagenausfall für ED-Anlagen zusätzlich darzustellen.
- Anhand von Ereignisbaumanalysen wird die Risikoreduktion für typische ED-Anlagen bezogen auf das Personenrisiko abgeschätzt. Es zeigt sich, dass ED-Anlagen bezogen auf das Personenrisiko im Tunnel lediglich eine geringe Risikoreduktion erwirken.
- Die Methode der Nutzwertanalyse wird auf typische ED-Anlagen angewendet. Es wurden Experten für Betrieb und Unterhalt aus verschiedenen zentraleuropäischen Ländern befragt. Im relativen Vergleich schnitten die Brandmeldeanlagen am besten ab.
- Zum Schluss wird eine ganzheitliche Bewertung der ED-Anlagen durchgeführt. Eine Klassifizierung erscheint nicht sinnvoll, da die Aufgaben der Anlagen völlig unterschiedlich sind und die Anzahl der Systeme begrenzt ist.

Erkenntnisse / Empfehlungen

- Es zeigt sich, dass ED-Anlagen bezogen auf das Personenrisiko im Tunnel lediglich eine geringe Risikoreduktion erwirken. Speziell im Bereich der Anlagen, welche das Schadensausmass im Brandfall reduzieren, erscheinen moderne Tunnel in der Schweiz ausreichend ausgerüstet zu sein. Brand ist ein wichtiges Szenario im Strassentunnel, 90% des Personenrisikos machen jedoch Unfälle ohne Brandfolgen aus. Will man das Personenrisiko weiter minimieren, so sind Massnahmen, welche auf die Unfallwahrscheinlichkeit einwirken, zu ergreifen.
- Es besteht Bedarf nach klar definierten Prüfverfahren (Prüfanweisungen) für die Abnahme von ED-Anlagen (Einzeltest). Gute Ansätze sind für einige spezifische Produkte vorhanden. Das Ziel sollte sein, dass jeder Test im Rahmen einer Abnahme auf einer Prüfanweisung basierend durchgeführt werden kann. Stichprobentests für Komponenten im Tunnel sind in der Regel nicht aussagekräftig und sollten nicht zum Einsatz kommen.
- Um die nicht detektierten Ereignisse zu minimieren, sind ED-Anlagen sensitiv einzustellen. Daraus resultieren unweigerlich Fehlalarme. In der Verkehrsleitzentrale ist daher eine hohe Fehlalarmtoleranz anzustreben. Je nach Ausführung der Verkehrsleitzentrale kann das verträgliche Mass an Fehlalarmen stark variieren. Wenn zum Beispiel jeder Alarm mit einem akustischen Signal verbunden ist, so kann eine hohe Fehlalarmrate für das Leitstellenpersonal zur Belastung werden. Im Falle einer diskreten und gut verifizierbaren Meldung werden auch hohe Fehlalarmraten toleriert. Dies ist bei der Planung von Leitzentralen zu berücksichtigen.

Résumé

Contenu

Les installations de détection automatique d'incidents (DAI) font partie intégrante de la conception de la sécurité dans les tunnels routiers. Ils constituent le premier maillon de traitement des incidents, et sont de ce fait de première importance.

Le présent rapport a pour but d'analyser les DAI dans leur entier et de rendre compte des avantages et inconvénients, ainsi que l'importance de chacune des installations au sein des tunnels routiers.

Le contenu du rapport est le suivant:

- La terminologie "incident" est tout d'abord discutée. Les incidents sont répartis en trois classes. Le mode de fonctionnement de chacune des DAI est présenté dans le cadre de ces trois classes d'incidents.
- Les DAI typiques sont décrites (structure, principes de mesure, exigences normatives).
- La qualité de la détection est discutée sous l'angle des fausses alarmes et des incidents non détectés. Ces paramètres sont sujets à un processus d'optimisation, car dans la pratique ils dépendent l'un de l'autre. Il n'est pas possible de traiter correctement 100% des incidents. Le facteur humain joue ici un rôle important. Ce point est à prendre en compte dans la conception de salles de commande.
- La testabilité des DAI est considérée (tests unitaires, tests intégrés). Le problème des tests par échantillonnage est traité. Il en ressort un besoin d'instructions de tests claires pour la réception des DAI.
- La matrice de réflexes de l'OFROU, valable pour toute la Suisse, est analysée. Elle est généralement utile. On pourrait envisager d'inclure des réflexes en cas de défaillance de DAI.
- La réduction de risque apportée par des DAI typiques est évaluée sur la base d'analyse d'arbres de défaillance. En comparaison des risques globaux d'un tunnel, les DAI ne fournissent qu'une faible réduction des risques.
- La méthode d'analyse multi critères est appliquée à des DAI typiques. Des experts en exploitation et entretien de divers pays européens ont été consultés. En comparaison relative, les installations de détection d'incendie affichent les meilleurs résultats.
- Enfin, une évaluation globale des DAI est réalisée. Un classement n'est pas pertinent, car chaque type installation a des tâches très différenciées, et le nombre de systèmes est limité.

Enseignements / Recommandations

- Les DAI n'apportent qu'une faible réduction des risques en regard des risques globaux dans un tunnel. En ce qui concerne les installations réduisant les dommages aux incendies, les tunnels modernes Suisses sont suffisamment équipés. L'incendie est un scénario important dans un tunnel routier, cependant, 90 % du risque global est causé par des accidents sans incendie. Si l'on souhaite encore réduire le risque global dans un tunnel, alors il faut agir sur des mesures qui ont un effet sur la probabilité d'accident.
- Il a été mis en évidence un besoin d'instructions de tests claires pour la réception des DAI. De bonnes approches sont disponibles pour quelques produits spécifiques. Le but devrait être de disposer d'une instruction de test spécifique pour chaque type de réception. Les tests d'installations de tunnel par échantillonnage ne sont en général pas pertinents et ne devraient pas être utilisés.
- Pour réduire le nombre d'incidents non détectés, il est nécessaire d'atteindre une haute tolérance aux fausses alertes dans les centrales de supervision de la circulation. Le degré d'acceptation varie fortement selon les solutions réalisées dans les centrales. Si par exemple chaque alarme est associée à un signal acoustique, alors un taux de fausses alarmes élevé peut devenir une nuisance pour le personnel de la centrale. Dans le cas d'un message discret et facilement vérifiable, le même taux élevé de fausses alarmes sera toléré. Cette considération est à prendre en compte dans la planification de centrales de supervision.

Summary

Content

Systems for incident detection are an integral part of the safety concept in road tunnels. They represent the first link in the chain of incident management and are therefore of great importance.

The goal of this report is to analyse the typical incident detection systems and to make a statement about the advantages and disadvantages of individual systems in the road tunnel.

The content of this report is the following:

- The term "incident" is discussed initially. Incidents are divided into three categories. The mode of action of each incident detection system is discussed in connection with the incident categories.
- Typical incident detection systems are described (layout, principle of measurement, requirements from guidelines and standards).
- The detection quality is discussed with regard to false alarms and undetected incidents. False alarms and undetected incidents are subject to an optimization process, as the two factors in practice are interdependent. In practice it is not possible to manage 100% of the incidents correctly. The human factor plays an important role. This should be considered in the design of control rooms.
- The testability of the incident detection systems is discussed (single test, integral test). The statistical problems caused by random sampling are mentioned. There is a need for well defined test guidelines for the approval of incident detection systems in the tunnel.
- The reflection matrix of ASTRA, which is valid for Switzerland, was analyzed critically. In general, the matrix appears to be useful. One might consider including the operational consequences (reflexes) in case of unavailability of incident detection systems.
- Based on event tree analysis, the risk reduction for tunnel users obtained by incident detection systems is estimated. Compared to the total risk for tunnel users, only a small risk reduction can be obtained by incident detection systems.
- A multi-criteria analysis is used to assess the advantages and disadvantages of incident detection systems. Experts from the field of operation and maintenance of electromechanical equipment of different central European countries were involved. In relative comparison, the fire detection systems were seen as the most valuable systems.
- The report ends with an overall assessment for the incident detection systems. A classification does not appear to be a sound instrument, since the different systems have very different purposes and the total number of systems is quite limited.

Findings / recommendations

- Compared to the total risk in the tunnel, incident detection systems only obtain a small risk reduction for tunnel users. Especially with regard to systems installed to minimise the damage in case of fire, modern road tunnels in Switzerland appear to be equipped sufficiently. Fire is an important scenario in the road tunnel, but 90% of the risk for tunnel users is caused by accidents without fire. If one wants to further minimize the risk for tunnel users, measures that affect the probability of accidents have to be taken.
- For the approval of incident detection systems there is need for clearly defined test guidelines. Good approaches can be seen for some specific products. The goal should be that for the approval each test can be performed based on a clear test guideline. Sampling tests for components in the tunnel generally give no reliable results and should not be applied therefore.
- In order to minimize undetected events, incident detection systems need to be set at a sensitive level. The occurrence of false alarms is inevitable; therefore a high false alarm tolerance should be striven for (in the traffic control room). Depending on the design of the traffic control room, the acceptable level of false alarms can vary greatly. If for example each alarm triggers an acoustic signal, a high false alarm rate can be very tiring for the control room staff. In case of discrete and easily verifiable alarms also high false alarm rates can be tolerated. This should be considered in the design of control rooms.

1 Einleitung

Strassentunnel sind zentrale Elemente der Strasseninfrastruktur und werden tendenziell mit zunehmender Intensität befahren. Die Gewährleistung der Sicherheit ist daher in den Strassentunnel von grosser Wichtigkeit. Auf den Nationalstrassen ist dies eine Aufgabe des Bundes. Die Sicherheit auf der Strasse wird generell vom Lenker, dem Fahrzeug sowie der baulichen und technischen Infrastruktur beeinflusst. Im Bereich der technischen Infrastruktur kann die Sicherheit durch optimal ausgelegte und betriebene Betriebs- und Sicherheitsanlagen erhöht werden. Die ED-Anlagen sind Teil der BSA und erstes Glied in der Ereignisbewältigung. Die Anforderungen an die Detektionsqualität und Verfügbarkeit der Anlagen sind daher hoch. Die ideale ED-Anlagen produziert keine Fehlalarme, detektiert jedes Ereignis sofort und örtlich präzise, fällt nie aus und hat eine unendliche Lebensdauer. Die Praxis sieht leider anders aus. Je sensitiver eine Anlage eingestellt wird, desto mehr Fehlalarme produziert sie. Anlagen steigen aufgrund von Defekten oder Verschmutzung aus und erreichen wegen den extremen Einsatzbedingungen im Strassentunnel nicht die erwartete Lebensdauer. Das übergeordnete Ziel einer ED-Anlage, die Risikoreduktion, wird dadurch nur vermindert erreicht.

Der vorliegende Bericht hat zum Ziel, die ED-Anlagen ganzheitlich zu analysieren und eine Aussage über die Vor- und Nachteile der einzelnen Anlagen innerhalb des Systems Strassentunnel zu machen.

2 Ereignisbegriff

2.1 Klassifizierung

Im Kontext der Sicherheit ist der Begriff „Ereignis“ in der Regel negativ behaftet. Im Vokabular der Strassentunnel-Sicherheit wird mit Ereignis meist ein Unfall oder das Folgenzenario eines Unfalls bezeichnet. Ein Tunnelbrand ist ein Ereignis, welches als Konsequenz aus vorhergehenden Ereignissen zu verstehen ist. Zum Beispiel kann ein verlorenes Objekt auf der Fahrbahn ein Ausweichmanöver provozieren, aus welchem eine Kollision resultiert. Als Folge der Kollision kann ein Brand entstehen.

Strassentunnel sind offene Systeme. Die Vielfalt möglicher Ereignisse ist daher gross. Als Vorschlag können Ereignisse nach folgenden Klassen eingeteilt werden:

Ereignisklasse	Beschreibung	Schaden	Beispiele
1 Vor-Unfall Ereignis	Risikoerhöhendes Ereignis	gering	Verlorenes Objekt, stehendes Fahrzeug, Panne/Fehlfunktion Fahrzeug, Falschfahrer, Ausfall/Fehlfunktion technischer Systeme im Tunnel, Verkehrsqualität, Verkehrszusammensetzung, Fahrbahnzustand
2 Unfallereignis	Mechanisches Ereignis	mittel bis gross	Selbstunfall, Auffahrunfall, Streifkollision, Frontalkollision
3 Nach-Unfall Ereignis	Chemisches Ereignis	mittel bis katastrophal	Brand, Ausströmen von Gefahr-gut, Explosion

Abb. 1: Ereignisklassen

2.2 Ereignisklasse 1

Ereignisklasse 1 umfasst Ereignisse oder Zustände, welche das Risiko für die Tunnelnutzer erhöhen. Diese risikoerhöhenden Ereignisse weisen nur ein geringes direktes Schadensausmass auf. Sie sind lästig oder unangenehm bzw. weisen mässige Kosten auf. Der Falschfahrer stellt hier gewissermassen einen Sonderfall dar. Er bewirkt in den meisten Fällen Angst oder Panik. Solange ein Falschfahrer jedoch keinen Unfall verursacht, sind die Schäden am Menschen psychologischer Natur und schwierig zu messen.

Schutzgut	Schaden
Mensch	Meistens lästig, unangenehm. Psychologische Beeinträchtigung möglich.
Bauwerk	Geringe Reparaturkosten bzw. Interventionskosten
Verfügbarkeit Tunnel	Geringe Sperrzeit bei Ausfall/Fehlfunktion eines technischen Systems möglich
Umwelt	Keine Schäden

Abb. 2: Schutzgüter Ereignisklasse 1

2.3 Ereignisklasse 2

Ereignisklasse 2 umfasst die eigentlichen Unfälle. Unfälle haben immer eine oder mehrere Ursachen. Sie können aus einem Ereignis der Klasse 1 hervorgehen. In vielen Fällen sind die Ursachen jedoch nicht abhängig vom Zustand des Tunnels (z.B. Abgelenktheit, Sekundenschlaf). Unfälle weisen mittleres bis grosses Schadensausmass auf (Materialschäden bis mehrere Tote). In der Schweiz ereignen sich jährlich über 600 Tunnelunfälle (rund 280 Verletzte und 8 Tote)¹.

Schutzgut	Schaden
Mensch	Leichtverletzte bis mehrere Tote (i.d.R. nicht mehr als 5)
Bauwerk	Mässig hohe Reparaturkosten bzw. Interventionskosten
Verfügbarkeit Tunnel	Sperrzeiten von mehreren Stunden möglich
Umwelt	Keine Schäden

Abb. 3: Schutzgüter Ereignisklasse 2

2.4 Ereignisklasse 3

Ereignisklasse 3 umfasst chemische Ereignisse (Brand, toxische Substanzen, Explosionen), beginnend bei selber löschbaren Kleinbränden bis zu Grossbränden mit Beteiligung von Gefahrgut. Das Schadensausmass dieser Ereignisse reicht demnach von mittel bis katastrophal. Diesen Ereignissen geht in der Regel ein Unfall bzw. eine Panne/Fehlfunktion voraus.

Schutzgut	Schaden
Mensch	Leichtverletzte bis viele Tote (Worst Case: BLEVE eines LPG-Tanklastzugs, >100 Tote möglich), bei Explosionen Tote ausserhalb des Tunnels nicht auszuschliessen
Bauwerk	Bis zu Verlust der Tragfähigkeit
Verfügbarkeit Tunnel	Sperrung über Monate möglich
Umwelt	Luftverschmutzung, Gewässerverschmutzung möglich

Abb. 4: Schutzgüter Ereignisklasse 3

2.5 Ereignisphasen bei Tunnelbrand

Folgende Abbildung zeigt die Ereignisphasen bei einem Tunnelbrandⁱⁱ (Ereignisklasse 3):

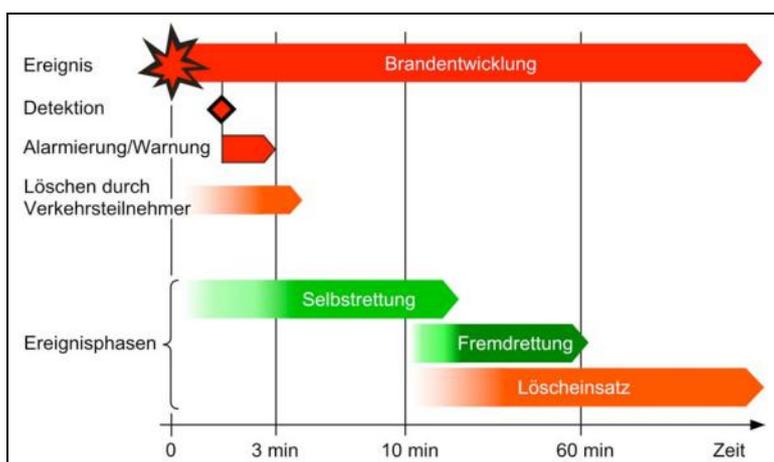


Abb. 5: Ereignisphasen bei Tunnelbrand

Die Zeit zwischen Ereignis und Detektion wird Detektionszeit genannt (in dieser Darstellung 1-2 Minuten). In dieser Zeit ist mit keinen Reaktionen der Sicherheitsanlagen zu rechnen. Nach erfolgreicher Detektion erfolgt die Alarmierung und Warnung. Evtl. wurde bzw. wird der Brand zu diesem Zeitpunkt bereits durch Verkehrsteilnehmer bekämpft.

Die Feuerwehr unterscheidet drei Ereignisphasen:

- Selbstrettung
- Fremdrettung
- Löscheinsatz

Ereignisphase	Beginn	Bemerkung
Selbstrettung	Bei direkter Wahrnehmung, Warnung durch Tunnelnutzer oder nach Warnung über Radiodurchsage	Tunnel ohne Rauchabsaugung nach 10-15 Minuten verraucht
Fremdrettung	Frühestens 10 Minuten nach Brandausbruch	Von der stärker verrauchten Seite her
Löscheinsatz	In der Regel parallel zur Fremdrettung	Von der weniger verrauchten Seite her

Abb. 6: Ereignisphasen

Die Stellung der ED-Anlagen in der Ereignisbekämpfung ist zentral. Eine kurze Detektionszeit ist anzustreben, da dadurch:

- die Tunnelnutzer frühzeitig gewarnt und zur Selbstrettung aufgefordert werden können
- die Ereignisdienste so rasch wie möglich alarmiert werden,
- die BSA unterstützend eingesetzt werden kann.

2.6 Ereignishäufigkeiten

Folgende Tabelle gibt einen Überblick betreffend der Häufigkeiten verschiedener Ereignisse in Strassentunnelnⁱⁱⁱ:

Ereignis	Ereignisklasse	Rate [10^8 FhzKm]	Bemerkung
Panne	1	Städtisch 1300 Überland 300-600 Alpin 900-1900	Pannenhäufigkeit stark von Längsneigung abhängig
Unfall	2	35	Durchschnitt CH, Gotthard ca. 50
Brand	3	25	Diese Rate ist sehr konservativ (worst case), Gotthard 5.2

Abb. 7: Ereignishäufigkeiten

3 Ziel der Ereignisdetektionsanlagen

3.1 Grundsatz der Sicherheit im Strassentunnel

Die Sicherheit im Strassentunnel wird durch 4 Faktoren bestimmt:

- Verkehrsteilnehmer
- Betrieb
- Fahrzeuge
- Infrastruktur

Alle vier Bereiche tragen in einem bestimmten Verhältnis zur Sicherheit bei. ED-Anlagen sind Teil der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung eines Tunnels, und gehören folglich zum Bereich Infrastruktur.

Die Tunnelnorm SIA 197/2 und die EU-Richtlinie 2004/54/EC schreiben vor, dass ab einer Länge von 300m (SIA) bzw. 500m (EU) Bauteile für die Sicherheit erforderlich sind, wobei Abweichungen von dieser Forderung in begründeten Fällen möglich sind.

3.2 Ziel der Ereignisdetektionsanlagen

ED-Anlagen haben zum Ziel, das Risiko der Tunnelnutzung zu minimieren und den Tunnel als Bauwerk zu schützen. Die meisten ED-Anlagen wirken dabei durch Schadensminimierung von Ereignissen, in der Regel durch:

- Frühzeitige Alarmierung von Tunnelnutzer und Hilfskräften
- Automatisch eingeleitete Schadensminimierungsmassnahmen
- Unterstützung der Selbstrettung

Es gibt auch ED-Anlagen, welche durch Detektion von gefährlichen Zuständen die Unfall- und Pannenwahrscheinlichkeit im Tunnel reduzieren und somit das Risiko präventiv minimieren.

4 Typische Ereignisdetektionsanlagen

4.1 Allgemein

Ereignisse werden mit technischen Anlagen detektiert. Die Anlagen messen bestimmte Parameter, interpretieren diese und geben in der Regel Alarmmeldungen an andere Anlagen oder an Personen ab. Die ED-Anlagen stellen somit die erste Stufe der Alarmierungskette dar. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der ED-Anlagen.

4.2 ED-Anlagen

Der Begriff „ED“ wird oft nur im Zusammenhang mit dem Verkehrsfernsehen verwendet und meint dann die automatische Ereignisdetektion durch Videobildanalyse. Der Begriff ED-Anlagen ist in diesem Bericht weiter gefasst. ED-Anlagen im Sinne dieses Berichts sind Anlagen in Strassentunneln, welche Ereignisse detektieren.

ED-Anlagen in Strassentunneln gehören zur Betriebs- und Sicherheitsausrüstung. Die Betriebs- und Sicherheitsausrüstung umfasst jedoch neben den ED-Anlagen noch weitere wichtige Einrichtungen. Folgende Abbildung zeigt die ED-Anlagen im Sinne dieses Berichts als Teilmenge der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

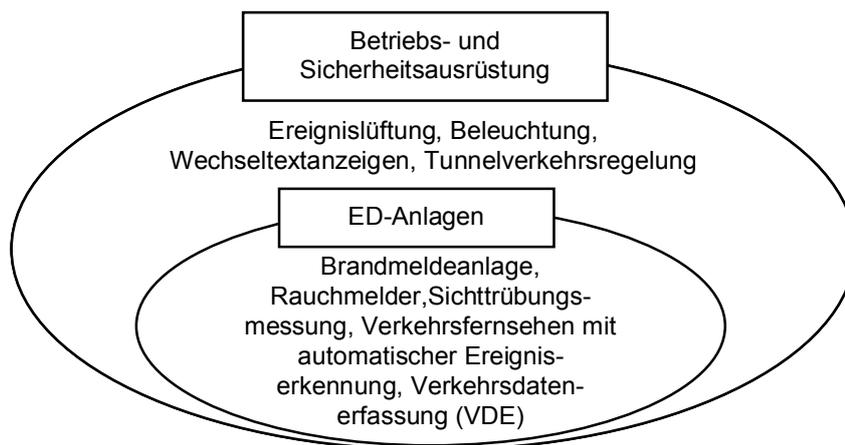


Abb. 8: ED-Anlagen innerhalb der BSA

Die SIA Norm 197/2 (Projektierung Tunnel, Strassentunnel) führt unter der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung unter anderem Erfassungsanlagen. Dies sind die ED-Anlagen im Sinne dieses Berichts.

4.2.1 Linienbrandmelder

Optisch

Als Fühler dient ein Glasfaserkabel, welches typischerweise mittig unter der Tunneldecke montiert wird. Ein Lichtsignal wird in das Kabel eingestrahlt. Erfährt das Kabel eine Erwärmung, entstehen in der Glasfaser Schwingungen, welche eine spezielle Rückstreuung des Lichtsignals bewirken (sog. Raman-Effekt). Das rückgestreute Licht enthält Informationen über den Temperaturverlauf entlang des Kabels. Ein Alarm kann über Maximaltemperatur oder Temperaturgradienten definiert werden.

Sensorkabel

Als Fühler dient ein Kabel mit integrierten Temperatursensoren (typischerweise alle 4-10 Meter), welches meist mittig unter der Tunneldecke montiert wird. Die Temperatursensoren (Transistoren) emittieren temperaturabhängige Signale, welche von der Auswerteeinheit bezüglich Brandkriterien analysiert werden. Somit lässt sich der Temperaturverlauf entlang des Kabels überwachen. Ein Alarm kann über Maximaltemperatur oder Temperaturgradienten definiert werden.

Fühlerrohr

Das erste Brandmeldesystem für Tunnel wurde 1970 in der Schweiz installiert und beruhte auf dem Fühlerrohr-Prinzip. Ein Brand bewirkt in einem gasgefüllten Kupferrohr einen Druckanstieg, welcher detektiert werden kann. Noch heute sind zahlreiche Tunnel (v.a. im asiatischen Raum) mit diesem System ausgerüstet^{iv}. In der Schweiz werden jedoch keine neuen Tunnel mit diesem System ausgerüstet.

4.2.2 Sichttrübungsmessung

Die Sichttrübungsmessung ist für die Steuerung der Tunnellüftung im Normalbetrieb unerlässlich. Das am meisten verbreitete Messverfahren ist die Streulichtmessung. Dabei wird das unter einem definierten Winkel gestreute Licht einer Lichtquelle (Diode) im Verhältnis zum ungestreuten Licht gemessen. Je mehr Partikel in der Luft, desto höher der Anteil gestreuten Lichts. Ein anderes, weniger verbreitetes, Messverfahren misst die Abschwächung eines Lichtsignals zwischen Emitter und Detektor über eine definierte Strecke im Tunnel. Beide Verfahren können neben der Luftgütemessung auch als Rauchmelder eingesetzt werden.

4.2.3 Rauchmelder

Rauchmelder für Tunnelanwendungen funktionieren nach dem Prinzip der Streulichtmessung. Dabei wird das unter einem definierten Winkel gestreute Licht einer Lichtquelle (Diode) im Verhältnis zum ungestreuten Licht gemessen. Je mehr Partikel in der Luft, desto höher der Anteil gestreuten Lichts.

4.2.4 Gassensoren

Zur Steuerung der Lüftung werden unter anderem Kohlenmonoxid (CO) Sensoren eingesetzt. CO entsteht auch bei unvollständiger Verbrennung, und die Sensoren können als Brandmelder eingesetzt werden. In der Schweiz ist die Bedeutung von CO-Sensoren abnehmend. Sie werden nur noch in Ausnahmefällen installiert^v.

4.2.5 Infrarotdetektoren

Bei Infrarotdetektoren handelt sich um Flammendetektoren. Die sog. Flacker-Frequenz einer Flamme sowie das Intensitätsverhältnis verschiedener Wellenlängen dienen als Detektionskriterien. Diese Technologie findet vorwiegend in Asien (Japan, China) Anwendung.

4.2.6 Verkehrsdatenerfassung (VDE)

Die Verkehrsdatenerfassung (VDE) erfolgt in der Schweiz meist über Induktionsschleifen in den jeweiligen Fahrstreifen. Dabei lässt die Art der Magnetfeldstörung (Verstimmung) eine Unterscheidung in Fahrzeugtypen sowie das Ermitteln der Geschwindigkeit zu. In letzter Zeit werden auch verstärkt Laserscannersysteme eingesetzt. Folgende Parameter können erhoben werden^{vi}:

- Anzahl PKW-ähnliche Fahrzeuge pro Zeitintervall
- Anzahl LKW-ähnliche Fahrzeuge pro Zeitintervall
- Geschwindigkeit von PKW-ähnlichen Fahrzeugen
- Geschwindigkeit von LKW-ähnlichen Fahrzeugen

Die erfassten Grössen können weiterverarbeitet und als aggregierte Kennwerte (Mittelwerte, Verteilungen) ausgegeben werden. Für die Genauigkeit der Werte bestehen in der Schweiz konkrete Anforderungen^{vii}.

Die VDE liefert neben den Werten für die Verkehrsstatistiken auch Ereignismeldungen wie „Stau“ oder „langsamer Verkehr“.

4.2.7 Verkehrsfernsehen (VTV) mit Ereigniserkennung

Verkehrsüberwachung mit Videokameras kommt sowohl auf offener Strecke als auch im Tunnel verbreitet zur Anwendung. Grob unterscheiden kann man zwischen Systemen mit und ohne automatischer Ereigniserkennung. ED-Anlagen im Sinne dieses Berichts sind VTV-Anlagen mit Ereigniserkennung durch automatische Bildauswertung und entsprechender Alarmierung.

Gängige Algorithmen sind:

- Stehendes Fahrzeug
- Langsamer Verkehr, Stau
- Verlorenes Objekt
- Falschfahrer
- Rauch

Eine spezielle Anwendung (Algorithmus) ist die automatische Detektion von Gefahrguttransporten. Diese ist in der Schweiz jedoch nicht üblich.

4.2.8 Glatteisfrühwarnung

Glatteiswarnanlagen werden z.B. auf Brücken oder im Portalbereich von Tunneln eingesetzt, da diese Stellen besonders anfällig auf Eisbildung sind. Die Anlagen geben Warnmeldungen an die Unterhaltsdienste ab. Eine automatische Signalsteuerung ist eher selten. Eine Verknüpfung mit anderen Reflexen ist in der Regel nicht realisiert. Eine Glatteiswarnanlage besteht meist aus einem oder mehreren in den Strassenbelag integrierten Sensoren, sowie einer Messeinrichtung für meteorologische Parameter neben der Fahrbahn.

4.3 Erforderlichkeit von ED-Anlagen

ED-Anlage	Detektierte Ereignis- klasse			Erforderlichkeit
	1	2	3	
Linienbrandmelder			x	Tunnel, die mit einem Lüftungssystem ausgestattet sind, sowie Tunnel mit grosser Verkehrsstärke und/oder hohem Anteil an Gefahrguttransporten sind mit einer automatischen Branddetektion (z.B. Linienbrandmelder im Fahrraum) auszurüsten ^{viii} . [SIA 197/2]
Rauchmelder			x	Zur Erfüllung der Anforderungen gemäss Richtlinie ASTRA 13004 (Branddetektion) ^{ix} zusammen mit Linienbrandmelder zu installieren.
Sichttrübungsmessung	x		(x)	Wenn eine mechanische Lüftung vorhanden ist, Sichttrübungsmessung kann zur Detektion eines Brands dienen
CO-Messung	x		(x)	Nur in Ausnahmefällen erforderlich
Luftlängsgeschwindigkeit	x		(x)	Wenn eine Lüftung installiert [SIA 197/2]
Verkehrsfernsehen (VTV) mit Ereigniserkennung	x	x	x	In Tunneln länger als 600 m [SIA 197/2]
Pannbuchthebelegung induktiv oder mit Videokameras	x			Induktiv: Wenn Bedarf nachgewiesen ist [SIA 197/2], Video: Richtlinie ASTRA 13005 ^x
Verkehrsdatenerfassung (VDE)	x			Richtlinie ASTRA 13012 (Verkehrszähler) Richtlinie ASTRA 15003 (Verkehrsmanagement) ^{xi}
Glatteisfrühwarnung	x			Wenn Bedarf nachgewiesen ist [SIA 197/2]
Keine ED-Anlagen				
SOS-Notrufsprechstelle				SIA 197/2
Alarmierter Feuerlöscher				SIA 197/2
Leuchtdichtemessung vor Portal				SIA 197/2
Automatische Löschanlage				In der Schweiz nicht installiert, keine Erforderlichkeit
Beschallungsanlage				In der Schweiz im Fahrraum nicht installiert (in Querschlägen z.T. schon)
Verkehrsfernsehen ohne Ereigniserkennung				SIA 197/2

Abb. 9: Erforderlichkeit von ED-Anlagen

4.4 Messprinzipien

ED-Anlage	Messprinzip
Linienbrandmelder optisch	Rückstreuung eines Lichtsignals (sog. Raman-Effekt) bei Erwärmung des Glasfaserkabels, rückgestreutes Licht enthält Informationen über Temperaturverlauf entlang des Kabels.
Linienbrandmelder Sensorchips	Temperatursensoren (Transistoren) generieren einen temperaturabhängigen Strom, welcher gemessen werden kann.
Rauchmelder	Streulichtmessung, Intensität des unter einem bestimmten Winkel gestreuten Lichts ist proportional zur Partikelkonzentration in der Luft.
Sichttrübungsmessung	Streulichtmessung: Intensität des unter einem bestimmten Winkel gestreuten Lichts ist proportional zur Partikelkonzentration in der Luft. Absorptionsmessung: Die Abschwächung des Lichts über eine definierte Messstrecke ist proportional zur Partikelkonzentration in der Luft.
CO-Messung	Elektrochemisch oder über Infrarot-Absorptionsmessung
Luftlängsgeschwindigkeit	Anemometer (Flügelradensor oder Ultraschall)
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	Spezifische Algorithmen für die verschiedenen Ereignisse.
Glatteisfrühwarnung	Temperaturmessung, Taupunktmessung
Verkehrsdatenerfassung (VDE), Pannenbuchtlegerung	Induktionsschleifen, Fahrzeuge bewirken eine Magnetfeldstörung (Verstimmung)

Abb. 10: Messprinzipien von ED-Anlagen

4.5 Normative Anforderungen an ED-Anlagen

ED-Anlage	Anforderungen	Norm/Richtlinie
Brandmeldeanlage generell	Detektion eines Brands in weniger als 60 Sekunden Übermittlung eines Datenwerts nicht grösser 10 Sekunden Höchstens 1 Fehlalarm pro 2 Röhrenkilometer und Jahr Höchstens eine Wartung pro Jahr	Richtlinie ASTRA 13004 (Branddetektion)
Linienbrandmelder	Räumliche Auflösung des Brandmeldekabels nicht grösser als 10 m	
Rauchmelder	Nebel darf nicht als Rauch detektiert werden Bei jeder Absaugklappe bzw. alle 100m	
Sichttrübungsmessung	Mindestens zwei Geräte pro Tunnelröhre, wenn eine mechanische Lüftung vorhanden ist	Richtlinie ASTRA 13001 (Lüftung der Strassentunnel)
CO-Messung	Wenn erforderlich mindestens zwei Geräte pro Tunnelröhre	
Luftlängsgeschwindigkeit	Wenn erforderlich In jedem Lüftungsabschnitt	
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	Visuelle Situationsbeurteilung durch Personen der Betriebsführung Ereignisdetektion Archivierung für den Ereignisfall Verkehrserfassung Verkehrsinformationen	Richtlinie ASTRA 13005 (Verkehrsfernsehen)
Glatteisfrühwarnung	Keine Anforderungen bekannt	
Verkehrsdatenerfassung (VDE)	Klar definierte Anforderungen betreffend Genauigkeit Funktion zu jeder Tageszeit und bei jeder Witterung	Richtlinie ASTRA 13012 (Verkehrszähler)

Abb. 11: Normative Anforderungen an ED-Anlagen

4.6 Redundanzen

Typischerweise werden Ereignisse von einer oder mehreren ED-Anlagen detektiert. Das wichtigste Beispiel ist der Brand, welcher von verschiedenen Systemen automatisch detektiert werden kann. Folgende Tabelle zeigt, welches Ereignis von welchen Anlagen detektiert werden kann (Auswahl an ED-Anlagen, variiert von Tunnel zu Tunnel):

Fähigkeit des Tunnels Detektion von:	Linienbrand- melder	Rauchmelder	Sichttrübungs- messung	Verkehrsdaten- erfassung	VTV mit Ereignis- erkennung	Glatteis- warnung
Brand (thermisch oder Rauch)	x	x	(x)		x	
Stau				x	x	
Verlorenes Objekt					x	
Stehendes Fahrzeug					x	
Falschfahrer				(x)	x	
Unfall					x	
Fahrbahnzustand						x

Abb. 12: Redundanzen durch verschiedene ED-Anlagen

Ein Ausfall einer ED-Anlage muss nicht automatisch zum Verlust der Fähigkeit zur Ereignisdetektion führen. Je nach Redundanz bleibt die Fähigkeit erhalten. Wenn beispielsweise der Linienbrandmelder ausfällt bleiben in vielen Tunneln noch weitere Branddetektionssysteme erhalten. Im Gegensatz dazu entfallen bei einem Ausfall der automatischen Videobildauswertung zahlreiche Fähigkeiten wie beispielsweise die Detektion eines verlorenen Objekts oder eines stehenden Fahrzeugs.

5 Detektionsqualität

5.1 Definition

Die Detektionsqualität einer ED-Anlage ergibt sich durch Optimierung folgender Kenngrößen:

1. Falsch positiv (Fehlalarm, Täuschungsalarm¹) = Ein System gibt Alarm, obwohl kein Ereignis vorliegt
2. Falsch negativ (nicht detektiertes Ereignis) = Ein System gibt keinen Alarm, obwohl ein Ereignis vorliegt
3. Detektionsgeschwindigkeit

Die Detektionsqualität ist maximal, wenn sämtliche Ereignisse ohne Fehlalarme in der geforderten Zeit detektiert werden. Dies ist jedoch bei realen Anlagen nicht möglich.

5.2 Fehlalarme vs. nicht detektierte Ereignisse

Die Fehlalarmrate und die Rate der nicht detektierten Ereignisse verhalten sich gegenläufig. Wird die Fehlalarmrate minimiert steigt die Zahl der nicht detektierten Ereignisse, da zu diesem Zweck die Anlage weniger sensitiv eingestellt werden muss. Folgende Tabelle illustriert diesen Sachverhalt:

Kriterium	Sensitive Anlagen	Unsensitive Anlagen
Falsch positiv (Fehlalarm)	hoch	tief
Falsch negativ (nicht detektiertes Ereignis)	tief	hoch
Spät erkannte Ereignisse	tief	hoch
Risiken	Abstumpfung Betriebspersonal durch hohe Fehlalarmrate, blinde Quittierung von Alarmen Abschalten von Anlagen wenn Sensitivität nicht entsprechend eingestellt werden kann	Ereignisse werden nicht oder zu spät detektiert, Massnahmen werden nicht oder zu spät eingeleitet Schadensausmass durch verspätetes Handeln erhöht
Akzeptanz bei Quittierung von Alarmen vor Ort (Aufwand relativ hoch)	tief	hoch
Akzeptanz bei Quittierung von Alarmen per Knopfdruck in Leitstelle oder BZ	mittel	hoch

Abb. 13: Fehlalarme vs. nicht detektierte Ereignisse

Der Entscheid bezüglich sensitiv-unsensitiv wird durch die Art der Alarmverifikation mitbestimmt. Müssen Brandalarme vor Ort quittiert werden, wird ein Alarmwert aus betrieblichen Gründen eher unsensitiv eingestellt. Ist eine Quittierung per Knopfdruck aus der Leitstelle möglich, so ist die Akzeptanz bezüglich Fehlalarmen höher.

Bei sehr seltenen Ereignissen besteht unabhängig von der Detektionsqualität ein erhöhtes Risiko für fehlerhaftes Ereignismanagement. Als Massnahme dagegen ist das Management von sehr seltenen Ereignissen in den Schulungen des Betriebs- und Leitstellenpersonals periodisch zu üben.

¹ Der Begriff "Täuschungsalarm" wird in der Brandmeldetechnik verwendet und meint Alarme, bei denen der Brandmelder korrekt meldete, jedoch kein Feuer vorlag (z.B. Wärmequelle bei Bauarbeiten, Rauchproduktion bei Schweissarbeiten)

5.3 Optimierung der Detektionsqualität

Die Detektionsqualität unterliegt in der Praxis einem Optimierungsprozess. Wenn alle Ereignisse schnell detektiert werden sollen, so steigt tendenziell die Fehlalarmrate. Dies kann beim Leitstellenpersonal zu Problemen führen. Folgende Aussagen beziehen sich primär auf Erfahrungen aus der Videodetektion:

- Für eine schnelle Detektion aller Ereignisse müssten die Systeme in der Regel sehr sensitiv eingestellt werden.
- Dies hat tendenziell eine Erhöhung der Fehlalarmrate zur Folge.
- Die erhöhte Fehlalarmrate kann zu unachtsamen Quittierungen von Alarmen führen (Faktor Mensch).
- Die Wahrscheinlichkeit, ein echtes Ereignis nicht sachgerecht zu bewältigen, steigt somit.

Fazit: Das Ziel, 100% der Ereignisse sachgerecht zu bewältigen, kann durch sensitive Systeme allein nicht erreicht werden. Dennoch sind sensitive Systeme von grosser Wichtigkeit, da Ereignisse sonst zu spät oder gar nicht detektiert werden. Wichtig ist der Faktor Mensch. Die Technik muss eine gute und einfache Verifikation von Alarmmeldungen ermöglichen. Zudem ist bei der Planung von Verkehrsleitzentralen darauf zu achten, dass das Personal nicht durch Reizüberflutung belastet wird. Wenn zum Beispiel jeder Alarm mit einem akustischen Signal verbunden ist, so kann eine hohe Fehlalarmrate für das Leitstellenpersonal zur Belastung werden. Im Falle einer diskreten und gut verifizierbaren Meldung werden auch hohe Fehlalarmraten toleriert und sensitive Systeme können seriös betrieben werden. Dies ist bei der Planung von Leitstellen zu berücksichtigen.

5.4 Praxiserfahrungen Fehlalarme

Durch Gespräche mit Herstellern und Betreibern von ED-Anlagen konnte die Problematik bezüglich Fehlalarme/Täuschungsalarme behandelt werden. Folgende Tabelle fasst die Erkenntnisse zusammen:

ED-Anlage	Fehlalarme/Täuschungsalarme
Linienbrandmelder	Bei Stau oder langsamem Verkehr kann es aufgrund von heissen Abgasen von LKWs (Auspuffrohre vertikal) zu Täuschungsalarmen kommen. Dies kann auch bei LKWs mit heisser Ladung (z.B. Bitumen) vorkommen. Bei älteren Modellen optischer Linienbrandmelder konnte es durch Wind-einfluss zu Fehlalarmen kommen.
Rauchmelder	Bei Geräten ohne Heizung kann es durch Nebel oder Sprühnebel zu Fehlalarmen kommen. Russende stehende LKWs können Täuschungsalarme auslösen Turboladerschaden oder geplatzter Reifen führt ebenfalls zu Partikelemissionen, welche einen Täuschungsalarm verursachen können
Sichttrübungsmessung	Analog zu Rauchmelder
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	Generell ist die Ereignisdetektion mittels Videobildanalyse anfällig auf Störgrössen Die Rauchdetektion wird oft durch Nebelbildung in Portalnähe gestört, daher wird Rauch bei den Portalkameras oft nicht detektiert Fehlalarme für stehende Fahrzeuge oder Objekte auf der Fahrbahn können durch Reflexionen ausgelöst werden Der Modus „Falschfahrer“ funktioniert in der Regel verlässlich

Abb. 14: Praxiserfahrungen ED-Anlagen

5.5 Detektionszeit

Die Detektionszeit ist die Zeit zwischen Ereignisbeginn bis zur Abgabe des Alarmsignals. Sie ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal für eine ED-Anlage. Betreiber suchen schnelle und sogleich verlässliche ED-Anlagen. Die Faktoren Schnelligkeit und Verlässlichkeit sind in der Praxis jedoch meist gegenläufig.

Beispiel Linienbrandmelder (optisch)

Bei einem Linienbrandmelder, welcher nach dem optischen Prinzip funktioniert, werden mit dem Ziel die Fehlalarmrate zu minimieren in der Regel zwei Messzyklen à je 14 Sek. durchlaufen bevor ggf. ein Alarm ausgegeben wird. Verzichtet man auf den zweiten Messzyklus verkürzt sich die Detektionszeit auf Kosten der Fehlalarmrate.

5.5.1 Detektionszeit bei Linienbrandmelder

Die Detektionszeit der thermischen Linienbrandmelder hängt im Wesentlichen von der Entwicklung des Brandes ab. Schnell anlaufende Brände werden entsprechend früher detektiert, da der Temperaturanstieg beim Brandmeldekabel schneller den Alarmwert überschreitet. Folgende Grafik^{xii} zeigt die Entwicklung der Brandleistung für verschiedene simulierte LKW-Brände:

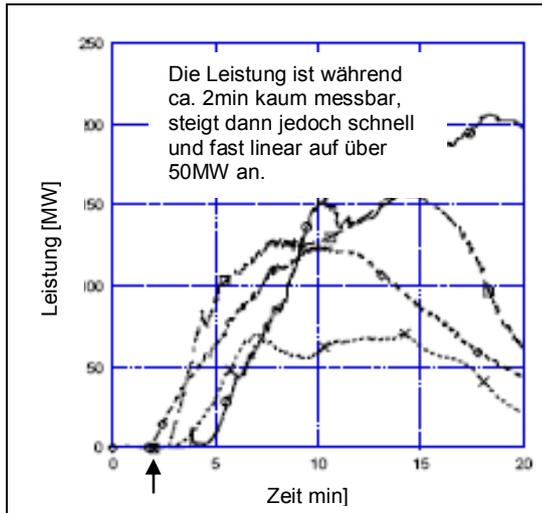


Abb. 15: Zeitliche Entwicklung der Brandleistung

Die Zeit bis zum Erreichen der Alarmbedingungen hängt von der Art und der Menge der brennenden Stoffe ab. Ein weiterer Faktor, welcher die Temperaturverhältnisse beeinflusst, ist die Luftlängsgeschwindigkeit im Tunnel. In der Regel verlängert sich die Detektionszeit mit steigender Luftlängsgeschwindigkeit. Folgende Tabelle^{xiii} zeigt die Detektionszeiten für zwei verschiedene Linienbrandmelder bei unterschiedlichen Brandleistungen und Luftlängsgeschwindigkeiten:

Feuer Nr.	Feuerleistung, Luftlängsgeschwindigkeit	Detektionszeit [min:sek] Linienbrandmelder	
		Typ A	Typ B
1	0.1 MW, 1.1-1.2m/s	1:26	1:23
2	0.1 MW, 1.6m/s	2:24	2:30
3	0.5 MW, 1.1-1.2m/s	1:27	0:53
4	0.5 MW, 1.6m/s	1:07	1:12
5	1.0 MW, 1.1-1.2m/s	0:33	0:25
6	1.0 MW, 1.6m/s	0:38	0:34
7	3.0 MW, 1.8m/s	0:31	0:25
8	Brand PW, 1.5-1.6m/s	3:19	2:53

Abb. 16: Detektionszeiten Linienbrandmelder

Die Feuer 1-7 waren offene Flüssigkeitsfeuer (Heptan). Feuer 8 war ein PW. Der Brand wurde auf dem Fahrersitz entfacht (Türen geschlossen, Fenster leicht geöffnet).

- Beim kleinsten Feuer ist der Effekt der Luftlängsgeschwindigkeit an meisten ausgeprägt, die Erhöhung verlängert die Detektionszeit um ca. 1 Minute.
- Für die grösseren Feuer ist der Effekt der Luftlängsgeschwindigkeit nicht mehr ausgeprägt.
- Bei den kleinen Feuern (bis 0.5MW) ist die Detektionszeit meist grösser als 1 Minute.
- Die Detektionszeiten sind für Feuer von 1MW und 3MW unabhängig von der Luftlängsgeschwindigkeit deutlich unter 1 Minute.
- Der PKW-Brand wird verhältnismässig spät detektiert, dies ist jedoch mit der eher langsamen Brandentwicklung zu erklären.

In einer anderen Studie wurden 3 Linienbrandmelder mit verschiedenen Flüssigkeitsfeuern (20 Liter, 2m²/4m², Benzin, Diesel, Heptan) getestet. Die Detektionszeiten lagen in 14 von 18 Fällen unter 60 Sekunden.

5.5.2 Detektionszeit bei Rauchmeldern

Die Detektionszeit eines Rauchmelders verkürzt sich mit zunehmender Rauchgasproduktion und Luftlängsgeschwindigkeit. Folgende Tabelle² zeigt die Detektionszeiten für einen Rauchmeldertyp (62.5m und 125m vom Brand entfernt) bei unterschiedlichen Brandleistungen und Luftlängsgeschwindigkeiten:

Feuer Nr.	Feuerleistung, Luftlängsgeschwindigkeit	Detektionszeit [min:sek] Rauchmelder	
		62.5m	125m
1	0.1 MW, 1.1-1.2m/s	6:34	8:20
2	0.1 MW, 1.6m/s	2:13	2:54
3	0.5 MW, 1.1-1.2m/s	2:28	3:35
4	0.5 MW, 1.6m/s	2:56	3:52
5	1.0 MW, 1.1-1.2m/s	1:33	2:26
6	1.0 MW, 1.6m/s	1:34	2:14
7	3.0 MW, 1.8m/s	0:55	1:35
8	Brand PW, 1.5-1.6m/s	1:23	1:59

Abb. 17: Detektionszeit Rauchmelder

Es handelt sich um die gleichen Testfeuer wie unter 5.5.1 beschrieben. Die Heptanfeuer (1-7) produzieren wenig Rauch. Entsprechend steigen die Detektionszeiten des Rauchmelders. Es zeigt sich aber, dass der Rauchmelder den realitätsnahen PW-Brand (8) schneller detektiert als die Linienbrandmelder. Die in der Richtlinie ASTRA 13004 geforderte Detektionszeit von einer Minute konnte jedoch nicht eingehalten werden.

5.5.3 Detektionszeit CO-Messung

Die CO-Messung wurde mit verschiedenen Flüssigkeitsfeuern (20 Liter, 2m²/4m², Benzin, Diesel, Heptan) getestet. Die Detektionszeiten lagen bei ca. 100 Sekunden⁴. Für die Branddetektion ist die CO-Messung daher höchstens ergänzend einzusetzen.

5.5.4 Ziel Detektionszeit 1 Minute

Die in der Richtlinie ASTRA 13004 geforderte Detektionszeit von einer Minute erscheint auf Basis der gemachten Betrachtungen als harte Vorgabe. Viele Brände produzieren innerhalb einer Minute noch nicht genug Wärme bzw. Rauch um von den gängigen Branddetektionsanlagen detektiert zu werden. Bei den Rauchmeldern muss der Rauch zudem die Distanz zum nächsten Melder zurücklegen. Diese Distanz kann im schlechtesten Fall 100m betragen, was bei einer Luftlängsgeschwindigkeit von 1.5m/s bereits über 1 Minute dauert.

5.6 Verfügbarkeit von ED-Anlagen

5.6.1 Definition

Die Verfügbarkeit ist die Fähigkeit eines Produkts, in einem Zustand zu sein, in dem es unter vorgegebenen Bedingungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während einer vorgegebenen Zeitspanne eine geforderte Funktion erfüllen kann unter der Voraussetzung, dass die geforderten äusseren Hilfsmittel bereitstehen^{xiv}.

Die Verfügbarkeit einer Anlage ist definiert als der Anteil Funktionszeit an der Gesamtzeit. Muss eine Anlage z.B. jedes Jahr für 8 Stunden zu Wartungszwecken abgeschaltet werden und funktioniert für den Rest der Zeit einwandfrei, so weist sie eine Verfügbarkeit von 0.9993 oder 99.93% auf.

In der Praxis kann eine hohe Verfügbarkeit durch folgende Faktoren erreicht werden:

- Qualitätsprodukte einsetzen
- Schneller Austausch, schnelle Wartung
- Erhaltungsmanagement, präventive Wartung

5.6.2 Zielwert Verfügbarkeit ED-Anlagen

Die Richtlinie ASTRA 13004 gibt z.B. für Brandmeldeanlagen vor, dass eine Wartung höchstens einmal pro Jahr erforderlich sein sollte. Wie lange diese Wartungsperiode sein darf wird nicht genannt. Es lässt sich daher kein Zielwert für die Verfügbarkeit ableiten.

5.6.3 Abhängigkeit Verfügbarkeit von Stromversorgung

Die Verfügbarkeit der einzelnen ED-Anlagen ist mit der Verfügbarkeit der Stromversorgung (inkl. USV) verknüpft. Eine funktionierende ED-Anlage bedingt daher das Funktionieren diverser Komponenten der Elektroversorgung.

Die Verfügbarkeit der ED-Anlage ist immer kleiner als die Verfügbarkeit der Stromversorgung (inkl. USV).

5.6.4 Steigerung der Verfügbarkeit bei Linienbrandmeldern

Die Österreichische RVS 09.02.22 fordert:

„Das System ist so aufzubauen, dass bei Auftreten eines Einfach-Fehlers (z.B. Leitungsbruch, Ausfall einer Auswerteeinheit) maximal 1.000 m Überwachungslänge ausfallen.“

Um dieser Anforderung zu genügen, werden sog. Fault Tolerant Netze aufgebaut. Dazu werden getrennte Detektionsabschnitte zu typischerweise 500 m gebildet, welche zwei-seitig überwacht werden können. Bei Ausfall eines Abschnitts bleibt dabei der Rest des Tunnels überwacht.

Eine redundante Kabelverlegung ist ebenfalls ein Mittel zur Verbesserung der Verfügbarkeit. Dabei werden zwei parallele Kabel mit zwei unabhängigen Detektoren installiert. Eine ausreichende räumliche Trennung der Kabel ist erforderlich. Beschädigungen an Linienbrandmeldern können z.B. durch lose LKW-Planen entstehen, welche im Fahrtwind erheblich flattern.

Die Deutsche RABT fordert: "Linienhafte Temperaturfühler sind in mehrere Abschnitte zu unterteilen. Bei Zerstörung eines Abschnitts müssen die anderen funktionsfähig bleiben."

Richtlinie ASTRA 13004 formuliert bezüglich Verfügbarkeit keine Anforderungen.

5.7 Unverfügbarkeit von ED-Anlagen

Wie wird betrieblich auf Ausfälle von ED-Anlagen reagiert? Gibt es Ausfallarten, bei denen der Betriebszustand des Tunnels verändert werden muss?

Die Unverfügbarkeit einer ED-Anlage hat eine Risikoerhöhung für den Tunnelnutzer zur Folge. Diese Risikoerhöhung resultiert meist dadurch, dass bei Unverfügbarkeit ein Ereignis verzögert bekämpft wird und somit das Schadenspotenzial höher ist. Der Entscheid betreffend Veränderung des Betriebszustands sollte in Abhängigkeit dieser Risikoerhöhung geschehen (diese zu quantifizieren ist jedoch anspruchsvoll). Wird ein Tunnel gesperrt, so hat dies in der Regel Ausweichverkehr mit neuen Risiken zur Folge.

Folgende Annahmen können für einen Entscheid hilfreich sein:

- Ist der Tunnel gesperrt, so wird er auf einer meist längeren Alternativroute umfahren
- Statistisch gesehen ist das Fahren im Tunnel sicherer als auf der offenen Strecke

In der Praxis werden Tunnel höchst selten aufgrund von Unverfügbarkeit von ED-Anlagen geschlossen bzw. nur reduziert befahren. Die Risikoerhöhung aufgrund der Unverfügbarkeit wird also meistens geringer eingestuft als das Risiko, welches durch Umfahrung entstehen würde.

6 Testbarkeit von ED-Anlagen

6.1 Anforderung an Tests von ED-Anlagen

6.1.1 Problematik

Grundsätzlich darf davon ausgegangen werden, dass eine gelieferte und in Betrieb gesetzte Anlage die geforderten Leistungen durch eine Prüfung unter Beweis stellt. Gemäss SIA 118 entspricht dies der notwendigen gemeinsamen Prüfung, welche die Basis der Abnahme des Werkes bildet. Damit geprüft werden kann, ist eine genehmigte Prüfspezifikation erforderlich, welche bereits Bestandteil des Werkvertrages sein sollte.

In der Schweizerischen Praxis wird aber häufig festgestellt, dass keine Prüfspezifikationen vorliegen, und eine erfolgreiche Inbetriebsetzung ohne wesentliche Mängel als ausreichend erachtet wird. Mittels definierter Testverfahren ist jedoch sicherzustellen, dass die ED-Anlagen die geforderte Funktion erfüllen. Damit soll sichergestellt werden, dass das geplante Risiko-Senkungs-Potenzial auch erreicht wird.

Die Anforderung an reproduzierbare Tests ist auch im Hinblick auf wiederkehrende Überprüfung der Systemfunktion sinnvoll und notwendig. Allerdings sind echte Testszenarien schwierig und aufwendig; es kann deshalb durchaus auf klar definierte, spezielle Tests ausgewichen werden.

6.1.2 Einzeltest, Systemtest

Einzeltests von ED-Anlagen können mit Hilfsmitteln durchgeführt werden, z.B. wird die Wärmeproduktion eines Brandes simuliert. In diesem Fall sind jedoch die Umgebungsbedingungen zu definieren. Das untenstehende Beispiel zeigt eine Testanordnung für ein Brandmeldekabel, welche reproduzierbare Tests erlaubt.

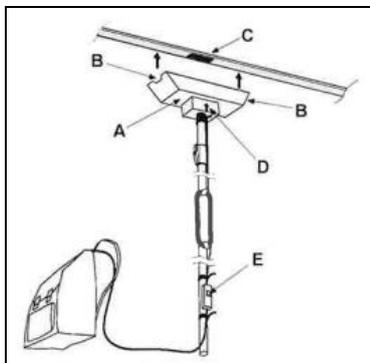


Abb. 18: Testeinrichtung für ein Brandmeldekabel (Securiton)

Die Testvorschrift muss sicherstellen, dass die Tests reproduzierbar sind. Im obigen Fall ist durch das Testgerät auch gewährleistet, dass Luftlängsgeschwindigkeiten im Tunnel das Ergebnis nicht beeinflussen.

6.1.3 Integraler Test

Ein einzelner Systemtest einer ED-Anlage stellt noch nicht sicher, dass die ganze Wirkungskette funktioniert. Weitere Anlagen sind Kommunikationssysteme und Steuerungen und Leitsysteme. Die korrekte Auslösung eines Lüftungs-Brandprogrammes ist beispielsweise eine zentrale Funktion bei Brandalarmen. Es sind folglich integrale Tests notwendig, um die durchgängige Funktion zu überprüfen.^{xv}

Quelle Aktion		Energieversorgung		Überwachungsanlagen							Kommunikation & Leittechnik		Neben- einrich- tungen	
		Normalnetzausfall	USV-Ausfall	Brand-dete- ktion thermisch Voralam	Brand- dete- ktion thermisch Hauptalam	Brand- dete- ktion Rauch bewegt	Brand- dete- ktion Rauch stationär	ED Stehendes Fahrzeug	ED Falschfah- rer	ED Stau	Notausgang- stüre	Notruftelefo- n-Anruf		Entnahme Feuerlösch- er
Beleuchtung	Durchfahrtsbeleuchtung			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
	Brandnotbeleuchtung				2		2							
	Sicherheitsstellenbeleuchtung			2	2	2	2				2	2	2	2
	Optische Leiteinrichtung				2		2							
	Fluchtweg- und Blitzleuchten				2		2							
Lüftung	Abluft-Ventilatoren				1		1			2				
	Strahl-Ventilatoren				1		1			2				
	Rauchklappen				1		1							
	Überdrucklüftung Sicherheitsstellen			1	1	1	1				2	2	2	2

Abb. 21: Ausschnitt aus Reflexmatrix im Fachhandbuch ASTRA, die Ziffer "1" bedeutet redundante, die "2" einfache Ereignisübertragung

Allen Reflexmatrizen gemeinsam ist die Absicht, die Verknüpfungen zwischen den Anlagen graphisch und übersichtlich darzustellen, damit daraus Testpläne abgeleitet werden können. Die Reflexe müssen mit den Beteiligten – Polizei/Leitzentrale, Betreiber/Gebietseinheit und ASTRA – abgestimmt und genehmigt werden.

Die ED-Anlage kann ihren Zweck nur erfüllen, wenn die integralen Tests auf Basis der Reflexmatrix durchgeführt werden, was noch nicht durchgängig üblich ist. Es ist allerdings beabsichtigt, regelmässig auf allen Nationalstrassenabschnitten Testprogramme durchzuführen.

Die Nichtverfügbarkeit oder der Ausfall einer ED-Anlage wird in der Reflexmatrix nicht erfasst. Dies ist begründbar durch die intrinsische Redundanz derartiger Systeme. Trotzdem erachten wir diese Ereignisse als relevant für die Reflexmatrix. Ein Ausfall eines derartigen Systems wird zurzeit auch immer direkt in eine Einsatzleitzentrale gemeldet.

6.1.5 Klasse 1 und Klasse 2-Reflexe

Die Unterscheidung in "Klasse 1"- und "Klasse 2"-Reflexe wird teilweise verwendet und leitet sich aus der Unterscheidung *redundante* oder *einfache, nicht redundante* Übertragung der Ereignisse ab. Redundanz, beispielsweise durch eine drahtgebundene Übertragung mit zusätzlicher LAN-Übermittlung soll eine höhere Ernstfallverfügbarkeit des Reflexes sicherstellen.

Die Unterscheidung ist auf den ersten Blick nachvollziehbar: Schaltbefehle an Ventilatoren oder Rauchklappen sind Klasse 1; Befehle an die optische Leiteinrichtung, oder 100%-Hochschaltung der Beleuchtung sind Klasse 2. Die Redundanz ist jedoch nur bezogen auf die *Kommunikation* der Ereignisse, was nur einen Teil der "Wirkungskette" umfasst. Es ist daher im Einzelfall zu überprüfen, ob auch die Systeme selbst (Feldebene), die zugehörigen Steuerungen (Prozessleitebene) und die übergeordnete Steuerung (Leitebene) dem gleichen Anspruch bez. Redundanz genügen. Dies ist in vielen Objekten durchaus der Fall.

6.1.6 Fazit Reflexmatrix und integraler Test

Die Reflexmatrizen aus dem Kanton Zürich und vom ASTRA sind brauchbare und geeignete Grundlagen für integrale Tests und die damit verbundene Prüfung der ED-Anlage. Aussagen über die Qualität und das Risikosenkungspotenzial der Systeme können jedoch nur gemacht werden, wenn die Tests auch durchgeführt werden, und die ED-Anlagen mittels reproduzierbarer Verfahren getestet werden.

Folgende Prüfungen sind durchzuführen:

- Prüfung von elektronischen Selbsttests (sofern vorhanden)
- Prüfung der ED-Anlage mittels Testeinrichtung
- Prüfung der gesamten Wirkungskette mittels integralem Test
- Beachtung der Zulässigkeits-Kriterien für Stichprobentests
- Prüfung der Klasse 1- und Klasse 2-Kriterien
- Umfassende Dokumentation der Tests inkl. Massnahmen bei Bedarf

Unter Beachtung obiger Punkte kann ein aussagekräftiger integraler Test durchgeführt werden und damit eine Aussage zur anforderungsgerechten Funktion der ED-Anlage gemacht werden.

6.2 Tests für Brandmeldeanlagen

6.2.1 Übersicht

Brandmeldeanlagen nehmen eine besondere Bedeutung unter den ED-Anlagen des Tunnels ein – und werden im Folgenden speziell betrachtet.

ED-Anlage	Test	Bemerkung	Grundlage
Linienbrandmelder	Heissluftgebläse	Kabel wird mit Heissluftgebläse direkt erwärmt	Richtlinie ASTRA 13004 (Branddetektion) macht keine Angaben zu Tests
	Halogenstrahler	Kabel wird mit Halogenstrahler direkt erwärmt	Die hier aufgeführten Tests sind Usanzen der Unternehmer, Testfeuer werden auf Wunsch Bauherr durchgeführt
	Testfeuer	-	
Rauchmelder	Streuelement	Das Streuelement wird direkt in den Strahlengang des Melders gehalten	
	Rauchendes Feuer	-	
	Rauchmaschine Feuerwehr	-	
	Rauchpetarde	-	
Branderkennung mittels Bildanalyse	Paraffinnebel	Im Werk	Q-Anforderung Unternehmer
	Diffusor	Diffusor, welcher die Konturen des Bildes trübt, wird vor die Kamera gehalten	Richtlinie ASTRA 13005 (Verkehrsfernsehen) nennt lediglich mögliche Testanordnungen
	Rauchendes Feuer	-	
	Rauchmaschine Feuerwehr	-	
	Rauchpetarde	-	

Abb. 22: Tests für Brandmeldeanlagen

6.2.2 Testfeuer und Detektionszeiten

6.2.2.1 Schweiz (Richtlinie ASTRA 13004)

Keine Angaben über Testfeuer.

6.2.2.2 Schweiz (Unternehmer)

Luftlängs- geschwindigkeit	Branddetektion		Brandlast
	Voralarm	Alarm	
bis 3 m/s	Kein Alarm		1 x 1 m ² mit 5 Liter Methanol (CH ₃ OH) Nominelle Brandleistung: ca. 1.0 MW
bis 3 m/s (Rauch)		60s	2 x 1 m ² mit je 5 Liter Normalbenzin Nominelle Brandleistung: ca. 5.0 MW*
bis 3m/s (wenig Rauch)		60s	4 x 1 m ² mit je 5 Liter Methylated Spirit (90% Ethanol / 10% Methanol) Nominelle Brandleistung: ca. 5.0 MW

Abb. 23: Testfeuer und Detektionszeiten Schweiz

*: in der RABT ist die Fläche sowie die Brennstoffmenge doppelt so gross, die Brandleistung jedoch auch auf 5 MW angegeben.

6.2.2.3 Österreich (RVS 09.02.22)

Luftlängs- geschwindigkeit	Branddetektion		Brandlast
	Voralarm	Alarm	
bis 3 m/s	60s	90s	2 x 1 m ² mit je 10 Liter Spirituspool-Feuer (C ₂ H ₅ OH) Nominelle Brandleistung: ca. 1,5 MW
≥3 m/s	120s	150s	2 x 1 m ² Dieselpool-Feuer mit je 10 Liter Die- sel und je 5 Liter Benzin Nominelle Brandleistung: ca. 3,5 MW

Abb. 24: Testfeuer und Detektionszeiten Österreich

6.2.2.4 Deutschland (RABT)

Luftlängs- geschwindigkeit	Branddetektion		Brandlast
	Voralarm	Alarm	
bis 6 m/s	-	60s	4 m ² mit total 20 Liter Benzin Nominelle Brandleistung: ca. 5.0 MW

Abb. 25: Testfeuer und Detektionszeit Deutschland

6.2.2.5 PIARC

Im Auftrag des Tunnelkomitees C4 der World Road Association PIARC wird voraussichtlich 2011 ein Report über „Design Fires“ veröffentlicht. Darin werden verschiedene Ansätze zur Festlegung der Testfeuer diskutiert, insbesondere auch die beiden Ansätze „performance-based“ (in Abhängigkeit des Tunnels, entspricht im Prinzip einem risikobasierten Ansatz) oder „prescriptive“, was einer definierten, objektunabhängigen Vorgabe entspricht. Der letztere Ansatz wird von den meisten europäischen Ländern bevorzugt.

6.2.2.6 Vorschlag Testdefinition

Folgende Parameter sollten für einen Test der Detektionszeit bei Linienbrandmeldern definiert sein

- Luftlängsgeschwindigkeit
- Fläche Wanne(n)
- Menge und Art Brennstoff(e)
- Temperatur Wanne inkl. Brennstoff
- Start der Zeitmessung = Anzündzeitpunkt

6.3 Statistische Betrachtung

6.3.1 Attributiver Test

Die sogenannten attributiven Tests lassen sich gut unter dem Überbegriff „Detektortest“ verstehen. Die Eigenheit von attributiven Testverfahren besteht darin, dass das Testergebnis im Gegensatz zu einer physikalischen Messgrösse ein Attribut wie z.B. „Erfolg“ bzw. „Misserfolg“ darstellt. Beispiele für Anlagen, welche mit attributiven Tests getestet werden, sind:

- Iris-Scan bei Zutrittskontrolle
- Metalldetektor
- Kamera zur Ereignisdetektion

Die statistische Grundlage für die attributiven Tests bildet die sog. Beta-Verteilung. Es handelt sich dabei um eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung mit komplexem mathematischem Hintergrund. Die Berechnungen erfolgen mittels Statistikprogrammen, da eine händische Rechnung wegen der nötigen approximativen Verfahren zur Lösung von Integralen kaum möglich ist.

Folgende Tabelle zeigt unterschiedliche Testserien und das dazugehörige 95%-Konfidenzintervall für die Detektionsrate (Bereich, in welchem sich die Detektionsrate mit 95% Sicherheit befindet):

	Testserie 1	Testserie 2	Testserie 3
Anzahl Tests	5	10	50
Anzahl erfolgreiche Detektionen	4	8	40
Vermutete Detektionsrate	80%	80%	80%
95%-Konfidenzintervall	Untere Grenze	28%	44%
	Obere Grenze	99%	97%
			66%
			90%

Abb. 26: Testserien und Konfidenzintervalle

Das 95%-Konfidenzintervall verengt sich mit zunehmendem Testumfang, bleibt aber auch bei umfänglichen Tests relativ breit. Wird ein Detektor z.B. 50 mal getestet wobei 40 erfolgreiche Detektionen zu verzeichnen sind, so liegt die wahre Detektionsrate mit 95% Sicherheit im Bereich von 66-90%. Dabei ist die untere Grenze des Konfidenzintervalls als Qualitätsmerkmal für eine Detektionsanlage zu verstehen.

6.3.2 Test gegen Vergleichswert

Durch wiederholtes Messen eines physikalischen Parameters lässt sich eine statistisch abgesicherte Aussage über das Einhalten eines Soll- bez. Grenzwerts machen. Beispiele für solche Tests können sein:

- Einhalten einer Vorgabe, z.B. Detektionszeit oder Messgenauigkeit eines Geräts
- Einhalten eines Grenzwerts (Umweltqualität)

Das verwendete Testverfahren ist der sog. einseitige Einstichproben T-Test und läuft nach folgendem Muster ab:

1. Vorgabe definieren
2. Nullhypothese formulieren
3. Messungen durchführen, Mittelwert und Standardabweichung berechnen
4. Prüfgrösse berechnen
5. Vergleichswert aus T-Verteilung ermitteln
6. Vergleich
7. Entscheid bezüglich der Nullhypothese fällen

Es soll untersucht werden, ob ein Linienmelder die Vorgabe „Detektionszeit kleiner 60 Sekunden“ einzuhalten vermag. Zu diesem Zweck wird die Detektionszeit 10-mal gemessen und mit der Vorgabe verglichen. Folgende Abbildung zeigt den Ablauf des Tests:

1. Schritt	Anforderung (μ)	60 s
	Test:	Ist die Detektionszeit signifikant unter der Vorgabe?
2. Schritt	Nullhypothese:	Die Detektionszeit ist kleiner/gleich der Vorgabe
3. Schritt	Alternative:	Die Detektionszeit ist grösser als die Vorgabe
	1-Stichproben T-Test einseitig	
	1. Messung	57 s
	2. Messung	59 s
	3. Messung	61 s
	4. Messung	54 s
	5. Messung	54 s
	6. Messung	60 s
	7. Messung	65 s
	8. Messung	60 s
	9. Messung	61 s
	10. Messung	64 s
	Mittelwert (m):	59.5 s
	Stabw. (s):	3.7 s
	Anzahl Messungen n	10
4. Schritt	Prüfgrösse t	-0.429
	$t = \frac{\sqrt{n}(m - \mu)}{s}$	
5. Schritt	T(95%, 9 FH)	1.833 (Aus Tabelle der T-Verteilung)
6. Schritt	Wenn $t > T$	Nullhypothese verwerfen
7. Schritt	Entscheid:	Nullhypothese annehmen

Abb. 27: Rechenbeispiel Test gegen Vergleichswert

Bemerkung:

Der Vergleichswert T ist in der Tabelle der T-Verteilung für verschiedene Konfidenzintervalle und Freiheitsgrade aufgeführt (Anhang). Die Freiheitsgrade (FG) sind beim einseitigen Einstichproben T-Test immer $n-1$. Gemäss statistischer Konvention wird meist das 95%-Konfidenzintervall verwendet.

6.3.3 Stichprobentest

Die den Stichprobentests zugrundeliegende Statistik ist die Binomialverteilung. Stichprobentests sind im Hinblick auf einen reduzierten Testaufwand eine Option. Aufgrund der gemachten Analyse einer Stichprobe wird auf die Qualität der Gesamtheit geschlossen. Die Sicherheit, mit der man diese Aussage treffen kann, hängt von der Grösse der Gesamtheit der Elemente, der wahren Fehlerrate sowie dem Stichprobenumfang ab. Im Folgenden wird dargelegt, dass die Aussagekraft von Stichprobentests sehr beschränkt ist und diese gerade für ED-Anlagen nicht geeignet sind.

6.3.3.1 Beispiel Notrufsäulen

In einem Tunnel gibt es 20 Notrufsäulen, welche mittels einer Stichprobe von 3 getestet werden sollen. Man setzt sich zum Grundsatz, dass wenn die Stichprobe fehlerfrei ist, keine weiteren Tests gemacht werden. In diesem Fall geht man also davon aus, dass die Gesamtheit ebenfalls fehlerfrei funktioniert. Findet man eine oder mehr fehlerhafte Säulen, so testet man sämtliche Säulen.

Folgende Tabelle zeigt die Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Beobachtungen beim beschriebenen Stichprobentest (rot die Irrtumswahrscheinlichkeiten):

Anzahl Elemente total	Anzahl fehlerhafte Elemente	Stichprobenumfang	Anzahl fehlerhafte Elemente in Stichprobe	Wahrscheinlichkeit der Beobachtung
20	1	3	0	0.857
20	1	3	1	0.143
20	2	3	0	0.729
20	2	3	1	0.243
20	2	3	2	0.028
20	3	3	0	0.614
20	3	3	1	0.325
20	3	3	2	0.057
20	3	3	3	0.003
20	3	10	0	0.197

Abb. 28: Problematik von Stichprobentests. Die rot markierten Felder zeigen die Irrtumswahrscheinlichkeiten bei den jeweiligen Tests

Hat man in Wahrheit unter den 20 Notrufsäulen eine fehlerhafte Säule, so findet man diese mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.857 nicht in einer 3er-Stichprobe. Die Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt also 85.7%. Wenn zwei fehlerhafte Säulen vorhanden sind, irrt man sich mit demselben Test in 72.9% der Fälle. Bei drei fehlerhaften Säulen beträgt die Irrtumswahrscheinlichkeit 61.4%.

Der Nutzen (weniger Aufwand beim Testen) lässt sich aufgrund der hohen Irrtumswahrscheinlichkeit nicht rechtfertigen. Auch bei einer 10er Stichprobe liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit bei drei fehlerhaften Säulen noch bei 19.7%.

6.3.3.2 Beispiel Brandmeldekabel mit Sensorchips

Ein Brandmeldekabel mit Sensorchips soll stichprobenartig getestet werden. Man setzt sich zum Grundsatz, dass wenn die Stichprobe fehlerfrei ist, keine weiteren Tests gemacht werden. In diesem Fall geht man also davon aus, dass die Gesamtheit ebenfalls fehlerfrei funktioniert. Sobald man einen fehlerhaften Chip findet, testet man sämtliche Chips.

Folgende Tabelle zeigt die Irrtumswahrscheinlichkeiten für verschiedene Stichprobenumfänge bei total 100 Chips, darunter 5 fehlerhafte:

Stichprobenumfang	Irrtumswahrscheinlichkeit
10	0.599
20	0.358
30	0.215
40	0.129
50	0.077
60	0.046

Abb. 29: Irrtumswahrscheinlichkeiten bei verschiedenen Stichprobenumfängen (immer für 100 Chips, davon 5 fehlerhaft)

Die Irrtumswahrscheinlichkeit (Wahrscheinlichkeit kein fehlerhaftes Element in der Stichprobe zu finden) sinkt mit zunehmender Stichprobengrösse. Es stellt sich für den Tester die Frage nach der Akzeptanz bezüglich des Irrtums.

Folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen der Anzahl Elemente total und der Irrtumswahrscheinlichkeit bei gleichbleibender Fehlerrate (10%) und relativer Stichprobengrösse (10%):

Anzahl Elemente total	Anzahl fehlerhafte Elemente absolut	Stichprobenumfang absolut	Anzahl fehlerhafte Elemente in Stichprobe	Irrtumswahrscheinlichkeit
10	1	1	0	0.900
50	5	5	0	0.590
100	10	10	0	0.349
300	30	30	0	0.042
500	50	50	0	0.005
1000	100	100	0	0.000027

Abb. 30: Abnehmende Irrtumswahrscheinlichkeit bei zunehmender Anzahl Elemente, konstanter Fehlerrate (10%) sowie konstanter relativer Stichprobengrösse (10%)

Die Irrtumswahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmender Anzahl Elemente total bei gleicher Fehlerrate und gleicher relativer Stichprobengrösse ab. Die Irrtumswahrscheinlichkeit sollte kleiner als 5% sein (95% Konfidenzintervall). Bei einem Stichprobenumfang von 10% und einer Fehlerrate von ebenfalls 10% fällt die Irrtumswahrscheinlichkeit unter 5% wenn sich die Gesamtheit der Elemente in der Grössenordnung von 300 bewegt. Beispiel: Ein Tunnel mit 2km Länge enthält rund 300 Chips. Wenn man davon 30 Chips stichprobenartig testet und keine fehlerhaften Chips findet, darf man davon ausgehen, dass die Fehlerrate kleiner als 10% ist.

Im Bereich der Tunneltests gibt es ansonsten für Stichprobentests kaum Anwendungen, da die Gesamtheit der Elemente nicht im Bereich von 300 liegt und die Fehlerrate erfahrungsgemäss tief (<5%) ist.

7 Risikoreduktion durch ED-Anlagen

7.1 Generelle Bemerkung

Ereignisdetektionsanlagen in Tunneln werden in der Regel aus folgenden Gründen installiert und unterhalten:

- Risikoreduktion für die Verkehrsteilnehmer
- Schutz des Bauwerks
- Sicherung der Verfügbarkeit

ED-Anlagen haben wie andere Elemente der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung zum Ziel, negative Effekte auf Mensch und Bauwerk zu minimieren. Sie können das Risiko nur im Zusammenwirken mit anderen BSA (z.B. Lüftung) reduzieren.

Das Risiko im Strassentunnel wird bei den gängigen Methoden in Toten pro Jahr bezogen auf den ganzen Tunnel angegeben^{xvi}. Die Kosten, welche bei Ereignissen am Bauwerk entstehen oder durch Tunnelsperrung nach einem Ereignis anfallen, werden in der Regel nicht einbezogen. Diese Schäden können je nach Objekt und Ereignis sehr gross werden. Im Folgenden wird der Effekt von ED-Anlagen auf das Risiko für die Verkehrsteilnehmer abgeschätzt (keine Betrachtung von Schäden am Bauwerk/Verfügbarkeit).

7.2 Risikoreduktion für Verkehrsteilnehmer

ED-Anlagen sind in Anschaffung und Betrieb mit relativ hohen Kosten verbunden. Es stellt sich die Frage, welchen Beitrag zur Risikoreduktion die einzelnen ED-Anlagen leisten.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von ED-Anlagen ist eine detaillierte Betrachtung der möglichen Schadensszenarien im Strassentunnel nötig. Mittels einer Ereignisbaumanalyse (Event Tree Analysis) kann der Effekt der einzelnen ED-Anlagen auf die Risikosituation des Tunnels abgeschätzt werden. Es handelt sich dabei um eine semi-quantitative Methode für den relativen Vergleich der ED-Anlagen.

Eine Massnahme zur Risikoreduktion kann auf die Eintretenswahrscheinlichkeit oder auf das Schadenspotenzial oder auf beide Parameter des Risikos wirken. Eine ED-Anlage kann die Unfallrate verringern oder das Schadensausmass bei Unfällen (mit oder ohne Brandfolgen) minimieren oder auf beide Parameter einwirken. Im Folgenden wird die Risikoreduktion für die typischen ED-Anlagen abgeschätzt.

7.2.1 Menschliches Verhalten – Reaktionszeit im Brandfall

Werden ED-Anlagen im Hinblick auf ihre Risikoreduktion für Verkehrsteilnehmer untersucht, so sind wahrnehmungspsychologische Aspekte der Alarmierung in die Betrachtungen mit einzubeziehen. Dabei steht die Reduktion des Schadensausmasses bei einem Brand im Vordergrund. Das Grundproblem ist, dass die Verkehrsteilnehmer im Brandfall zu lange in ihren Fahrzeugen verharren (lange Reaktionszeit). Eine ED-Anlage kann den Personenschaden im Brandfall minimieren, wenn die Detektion in geeigneter Form und Qualität an die Verkehrsteilnehmer weitergeleitet und so die Reaktionszeit verkürzt wird.

Bei einem Brand im Tunnel bildet sich in der Regel ein Stau. Ein Ereignis wahrzunehmen ist in dieser Situation schwierig, da hohe Fahrzeuge die Sicht blockieren können. Wenn eine Person das Radio ausgeschaltet hat, wird sie erst durch andere Flüchtende zur Flucht bewegt oder fällt den Entscheid aufgrund der Wahrnehmung von Rauch.

Folgende Tabelle zeigt die vom Verkehrsteilnehmer wahrnehmbaren Tunnelreflexe bei Brand² und enthält eine Einschätzung, ob diese Reflexe für den Verkehrsteilnehmer als Alarmsignal "sofort flüchten!" interpretiert werden können:

Tunnelreflexe bei Brand	Alarmsignal "sofort flüchten"?
Durchfahrtsbeleuchtung 100%	Kein Effekt
Brandnotbeleuchtung	Evtl. geringer Effekt, jedoch nur alle 50m installiert
Sicherheitsstollenbeleuchtung	Kein Effekt, da aus Fahrraum nicht wahrnehmbar
Optische Leiteinrichtung 100%	Kein Effekt, da nicht speziell
Fluchtweg- und Blitzleuchten	Geringer Effekt (auf Personen in der Nähe von Notausgängen)
Tunnel sperren	Kein Effekt, da nur von wenigen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen
Funk, UKW-Einsprechung	Effekt bei den ca. 25% die das Radio eingeschalten haben
In der Schweiz nicht verbreitet	
Beschallungsanlage	Effekt als Alarmsignal
SMS-Meldung	Effekt als Alarmsignal

Abb. 31: Tunnelreflexe und deren Wirkung als Fluchtsignal

Gemäss eigenen Einschätzungen ist der gesamthafte Effekt der auf einen Brandalarm folgenden Reflexe eher gering. Einzig die Radiodurchsagen leisten einen Beitrag zu einer frühzeitigen Entfluchtung (Verkürzung der Reaktionszeit). Die Brandmeldeanlagen haben daher nur einen moderaten Effekt auf den Personenschaden bei Brand. Eine Beschallungsanlage (keine ED-Anlage) kann beim Grossteil der Tunnelnutzer zu einer verkürzten Reaktionszeit beitragen. Beschallungsanlagen für den Fahrraum sind in der Schweiz jedoch nicht üblich bzw. gefordert.

Die Verkehrsteilnehmer verharren im Ereignisfall zu lange in ihren Fahrzeugen^{xvii}. Die meisten Personen haben in einem Strassentunnel noch nie ihr Fahrzeug verlassen. Diese Handlung stellt aus Sicht des Tunnelnutzers ein Wagnis dar, und wird daher hinausgezögert. Zudem wollen viele Tunnelnutzer aus Angst vor materiellem Schaden ihr Auto und ihre darin transportierten Sachen nicht einfach stehen lassen. Sie warten daher so lange, bis das Risiko durch das Ereignis eindeutig hoch ist. Erst dann entschliessen sie sich zur Flucht zu Fuss oder versuchen zu wenden (verboten und riskant). Vielfach sammeln Personen vor der Flucht noch Wertsachen zusammen und verlieren so wertvolle Zeit. Eine sich einstellende Gruppendynamik kann diesen Vorgang entweder beschleunigen (alle begeben sich sofort in Sicherheit) oder aber verzögern (alle räumen zuerst ihr eigenes Fahrzeug leer). Solche Momente der Ungewissheit über das korrekte Verhalten gilt es zu vermeiden.

Die Betroffenen sind über die Krisensituation möglichst schnell zu informieren. Dies bedingt jedoch, dass die Ereignisdetektion genau funktioniert und die Meldung glaubwürdig an die Nutzer weitergeleitet wird. Die klare Benennung der Ursache der Krisensituation sowie die Information über das Ausmass und das angemessene Verhalten fördert eine schnelle Evakuierung. Gemäss Studien und entgegen der allgemeinen Auffassung, ruft die Information über das Krisenausmass keine Massenpanik hervor^{xviii}. Die betroffenen Verkehrsteilnehmer werden sich vielmehr über die vorherrschenden Risiken bewusst und handeln dementsprechend angepasst.

Wie in Abb. 31 argumentiert, hat die Branddetektion zusammen mit den Standardreflexen wenig Potenzial, die Reaktionszeit stark zu verkürzen. Die Reflexe vermindern jedoch den Personenschaden bei Brand, indem sie für verbesserte Fluchtbedingungen sorgen.

² Reflexe auf "Branddetektion thermisch Hauptalarm" gemäss Reflexmatrix Ereignisse ASTRA

7.2.2 Abschätzung der Risikoreduktion

In folgender Tabelle wird der Reduktionseffekt der einzelnen ED-Anlagen auf das Risiko der Tunnelanlage für die Verkehrsteilnehmer (Tote/Jahr) abgeschätzt. Dazu wird die Unfallwahrscheinlichkeit (Unfallrate) und das Schadensausmass detailliert betrachtet. Die Reduktion wird in Prozent angegeben.

ED-Anlage	Wahrscheinlichkeit Unfall	Schadensausmass
Linienbrandmelder	-	Die Reduktion des Schadensausmass hängt unter anderem vom Tunneltyp, dem Fluchtverhalten und dem Abstand der Notausgänge ab. Mittels einer gesonderten Betrachtung (Raum-Weg-Diagramme, Anhang) wurde ein Reduktionseffekt von 2-10% ermittelt. Analoges Effekt wie Rauchmelder.
Rauchmelder	-	Die Reduktion des Schadensausmass hängt unter anderem vom Tunneltyp, dem Fluchtverhalten und dem Abstand der Notausgänge ab. Mittels einer gesonderten Betrachtung (Raum-Weg-Diagramme, Anhang) wurde ein Reduktionseffekt von 2-10% ermittelt. Analoges Effekt wie Linienbrandmelder.
Sichttrübungsmessung	Wirkung durch Vermeidung von Unfällen, welche durch Sichttrübung verursacht werden. Gemäss [1] sind nur 1% der Unfälle im Tunnel durch äussere Einflüsse bedingt, somit kann die Sichttrübung die Unfallrate nicht mehr als um 1% reduzieren. Annahme 30% der Unfälle durch äussere Einflüsse sind durch Sichttrübung verursacht. Somit ergibt sich eine Reduktion von 0.3%.	Da Sichttrübungsmessungen nur ca. alle 500-700m montiert sind, ist ihr Effekt in der Ereignisbewältigung vergleichsweise klein. Annahme: 0.4-2% Reduktion der Brandschäden (ein Fünftel des Effekts der Rauchmelder, welche alle 100m angebracht werden).
VDE induktiv	Die Häufigkeit von Auffahrunfällen im Tunnel wird vermindert, da Stau entsprechend signalisiert wird. Annahme: 42% der Unfälle gem. [1] sind Auffahrunfälle, 30% der Unfälle kommen in den Stosszeiten zustande, davon 40% Auffahrt auf Stauende, davon 10% durch VDE und Warnung vermieden: also Reduktion der Unfallrate um $0.42 \cdot 0.3 \cdot 0.4 \cdot 0.1 = 0.5\%$	Mit den Informationen aus der VDE können Stautunden reduziert werden (Information der Verkehrsteilnehmer, Vorschläge für Alternativrouten). Reduktion von Stau bewirkt Reduktion des Schadensausmasses bei Tunnelbrand. Annahme: Reduktion der Stautunden im Tunnel um 10%.
Videodetektion	Unfälle, welche durch äussere Einflüsse (wie z.B. verlorene Gegenstände) verursacht werden, machen max. 1% der Unfälle aus [1]. Weiter kann durch die Detektion eines Falschfahrers die Unfallkategorie "Begegnungsunfall" (4% gem. [1]) etwas reduziert werden. Da Falschfahrer selten vorkommen (Schätzung 1% der Begegnungsunfälle) ist der Effekt 0.04%. Durch Detektion von Stau im Tunnel ist analog zur VDE mit einem Effekt von 0.5% zu rechnen. Der gesamthafte Effekt der Videodetektion wird daher mit 1.54% abgeschätzt.	Die Videodetektion verringert neben dem Schadensausmass im Brandfall auch die Personenschäden bei Unfall ohne Brandfolge (z.B. durch genauere Lokalisierung des Unfalls und schnellere Alarmierung der Rettungskräfte). Annahme: 1% Reduktion bei den Unfällen ohne Brand. Beim Brand funktioniert die Videodetektion wie ein Melder (entweder über den Modus "Rauch" oder indirekt über "stehendes Fahrzeug"). Während der Ereignisbewältigung liefert die Videodetektion Informationen (solange der Tunnel nicht verrauch ist). Der Effekt auf das Schadensausmass bei Brand wird daher mit 2.5-10.5% abgeschätzt. Zudem werden analog zur VDE die Stautunden im Tunnel um 10% reduziert.
Glatteiswarnung	Wirkung durch Vermeidung von Unfällen, welche durch Eisglätte in den Portalbereichen verursacht werden. Gemäss [1] sind nur 1% der Unfälle im Tunnel durch äussere Einflüsse bedingt, somit kann die Glatteiswarnung die Unfallrate nicht mehr als um 1% reduzieren. Wir gehen davon aus, dass unter den äusseren Einflüssen nur 10% Glatteis sind, d.h. der Effekt der Glatteiswarnung auf die Unfallrate wäre 0.1% Reduktion.	-

[1]

BFU Report 51

Abb. 32: Abschätzung Risikoreduktion durch ED-Anlagen

7.2.3 Ereignisbaumanalyse

Die Ereignisbaumanalyse eignet sich gut zur Untersuchung des Unfallgeschehens in Tunneln (Anhang). Die hier verwendete Analyse ist eine in Österreich standardisiert angewendete Tunnelrisikoanalyse^{xix}. Ausgehend von den beiden Initialereignissen „Unfall“ und „Panne“ werden die unterschiedlichen Schadenszenarien entwickelt. Die Effekte der einzelnen ED-Anlagen werden im Ereignisbau dargestellt (Veränderung der Parameter). Es wird ein fiktiver Tunnel verwendet³. Als Nullvariante wird der Tunnel ohne ED-Anlagen betrachtet. Danach werden die einzelnen ED-Anlagen sozusagen fiktiv installiert und eine Neuberechnung des Risikos durchgeführt. Für jede ED-Anlage ergibt sich somit eine Risikoreduktion. Es wird lediglich ein relativer Vergleich der verschiedenen ED-Anlagen gemacht, wobei das Risiko im Tunnel ohne ED-Anlagen als 100% dargestellt wird. Für die ED-Anlagen, welche der Brandmeldung dienen, wurde ein Bereich der Risikoreduktion ermittelt, welcher den unterschiedlichen Tunnel Rechnung trägt. Folgende Tabelle

³ Richtungsverkehrstunnel, Länge 2 km, DTV 15'000, LKW-Anteil 23%, Längslüftung

zeigt die Effektschätzungen für die verschiedenen ED-Anlagen im Vergleich zum Tunnel ohne ED-Anlagen:

ED-Anlage	Risikoreduktion	Restrisiko
Tunnel ohne ED-Anlagen	-	100%
Linienbrandmelder 2%	0.18%	99.82%
Linienbrandmelder 10%	0.94%	99.06%
Rauchmelder 2%	0.18%	99.82%
Rauchmelder 10%	0.94%	99.06%
Sichttrübungsmessung 0.4%	0.32%	99.68%
Sichttrübungsmessung 2%	0.47%	99.53%
VDE induktiv	1.37%	98.63%
Videodetektion 2.5%	3.46%	96.54%
Videodetektion 10.5%	4.15%	95.85%
Glatteiswarnung	0.09%	99.91%

Abb. 33: Risikoreduktion durch ED-Anlagen

Lesebeispiel: Der Linienbrandmelder vermag den Personenschaden bei Brand um 2-10% zu senken. Daraus resultiert bezogen auf das Gesamtrisiko des Tunnels eine Reduktion um 0.18-0.94%.

Schadensausmass im Brandfall

Diverse Anlagen (nicht nur ED-Anlagen) zielen darauf ab, das Schadensausmass im Brandfall zu minimieren. Zu diesen Anlagen gehören alle Brandmeldeanlagen, aber auch BSA wie automatische Löschanlagen oder Beschallungsanlagen für den Fahrraum, welche in der Schweiz noch nicht zur Anwendung kommen. Folgende Tabelle zeigt auf, wie die Reduktion des Schadensausmasses bei Brand mit dem Gesamtrisiko des Tunnels zusammenhängt:

Schadensausmass Brand	Gesamtrisiko Tunnel
100.00%	100.00%
98.00%	99.81%
90.00%	99.06%
70.00%	97.18%
30.00%	93.41%
0.00%	90.59%

Abb. 34: Schadensausmass Brand und Gesamtrisiko Tunnel

7.2.4 Diskussion

Die hier durchgeführte Analyse ist semi-quantitativ und umfasst die typischen Ereignisse im Strassentunnel. Es handelt sich um eine strukturierte Abschätzung mit Bezug von Unfallstatistiken.

Linienbrandmelder, Rauchmelder

Linienbrandmelder und Rauchmelder haben keinen Einfluss auf die Unfallrate. Sie wirken nur im Brandfall und weisen somit ein eingeschränktes Wirkspektrum auf. Mittels einer gesonderten Betrachtung (Raum-Zeit-Diagramm) wurde abgeschätzt, dass diese Brandmeldesysteme das Schadensausmass um 2-10% reduzieren können (abhängig vom Abstand der Notausgänge, dem Fluchtverhalten, der Dynamik des Ereignisses und weiteren Faktoren). Dies setzt das Vorhandensein einer Lüftungsanlage voraus, welche im Brandfall die richtige Luftlängsgeschwindigkeit erzeugen kann.

Sichttrübungsmessung

Die Sichttrübungsmessung vermindert die Unfallrate moderat durch die Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse im Tunnel. Dies setzt das Vorhandensein einer Lüftungsanlage voraus. Zudem funktioniert sie als Brandmelder. Dieser Effekt ist allerdings nicht so ausgeprägt wie beim Linienbrandmelder oder den Rauchmeldern, da Sichttrübungsmessungen typischerweise nur alle 500-700m angebracht werden und somit eine längere Detektionszeit aufweisen.

Verkehrsdaterfassung (VDE)

Die gute Wirkung der VDE ist dadurch begründet, dass Auffahrunfälle und Stau im Tunnel vermieden werden. Das Modell geht davon aus, dass bei einem Brand im Richtungsverkehrstunnel mit Längslüftung nur bei Stau Personenschäden auftreten. Entsprechend kann das Risiko durch die Reduktion der Stauzeiten effizient reduziert werden. Diese Annahme ist aus unserer Sicht gerechtfertigt, da bei Lüftung in Fahrtrichtung in der Regel keine Personen betroffen sind.

Videodetektion

Betrachtet man die Risikoreduktion der einzelnen ED-Anlagen, so wird das Feld von der Videodetektion angeführt. Grund dafür ist das breite Wirkungsspektrum (sowohl bei der Unfallrate als auch beim Schadensausmass).

Glatteiswarnung

Die Glatteiswarnung ist eine hochspezifische ED-Anlage. Da Eisglätte nur ein geringer Anteil der Unfallrate ausmacht, ist die maximal erzielbare Risikoreduktion eher gering.

Monetarisierung

Anhand der Risikoreduktion und der Lebenszykluskosten kann die Effizienz einer Massnahme zur Steigerung der Sicherheit bewertet werden. Beispiel: Für die Videodetektion wurde ein Reduktionseffekt von 3-4% ermittelt. Bei einem Tunnel mit 1 Toten in 10 Jahren⁴ wäre der Effekt 3-4 vermiedene Tote in 1'000 Jahren. Ordnet man einem Menschenleben die Summe von CHF 5 Mio. zu, so erzielt die Videodetektion einen jährlichen Nutzen von CHF 17'500. Diese Zahl lässt sich mit den auf 1 Jahr bezogenen Lebenszykluskosten vergleichen. Ein Vergleich mit anderen Massnahmen kann durch diese risikobasierte Kosten-Nutzen Analyse ebenfalls erfolgen. Diese Methode kann bei der Allokation von Ressourcen hilfreich sein.

Schadensausmass im Brandfall

Wie in Abb. 34 dargestellt, lässt sich durch Eliminierung des Personenschadens bei Brand das Gesamtrisiko des Tunnels nur um ca. 10% reduzieren. Es stellt sich daher die Frage, ob die Investition in Massnahmen, welche lediglich auf die Reduktion des Schadensausmasses bei Brand abzielen, effizient ist.

Bei einem Tunnel mit einem Gesamtrisiko von einem Toten in 10 Jahren wäre 0.01 Toter pro Jahr durch Brand bedingt (10%). Alle Anlagen, welche auf das Schadensausmass im Brandfall wirken, teilen sich theoretisch diesen maximal möglichen Reduktionseffekt auf. Ordnet man einem Menschenleben die Summe von CHF 5 Mio. zu, so dürfte die Gesamtheit dieser Anlagen maximal jährliche Lebenszykluskosten von CHF 50'000 aufweisen. Das Gesamtrisiko eines Tunnels lässt sich unter diesen Annahmen durch Massnahmen zur Unfallvermeidung effizienter reduzieren als durch Massnahmen, welche nur im Brandfall wirken.

⁴ Typischer Wert für Richtungsverkehrstunnel, Länge 2 km, DTV 15'000

8 Nutzwertanalyse für ED-Anlagen aus Anwendersicht

8.1 Methode

8.1.1 Beschreibung Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse ist ein multikriterielles Bewertungsverfahren. Sie erlaubt es, unterschiedliche Modelle, Technologien, Prozesse, Varianten, etc. zu vergleichen. Die Analyse gliedert sich in folgende Schritte:

1. Auswahl der ED-Anlagen
2. Definition der Kriterien
3. Gewichtung der Kriterien
4. Durchführung der Bewertung

Für die hier durchgeführte Nutzwertanalyse wurden Experten aus dem Betrieb und Unterhalt von BSA befragt. Die Befragungen erfolgten im persönlichen Kontakt. Die Befragten kamen aus fünf zentraleuropäischen Ländern.

8.1.2 Auswahl ED-Anlagen

Folgende ED-Anlagen wurden mit der Nutzwertanalyse bewertet:

ED-Anlage	Verbreitung
Linienbrandmelder	Weit verbreitet
Rauchmelder	Noch nicht weit verbreitet
Sichttrübungsmessung	Weit verbreitet
Verkehrsdatenerfassung (VDE)	Weit verbreitet
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	Vermehrt vorhanden
Glatteisfrühwarnung	Relativ selten vorhanden

Abb. 35: Bewertete ED-Anlagen

8.1.3 Definition der Kriterien

Bei der Wahl der Kriterien wurde auf grösstmögliche Unabhängigkeit geachtet. Die Kriterien sollen orthogonal sein und nicht gleiche Aspekte abdecken. Ein Beispiel: Die Kriterien „Lebensdauer“ und „Korrosionsanfälligkeit“ sind nicht unabhängig voneinander, da die Lebensdauer teilweise durch die Korrosionsanfälligkeit bestimmt wird. Es kann hilfreich sein, sich am Detaillierungsgrad der Kriterien zu orientieren. Die Lebensdauer ist ein weniger detailliertes Kriterium als die Korrosionsanfälligkeit. Durch die Wahl von Kriterien des gleichen Detaillierungsgrads wurden Abhängigkeiten reduziert.

Für die Nutzwertanalyse wurden folgende Kriterien verwendet:

Nr.	Kriterium	Einheit
1	Investitionskosten	CHF
2	Kosten für Betrieb und Unterhalt (inkl. Kosten für Tests, Sperrungen und Reparaturen)	CHF/Jahr
3	Lebensdauer	Jahre
4	Fehlalarmrate	Fehlalarme in einem definierten Zeitraum für den ganzen Tunnel (inkl. Täuschungsalarme)
5	Nicht-detektierte Ereignisse	Nicht-detektierte Ereignisse in einem definierten Zeitraum für den ganzen Tunnel
6	Potenzial Risikominderung	Anzahl vermiedene Tote im Tunnel in einem definierten Zeitraum

Abb. 36: Kriterien der Nutzwertanalyse

In der Praxis besteht oft ein Optimierungsproblem zwischen der Fehlalarmrate und den nicht-detektierten Ereignissen. Für die Kriterienwahl ist dieser praktische Zusammenhang jedoch nicht hinderlich.

Die potentielle Risikominderung ergibt sich aus dem Detektionsspektrum der Anlage und ist losgelöst von der Detektionsqualität. Somit sind die Kriterien orthogonal und die Verwendung ist zulässig.

8.1.4 Gewichtung der Kriterien

Zur Ermittlung der Gewichtung werden die Kriterien in einer Matrix paarweise miteinander verglichen. Das Vorgehen ist einfach und transparent. Detailliertere Informationen befinden sich im Anhang 2 dieses Berichts.

8.1.5 Durchführung der Bewertung

Die Bewertung der ED-Anlagen erfolgte mittels einer 5-stufigen Skala für die ausgewählten Kriterien. Für jede Anlage wurde abgeschätzt, wie gut sie das jeweilige Kriterium erfüllt. Folgende Tabelle enthält Richtwerte für die Bewertung:

Kriterium	sehr gut 5 Punkte	gut 4 Punkte	mittel 3 Punkte	schlecht 2 Punkte	sehr schlecht 1 Punkt
Investitionskosten [CHF]	10'000	50'000	100'000	500'000	1'000'000
Kosten für Betrieb und Unterhalt [CHF/Jahr]	2'000	10'000	20'000	100'000	200'000
Lebensdauer [Jahre]	25	20	15	10	5
Fehlalarmrate	wenige (1-5) pro Jahr	wenige (1-5) pro Monat	einige (6-10) pro Monat	einige (3-10) pro Woche	viele (>10) pro Woche
Nicht-detektierte Ereignisse	wenige (1-5) pro Jahr	wenige (1-5) pro Monat	einige (6-10) pro Monat	einige (3-10) pro Woche	viele (>10) pro Woche
Potenzial Risiko- minderung	1 Toter vermieden innert 50 Jahren	1 Toter vermieden innert 100 Jahren	1 Toter vermieden innert 200 Jahren	1 Toter vermieden innert 500 Jahren	1 Toter vermieden innert 1000 Jahren

Abb. 37: Bewertungsskala

Als Hilfe für die Beurteilung des Kriteriums „Potenzial Risikominderung“ wurde den Teilnehmern folgende statistische Angabe zu Tunnelbränden vorgelegt: In einem 3 Km langen Richtungsverkehrstunnel mit DTV 20'000 ereignet sich alle 2-3 Jahre ein Brand.

Die Nutzwertanalyse wurde mit Experten für Betrieb und Unterhalt von elektromechanischen Anlagen in Strassentunnel durchgeführt. Die Experten kamen aus 5 zentraleuropäischen Ländern.

Die Nutzwertanalysen wurden zumeist im Rahmen eines Workshops durchgeführt. Oft nahmen mehrere Experten teil, welche sich jeweils auf einen Konsens einigten. Es wurden 6 Nutzwertanalysen durchgeführt.

8.2 Resultate

8.2.1 Gewichtung der Kriterien

Folgende Grafik zeigt die Kriteriengewichtung für die verschiedenen Nutzwertanalysen sowie die durchschnittliche Gewichtung:

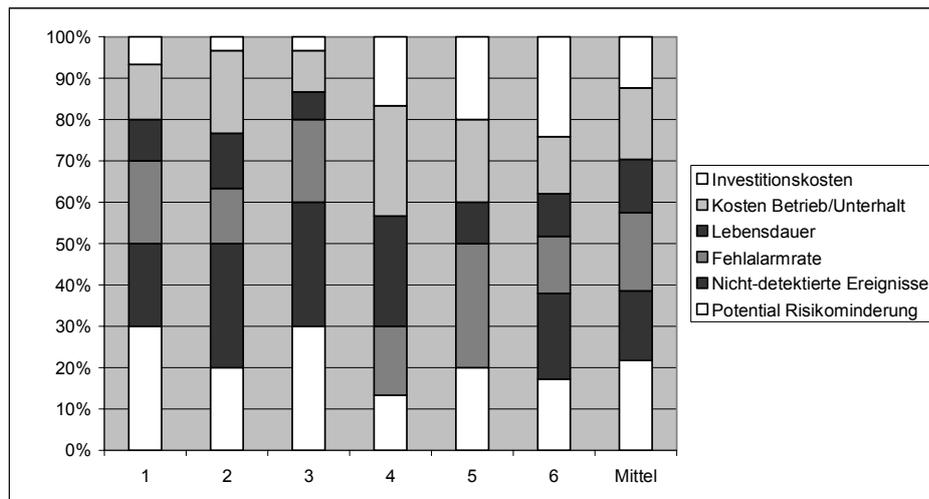


Abb. 38: Gewichtung der Kriterien

Die Wertetabelle zur Grafik:

Kriterien	1	2	3	4	5	6	Min	Max	μ	σ	σ/μ
Investitionskosten	0.07	0.03	0.03	0.17	0.20	0.24	0.03	0.24	0.12	0.09	0.73
Kosten für Betrieb und Unterhalt	0.13	0.20	0.10	0.27	0.20	0.14	0.10	0.27	0.17	0.06	0.35
Lebensdauer	0.10	0.13	0.07	0.27	0.10	0.10	0.07	0.27	0.13	0.07	0.55
Fehlalarmrate	0.20	0.13	0.20	0.17	0.30	0.14	0.13	0.30	0.19	0.06	0.32
Nicht-detektierte Ereignisse	0.20	0.30	0.30	0.00	0.00	0.21	0.00	0.30	0.17	0.14	0.82
Potenzial Risikominderung	0.30	0.20	0.30	0.13	0.20	0.17	0.13	0.30	0.22	0.07	0.31

Abb. 39: Wertetabelle

μ Mittelwert
 σ Standardabweichung
 σ/μ Relative Standardabweichung

Die Gewichtung der Kriterien variiert von Fall zu Fall ziemlich stark. Auskunft über dieses Verhalten gibt die relative Standardabweichung (σ/μ). Die grössten Unterschiede zeigen sich beim Kriterium „Nicht-detektierte Ereignisse“. Auch beim Kriterium „Investitionskosten“ zeigen sich starke Unterschiede in der Bewertung. Bei der Fehlalarmrate und der potentiellen Risikominimierung zeigen sich die geringsten Unterschiede. Betrachtet man die

Mittelwerte der Gewichtungen, so ergibt sich eine ziemlich ausgewogene Verteilung, wobei die potentielle Risikominderung das wichtigste Kriterium darstellt. Das Kriterium mit dem geringsten Gewicht sind die Investitionskosten, dicht gefolgt von der Lebensdauer.

8.2.2 Bewertung der ED-Anlagen

Die ED-Anlagen werden hinsichtlich jedes Kriteriums bewertet (5-teilige Skala, 5 sehr gut, 1 sehr schlecht). Die Bewertungen sind in folgender Tabelle dargestellt (Mittelwerte):

ED-Anlage	Investitions-kosten	Kosten für Betrieb und Unterhalt	Lebensdauer	Fehlalarmrate	Nicht-detektierte Ereignisse	Potenzial Risiko-minderung
Linienbrandmelder	1.6	4.2	3.2	5.0	4.4	3.8
Rauchmelder	2.5	3.8	3.0	3.8	5.0	4.3
Sichttrübungsmessung	3.0	4.0	2.8	4.5	5.0	3.7
Verkehrsdatenerfassung (VDE)	3.8	4.7	3.7	4.8	4.8	2.2
Verkehrsfernsehen mit Ereignis-erkennung	1.3	3.3	2.0	1.3	3.8	4.5
Glatteiswarnung ⁵	2.3	3.3	2.7	3.0	3.3	1.7

Skala:

sehr gut	gut	mittel	schlecht	sehr schlecht
4.5-5.0	3.5-4.5	2.5-3.5	1.5-2.5	1.0-1.5

Abb. 40: Bewertung der ED-Anlagen

⁵ Glatteiswarnung: Es stellte sich heraus, dass Anlagen zur Glatteiswarnung in der Regel nicht mit Tunneln in Verbindung stehen bzw. mit der Tunnelsicherheit assoziiert sind. Die Anlagen befinden sich in der Regel nicht im Portalbereich.

Spinnennetzdiagramme

Im Folgenden wird die Bewertung der ED-Anlagen in sogenannten Spinnennetzdiagrammen dargestellt. Diese Darstellungsform eignet sich gut für multikriterielle Bewertungen. Dabei gibt die aufgespannte Fläche über die Gesamtnote Auskunft.

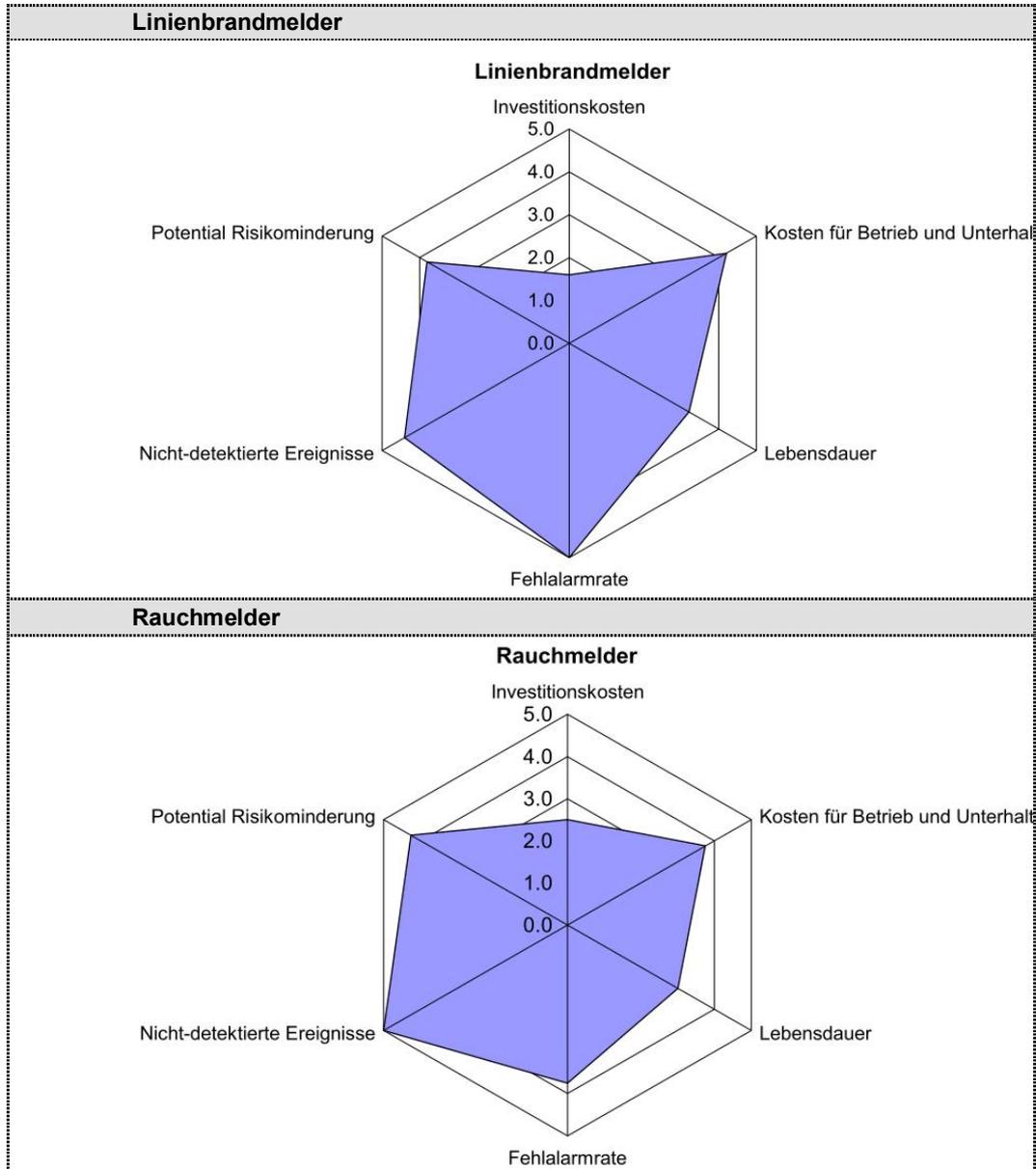


Abb. 41: Bewertung der ED-Anlagen

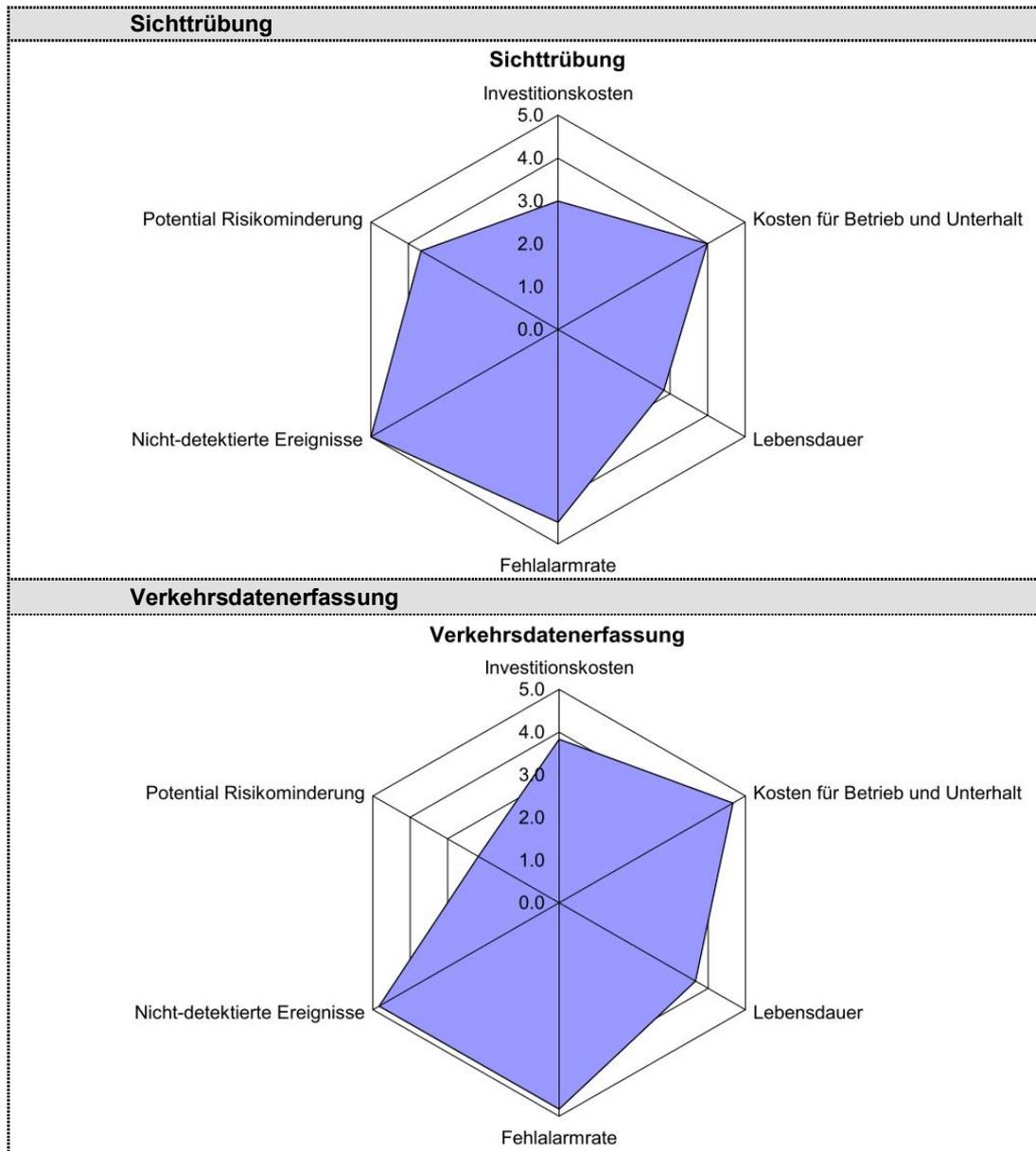


Abb. 42: Bewertung der ED-Anlagen

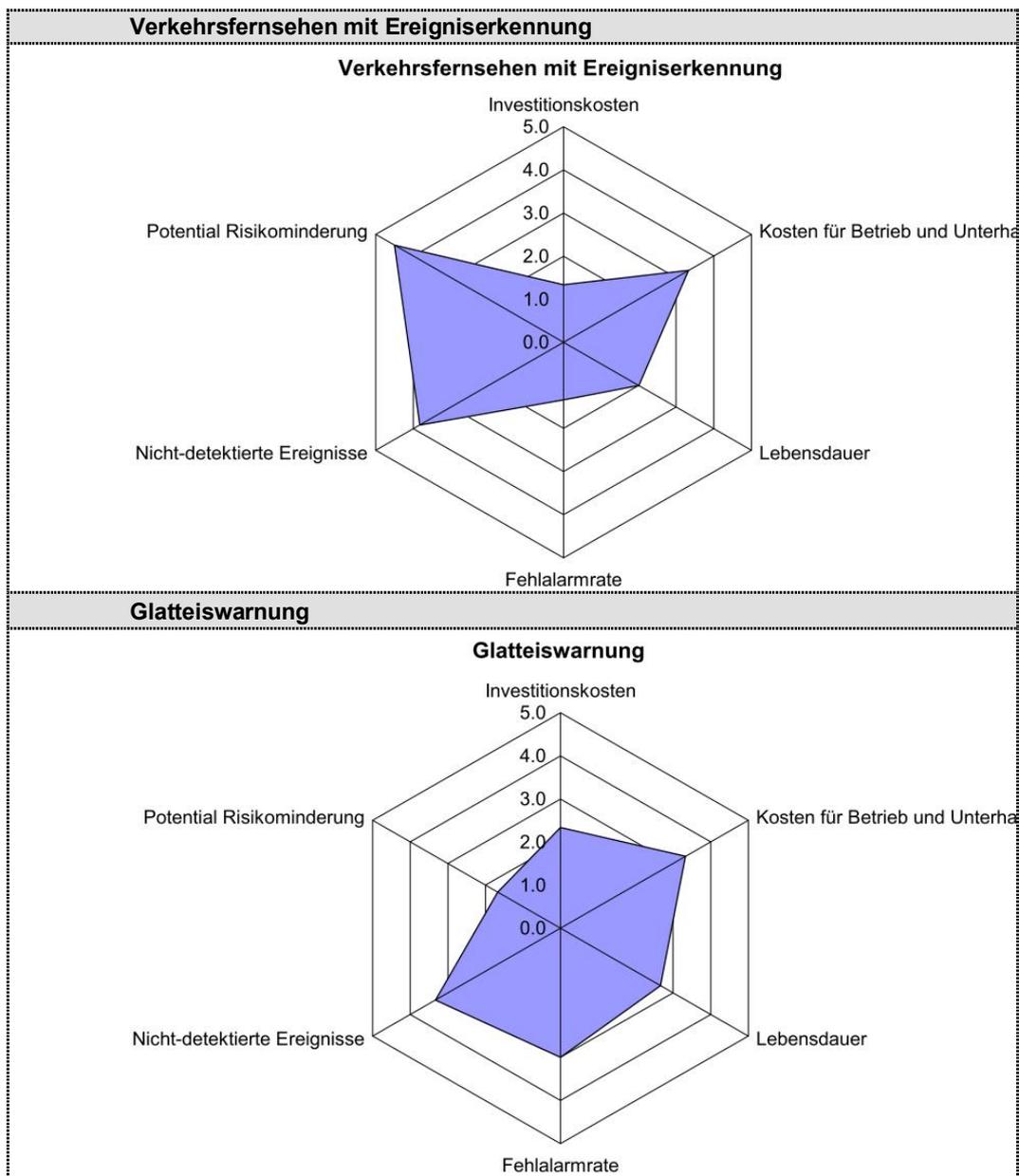


Abb. 43: Bewertung der ED-Anlagen

8.2.3 Nutzwert

Als Endresultat ergibt sich für jede Anlage der Nutzwert. Der Nutzwert ist die aggregierte Grösse der gewichteten multikriteriellen Bewertung. Das heisst er enthält sämtliche Informationen aus der Nutzwertanalyse.

Aus jeder Nutzwertanalyse resultiert eine „Rangliste“ der ED-Anlagen gemäss ihren Nutzwerten. Diese Ranglisten unterscheiden sich von Fall zu Fall. Es lassen sich aber Gemeinsamkeiten erkennen:

- Der Linienbrandmelder rangiert meist auf den Plätzen 1 und 2
- Rauchmelder und Sichttrübung rangiert meist auf den Plätzen 2 und 3
- Die Verkehrsdatenerfassung rangiert auf sehr unterschiedlichen Rängen (1-4)
- Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung rangiert oft auf dem 5. Platz
- Glatteiswarnung rangiert immer auf dem 6. Platz

Bildet man den Mittelwert aus den Nutzwerten, so ergibt sich eine aggregierte Rangliste aus sämtlichen Nutzwertanalysen. Folgende Tabelle enthält die aggregierten Nutzwerte aus sämtlichen Nutzwertanalysen (der maximale Nutzwert beträgt in diesem Fall 5):

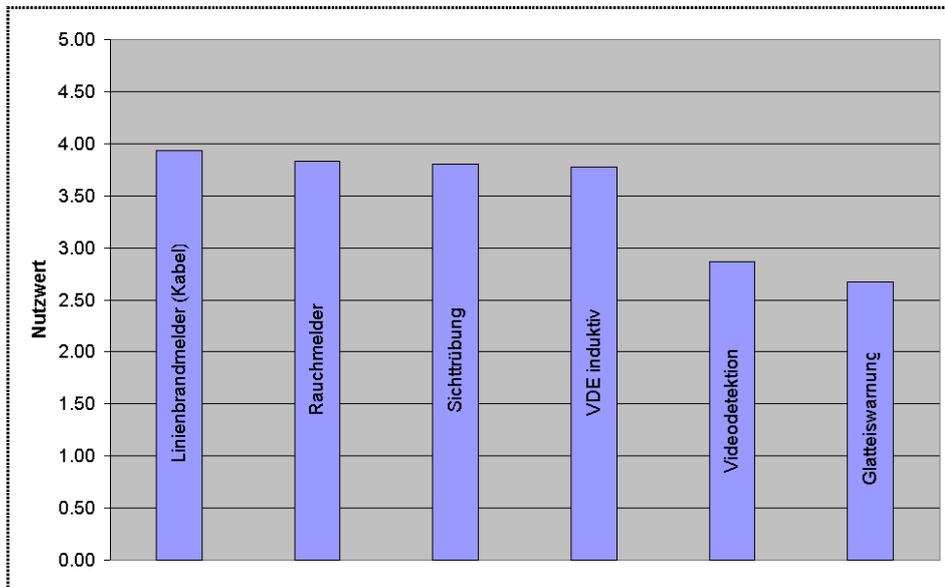


Abb. 44: Nutzwerte der ED-Anlagen

Die Wertetabelle zur Grafik:

ED-Anlage	Nutzwert
Linienbrandmelder	3.93
Rauchmelder	3.83
Sichtrübungsmessung	3.81
Verkehrsdaterfassung (VDE)	3.78
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	2.87
Glatteisfrühwarnung	2.67

Abb. 45: Wertetabelle

8.3 Diskussion

8.3.1 Gewichtung der Kriterien

Betrachtet man die Mittelwerte der Gewichtungen, so ergibt sich eine ziemlich ausgewogene Verteilung, wobei die potentielle Risikominderung am stärksten, die Investitionskosten am schwächsten gewichtet wurden. Dies ist aus unserer Sicht nachvollziehbar, da das übergeordnete Ziel der ED-Anlagen die Risikominderung für den Tunnelnutzer darstellt.

Die Gewichtung der Kriterien variiert von Fall zu Fall ziemlich stark. Es ist nachvollziehbar, dass die beteiligten Experten die Kriterien unterschiedlich gewichten. Die gemachten Erfahrungen mit den ED-Anlagen variieren individuell und hängen mit dem zugewiesenen Verantwortungsbereich zusammen. Zudem variieren die Tunnel, welche in den Zuständigkeitsbereich der jeweiligen Befragten fallen, hinsichtlich der baulichen und verkehrlichen Voraussetzungen sehr stark. Die Bandbreite geht von kurzen, stark befahrenen städtischen Tunneln bis zu langen transalpinen Tunneln mit vergleichsweise wenig Verkehr.

Das Kriterium „Nicht-detektierte Ereignisse“ wurde in 2 Fällen als nicht relevant einge-

stuf. Vielleicht lässt sich dies dadurch erklären, dass das Kriterium „Nicht-detektierte Ereignisse“ im Vergleich zu den Kosten und den Fehlalarmen weniger gut erfassbar ist. Nicht-detektierte Ereignisse sind nur bei Tests erfassbar, oder wenn ein relativ massives Ereignis nicht detektiert wurde, welches früher oder später zwangsläufig wahrgenommen wird (z.B. Brand). Speziell beim Verkehrsfernsehen ist zu erwarten, dass eine Dunkelziffer an nicht-detektierten Ereignissen besteht, z.B. wenn ein Fahrzeug stillsteht, nicht detektiert wird, jedoch ohne weitere Konsequenzen wieder weiterfahren kann (Ereignisklasse 1 gemäss Kapitel 2.2).

8.3.2 Nutzwerte der ED-Anlagen

Linienbrandmelder

Der Linienbrandmelder rangierte meist auf den Plätzen 1 und 2. In der durchschnittlichen Bewertung rangierte der Linienbrandmelder auf dem 1. Rang. Grund dafür ist die hohe Detektionsqualität sowie die geringen Kosten für Betrieb und Unterhalt. Die hohen Investitionskosten fielen nicht stark ins Gewicht, da dieses Kriterium am wenigsten stark war.

Das sehr gute Abschneiden des Linienbrandmelders ist plausibel. Die Vorteile überwiegen die relativ hohen Anschaffungskosten stark.

Rauchmelder

Der Rauchmelder rangierte meist auf den Plätzen 2 und 3. In der durchschnittlichen Bewertung rangierte der Rauchmelder auf dem 2. Rang. Grund dafür ist das gute Abschneiden beim Kriterium „Nicht-detektierte Ereignisse“ und das Fehlen einer eindeutig erkennbaren Schwäche.

Das gute Abschneiden des Rauchmelders ist nachvollziehbar. Die Anwendung ist zwar noch nicht sehr verbreitet. Die rasche Detektion von Kaltbränden dürfte jedoch ein starkes Argument für diese Technologie darstellen.

Sichttrübungsmessung

Die Sichttrübungsmessung rangiert meist auf den Plätzen 2 und 3. In der durchschnittlichen Bewertung rangiert die Technologie auf dem 3. Rang. Grund dafür ist das gute Abschneiden beim Kriterium „Nicht-detektierte Ereignisse“ und das Fehlen einer eindeutig erkennbaren Schwäche. Die Platzierung ist plausibel.

Die Sichttrübungsmessung hat zum Ziel, die Lüftung zu steuern und dadurch die lufthygienischen Anforderungen im Tunnel zu gewährleisten. Sie reduziert somit das Risiko der Gesundheitsschädigung für die Tunnelnutzer. Ebenfalls trägt die Sichttrübungsmessung zu guten Sichtverhältnissen im Tunnel bei, und wirkt somit gegen Unfälle.

Verkehrsdatenerfassung

Die Verkehrsdatenerfassung rangiert auf sehr unterschiedlichen Rängen. In der durchschnittlichen Bewertung rangiert die Technologie auf dem 4. Rang. Die Technologie scheint im Ausland in der Anschaffung billiger zu sein als in der Schweiz. Hinsichtlich Risikoreduktion misst man der VDE nur geringes Potenzial zu.

Die Stärke der Verkehrsdatenerfassung liegt darin, verlässliche Rohdaten für das Verkehrsmanagement zu liefern. Der Nutzen bezüglich Risikoreduktion wurde aus unserer Sicht unterschätzt. Die VDE leistet durch die Vermeidung von Stau im Tunnel einen guten Beitrag zur Risikoreduktion.

Verkehrsfernsehen

Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung rangierte oft auf dem 5. Platz. In der durchschnittlichen Bewertung rangierte die Technologie auf dem 5. Rang. Grund dafür ist das schlechte Abschneiden bei den Kriterien „Fehlalarme“, „Lebensdauer“ und „Investitionskosten“. Das Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung weist ein grosses Potenzial für Risikoreduktion auf, da bereits risikoerhöhende Ereignisse detektiert werden. Das Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung hat präventiven Charakter.

In einigen der betrachteten Tunnel (kurze Tunnel mit hohem DTV) werden Ereignisse nur über das Verkehrsfernsehen mit automatischer Ereigniserkennung detektiert. Thermische oder optische Brandmeldesysteme sind nicht installiert. Die zum Teil sehr hohe Fehlalarmrate wurde in Kauf genommen und stellt für die Operateure kein Problem dar.

Das eher schlechte Abschneiden der Videodetektion ist nachvollziehbar. Es sind uns Anlagen bekannt, für welche der Betreiber die Ereignisdetektion aufgrund der hohen Fehlalarmrate ausgeschaltet hat. Die Toleranz bezüglich Fehlalarmen variiert von Betreiber zu Betreiber relativ stark.

Glatteiswarnung

Die Glatteiswarnung wurde nur dreimal bewertet, da das System international nicht stark verbreitet ist. Sie rangiert jeweils auf dem 6. Platz. Die betrachteten Anlagen zur Glatteiswarnung standen nicht direkt mit Tunneln in Verbindung. Sie waren auf der offenen Strecke positioniert.

8.3.3 Vergleich mit Ereignisbaumanalyse

In Kapitel 7 wurde die Risikoreduktion durch ED-Anlagen mittels Ereignisbaumanalyse abgeschätzt. Folgende Tabelle zeigt einen Vergleich mit dem Kriterium "Potenzial Risikominderung" aus der Nutzwertanalyse:

ED-Anlagen	Rang Ereignisbaumanalyse	Rang Potenzial Risikominderung Nutzwertanalyse	Bemerkung
Linienbrandmelder	3	3	Konsens
Rauchmelder	3	2	Abweichung
Sichttrübungsmessung	4	4	Konsens
Verkehrsdatenerfassung (VDE)	2	5	Grösste Abweichung
Verkehrsfernsehen mit Ereigniserkennung	1	1	Konsens
Glatteiswarnung	6	6	Konsens

Abb. 46: Vergleich Ereignisbaumanalyse - Nutzwertanalyse

Konsens besteht in der Rangierung bei 4 Anlagen. Die grösste Abweichung zeigt sich bei der VDE. Die Risikoreduktion dieser Anlage scheint generell unterschätzt zu werden.

9 Bewertung der ED-Anlagen

9.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die ED-Anlagen einer zusammenfassenden Bewertung unterzogen. Dabei werden folgende Kriterien betrachtet:

- Detektionsqualität
- Risikoreduktion
- Nutzersicht
- Testbarkeit

9.2 Linienbrandmelder

Detektionsqualität

Linienbrandmelder weisen eine sehr gute Detektionsqualität auf (wenig Fehlalarme, wenig nicht-detektierte Ereignisse). Die Nähe zum Brand, die Möglichkeit zur Lokalisierung sowie Feststellung der Richtung der Brandentwicklung sind weitere wertvolle Stärken dieser ED-Anlage.

Risikoreduktion

Die Risikoreduktion, welche durch einen Linienbrandmelder erwirkt werden kann, ist als eher moderat zu bezeichnen. Dies gilt jedoch für sämtliche Systeme, welche bestimmungsgemäss nur im Brandfall zum Einsatz kommen. Gemäss den durchgeführten Berechnungen macht das Risiko durch Brand maximal 10% des Gesamtrisikos im Tunnel aus. Der Rest sind Verkehrsunfälle ohne Brandentwicklung.

Nutzersicht

Nutzer attestierten dem Linienbrandmelder den höchsten Nutzwert unter den betrachteten Anlagen. Die Kosten für Betrieb und Unterhalt sind relativ tief und die Lebensdauer lang.

Testbarkeit im Tunnel

Die Testbarkeit des Linienbrandmelders ist gegeben, jedoch nur unter speziellen Bedingungen unter Verkehr möglich. Manchmal wird das Kabel in eine Nische geführt, sodass an einem definierten Ort unter Verkehr getestet werden kann. Will man das Kabel an mehreren Orten im Tunnel testen, so ist eine Vollsperrung der Röhre nötig. Der Testvorgang selber kann mit einem speziellen Testgerät durchgeführt werden. Bei der Abnahme werden manchmal Testfeuer gefordert. Je nach Hersteller kommen herstellerspezifische Testanweisungen zur Anwendung. Der Bauherr sollte vom Hersteller in jedem Fall eine Testanweisung einfordern.

Fazit

Ist in einem Tunnel eine Brandmeldeanlage zu installieren, so sollte dies in erster Priorität ein Linienbrandmelder sein. Dabei spielt es aus technischer Sicht kaum eine Rolle, ob man auf das optische Kabel oder auf das Sensorchipkabel setzt. Best-Practice Lösungen weisen eine optimierte Verfügbarkeit auf, sei dies durch redundante Kabel oder durch kurze maximale Ausfallstrecken.

9.3 Rauchmelder

Detektionsqualität

Rauchmelder weisen eine gute Detektionsqualität auf. Nicht-detektierte Ereignisse kommen kaum vor. Die Möglichkeit zur Lokalisierung des Brands ist gegenüber dem Linienbrandmelder eingeschränkt. Die Detektionsgeschwindigkeit bei realen Bränden ist (in den meisten Fällen) besser als bei den thermischen Meldern.

Risikoreduktion

Die Risikoreduktion, welche durch Rauchmelder erzielt werden kann, ist als eher moderat zu bezeichnen. Dies gilt jedoch für sämtliche Systeme, welche bestimmungsgemäss nur im Brandfall zum Einsatz kommen. Das Risiko durch Brand macht maximal 10% aus. Der Rest sind Verkehrsunfälle ohne Brandentwicklung.

Nutzersicht

Nutzer attestierten dem Rauchmelder den zweithöchsten Nutzwert unter den betrachteten Anlagen. Die Anlage wurde bei den verschiedenen Kriterien relativ gleichmässig bewertet.

Testbarkeit im Tunnel

Rauchmelder können mit Sprühsubstanzen, Rauch oder mittels Streuelement (in den Strahlengang gehalten) getestet werden. Je nach Ort der Rauchmelder kann dazu eine Vollsperrung nötig sein. Bei der Abnahme werden manchmal Testfeuer gefordert. Je nach Brandsubstanz entwickelt das Testfeuer mehr oder weniger Rauch, was sich auf die Detektionsgeschwindigkeit der Rauchmelder auswirkt. Für die Tests im Tunnel sind klare Testanweisungen nötig. Der Bauherr sollte vom Hersteller in jedem Fall eine Testanweisung einfordern.

Fazit

Rauchmelder können zu einer verkürzten Detektionszeit beitragen, da viele reale Brände eine grosse Rauchentwicklung bei langsamem Temperaturanstieg aufweisen und somit durch den Linienbrandmelder verzögert detektiert werden. Die ASTRA Richtlinie Branddetektion sieht vor, dass in neuen Tunneln in der Regel eine Kombination von Linienbrandmelder und Rauchmelder zum Einsatz kommen soll. Nach der Best-Practice sollte der Gewinn bei der Detektionszeit mit einer effizienten Alarmierung der Tunnelnutzer verbunden werden.

9.4 Sichttrübungsmessung

Detektionsqualität

Wie die Rauchmelder weist die Sichttrübungsmessung eine gute Detektionsqualität auf. Die Sichttrübungsmessung muss aber primär als Informationslieferant für die Lüftungssteuerung gesehen werden und nicht als Rauchmelder.

Risikoreduktion

Die Risikoreduktion kommt durch die Gewährleistung ausreichender Sicht- und Luftverhältnisse im Normalbetrieb sowie durch die Rauchmelderfunktion im Brandfall zustande. Gesamthaft ist die Risikoreduktion als moderat zu bezeichnen. Der Effekt der Sicherstellung der Lufthygiene wurde nicht in die Risikoreduktion einbezogen.

Nutzersicht

Die Nutzer platzierten die Sichttrübungsmessung auf dem dritten Rang. Es sind keine eindeutigen Stärken oder Schwächen auszumachen.

Testbarkeit im Tunnel

Die Sichttrübungsmessung kann analog zu den Rauchmeldern getestet werden.

Fazit

Die Sichttrübung detektiert lufthygienisch bedenkliche Zustände sowie ggf. einen Brand. Wenn eine Lüftung installiert ist, muss auch eine Sichttrübungsmessung installiert werden, da sonst die Lüftungssteuerung im Normalbetrieb nicht möglich wäre. Dies entspricht der Best-Practice und ist in der Schweiz so umgesetzt.

9.5 Verkehrsdatenerfassung (VDE)

Detektionsqualität

Die Detektionsqualität der VDE ist sehr gut. Aus den sogenannten Verstimmungskurven kann mit grosser Zuverlässigkeit auf Geschwindigkeiten und Fahrzeugtypen geschlossen werden.

Risikoreduktion

Die Risikoreduktion, welche durch die Ereignisbaumanalyse abgeschätzt wurde, war vergleichsweise hoch. Die Vermeidung von Stau im Tunnel ist ein wertvoller Beitrag zur Risikoreduktion. Die Risikoreduktion von präventiv wirkenden Anlagen wird tendenziell unterschätzt.

Nutzersicht

Die Nutzer platzierten die VDE auf dem vierten Rang.

Testbarkeit im Tunnel

Die Testbarkeit im Tunnel ist mit einer alternativen Messung/Zählung möglich.

Fazit

Die VDE leistet einen wertvollen Beitrag zur Risikoreduktion im Tunnel. Das System ist wartungsarm und liefert verlässliche Daten für die Verkehrsstatistik und das Verkehrsmanagement. Dieser Nutzen wurde im Rahmen dieses Berichts nicht beleuchtet. Aktuelle Entwicklungen (Westumfahrung) zeigen, dass die VDE verstärkt zum Einsatz kommt. Eine hohe Informationsdichte für das Verkehrsmanagement entspricht der aktuellen Best-Practice.

9.6 Verkehrsfernsehen mit Ereignisdetektion

Detektionsqualität

Die Detektionsqualität der Ereignisdetektion mit Videobildauswertung wird oft als Schwachpunkt dieser Technologie genannt. Dabei geht es vor allem um die Fehlalarme. Die Portalkameras sind speziell betroffen, da sie besonders durch Störeinflüsse (Licht, Nebel, Blooming) beeinflusst werden. Je länger der Tunnel (geringerer Anteil der Portalbereiche) desto besser schneidet die ED in der Regel ab (Fehlalarme pro Kamera und Zeit).

Risikoreduktion

Die Risikoreduktion ist verglichen mit anderen ED-Anlagen gross. Da bereits risikoerhöhende Ereignisse detektiert werden, kann frühzeitig gegen die eigentlichen Schadensereignisse eingewirkt werden. Die Ereignisdetektion wirkt sowohl bei der Unfallhäufigkeit als auch beim Schadensausmass und erreicht so eine gute Risikoreduktion.

Nutzersicht

In der Nutzwertanalyse wurde die Ereignisdetektion mittels Videobildauswertung auf dem fünften Platz eingeordnet. Als Schwächen wurden die hohen Investitionskosten sowie die Fehlalarmrate genannt. Die Toleranz bezüglich Fehlalarmen kann je nach Leitstelle stark variieren. Wenn jeder Alarm mit einem akustischen Signal verbunden ist, so kann eine hohe Fehlalarmrate für das Leitstellenpersonal zur Belastung werden. Im Falle einer diskreten und gut verifizierbaren Meldung werden auch hohe Fehlalarmraten toleriert. Dies ist bei der Planung von Leitstellen zu berücksichtigen.

Testbarkeit im Tunnel

Der Testaufwand steigt mit der Anzahl Detektionsmodi. In der Regel werden Videosequenzen eingespielt, um die Algorithmen zu testen. Bei einem neuen Tunnel ist dies jedoch nicht möglich. Das reale Nachspielen von Ereignissen kann notwendig werden. In jedem Fall ist ein laufender Verbesserungsprozess durch Verifikation der Alarmmeldungen und Anpassungen an den Parametrierungen der Kameras unumgänglich.

Fazit

Neue Tunnel werden in der Regel mit Verkehrsfernsehen ausgerüstet. Ob auch eine automatische Ereignisdetektion installiert wird, sollte im Einzelfall entschieden werden. Je länger ein Tunnel, desto höher die Detektionsqualität bezogen auf den ganzen Tunnel. Die Anordnung der Kameras ist bei einer Nachrüstung mit Ereignisdetektion entscheidend. Als Best-Practice würden wir die automatische Ereignisdetektion bei allen Tunneln mit einer Absaugung im Ereignisfall empfehlen.

In Abhängigkeit zum Ausrüstungsgrad des Tunnels kann ggf. auf den Modus "Rauch" verzichtet werden. Erfahrungsgemäss ist dieser Modus für viele Fehlalarme bei den Portalkameras verantwortlich. Über den Modus "Stehendes Fahrzeug" wird ein stationärer Brand ebenfalls detektiert. Es ist zu erwarten, dass sich die Algorithmen laufend verbessern werden und die Technologie verlässlicher wird.

9.7 Glatteiswarnung

Detektionsqualität

Die Detektionsqualität der Glatteiswarnung ist gut. Es sind ausgereifte Systeme auf dem Markt.

Risikoreduktion

Da die Anlage hoch spezifisch ist, bringt sie nur eine sehr geringe Risikoreduktion in Bezug auf das Gesamtrisiko des Tunnels.

Nutzersicht

Die Glatteiswarnung rangierte auf dem sechsten Platz. Dies in erster Linie wegen der geringen Risikoreduktion bei verhältnismässig hohen Investitionskosten.

Testbarkeit im Tunnel

Die Glatteiswarnung kann durch Verifikation der Strassenverhältnisse vor Ort getestet werden.

Fazit

Die Glatteiswarnung kommt nur sehr selten im Zusammenhang mit einem Tunnel zum Einsatz. Ihr Beitrag zur Risikoreduktion ist in jedem Fall gering, auch wenn ein Tunnel stark von Eisglätte betroffen ist. Neben der Sicherheit werden Glatteiswarnanlagen aus Umweltschutzgründen installiert. Ihr Einsatz verringert die Streusalzausbringung und trägt somit zum Boden- und Gewässerschutz bei.

Anhänge

I	Anhang 1: T-Verteilung.....	59
II	Anhang 2: Nutzwertanalyse, Gewichtung der Kriterien	60
III	Anhang 3: Raum-Zeit-Diagramm.....	61
IV	Anhang 4: Ereignisbaum.....	62

I Anhang 1: T-Verteilung

Tabelle der T-Verteilung für verschiedene Konfidenzintervalle

FG	Konfidenzintervall							
	75%	87.5%	90%	95%	97.5%	99%	99.5%	99.9%
1	1	2.414	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309
2	0.817	1.604	1.886	2.92	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.765	1.423	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215
4	0.741	1.344	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.727	1.301	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.718	1.273	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.711	1.254	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.706	1.24	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.703	1.23	1.383	1.833	2.262	2.821	3.25	4.297
10	0.7	1.221	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.697	1.214	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.695	1.209	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.93
13	0.694	1.204	1.35	1.771	2.16	2.65	3.012	3.852
14	0.692	1.2	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.691	1.197	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.69	1.194	1.337	1.746	2.12	2.583	2.921	3.686
17	0.689	1.191	1.333	1.74	2.11	2.567	2.898	3.646
18	0.688	1.189	1.33	1.734	2.101	2.552	2.878	3.611
19	0.688	1.187	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.687	1.185	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.686	1.183	1.323	1.721	2.08	2.518	2.831	3.527
22	0.686	1.182	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.685	1.18	1.319	1.714	2.069	2.5	2.807	3.485
24	0.685	1.179	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.684	1.178	1.316	1.708	2.06	2.485	2.787	3.45
26	0.684	1.177	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.684	1.176	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.683	1.175	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.683	1.174	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.683	1.173	1.31	1.697	2.042	2.457	2.75	3.385
40	0.681	1.167	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
50	0.679	1.164	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
60	0.679	1.162	1.296	1.671	2	2.39	2.66	3.232
70	0.678	1.16	1.294	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211
80	0.678	1.159	1.292	1.664	1.99	2.374	2.639	3.195
90	0.677	1.158	1.291	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183
100	0.677	1.157	1.29	1.66	1.984	2.364	2.626	3.174

Abb. I.1 T-Verteilung

II Anhang 2: Nutzwertanalyse, Gewichtung der Kriterien

Zur Ermittlung der Gewichtung werden die Kriterien in einer Matrix paarweise miteinander verglichen. In jedem Feld der Matrix stellt man die Frage „Ist das Kriterium auf der Zeile wichtiger als das Kriterium in der Spalte?“

Je nach Antwort auf die Frage wird in jedem Feld einer der folgenden Einträge gemacht:

0 = nein, weniger wichtig

1 = gleich wichtig

2 = ja, wichtiger

Beispiel: Die Investitionskosten werden mit den Kosten für Betrieb und Unterhalt verglichen. Da sie als weniger wichtig erachtet werden ist der Eintrag 0.

Aus der Summe der Einträge auf einer Zeile ergibt sich das Gewicht bzw. der Faktor des jeweiligen Kriteriums.

Kriterien		1	2	3	4	5	6	Gewicht	Faktor
		Investitionskosten	Kosten für Betrieb und Unterhalt	Lebensdauer	Fehlalarmrate	Nicht-detektierte Ereignisse	Potential Risikominderung		
1	Investitionskosten		0	1	0	0	0	1	0.03
2	Kosten für Betrieb und Unterhalt (inkl. Kosten für Tests und Sperrungen)	2		1	1	1	1	6	0.20
3	Lebensdauer	1	1		1	0	1	4	0.13
4	Fehlalarmrate	2	1	1		0	0	4	0.13
5	Nicht-detektierte Ereignisse	2	1	2	2		2	9	0.30
6	Potential Risikominderung	2	1	1	2	0		6	0.20

Abb. II.2 Ausgefüllte Matrix zur Ermittlung des Kriteriengewichts

III Anhang 3: Raum-Zeit-Diagramm

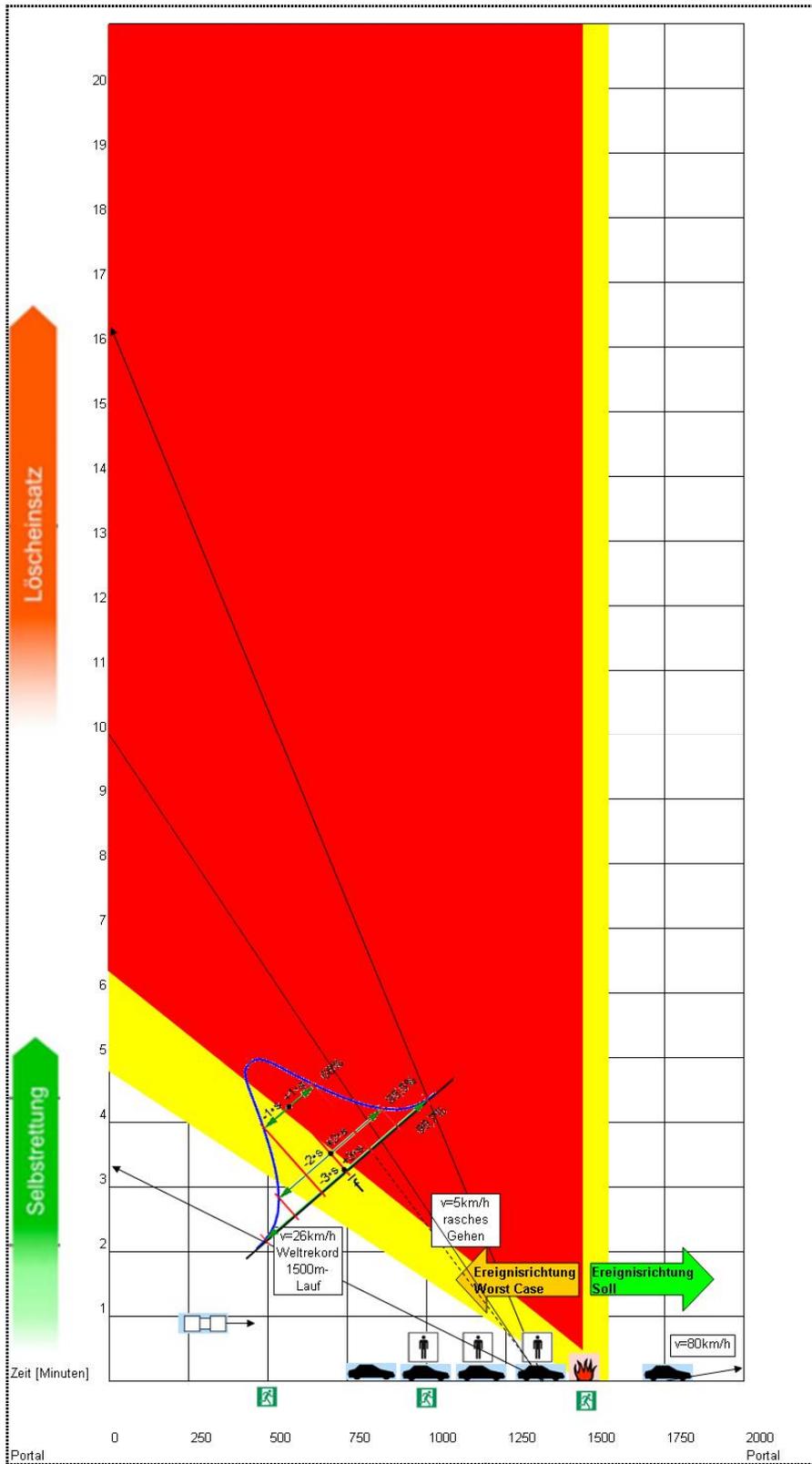


Abb. III.3 Beispiel Raum-Zeit-Diagramm

IV Anhang 4: Ereignisbaum

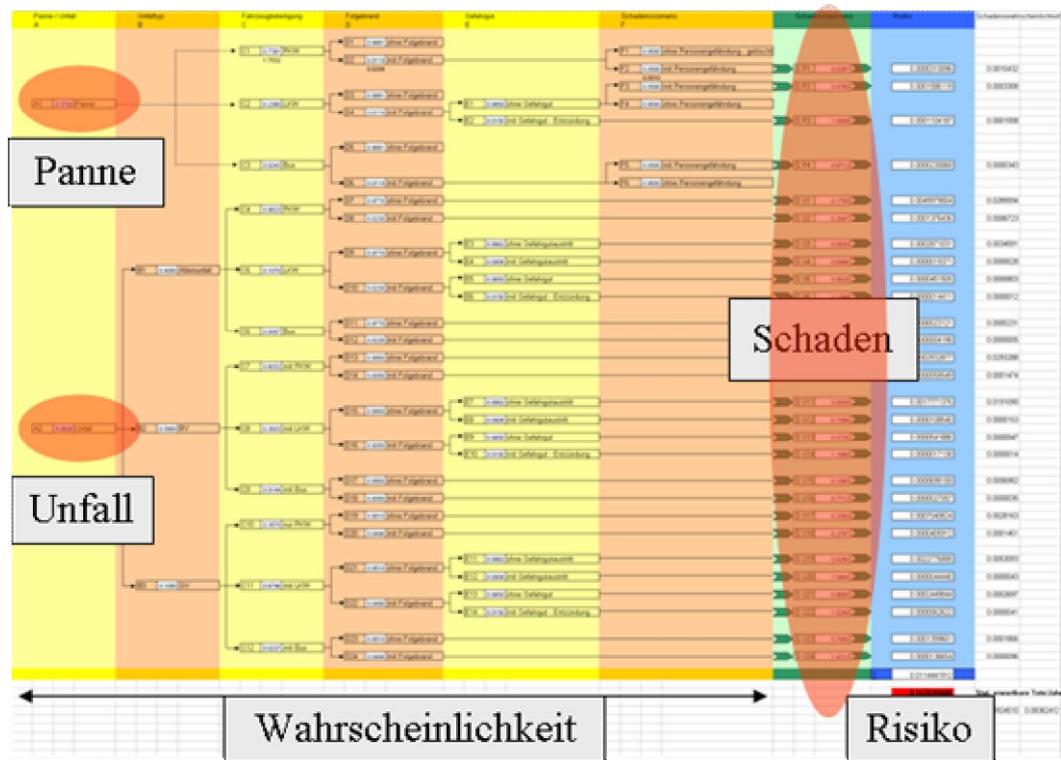


Abb. IV.4 Ereignisbaum

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
DTV	Durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen (in beide Richtungen)
ED	Ereignisdetektion
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstung
LPG	Liquified Petroleum Gas, Flüssiggas
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, Explosion eines Flüssiggastanks
VDE	Verkehrsdatenerfassung
VTV	Verkehrsfernsehen

Literaturverzeichnis

- [1] Schweizerische Beratungsstelle für Unfallverhütung, 2004, Verkehrssicherheit in Autobahn- und Autostrassentunneln
- [2] Feuerwehr Koordination Schweiz (FKS), 2005, Technische Wegleitung für die Intervention bei Bränden in Strassentunneln
- [3] Schlussbericht Tunnel Task Force, 2000, ASTRA
- [4] Rogner, 2009, Fire detection in tunnels – an actual overview on technologies and systems, 2nd Tunnel Safety Forum, Lyon
- [5] Reflexmatrix ASTRA, 2009, Fachhandbuch BSA
- [6] Strassentunneln – Vergleichende Untersuchungen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik
- [7] Richtlinie ASTRA 13012, 2009, Verkehrszähler
- [8] SIA 197/2, 2004, Projektierung Tunnel, Strassentunnel
- [9] Richtlinie ASTRA 13004, 2007, Branddetektion in Strassentunneln
- [10] Richtlinie ASTRA 13005, 2005, Verkehrsfernsehen
- [11] Richtlinie ASTRA 15003, 2008, Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH)
- [12] Ingason and Lönnemark, 2005, Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels, Fire Safety Journal
- [13] Aralt and Nilsen, 2008, Automatic fire detection in road traffic tunnels, Tunneling and Underground Space Technology
- [14] SN EN 50126, 1999, Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit (RAMS)
- [15] Welte, U. et al., Bericht ASTRA 2009, Konzept Gesamttest Tunnel, Integrale Test im Nationalstrassentunnel
- [16] Technical Report "Risk Evaluation", PIARC Technical Committee C.4 Working Group 2, Road Tunnel Safety, Draft Version 4, 2010
- [17] Noizet and Mourey, 2005, Crisis situation in tunnels: What kind of behaviours can we expect from drivers? Some results from the French Acteurs Project. 3rd International Conference, Traffic and Safety in Road Tunnels, Hamburg
- [18] Boer, 2002, Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel, TNO Report, TNO Human Factors, Bouwdienst Rijkswaterstaat, Centre for Tunnel Safety
- [19] Tunnel-Risikoanalysemodell, Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse Schiene Verkehr, RVS 09.03.11

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		ARAMIS SBT					
Formular Nr. 3: Projektabschluss							
erstellt / geändert am:	31.08.2010 / -						
Grunddaten							
Projekt-Nr.:	VSS 2008 / 205						
Projekttitel:	Ereignisdetektion im Strassentunnel						
Enddatum:	30.09.2010						
Projektleiter							
Name:	Wette	Vorname:	Urs				
Amt, Firma, Institut:	Amstein + Walthert Progress AG						
Strasse, Nr.:	Andreasstrasse 11						
PLZ:	8050	Email:	urs.wette@amstein-walthert.ch				
Ort:	Zürich	Telefon:	+41 44 305 91 11				
Kanton, Land:	Zürich, Schweiz	Fax:	+41 44 305 92 14				
Texte:							
Zusammenfassung der Projektergebnisse:	<ul style="list-style-type: none"> ED-Anlagen bewirken bezogen auf das Gesamtrisiko für Personen lediglich eine moderate Risikoreduktion. Speziell im Bereich der Anlagen, welche das Schadensausmass im Brandfall reduzieren, sind moderne Tunnel in der Schweiz ausreichend ausgerüstet. Will man das Personenrisiko weiter minimieren, so sind Anlagen zur Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit zu installieren. Es besteht Bedarf nach klar definierten Prüfanweisungen für Ereignisdetektionsanlagen im Tunnel (bei der Inbetriebsetzung und im Betrieb). Die Aussagekraft von Stichprobentests ist im Bereich der Strassentunnel sehr beschränkt. Aus diesem Grund sollten keine Stichprobentests angewendet werden. In der Praxis sind Leitstellen so zu konzipieren, dass eine möglichst hohe Fehlalarmtoleranz beim Leitstellenpersonal erreicht werden kann. So können Anlagen sensitiver eingestellt werden und die Anzahl an nicht oder spät detektierten Ereignissen kann minimiert werden. 						
Zielerreichung:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Projektziel</th> <th>Bemerkung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grundlagen/Literatur</td> <td>✓</td> </tr> </tbody> </table>			Projektziel	Bemerkung	Grundlagen/Literatur	✓
Projektziel	Bemerkung						
Grundlagen/Literatur	✓						
ARAMIS SBT: Form_3_Projektabschluss_20100923.doc							
Seite 1 / 4							



Klassifizierung der Ereignisdetektion	✓ Es wurde eine Bewertung vorgenommen. Eine eigentliche Klassifizierung wurde als nicht sinnvoll erachtet.
Bewertung der technischen Ausrüstungen (Vor- und Nachteile)	✓
Vereinheitlichung der technischen Mittel	✓ Eine generelle Vereinheitlichung wird aufgrund der Forschungsarbeit nicht als sinnvoll erachtet.
ED-Anlagen in den Vorportalzonen	✓
Massnahmen zur Ereignisvermeidung	✓
Analyse Reflex-Matrizen, allgemeine Einsetzbarkeit erreichen	✓ Es liegen mittlerweile konkrete Anordnungen seitens ASTRA vor
Best-Practice	✓

Folgerungen und Empfehlungen:

- Im Bereich der Anlagen, welche den Personenschaden im Brandfall reduzieren, sind moderne Tunnel in der Schweiz ausreichend ausgerüstet. Es braucht im Kontext Personenschaden/Brand nicht noch mehr Systeme.
- Will man das Personenrisiko weiter minimieren, so sind Anlagen zur Reduktion der Unfallwahrscheinlichkeit zu installieren.
- Es besteht Bedarf nach klar definierten Prüfanweisungen für Ereignisdetektionsanlagen im Tunnel (Inbetriebsetzung und im Betrieb). Anhand eines Beispiels wurde aufgezeigt, dass klar definierte Prüfverhältnisse resp. -Einrichtungen hilfreich sind.
- Die Aussagekraft von Stichprobentests ist im Bereich der Strassentunnel sehr beschränkt. Aus diesem Grund sollten keine Stichprobentests angewendet werden. Vor einem integralen Test sind sämtliche Einzelanlagen zu testen.
- In der Praxis sind Leitstellen so zu konzipieren, dass eine möglichst hohe Fehlalarmtoleranz beim Leitstellenpersonal erreicht werden kann. So können Anlagen sensibler eingestellt werden und die Anzahl an nicht oder spät detektierten Ereignissen kann minimiert werden.

Publikationen:

VSS



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Beurteilung der Begleitkommission:

Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	Es wurden vier Sitzungen der Begleitkommission durchgeführt, jeweils im Rahmen der EK-Sitzungen (BK und EK waren identisch). Die Beurteilung der BK war positiv; es wurden vereinzelt Anmerkungen oder Korrekturwünsche angebracht: zum Beispiel bez. Ereignismanagement bei sehr seltenen Ereignissen oder bez. Thematik des relativ geringen Einflusses der Ereignisdetektion auf das Risikosenkungspotenzial.
Umsetzung:	<p>Die Art und Möglichkeit der Umsetzung von Forschungsergebnissen wurde in der Zusammenfassung und in den Empfehlungen des Berichtes aufgeführt. Speziell erwähnenswert sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Das Risikosenkungspotenzial von Ereignisdetektionsanlagen ist für Personen im Brandfall relativ gering. Bezüglich Anlagen, welche den Personenschaden im Brandfall reduzieren, erscheinen moderne Tunnel in der Schweiz ausreichend ausgerüstet zu sein. • Prüfanweisungen sind ein wichtiges Instrument zur nachvollziehbaren und kontinuierlichen Qualitätsüberwachung von ED-Anlagen. Derartige Anweisungen sind wenig im Einsatz und müssen erstellt, bzw. gemeinsam mit dem Anlagenhersteller entwickelt werden. Es gibt einige wenige, gute Beispiele. • Stichprobentests sollten in Testprogrammen keine Anwendung finden, da sie keine verlässlichen Resultate liefern. • Um die nicht detektierten Ereignisse zu minimieren, sind ED-Anlagen sensitiv einzustellen. Daraus resultieren unweigerlich Fehlalarme. In der Verkehrsleitzentrale ist daher eine hohe Fehlalarmtoleranz anzustreben. Je nach Ausführung der Verkehrsleitzentrale kann das verträgliche Mass an Fehlalarmen stark variieren. Wenn zum Beispiel jeder Alarm mit einem akustischen Signal verbunden ist, so kann eine hohe Fehlalarmrate für das Leitstellenpersonal zur Belastung werden. Im Falle einer diskreten und gut verifizierbaren Meldung werden auch hohe Fehlalarmraten toleriert. Dies ist bei der Planung von Leitstellen zu berücksichtigen.
weitergehender Forschungsbedarf:	Die vertiefte Erforschung des Risikosenkungspotenzials von Ereignisdetektionsanlagen und der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung generell ist aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit angezeigt.
Einfluss auf Normenwerk:	Im Rahmen des ASTRA-Richtlinienwerks ist zu prüfen, wie weit bestehende Richtlinien in eine VSS-Norm überführt werden können. Dies gilt generell für allgemein gültige Ausrüstungsstandards in Tunnel (für die Anforderung an die Tunnelbeleuchtung wird dies zurzeit umgesetzt.)

Präsident Begleitkommission:

Name: Vorname:

Amt, Firma, Institut:

Strasse, Nr.:

PLZ: Email:

Ort: Telefon:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Kanton, Land:

Neuchâtel, Suisse

Fax:

032 720 01 01

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht	Projekt Nr.	Titel	Datum
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung <i>Speed on upgrades and downgrades; revision</i> <i>Les vitesses dans les rampes et les pentes; vérification</i>	2010
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen <i>Adhérence sur les chaussées hivernales</i> <i>Skid resistance of winter road surfaces</i>	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden <i>Base de projet pour installations de feux de circulation et guide</i> <i>Design basics for traffic light systems and guidelines</i>	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinkörnungen am Haufwerk <i>Répétabilité et reproductibilité de la résistance à la compression des granulats en vrac</i> <i>Repeatability and Reproducibility of the compressive Strength on the Stack</i>	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux <i>Bestimmung der Anwesenheit und Wirksamkeit von Haftmittel im Asphaltbeton</i> <i>Determination of the presence and efficiency of adhesion agent in asphalt concrete</i>	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen <i>Modèles de conduite sur autoroutes surchargées</i> <i>Speed patterns on congested highways</i>	2010
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN <i>Affinité entre granulats et bitume, mise en application nationale de la EN</i> <i>Affinity between aggregate and bitumen, national implementation of the EN</i>	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II- Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1 <i>Footprint II- Langzeit Belag Performance und Umwelt Monitoring an der A1</i> <i>Footprint II- Long terme performance des chaussées et à la surveillance de l'environnement A1</i>	2010

Bericht	Projekt Nr.	Titel	Datum
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-côtés <i>Entwässerung über das Bankett</i> <i>Road runoff on road sides</i>	2010
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen <i>Coûts supplémentaires engendrés par l'exécution anticipée ou retardée des mesures d'entretien</i> <i>Additional costs caused by bringing forward or delaying of standard interventions for road maintenance</i>	2010
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie <i>Niveaux de service multimodales de la circulation routière - études préliminaires</i> <i>Multimodal level of service of road traffic - preliminary study</i>	2010
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen <i>Aménagement des feux de signalisation pour les personnes a mobilité réduite ou âgées</i> <i>Traffic control systems - Handicapped and older people at signalized intersections</i>	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat <i>Bases pour l'utilisation du béton de recyclage en granulats de béton</i> <i>Fundamentals for the use of recycled concrete comprised of concrete material</i>	2010
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine <i>Neue Bemessungsmethode für Stahlbetonverbundbrücken mit Vollwandträger</i> <i>New method for design of steel-concrete composite plate girder bridges</i>	2010
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht <i>Région test - Méthodes pour l'appréciation des risques Rapport final</i> <i>Test region - Methods of risk assessment Final report</i>	2010
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten <i>Inhibiteurs de corrosion pour la remise en état des ouvrages en béton armé, contaminés par des chlorures</i> <i>Corrosion inhibitors for the rehabilitation of chloride contaminated reinforced concrete structures</i>	2010

