

Masterarbeit

Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation in Straßentunnels

Andreas Muehlthaler, BSc.

Institut für Technische Informatik
Technische Universität Graz

Vorstand: O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Reinhold Weiß



Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Eugen Brenner

Graz, im Jänner 2011

KURZFASSUNG

In dieser Masterarbeit wurde ein Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation in Straßentunnels verwirklicht. Mithilfe dieses Sensorkonzeptes sollen sehr langsam fahrende Fahrzeuge erkannt werden. Diese sehr langsam fahrenden Fahrzeuge stellen ein Sicherheitsrisiko dar, weil sich durch diese Fahrzeuge die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalles oder einer Kollision bei einem Spurwechsel erheblich erhöht. Sollte es gewünscht sein, könnte die Tunnelsteuerung automatisch auf diese Gefahr, mittels Herabsetzen der höchstzulässigen Geschwindigkeit, durch Warnhinweise für andere Verkehrsteilnehmer oder durch das vollständige Sperren des Tunnels, reagieren. Sollte dies nicht gewünscht sein, könnte zumindest der Tunnelwart in der Tunnelwarte von dieser Gefahrenstelle informiert werden. Dies könnte durch einen geeigneten Warnhinweis, oder durch das Aktivschalten des Videobilds von dem betreffenden Streckenabschnitt auf seinen Hauptbildschirm, erfolgen.

Vor der Entwicklung dieses Sensorkonzepts wurde eine detaillierte Analyse der allgemeinen Tunnelsicherheit anhand der Fahrleistung, Unfallrate, Verunglückungsrate, Getötetenrate, Beteiligungsrate und Unfallkostenrate durchgeführt. Diese Kennzahlen dienen zur Ermittlung des Gefahrenpotentials auf Österreichs Straßen und werden unter dem Begriff Unfallrelativzahlen zusammengefasst. Anschließend wurde ein Risikoanalysemodell vorgestellt, welches zur Ermittlung des Unfallrisikos verwendet werden kann. Dieses Modell kann bereits in der Planungsphase von Tunnels verwendet werden. Dadurch kann im Vorfeld herausgefunden werden, ob zusätzliche Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit notwendig sind, was zu einer genaueren Kostenabschätzung helfen kann. Ebenso können unterschiedliche Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit miteinander verglichen werden.

ABSTRACT

This master thesis created a sensor concept in order to detect the traffic situation in traffic tunnels. It detects road users driving very slowly. This way of driving increases the risk of car accidents due to the increased possibility of rear-end collisions or collisions changing traffic lanes. If required, it is possible that the tunnel control program reacts automatically after detecting a slowly driving craft. The tunnel control program augments the speed limit by activating warning notices for other road users or by closing the road tunnel. It is possible to inform the tunnel control station by displaying a notice or by displaying the security video of the particular section on the main screen.

Previously to the sensor concept, a detailed analysis of tunnel safety by using the value of "distance travelled", "Accident rate", "Casualty rate", "fatality rate", "Involvement rate" and "accident cost rate" was conducted. These key dates can be used to calculate the risk in traffic tunnels and can be centralized as "accident relative rates". Afterwards, a tunnel risk model to calculate the risk in traffic tunnels was introduced. It can be used during the planning phase of a road tunnel to detect problems as soon as possible. It is easier and cheaper to include safety methods during the planning phase than during the construction phase. By using this model costs can be estimated in a better way. It is also possible to compare different safety methods.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

Unterschrift

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

date

.....

signature

MEIN BESONDERER DANK GILT...

... Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Eugen Brenner für die Idee und die Vergabe des Diplomarbeitsthemas, die Bereitstellung des Arbeitsplatzes und die persönliche Betreuung im Verlauf der Arbeit,

... der Firma Beckhoff für die Bereitstellung des Bussystems sowie Kurt Korinek und Manfred Haas für die Hilfsbereitschaft bei Fragen bezüglich des Busaufbaus und bei der PLC-Programmierung,

... Ing. Peter Weberhofer der Firma Alpine Austria für die leihweise Bereitstellung von Unterlagen zum Straßen- und Tunnelbau,

... meinen Kollegen der Arbeitsgruppe am Institut für das angenehme Arbeitsklima,

... meinen Studienkollegen Georg, Martin, Ralph und Werner für die gemeinsamen Erlebnisse im wie auch abseits des Studiums,

... meiner Freundin Julia für die schöne Zeit abseits des Studiums,

... meiner Familie, allen voran meinem Bruder Roland und meinen Eltern, für die emotionale und finanzielle Unterstützung während meiner gesamten Ausbildung.

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG	1
1. TUNNELSICHERHEIT	3
1.1. Unfallrelativzahlen	3
1.2. Sicherheitsvergleich	7
1.2.1. Vergleich von Unfällen mit Personenschaden	7
1.2.2. Vergleich der Verletzungsschwere auf unterschiedlichen Straßenarten	11
1.2.3. Vergleich der Verletzungsschwere in Verkehrstunnels	12
1.2.4. Jahresvergleich von Unfällen auf den unterschiedlichen Straßentypen	14
1.2.5. Vergleich der Unfalltypen innerhalb von Verkehrstunnels	16
1.2.6. Vergleich der Unfallrelativzahlen innerhalb von Verkehrstunnels	17
1.2.7. Jahresvergleich von Tunnelunfällen in Autobahntunnels	19
1.2.8. Ausgangspunkt von Unfällen innerhalb von Verkehrstunnels	20
1.2.9. Vergleich von Unfalltyp und Ausgangspunkt innerhalb von Verkehrstunnels	21
1.2.10. Verschulden nach Verkehrsteilnehmer in Verkehrstunnels	23
1.2.11. Vergleich von Alleinschuld und Fahrzeugtyp bei Unfällen	25
1.2.12. Ursache und Ausgangspunkt von Unfällen in Verkehrstunnels	25
1.3. Schlussfolgerung des Sicherheitsvergleiches	27
2. RISIKOANALYSE	29
2.1. Allgemeines Risikoanalysemodell	29
2.1.1. Häufigkeitsanalyse	29
2.1.2. Unfallfolgenanalyse	29
2.1.3. Ereignisbaum	31
2.1.3.1. Basiswert Pannenrate, Basiswert Unfallrate	32
2.1.3.2. Aufteilung der Unfallrate auf Unfalltypen	34
2.1.3.3. Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen	35
2.1.3.4. Folgebrände bei Pannen und Unfällen	38
2.1.3.5. Gefahrgutbeteiligung	38
2.1.3.6. Brand infolge einer Panne	38
2.1.3.7. Schadensszenarien	38
2.1.3.8. Ermittlung des Risikoäquivalentwertes	41
2.1.4. Beispiel der Berechnung des Risikoäquivalentwertes mit einem Ereignisbaum	41
2.1.4.1. Berechnung von Pannenrate und Unfallrate	42
2.1.4.2. Einteilung der Unfalltypen	43
2.1.4.3. Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen	43
2.1.4.4. Folgebrand bei Pannen und Unfällen	46
2.1.4.5. Gefahrgutbeteiligung	47
2.1.4.6. Personengefährdung bei Brand infolge einer Panne	48
2.1.4.7. Schadensausmaßanalyse	49
2.1.4.8. Risikoberechnung	50
2.2. Vereinfachtes Risikoanalysemodell	51
2.2.1. Häufigkeitsäquivalent	51
2.2.2. Schadensausmaßäquivalent	52
2.2.3. Risikoäquivalentwert	52

2.3.	Gefährungsklassen	53
2.4.	Einflussfaktoren zur Senkung des Risikos	55
2.4.1.	Verkehrsführung	55
2.4.2.	Tunnellänge	55
2.4.3.	Lüftungsart	55
2.4.4.	Abstand der Notausgänge	55
2.4.5.	Verkehrsstärke	55
2.4.6.	Aktuelle Verkehrssituation (Stau, normale Verkehrsverhältnisse)	56
2.4.7.	LWK-Anteil	56
2.4.8.	Anteil des Gefahrguttransports am Schwerverkehr	56
2.4.9.	Längsneigung vor dem Tunnel	56
2.4.10.	Längsneigung im Tunnel	56
2.4.11.	Zulässige Fahrgeschwindigkeit	57
2.4.12.	Zeitlicher Ablauf Detektion – Inbetriebnahme Lüftung – Evakuierung	57
2.4.13.	Abstellstreifen/Pannenbucht	57
2.4.14.	Fahrstreifenbreite	57
3.	SENSORENKONZEPT	58
3.1.	Grundlage	58
3.2.	Technische Ausführung	60
3.3.	Technische Grundlagen	63
3.3.1.	Abtastfrequenz der Sensoren	63
3.3.1.1.	Berechnungsbeispiel	63
3.3.1.2.	Ermittelte Ergebnisse	64
3.3.2.	Überlagerungen	67
3.3.3.	Erkennung von defekten Sensoren	74
3.4.	Tunnelmodell	76
3.4.1.	Funktionsumfang des Tunnelmodells	76
3.4.2.	Betriebsarten	79
3.4.2.1.	Normalbetrieb (Normal Operation)	79
3.4.2.2.	Notfallbetrieb (Emergency Operation)	80
3.4.2.3.	linke Röhre sperren (Lock Tube 1 - left tube)	80
3.4.2.4.	rechte Röhre sperren (Lock Tube 2 - right tube)	80
3.4.2.5.	Gegenfahrbetrieb linke Röhre (Two-way Traffic Tube 1 - left tube)	81
3.4.2.6.	Gegenfahrbetrieb rechte Röhre (Two-way Traffic Tube 2 - right tube)	81
3.4.2.7.	Wartungsbetrieb linke Röhre (Service Operation Tube 1 - left tube)	81
3.4.2.8.	Wartungsbetrieb rechte Röhre (Service Operation Tube 2 - left tube)	81
3.4.2.9.	Warnbetrieb linke Röhre (Caution Operation Tube 1 -left tube)	82
3.4.2.10.	Warnbetrieb rechte Röhre (Caution Operation Tube 2 -right tube)	82
3.4.3.	Arbeitsschritte	82
3.4.4.	Tunnelsteuerprogramm	82
4.	ECHTZEITSYSTEM UND BUSSYSTEME	91
4.1.	Kennwerte für digitale Systeme	92
4.2.	Fast Ethernet	98
4.3.	Echtzeit – Ethernet Bussysteme	99
4.3.1.	EtherCAT	99
4.3.2.	POWERLINK	100
4.3.3.	PROFINET-IRT	101
4.4.	Vergleich der Bussysteme anhand ihrer Zykluszeiten	102

4.4.1.	Grundlagen zur Berechnung der minimalen Zykluszeit	103
4.4.1.1.	EtherCAT	103
4.4.1.2.	POWERLINK	106
4.4.1.3.	PROFINET IRT	107
4.4.2.	Berechnung der minimalen Zykluszeit	107
4.4.2.1.	EtherCAT	108
4.4.2.2.	POWERLINK	109
4.4.2.3.	PROFINET IRT	109
4.4.2.4.	Gegenüberstellung	110
AUSBLICK		111
ANHANG		112
LITERATURVERZEICHNIS		119
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		125
TABELLENVERZEICHNIS		126
FORMELVERZEICHNIS		128
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS		130
STICHWORTVERZEICHNIS		131

EINLEITUNG

Durch die stetig steigende Anzahl an Verkehrsteilnehmern wird der Straßenausbau seit Jahren vorangetrieben. Jedoch muss für den Straßenausbau aufgrund der großen Bebauungsdichte sowie der gebirgigen Landschaft innerhalb von Österreich sehr häufig auf Verkehrstunnels zurückgegriffen werden. Verkehrstunnels beseitigen das Problem der Landschaftsfläche und ermöglichen eine schnelle und gut ausgebaute Verkehrsverbindung. Diese Art der Bauweise ist zwar gut um Umfahrungstrassen sowie Verbindungen zwischen schwer zugänglichen Gebieten zu ermöglichen, haben jedoch den Nachteil, dass sie zum einen im Bau sehr teuer sind, aber auch während des Betriebes zu großen Kosten führen. Neben diesem erhöhten Kostenaufwand besteht weiters das Problem des erhöhten Risikos bei Unfällen. Denn spätestens seit dem Tauernunglück, das sich am 29.05.1999 ereignete, und bei dem zwölf Menschen ihr Leben ließen und weitere 42 verletzt wurden, ist jedem Österreicher bewusst, dass Tunnels ein erhöhtes Risiko für Verkehrsteilnehmer darstellen.¹ Um diesem erhöhten Risiko entgegenzuwirken, müssen spezielle Vorkehrungen, angefangen von einer Unfalldatenbank, der Unfallvermeidung, der Branddetektion bis hin zur schnellen Evakuierung des Tunnels für die Tunnelsicherheit getroffen werden. Die österreichische „Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft“ - kurz ASFINAG - hat dafür insgesamt 1.541 Ereignisse zwischen dem 01.01.2006 bis 25.02.2010 erfasst und in einer Tunneldatenbank gespeichert. Diese Einträge teilen sich in Ereignisse mit Personenschaden (377), Ereignisse mit Sachschaden (1.080), Ereignisse aufgrund eines Feuers (46) und anderen Ereignissen (38) auf. Zusätzlich wurden in der Erhebung alle Tunnelsperrungen und deren Gründe ermittelt. Im Betrachtungszeitraum von 01.01.2009 bis 25.02.2010 wurden insgesamt 8.473 Tunnelschließungen durchgeführt. Davon erfolgten 1.281 planmäßige Schließungen, 6.576 Schließungen durch das Auslösen eines Ereignisses (z.B. Unfälle, Feuer) und 616 Schließungen aufgrund eines Vorfalles wie dem Ausfall des Tunnellichtes oder dem Auslösen der Höhenkontrolle vor dem Tunnel. In Summe wurden die Tunnels für 175 Tage, 1 Stunde und 56 Minuten mit einer durchschnittlichen Schließungsdauer von 30 Minuten geschlossen.²

¹ [Wiki_2 2010] Tauerntunnel

² [Schedl 2010] Austrian Tunnel Safety Initiative

Desweiteren wurden viele Autobahntunnels auf den neuesten Stand der Technik gebracht, sowie Tunnelwarten modernisiert. Als glänzendes Beispiel der Tunnelwartenmodernisierung sei die neue Tunnelwarte der S35 in Bruck an der Mur erwähnt. Diese Tunnelwarte überwacht alle Verkehrstunnels der S6 Semmering Schnellstraße zwischen St. Marein im Mürztal und Leoben Ost, die Verkehrstunnels der S35 Brucker Schnellstraße, sowie der S36 Murtal Schnellstraße. In weiterer Folge soll die Tunnelwarte Bruck/Mur auch die Überwachung der Tunnelwarten Gleinalm und Mürzzuschlag übernehmen. Nach dieser Zusammenlegung, dem Ausbau der Schnellstraße zwischen Judenburg und Scheifling sowie der Errichtung der zweiten Gleinalmtunnelröhre, wird die Tunnelwarte 218km Schnellstraße mit einer inkludierten Tunnellänge von 71,01km überwachen.³

Eine Möglichkeit diese zentralisierte Überwachung zu verbessern, wäre eine automatische Analyse der Verkehrssituation. Diese automatische Analyse soll den Tunnelwart auf mögliche Gefahrenstellen aufmerksam machen, damit dieser einfacher Problemstellen erkennen und gegebenenfalls schneller Gegenmaßnahmen einleiten kann. Diese Masterarbeit soll daher ein Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation in Straßentunnels liefern, welches Problemsituationen im Vorfeld erkennen kann.

Zu Beginn wurde weiters die Tunnelsicherheit im Allgemeinen begutachtet und darauf basierend ein Risikoanalysemodell beschrieben. Abschließend wurde eine kurze Gegenüberstellung von Echtzeitbussystemen durchgeführt, da diese die Grundlage für das entwickelte Sensorkonzept darstellt.

³ [Gruber 2010] Highway and Tunnel Control Center S35

1. TUNNELSICHERHEIT

1.1. Unfallrelativzahlen

Um eine Aussage der Verkehrssicherheit innerhalb von Verkehrstunnels, Autobahnen, Schnellstraßen und Freilandstraßen treffen zu können, muss man zuerst diverse Unfallrelativzahlen ermitteln. Diese Unfallrelativzahlen geben Aufschluss über die Anzahl der Unfälle, die Verunglückten, die Getöteten sowie die Kosten, welche durch diese Unfälle verursacht wurden. Diese Unfallrelativzahlen sind auf die Fahrleistung bezogen, wodurch sich fahrleistungsbezogene Unfallrisiken ermitteln lassen. Anhand dieser Unfallrelativzahlen können die einzelnen Straßenabschnitte miteinander verglichen und bewertet werden.

Berechnung der Unfallrelativzahlen:⁴

UPS	Anzahl der Unfälle auf den betrachteten Straßenabschnitten während des Untersuchungszeitraumes. [Anzahl Unfälle]
jDTV	Jahresdurchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Kfz pro Tag]
t	Untersuchungszeitraum [Jahren]
L	Länge des betrachteten Straßenabschnittes [km]
V	Anzahl der verunglückten Verkehrsteilnehmer auf den betrachteten Verkehrsabschnitten während des Untersuchungszeitraumes. [Anzahl Personen]
B	Anzahl der beteiligten Fahrzeuge bei Unfällen mit Personenschaden auf den betrachteten Verkehrsabschnitten während des Untersuchungszeitraumes. [Anzahl Fahrzeuge]

Fahrleistung (FL):

Zurückgelegte Entfernung aller gefahrenen Kfz innerhalb eines Beobachtungszeitraumes.

$$FL = jDTV * 365 * t * L$$

Formel 1: Fahrleistung

⁴ [Robatsch 2004] Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr

Unfallrate (Ur):

Unfälle mit Personenschaden pro einer Million Kfz-Kilometer

$$Ur = \frac{UPS * 10^6}{jDTV * 365 * t * L} = \frac{UPS * 10^6}{FL}$$

Formel 2: Unfallrate

Verunglückungsrate (Vr):

Verunglückte pro einer Million Kfz-Kilometer

$$Vr = \frac{V * 10^6}{jDTV * 365 * t * L} = \frac{V * 10^6}{FL}$$

Formel 3: Verunglückungsrate

Getötetenrate (Gr):

Getötete pro einer Milliarde Kfz-Kilometer

$$Gr = \frac{G * 10^9}{jDTV * 365 * t * L} = \frac{G * 10^9}{FL}$$

Formel 4: Getötetenrate

Beteiligungsrate (Br):

An Unfällen mit Personenschaden beteiligte Fahrzeuge pro einer Million Kfz-Kilometer

$$Br = \frac{B * 10^6}{jDTV * 365 * t * L} = \frac{B * 10^6}{FL}$$

Formel 5: Beteiligungsrate

Unfallkostenrate (UKr):

Unfallkosten in Euro aufgrund der Unfälle mit Personenschaden pro 1.000 Kfz-Kilometer

$$UKr = \frac{Kosten * 10^3}{jDTV * 365 * t * L} = \frac{Kosten * 10^3}{FL}$$

Formel 6: Unfallkostenrate

Die Unfallkosten werden anhand der volkswirtschaftlichen Kosten für Getötete (805.233 EUR), Schwerverletzte (43.605 EUR), Leichtverletzte (3.698 EUR) und für Sachschaden bei Unfällen mit Personenschaden (4.870 EUR) berechnet.⁵ Zur Vereinfachung wird bei der Berechnung des Sachschadens (von Unfällen mit Personenschaden) der Kostensatz für schweren Sachschaden verwendet. Als Grundlage des Kostensatzes werden die Daten aus dem Jahr 1993 verwendet. Nach [Sommer 2007] werden die Unfallkosten anhand von sieben Kostenbereichen berechnet, welche in drei Untergliederungen aufgeteilt werden können.⁶

⁵ [Metelka 1997] Österreichische Unfallkosten- und Verkehrssicherheitsrechnung Straße

⁶ [Sommer 2007] bfu-Report; Volkswirtschaftliche Kosten

- Direkte Kosten
 - ◇ Medizinische Heilungskosten
 - ◇ Sachschäden
- Indirekte Kosten
 - ◇ Produktionsausfall
 - ◇ Wiederbesetzungskosten
 - ◇ Administrative Kosten von Versicherungen
 - ◇ Polizei- und Rechtsfolgekosten
- Immaterielle Kosten
 - ◇ Immaterielle Kosten

Ebenso ist eine Berechnung nach [Bures 2009] möglich. Diese gliedert die Unfallkosten nach ihrer Gewichtung.

- Wert des menschlichen Leids (49%)
- Kosten von Sachschäden (22%)
- Verlust an Leistungspotenzial (18%)
- Verwaltungskosten Versicherungen (7%)
- Rechtskosten (2%)
- Medizinische Behandlungskosten (1%)

Nähere Informationen zur volkswirtschaftlichen Kostenberechnung können aus den Arbeiten von Heini Sommer⁷, M. Metelka⁸, Herbert Baum⁹, Doris Bures¹⁰ sowie der Herry Consult GmbH¹¹ entnommen werden.

⁷ [Sommer 2007] bfu-Report; Volkswirtschaftliche Kosten

⁸ [Metelka 1997] Österreichische Unfallkosten- und Verkehrssicherheitsrechnung Straße

⁹ [Baum 2010] Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle

¹⁰ [Bures 2009] Verkehrssicherheitsprogramm 2002-2010

¹¹ [Herry Consult 2008] Unfallkostenrechnung Straße 2007

1.2. Sicherheitsvergleich¹²

1.2.1. Vergleich von Unfällen mit Personenschaden

Zwischen 1999 und 2003 ereigneten sich auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen 442 Tunnelunfälle, wobei 789 Personen involviert waren und davon 65 Personen getötet wurden. Die volkswirtschaftlichen Kosten betragen 64,5 Millionen Euro. Die Werte der Fahrleistung auf Freilandstraßen sind aufgrund der Fahrleistungsermittlung ungenau.

	Autobahn	Schnellstraße	Freilandstraße	Tunnel
UPS [absolut]	12.484	1.130	34.480	442
Verunglückte [absolut]	20.465	1.700	52.727	789
Getötete [absolut]	675	115	1.601	65
Unfallkosten [Mio. Euro]	915,3	123,4	2.340,7	64,5
Fahrleistung [Mrd. Kfz-km]	91,36	7,50	79,67	4,23

Tabelle 1: Vergleich der Unfälle mit Personenschaden 1999-2003 (Absolutzahlen)¹³

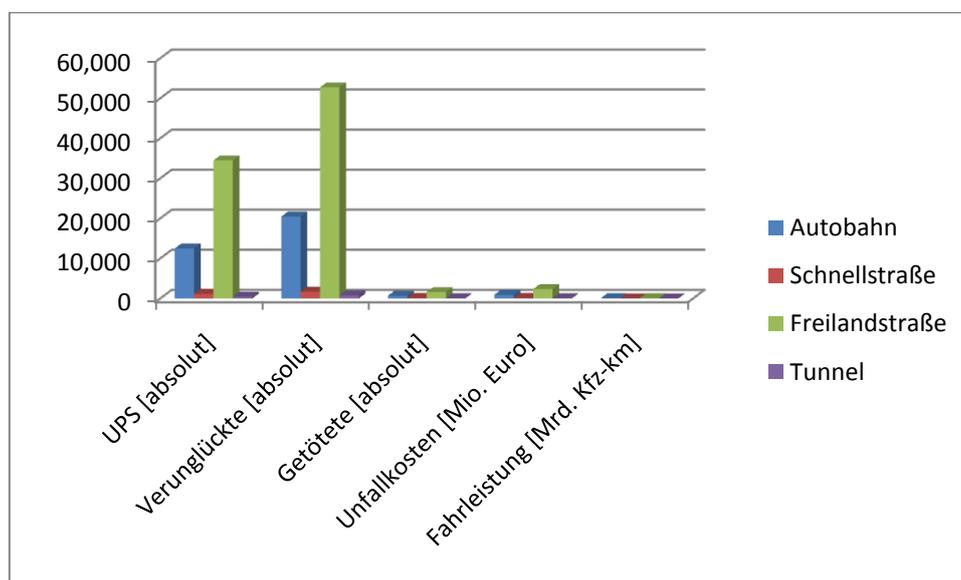


Abbildung 1: Vergleich der Unfälle mit Personenschaden 1999-2003 (Absolutzahlen)

¹² Im folgenden Kapitel wird des Öfteren anstelle von „Autobahnen und Schnellstraßen“ nur „Autobahnen“ geschrieben. Sollte eine Differenzierung zwischen Autobahnen und Schnellstraßen notwendig sein, wird darauf hingewiesen bzw. werden die Werte in unterschiedlichen Spalten der Tabellen/Diagramme/Abbildungen dargestellt.

¹³ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels – Seite 8

Wie in Abbildung 1 erkennbar ist, ist ein Vergleich der absoluten Unfallzahlen nicht zielführend, da diese voneinander sehr stark abweichen können. Die Abweichung ist auf die große Differenz der Fahrleistung und der daraus resultierenden Unfallzahlen zurückzuführen.

Berechnungsbeispiel:

$$Ur = \frac{UPS * 10^6}{FL} = \frac{12484 * 10^6}{91,36 * 10^9} = 0,136646 \left[\frac{UPS}{1 Mio Kfz km} \right]$$

$$Vr = \frac{V * 10^6}{FL} = \frac{1700 * 10^6}{7,50 * 10^9} = 0,226667 \left[\frac{V}{1 Mio Kfz km} \right]$$

$$UKr = \frac{Kosten * 10^3}{FL} = \frac{915,3 * 10^6 * 10^3}{91,36 * 10^9} = 10,0186 \left[\frac{Kosten}{1000 Kfz km} \right]$$

$$Gr = \frac{G * 10^9}{FL} = \frac{1601 * 10^9}{79,67 * 10^9} = 20,0954 \left[\frac{G}{1 Mrd Kfz km} \right]$$

Um eine genauere Aussage bezüglich der Sicherheit von Verkehrstunnels untereinander und im Verhältnis zur Freilandstraße und Autobahn machen zu können, ist es ratsam die absoluten Zahlen auf ihre Fahrleistung bezogen zu normieren. Diese Umrechnung erfolgt anhand des oben exemplarisch angeführten Berechnungsbeispiels, wobei sich das in Tabelle 2 ersichtliche Ergebnis ergibt.

1. Tunnelsicherheit

Unfallrelativzahlen	Autobahn	Schnellstraße	Freilandstraße	Tunnel
Unfallrate [UPS/1Mio.Kfz-km]	0,137	0,151	0,433	0,104
Verunglückungsrate [V/1Mio.Kfz-km]	0,224	0,227	0,662	0,186
Unfallkostenrate [Euro/1000Kfz-km]	10,0	16,4	29,0	15,2
Getötetenrate [Tote/1Mrd.Kfz-km]	7,4	15,3	20,1	15,4

Tabelle 2: Unfallrelativzahlen für 1999-2003¹⁴

Obwohl Tunnels mit einem Wert von 0,104 die niedrigste Unfallrate aufweisen und auch die Verunglückungsrate mit 0,186 deutlich niedriger als bei Autobahnen und Schnellstraßen ist, weisen die Unfallkostenrate und Getötetenrate annähernd die gleiche Höhe wie auf Schnellstraßen auf, sind jedoch um vieles höher als auf Autobahnen.

¹⁴ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 8

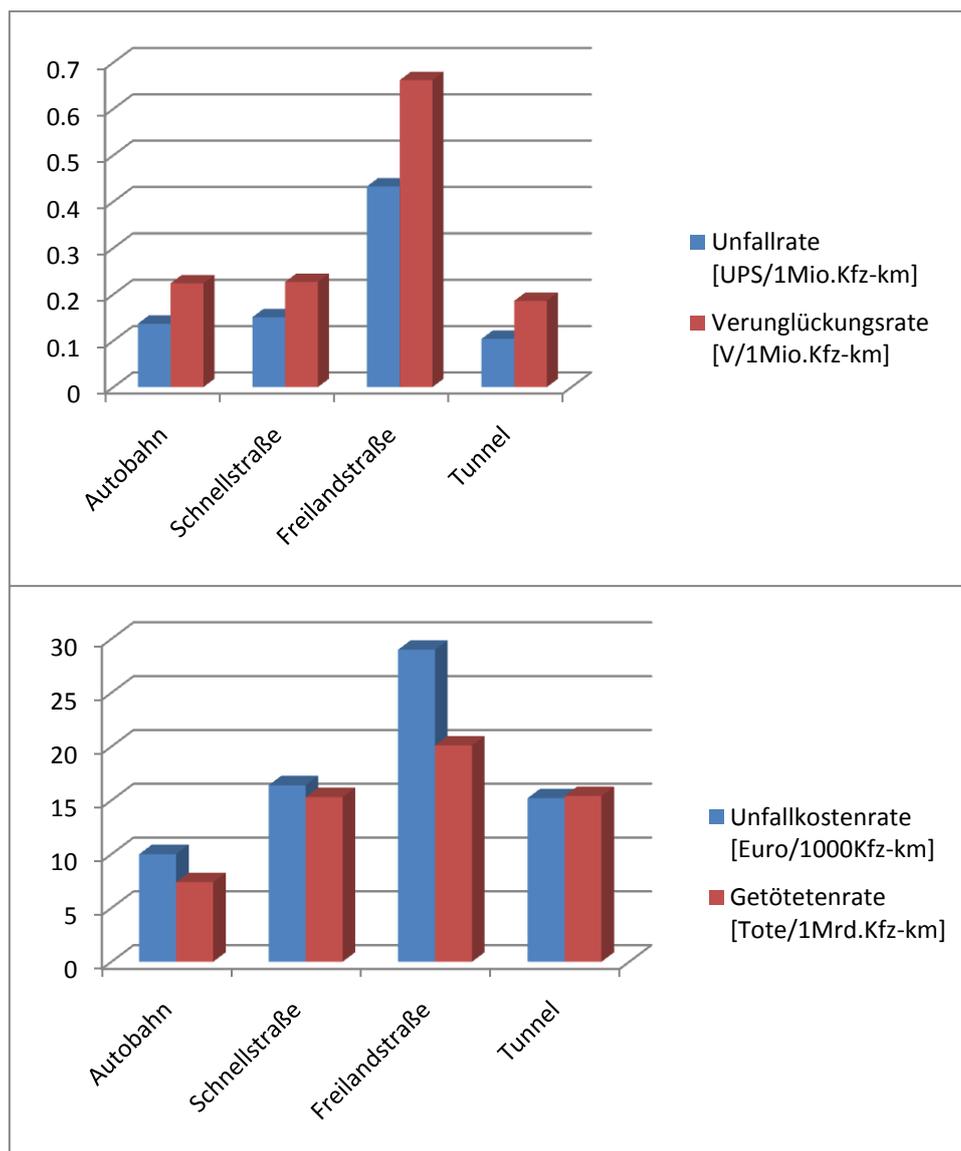


Abbildung 2: Unfallrelativzahlen zwischen 1999-2003

Dass eine Darstellung für den Vergleich von Unfallzahlen anhand ihrer Relativzahlen sinnvoller ist, kann man sofort erkennen, wenn man Abbildung 1 und Abbildung 2 miteinander vergleicht. In Abbildung 1 kann man nur sehr schwer die Unfälle auf Autobahnen mit den Unfällen auf Schnellstraßen vergleichen. Bei einem Vergleich der Absolut-Zahlen der Unfälle untereinander, könnte man meinen, dass die österreichischen Schnellstraßen viel sicherer seien als die österreichischen Autobahnen. In Wirklichkeit ereigneten sich im betreffenden Betrachtungszeitraum aber 12.484 Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen, hingegen nur 1.130 Unfälle mit Personenschaden auf Schnellstraßen. Ebenso mussten 675 Menschen auf den Autobahnen und nur 115 Menschen auf den Schnellstraßen ihr Leben lassen. Berücksichtigt man jedoch wie in Abbil-

dung 2 die Fahrleistung auf beiden Straßentypen mit, kann man erkennen, dass es unwahrscheinlicher ist, in einen Unfall mit Personenschaden auf den österreichischen Autobahnen verwickelt zu werden als auf den österreichischen Schnellstraßen.

1.2.2. Vergleich der Verletzungsschwere auf unterschiedlichen Straßenarten

$$SV[\%] = \frac{\text{Anzahl Schwerverletzte}}{\text{Anzahl Gesamtverletzte}} * 100 = \frac{2784}{20465} * 100 = 13,6037 [\%]$$

	Autobahn		Schnellstraße		Landesstraße		Tunnel	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Tote	675	3,3	115	6,8	1.601	3,0	65	8,2
Schwerverletzte	2.784	13,6	271	15,9	9.117	17,3	118	15,0
Verletzungsgrad nicht erkennbar	3.176	15,5	215	12,6	8.290	15,7	66	8,34
Leichtverletzte	13.830	67,6	1.099	64,6	33.719	64,0	540	68,4
Verunglückte	20.465	100	1.700	100	52.727	100	789	100

Tabelle 3: Vergleich der Verletzungsschwere zwischen 1999-2003¹⁵

Die Verletzungsschwere ist bei Unfällen innerhalb von Tunnels deutlich höher als bei anderen Straßentypen. Ein Unfall mit Personenschaden auf der Landstraße oder Autobahn führt in ca. drei Prozent der Fälle zu einem Todesfall, jedoch kommt es bei einem Unfall mit Personenschaden innerhalb eines Tunnels in acht Prozent der Fälle zu einem Todesfall.

¹⁵ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 9

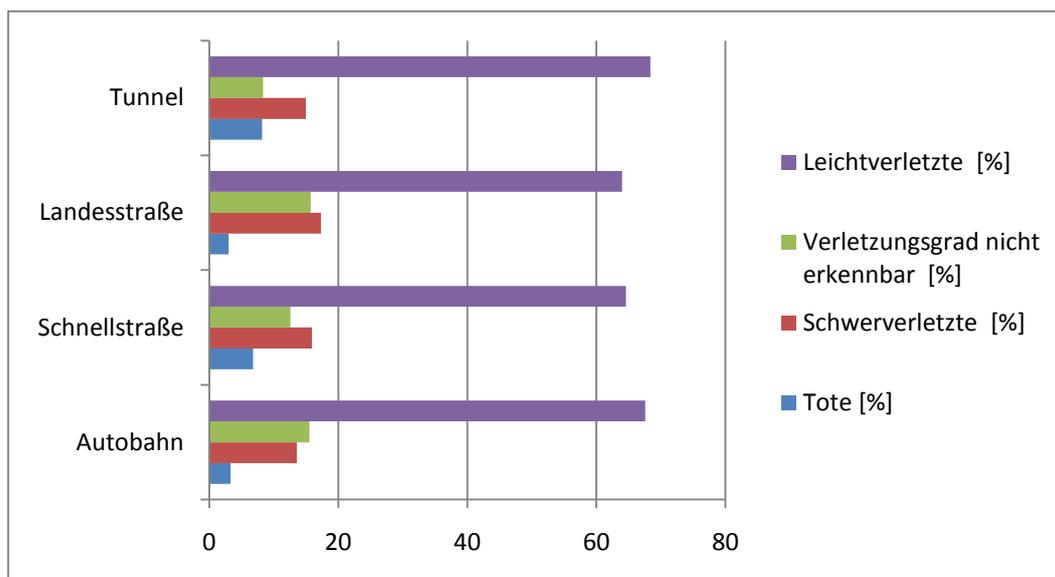


Abbildung 3: Vergleich der Verletzungsschwere auf unterschiedlichen Straßenarten

Bei genauerer Betrachtung von Abbildung 3 kann man erkennen, dass die Todesrate auf Autobahnen und Landesstraßen annähernd identisch ist. Die Anzahl der Schwerverletzten ist auf Landesstraßen jedoch um einiges höher. Desweiteren weisen Tunnels eine sehr hohe Schwerverletztenrate und die höchste Todesrate auf. Sollte man in einen Unfall mit Personenschaden innerhalb eines Tunnels verwickelt sein, führt dieser eher zu einer Schwerverletzung bzw. zum Tod als auf der Autobahn.

1.2.3. Vergleich der Verletzungsschwere in Verkehrstunnels

	Tunnel mit Richtungsverkehr		Tunnel mit Gegenverkehr			
	Autobahn, Schnellstraße		Autobahn, Schnellstraße		Landesstraße	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Tote	27	6,3	38	10,6	3	4,4
Schwerverletzte	62	14,4	56	15,7	14	20,6
Verletzungsgrad nicht erkennbar	37	8,6	29	8,1	12	17,6
Leichtverletzte	306	70,8	234	65,5	39	57,4
Verunglückte	432	100	357	100	68	100

Tabelle 4: Vergleich der Verletzungsschwere in Tunnels zwischen 1999-2003¹⁶

¹⁶ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 12, 15

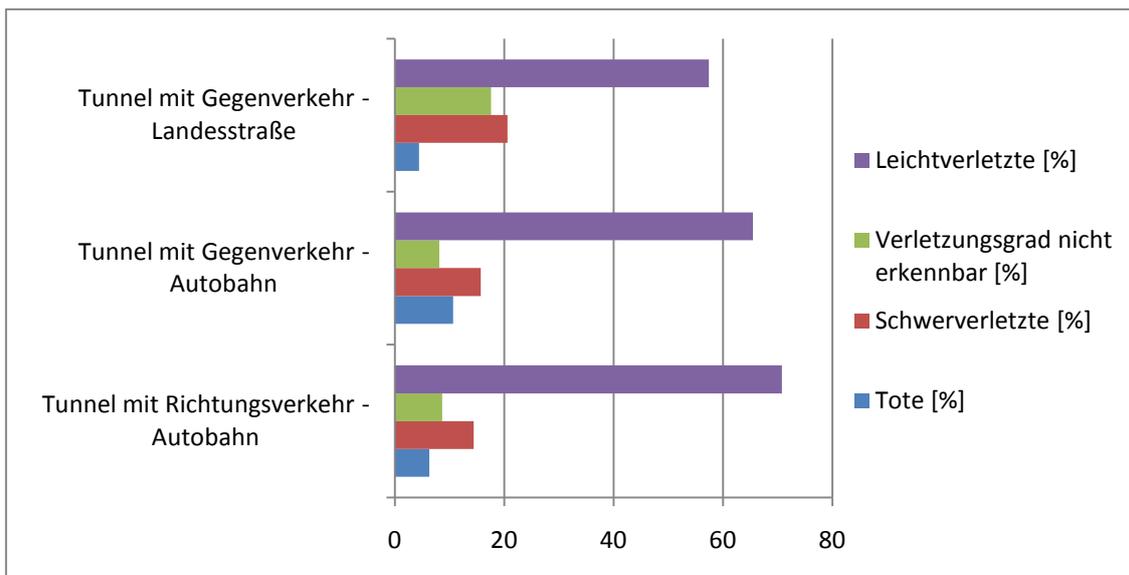


Abbildung 4: Vergleich der Verletzungsschwere in Verkehrstunnels

Vergleicht man wie in Abbildung 4 die Verletzungsschwere zwischen den einzelnen Tunneltypen miteinander, kann man erkennen, dass Unfälle mit Personenschaden auf Landesstraßen eine sehr geringe Todesrate im Vergleich zu Tunnels auf einer Autobahn, aufweisen. Dies ist auf die geringere Geschwindigkeit und die kürzere Länge der Landesstraßentunnels zurückzuführen. Genau aus diesem Grund ist die Todesrate bei Autobahntunnels mit Gegenverkehr um vieles größer als bei Autobahntunnels mit Richtungsverkehr, da im Durchschnitt die Autobahntunnels mit Gegenverkehr länger sind als Autobahntunnel mit Richtungsverkehr. Zusätzlich zu diesem Längenunterschied weisen Tunnels mit Gegenverkehr das zusätzliche Risiko eines Begegnungsunfalles auf.

1.2.4. Jahresvergleich von Unfällen auf den unterschiedlichen Straßentypen

Jahr	Tunnels mit Gegenverkehr		Tunnels mit Richtungsverkehr		Autobahn und Schnellstraße gesamt		Anteil der Tunnelunfälle	
	Anzahl der Unfälle	Anzahl der Verunglückten	Anzahl der Unfälle	Anzahl der Verunglückten	Anzahl der Unfälle	Anzahl der Verunglückten	Anzahl der Unfälle [%]	Anzahl der Verunglückten [%]
1999	30	93	55	90	2.761	4.454	3,1	4,1
2000	42	72	57	88	2.657	4.405	3,7	3,6
2001	30	69	45	76	2.679	4.340	2,8	3,3
2002	34	69	63	89	2.672	4.434	3,6	3,6
2003	31	54	55	89	2.845	4.532	3,0	3,2
Durchschnitt	33	71	55	86	2.723	4.433	3,2	3,6

Tabelle 5: Vergleich von Unfällen und Verunglückten zwischen 1999-2003¹⁷

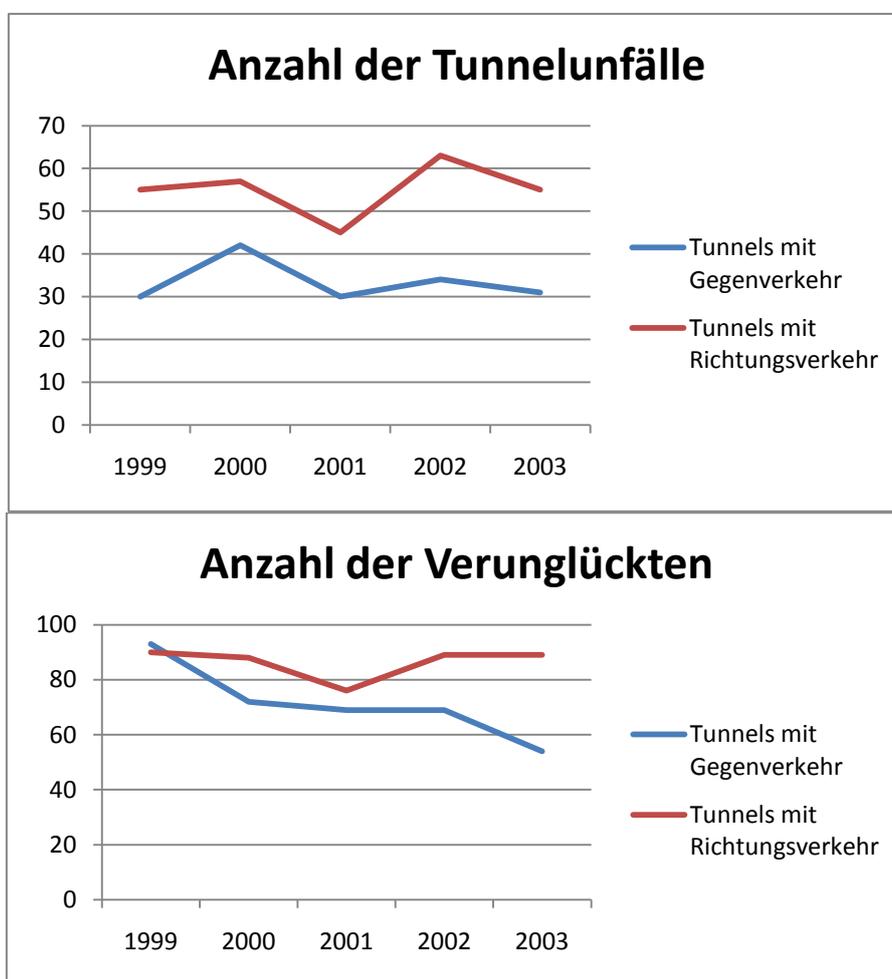


Abbildung 5: Vergleich der Jahresunfallzahlen und Jahresverunglückten

¹⁷ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 11

Betrachtet man den Verlauf der Unfallzahlen zwischen 1999 und 2003 in Abbildung 5 näher, kann man erkennen, dass die Anzahl der Unfälle über die Jahre hinweg annähernd gleich geblieben ist. Jedoch ist die Anzahl der Verunglückten bei Unfällen mit Personenschaden in Tunnels mit Gegenverkehr deutlich zurückgegangen. Wie in Tabelle 5 zu sehen ist, ereigneten sich pro Jahr durchschnittlich 2.723 Unfälle mit 4.433 Verunglückten auf Österreichs Autobahnen und Schnellstraßen. Davon ereignen sich durchschnittlich 88 der Unfälle in Tunnels, wobei durchschnittlich 33 Unfälle mit 71 Verunglückten in Tunnels mit Gegenverkehr und 55 Unfälle mit 86 Verunglückten in Tunnels mit Richtungsverkehr stattfanden.

1.2.5. Vergleich der Unfalltypen innerhalb von Verkehrstunnels

Unfalltyp	Autobahn und Schnellstraßen				Tunnels mit Gegenverkehr			
	Gesamt		Tunnels mit Richtungsverkehr		Autobahn, Schnellstraße		Landesstraße	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Alleinunfälle	3.262	39,8	45	36,3	15	15,5	6	27,3
Richtungsunfälle	4.465	54,5	76	61,3	45	46,4	10	45,5
Begegnungsverkehr	229	2,8	2	1,6	36	37,1	4	18,2
Sonstige Typen	241	2,9	1	0,8	1	1,0	2	9,1
UPS gesamt	8.197	100	124	100	97	100	22	100

Tabelle 6: Vergleich von Unfalltypen zwischen 1999-2003¹⁸

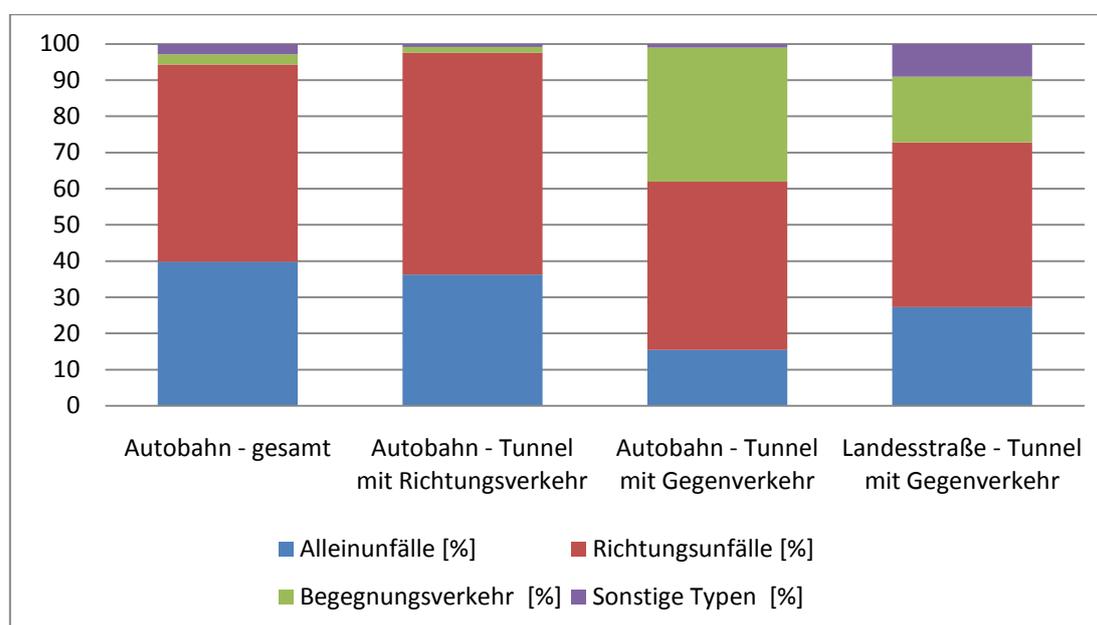


Abbildung 6: Vergleich von Unfalltypen zwischen Tunnels und dem Autobahnnetz

Wie in Tabelle 6 und Abbildung 6 ersichtlich ist, sind Richtungsunfälle mit 61,3 Prozent in Tunnels mit Richtungsverkehr und 46,4 bzw. 45,5 Prozent in Tunnels mit Gegenverkehr die häufigste Unfallursache innerhalb von Verkehrstunnels. Im verringerten Ausmaß trifft dies auch auf das restliche Autobahnnetz zu. Hier treten Richtungsunfälle zu 54,5 Prozent auf. Bei einem Richtungsunfall, welcher sich beispielweise als Auffahrunfall oder als Kollision durch Spurwechsel ereignen kann, sind neben dem Unfallverursacher nur Verkehrsteilnehmer der gleichen Fahrtrichtung beteiligt. Die zweithäufigste Unfallursache bei Tunnels mit Richtungsverkehr und Landesstraßentunnels mit

¹⁸ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 12, 15

Gegenverkehr ist der Alleinunfall. Dieser tritt bei Autobahntunnels mit Richtungsverkehr zu 36,3 Prozent und bei Landesstraßentunnels mit Gegenverkehr zu 27,3 Prozent auf. Bei einem Alleinunfall ist neben dem Unfallverursacher kein weiterer Verkehrsteilnehmer beteiligt. Dies kann geschehen, wenn ein einzelner Verkehrsteilnehmer gegen die Tunnelwand fährt oder es zu einem Fahrzeugbrand kommt, welcher in weiterer Folge zu einem Personenschaden führt. In Autobahntunnels mit Gegenverkehr ist der Alleinunfall mit 15,5 Prozent nur die dritthäufigste Unfallart. Hier ist der Unfalltyp mit dem Begegnungsverkehr die zweithäufigste Unfallursache. Dieser tritt bei Autobahntunnels mit Gegenverkehr zu 37,1 Prozent auf. In Landesstraßentunnels mit Gegenverkehr ist der Begegnungsverkehr mit 18,2 Prozent die dritthäufigste Unfallart. Erwartungsgemäß spielt der Unfalltyp mit dem Begegnungsverkehr in Autobahntunnels mit Richtungsverkehr nur eine geringe Rolle. Diese beiden (1,6 Prozent) Unfälle wurden durch Geisterfahrer verursacht. Bei einem Unfall mit dem Begegnungsverkehr kommt es zu einer Kollision zwischen Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrtrichtungen. Dies kann durch Abkommen von der Spur (Tunnels mit Gegenverkehr), Geisterfahrer bzw. schlechte (nicht vorhandene) bauliche Trennung der Fahrspuren zustande kommen.

1.2.6. Vergleich der Unfallrelativzahlen innerhalb von Verkehrstunnels

	Tunnels mit Richtungsverkehr	Tunnels mit Gegenverkehr	
		Autobahn, Schnellstraße	Landesstraße
Unfallrate [UPS/1Mio.Kfz-km]	0,118	0,076	0,082
Verunglückungsrate [V/1Mio.Kfz-km]	0,185	0,162	0,139
Unfallkostenrate [Euro/1000Kfz-km]	12,2	16,3	8,0
Getötetenrate [Tote/1Mrd.Kfz-km]	11,6	17,2	6,2

Tabelle 7: Vergleich von Unfallrelativzahlen in Tunnels zwischen 1999-2003¹⁹

¹⁹ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 12, 15

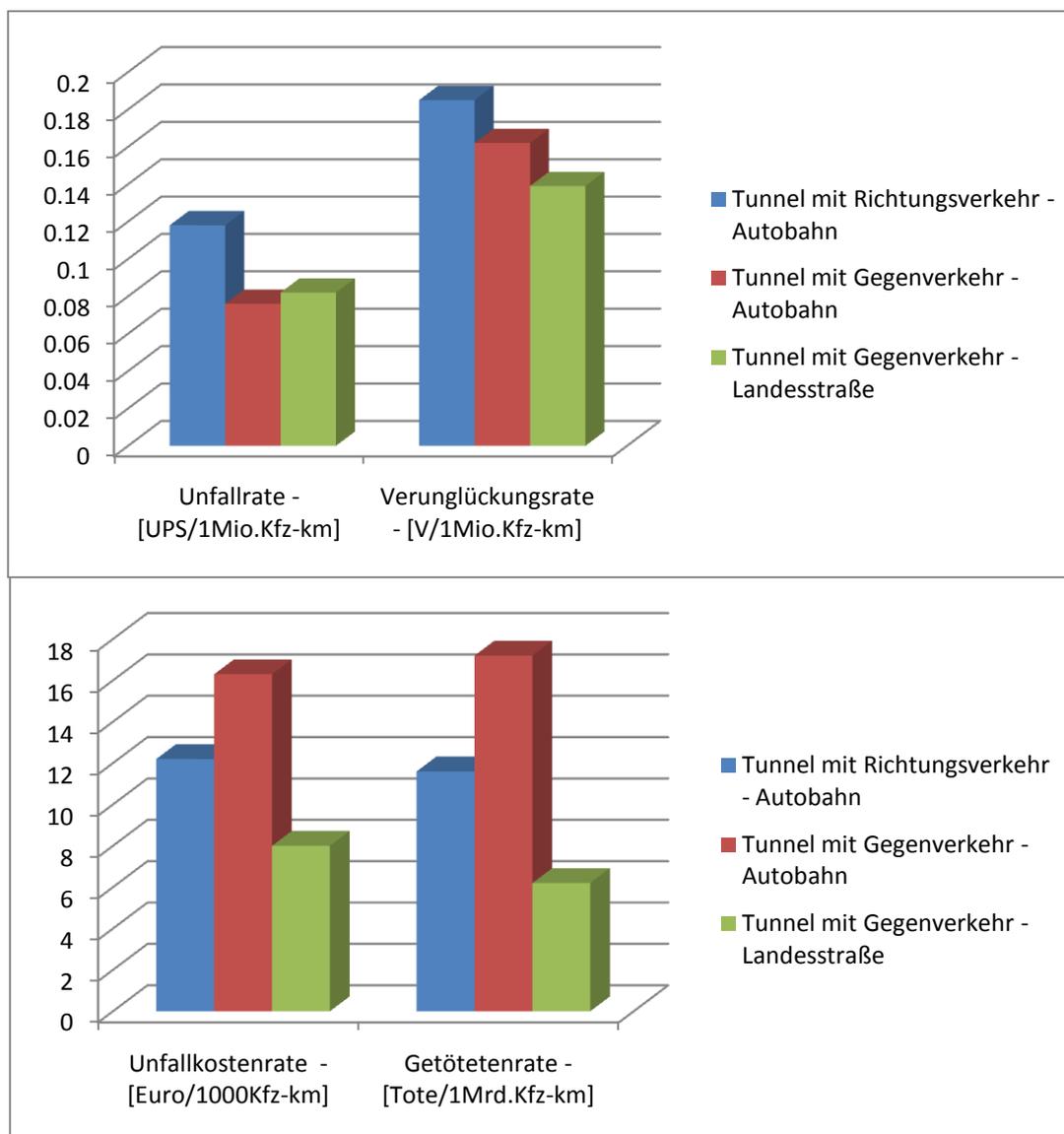


Abbildung 7: Vergleich von Unfallrelativzahlen in Verkehrstunnels

Stellt man in Tabelle 7 sowie in Abbildung 7 die Unfallrelativzahlen der unterschiedlichen Tunnelarten gegenüber, kann man erkennen, dass die Unfallrate in Tunnels mit Richtungsverkehr um vieles höher ist, als in Tunnels mit Gegenverkehr. Jedoch sind die Unfallkostenrate sowie die Getötetenrate in Autobahntunnels mit Gegenverkehr um vieles höher als in Autobahntunnels mit Richtungsverkehr und Landesstraßentunnels mit Gegenverkehr. Kommt es in Autobahntunnels mit Gegenverkehr zu Unfällen mit Personenschaden, führt dies zu 17,2 Toten pro einer Milliarde Kfz-Kilometer. Dies liegt an der hohen Geschwindigkeit und der großen Wahrscheinlichkeit eines direkten Zusammenstoßes mit dem Begegnungsverkehr. Auf Landesstraßen kommt es aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeit und der Kürze der Verkehrstunnels zu einer Rate von 6,2

toten Personen pro einer Milliarde Kfz-Kilometer. Dies ist deutlich niedriger als bei Tunnels mit Richtungsverkehr und Autobahntunnels mit Gegenverkehr. Dieser Unterschied wird auch in den Unfallkostenraten widerspiegelt.

1.2.7. Jahresvergleich von Tunnelunfällen in Autobahntunnels

	Tunnels mit Gegenverkehr				Tunnels mit Richtungsverkehr			
	UPS	Verunglückte	Unfallkosten	Getötete	UPS	Verunglückte	Unfallkosten	Getötete
	[absolut]	[absolut]	[Mio.Euro]	[absolut]	[absolut]	[absolut]	[Mio.Euro]	[absolut]
1999	30	93	13,1	15	55	90	5,6	5
2000	42	72	6,7	7	57	88	5,2	5
2001	30	69	7,2	7	45	76	8,8	9
2002	34	69	5,9	6	63	89	7,2	7
2003	31	54	3,1	3	55	89	1,8	1
durch.	33,4	71,4	7,2	7,6	55,0	86,4	5,7	5,4

Tabelle 8: Entwicklung der Tunnelunfälle zwischen 1999-2003²⁰

Außer im Jahr 2000 ist die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden in Tunnels mit Gegenverkehr nahezu konstant geblieben, jedoch kann man eine deutliche Reduktion der Verunglückten, der Unfallkosten und der Getöteten erkennen. Dies könnte aber auf das Ausgangsjahr der Betrachtung zurückzuführen sein, da vor allem das Jahr 1999 einen hohen Wert der Unfallkosten und der Getöteten aufweist. Dies ist auf die Katastrophe im Tauerntunnel zurückzuführen. In Tunnels mit Richtungsverkehr ist diese Tendenz nur bei den Getöteten und bei den Unfallkosten im Jahr 2003 erkennbar. Die Anzahl der Verunglückten und die Anzahl der Unfälle mit Personenschaden haben sich über die Jahre kaum verändert. Wie in Tabelle 9 ersichtlich, spiegelt sich dieser Trend nicht nur in den Absolutzahlen sondern auch in den Unfallrelativzahlen wider.

²⁰ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 22

	Tunnels mit Gegenverkehr				Tunnels mit Richtungsverkehr			
	Unfallrate	Verunglücktenrate	Unfallkostenrate	Getötetenrate	Unfallrate	Verunglücktenrate	Unfallkostenrate	Getötetenrate
	[UPS/ 1Mio.Kfz-km]	[V/ 1Mio.Kfz-km]	[Euro/ 1000 Kfz-km]	[Tote/ 1Mrd Kfz-km]	[UPS/ 1Mio.Kfz-km]	[V/ 1Mio.Kfz-km]	[Euro/ 1000 Kfz-km]	[Tote/ 1Mrd Kfz-km]
1999	0,077	0,240	33,7	38,7	0,134	0,219	13,5	12,1
2000	0,106	0,182	16,9	17,7	0,136	0,211	12,5	12,0
2001	0,068	0,156	16,2	15,8	0,095	0,161	18,5	19,0
2002	0,077	0,156	13,3	13,5	0,133	0,188	15,1	14,8
2003	0,070	0,122	7,0	6,8	0,116	0,188	3,9	2,1
durch.	0,0796	0,1712	17,42	18,5	0,1228	0,1934	12,7	12,0

Tabelle 9: Entwicklung der Unfallrelativzahlen zwischen 1999-2003²¹

1.2.8. Ausgangspunkt von Unfällen innerhalb von Verkehrstunnels

Unfallrate	Tunnels mit Gegenverkehr	Tunnels mit Richtungsverkehr
Vor-/Nachlauf (250m vor/nach Tunnel)	0,164	0,097
Portal (0-50m im Tunnel)	0,305	0,297
Einfahrtsbereich (51-150m im Tunnel)	0,095	0,053
Tunnelmitte (ab 150m im Tunnel)	0,072	0,090

Tabelle 10: Unfallrate und deren Ausgangspunkt der Unfälle zwischen 1999-2003²²

In Tabelle 10 kann man die Unfallraten anhand des Ausgangspunktes der Unfälle zwischen 1999 und 2003 erkennen. Die Unfallrate ist im Bereich des Portals mit einem Wert von 0,305 bei Tunnels mit Gegenverkehr und mit 0,297 bei Tunnels mit Richtungsverkehr deutlich am höchsten. Weiters ist bei Tunnels mit Gegenverkehr die Unfallrate im Vor- und Nachlauf höher als im Einfahrtsbereich oder der Tunnelmitte. Bei Tunnels mit Richtungsverkehr sind die Unfallraten im Vor- und Nachlauf sowie in der Tunnelmitte nahezu identisch. Nur der Einfahrtsbereich weist eine viel geringere Unfallrate als die anderen Bereiche des Tunnels auf.

²¹ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 22

²² [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 24

1.2.9. Vergleich von Unfalltyp und Ausgangspunkt innerhalb von Verkehrstunnels

		Vor- /Nachlauf	Portal	Einfahrtsbereich	Tunnelmitte
Tunnels mit Gegenverkehr	Alleinunfall	18,9	53,3	20,0	15,0
	Auffahrunfall	54,1	40,0	60,0	49,3
	Begegnungsunfall	18,9	6,7	20,0	35,7
	Sonstige Typen	8,1	0,0	0,0	0,0
	Gesamt	100	100	100	100
Tunnel mit Richtungsverkehr	Alleinunfall	49,2	54,1	14,8	36,3
	Auffahrunfall	44,2	44,6	81,5	61,5
	Begegnungsunfall	0,0	0,0	0,0	0,0
	Sonstige Typen	6,7	1,4	3,7	2,2
	Gesamt	100	100	100	100

Tabelle 11: Unfalltypen nach Ausgangspunkt der Unfälle zwischen 1999-2003²³

²³ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 25, 26

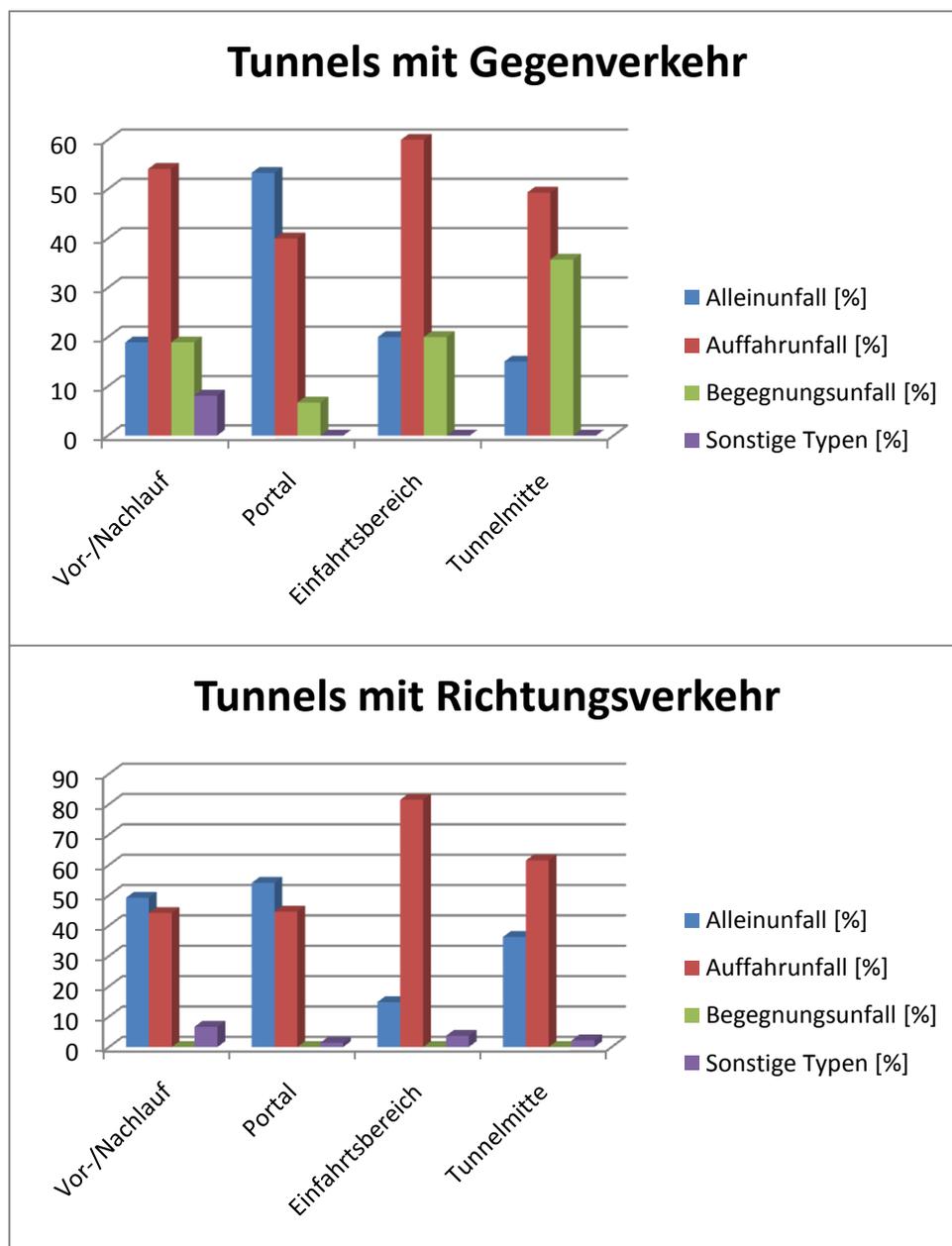


Abbildung 8: Unfalltypen nach Ausgangspunkt in Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr

Wie bereits in Tabelle 6 gezeigt ist die Hauptursache in Tunnels der Alleinunfall bzw. der Auffahrunfall. In Abbildung 8 und Tabelle 11 wurden diese Unfallzahlen nochmals auf deren Unfallort verfeinert. Dadurch kann man erkennen, dass es vor allem in Tunnels mit Richtungsverkehr zu Auffahrunfällen im Einfahrtsbereich und der Tunnelmitte kommt. Dies resultiert aus der Unaufmerksamkeit bei Überholmanövern und dem Nicht-Einhalten von genügend Sicherheitsabstand zum vorhergehenden Fahrzeug. Da man bei Tunnels mit Gegenverkehr nicht überholen und somit keinen Spurwechsel

durchführen darf, kommt es zu keinem wesentlichen Anstieg von Auffahrunfällen in der Tunnelmitte. Wohingegen hier der Begegnungsunfall deutlich ansteigt, weil die Verkehrsteilnehmer nach Passieren des Einfahrtsbereiches vermehrt unaufmerksam werden und dadurch leichter auf die falsche Fahrbahn abkommen. Bei Tunnels mit Richtungsverkehr kommt es hingegen vermehrt zu Alleinunfällen im Einfahrts- und Portalbereich. Dies ist unter anderem auf den Helligkeitswechsel zwischen Tunnel und Freiem, sowie Platzangst beim Einfahren in den Tunnel zurückzuführen. Ob eine Anbringung von Schutzdämpfern im Einfahrtsbereich zu einer Reduzierung der Unfallzahlen führen würde, ist noch nicht bekannt.

1.2.10. Verschulden nach Verkehrsteilnehmer in Verkehrstunnels

Vollschuld [%]	Tunnels mit Gegenverkehr				Tunnels mit Richtungsverkehr			
	Pkw	Lkw	Sonst.	Gesamt	Pkw	Lkw	Sonst.	Gesamt
Vor-/Nachlauf	76,3	18,4	5,3	100	81,1	14,8	4,1	100
Portal	85,7	14,3	0,0	100	92,4	7,6	0,0	100
Einfahrtsbereich	80,0	10,0	10,0	100	73,7	21,1	5,2	100
Tunnelmitte	75,0	19,7	5,3	100	82,7	13,4	3,9	100
Tunnel Gesamt	76,3	18,6	5,1	100	83,5	13,2	3,3	100

Tabelle 12: Verschulden nach Verkehrsteilnehmer und Ausgangspunkt zwischen 1999-2003²⁴

Um die Sicherheit in Verkehrstunnels weiter erhöhen zu können, ist neben der Analyse von Unfallort und Unfallart auch eine Analyse der Verkehrsteilnehmer, welche den Unfall verursachen bzw. beteiligt sind, notwendig. Dafür wurden die Verkehrsteilnehmer in PKW, LKW und sonstige Verkehrsteilnehmer aufgeteilt. Aufgrund der niedrigen Beteiligung am gesamten Verkehrsaufkommen sind Busse, Sondertransporte und Motorräder unter sonstige Verkehrsteilnehmer zusammengefasst. Aufgrund ihrer geringen Anzahl sind sie auch die kleinste Gruppe der Unfallverursacher. Die größte Gruppe der Unfallverursacher sind erwartungsgemäß die PKW-Lenker. Dies ist neben ihrer großen Anzahl auch auf ihre mangelnde Erfahrung im Vergleich zu den LKW-Lenkern zurückzuführen, welche größtenteils Berufskraftfahrer sind. PWKs verursachen vor allem im

²⁴ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 27

Portalbereich die meisten Unfälle. Wohingegen die LKWs vor allem bei Tunnels mit Richtungsverkehr hier die geringste Verschuldensrate aufweisen.

	Alleinunfall		Auffahrunfall		Begegnungsunfall	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Pkw	101	86,3	129	77,7	38	71,7
Lkw	8	6,8	31	18,7	15	28,3
Sonstige	8	6,8	6	3,6	0	0,0
Gesamt	117	100	166	100	53	100

Tabelle 13: Verschulden und Unfalltyp zwischen 1999-2003²⁵

Wenn man nun noch die Art der Verkehrsunfälle mit deren Verursachern vergleicht (Tabelle 13), erkennt man, dass die LKW-Lenker nur selten Alleinunfälle verursachen, jedoch eine große Beteiligung bei den Begegnungsunfällen aufweisen. Dies ist neben dem geringeren Platzspielraum zum Begegnungsverkehr aufgrund ihrer größeren Fahrzeugbreite auch auf Übermüdung der Lenker zurückzuführen. Diese Übermüdung und Unaufmerksamkeit führt ebenso zu der hohen Beteiligung von LKWs bei den Auffahrunfällen.

²⁵ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 27

1.2.11. Vergleich von Alleinschuld und Fahrzeugtyp bei Unfällen

	Personenschaden		Sachschaden		Panne		Brand	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Pkw	427	80,9	255	71,0	505	74,6	7	57,1
Lkw	80	15,2	94	26,2	124	18,3	6	42,9
Bus	4	0,8	5	1,4	22	3,2	0	0,0
Sonstige	17	3,2	5	1,4	26	3,8	0	0,0
Gesamt	528	100	359	100	677	100	13	100

Tabelle 14: Vollschuld nach Fahrzeugarten zwischen 1999-2003²⁶

In Tabelle 14 soll ein Vergleich zwischen Schadensausmaß und Verkehrsteilnehmer durchgeführt werden. Die größte Schuld an Unfällen mit Personenschaden haben PKW-Lenker. Ebenso sind diese Hauptverursacher von Pannen und Sachschäden. Bei Bränden liegt die Schuld gleichermaßen bei PKW- wie auch bei LKW-Lenkern. Aufgrund von Überhitzung der Bremsen und in weiterer Folge des Entzündens des Ladegutes trifft LKWs vermehrt die Schuld an Bränden. Busse und sonstige Verkehrsteilnehmer spielen aufgrund ihrer niedrigen Beteiligung am Verkehrsaufkommen nur eine untergeordnete Rolle.

1.2.12. Ursache und Ausgangspunkt von Unfällen in Verkehrstunnels

	Vor-/Nachlauf		Portal		Einfahrtsbereich		Tunnelmitte	
	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]	[absolut]	[%]
Fehlverhalten des Lenkers	73	43,7	26	28,3	14	37,8	122	41,5
Fehleinschätzung	68	40,7	27	41,3	10	27,0	70	24,6
Mangelnde Wachsamkeit	71	43,7	36	40,2	10	37,8	121	47,8
Geschwindigkeit	29	18,0	23	25,0	4	10,8	5	2,4
Sonstige Ursachen	18	9,6	5	5,4	2	5,4	16	5,9

Tabelle 15: Ursache und Ausgangspunkt von Tunnelunfällen zwischen 1999-2003²⁷

²⁶ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 32

²⁷ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 29, Mehrfachnennung von Unfallursachen möglich.

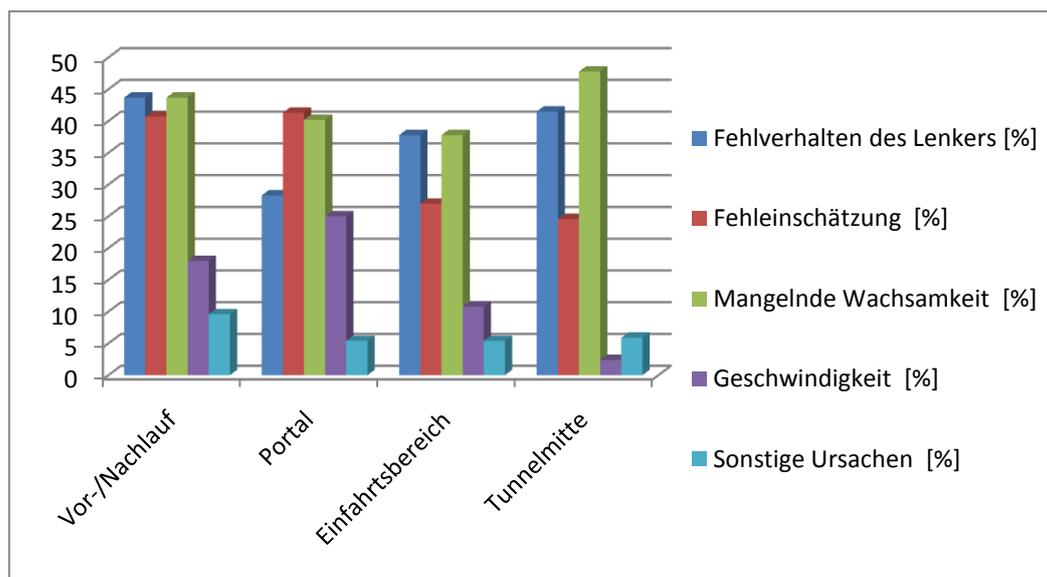


Abbildung 9: Ursache und Ausgangspunkt von Tunnelunfällen²⁸

In Tabelle 15 wurde die Ursache des Unfalls mit dem Ort des Geschehens verglichen und in Abbildung 9 graphisch aufbereitet. Unter Fehlverhalten des Lenkers wird das Nichteinhalten des Sicherheitsabstandes, die Spurhaltung sowie das Fehlverhalten beim Überholen zusammengefasst. Unter Fehleinschätzung des Lenkers werden Unfälle verstanden, die sich aufgrund von Fehleinschätzung bezüglich der Witterung, Straßenführung oder anderer Verkehrsteilnehmer ereignet haben. Unfälle aufgrund mangelnder Wachsamkeit sind Unfälle als Folge von Übermüdung, Ablenkung bzw. Unaufmerksamkeit. Unter sonstige Ursachen werden unvorhergesehene Ereignisse und technische Mängel wie Defekt am Motor, Bereifung bzw. Bremsen zusammengefasst.

Mit Ausnahme des unfallrisikoreichen Tunnelportals sind mangelnde Wachsamkeit und Fehlverhalten des Lenkers die Hauptursachen für Verkehrsunfälle mit Personenschaden. Im Bereich des Tunnelportals ist die Fehleinschätzung in Bezug auf die Straßenführung am größten. Die Geschwindigkeit spielt im gesamten Tunnelverlauf nur eine untergeordnete Rolle, sofern man diese von zu geringem Sicherheitsabstand trennt. Auf Unfälle, welche auf unvorhergesehenen Ereignissen beruhen, hat man nur geringen bis überhaupt keinen Einfluss. Desweiteren sind sie nur zu einem sehr geringen Prozentsatz für das Verschulden von Unfällen innerhalb von Verkehrstunnels verantwortlich.

²⁸ Mehrfachnennung von Unfallursachen möglich.

1.3. Schlussfolgerung des Sicherheitsvergleiches

Um eine Verbesserung der Sicherheit innerhalb von Verkehrstunnels zu erzielen, sollte man die Hauptursachen für Verkehrsunfälle genauer betrachten und Wege für deren Beseitigung finden. Wie in Kapitel 1.2.12 gezeigt wurde, sind die häufigsten Unfallursachen das Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer im Straßenverkehr, die Fehleinschätzung der aktuellen Situation und die zu geringe Wachsamkeit des Lenkers.

Wie bereits erwähnt wird unter Fehlverhalten des Lenkers das Nichteinhalten des Sicherheitsabstandes, die Spurhaltung sowie Fehlverhalten beim Überholen zusammengefasst. Unter Fehleinschätzung des Lenkers werden Unfälle zusammengefasst, die aufgrund von Fehleinschätzung bezüglich der Witterung, Straßenführung oder anderer Verkehrsteilnehmer verursacht wurden. Unfälle aufgrund mangelnder Wachsamkeit sind Unfälle aufgrund von Übermüdung, Ablenkung bzw. Unaufmerksamkeit.

Eine Verbesserung des Verhaltens der Lenker kann beispielsweise durch den Einsatz von Abstandsmessanlagen erreicht werden. Sollte ein Fahrzeug den geforderten Abstand bei der aktuellen Geschwindigkeit unterschreiten, könnte man durch diverse Anzeigen den Fahrer darauf hinweisen und so Auffahrunfälle vermeiden.

Durch Geschwindigkeitsmessungen und der Weitergabe bei Überschreitung der Maximalgeschwindigkeit an den Lenker könnte man das Fehlverhalten beim Überholen sowie die Fehleinschätzung des Lenkers gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern reduzieren. Da vor allem im Tunnelportal das Problem der Fehleinschätzung von Lenkern vorliegt, sollte mit der Geschwindigkeit- sowie Abstandsmessung bereits vor dem Tunnelportal begonnen werden.

Ebenso ist das Nicht-Einhalten von Signalanlagen (z.B. rote Verkehrsampeln) ein großes Problem im Portalbereich. Hierbei sollte man die Positionierung der Signalanlagen überdenken bzw. bereits früher als bisher eine Warnung an die Verkehrsteilnehmer weitergeben. Begleitend dazu müssten in der Fahrschule oder in späteren Schulungen bewusstseinsbildende Maßnahmen bei den einzelnen Verkehrsteilnehmer durchgeführt werden.

Die Installation von Aufpralldämpfern wäre zur Verbesserung der Sicherheit im Tunnelportalbereich zu empfehlen. Dies würde zu einer Reduktion der Aufprallenergie führen, wodurch der Verletzungsgrad verringert werden könnte. Diese Maßnahme würde den Unfall an sich nicht verhindern, jedoch dessen Auswirkungen minimieren.

Die Übermüdung der einzelnen Lenker stellt das größte Problem bezüglich mangelnder Wachsamkeit dar. Dies ist vor allem bei LKW-Lenkern ein sehr großes Problem. Hierbei sollte man vermehrt die Einhaltung von Ruhezeiten kontrollieren. Gleichzeitig könnte man mit diesen Kontrollen den technischen Zustand der LKWs kontrollieren, da technische Mängel als Hauptursache für Pannen und Brände in Verkehrstunnels erkannt wurden. Diese Mängel beziehen sich sowohl auf die Bereifung, die Bremsen wie auch auf den Motor.

Ebenso könnte man Systeme zur Früherkennung von Problemsituationen installieren. Hierbei sollte man neben einer Geschwindigkeitsmessung von zu schnell fahrenden Fahrzeugen auch eine Messung von zu langsam fahrenden bzw. langsamer werdenden Fahrzeugen installieren. Denn neben zu schnell fahrenden Fahrzeugen führen vor allem stehende bzw. sehr langsame Fahrzeuge, aufgrund mangelnder Wachsamkeit bzw. Fehleinschätzung der aktuellen Situation von anderen Verkehrsteilnehmern, zu schweren Auffahrunfällen. Diese Auffahrunfälle könnten durch automatisierte Warnhinweise verringert werden.

2. RISIKOANALYSE

Um die Risiken der einzelnen Verkehrstunnels miteinander vergleichen zu können, wurde von der „Österreichischen Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr“ (FSV) ein Risikoanalysemodell entworfen. Dieses Risikoanalysemodell wurde durch detaillierte Auswertung eines Sicherheitsvergleiches von Verkehrstunnels, sowie Unfällen mit Personenschaden in Verkehrstunnels entwickelt. Daher kann dieses Risikoanalysemodell ausschließlich zu Ermittlung von Gefahren für Tunnelnutzer herangezogen werden und nicht zur Ermittlung von Sachschäden ohne Personenschaden. Dieses Modell kann auch während der Planungsphase verwendet werden um eventuelle Sicherheitsprobleme zu erkennen und diese im Vorfeld zu beseitigen.

Es wurde ein allgemeines Risikoanalysemodell und ein vereinfachtes Risikoanalysemodell entwickelt, wobei beide Modelle aus einer Häufigkeitsanalyse und einer Unfallfolgenanalyse bestehen.

2.1. Allgemeines Risikoanalysemodell²⁹

2.1.1. Häufigkeitsanalyse

Die Häufigkeitsanalyse wird anhand eines Ereignisbaumes durchgeführt. In diesem Baum trägt man die Häufigkeit eines auslösenden Ereignisses (z.B. Unfall, Panne) ein, die relative Häufigkeit der Verzweigungen im Ereignisbaum sowie das Schadensausmaß der einzelnen Schadensszenarien. Die einzelnen Einträge und deren Bedeutung werden in Kapitel 2.1.3 genauer beschrieben.

2.1.2. Unfallfolgenanalyse

Die notwendigen Erwartungswerte werden anhand ihrer Abhängigkeit zu den Haupteinflussfaktoren in den Ereignisbaum eingetragen. Für manche Schadensszenarien muss man kombinierte Häufigkeitswerte eintragen. Dies ist der Fall, wenn man beispielsweise das Schadensausmaß während eines Staus und das Schadensausmaß ohne Stau ermitteln will. Hierbei muss man die Häufigkeit eines Staus mit dessen Schadensausmaß kombinieren.

²⁹ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell

Durch das Risikomodell erhält man relative Risikowerte. Um feststellen zu können, ob ein Verkehrstunnel die minimalen Sicherheitsbestimmungen erfüllt, vergleicht man die errechneten Werte mit den Werten eines Tunnels, der exakt die Sicherheitsbestimmungen erfüllt. Ist das Risiko im zu beurteilenden Tunnel höher, muss man durch zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen das Risiko senken. Desweiteren kann anhand des Risikoanalysemodells die Erfüllung der geforderten Sicherheit in Tunnels nachgewiesen werden.

2.1.3. Ereignisbaum

Unterscheidung Panne oder Unfall	Unfalltyp	Fahrzeugbeteiligung	Folgebrand	Gefahrgut	Schadensszenario	Schadensausmaß	Risiko	
A1 - Panne im Tunnel	C1 - PKW Panne	D1 - kein Folgebrand	D2 - PKW Panne mit Folgebrand	E1 - ohne Gefahrgut	F1 - PKW Brand ohne Personenschaden gelöscht	SP1		
					F2 - PKW Brand infolge Panne mit Personengefährdung			
		C2 - LKW Panne	D3 - kein Folgebrand	D4 - LKW Panne mit Folgebrand	E2 - mit Gefahrgut und dessen Entzündung	F3 - LKW Brand infolge Panne mit Personengefährdung	SP2	
	D5 - kein Folgebrand		D6 - Bus Panne mit Folgebrand	F4 - LKW Brand ohne Personengefährdung				
	B1 - Alleinunfall	C3 - Bus Panne	D7 - PKW Unfall ohne Folgebrand	D8 - PKW Unfall mit Folgebrand	E3 - kein Gefahrgutaustritt	F5 - Bus Brand infolge Panne mit Personengefährdung	SP3	
						F6 - Bus Brand ohne Personengefährdung		
C4 - PKW		D9 - LKW Unfall ohne Folgebrand	D10 - LKW Unfall mit Folgebrand	E4 - Gefahrgutaustritt	PKW Alleinunfall	S U1		
		D11 - Bus Unfall ohne Folgebrand	D12 - Bus Unfall mit Folgebrand		E5 - ohne Gefahrgut	PKW Alleinunfall mit Folgebrand	S U2	
C5 - LKW		D13 - PKW Unfall ohne Folgebrand	D14 - PKW Unfall mit Folgebrand	E6 - mit Gefahrgut und dessen Entzündung	LKW Alleinunfall	S U3		
					LKW Alleinunfall und Gefahrgutaustritt	S U4		
C6 - Bus	D15 - LKW Beteiligung ohne Folgebrand	D16 - LKW Beteiligung mit Folgebrand	E7 - kein Gefahrgutaustritt	LKW Alleinunfall mit Folgebrand	S U5			
				LKW Alleinunfall mit Folgebrand und Gefahrgut	S U6			
A2 - Unfall im Tunnel	B2 - Unfall im Richtungsverkehr	C7 - nur PKW	D17 - Bus Beteiligung ohne Folgebrand	D18 - Bus Beteiligung mit Folgebrand	E8 - Gefahrgutaustritt	Bus Alleinunfall	S U7	
						Bus Alleinunfall mit Folgebrand	S U8	
		C8 - mit LKW	D19 - PKW Unfall ohne Folgebrand	D20 - PKW Unfall mit Folgebrand	E9 - ohne Gefahrgut	PKW Unfall im Richtungsverkehr	S U9	
						PKW Unfall im Richtungsverkehr mit Folgebrand	S U10	
		C9 - mit Bus	D21 - LKW Beteiligung ohne Folgebrand	D22 - LKW Beteiligung mit Folgebrand	E10 - mit Gefahrgut und dessen Entzündung	LKW Unfall im Richtungsverkehr	S U11	
						LKW Unfall im Richtungsverkehr und Gefahrgutaustritt	S U12	
	B3 - Unfall mit Begegnungsverkehr	C10 - nur PKW	D23 - Bus Beteiligung ohne Folgebrand	D24 - Bus Beteiligung mit Folgebrand	E11 - kein Gefahrgutaustritt	LKW Unfall im Richtungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgut	S U13	
						Bus Unfall im Richtungsverkehr	S U14	
		C11 - mit LKW	D25 - PKW Unfall ohne Folgebrand	D26 - PKW Unfall mit Folgebrand	E12 - Gefahrgutaustritt	Bus Unfall im Begegnungsverkehr	S U15	
						Bus Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	S U16	
		C12 - mit Bus	D27 - PKW Unfall ohne Folgebrand	D28 - PKW Unfall mit Folgebrand	E13 - ohne Gefahrgut	PKW Unfall im Begegnungsverkehr	S U17	
						PKW Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	S U18	
C13 - mit LKW	D29 - LKW Unfall ohne Folgebrand	D30 - LKW Unfall mit Folgebrand	E14 - mit Gefahrgut und dessen Entzündung	LKW Unfall im Begegnungsverkehr	S U19			
				LKW Unfall im Begegnungsverkehr und Gefahrgutaustritt	S U20			
					LKW Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	S U21		
					LKW Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgut	S U22		
					Bus Unfall im Begegnungsverkehr	S U23		
					Bus Unfall im Begegnungsverkehr mit Folgebrand	S U24		
					Summe			

Abbildung 10: Ereignisbaum³⁰

³⁰ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell

Der Ereignisbaum wurde schematisch in Abbildung 10 abgebildet. Zu Beginn wird unter zu Hilfenahme der Spalte A – F das Schadensszenario ermittelt. Durch Multiplikation mit dem Schadensausmaß gelangt man in weiterer Folge zum Risiko. Durch Aufsummierung der Einzelrisiken erhält man das spezifische Risiko des betrachteten Verkehrstunnels. Dieses Risiko muss noch mit der Tunnellänge und der Verkehrsleistung multipliziert werden um zum erwartenden Risiko (zu erwartende Tote pro Jahr) im Tunnel zu gelangen.

2.1.3.1. Basiswert Pannensrate, Basiswert Unfallrate

Zu Beginn unterscheidet man zwischen Unfällen und Pannen. Da eine Panne sowohl in Tunnels mit Richtungsverkehr wie auch in Tunnels mit Gegenverkehr gleich wahrscheinlich ist, wird hier keine Differenzierung durchgeführt und ein Pannensraten-Basiswert von 2,372 Pannen pro einer Million Kfz Kilometer verwendet. Weiters wird für die Pannensrate kein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Verkehrsleistung oder der Tunnellänge benötigt, da diese Faktoren keinen Einfluss auf die Pannensrate haben. Aufgrund der Verkehrssicherheitsanalyse konnten für Unfälle die in Tabelle 16 dargestellten Basiswerte ermittelt werden.

[UPS/1Mio.Kfz-km]	Gegenverkehrstunnel		Richtungsverkehrstunnel
	Landesstraßen	Autobahn und Schnellstraßen	
Basiswert Unfallrate	0,082	0,077	0,112

Tabelle 16: Basiswert Unfallrate³¹

Da im Gegensatz zur Pannensrate die Unfallrate von der Verkehrsleistung und der Tunnellänge abhängig ist, müssen zu den Basiswerten Korrekturfaktoren eingefügt werden.

³¹ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 7

Korrekturfaktor Unfallrate

Für die Verkehrsleistung wird der Korrekturfaktor auf Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr aufgeteilt, da sich die Unfallrate je nach Tunnelart und Verkehrsleistung verändert. Die Faktoren in Formel 7 und Formel 8 sind nur bei einer Verkehrsleistung von 15.000 bis 40.000 Kfz pro Tag gültig. Sollte diese Verkehrsleistung unter- oder überschritten werden, sind diese Faktoren anzupassen.

$$f_{VK,RV} = \frac{7,934 * 10^{-2} * \ln(jDTV) - 0,6935}{0,112}$$

Formel 7: Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Richtungsverkehr

$$f_{VK,GV} = \frac{3,217 * 10^{-14} * jDTV^3 - 2,209 * 10^{-9} * jDTV^2 + 5,021 * 10^{-5} * jDTV - 0,2781}{0,077}$$

Formel 8: Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Gegenverkehr

Neben der Verkehrsleistung hat auch die Tunnellänge einen Einfluss auf die Unfallrate. Daher wird ein Korrekturfaktor nach Formel 9 eingeführt.

$$f_{TL} = \frac{0,1081 * L_{TU}^{-0,3543}}{0,112}$$

Formel 9: Korrekturfaktor Tunnellänge

Dieser Korrekturfaktor ist nur für Verkehrstunnels zwischen 0,5 und 3 Kilometer gültig. Sollte der Tunnel länger oder kürzer sein, sind die entsprechenden Werte für L_{TU} zu verwenden. Sollte der Tunnel länger als drei Kilometer sein, ist bei Tunnels mit Richtungsverkehr ein L_{TU} Wert von drei Kilometer einzusetzen, bei einer Länge von kleiner 0,5 Kilometer und Richtungsverkehr ein L_{TU} Wert von 0,5 Kilometer. Ist der zu berechnende Tunnel ein Tunnel mit Gegenverkehr, ist für L_{TU} stets ein Wert von einem Kilo-

meter zu verwenden. Bei der Berechnung der Länge wird bei Tunnels mit Richtungsverkehr (zwei Röhren) die mittlere Länge beider Röhren herangezogen. Dies ist jedoch nur zulässig, solange der Längenunterschied kleiner zehn Prozent beträgt. Ist die Abweichung größer, müssen die beiden Röhren einzeln bewertet werden.

Sollten sich Verflechtungsstrecken bzw. deren Einflussbereiche im Tunnel oder dessen Portal befinden, muss ein Verflechtungsstrecken-Korrekturfaktor mit berücksichtigt werden. Die Länge des Einflussbereiches einer Verflechtungsstrecke entspricht der Länge die man in zehn Sekunden mit der höchstzulässigen Geschwindigkeit zurücklegt. Während dieser Länge muss die Unfallrate verdoppelt werden. Bei diesem Korrekturfaktor wird wieder zwischen Richtungsverkehr und Gegenverkehr unterschieden.

$$f_{VF,RV} = \frac{(2 * L_{TU} - \sum L_V) + 2 * \sum L_V}{2 * L_{TU}}$$

Formel 10: Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Richtungsverkehr

$$f_{VF,GV} = \frac{(L_{TU} - \sum L_V) + 2 * \sum L_V}{L_{TU}}$$

Formel 11: Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Gegenverkehr

2.1.3.2. Aufteilung der Unfallrate auf Unfalltypen

Im nächsten Schritt müssen die Unfälle in ihre Unfalltypen aufgeteilt werden. Hierbei unterscheidet man zwischen Alleinunfällen, Unfällen mit dem Richtungsverkehr und Unfällen mit dem Begegnungsverkehr. Desweiteren könnte man Unfalltypen³² nach:

- Unfälle beim Abbiegen und Umkehren – richtungsgleich
- Unfälle beim Abbiegen und Umkehren – entgegengesetzt
- Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Queren

³² [RVS 02.02.21]

- Rechtwinkelige Kollisionen auf Kreuzungen beim Einbiegen
- Unfälle mit haltenden oder parkenden Fahrzeugen
- Fußgängerunfälle
- Unfälle auf Parkplatz-, Tankstellen-, Haus- oder Grundstücksausfahrten oder Grundstückseinfahrten
- Tierunfälle
- Sonstige Unfälle (Bahnunfälle)
- Radfahrerunfälle

unterteilen. Dies wird jedoch für die Risikoanalyse nicht durchgeführt, da diese Unterscheidung auf Autobahnen nicht relevant ist. Jedoch müssen aufgrund der unterschiedlichen Verteilung zwischen Tunnels mit Richtungsverkehr und Tunnels mit Gegenverkehr die drei unten genannten Unfalltypen, wie in Tabelle 17, auf diese beiden Tunnelarten aufgeteilt werden.

		Tunnels mit Gegenverkehr		Tunnels mit Richtungsverkehr
		Landesstraßen	Autobahn und Schnellstraßen	
B1	Alleinunfall	30%	17%	40%
B2	Unfall mit dem Richtungsverkehr	49%	50%	59%
B3	Unfall mit dem Begegnungsverkehr	21%	33%	1%

Tabelle 17: Aufteilung der Unfallrate auf Unfalltypen³³

2.1.3.3. Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen

Im Regelfall wird ein PKW-Anteil von 76,5 Prozent, ein LKW-Anteil von 20 Prozent und ein Bus-Anteil von 3,5 Prozent angenommen. Sollte diese Aufteilung nicht zutreffen, muss die veränderte Fahrzeugbeteiligung neu ermittelt und der Ereignisbaum mit diesen Werten weiter berechnet werden. Ansonsten können die Basiswerte aus Tabelle 18 verwendet werden. Als PKW-Unfälle werden Unfälle, an denen nur PKWs beteiligt sind, bezeichnet. An LKW-Unfällen ist mindestens ein LKW, an Busunfällen mindestens ein Bus beteiligt.

³³ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 10

			Basiswert [%]	Bei neuer KFZ Zusammensetzung [%]
Panne	C1	PKW	75,9	P_{C1}
	C2	LKW	20,7	P_{C2}
	C3	Bus	3,4	P_{C3}
Alleinunfall	C4	PKW	90,6	P_{C4}
	C5	LKW	9,3	P_{C5}
	C6	Bus	0,1	P_{C6}
Unfall im Richtungsverkehr	C7	PKW	63,6	P_{C7}
	C8	LKW	34,4	P_{C8}
	C9	Bus	2,0	P_{C9}
Unfall im Begegnungsverkehr	C10	PKW	37,7	P_{C10}
	C11	LKW	59,0	P_{C11}
	C12	Bus	3,3	P_{C12}

Tabelle 18: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen³⁴

$$P_{C1} = \frac{75,7 * S_{PKW}}{76,3} [\%]$$

$$P_{C2} = \frac{20,7 * S_{LKW}}{20,2} [\%]$$

$$P_{C3} = \frac{3,4 * S_{Bus}}{3,5} [\%]$$

Formel 12: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen

³⁴ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 10, 11

$$P_{C4} = \frac{90,6 * S_{PKW}}{76,5} [\%]$$

$$P_{C5} = \frac{9,3 * S_{LKW}}{20} [\%]$$

$$P_{C6} = \frac{0,1 * S_{Bus}}{3,5} [\%]$$

Formel 13: Fahrzeugbeteiligung bei Alleinunfällen

$$P_{C7} = \frac{63,6 * S_{PKW}^2}{76,5^2} [\%]$$

$$P_{C8} = \frac{34,4 * (S_{LKW}^2 + 2 * S_{LKW} * S_{PKW})}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} [\%]$$

$$P_{C9} = \frac{2,0 * (S_{Bus}^2 + 2 * S_{PKW} * S_{Bus} + 2 * S_{LKW} * S_{Bus})}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} [\%]$$

Formel 14: Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen im Richtungsverkehr

$$P_{C10} = \frac{37,7 * S_{PKW}^2}{76,5^2} [\%]$$

$$P_{C11} = \frac{59,0 * (S_{LKW}^2 + 2 * S_{LKW} * S_{PKW})}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} [\%]$$

$$P_{C12} = \frac{3,3 * (S_{Bus}^2 + 2 * S_{PKW} * S_{Bus} + 2 * S_{LKW} * S_{Bus})}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} [\%]$$

Formel 15: Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen im Gegenverkehr

S_{PKW}	Anteil des PKW-Verkehrs am jDTV in Prozent
S_{LKW}	Anteil des LKW-Verkehrs am jDTV in Prozent
S_{Bus}	Anteil des Busverkehrs am jDTV in Prozent

2.1.3.4. Folgebrände bei Pannen und Unfällen

Während des Beobachtungszeitraums zwischen 1999 und 2003 kam es in 1,19 Prozent der Fälle zu einem Folgebrand bei einer Fahrzeugpanne. Diese Aufteilung ist prozentuell über alle Fahrzeugtypen gleich und ist unabhängig vom Tunneltyp, von der Tunnellänge oder der Fahrleistung. Bei den aufgezeichneten Unfällen kam es zu 2,3 Prozent aller Alleinunfälle, zu 0,5 Prozent der Unfälle im Richtungsverkehr und zu 4,9 Prozent der Unfälle im Begegnungsverkehr zu einem Folgebrand.

2.1.3.5. Gefahrgutbeteiligung

Aufgrund eines Gefahrgutanteils von fünf Prozent am Schwerverkehr, einem prozentuellen Anteil von brandgefährlichen Stoffen von 75 Prozent aller Transporte und einer Zündwahrscheinlichkeit von 50 Prozent dieser Stoffe, kommt es in 1,9 Prozent der Fälle zu einem Gefahrgutbrand. Dadurch werden auch Zündungen des Gefahrgutes ohne Brand berücksichtigt.

Durch einen zehn prozentigen Transportgutanteil von stark gesundheitsgefährdender Wirkung und einer Freisetzungswahrscheinlichkeit von 20 Prozent kommt es zu einem Gefahrgutaustritt in 0,1 Prozent der Fälle.

2.1.3.6. Brand infolge einer Panne

Im Regelfall können Brände infolge einer Panne ohne Auftreten von Personenschaden gelöscht werden. Es wird eine fünfprozentige Wahrscheinlichkeit eines Personenschadens infolge eines Brandes nach einer Panne angenommen.

2.1.3.7. Schadensszenarien

Durch die Verzweigungen im Ereignisbaum kommt es zu 28 unterschiedlichen Schadensszenarien. Das Schadensausmaß setzt sich somit, abhängig von den Verzweigungen im Ereignisbaum, aus bis zu fünf unterschiedlichen Komponenten zusammen. Ebenso

muss eine Ermittlung des Schadensausmaßes bei durchschnittlichen Verkehrsverhältnissen und bei Stau durchgeführt werden.

$$SA_{P1,P2,P3,P4} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau}$$

Formel 16: Schadensausmaß eines Brandes infolge einer Panne

$$SA_{U1,U3,U7} = SA_{mech}$$

Formel 17: Schadensausmaß bei Alleinunfällen ohne Folgebrand

$$SA_{U2,U5,U8} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 18: Schadensausmaß bei Alleinunfällen mit Folgebrand

$$SA_{U4} = SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 19: Schadensausmaß bei LKW – Alleinunfällen und Gefahrgutaustritt

$$SA_{U6} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 20: Schadensausmaß bei LKW – Alleinunfällen, Folgebrand und Gefahrgutaustritt

$$SA_{U9,U11,U15} = SA_{mech}$$

Formel 21: Schadensausmaß bei Unfällen mit Richtungsverkehr ohne Folgebrand oder Gefahrgutaustritt

$$SA_{U10,U13,U16} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 22: Schadensausmaß bei Unfällen mit Richtungsverkehr mit Folgebrand oder Gefahrgutaustritt

$$SA_{U12} = SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 23: Schadensausmaß bei LKW-Unfällen im Richtungsverkehr ohne Folgebrand mit Gefahrgutaustritt

$$SA_{U14} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 24: Schadensausmaß bei LKW-Unfällen im Richtungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgutaustritt

$$SA_{U17,U19,U23} = SA_{mech}$$

Formel 25: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr ohne Folgebrand und ohne Gefahrgutaustritt

$$SA_{U18,U21,U24} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 26: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr mit Folgebrand ohne Gefahrgutaustritt

$$SA_{U20} = SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 27: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr ohne Folgebrand mit Gefahrgutaustritt

$$SA_{U22} = SA_{Brand} + SA_{Brand,Stau} * p_{Stau} + SA_{Gfg} + SA_{Gfg,Stau} * p_{Stau} + SA_{mech}$$

Formel 28: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgutaustritt

SA_{Brand}	durch Brand verursachte Schäden
$SA_{Brand, Stau}$	durch Brand verursachte Schäden während eines Staus
p_{Stau}	Wahrscheinlichkeit eines Staus
SA_{Gfg}	durch Gefahrgut verursachte Schäden
$SA_{Gfg,Stau}$	durch Gefahrgut verursachte Schäden während eines Staus
SA_{mech}	durch mechanische Wirkung verursachte Schäden

2.1.3.8. Ermittlung des Risikoäquivalentwertes

Abschließend muss die Häufigkeit der Schadensszenarien mit dem entsprechenden Schadensausmaß multipliziert werden. Wenn man diese Risikowerte zusammen addiert, erhält man das spezifische Risiko. Um den Risikoäquivalentwert (R) zu erhalten, muss dieses spezifische Risiko mit der Tunnellänge und der Verkehrsleistung multipliziert und auf eine Million normiert werden.

$$R = \frac{\sum(Häufigkeit * Schadensausmaß) * Tunnellänge * jDTV * Betriebstage}{10^6}$$

Formel : Risikoäquivalentwert

2.1.4. Beispiel der Berechnung des Risikoäquivalentwertes mit einem Ereignisbaum

Es soll ein Autobahntunnel mit Gegenverkehr, einer Länge von 4.500 Meter, einer Querlüftung und einer Verkehrsstärke von 22.000 KFZs pro Tag untersucht werden. Der Anteil des PKW-Verkehrs beträgt 74,5 Prozent, des LKW-Verkehrs 23 Prozent und der Anteil des Bus-Verkehrs beträgt 2,5 Prozent. Der Gefahrguttransport am Schwerverkehr beträgt sechs Prozent. Es kommt in 150 Stunden im Jahr zu einem Stau. Es gibt alle 250 Meter Notausgänge und es befindet sich unmittelbar nach dem Tunnel eine Ausfahrt.

Da sich eine Ausfahrt nach dem Tunnel befindet und sich der Einflussbereich der Verflechtungsstrecke bis ins Tunnelportal erstreckt, hat die Verflechtungsstrecke eine Länge von 50 Meter.

2.1.4.1. Berechnung von Pannenrate und Unfallrate

$$A1 \text{ Basiswert Pannenrate} = 2,372 \left[\frac{\text{Pannen}}{1 \text{ Mio Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$\begin{aligned} f_{VK,GV} &= \frac{3,217 * 10^{-14} * jDTV^3 - 2,209 * 10^{-9} * jDTV^2 + 5,021 * 10^{-5} * jDTV - 0,2781}{0,077} \\ &= \frac{3,217 * 10^{-14} * 22000^3 - 2,209 * 10^{-9} * 22000^2 + 5,021 * 10^{-5} * 22000 - 0,2781}{0,077} \\ &= 1,29753 \end{aligned}$$

$$L_{TU} = \text{Tunnellänge} + 2 * \text{Portallänge} = 4500 + 2 * 50 = 4600 \text{ [m]} = 4,6 \text{ [km]}$$

$$f_{TL} = \frac{0,1081 * L_{TU}^{-0,3543}}{0,112} = \frac{0,1081 * 1^{-0,3543}}{0,112} = 0,965179$$

$$f_{VF,GV} = \frac{(L_{TU} - \sum L_V) + 2 * \sum L_V}{L_{TU}} = \frac{(4,6 - 0,05) + 2 * 0,05}{4,6} = 1,01087$$

$$\begin{aligned} A2 \text{ Unfallrate} &= \text{Basiswert Unfallrate} * f_{VK} * f_{TL} * f_{VF} \\ &= 0,077 * 1,29753 * 0,965179 * 1,01087 \\ &= 0,097479 \left[\frac{\text{UPS}}{1 \text{ Mio Kfz} - \text{km}} \right] \end{aligned}$$

2.1.4.2. Einteilung der Unfalltypen

$$B1 = p_{GV,Aut,T0} * A2 \text{ Unfallrate} = 0,17 * 0,097479 = 0,01657 \left[\frac{UPS}{1 \text{ Mio Kfz} - km} \right]$$

$$B2 = p_{GV,Aut,T1} * A2 \text{ Unfallrate} = 0,5 * 0,097479 = 0,04874 \left[\frac{UPS}{1 \text{ Mio Kfz} - km} \right]$$

$$B3 = p_{GV,Aut,T2} * A2 \text{ Unfallrate} = 0,33 * 0,097479 = 0,03217 \left[\frac{UPS}{1 \text{ Mio Kfz} - km} \right]$$

2.1.4.3. Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen

$$P_{C1} = \frac{75,7 * S_{PKW}}{76,3} = \frac{75,7 * 74,5}{76,3} = 73,914 [\%]$$

$$P_{C2} = \frac{20,7 * S_{LKW}}{20,2} = \frac{20,9 * 23}{20,2} = 23,797 [\%]$$

$$P_{C3} = \frac{3,4 * S_{Bus}}{3,5} = \frac{3,4 * 2,5}{3,5} = 2,429 [\%]$$

$$P_{C4} = \frac{90,6 * S_{PKW}}{76,5} = \frac{90,6 * 74,5}{76,5} = 88,231 [\%]$$

$$P_{C5} = \frac{9,3 * S_{LKW}}{20} = \frac{9,3 * 23}{20} = 10,695 [\%]$$

$$P_{C6} = \frac{0,1 * S_{Bus}}{3,5} = \frac{0,1 * 2,5}{3,5} = 0,071 [\%]$$

$$P_{C7} = \frac{63,6 * S_{PKW}^2}{76,5^2} = \frac{63,6 * 74,5^2}{76,5^2} = 60,318 [\%]$$

$$P_{C8} = \frac{34,4 * (S_{LKW}^2 + 2 * S_{LKW} * S_{PKW})}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} = \frac{34,4 * (23^2 + 2 * 23 * 74,5)}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} = 39,331 [\%]$$

$$P_{C9} = \frac{2,0 * (S_{Bus}^2 + 2 * S_{PKW} * S_{Bus} + 2 * S_{LKW} * S_{Bus})}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} = \frac{2,0 * (2,5^2 + 2 * 74,5 * 2,5 + 2 * 23 * 2,5)}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} = 1,436 [\%]$$

$$P_{C10} = \frac{37,7 * S_{PKW}^2}{76,5^2} = \frac{37,7 * 74,5^2}{76,5^2} = 35,755 [\%]$$

$$P_{C11} = \frac{59,0 * (S_{LKW}^2 + 2 * S_{LKW} * S_{PKW})}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} = \frac{59,0 * (23^2 + 2 * 23 * 74,5)}{(20^2 + 2 * 20 * 76,5)} = 67,458 [\%]$$

$$P_{C12} = \frac{3,3 * (S_{Bus}^2 + 2 * S_{PKW} * S_{Bus} + 2 * S_{LKW} * S_{Bus})}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} = \frac{3,3 * (2,5^2 + 2 * 74,5 * 2,5 + 2 * 23 * 2,5)}{(3,5^2 + 2 * 76,5 * 3,5 + 2 * 20 * 3,5)} = 2,369 [\%]$$

$$C_1 = A_1 * P_{C1} = 2,372 * \frac{73,914}{100} = 1,75324 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_2 = A_1 * P_{C2} = 2,372 * \frac{23,797}{100} = 0,56447 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_3 = A_1 * P_{C3} = 2,372 * \frac{2,429}{100} = 0,05761 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_4 = B_1 * P_{C4} = 0,01657 * \frac{88,231}{100} = 0,01462 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_5 = B_1 * P_{C5} = 0,01657 * \frac{10,695}{100} = 0,001772 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_6 = B_1 * P_{C6} = 0,01657 * \frac{0,071}{100} = 0,000012 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_7 = B_2 * P_{C7} = 0,04874 * \frac{60,318}{100} = 0,029399 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_8 = B_2 * P_{C8} = 0,04874 * \frac{39,331}{100} = 0,01917 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_9 = B_2 * P_{C9} = 0,04874 * \frac{1,436}{100} = 0,0007 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_{10} = B_3 * P_{C10} = 0,03217 * \frac{35,755}{100} = 0,011502 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_{11} = B_3 * P_{C11} = 0,03217 * \frac{67,458}{100} = 0,0217 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

$$C_{12} = B_3 * P_{C12} = 0,03217 * \frac{2,369}{100} = 0,000762 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

2.1.4.4. Folgebrand bei Pannen und Unfällen

$$D_1 = C_1 * \frac{98,81}{100}$$

$$D_{13} = C_7 * \frac{99,5}{100}$$

$$D_2 = C_1 * \frac{1,19}{100}$$

$$D_{14} = C_7 * \frac{0,5}{100}$$

$$D_7 = C_4 * \frac{97,7}{100}$$

$$D_{19} = C_{10} * \frac{95,1}{100}$$

$$D_8 = C_4 * \frac{2,3}{100}$$

$$D_{20} = C_{10} * \frac{4,9}{100}$$

		C-Wert	Wahrscheinlichkeit keines/eines Folgebrandes	Ergebnis
		Ereignisse / 1Mio.Kfz-km	[%]	Ereignisse / 1Mio.Kfz-km
Panne	D1	1.753240	98,81	1.73238
	D2	1.753240	1,19	0.02086
	D3	0.564470	98,81	0.55775
	D4	0.564470	1,19	0.00672
	D5	0.057610	98,81	0.05692
	D6	0.057610	1,19	0.00069
Alleinunfall	D7	0.014620	97,7	0.01428
	D8	0.014620	2,3	0.00034
	D9	0.001772	97,7	0.00173
	D10	0.001772	2,3	0.00004
	D11	0.000012	97,7	0.00001
	D12	0.000012	2,3	0.00000
Unfall mit dem Richtungsverkehr	D13	0.029399	99,5	0.02925
	D14	0.029399	0,5	0.00015
	D15	0.019170	99,5	0.01907
	D16	0.019170	0,5	0.00010
	D17	0.000700	99,5	0.00070
	D18	0.000700	0,5	0.00000
Unfall mit dem Begegnungsverkehr	D19	0.011502	95,1	0.01094
	D20	0.011502	4,1	0.00047
	D21	0.021700	95,1	0.02064
	D22	0.021700	4,1	0.00089
	D23	0.000762	95,1	0.00072
	D24	0.000762	4,1	0.00003

Tabelle 19: Folgebrände bei Pannen und Unfällen

2.1.4.5. Gefahrgutbeteiligung

$p_{Gfg,Brand} = \text{Gefahrgutanteil am Schwerverkehr}$

$$\begin{aligned}
 & * \text{Anteil brandgefährlicher Stoffe} * \text{Zündwahrscheinlichkeit} \\
 & = 0,06 * 0,75 * 0,5 = 0,0225
 \end{aligned}$$

$p_{Gfg,Austritt} = \text{Gefahrgutanteil am Schwerverkehr}$

$$\begin{aligned}
 & * \text{Anteil an Stoffen mit gesundheitsgefährdender Wirkung} \\
 & * \text{Freisetzungswahrscheinlichkeit} = 0,06 * 0,1 * 0,2 = 0,0012
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_1 &= D_4 * (1 - p_{Gfg,Brand}) = 0,006717 * (1 - 0,0225) \\
 &= 0,006566 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz - km}} \right]
 \end{aligned}$$

$$E_2 = D_4 * p_{Gfg,Brand} = 0,006717 * 0,0225 = 0,000151 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1 \text{ Mio. Kfz - km}} \right]$$

	Wahrscheinlichkeit	D-Werte		Ergebnis
	[%]		Ereignisse / 1Mio.Kfz-km	Ereignisse / 1Mio.Kfz-km
E1	97,75	D4	0.006717	0.006566
E2	2,25	D4	0.006717	0.000151
E3	99,88	D9	0.001731	0.001729
E4	0,12	D9	0.001731	0.000002
E5	97,75	D10	0.000041	0.000040
E6	2,25	D10	0.000041	0.000001
E7	99,88	D15	0.001907	0.019051
E8	0,12	D15	0.001907	0.000023
E9	97,75	D16	0.000096	0.000094
E10	2,25	D16	0.000096	0.000002
E11	99,88	D21	0.002063	0.020612
E12	0,12	D21	0.002063	0.000025
E13	97,75	D22	0.000890	0.000870
E14	2,25	D22	0.000890	0.000020

Tabelle 20: Gefahrgutbeteiligung

2.1.4.6. Personengefährdung bei Brand infolge einer Panne

Bei einem Brand nach einer Panne kommt es in fünf Prozent der Fälle zu einem Personenschaden.

$$F_1 = D_2 * \frac{\text{Wahrscheinlichkeit}}{100} = 0,020864 * \frac{95}{100} = 0,01982 \left[\frac{\text{Ereignisse}}{1\text{Mio. Kfz} - \text{km}} \right]$$

	Wahrscheinlichkeit	Werte		Ergebnis
	[%]		Ereignisse / 1Mio.Kfz-km	Ereignisse / 1Mio.Kfz-km
F1	95	D2	0,020864	0,01982
F2	5	D2	0,020864	0,00104
F3	5	E1	0,006566	0,00033
F4	95	E1	0,006566	0,00624
F5	5	D6	0,000686	0,00003
F6	95	D6	0,000686	0,00065

Tabelle 21: Personengefährdung bei Brand infolge einer Panne

2.1.4.7. Schadensausmaßanalyse

$$p_{\text{Stau}} = \frac{\text{Anzahl an Stunden Stau pro Jahr}}{\text{Jahresstundenanzahl}} * 100 = \frac{150}{365 * 24} * 100 = 1,71233 \text{ [%]}$$

$$SA_U = SA_{\text{Brand}} + SA_{\text{Brand,Stau}} * p_{\text{Stau}} + SA_{\text{Gfg}} + SA_{\text{Gfg,Stau}} * p_{\text{Stau}} + SA_{\text{mech}}$$

$$SA_{P1} = 0,67 + 0,33 * \frac{1,712}{100} = 0,670$$

	SA _{Brand}	SA _{Brand,Stau}	P _{Stau}	SA _{Gfg}	SA _{Gfg,Stau}	P _{Stau}	SA _{mech}	Ergebnis
S P1	0,67	0,33	1,712	X	X	X	X	0,670
S P2	0,67	0,33	1,712	X	X	X	X	0,670
S P3	0,67	0,33	1,712	5,67	0,33	1,712	X	6,340
S P4	1,00	0,83	1,712	X	X	X	X	1,000
S U1	X	X	X	X	X	X	0,138	0,138
S U2	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,138	0,808
S U3	X	X	X	X	X	X	0,083	0,083
S U4	X	X	X	5,67	0,33	1,712	0,083	5,753
S U5	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,083	0,753
S U6	0,67	0,33	1,712	5,67	0,33	1,712	0,083	6,423
S U7	X	X	X	X	X	X	0,100	0,100
S U8	1,00	0,83	1,712	X	X	X	0,100	1,100
S U9	X	X	X	X	X	X	0,019	0,019
S U10	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,019	0,689
S U11	X	X	X	X	X	X	0,419	0,419
S U12	X	X	X	5,67	0,33	1,712	0,419	6,089
S U13	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,419	1,089
S U14	0,67	0,33	1,712	5,67	0,33	1,712	0,419	6,759
S U15	X	X	X	X	X	X	0,100	0,100
S U16	1,00	0,83	1,712	X	X	X	0,100	1,100
S U17	X	X	X	X	X	X	0,250	0,250
S U18	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,250	0,920
S U19	X	X	X	X	X	X	0,429	0,429
S U20	X	X	X	5,67	0,33	1,712	0,429	6,099
S U21	0,67	0,33	1,712	X	X	X	0,429	1,099
S U22	0,67	0,33	1,712	5,67	0,33	1,712	0,429	6,769
S U23	X	X	X	X	X	X	0,750	0,750
S U24	1,00	0,33	1,712	X	X	X	0,750	1,750

Tabelle 22: Schadensausmaß

2.1.4.8. Risikoberechnung

$$Risiko_{F2} = 0,00104 * 0,670 = 0,0006989$$

Häufigkeit		Schadensausmaß		Risiko
F2	0.00104	S P1	0,670	0.0006989
F3	0.00104	S P2	0,670	0.0006989
E2	0.00015	S P3	6,340	0.0009582
F5	0.00003	S P4	1,000	0.0000343
D7	0.01428	S U1	0,138	0.0019712
D8	0.00034	S U2	0,808	0.0002717
E3	0.00173	S U3	0,083	0.0001435
E4	0.00000	S U4	5,753	0.0000120
E5	0.00004	S U5	0,753	0.0000300
E6	0.00000	S U6	6,423	0.0000059
D11	0.00001	S U7	0,100	0.0000012
D12	0.00000	S U8	1,100	0.0000003
D13	0.02925	S U9	0,019	0.0005558
D14	0.00015	S U10	0,689	0.0001013
E7	0.01905	S U11	0,419	0.0079825
E8	0.00002	S U12	6,089	0.0001394
E9	0.00009	S U13	1,089	0.0001020
E10	0.00000	S U14	6,759	0.0000146
D17	0.00070	S U15	0,100	0.0000697
D18	0.00000	S U16	1,100	0.0000039
D19	0.01094	S U17	0,250	0.0027346
D20	0.00047	S U18	0,920	0.0004339
E11	0.02061	S U19	0,429	0.0088425
E12	0.00002	S U20	6,099	0.0001510
E13	0.00087	S U21	1,099	0.0009558
E14	0.00002	S U22	6,769	0.0001355
D23	0.00072	S U23	0,750	0.0005435
D24	0.00003	S U24	1,750	0.0000547
			Summe	0.0276465

Tabelle 23: Risikoberechnung

$$R = \frac{\sum(\text{Häufigkeit} * \text{Schadensausmaß}) * \text{Tunnellänge} * jDTV * \text{Betriebstage}}{10^6}$$

$$= \frac{0,0276465 * 4,6 * 22000 * 365}{10^6} = 1,02121 \left[\frac{\text{erwartbare Tote}}{\text{Jahr}} \right]$$

Aufgrund der Berechnung des Risikoäquivalentwerts kann der Tunnel in eine spezielle Gefährdungsklasse eingeteilt werden. Ein Risikoäquivalentwert von 1,02121 stuft den Tunnel in die Gefährdungsklasse IV ein. Dies ist die gefährlichste zulässige Gefährdungsklasse. Eine Auflistung sowie nähere Informationen zu den Gefährdungsklassen können aus der Tabelle 25 und Kapitel 2.3 entnommen werden.

2.2. Vereinfachtes Risikoanalysemodell³⁵

Bei der Untersuchung eines Tunnels mit geringer Abweichung von der Norm kann anstelle des allgemeinen Risikoanalysemodells aus Kapitel 2.1 ein vereinfachtes Risikoanalysemodell verwendet werden. Damit das vereinfachte Risikoanalysemodell zur Anwendung gebracht werden darf, muss der Tunnel eine geringe oder mittlere Stauhäufigkeit aufweisen. Eine geringe Stauhäufigkeit ist bei einer maximalen Staudauer von 25 Stunden pro Jahr und eine mittlere Stauhäufigkeit bei einer maximalen Staudauer von 75 Stunden pro Jahr gegeben. Kommt es im zu untersuchenden Tunnel zu einer maximalen Staudauer von über 75 Stunden pro Jahr ist das vereinfachte Risikoanalysemodell nicht anwendbar.

Desweiteren darf der Tunnel eine Gesamtlänge von 7,5 Kilometer, eine Verkehrsstärke bei einem Richtungsverkehrstunnel von 60.000 Kfz/Tag und eine Verkehrsstärke bei einem Gegenverkehrstunnel von 40.000 Kfz/Tag nicht überschreiten. Der Tunnel muss eine ebene Tunneloberfläche aufweisen, ein einfaches Lüftungssystem (nicht kombiniert) und muss durchgehend zwei Fahrstreifen besitzen. Eine Längsneigung von unter drei Prozent ist erlaubt und die Branddetektion muss innerhalb von 150 Sekunden erfolgen. Desweiteren darf der Tunnel keine Querschnittsänderungen (außer für Pannengebühren) aufweisen.

2.2.1. Häufigkeitsäquivalent

Grundlage des vereinfachten Risikoanalysemodells ist das Häufigkeitsäquivalent. Diese Kennzahl wird nach Formel 29 ermittelt und spiegelt die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses wider, welches zu einem Personenschaden führt.

$$H = jDTV * 3,65 * 10^{-4} * L_{TU} * U_R * f_{VK} * f_{TL} * f_{VF}$$

Formel 29: Häufigkeitsäquivalent des vereinfachten Risikoanalysemodells

Für $jDTV$ ist die jährliche durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke zu verwenden. Für L_{TU} wird die durchschnittliche Tunnellänge der beiden Röhren verwendet, sofern diese

³⁵ [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung

beiden Längen nicht mehr als zehn Prozent voneinander abweichen. Sollte dies der Fall sein, müssen beide Röhren getrennt voneinander betrachtet werden.

Der Wert für U_R kann für Tunnels mit Richtungsverkehr und für Tunnels mit Gegenverkehr aus der Tabelle 24 entnommen werden.

$U_{R,RV}$	0,112 / 1 Mio.Kfz-km
$U_{R,GV}$	0,077 / 1 Mio.Kfz-km

Tabelle 24: U_R Basiswert für vereinfachtes Risikoanalysenmodell

Je nach Tunnelart (Richtungsverkehr, Gegenverkehr) kann für f_{VK} die Formel 7 oder die Formel 8 verwendet werden. Die Berechnung von f_{TL} erfolgt nach Formel 9 und für f_{VF} kann die Formel 11 bzw. Formel 10 verwendet werden.

2.2.2. Schadensausmaßäquivalent

Das Schadensausmaßäquivalent kann für Tunnels mit Richtungsverkehr, für Tunnels mit Gegenverkehr und geringer Stauhäufigkeit und für Tunnels mit Gegenverkehr und mittlerer Stauhäufigkeit aus dem Anhang entnommen werden. Eine Tabelle mit Korrekturfaktoren für abweichenden Schwerverkehrsanteil befindet sich ebenfalls im Anhang.

2.2.3. Risikoäquivalentwert

Der Risikoäquivalentwert spiegelt den Risikowert des untersuchten Tunnels auf ein Jahr bezogen wider. Er wird durch die Multiplikation von Häufigkeits- und Schadensausmaßäquivalent berechnet.

$$R = H * S \left[\frac{\text{erwartbare Tote}}{\text{Jahr}} \right]$$

Formel 30: Risikoäquivalentwert des vereinfachten Risikoanalysemodells

Durch den Risikoäquivalentwert werden die zu erwartenden Toten pro Jahr angegeben, er erlaubt überdies eine Einteilung der einzelnen Tunnels in Gefährdungsklassen nach Tabelle 25.

2.3. Gefährdungsklassen

Anhand des Risikoäquivalentwertes kann eine Einstufung des Tunnels in bestimmte Gefährdungsklassen nach Tabelle 25 durchgeführt werden. Durch die eingestufte Gefährdungsklasse werden notwendigen Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen ermittelt. Je höher die Gefährdungsklasse ist, desto häufigere und desto bessere Sicherheitseinrichtungen sind in den Tunnel einzubauen. Beispielsweise ist eine zweiseitige Anspeisung der Energieversorgungsanlagen bei Tunnels der Gefährdungsklasse III und IV verpflichtend, bei Tunnels der Gefährdungsklasse II benötigt es einer gesonderten Überprüfung ob diese ein- oder zweiseitig sein muss und bei Tunnels der Gefährdungsklasse I ist nur eine einseitige Anspeisung nötig.

Ebenso verändern sich bestimmte Rahmenbedingungen bezüglich der Informationslaufzeiten. Die Tunnelwarte muss bei einem Tunnel der Gefährdungsklasse IV wesentlich schneller über ein Problem informiert werden, als bei einem Tunnel der Gefährdungsklasse I, II oder III. Beispielsweise darf die Informationslaufzeit einer Notrufanlage vom Tunnel zur Überwachungszentrale bei einem Tunnel der Gefährdungsklasse IV maximal drei Sekunden dauern. Bei Tunnels der Gefährdungsklassen II und III darf diese schon fünf Sekunden betragen. Wohingegen der Einbau einer Notrufanlage bei Tunnels der Gefährdungsklasse I generell nicht nötig ist.

Risikoäquivalentwert		Gefährdungsklasse
Untere Grenze	Obere Grenze	
-	$2 \cdot 10^{-2}$	I
$> 2 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1}$	II
$> 1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	III
$> 5 \cdot 10^{-1}$	-	IV

Tabelle 25: Einteilung der Gefährdungsklassen³⁶

Aufgrund der Abhängigkeit zwischen Risikoäquivalentwert und jahresdurchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (jDTV) ist auch die Einstufung der Gefährdungsklasse von der jahresdurchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke abhängig. In Abbildung 11 ist diese Abhängigkeit für die Tunnel Götschka (4425m Länge), Neumarkt im Mühl-

³⁶ [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung – Seite 29

kreis (1970m Länge), Lest (545m Länge), Walchshof (800m Länge) und Manzenreith (715m Länge) der S10 Mühlviertler Schnellstraße abgebildet.

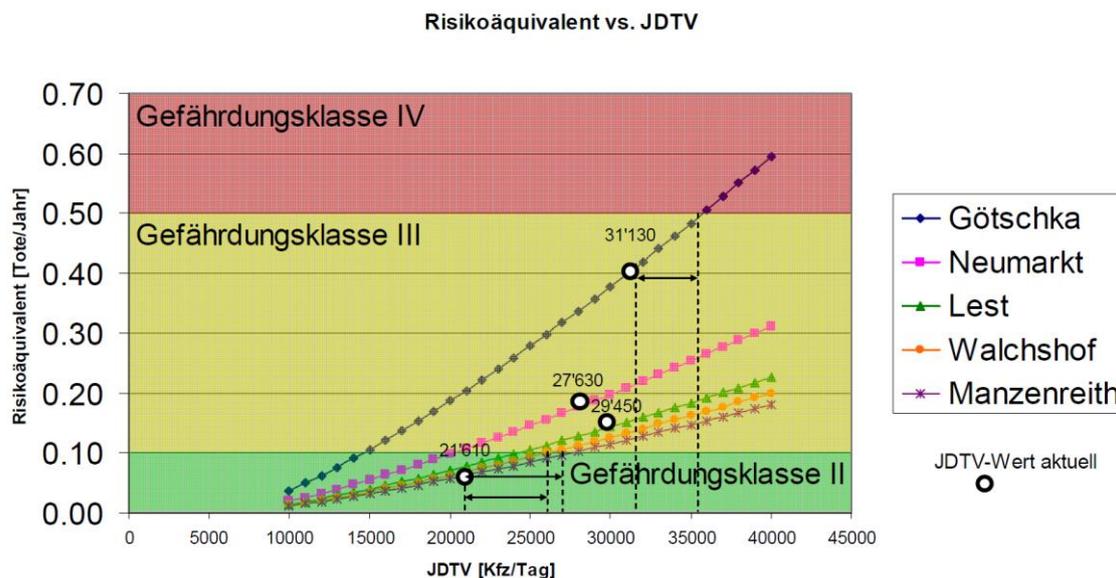


Abbildung 11: Einstufung der Gefährdungsklasse anhand der jDTV³⁷

Weiterführende Informationen bezüglich Gefährdungsklassen können aus [RVS 09.02.22]³⁸ und [Bopp 2009]³⁹ entnommen werden.

³⁷ [Welte 2008] Teilgutachten Nr. 15: Tunnelsicherheit - Seite 29

³⁸ [RVS 09.02.22] Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen

³⁹ [Bopp 2009] Sicherheitsbeurteilung: Tunnel Judenburg - Seite 20ff

2.4. Einflussfaktoren zur Senkung des Risikos

Das Schadensausmaß bei Brand und Gefahrgutbeteiligung hängt von folgenden Faktoren ab:

2.4.1. Verkehrsführung

Anhand der Verkehrsführung (Richtungsverkehr oder Gegenverkehr) kommt es zu unterschiedlichen Entscheidungszweigen im Ereignisbaum. Dies führt zu unterschiedlichen Unfallraten, Unfalltypen sowie Fahrzeugbeteiligungen und in weiterer Folge zu einem unterschiedlichen Schadensausmaß sowie Risikoäquivalentwert.

2.4.2. Tunnellänge

Die Tunnellänge beeinflusst die Unfallrate sowie das Schadensausmaß.

2.4.3. Lüftungsart

Die Lüftung beeinflusst das Schadensausmaß im Brandfall, da es je nach Lüftungsart zu unterschiedlichen Rauchentwicklungen kommt.

2.4.4. Abstand der Notausgänge

Die Abstände der Notausgänge haben einen sehr großen Einfluss auf die Evakuierung des Tunnels. Die Abstände der Notausgänge wurden auf eine definierte Länge von 250 und 500 Metern festgelegt. Sollte die Entfernung der Notausgänge von diesen Werten abweichen, können diese interpoliert werden.

2.4.5. Verkehrsstärke

Die Unfallrate wird durch die Verkehrsstärke beeinflusst. Ebenso ist das Schadensausmaß von der Verkehrsstärke bzw. den Fahrzeugen im Tunnel abhängig und muss im Ereignisbaum mitberücksichtigt werden.

2.4.6. Aktuelle Verkehrssituation (Stau, normale Verkehrsverhältnisse)

Das Schadensausmaß wird durch Staus maßgeblich beeinflusst. Durchschnittlich kommt es zu einer Stauhäufigkeit von 0,29 Prozent, sofern der Tunnel von keinen Verflechtungsstrecken beeinflusst wird. Wird der Tunnel von einer oder mehreren Verflechtungsstrecken beeinflusst, ist die Beeinflussung bezüglich Staubildung separat zu prüfen.

2.4.7. LKW-Anteil

Der LKW-Anteil beeinflusst das Schadensausmaß bei mechanischen Ereignissen und im Brandfall. Durch einen höheren LKW-Anteil kommt es häufiger zu einem Schadensszenarium mit LKW-Beteiligung.

2.4.8. Anteil des Gefahrguttransports am Schwerverkehr

Das Risiko von Unfällen an denen Gefahrgut beteiligt ist, steigt mit dem Anteil des Gefahrguttransports am Schwerverkehr und hat Einfluss auf das Schadensausmaß. Der Anteil des Gefahrgutes am Schwerverkehr wird bei der Ermittlung des Risikoäquivalentwertes mitberücksichtigt. In der oben gezeigten Methode wurde der Gefahrguttransport nur grob berücksichtigt. Ist eine genauere Betrachtung erwünscht verweise ich hier auf die OECD/PIARC Studie⁴⁰.

2.4.9. Längsneigung vor dem Tunnel

Die Längsneigung vor dem Tunnel beeinflusst die Häufigkeit von LKW-Bränden, da es bei starken Neigungen zu Überhitzung der Bremsen und in weiterer Folge zum Fahrzeugbrand kommen kann.

2.4.10. Längsneigung im Tunnel

Aufgrund der Längsneigung im Tunnel kann es im Brandfall zu einem erhöhten Schadensausmaß kommen. Hierbei ist zu überprüfen, ob im Brandfall die Lüftung ausreichend dimensioniert ist, um die Rauchentwicklung einzudämmen. Außerdem kann es durch Längsneigung im Tunnel zu einer erhöhten Unfallrate kommen.

⁴⁰ [OECD 1997] Road Safety principles and models

2.4.11. Zulässige Fahrgeschwindigkeit

Aufgrund der maximal zulässigen Geschwindigkeit kommt es zu unterschiedlichen Unfallraten sowie mechanischen Unfallschäden. In Tunnels im Gegenverkehrsbetrieb wurde eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 80 Kilometer pro Stunde und bei Tunnels im Richtungsverkehrsbetrieb eine maximal zulässige Geschwindigkeit von 100 Kilometer pro Stunde festgelegt. Diese maximal zulässige Geschwindigkeit ist jedoch zusätzlich von der Trassierung⁴¹ sowie der Linienführung im Tunnel⁴² abhängig. Aufgrund der Trassierung und der Linienführung im Tunnel ist eine Reduktion der maximalen Geschwindigkeit möglich.

Sollten die Werte der maximal zulässigen Geschwindigkeit (80/100 km/h) abweichen, muss man die Unfallrate sowie das mechanische Schadensausmaß verändern.

2.4.12. Zeitlicher Ablauf Detektion – Inbetriebnahme Lüftung – Evakuierung

Das Schadensausmaß ist vom zeitlichen Ablauf von Erkennung des Unfalles bis zur Evakuierung des Tunnels abhängig. Die Zeit bis zur Alarmierung darf nach österreichischen Richtlinien maximal 150 Sekunden betragen. Ist der Tunnel mit speziellen Frühwarnsystemen ausgestattet, kann dieser Wert angepasst werden, was zu einer Reduktion des Schadensausmaßes führt.

2.4.13. Abstellstreifen/Pannenbucht

Die Anzahl und der Abstand von Abstellstreifen und Pannenbuchten beeinflusst die Unfallrate sowie das Schadensausmaß, da es bei Pannen zu weniger Auffahrunfällen und zu einer geringeren Staubildung kommt, wenn die Abstellstreifen/Pannenbuchten näher beieinander liegen.

2.4.14. Fahrstreifenbreite

Die Fahrbreite hat direkten Einfluss auf die Unfallrate. Im oberen Modell wird von einer Fahrstreifenbreite von 3,5 Metern und einem Sicherheitsstreifen von 0,5 Metern ausgegangen.

⁴¹ [RVS 03.03.23] Trassierung

⁴² [RVS 09.01.21] Linienführung im Tunnel

3. SENSORENKONZEPT

Im folgenden Kapitel soll ein Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation vorgestellt werden. Dieses Sensorkonzept soll in erster Linie die Reaktionszeit des Tunnelwarts in kritischen Verkehrssituationen in Straßentunnels verringern, könnte aber ohne größeren Aufwand zur Warnung der Verkehrsteilnehmer verwendet werden. Ebenso wäre das automatische Einleiten von Sicherheitsmaßnahmen durch die Tunnelsteuerung möglich. Hierbei müsste man aber zusätzliche Maßnahmen zur Fehlererkennung einbauen, damit der Tunnel nicht aufgrund eines defekten Sensors gesperrt wird.

In der aktuellen Ausführung dient das Sensorkonzept dazu, dem Tunnelwart frühzeitig zu warnen und ihm die kritischsten Verkehrsstellen direkt vor Augen zu führen. Dadurch würde sich die Aufmerksamkeit des Tunnelwarts, schon vor dem ereignen eines Unfalls, auf die Gefahrenstelle richten. Dadurch ist ein schnelleres Eingreifen des Tunnelwarts möglich. Dieser kann dadurch früher entscheiden, ob es sinnvoll ist, die höchstzulässige Geschwindigkeit zu reduzieren oder sogar den Tunnel komplett zu sperren. Dadurch könnten Verkehrsunfälle vermieden werden. Sollte es aber dennoch zu einem Unfall kommen, würde das frühzeitige Sperren bzw. die reduzierte Geschwindigkeit dafür sorgen, dass sich weniger Verkehrsteilnehmer im Straßentunnel befinden. Deshalb würde sich die Anzahl der beteiligten Verkehrsteilnehmer reduzieren und sich die Schwere des Personenschadens herabsetzen.

3.1. Grundlage

Um die Verkehrssituation innerhalb von Straßentunnels zu erkennen, werden alle 50 bis 100 Meter Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Anhand dieser Messungen können sowohl zu schnell wie auch zu langsam fahrende Fahrzeuge ermittelt werden. Zu langsam fahrend soll hier nicht zwingend das Unterschreiten der Mindestgeschwindigkeit bedeuten, sondern das Unterschreiten eines vordefinierten Schwellwertes. Dieser Schwellwert ist frei wählbar und dient dazu, die Aufmerksamkeit des Tunnelwartes auf die Umgebung des Fahrzeuges, welches zu langsam fährt, zu lenken. Ist eine solche Situation durch das Sensorkonzept erkannt worden, kann der Tunnelwart entscheiden, ob dieses Fahrzeug ein Risiko für nachkommende Verkehrsteilnehmer darstellt – und der Tunnelwart daher den Tunnel sperrt, die maximal zulässige Geschwindigkeit herab-

setzt oder schon Hilfskräfte anfordert – oder ob nichts unternommen werden muss. Nach ausführlichen Testläufen könnte die Entscheidung auch automatisiert durchgeführt werden und zur Unfallverminderung beitragen.

3.2. Technische Ausführung

Wie bereits im Kapitel 3.1 erwähnt, wird alle 50 bis 100 Meter eine Geschwindigkeitsmessung durchgeführt. Die Messstationen bestehen aus jeweils zwei Lichtschranken, welche in einem Abstand von fünf oder zehn Zentimeter (abhängig von den verwendeten Sensoren) zueinander angebracht sind. Diese Messstationen werden am Sicherheitsstreifen neben der Fahrbahn angebracht. Am Sicherheitsstreifen auf der gegenüberliegenden Seite des Straßentunnels wird der Reflektor für die Lichtschranken angebracht. Diese Lichtschranken sind somit so tief angebracht, dass sie im Regelfall nicht durch die Karosserie eines Fahrzeuges sondern durch die Reifen durchbrochen werden. Dies ist wichtig, um nebeneinander fahrende Fahrzeuge erkennen zu können.

Wird von einem Reifen der erste Lichtschranken durchbrochen, wird die aktuelle Zeit festgehalten. Beim Durchbrechen des zweiten Lichtschrankens wird ebenfalls die aktuelle Zeit festgehalten. Danach wird von einer Kontrolleinheit die Zeitdifferenz ermittelt. Anhand dieser Zeitdifferenz und dem Abstand von zehn Zentimeter der beiden Lichtschranken wird die Geschwindigkeit ermittelt, mit der das Fahrzeug unterwegs ist. Unterschreitet ein Fahrzeug eine festgelegte Geschwindigkeit wird sofort der Tunnelwart darüber informiert. Sollte es erwünscht sein, könnte man dem Tunnelwart automatisiert das Überwachungsbild des entsprechenden Streckenabschnittes auf seinen Hauptbildschirm anzeigen.

Aufgrund der horizontalen Messung der Geschwindigkeit über beide Fahrbahnen ist dieses System bei Tunnel mit Gegenverkehrsbetrieb nicht anwendbar. Daher wäre eine Messung vertikal von der Decke herunter zu bevorzugen. Dafür müsste man jedoch einen diffusen Lichtschranken finden, welcher eine Messweite von sechs Metern überbrücken kann und eine Schaltzeit von mindestens einem kHz (bei einem Sensorabstand von zehn Zentimeter) bzw. zwei kHz (bei einem Sensorabstand von fünf Zentimeter) aufweist. Ob dieser Lichtschranke ein Ultraschallsensor, Laserentfernungsmesser oder Radarmessgerät wäre ist dabei sekundär. Das einzig Wichtige ist, dass er die oben genannten Kenndaten erfüllt und ein Low- oder High-Signal an das Bus-Modul weitergibt, sobald ein Fahrzeug den Schranken durchbricht. Das Weitergeben von Analogwerten wäre nicht nötig, da die Kontrollstelle keinerlei Information über die Entfernung/Größe des Objektes benötigt, sondern nur, ob ein Fahrzeug die betreffende Stelle passiert hat

oder nicht. Wie bereits bekannt wird die Geschwindigkeit durch die Zeitdifferenz der beiden Sensoren ermittelt. Eine vertikale Messung durch einen herkömmlichen Lichtschranken ist leider nicht möglich, da dieser Sensortyp entweder eine aktive Gegenstelle oder einen Reflektor benötigt um diese Distanz zu überbrücken. Diese aktive Empfangsgegenstelle oder dieser passive Reflektor müsste in die Asphaltdecke eingebettet werden. Das Einbauen einer aktiven Gegenstelle ist aufgrund der Wartbarkeit nicht durchführbar. Ebenso ist das Einbetten eines Reflektors in die Asphaltdecke nur bedingt durchführbar, da zum einen diese Reflektoren durch Blenden den Verkehrsteilnehmer stören könnten und zum anderen diese sehr leicht verschmutzt werden und dadurch die Reflexion des Lichtschranken nicht mehr gegeben ist. Weiters stellt das mögliche Lösen dieser Reflektoren ein Sicherheitsrisiko dar und könnte in weiterer Folge zu Unfällen oder Pannen bzw. Beschädigungen an Fahrzeugen führen. Aufgrund der oben beschriebenen Problematik wird der Einbau von horizontalen Messstationen bevorzugt. Alle weiteren Ausführungen beziehen sich auf diese Bauart.

Aufgrund der horizontalen Messung kann nicht unterschieden werden, ob das gemessene Fahrzeug auf der ersten oder der zweiten Spur fährt. Ebenso könnte es zu Überlappungen der Fahrzeuge bzw. deren Räder kommen. Dadurch würde man eine beliebige Geschwindigkeit zwischen dem langsameren und dem schnelleren Fahrzeug messen. Dies kommt zustande, weil das langsamere Fahrzeug A den ersten Lichtschranken und das schnellere Fahrzeug B den zweiten Lichtschranken durchbricht, bevor Fahrzeug A diesen erreicht. Aufgrund des geringen Abstandes von zehn Zentimeter zwischen den beiden Lichtschranken und der Tatsache, dass im Regelfall nur die Räder und nicht die Karosserie gemessen wird, tritt dieser Effekt sehr selten auf. Sollten sich zwei baugleiche Fahrzeuge mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen und sich die Räder vollkommen überdecken bzw. nahtlos ineinander übergehen, wird nur ein Fahrzeug erkannt und dessen Geschwindigkeit gemessen. Da diese Messung nicht zur Fahrzeugzählung sondern nur zur Geschwindigkeitsermittlung verwendet wird, ist es nicht erforderlich, jedes Fahrzeug einzeln zu erkennen sondern nur die Geschwindigkeit der durchfahrenden Fahrzeuge. Aufgrund der gleichen Geschwindigkeit der beiden Fahrzeuge stimmen die ermittelten Werte und die Tunnelwarte erhält dennoch die korrekten Werte.

Sollte ein Fahrzeug eine Panne haben und es nicht mehr in eine Pannenbucht schaffen, gibt es zwei Szenarien um diese Panne zu ermitteln. Durch die Panne wird das Fahrzeug immer langsamer und unterschreitet beim Passieren einer Messstation die festgelegte Geschwindigkeit, woraufhin der Tunnelwart informiert wird. Jedoch kann es aufgrund des Abstandes von 50 bis 100 Metern zwischen den einzelnen Messungen vorkommen, dass ein Fahrzeug zwischen zwei Messstationen liegen bleibt, ohne zuvor die festgelegte Geschwindigkeit zu unterschreiten. Somit wird das stehende Fahrzeug nicht erkannt. Sollte jedoch zu diesem Zeitpunkt ein normales Verkehrsaufkommen herrschen, wird es aufgrund des blockierten Fahrstreifens zu stockendem Verkehr kommen. Dadurch wird ein anderes Fahrzeug die festgelegte Geschwindigkeit unterschreiten und die Tunnelwarte wird über das vorhandene Problem informiert. Sollte das Verkehrsaufkommen sehr gering sein, ist die vom stehenden Fahrzeug ausgehende Gefahr um vieles geringer als bei starkem Verkehrsaufkommen. Desweiteren ist ein stehendes Fahrzeug in einem leeren Tunnel um vieles leichter zu erkennen, als in vollen Tunnels. Daher ist das nicht automatisierte Erkennen weniger problematisch.

3.3. Technische Grundlagen

3.3.1. Abtastfrequenz der Sensoren

Zu Beginn wurde die benötigte Abtastfrequenz der Sensoren berechnet. Dies war notwendig um herauszufinden, welche Sensoren für diese Aufgabe verwendet werden können. Dafür wurde die notwendige Zeit zur Überbrückung des Sensorabstandes (fünf bzw. zehn Zentimeter) bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ermittelt. Danach wurde von dieser Zeit der Kehrwert genommen um die benötigte Abtastfrequenz zu erhalten.

s	Distanz zwischen den beiden Sensoren [cm]
v	Geschwindigkeit des Fahrzeuges [cm/s]
t	Benötigte Zeit des Fahrzeuges um die Entfernung zwischen den Sensoren zurückzulegen [ms]
f	Notwendige Abtastfrequenz der Sensoren [Hz]

$$t = \frac{s}{v} * 1000$$

Formel 31: Zeitberechnung zur Ermittlung der Abtastfrequenz

$$f = \frac{1}{t * 10^{-3}}$$

Formel 32: Ermittlung der Abtastfrequenz

3.3.1.1. Berechnungsbeispiel

Ein Fahrzeug fährt mit einer Geschwindigkeit von 100 Kilometer pro Stunde durch den Tunnel. Der Abstand zwischen den beiden Sensoren beträgt fünf Zentimeter.

$$t = \frac{s}{v} * 1000 = \frac{5}{100 * \frac{1000 * 100}{3600}} * 1000 = 1,8[ms]$$

$$f = \frac{1}{t * 10^{-3}} = \frac{1}{1,8 * 10^{-3}} = 555,56 [Hz]$$

3.3.1.2. Ermittelte Ergebnisse

Geschwindigkeit des Fahrzeugs			Benötigte Zeit [ms] um eine Distanz von x [cm] zurückzulegen			Minimale Abtastfrequenz [Hz]	
[km/h]	[m/s]	[cm/s]	x = 5cm	x = 10cm	x = 200 cm	x = 5cm	x = 10cm
10	2,78	277,87	18.00	36.00	720.0	55,56	27,78
20	5.56	555.56	9.00	18.00	360.0	111.11	55.56
30	8.33	833.33	6.00	12.00	240.0	166.67	83.33
40	11.11	1111.11	4.50	9.00	180.0	222.22	111.11
50	13.89	1388.89	3.60	7.20	144.0	277.78	138.89
60	16.67	1666.67	3.00	6.00	120.0	333.33	166.67
70	19.44	1944.44	2.57	5.14	102.9	388.89	194.44
80	22.22	2222.22	2.25	4.50	90.0	444.44	222.22
90	25.00	2500.00	2.00	4.00	80.0	500.00	250.00
100	27.78	2777.78	1.80	3.60	72.0	555.56	277.78
110	30.56	3055.56	1.64	3.27	65.5	611.11	305.56
120	33.33	3333.33	1.50	3.00	60.0	666.67	333.33
130	36.11	3611.11	1.38	2.77	55.4	722.22	361.11
140	38.89	3888.89	1.29	2.57	51.4	777.78	388.89
150	41.67	4166.67	1.20	2.40	48.0	833.33	416.67
160	44.44	4444.44	1.13	2.25	45.0	888.89	444.44
170	47.22	4722.22	1.06	2.12	42.4	944.44	472.22
180	50.00	5000.00	1.00	2.00	40.0	1000.00	500.00
190	52.78	5277.78	0.95	1.89	37.9	1055.56	527.78
200	55.56	5555.56	0.90	1.80	36.0	1111.11	555.56
210	58.33	5833.33	0.86	1.71	34.3	1166.67	583.33
220	61.11	6111.11	0.82	1.64	32.7	1222.22	611.11
230	63.89	6388.89	0.78	1.57	31.3	1277.78	638.89
240	66.67	6666.67	0.75	1.50	30.0	1333.33	666.67
250	69.44	6944.44	0.72	1.44	28.8	1388.89	694.44
260	72.22	7222.22	0.69	1.38	27.7	1444.44	722.22
270	75.00	7500.00	0.67	1.33	26.7	1500.00	750.00
280	77.78	7777.78	0.64	1.29	25.7	1555.56	777.78
290	80.56	8055.56	0.62	1.24	24.8	1611.11	805.56
300	83.33	8333.33	0.60	1.20	24.0	1666.67	833.33
310	86.11	8611.11	0.58	1.16	23.2	1722.22	861.11
320	88.89	8888.89	0.56	1.13	22.5	1777.78	888.89
330	91.67	9166.67	0.55	1.09	21.8	1833.33	916.67
340	94.44	9444.44	0.53	1.06	21.2	1888.89	944.44
350	97.22	9722.22	0.51	1.03	20.6	1944.44	972.22
360	100.00	10000.00	0.50	1.00	20.0	2000.00	1000.00

Tabelle 26: Ermittlung der minimalen Abtastfrequenz der Sensoren

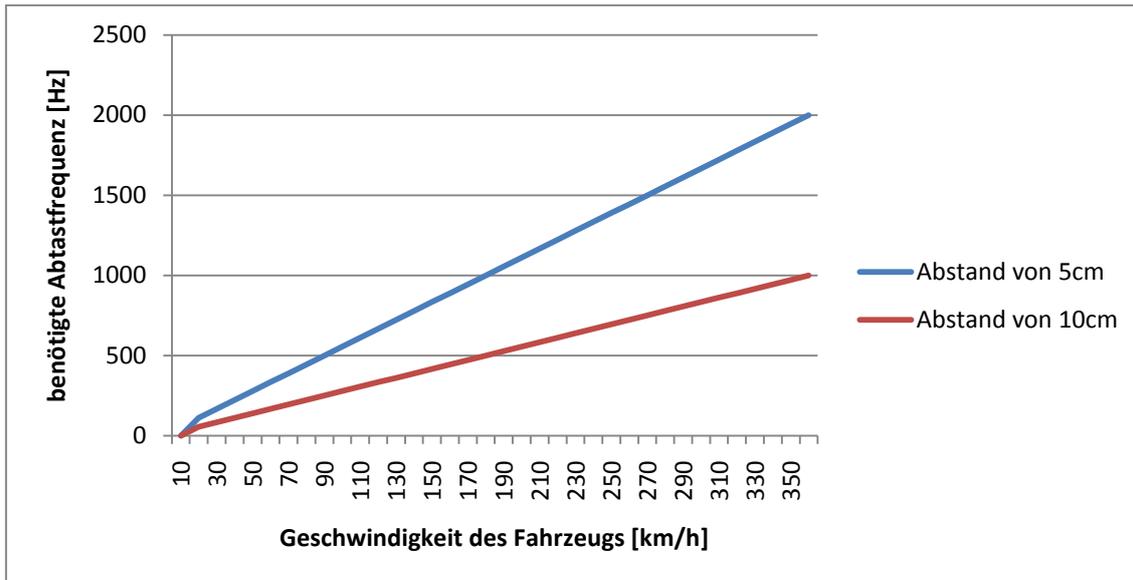


Abbildung 12: Minimal benötigte Abtastfrequenz der Lichtschranken in Hz bei gegebenem Abstand

Um Geschwindigkeiten bis 360 Kilometer pro Stunde noch erkennen zu können, benötigt man bei einem Abstand von fünf Zentimeter eine minimale Abtastfrequenz von zwei Kilohertz bzw. bei einem Abstand von zehn Zentimeter eine minimale Abtastfrequenz von einem Kilohertz. Sollen Geschwindigkeiten über 360 Kilometer pro Stunde erkannt werden, müsste man entweder Sensoren mit einer höheren Abtastfrequenz verwenden oder die Entfernung zwischen den beiden Sensoren vergrößern. Das Vergrößern der Entfernung ist jedoch nicht zu empfehlen, da sich dadurch die Wahrscheinlichkeit von Fehlmessungen bzw. von Fehlinterpretationen der Geschwindigkeiten erhöht. Dies tritt auf, wenn der erste Sensor von einem anderen Fahrzeug durchbrochen wird, als der zweite Sensor. Die benötigte Genauigkeit zur Ermittlung der Zeit in welcher der Sensor durchbrochen wird ist mit 100 Mikrosekunden erreicht. Mit dieser Genauigkeit ist beispielsweise das Unterscheiden zwischen den Geschwindigkeiten von 250 bis 270 Kilometer pro Stunde nicht mehr möglich, jedoch ist der Fokus dieses Sensorkonzeptes die Detektion von langsamen Fahrzeugen und nicht die Erkennung der genauen Geschwindigkeit von Rasern zur strafrechtlichen Verfolgung. Dies würde aufgrund der fehlenden Kennzeichen-Ermittlung ohnehin nicht funktionieren. Wenn die benötigten Anzeigeelemente vorhanden sind, ist es dennoch möglich dem Lenker mitzuteilen, dass dieser zu schnell unterwegs ist. Dafür ist es nämlich unerheblich ob dieser um 150 oder um 170 Kilometer pro Stunde zu schnell unterwegs ist.

Neben der Ermittlung der minimalen Abtastfrequenz wurde ebenso die minimale Abholhäufigkeit (Zykluszeit des Bussystems) berechnet. Hierbei wurde von einem Radstand von zwei Metern ausgegangen. dadurch ergibt sich eine minimale Zykluszeit von 20 Millisekunden. Dies ist aber eine sehr vereinfachte Darstellung und kann in der Praxis nicht angewendet werden, weil es zum einen eine zweite Fahrspur gibt und zum anderen die Radstände um vieles kleiner sein können. Die zweite Fahrspur sorgt dafür, dass es Messungen zwischen der Messung des Vorderrades von Spur eins und des Hinterrades der Spur eins kommen kann. Desweiteren gibt es bei LKW-Zugmaschinen einen Radstand von 1300 Millimeter zwischen der zweiten und der dritten Achse. Aufgrund einer Bereifung von z.B. 315/70R22,5 (Reifendurchmesser von 1013 Millimeter) ergibt dies eine Lücke von 287 Millimetern zwischen den beiden Reifen. Dadurch verringert sich der minimale Zykluszeit auf 2,87 Millisekunden. Grundsätzlich ist ein Bussystem zu wählen, welches eine möglichst geringe Zykluszeit aufweist, da aufgrund dieser Zykluszeit der minimal notwendige Abstand zwischen den zu erkennenden Reifen gegeben ist. Folglich ist eine Überlappung von Reifen zwischen der ersten und der zweiten Fahrspur umso geringer, je geringer die Zykluszeit des Bussystems ist.

3.3.2. Überlagerungen

Nach der Berechnung der minimalen Abtastfrequenz und Zykluszeit würde eine Abschätzung der auftretenden Überlagerungen durchgeführt. Dafür müsste die Verkehrsstärke in Abhängigkeit der Uhrzeit auf ausgewählten Autobahnstraßen ermittelt werden. Dies geschah anhand der Werte der Straßenverkehrszählung 2000⁴³. Als Berechnungsgrundlage wurden die Messstationen 7.A9 Gleinalmtunnel, 14.A10 Tauerntunnel-Nord, 4.A13 Brennersee und 8.S6 Tanzenbergtunnel herangezogen. Der Gleinalm- und der Tauerntunnel sind einröhrige Tunnels, der Tanzenbergtunnel ein zweiröhriger Tunnel und die A13 auf der Höhe Brennersee eine zweispurige Autobahn.

Wochentag	DI	SA	FR	SO	DI	SA	MI	MO	SO	DO
Startzeit	15	9	15	15	15	9	6	6	15	15
Endzeit	19	12	19	19	19	12	9	9	19	19
Gleinalmtunnel	3155	3035	4579		1737	3073		1430	4846	4151
Tauerntunnel	1758	3770	3901	3495	4378	7001	2318	2245	3930	3000
Brennersee	3315	8198	5641	5547	5858	10547	2981	2781	5928	3697
Tanzenbergtunnel	4514	4900	8574	5648	6478	5747	4259	5424	5346	7262

Tabelle 27: Straßenverkehrszählung 2000⁴⁴

Anhand dieser Zahlen wurde die Zeit mit dem größten und niedrigstem Verkehrsaufkommen und die durchschnittliche Anzahl an Verkehrsteilnehmern pro Stunde ermittelt.

sDV	Stundendurchschnittliche Verkehrsstärke [Kfz pro Stunde]
n	Anzahl unterschiedlicher Erhebungstage zur gleichen Uhrzeit unter Berücksichtigung von Arbeitstag und Wochenende
BZ	Beobachtungszeit [h]

$$sDV = \frac{\sum_{i=1}^n \text{gezählteFahrzeuge}[i]}{n * BZ}$$

Formel 33: Stundendurchschnittliche Verkehrsstärke

$$sDV = \frac{\sum_{i=1}^n \text{gezählteFahrzeuge}[i]}{n * BZ} = \frac{3155 + 4579 + 1737 + 4151}{4 * 4} = 851,4$$

⁴³ [SVZ 2000] Straßenverkehrszählung

⁴⁴ [SVZ 2000] Straßenverkehrszählung, Seite 185, 186, 188 und 190

	Arbeitstag 15-19 Uhr	Samstag 9-12 Uhr	Arbeitstag 6-9 Uhr	Sonntag 15-19 Uhr	Max	Min
Gleinalmtunnel	851.4	1018.0	476.7	1211.5	1211.5	476.7
Tauerntunnel	814.8	1795.2	760.5	928.1	1795.2	760.5
Brennersee	1156.9	3124.2	960.3	1434.4	3124.2	960.3
Tanzenbergtunnel	1676.8	1774.5	1613.8	1374.3	1774.5	1374.3

Tabelle 28: Stundendurchschnittliche Verkehrsstärke

Danach wurde anhand der minimalen und maximalen Verkehrsstärken die jeweilige Anzahl an Fahrzeugen pro Sekunde (VS_{max} , VS_{min}) ermittelt, welche in diesen Streckenabschnitt einfahren.

$$VS_{max} = \frac{sDV}{3600} = \frac{1211,5}{3600} = 0,34$$

	Maximale und Minimale Verkehrsstärke pro Sekunde	
	Max	Min
Gleinalmtunnel	0.337	0.132
Tauerntunnel	0.499	0.211
Brennersee	0.868	0.267
Tanzenbergtunnel	0.493	0.382

Tabelle 29: Maximale und Minimale Sekundendurchschnittliche Verkehrsstärke

Daraus konnte die Zeit ermittelt werden, wie lange es dauert, bis ein neues Fahrzeug in den Streckenabschnitt einfährt. Zuvor mussten diese Fahrzeuge auf die zur Verfügung stehenden Fahrstreifen aufgeteilt werden. Bei zweispurigen Fahrbahnen und in verkehrsstarken Zeiten wurde ein Verkehrsanteil von einem Drittel auf der ersten und zwei Drittel auf der zweiten Fahrspur angenommen. In verkehrsschwachen Zeiten wurde diese Aufteilung aufgrund des Fahrverhaltens der Verkehrsteilnehmer umgedreht.

Die beiden einspurigen Tunnel wurden in diesem Fall wie zweispurige Tunnel berechnet. Dies wurde durchgeführt, weil zum einen dieses Sensorkonzept bei Tunnels im Gegenverkehrsbetrieb nicht anwendbar ist und zum anderen, weil zum Testen des Sensorkonzeptes eine möglichst hohe aber dennoch realistische Verkehrsstärken zur Berechnung notwendig waren. Dies wurde durch die Verwendung der Verkehrszahlen von langen einspurigen Tunnels realisiert. Einspurige Tunnels befinden sich auf verkehrsstarken Strecken und wurden aufgrund ihrer großen Länge und den daraus resultierenden Kosten nur einspurig gebaut. Die Daten der Verkehrszählerhebung sind in diesem

Bereich ebenfalls genauer, weil diese mittels automatischen und manuellen Zählstellen ermittelt wurden, was zu einer erhöhten Genauigkeit der Verkehrsstärke führt.

Anhand der aufgeteilten Verkehrsstärke pro Fahrbahn konnte die Zeit ermittelt werden, wie lange es dauert, bis ein neues Fahrzeug den Streckenabschnitt erreicht.

VS_{max_Spur1}	Verkehrsstärke der ersten Fahrspur anhand der maximalen Verkehrsstärke [Anzahl pro Sekunde]
VS_{max_Spur2}	Verkehrsstärke der zweiten Fahrspur anhand der maximalen Verkehrsstärke [Anzahl pro Sekunde]
VS_{min_Spur1}	Verkehrsstärke der ersten Fahrspur anhand der minimalen Verkehrsstärke [Anzahl pro Sekunde]
VS_{min_Spur2}	Verkehrsstärke der zweiten Fahrspur anhand der minimalen Verkehrsstärke [Anzahl pro Sekunde]

$$VS_{max_Spur1} = \frac{VS_{max}}{3} = \frac{0,337}{3} = 0,112$$

$$VS_{max_Spur2} = \frac{2 * VS_{max}}{3} = \frac{2 * 0,337}{3} = 0,224$$

$$VS_{min_Spur1} = \frac{2 * VS_{min}}{3} = \frac{2 * 0,132}{3} = 0,088$$

$$VS_{min_Spur2} = \frac{VS_{min}}{3} = \frac{0,132}{3} = 0,044$$

Formel 34: Aufteilung der Verkehrsstärke auf zwei Spuren

T_{max_Spur1}	Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges auf der ersten Spur anhand der maximalen Verkehrsstärke [s]
T_{max_Spur2}	Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges auf der zweiten Spur anhand der maximalen Verkehrsstärke [s]
T_{min_Spur1}	Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges auf der ersten Spur anhand der minimalen Verkehrsstärke [s]
T_{min_Spur2}	Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges auf der zweiten Spur anhand der minimalen Verkehrsstärke [s]

$$T_{max_{Spur1}} = \frac{1}{VS_{max_{Spur1}}} = \frac{1}{0,112} = 8,91$$

$$T_{max_{Spur2}} = \frac{1}{VS_{max_{Spur2}}} = \frac{1}{0,224} = 4,46$$

$$T_{min_{Spur1}} = \frac{1}{VS_{min_{Spur1}}} = \frac{1}{0,088} = 11,33$$

$$T_{min_{Spur2}} = \frac{1}{VS_{min_{Spur2}}} = \frac{1}{0,044} = 22,66$$

Formel 35: Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges je Fahrspur

	Eintreffende Fahrzeuge pro Sekunde			
	Max		Min	
	1. Fahrspur	2. Fahrspur	1. Fahrspur	2. Fahrspur
Gleinalmtunnel	0.112	0.224	0.088	0.044
Tauerntunnel	0.166	0.332	0.141	0.070
Brennersee	0.289	0.579	0.178	0.089
Tanzenbergtunnel	0.164	0.329	0.254	0.127
	Zeit bis zum Eintreffen eines neuen Fahrzeugs [s]			
	Max		Min	
	1. Fahrspur	2. Fahrspur	1. Fahrspur	2. Fahrspur
Gleinalmtunnel	8.91	4.46	11.33	22.66
Tauerntunnel	6.02	3.01	7.10	14.20
Brennersee	3.46	1.73	5.62	11.25
Tanzenbergtunnel	6.09	3.04	3.93	7.86

Tabelle 30: Fahrzeuge je Fahrspur pro Sekunde oder pro Fahrzeug

Nun kann anhand der gefahrenen Geschwindigkeit (v [km/h]) der Abstand (s_{max_Spur1} , s_{min_Spur1} ...) zwischen den einzelnen Fahrzeugen pro Fahrspur ermittelt werden. Um die Berechnung einfach zu halten wurde für den Gleinalm-, Tauern- und Tanzenbergtunnel eine konstante Geschwindigkeit von 80 Kilometer pro Stunde auf der ersten Spur und 100 Kilometer pro Stunde auf der zweiten Spur angenommen. Auf der Autobahn am Brennersee wurden die Geschwindigkeit mit 100 bzw. 130 Kilometer pro Stunde angenommen.

$$s_{max_{Spur1}} = \frac{v * 1000}{3600} * T_{max_{Spur1}} = \frac{80 * 1000}{3600} * 8,91 = 198,102 [m]$$

	Abstand der einzelnen Fahrzeuge [m]			
	Max		Min	
	1. Fahrspur	2. Fahrspur	1. Fahrspur	2. Fahrspur
Gleinalmtunnel	198.102	125.428	251.748	629.371
Tauerntunnel	133.692	83.558	157.791	394.477
Brennersee	96.026	62.417	156.196	406.109
Tanzenbergtunnel	135.249	84.531	87.320	218.301

Tabelle 31: Abstand der einzelnen Fahrzeuge je Fahrspur und Verkehrsstärke

Zur Berechnung nach wie vielen Fahrzeugen eine Überschneidung an einem Sensor eintreten wird, müssen zwei Weg/Zeit Funktionen aufgestellt werden.

$s_1(x), s_2(x)$	Weg/Zeitfunktion
v_1, v_2	Gefahrene Geschwindigkeit der betreffenden Fahrspur [m/s]
a, b	Anzahl an Fahrzeugen (muss eine natürliche Zahl sein)
s_1, s_2	Abstand zwischen den einzelnen Fahrzeugen [m]

$$s_1(x) = v_1 * \left(x - a * \frac{s_1}{v_1} \right)$$

$$s_2(x) = v_2 * \left(x - b * \frac{s_2}{v_2} \right)$$

Formel 36: Weg/Zeitfunktion zur Ermittlung der Überlagerungen

Für diese Funktionen muss eine Nullstelle gefunden werden und diese muss bei beiden Funktionen an derselben Stelle sein. Daher kann man die beiden Terme gleichsetzen.

$$a * \frac{s_1}{v_1} = b * \frac{s_2}{v_2} \gg \frac{s_1}{v_1} * \frac{v_2}{s_2} = \frac{b}{a}$$

$$\frac{b}{a} = \frac{s_1}{v_1} * \frac{v_2}{s_2} = \frac{198,1}{22,2} * \frac{27,8}{125,4} = 1,9778$$

Nun müssen nur noch zwei natürliche Zahlen gefunden werden, welche beim Teilen einen Wert von 1,9778 ergeben.

	Anzahl der Fahrzeuge bis zur Überschneidung			
	Max		Min	
	1. Fahrspur	2. Fahrspur	1. Fahrspur	2. Fahrspur
Gleinalmtunnel	5000	9889	20221	10000
Tauerntunnel	5000	7333	14057	5000
Brennersee	2500	5147	13649	5000
Tanzenbergtunnel	5000	7543	8762	5000

Tabelle 32: Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen je Fahrspur bis es zu einer Überschneidung kommt

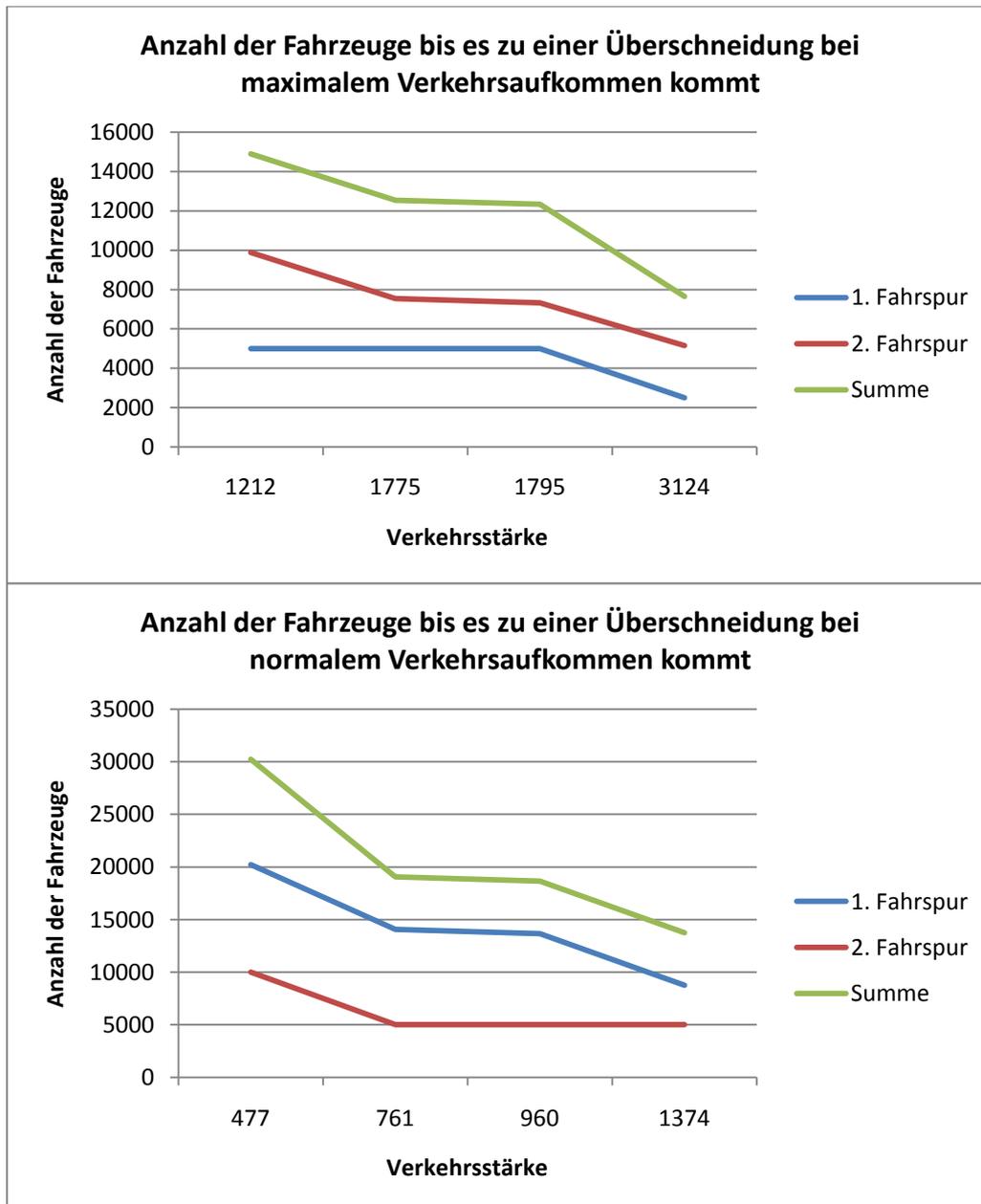


Abbildung 13: Anzahl der Fahrzeuge bis es zu einer Überschneidung bei maximalem und normalem Verkehrsaufkommen kommt.

Wie bereits angenommen nimmt bei sinkender Verkehrsdichte die Häufigkeit des Auftretens einer Überschneidung ebenso ab.

Diese Zahlen sind jetzt aber nur theoretische Anhaltspunkte, da in dieser Rechnung nur die erste Achse eines Fahrzeuges berücksichtigt wurde. Würden in einem Verkehrsschnitt nur PKWs fahren würde sich diese Anzahl um den Faktor vier reduzieren. Bei einem LKW Anteil von zehn Prozent und einer Achsenanzahl von fünf Achsen pro LKW würden sich die Werte aus Tabelle 32 um den Faktor fünf reduzieren. Ebenso wurde die Reifenbreite in die Berechnung nicht mit aufgenommen, wodurch sich die Anzahl der Fahrzeuge weiters reduzieren würde.

Jedoch würde jede Geschwindigkeitsänderung dieser Reduktion entgegenwirken. Denn durch die angenommene konstante Geschwindigkeit konnte die schnellstmögliche und statistisch häufig auftretende Überschneidung gefunden werden. Aufgrund der in der Praxis auftretenden ungleichmäßigen Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, wird zumindest einem Teil der oben genannten Reduzierungspunkte entgegengewirkt. Für eine genauere Untersuchung fehlen aber detailliertere Informationen bezüglich PKW/LKW Anteil, sowie Achsenanzahl des Schwerverkehrs, durchschnittlicher Radstand der Fahrzeuge, genauere Informationen bezüglich Aufteilung des Verkehrs bei mehreren Fahrspuren und Geschwindigkeitsänderungen der Verkehrsteilnehmer über die Zeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke. Die zusätzliche Erhebung und Auswertung dieser Daten würde den Rahmen dieser Masterarbeit bei weitem sprengen und müsste in einer separaten Masterarbeit durchgeführt werden.

3.3.3. Erkennung von defekten Sensoren

Damit dieses Sensorkonzept in der Praxis auch verwendet werden kann, musste man sich Gedanken bezüglich der automatischen Erkennung von defekten Sensoren machen. Neben diversen Möglichkeiten der Hardwareimplementierung von Fehlererkennungen (diese wurden in dieser Masterarbeit nicht berücksichtigt), wurde an einer Softwarelösung für dieses Problem gearbeitet. Zu allererst gibt die Steuereinheit im Tunnel nur dann eine neue Geschwindigkeit an die Tunnelwarte weiter, wenn die gerade ermittelte Geschwindigkeit von der zuvor gemessenen Geschwindigkeit abweicht. Damit eine Geschwindigkeit berechnet wird, muss immer zuerst ein Sensor durchbrochen werden und danach der zweite Sensor. Erst nach dem Durchbrechen des zweiten Sensors wird die Geschwindigkeit berechnet und bei Bedarf an die Tunnelwarte weitergeleitet. Sollte es somit vorkommen das ein einzelner Sensor nie mehr durchbrochen wird (aufgrund eines Defektes) berechnet die Steuereinheit im Tunnel nie eine neue Geschwindigkeit und übermittelt somit auch keine Daten dieser defekten Sensorstation an die Tunnelwarte. Sollten ein einzelner Sensor die ganze Zeit übermitteln, dass er gerade durchbrochen wurde, wird solange keine Geschwindigkeit berechnet, bis auch der zweite Sensor dieser Messstation durchbrochen wurde. Wird dieser dann durch ein Fahrzeug durchbrochen, kommt es zu einer vollkommen falschen Geschwindigkeitsermittlung, da die Steuereinheit (abhängig von ihrer Einstellung) entweder den ersten ermittelten Zeitwert von Sensor eins herannimmt (führt zu einer extrem niedrigen Geschwindigkeit) oder den zuletzt ermittelten Zeitwert von Sensor eins, welcher genau einen Taktzyklus vor dem Durchbrechen des zweitens Sensors übermittelt wurde. Dies würde zu einer extrem großen Geschwindigkeit führen, welche ein Fahrzeug niemals erreichen kann.

Ebenso wurde eine Überprüfung in der Tunnelsteuerung der Tunnelwarte eingebaut. Diese Überprüfung zählt alle gemessenen Geschwindigkeiten pro Messstation. Nach Erreichen eines Schwellwertes (sollte abhängig von der Verkehrsdichte sein) wird die durchschnittliche Anzahl aller gemessenen Geschwindigkeiten ermittelt. Weicht die Anzahl an Geschwindigkeitsmessungen einer einzelnen Station erheblich vom Durchschnitt ab, wird diese als defekt gemeldet. Nun kann der Tunnelwart entscheiden, ob er diese Station deaktiviert. Dadurch kommt es zum einen zu keiner Fehlmeldung (falls

diese Station ein Unterschreiten der Mindestgeschwindigkeit meldet) und zum anderen wird diese Station von der Durchschnittsberechnung aller Messungen ausgeschlossen.

Aufgrund der in Kapitel 0 beschriebenen Überlagerungen und der daraus resultierenden Verringerung an Geschwindigkeitsmessungen kann es nicht zu einer Fehlinterpretation bezüglich der Anzahl an durchgeführten Messungen kommen, da dieser Effekt über alle Stationen gleichverteilt ist und durch die Ermittlung des Durchschnittes herausgefiltert wird. Desweiteren wird eine Sensorstation nicht gleich als defekt gemeldet, wenn sie bei einer durchschnittlichen Anzahl von 10.000 Messungen pro Station eine Abweichung von 20 Messungen hat, sondern erst nach einem prozentuellen Schwellwert. Die Ermittlung dieses Schwellwertes müsste in der Praxis oder durch langzeitliche Tests erfolgen.

3.4. Tunnelmodell

3.4.1. Funktionsumfang des Tunnelmodells

Diese Masterarbeit wurde zusammen mit einem Masterprojekt durchgeführt, in dem ein Tunnelmodell entworfen wurde. Dieses Tunnelmodell dient neben der Visualisierung des Sensorkonzeptes auch zur Veranschaulichung von unterschiedlichen Betriebsarten, nach welchen ein Verkehrstunnel betrieben werden kann. Diese Betriebsarten haben direkten Einfluss auf unterschiedliche Ein- und Ausgabemodule und werden von einem Tunnelsteuerungsprogramm angesteuert. Dieses Tunnelsteuerungsprogramm kommuniziert über eine speicherprogrammierbare Steuerung mit jedem Ein- und Ausgabemodul und setzt diese auf die benötigten Werte bzw. nimmt die erfassten Daten auf und verarbeitet diese weiter. Die speicherprogrammierbare Steuerung, sowie die benötigten Ein- und Ausgabemodul wurde mir von der Firma Beckhoff zur Verfügung gestellt. Hierbei wurde der Industrie-PC CX1020-0111 zur Kommunikation zwischen Tunnelwart und Ein- und Ausgabemodulen sowie zur Berechnung der Geschwindigkeiten und zur Verwirklichung des "fail-safe" Zustandes verwendet. In diesem Modell tritt dieses "fail-safe" Zustand in Kraft, sobald für eine bestimmte Zeit die Kommunikation zwischen Tunnelsteuerungsprogramm und der speicherprogrammierbaren Steuerung unterbrochen ist.

Für die Sensorstationen wurde das digitale Eingangsmodul EL1252 verwendet, welches die genauen "Uhrzeit" beim Eintreffen eines Eingangssignals an die speicherprogrammierbare Steuerung weitergibt. Zur Ansteuerung des restlichen Tunnelmodells wurden noch weitere Ein- sowie Ausgabemodule benötigt, auf welche an dieser Stelle aber nicht weiter eingegangen wird.

Folgende Funktionen sind für einen Autobahntunnel von großer Bedeutung und wurden in Abbildung 14 graphisch dargestellt.

- Beleuchtung
- Seitenlichter
- Warnleuchten
- Temperaturmessung



Abbildung 14: Signalelemente Autobahntunnel⁴⁵

⁴⁵ [ÖAMTC 2005] Tunnelsicherheit spielerisch lernen

Im Bereich des Tunnelportals sind weitere Signalanzeigen von großer Bedeutung:

- Verkehrsampel
- Einfahrtslichter
- Helligkeitsmessung
- Geschwindigkeitsanzeigen
- Ventilation

Diese sind in Abbildung 15 abgebildet.

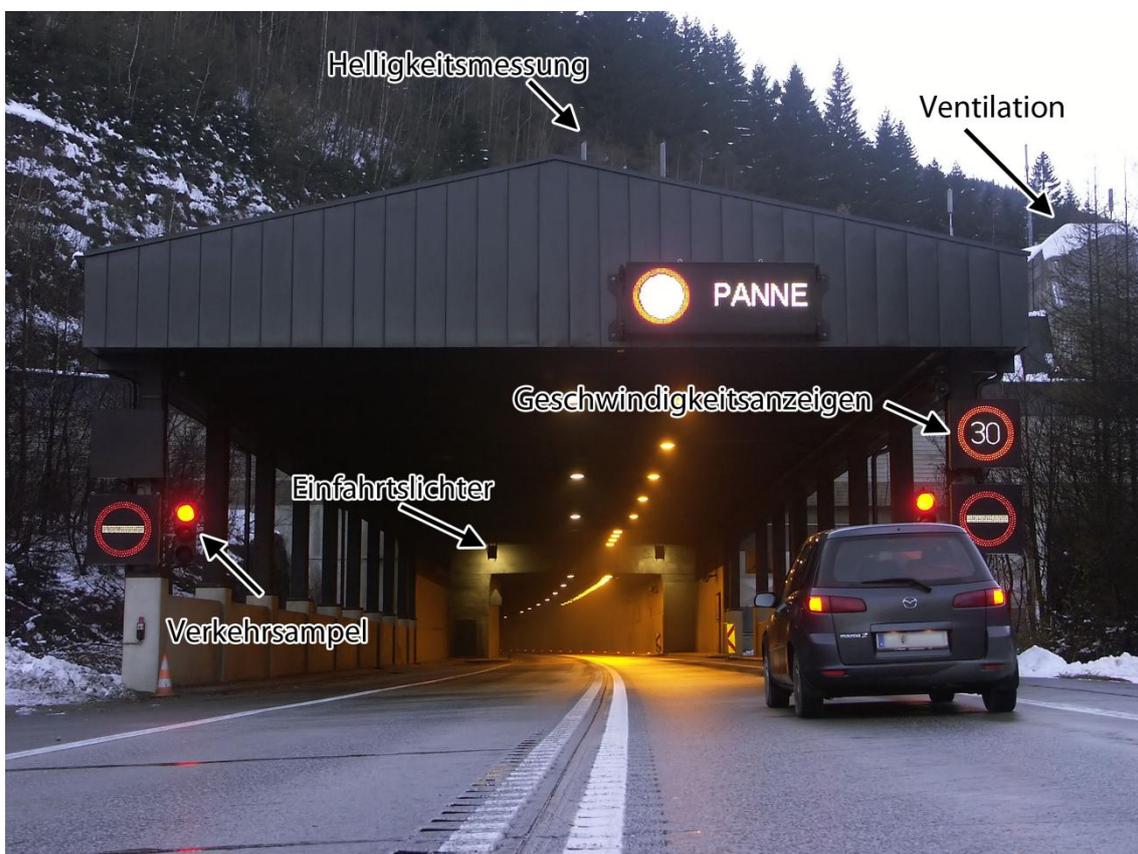


Abbildung 15: Signalelemente Tunnelportal⁴⁶

Um die Betrachtung der einzelnen Signalelemente detaillierter vornehmen zu können, wird im Folgenden von einem Tunnel mit Nord-Süd Ausrichtung ausgegangen. Der Tunnel wird von Süden aus betrachtet. Somit fahren im Normalfall die Fahrzeuge in der „linken“ Tunnelröhre von Norden nach Süden und in der „rechten“ Tunnelröhre von

⁴⁶ [ade 2005] Gleinalmtunnel

Süden nach Norden. Beschriftungen werden ebenfalls von „links“ nach „rechts“ durchgeführt.

3.4.2. Betriebsarten

Folgende Betriebsarten wurden sowohl im Tunnelsteuerungsprogramm wie auch im Tunnelmodell umgesetzt. Im Tunnelsteuerungsprogramm sowie im Softwaredesign wurden diese Betriebsarten mit englischen Namen bezeichnet. Daher sind diese Bezeichnungen in den kommenden Abbildungen auf Englisch.

3.4.2.1. Normalbetrieb (Normal Operation)

Dies ist die meistverwendete Betriebsart. Hier sind beide Röhren des Tunnels in Betrieb und der Verkehr kann zweiseitig in jede Richtung durch den Tunnel fahren.

- Die Tunnelbeleuchtung ist im Automatik-Modus und regelt sich abhängig von der Helligkeit außerhalb des Tunnels.
- Die Ventilation ist im Automatik-Modus und regelt sich abhängig von der Temperatur innerhalb des Tunnels.
- Die Warnlichter innerhalb des Tunnels sind abgeschaltet.
- Der Schranken zwischen den Fahrspuren ist geschlossen.
- Die Geschwindigkeitsanzeigen beschränken die höchstzulässige Geschwindigkeit auf 100 km/h.
- Die Fahrtrichtung ist in der „linken“ Röhre von Norden nach Süden und in der „rechten“ Röhre von Süden nach Norden.
- Die Seitenlichter sind in Fahrtrichtung rot und gegen die Fahrtrichtung weiß.
- Die Verkehrsampeln sind in Verkehrsrichtung grün und gegen die Verkehrsrichtung rot, d.h. die Verkehrsampeln Nord-1 und Nord-2 sind grün, die Ampeln Nord-3 und Nord-4 sind rot. Die Verkehrsampeln Süd-1 und Süd-2 sind rot, die Verkehrsampeln Süd-3 und Süd-4 sind grün.
- Die Einfahrtslichter oberhalb der Tunneleinfahrt entsprechen den Farben der Verkehrsampeln der gleichen Fahrspur.

3.4.2.2. Notfallbetrieb (Emergency Operation)

Diese Betriebsart wird im Notfall aktiviert. Sie führt zur sofortigen Sperre beider Tunnelröhren.

- Die Tunnelbeleuchtung wird auf die höchste Stufe eingestellt.
- Die Ventilation wird ebenfalls auf die höchste Stufe eingeschaltet.
- Die Warnlichter innerhalb des Tunnels werden eingeschaltet.
- Die Geschwindigkeitsanzeigen werden auf 80 bzw. 60 km/h eingestellt.
- Die Verkehrsampeln werden auf rot geschaltet.
- Die Einfahrtslichter werden ebenfalls auf rot gestellt.
- Alle weiteren Signalelemente bleiben unverändert.

3.4.2.3. linke Röhre sperren (Lock Tube 1 - left tube)

Will man nur die „linke“ Tunnelröhre sperren, aktiviert man diese Betriebsart. Dabei bleiben alle Einstellungen, welche die „rechte“ Tunnelröhre betreffen, unverändert.

- Die Geschwindigkeitsanzeigen für die „linke“ Tunnelröhre werden auf 80 bzw. 60 km/h eingestellt
- Die Verkehrsampeln für die „linke“ Tunnelröhre werden auf rot gesetzt.
- Die Einfahrtslichter für die „linke“ Tunnelröhre werden ebenfalls auf rot gesetzt.
- Alle anderen Signalelemente bleiben unverändert.

3.4.2.4. rechte Röhre sperren (Lock Tube 2 - right tube)

Will man nur die „rechte“ Tunnelröhre sperren, aktiviert man diese Betriebsart. Dabei bleiben alle Einstellungen, welche die „linke“ Tunnelröhre betreffen, unverändert.

- Die Geschwindigkeitsanzeigen für die „rechte“ Tunnelröhre werden auf 80 bzw. 60 km/h eingestellt
- Die Verkehrsampeln für die „rechte“ Tunnelröhre werden auf rot gesetzt.
- Die Einfahrtslichter für die „rechte“ Tunnelröhre werden ebenfalls auf rot gesetzt.
- Alle anderen Signalelemente bleiben unverändert.

3.4.2.5. Gegenfahrbetrieb linke Röhre (Two-way Traffic Tube 1 - left tube)

Sollte es aufgrund von Wartungsarbeiten oder eines Unfalles in der "rechten" Tunnelröhre notwendig sein den gesamten Verkehr über die "linke" Tunnelröhre umzuleiten, wird diese Betriebsart gewählt. Hierbei müssen zuerst beide Tunnelröhren gesperrt werden. Daraufhin muss der Tunnelwart bestätigen, dass sich in der „linken“ Tunnelröhre keine Fahrzeuge mehr befinden. Danach wird der Verkehr aus beiden Richtungen durch die „linke“ Tunnelröhre umgeleitet während die „rechte“ Tunnelröhre weiterhin gesperrt bleibt. Nachdem der Gegenverkehrsbetrieb in der „linken“ Tunnelröhre aktiviert wurde, sind folgende Signalelemente eingestellt:

- Die Geschwindigkeitsanzeige wird auf 80 bzw. 60 km/h gestellt
- Die Verkehrsampeln Nord 1 und Nord 2 sind grün, Nord 3 und Nord 4 sind rot. Die Verkehrsampeln Süd 1 und Süd 2 sind grün, Süd 3 und Süd 4 sind rot.
- Die Einfahrtslichter Nord 1 und Süd 2 sind grün. Alle anderen Einfahrtslichter sind rot.

3.4.2.6. Gegenfahrbetrieb rechte Röhre (Two-way Traffic Tube 2 - right tube)

Diese Betriebsart entspricht "Gegenfahrbetrieb linke Röhre" bzw. "Two-way Traffic Tube 1" wobei die Signalelemente bezüglich der Tunnelröhre vertauscht werden.

3.4.2.7. Wartungsbetrieb linke Röhre (Service Operation Tube 1 - left tube)

Diesem Betriebszustand muss vorerst die Sperrung der "linken" Tunnelröhre vorangehen. Danach wird die Ventilation sowie die Beleuchtung der „linken“ Röhre auf Maximum eingestellt. Die „linke“ Tunnelröhre bleibt weiterhin gesperrt und es besteht die Möglichkeit den Verkehr durch die „rechte“ Tunnelröhre umzuleiten.

3.4.2.8. Wartungsbetrieb rechte Röhre (Service Operation Tube 2 - left tube)

Diese Betriebsart entspricht "Wartungsbetrieb linke Röhre" bzw. "Service Operation Tube 1" wobei die Signalelemente je nach Tunnelröhre vertauscht werden.

3.4.2.9. Warnbetrieb linke Röhre (Caution Operation Tube 1 -left tube)

In dieser Betriebsart werden nur die Warnlichter in der “linken” Tunnelröhre aktiviert. Alle anderen Signalelemente verbleiben in den Einstellungen der vorhergehenden Betriebsart.

3.4.2.10. Warnbetrieb rechte Röhre (Caution Operation Tube 2 -right tube)

In dieser Betriebsart werden nur die Warnlichter in der “rechten” Tunnelröhre aktiviert. Alle anderen Signalelemente verbleiben in den Einstellungen der vorhergehenden Betriebsart.

3.4.3. Arbeitsschritte

Nachdem das grundsätzliche Konzept entworfen wurde, musste ein geeignetes Bussystem zum Übertragen der ermittelten Geschwindigkeiten an die Kontrolllogik gefunden werden. Dafür wurde zuerst ein Vergleich der unterschiedlichen Echtzeit-Ethernet Bussysteme durchgeführt. Auf Details zu diesem Vergleich wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Aufgrund der höheren Übertragungsgeschwindigkeit und dem perfekt geeigneten digitalen Eingangsmoduls EL1252 von EtherCAT sowie den Möglichkeiten der Datenübertragung von der Steuerlogik in die höhere Programmiersprache .net wurde das System der Firma Beckhoff gewählt. Nachfolgend wurde das Design für ein Programm entworfen, welches die Steuerung des Tunnels ermöglichen soll, die ermittelten Daten der Sensorstationen verwaltet und bei Bedarf den Tunnelwart über vorhandene Probleme informiert.

3.4.4. Tunnelsteuerprogramm

Das Tunnelsteuerprogramm wurde mit dem Programm ObjectIf der Firma microTOOL GmbH geplant. Das Tunnelsteuerungsprogramm soll neben der Geschwindigkeitsmessung auch die Steuerung des Tunnels übernehmen. ObjectIf kann nach dem Erstellen eines Use-Case-Diagramms, eines Anwendungsdiagramms, eines Zustandsdiagramms sowie eines Klassendiagramms automatisiert C# Projekte, Klassen und Methoden generieren. Zu Beginn wurde das Use-Case-Diagramm aus Abbildung 16 erstellt.

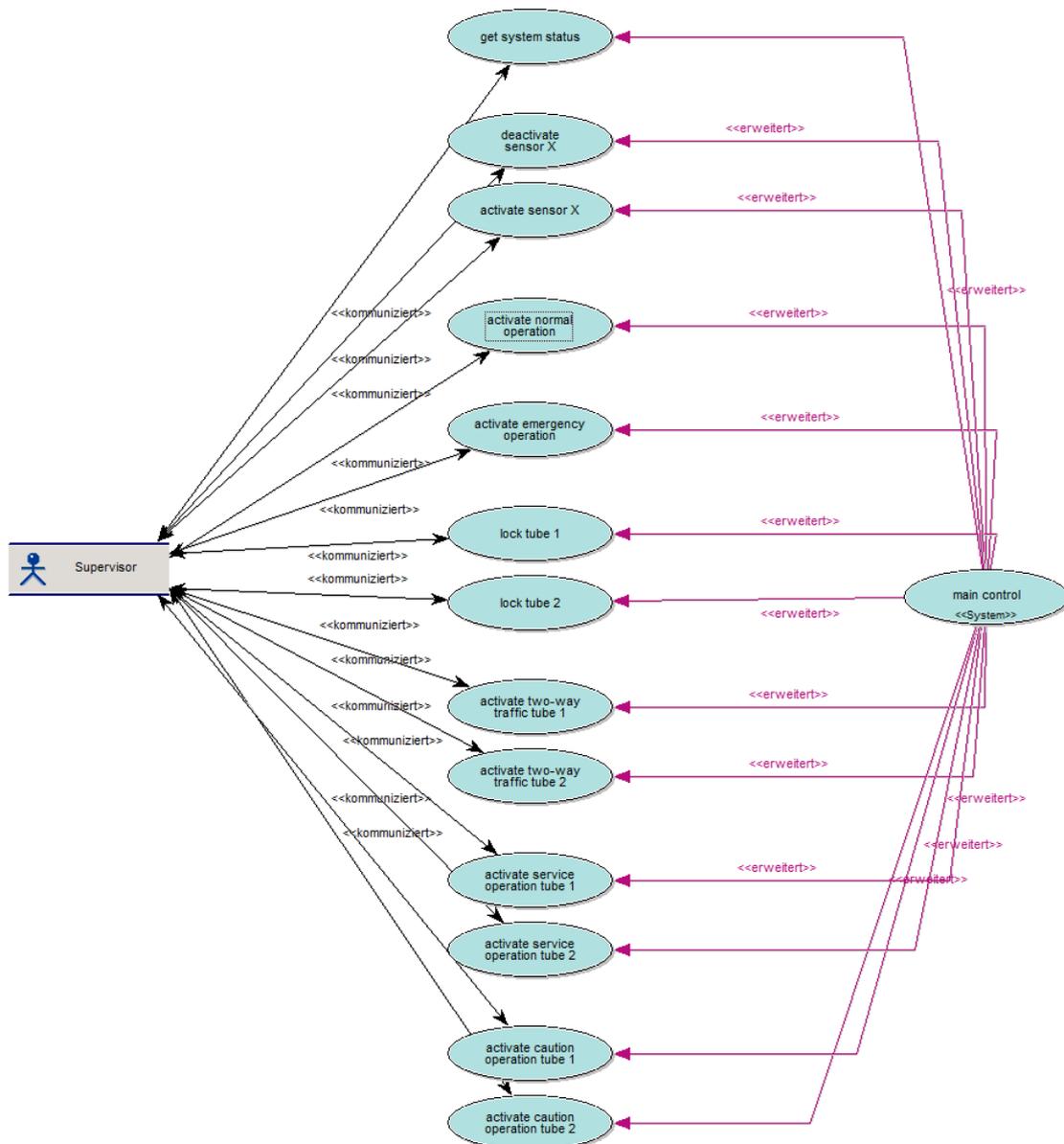


Abbildung 16: ObjectIf - Use-Case-Diagramm

In diesem Use-Case-Diagramm wurden der Akteur sowie die Zustände des Tunnels festgelegt. Der einzige Akteur ist der Tunnelwart. Dieser kommuniziert über die graphische Benutzeroberfläche (GUI) mit der Kontrolleinheit des Steuerungsprogrammes. Mit dieser Benutzeroberfläche kann der Tunnelwart die unterschiedlichen Betriebszustände des Tunnels einstellen. Desweiteren kann der Tunnelwart einzelne Sensoren aktivieren oder deaktivieren. Ebenso kann der System-Status abgerufen werden. Dieser liefert detaillierte Informationen der einzelnen Ein- und Ausgabeeinheiten.

Anschließend wurde für jeden Betriebszustand ein Zustandsdiagramm erstellt. Exemplarisch wurden in Abbildung 17 das Zustandsdiagramm für den „normal operation“ Betriebszustand dargestellt. In diesem Zustandsdiagramm wurden die einzelnen Ein- und Ausgabemodule festgehalten und ihre Rolle in dem jeweiligen Betriebszustand definiert. Beispielsweise wurde hier für die Verkehrsampeln definiert, dass sie zuerst alle alten Befehle verwerfen sollen, danach in den „normal operation“-Modus wechseln sollen und abschließend kontrollieren, ob der erreichte Zustand dem Sollzustand entspricht. Für die Beleuchtung soll zu Beginn die Helligkeit außerhalb des Tunnelportals gemessen werden. Danach soll je nach Betriebszustand die nötige Helligkeitseinstellung der Tunnelbeleuchtung ermittelt und eingestellt werden. Abschließend soll überprüft werden, ob die eingestellte Helligkeit auch wirklich der gewollten Helligkeit entspricht.

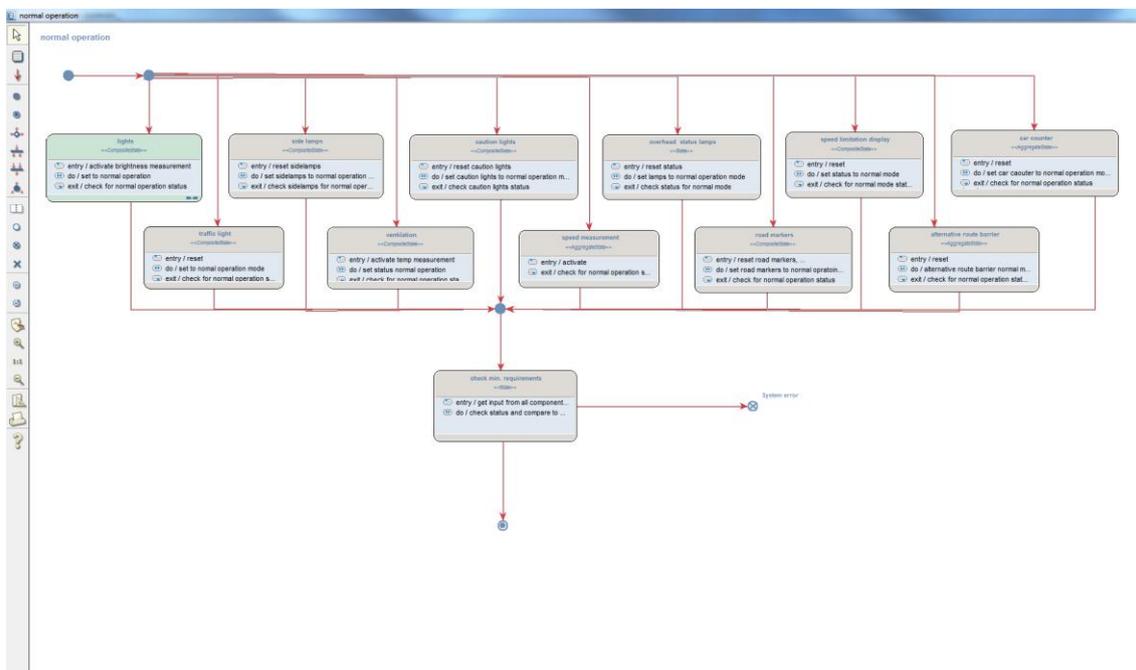


Abbildung 17: Zustandsdiagramm

Nach dem Zustandsdiagramm wurde für jeden Anwendungsfall im use-case-Diagramm ein Aktivitätendiagramm erstellt. In Abbildung 18 ist das Diagramm für die Kontrolleinheit des Tunnelsteuerungsprogramms dargestellt. Zuerst holt sich die Kontrolleinheit den gewünschten Betriebszustand von der graphischen Benutzeroberfläche. Dann ermittelt die Kontrolleinheit die notwendigen Änderungen der einzelnen Ein- und Ausgabemodule. Diese einzelnen Module werden von der Kontrolleinheit aufgerufen, danach die Resultate verarbeitet und Statusnachrichten zurück an die Benutzeroberfläche geschickt.

Damit kann der Tunnelwart erkennen, ob der Wechsel des Betriebszustandes erfolgreich durchgeführt wurde oder nicht.

Wie die einzelnen Module aufgerufen werden, wurde in einer Verfeinerung der Zwischenaktivität „call components“ definiert. Diese Verfeinerung ist in Abbildung 19 dargestellt und zeigt abhängig von der Betriebsart alle Ein- und Ausgabemodule, welche von dieser Betriebsart beeinflusst werden. Die Betriebsart „normal operation“ hat Einfluss auf alle Module. Dies ist notwendig, um den Tunnel bei Inbetriebnahme oder nach dem Sperren des Tunnels wieder in den Standard Betriebszustand zu versetzen. Wenn man hingegen die Betriebsart „lock tube 1“ ansieht, kann man erkennen, dass dieser nur Einfluss auf die drei Module

- Overhead status light
- Speed limitation display
- Traffic light

hat. Denn, wenn man eine einzelne Tunnelröhre sperren muss, ist es ausreichend die Geschwindigkeitsanzeigen der betreffenden Tunnelröhre zu verändern (80 bzw. 60 km/h), die Verkehrsampeln auf rot zu setzen und die Einfahrtslichter ebenfalls auf rot zu setzen. Somit dürfen keine weiteren Fahrzeuge mehr in den Tunnel einfahren und der Tunnel wurde erfolgreich gesperrt. Das Sperren des Tunnels hat daher keinen Einfluss auf andere Module wie beispielsweise die Tunnelbeleuchtung oder die Tunnelventilation.

3. Sensorenkonzept

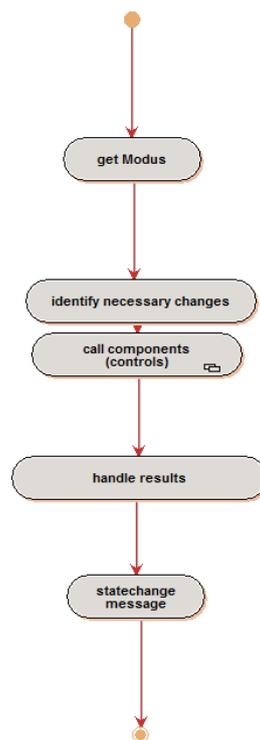


Abbildung 18: Aktivitätendiagramm Main-control

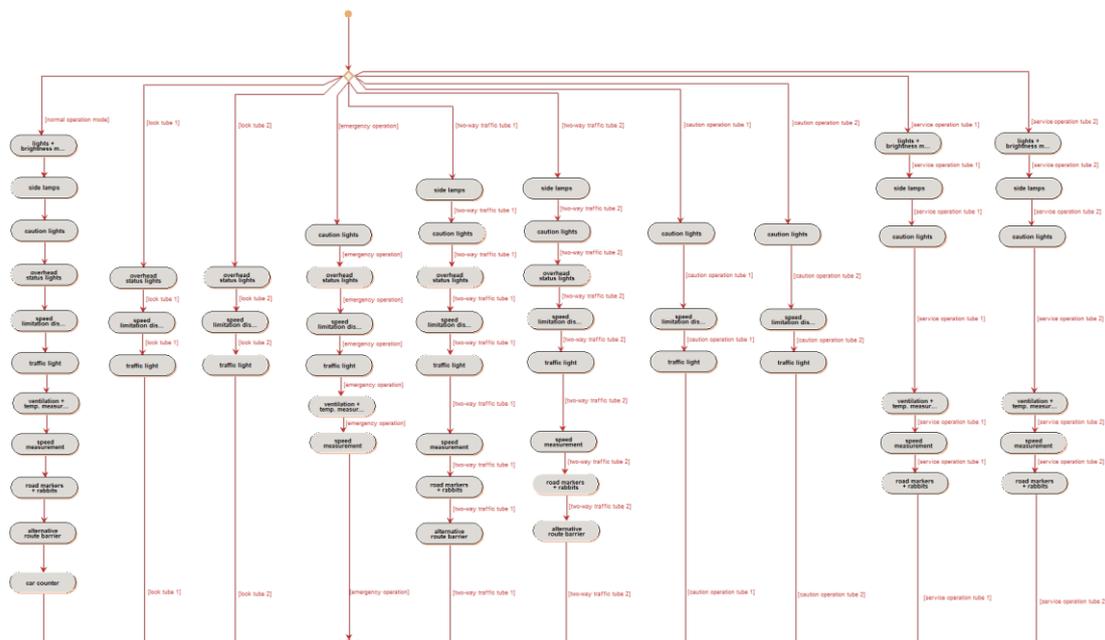


Abbildung 19: Aktivitätendiagramm Call-Component

In weiterer Folge wurde das in Abbildung 20 dargestellte Klassendiagramm erstellt. Dieses Klassendiagramm ist eine Verfeinerung der Kontrolleinheit des Tunnelsteue-

rungsprogramms und dient sowohl zur Definition von Methoden wie auch von Schnittstellen zwischen den einzelnen Klassen. Um den Kommunikationsablauf und die Schnittstellen korrekt darstellen zu können, wurde eine leere Klasse mit dem Namen „SPS“ mit in das Klassendiagramm aufgenommen. Die Klasse „SPS“ repräsentiert die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des Übertragungsbusses und nimmt entweder Werte von der Kontrolleinheit entgegen und gibt diese nach einer Auswertung an die Ausgabeeinheiten weiter, oder gibt empfangene Werte von Eingabeeinheiten an die Kontrolleinheit in der Tunnelwarte weiter. Die Werte der Eingabeeinheiten dienen vorrangig zur Geschwindigkeitsermittlung von Fahrzeugen, jedoch werden auch Werte über die Helligkeit vor den Tunnelportalen wie auch die Temperatur innerhalb des Tunnels übermittelt. Diese Daten werden für die Helligkeit der Tunnelbeleuchtung wie auch für die Ventilationssteuerung verwendet. Die graphische Benutzeroberfläche wurde in Abbildung 20 ebenfalls als leere Klasse dargestellt, da diese Klasse aus sehr vielen einzelnen Event-Methoden besteht, welche die einzelnen Aktionen beim Betätigen eines Steuerungsknopfes verarbeiten. Die Klasse „MainControl“ ist das Herzstück der Tunnelsteuerung. Sie empfängt notwendige Daten von der speicherprogrammierbaren Steuerung, Benutzereingaben von der graphischen Benutzeroberfläche und entscheidet anhand dieser Informationen, ob weitere Schritte notwendig sind oder nicht. Die Klasse „MainControl“ besitzt mehrere Hilfsklassen. Die Hilfsklasse „DateInterpreter“ dient zur Verarbeitung von Temperatur- und Helligkeitswerten und teilt der „MainControl“ mit, ob eine Veränderung der Ventilation bzw. der Beleuchtung notwendig ist oder nicht.

In der Klasse „SpeedInterpreter“ laufen die ermittelten Geschwindigkeiten aller Messstationen zusammen. Diese Klasse ermittelt, ob ein Fahrzeug die eingestellte Mindestgeschwindigkeit unterschreitet. Wurde ein solches Fahrzeug ermittelt, wird dies sofort dem Tunnelwart mitgeteilt. Die Klasse „SpeedInterpreter“ detektiert, anhand der übertragenen Messungen aller Messstationen, defekte Sensoren und setzt bei Ausfällen den Tunnelwart darüber in Kenntnis. Weicht die Anzahl der gemessenen Geschwindigkeiten einer einzelnen Messstation zu weit von der durchschnittlichen Anzahl aller anderen Messstationen ab, ist diese vermutlich defekt. Eine geringe Abweichung der Anzahl der ermittelten Messungen ist erlaubt, da es vorkommen kann, dass zwei Fahrzeuge als ein Fahrzeug erkannt werden, wenn diese nebeneinander fahren. Aufgrund der Gleichverteilung des Verkehrs und der Gleichverteilung der Geschwindigkeit innerhalb des

Tunnels kann davon ausgegangen werden, dass alle Messstationen im gleichen Ausmaß von diesem Effekt betroffen sind. Daher kann es zu keiner großen Abweichung - bezüglich der Anzahl durchgeführter Messungen - einer einzelnen Messstation aufgrund dieses Effektes kommen. Somit kann diese Anzahl zur Ermittlung defekter Messstationen herangezogen werden.

Desweiteren gibt es eine Klasse namens „SPSWrite“. In dieser Klasse ist die Datenschnittstelle zur speicherprogrammierbaren Steuerung implementiert, welche zur Datenübertragung von der Tunnelsteuerung zur speicherprogrammierbaren Steuerung benötigt wird. Diese Klasse empfängt von der „MainControl“ Werte, welche zur SPS übermittelt werden sollen, transformiert diese in ein passendes Dateiformat und überträgt dieses zur SPS

Die Hauptaufgabe der „XML“ Klasse liegt an der Überprüfung des aktuellen Zustandes mit dem eingestellten Zustand. Je nach eingestelltem Betriebszustand verwendet die „XML“ Klasse eine spezielle XML-Datei zur Ermittlung des Soll-Zustandes. Dieser Soll-Zustand wird mit den übermittelten Daten des aktuellen Ist-Zustandes von der „MainControl“ bzw. von der SPS verglichen. Sollte es beispielsweise durch eine Änderung der Betriebsart zu einem Unterschied zwischen dem Soll- und dem Ist-Zustand der Ausgabeeinheiten kommen, ermittelt die „XML“ Klasse alle Unterschiede. Diese Unterschiede werden unter zur Hilfenamen der „SPSWrite“ Klasse an die SPS gesendet, welche danach die Änderungen der Ausgabeeinheiten vornimmt. Sind alle Änderungen durchgeführt, erkennt die „XML“ Klasse keinen Unterschied zwischen dem Soll- und dem Ist-Zustand. Somit ist der Wechsel der Betriebsart erfolgreich durchgeführt worden.

3. Sensorenkonzept

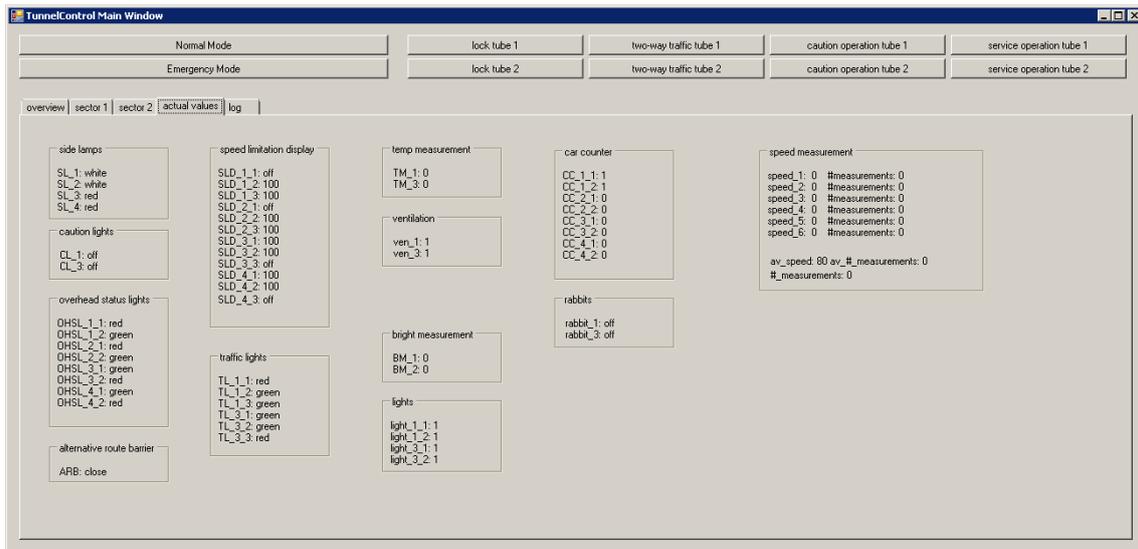


Abbildung 21: Graphische Benutzeroberfläche, aktuelle Werte der Ein- und Ausgabemodule

In Abbildung 21 kann man im oberen Bereich die unterschiedlichen Betriebsarten, welche in Kapitel 3.4.2 beschrieben wurden, einstellen. Darunter ist eine Registerkartenzeile eingefügt worden. Auf der ersten Registerkarte ist eine graphische Übersicht des gesamten Tunnels zu sehen. In der zweiten und dritten Registerkarte wurde diese Übersicht aufgeteilt und mit detaillierteren Informationen versehen. Die vierte Registerkarte ist in Abbildung 21 abgebildet und enthält die aktuellen Werte aller Ein- und Ausgabemodule. In der fünften und letzten Registerkarte wird das zuvor beschriebene Logfenster angezeigt. Dieses dient zur Protokollierung aller Vorkommnisse.

4. ECHTZEITSYSTEM UND BUSSYSTEME

Ein Echtzeitsystem liefert innerhalb von zeitlich vorgegebenen Schranken Ergebnisse auf zuvor bekannte oder unbekannte Ereignisse. Nur wenn die Berechnung innerhalb der vordefinierten Grenzen vollständig durchgeführt wurde, zeigt das Echtzeitsystem fehlerfreies Verhalten. Damit ein System als ein Echtzeitsystem bezeichnet werden kann, muss es auf der Eigenschaft der Rechtzeitigkeit, Gleichzeitigkeit, Berechenbarkeit sowie Zuverlässigkeit basieren. Ein System weist Rechtzeitigkeit auf, wenn es mit seinen Berechnungen auf jeden Fall zum vordefinierten Zeitpunkt fertig ist. Sollten mehrere Ereignisse gleichzeitig auftreten, müssen diese gleichzeitig abgearbeitet werden. Dies wird als Gleichzeitigkeit bezeichnet. Damit ein System die Bedingung der Berechenbarkeit erfüllt muss dieses auf jedes Ereignis ein Ergebnis zurückliefern können. Um das letzte Kriterium der Zuverlässigkeit zu erfüllen, muss dieses stabil und zuverlässig arbeiten.⁴⁷

Im Allgemeinen wird ein System als Bussystem bezeichnet, wenn dieses über eine gemeinsam genutzte Datenleitung Informationen zwischen mehreren Teilnehmern versendet. Dies ist davon unabhängig, welche Art von Informationen übertragen wird. Hier gibt es die Gruppe der analogen Bussysteme und die Gruppe der digitalen Bussysteme. In dieser Masterarbeit wurde ein digitales Bussystem gewählt, da dieses aufgrund der zu übertragenden Daten und ihrer Störsicherheit gegenüber der Umgebung besser geeignet ist.⁴⁸ Digitale Ethernet-Bussysteme können anhand unterschiedlicher Kennwerte miteinander verglichen werden. Dafür kann man im ersten Schritt Kennwerte aus der Kommunikationstechnik verwenden. Ausgewählte Bussysteme können beispielsweise in weiterer Folge anhand ihres Frame-Aufbaus, ihrer Zykluszeiten, ihrer Einordnung im OSI-Referenzmodell oder dem Grad der Standardisierung und Verwendbarkeit mit Standardkomponenten miteinander verglichen werden.

⁴⁷ [Kopetz 2001] Real-time systems

⁴⁸ [Borgeest 2010] Fahrzeugtechnik

4.1. Kennwerte für digitale Systeme⁴⁹

Elementevorrat/Zeichenvorrat:

Zur Berechnung des Zeichenvorrates kann die unten stehende Formel herangezogen werden. Der Zeichenvorrat wird zur Bestimmung des Entscheidungsgehaltes benötigt.

$$V = \prod_{i=1}^n a_i = B^n$$

Wobei "a_i" der Anzahl der Zeichen je Stellenwert, "B" der Basis des Zahlensystems und "n" der Anzahl der zu übertragenden Stellen entspricht.

Entscheidungsgehalt:

Der Entscheidungsgehalt entspricht der Entscheidungsanzahl, die zur Kennzeichnung eines Zeichens notwendig sind.

$$G = \text{ld}(V) [\text{bit}]$$

Informationsgehalt:

Der Informationsgehalt bzw. Nachrichtengehalt pro Zeichen hängt von der Wahrscheinlichkeit auftretender Zeichen ab. Grundsätzlich gilt dass, je unwahrscheinlicher ein Zeichen ist, desto größer ist sein Informationsgehalt.

Bei gleichwahrscheinlichen Zeichen: $H = G = \text{ld}(V) = \text{ld}\left(\frac{1}{p}\right) = -\text{ld}(p)$

Bei nicht gleichwahrscheinlichen Zeichen und ohne Wiederholung: $V = n!$

Bei nicht gleichwahrscheinlichen Zeichen und mit Wiederholung: $V = \frac{n!}{a_1!}$

Daraus ergibt sich ein mittlerer Informationsgehalt von: $H = \frac{H_n}{n} \approx \sum_{i=1}^k p_i * \text{ld}\left(\frac{1}{p_i}\right)$

Dieser mittlere Informationsgehalt wird auch Entropie genannt. Und obwohl der Informationsgehalt eines einzelnen Zeichens am größten ist, wenn es am unwahrscheinlich-

⁴⁹ [Koudelka 2004] Nachrichtentechnik

ten ist, ist der gesamte Informationsgehalt am größten, wenn alle Zeichen gleichwahrscheinlich sind.

Codierung:

Unter Codierung versteht man eine *"Zuordnung von binären Worten (Codeworten) zu diskreten Zeichen, die derart erfolgen, dass beim Empfänger aus den Codeworten wieder die diskreten Zeichen eindeutig erzeugt werden können."* [Koudelka 2004 - Seite 14] Eine weitere aber abstraktere Definition wäre: *"Ein Code entsteht durch die Abbildung eines Quellenalphabets in ein Codealphabet, wobei das Codealphabet ganz bestimmte gewünschte Eigenschaften aufweist, die das Quellenalphabet nicht hat. Die Abbildung selbst muss umkehrbar eindeutig sein, damit die durch die Codierung veränderte Form der Informationsdarstellung wieder die ursprüngliche Gestalt annehmen kann. Die Abbildungsvorschriften sind die Codierungsverfahren"* [Dankmeier 2006 - Seite 4]

Um unterschiedliche Codierungen miteinander vergleichen zu können, benötigt man zuerst den mittleren Binärstellenaufwand $\bar{m} = \sum_{i=1}^V m_i * p_i \left[\frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} \right]$ wobei "m_i" der Anzahl an Binärstellen für ein Codewort entspricht.

Dadurch kann nur die Redundanz $R = \bar{m} - H \left[\frac{\text{bit}}{\text{Zeichen}} \right]$ ermittelt werden. Diese Redundanz kann mit Hilfe des Codierungsverfahrens beliebig klein gemacht werden, jedoch steigt damit der dafür benötigte technische Aufwand. Zum Zwecke der Datensicherung bzw. der Fehlererkennung wird jedoch oft die Redundanz vergrößert. Ist die Redundanz gleich null wird dieser Code als optimal bezeichnet.

Dämpfung:

"Als Dämpfung bezeichnet man in der Physik die Umwandlung von Schwingungsenergie in eine andere Energieform. Dies äußert sich beispielsweise in einem Abklingen eines Signals, einer Schwingung oder einer Welle. Eine Schwingung in einem gedämpften System verebbt, wenn ihr keine neue Energie zugeführt wird. Ein gedämpftes System verringert seine Amplitude, seine Intensität, seinen Ausschlag oder besser die Auslenkung seiner Schwingung oder Welle." [Wiki_1 2010 - Dämpfung] Die Dämpfung wird in Dezibel [dB] gemessen.

Bandbreite:

Der Frequenzbereich, in welchem mit geringer Dämpfung übertragen werden kann, wird als Bandbreite des Übertragungskanals bezeichnet. Aufgrund der Proportionalität zwischen Dämpfung und Frequenz erhöht sich bei steigender Frequenz auch die Dämpfung des Signals. Ein Übertragungsmedium ist geeignet, wenn die Bandbreite des Übertragungsmediums größer ist als die Bandbreite des Datensignals. Die Bandbreite wird in Hertz [Hz] angegeben.

Bitrate:

Die Bitrate, auch als Datenrate bezeichnet, gibt die Anzahl der Bits an, welche in einem bestimmten Zeitintervall übertragen werden können. Die Bitrate wird in Bits pro Sekunde $\left[\frac{Bit}{s}\right]$ angegeben.

Baudrate:⁵⁰

Die Baudrate gibt die Anzahl der übertragenen Symbole je Zeiteinheit an. Werden bei einem Codierungsverfahren mehrere Bits in einem Symbol kodiert, ergibt sich eine kleinere Baudrate als Bitrate. Wird jedoch ein Bit in mehreren Symbolen kodiert (aufgrund von Datensicherheit, Fehlererkennung) erhält man eine größere Baudrate in Bezug auf die Bitrate. Die Baudrate wird oft auch als Symbolrate, Schrittgeschwindigkeit oder als Symbolgeschwindigkeit bezeichnet und in Baud [Bd] gemessen.

Übertragungsfrequenz:

Die Übertragungsfrequenz hängt wesentlich vom verwendeten Codierungsverfahren ab und ergibt sich aus der Datenübertragung. Die Übertragungsfrequenz wird fälschlicherweise häufig mit der Bitrate (Datenrate) gleichgesetzt, wobei jedoch die Bitrate die Anzahl der maximalen über ein Übertragungsmedium zu übertragenden Bits je Zeiteinheit angibt. Aufgrund der Proportionalität zwischen Übertragungsfrequenz und Dämpfung ist eine niedrige Übertragungsfrequenz gewünscht, da eine niedrige Dämpfung zu einer größeren Übertragungsreichweite führt. Die Übertragungsfrequenz wird in Hertz [Hz] angegeben.

⁵⁰ [InfoArchiv 2004] Baudrate

Kanalkapazität:

Die Kanalkapazität entspricht dem Maximalwert des Informationsflusses H' welcher bei optimaler Codierung fehlerfrei in den Empfänger gelangen kann. Die Kanalkapazität nach Shannon lautet $C = B * \lg \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right) \left[\frac{\text{bit}}{s} \right]$ und wird durch die Bandbreite "B", der Signalleistung " P_S " [W] sowie der Rauschleistung " P_N " [W] berechnet. Das Verhältnis von $\frac{P_S}{P_N}$ entspricht dem Signal-Rausch-Verhältnis. Durch die Berücksichtigung des Signal-Rausch-Verhältnisses wird der Kanal nicht nur anhand seiner Bandbreite sondern auch anhand seiner Störsicherheit bewertet, da bei gleichbleibender Bandbreite und erhöhtem Signal-Rausch-Verhältnis die Kanalkapazität ebenfalls steigt.

Übertragungsverfahren:^{51,52}

Grundsätzlich gibt es drei unterschiedliche Übertragungsverfahren:

- Halbduplexverfahren (HDX)
- Vollduplexverfahren (FDX)
- sequenzielle Verfahren (SEQ)

Beim Vollduplexverfahren findet die Datenübertragung vom Transponder in Richtung Lesegerät gleichzeitig mit der Datenübertragung vom Lesegerät in Richtung Transponder statt. Als Transponder wird ein Kommunikationsgerät bezeichnet, welches eingehende Signale aufnimmt und automatisch beantwortet bzw. weiterleitet. Der Begriff Transponder setzt sich aus den Begriffen "Transmitter" und "Responder" zusammen. Die Datenübertragung erfolgt per Lastmodulation oder moduliertem Rückstrahlenquerschnitt.

Im Gegensatz zum Vollduplexverfahren findet beim Halbduplexverfahren die Kommunikation vom Transponder in Richtung Lesegerät und vom Lesegerät in Richtung Transponder abwechselnd statt. Das Halbduplexverfahren wird hauptsächlich bei induktiv gekoppelten Systemen eingesetzt und bietet einen höheren Wirkungsgrad als das Vollduplexverfahren, führt aber zu höheren Kosten.

⁵¹ [RFID Basis 2009] Übertragungsverfahren

⁵² [Zinecker 2006] Energieversorgung und Betriebsarten von Transpondern

Bei sequenziellen Verfahren sendet der Transponder während der Energieübertragungspausen des Lesegerätes. Das Lesegerät sendet hingegen während der Energieübertragung. Die sequenziellen Verfahren können noch in uni- bzw. bidirektionale Verfahren unterteilt werden. Die Datenübertragung erfolgt durch Modulation und Demodulation des Übertragungssignals.

In Abbildung 22 ist ein Vergleich dieser drei Übertragungsverfahren dargestellt. Als Downlink bezeichnet man die Datenübertragung von Schreib-/Lesegeräten zum Transponder. Der Uplink beschreibt die umgekehrte Datenübertragung.

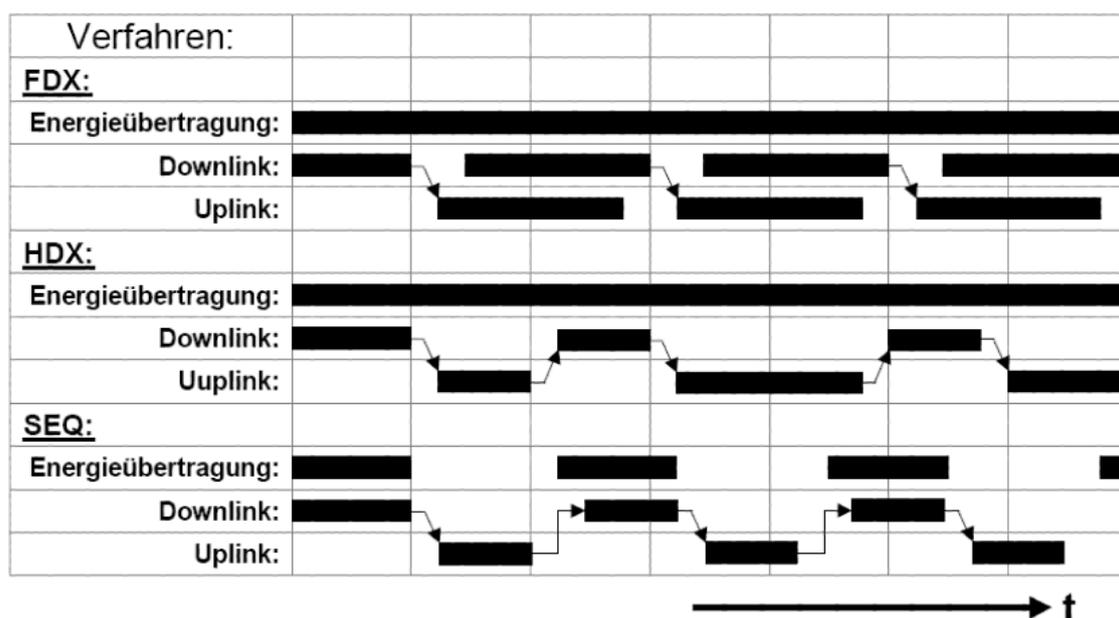


Abbildung 22: Vergleich von Übertragungsverfahren⁵³

Bei den beiden Duplex-Verfahren besteht eine kontinuierliche Energieübertragung wohingegen bei sequenziellen Verfahren diese Energieübertragung immer wieder unterbrochen wird. Wie bereits oben erwähnt, werden beim sequenziellen Verfahren diese Pausen zur Informationsübermittlung verwendet. Der Unterschied zwischen FDX und HDX besteht darin, dass beim FDX der Down- und Uplink nahezu zeitgleich und beim HDX zeitversetzt durchgeführt wird.

⁵³ [RFID LS 2010] Betriebsarten

Verbindungsorientiert/verbindungslos:

Bei verbindungsorientierten Übertragungsverfahren wird eine fixe Verbindung zwischen zwei Teilnehmern vereinbart. Durch diese Punkt-zu-Punkt Verbindung wird für die Dauer der Übertragung die Leitung bzw. der Kanal für andere Teilnehmer gesperrt. Bei verbindungslosen Übertragungsverfahren werden die zu übermittelnden Daten in Pakete mit Adressierungsinformationen verpackt. Dadurch ist der Aufbau einer Punkt-zu-Punkt Verbindung zwischen zwei Teilnehmern nicht mehr nötig und die Leitung kann von mehreren Teilnehmern verwendet werden.

Zugriffsverfahren:⁵⁴

Zugriffsverfahren sollen das gleichzeitige Schreiben auf eine bestimmte Ressource verhindern oder zumindest erkennen. Bei Fast Ethernet wird dies durch das Verfahren "Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection" (CSMA/CD) verwirklicht, welcher als IEEE 802.3 standardisiert wurde. Im Falle einer WLAN-Verbindung erfolgt das asynchrone Medienzugriffsverfahren durch "Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance" (CSMA/CA) und im Falle des CAN-Busses durch den Mechanismus "Carrier Sense Multiple Access/Collision Resolution" (CSMA/CR) .

⁵⁴ [IEEE 802.3z] Gigabit Ethernet Standard

4.2. Fast Ethernet

Fast Ethernet ist der direkte Nachfolger von Ethernet. Fast Ethernet wurde 1995 unter dem Standard IEEE 802.3u definiert und hat anstelle einer Datenrate von 10 MBit/s eine gesteigerte Datenrate von 100 MBit/s sowie die definierten Interfacearten 100BASE-TX (Twisted-Pair-Kabel Kat.5), 100BASE-FX (Lichtwellenleiter), 100BASE-T2 und 100BASE-T4 (Twisted-Pair-Kabel Kat.3). Fast Ethernet verwendet die „Non Return to Zero/Inverted“ Codierung. Bei dieser Codierung wird eine logische Eins als Pegelwechsel und eine logische Null als gleichbleibender Pegel übertragen. Durch diese Übertragungsart wird die benötigte Anzahl an Pegelwechseln und somit auch die benötigte Übertragungsfrequenz reduziert. Die NRZI-Codierung hat den Nachteil, dass man bei einer langen Null-Folge keinerlei Informationen bezüglich des Taktsignals erhält. Des Weiteren kommt es zum sogenannten „baseline wander“, welcher aufgrund der AC-Kopplung zu Übertragungsfehlern führen kann.⁵⁵ Dies wurde durch die 4B/5B-Codierung verbessert. Hierbei werden vier Nutzerdatenbits in eine fünf Bit große Übertragungsgruppe gepackt. Dadurch wird sichergestellt, dass im Datenstrom genügend Taktinformation sowie ein Statusbit enthalten sind. Durch dieses Statusbit können Codegruppen erkannt werden, welche nicht übertragen werden dürfen. Eine Auflistung dieser Codegruppen kann auf der Homepage der Universität Oldenburg⁵⁶ gefunden werden. Durch die Verwendung von Twisted-Pair-Kabeln sowie der Verwendung von Switches im Netzwerk wurde der Voll-Duplex Betrieb ermöglicht. Dadurch wird das Zugriffsverfahren CSMA/CD nicht weiter benötigt und dadurch kann die Performance erhöht werden.⁵⁷ Ist das gesamte Netzwerk als Stern aufgebaut kann es zu keinen Kollisionen mehr kommen und das Netzwerk kann als „Switched Ethernet“ bezeichnet werden.

Genauere Informationen zum Fast Ethernet Standard, ihrer Einordnung im OSI-Referenzmodell sowie Frameformat können in der Arbeit von Sporer Harald [Sporer 2010] nachgeschlagen werden.

⁵⁵ [CISCO 2010] Internetworking Technology Handbook

⁵⁶ [Kowalk 2002] Signalkodierung

⁵⁷ [Shalunov 2005] Detecting Duplex Mismatch on Ethernet

4.3. Echtzeit – Ethernet Bussysteme⁵⁸

Fast Ethernet weist im Regelfall keine Echtzeitfähigkeit auf, jedoch wurden mehrere Varianten erarbeitet mit denen ein Echtzeitverhalten realisiert werden kann. Diese Varianten werden unter dem Begriff „Industrial Ethernet“ zusammengefasst. „Industrial Ethernet“ werden in drei Klassen unterteilt. Lösungen der Klasse 1 verwenden sowohl Standardhardware wie auch einen Standard TCP/IP Stack. Vertreter von Industrial Ethernet Klasse 1 wären Modbus-IDA und EtherNet/IP. Bei Lösungen der Klasse 2 wird der TCP/IP Stack umgangen und echtzeitkritische Elemente mittels VLAN höher priorisiert. Diese Veränderungen verhelfen PROFINET RT zu seinem Echtzeitverhalten. Um eine bestmögliche Performance zu erreichen werden bis zu vier Schichten des OSI-Referenzmodells verändert. Das Echtzeitverhalten wird durch das Zeitschlitzverfahren bzw. das Summenrahmenverfahren realisiert und benötigt im Regelfall spezielle Hardware wie Switches, FPGAs oder ASICs. Lösungen dieser Art werden in der Kategorie „Industrial Ethernet Klasse 3“ zusammengefasst.

Nähere Informationen zu Echtzeit – Ethernet und den nachfolgend beschriebenen drei Echtzeitbussystemen EtherCAT, POWERLINK und PROFINET IRT können sie in der Arbeit von Sporer Harald [Sporer 2010] finden.

4.3.1. EtherCAT

EtherCAT wurde ursprünglich von der Firma Beckhoff entwickelt und in späterer Folge der EtherCAT Technology Group (ETG) übergeben. EtherCAT verwendet das Summenrahmenverfahren. Dabei werden in einem Ethernet-Frame mehrere EtherCAT Telegramme eingebettet. In dieses Ethernet-Frame werden von allen Teilnehmern im Durchlauf Nutzdaten hinzugefügt oder entfernt. Nachdem alle adressierten EtherCAT-Slaves das Telegramm erhalten haben, wird dieses an den ersten Slave zurück geschickt, welcher dieses weiter an den Master leitet. Ein EtherCAT Frame, wie in Abbildung 23 dargestellt, beinhaltet einen zwei Byte großen Frameheader gefolgt von einem EtherCAT Datagram. Dieses Datagram unterteilt sich wiederum in einen 10 Byte großen Ether-

⁵⁸ [Sporer 2010] Echtzeit - Ethernet

CAT-Header, ein mindestens ein Byte großes Nutzdatenfeld und einen zwei Byte großen Workingcounter.

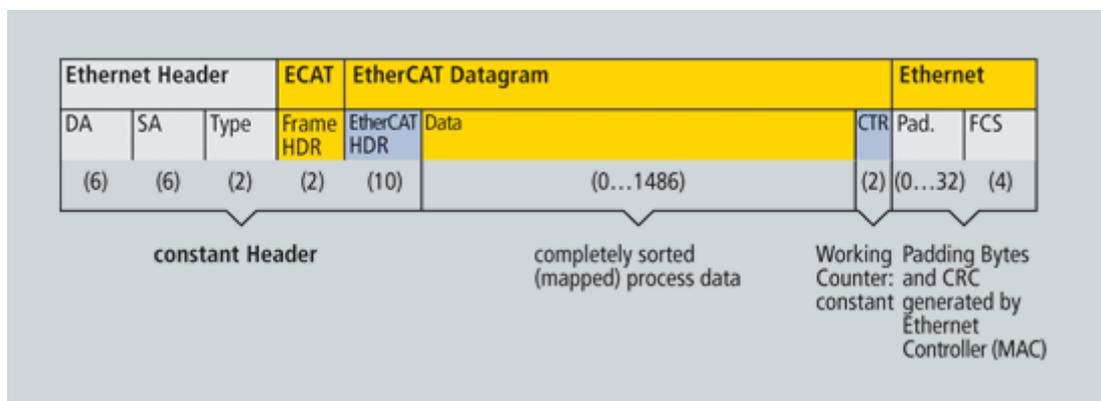


Abbildung 23: EtherCAT Frame⁵⁹

4.3.2. POWERLINK

POWERLINK wurde ursprünglich von der Firma Berner&Rainer entwickelt und wird nun von der POWERLINK Standardization Group (EPSG) weiterentwickelt. POWERLINK verwendet zur Realisierung des Echtzeitverhaltens das Zeitschlitzverfahren gemischt mit Polling. Der Kommunikationszyklus wird in einen isochronen und einen asynchronen Übertragungszeitraum aufgeteilt. Echtzeitkritische Daten werden im isochronen Zeitraum übertragen und zeit-unkritische Daten werden im verbleibenden asynchronen Übertragungszeitraum übermittelt.

In Abbildung 24 ist ein POWERLINK Basis Frame abgebildet, wo man die Integration des POWERLINK-Frames in den Ethernet Datenbereich sehen kann. Das POWERLINK Frame beginnt mit einem sieben Bit langen Nachrichtentypblock, gefolgt von der Ziel- und Quelladresse und abschließend dem Datenblock.

⁵⁹ [EtherCAT 2010] Technical Instruction

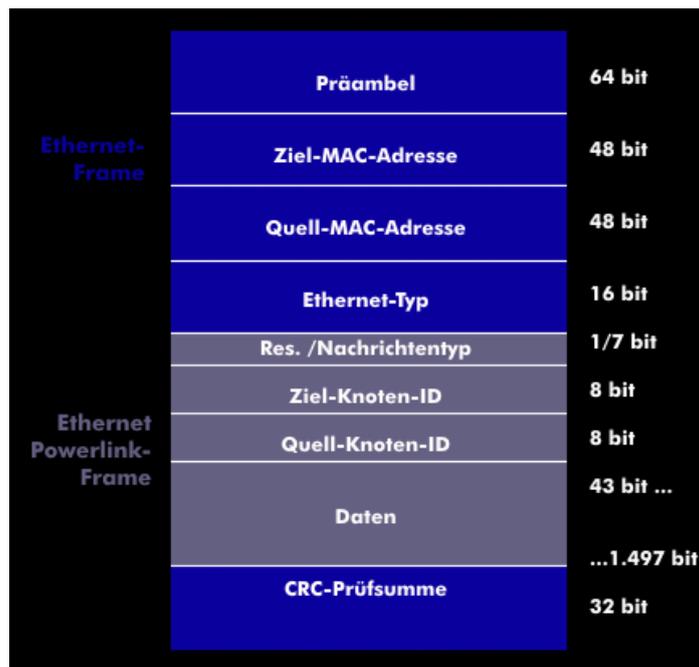
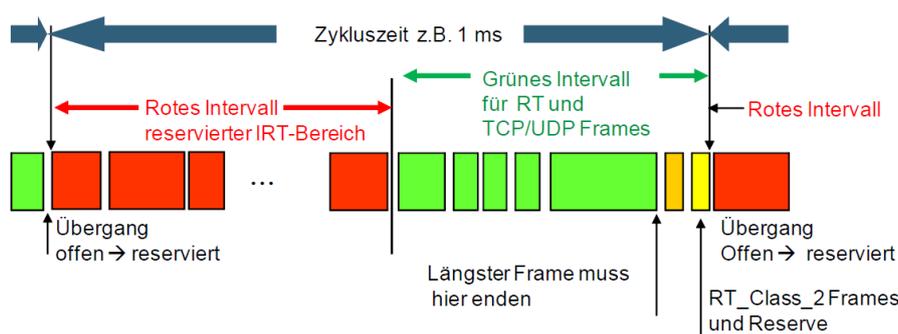


Abbildung 24: POWERLINK Basis-Frame⁶⁰

4.3.3. PROFINET-IRT

PROFINET wurde von der Firma Siemens entwickelt und später von der PROFIBUS Benutzerorganisation betreut. Ein Übertragungszyklus wird wie bei POWERLINK in einen zeitkritischen und in einen zeitunkritischen Teil aufgeteilt. Aufgrund der Tatsache, dass die Reihenfolge der Echtzeit-Übertragungen der einzelnen Teilnehmer bereits bei der Netzwerkplanung festgelegt wird, ist von Beginn an bekannt, welche Teilnehmer welche Echtzeit-Daten senden. Um Kollisionen zu vermeiden werden spezielle PROFINET-Switches verwendet. Der Übertragungszyklus wird in ein rotes und ein grünes Intervall unterteilt. Dabei transportiert das rote Intervall alle echtzeitkritischen Informationen, welche in der Planungsphase berücksichtigt werden müssen. Im grünen Intervall werden alle zeitunkritischen Informationen übertragen.

⁶⁰ [ITWissen 2010] Ethernet - POWERLINK

Abbildung 25: Übertragungszyklus von PROFINET IRT⁶¹

4.4. Vergleich der Bussysteme anhand ihrer Zykluszeiten

Aufgrund der örtlichen Entfernung zwischen den einzelnen Sensorstationen von 50 bis 100 Metern innerhalb des Verkehrstunnels kommt nur eine Linientopologie in Frage. Ansonsten würde der Verkabelungsaufwand zu groß werden und desweiteren würde die maximale Übertragungsweite von Echtzeit-Ethernet auf 100BASE-TX basierend gesprengt werden. Beim Vergleich der unterschiedlichen Echtzeit-Ethernet Varianten werden nur die Geschwindigkeitsmessstationen und deren Datenaustausch mit der örtlichen Kleintunnelwarte berücksichtigt, da sich diese Arbeit hauptsächlich auf das Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation in Verkehrstunnels bezieht und nicht auf die Steuerung einer gesamten Tunnelanlage. Ebenso wird nur die Übertragung bis zur örtlichen Kleintunnelwarte herangezogen, da die Übertragung bis zur Haupttunnelwarte aufgrund der großen Entfernung mittels Lichtwellenleiter durchgeführt wird und nicht zwingend echtzeitfähig sein muss. Für diese Übertragung würde im praktischen Einsatz die bereits vorhandene Lichtwellenleiter-Übertragungsstrecke verwendet werden und daher für alle drei Echtzeit-Ethernet Varianten identisch sein. Als Kennzahl für den Vergleich wird die minimale Zykluszeit herangezogen, da diese die wichtigste Kennzahl im Echtzeit-Ethernet ist. Die minimale Zykluszeit ist die benötigte Zeit für den vollständigen Austausch von Ein- und Ausgangsdaten mit allen Teilnehmern im Echtzeit-Ethernet-Bus.

⁶¹ [HMS 2010] PROFINET Whitepaper

4.4.1. Grundlagen zur Berechnung der minimalen Zykluszeit⁶²

Variable	Wert	Beschreibung
T_{PHY}	500	Summe der Verzögerung der physikalischen Schicht [ns]
T_C	5	durch das Übertragungsmedium bedingte Verzögerungszeit [ns/m]
n_{Slaves}		Anzahl der Slaves [Anzahl]
$d_{Payload}$		Nutzdaten pro Slave [Byte]
B	100*106	Verwendete Bandbreite [Bit/s]
$d_{Ethernet_Max_Length}$	1538	Maximale Anzahl der Byte in einem Frame inkl. Header und Interframe-Gap [Byte]
$d_{Ethernet_Header}$	38	Header-Daten pro Ethernet-Frame inkl. Interframe-Gap [Byte]

Tabelle 33: Allgemeine Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit^{63 64}

4.4.1.1. EtherCAT

$$T_{EtherCAT_M_fwd} = (k_{Frames} - 1) * T_{full_Frame} + T_{part_Frame}$$

Formel 37: Verzögerung der Weiterleitung im EtherCAT Master

$$T_{EtherCAT_Min_Cycle} = T_{EtherCAT_M_fwd} + T_{PHY} + n_{Slave} * (T_{S_fwd} + T_C)$$

Formel 38: minimale Zykluszeit bei EtherCAT

⁶² [Sporer 2010] Echtzeitkommunikation

⁶³ [Sporer 2010] Echtzeitkommunikation

⁶⁴ [Prytz 2008] Performance analysis

Variable	Wert	Beschreibung
$d_{EtherCAT_Max_Payload}$	1498	Maximale Anzahl der Bytes im Nutzdatenbereich inkl. EtherCAT-Header [Byte]
$d_{EtherCAT_Min_Payload}$	32	Minimale Anzahl an Bytes im Nutzdatenbereich [Byte]
$d_{EtherCAT_Telegram_Header}$	12	Header-Daten je EtherCAT-Telegramm [Byte]
$d_{EtherCAT_Header}$	2	Header-Daten je EtherCAT-Frame [Byte]
$d_{EtherCAT_Payload_Part_Frame}$		Nutzdaten im Frame mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich [Byte]
$n_{EtherCAT_Telegrams_Part_Frame}$		Anzahl der EtherCAT-Telegramme im Frame mit nicht vollständigem Nutzdatenbereich [Anzahl]
$d_{Header_Data_Part_Frame}$		Header Daten im Frame mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich [Byte]
k_{Frames}		Anzahl der Frames je Zyklus [Anzahl]
$k_{Frames} - 1$		Anzahl der Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich je Zyklus [Anzahl]
T_{full_Frame}		Zeit für die Weiterleitung eines Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich [s]
T_{part_Frame}		Zeit für die Weiterleitung eines Frames mit nicht ausgefülltem Nutzdatenbereich [s]
T_{S_fwd}	450	Summe der Verzögerung für die Weiterleitung [ns]

Tabelle 34: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für EtherCAT^{65 66}

$$\begin{aligned}
 d_{EtherCAT_Payload_Part_Frame} &= (n_{Slaves} * d_{Payload}) \bmod (d_{EtherCAT_Max_Payload} - n_{Slaves} \\
 &\quad * d_{EtherCAT_Telegram_Header})
 \end{aligned}$$

Formel 39: Nutzdaten im Frame mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich

$$\begin{aligned}
 d_{Header_Data_Part_Frame} &= d_{Ethernet_Header} + d_{EtherCAT_Header} + n_{EtherCAT_Telegrams_Part_Frame} \\
 &\quad * d_{EtherCAT_Telegram_Header}
 \end{aligned}$$

Formel 40: Header Daten im Frame mit nicht vollständig ausgefüllten Nutzdatenbereich

⁶⁵ [Sporer 2010] Echtzeitkommunikation

⁶⁶ [Prytz 2008] Performance analysis

$$k_{Frames} - 1 = \left\lfloor \frac{(n_{Slaves} * d_{Payload})}{(d_{EtherCAT_Max_Payload} - n_{Slaves} * d_{EtherCAT_Telegram_Header})} \right\rfloor$$

Formel 41: Anzahl der Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich

$$T_{full_Frame} = \frac{d_{Ethernet_Max_Length} * 8}{B}$$

Formel 42: Zeit für die Weiterleitung eines Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich

$$T_{part_Frame} = \frac{(d_{EtherCAT_Payload_part_Frame} + d_{Header_Data_Part_Frame}) * 8}{B}$$

Formel 43: Zeit für die Weiterleitung des Frames mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich

4.4.1.2. POWERLINK

$$T_{POWERLINK_M_fwd} = \frac{n_{Slave} * (d_{Payload} + d_{Ethernet_Header} + d_{POWERLINK_Header}) * 8}{B}$$

Formel 44: Verzögerung der Weiterleitung im POWERLINK Master

Bei POWERLINK wurde bei der Berechnung der minimalen Zykluszeit die Verzögerungszeit des Masters verdoppelt, weil POWERLINK im Halb-Duplex-Modus arbeitet.

$$T_{POWERLINK_Min_Cycle} = 2 * T_{POWERLINK_M_fwd} + T_{PHY} + n_{Slave} * (T_{Hub_fwd} + T_{S_fwd} + T_C)$$

Formel 45: minimale Zykluszeit bei POWERLINK

Variable	Wert	Beschreibung
$d_{POWERLINK_Min_Payload}$	43	Minimale Anzahl an Bytes im Nutzdatenbereich [Byte]
$d_{POWERLINK_Header}$	3	Header-Daten je POWERLINK-Frame [Byte]
T_{S_fwd}	1000	Summe der Verzögerung für die Weiterleitung [ns]
T_{Hub_fwd}	500	Summe der Verzögerung für die Weiterleitung in einem Hub bei Linientopologie[ns]

Tabelle 35: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für POWERLINK^{67 68}

⁶⁷ [Sporer 2010] Echtzeitkommunikation

⁶⁸ [Prytz 2008] Performance analysis

4.4.1.3. PROFINET IRT

$$T_{PROFINET_M_fwd} = \frac{n_{Slave} * (d_{Payload} + d_{Ethernet_Header} + d_{PROFINET_Header}) * 8}{B}$$

Formel 46: Verzögerung der Weiterleitung im PROFINET IRT Master

$$T_{PROFINET_Min_Cycle} = T_{PROFINET_M_fwd} + T_{PHY} + T_{S_fwd} + T_C$$

Formel 47: minimale Zykluszeit bei PROFINET IRT

Variable	Wert	Beschreibung
$d_{PROFINET_Min_Payload}$	40	Minimale Anzahl an Bytes im Nutzdatenbereich [Byte]
$d_{PROFINET_Header}$	6	Header-Daten je PROFINET IRT-Frame [Byte]
T_{S_fwd}	3	Summe der Verzögerung für die Weiterleitung [μ s]
T_{Switch_fwd}		Summe der Verzögerung für die Weiterleitung in einem Switch[s]

Tabelle 36: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für PROFINET IRT^{69 70}**4.4.2. Berechnung der minimalen Zykluszeit**

Als Berechnungsbeispiel wird ein Verkehrstunnel mit einer Länge von fünf Kilometer und einem Messstationenabstand von 50 Metern angenommen. Daher ergeben sich in Summe 100 Messstationen mit einer gesamten Übertragungsstrecke von 5.000 Metern, da wie bereits zuvor erwähnt die Übertragungszeit nur bis zur lokalen Tunnelwarte und nicht bis zur Haupttunnelwarte berechnet wird. Pro Messstation wird ein Zahlenwert mit einer Länge von 16 Bits zur Tunnelwarte übertragen. Dies ergibt eine Nutzdatengröße von zwei Bytes. Diese Nutzdatengröße ist bei allen drei Echtzeit-Ethernet-Bussystemen kleiner als die minimale Nutzdatenmenge. Daher müssen für alle Berechnungen die minimalen Nutzdatenlängen des jeweiligen Bussystems verwendet werden.

⁶⁹ [Sporer 2010] Echtzeitkommunikation⁷⁰ [Prytz 2008] Performance analysis

4.4.2.1. EtherCAT

$$\begin{aligned}
 d_{EtherCAT_Payload_Part_Frame} & \\
 &= (n_{Slaves} * d_{Payload}) \bmod (d_{EtherCAT_Max_Payload} - n_{Slaves} \\
 &\quad * d_{EtherCAT_Telegram_Header})
 \end{aligned}$$

$$d_{EtherCAT_Payload_Part_Frame} = (100 * 32) \bmod (1498 - 100 * 12) = 220 \text{ [Byte]}$$

$$\begin{aligned}
 d_{Header_Data_Part_Frame} & \\
 &= d_{Ethernet_Header} + d_{EtherCAT_Header} + n_{EtherCAT_Telegrams_Part_Frame} \\
 &\quad * d_{EtherCAT_Telegram_Header}
 \end{aligned}$$

$$d_{Header_Data_Part_Frame} = 38 + 2 + 100 * 12 = 1240 \text{ [Byte]}$$

$$\begin{aligned}
 T_{EtherCAT_M_fwd} & \\
 &= (k_{Frames} - 1) * T_{full_Frame} \\
 &\quad + \frac{(d_{EtherCAT_Payload_Part_Frame} + d_{Header_Data_Part_frame}) * 8}{B}
 \end{aligned}$$

$$T_{EtherCAT_M_fwd} = 0 * T_{full_Frame} + \frac{(220 + 1240) * 8}{100 * 10^6} = 116,8 \text{ [\mu s]}$$

$$T_{EtherCAT_Min_Cycle} = T_{EtherCAT_M_fwd} + T_{PHY} + n_{Slave} * (T_{S_fwd} + T_C)$$

$$\begin{aligned}
 T_{EtherCAT_Min_Cycle} & \\
 &= 116,8 * 10^{-6} + 0,5 * 10^{-6} + 100 * (0,45 * 10^{-6} + 5 * 10^{-9} * 50) \\
 &= 187,3 \text{ [\mu s]}
 \end{aligned}$$

4.4.2.2. POWERLINK

$$T_{POWERLINK_M_fwd} = \frac{n_{Slave} * (d_{Payload} + d_{Ethernet_Header} + d_{POWERLINK_Header}) * 8}{B}$$

$$T_{POWERLINK_M_fwd} = \frac{100 * (43 + 38 + 3) * 8}{100 * 10^6} = 672 [\mu s]$$

$$T_{POWERLINK_Min_Cycle}$$

$$= 2 * T_{POWERLINK_M_fwd} + T_{PHY} + n_{Slave} * (T_{Hub_fwd} + T_{S_fwd} + T_C)$$

$$T_{POWERLINK_M_fwd}$$

$$= 2 * 672 * 10^{-6} + 0,5 * 10^{-6} + 100$$

$$* (0,5 * 10^{-6} + 5 * 10^{-9} * 50 + 1 * 10^{-6}) = 1.519,5 [\mu s]$$

4.4.2.3. PROFINET IRT

$$T_{PROFINET_M_fwd} = \frac{n_{Slave} * (d_{Payload} + d_{Ethernet_Header} + d_{PROFINET_Header}) * 8}{B}$$

$$T_{PROFINET_M_fwd} = \frac{100 * (40 + 38 + 6) * 8}{100 * 10^6} = 672 [\mu s]$$

$$T_{PROFINET_Min_Cycle} = T_{PROFINET_M_fwd} + T_{PHY} + T_{S_fwd} + T_C$$

$$T_{PROFINET_Min_Cycle} = 672 * 10^{-6} + 0,5 * 10^{-6} + 5 * 10^{-9} * 50 + 3 * 10^{-6}$$

$$= 675,75 [\mu s]$$

4.4.2.4. Gegenüberstellung

In Abbildung 26 ist die graphische Gegenüberstellung der minimalen Zykluszeiten der drei Bussysteme abgebildet. Hierbei kann man erkennen, dass EtherCAT um vieles schneller als die beiden anderen Bussysteme ist. Dies ist auf die große Anzahl der Teilnehmer und das verwendete Summenrahmenverfahren zurückzuführen. Aufgrund dieses Vorteils und der leichten Erweiterbarkeit (im Vergleich zu PROFIBUS IRT) wurde das Sensorkonzept und die Steuerung des Tunnelmodells mittels EtherCAT verwirklicht.

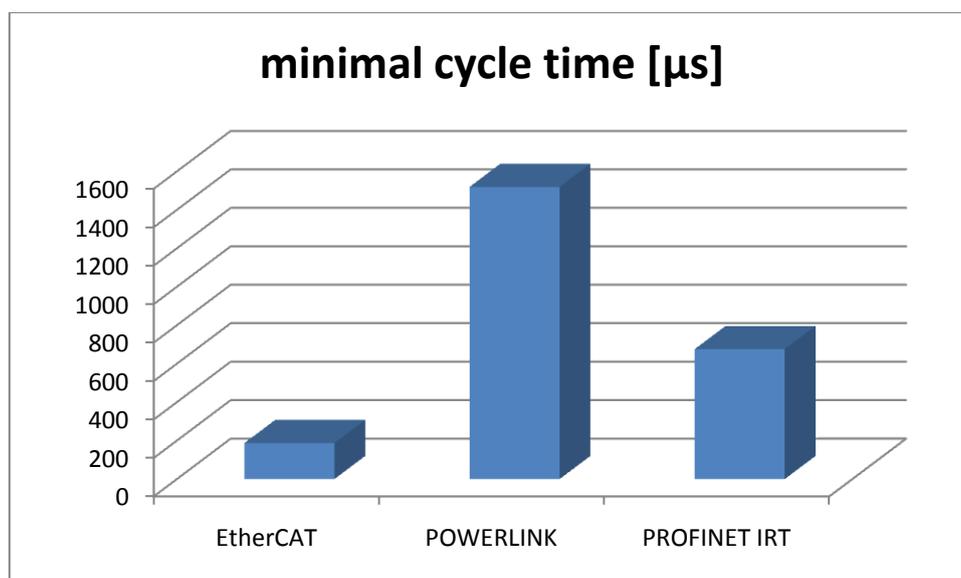


Abbildung 26: Minimale Zykluszeit für 100 Stationen mit einem Abstand von je 50 Metern in Abhängigkeit vom verwendeten Bussystem

AUSBLICK

Wie in Kapitel 1 gezeigt wurde, ist das Risiko innerhalb eines Verkehrstunnels in einen Unfall verwickelt zu werden geringer, als man im ersten Moment annehmen würde. Es geschehen wesentlich weniger Unfälle wie auf offener Straße. Das grundsätzliche Problem bei Verkehrstunnels stellt somit nicht die Anzahl der Unfälle, sondern die großen Folgen bei einem Unfall dar. Daher ist es wichtig, an Systemen zur schnellen Branderkennung und Rauchererkennung sowie an Systemen zur Eindämmung der Rauchentwicklung zu arbeiten, da Brände und der dadurch entstehende Rauch das größte Gesundheitsrisiko für Personen darstellen. Nähere Informationen zu diesen Themen können aus den Arbeiten von Navid Modiri⁷¹, R. Buchmann⁷², Christian Kaiser⁷³ und Helmut Kern⁷⁴ entnommen werden.

Ebenso ist eine schnelle Reaktionszeit der Tunnelwarte von großer Bedeutung, denn umso schneller ein Tunnel gesperrt wird, desto weniger Verkehrsteilnehmer befinden sich in der Gefahrenzone. Dieses Sensorkonzept kann daher zur Sicherheit beitragen.

Dennoch sollte man weiter an Systemen zur Vermeidung von Unfällen arbeiten. Dieses Sensorkonzept zur Erkennung der Verkehrssituation in Straßentunnels könnte durch Hinzufügen eines lichtempfindlichen Sensors je Fahrstreifen erkennen, ob sich das gerade gemessene Fahrzeug auf der ersten oder der zweiten Spur befindet. Anhand dieser Information und der ermittelten Geschwindigkeit könnte man den Abstand zwischen den Fahrzeugen pro Fahrspur berechnen. Sollte ein Fahrzeug den geforderten Mindestabstand, bei der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit, unterschreiten, könnte man den Fahrzeuglenker mittels digitalen Warnanzeigen darauf hinweisen. Dies würde zum einen zu einer Verbesserung der Fahrdisziplin der einzelnen Verkehrsteilnehmer führen und könnte zum Anderen viele Auffahrunfälle verhindern, welche als Hauptunfallverursacher von schweren Tunnelunfällen gelten.

⁷¹ [Modiri 2010] Tehran resalat tunnel innovation

⁷² [Buchmann 2010] leakages in exhaust ducts of transverse ventilated road tunnels

⁷³ [C.Kaiser 2010] fire-fighting water supply

⁷⁴ [H.Kern 2010] structure and smoke gas cooling

ANHANG

Ausgangssituation für den Vergleich von Tunnels

	Tunnels mit Richtungsverkehr	Tunnels mit Gegenverkehr	
		Autobahn, Schnellstraße	Landesstraße
Anzahl untersuchter Tunnels	110	20	24
Gesamtlänge [km]	104,669	86,700	29,892
Durchschnittliche Länge [km]	0,952	4,335	1,246
Verkehrsstärke [durch.Kfz/Tag]	12.363	14.825	9.456
UPS	275	167	40
Verunglückte	432	357	68
Getötete	27	38	3

Tabelle 37: Ausgangssituation für den Tunnelvergleich⁷⁵

SA _{mech}		Tunnels mit Gegenverkehr	Tunnels mit Richtungsverkehr
Alleinunfall	PKW	0,138	0,175
	LKW	0,083	0,083
	Bus	0,100	0,100
Unfall im Richtungsverkehr	PKW	0,019	0,010
	LKW	0,419	0,093
	Bus	0,100	0,100
Unfall im Begegnungsverkehr	PKW	0,250	0,250
	LKW	0,429	0,429
	Bus	0,750	0,750

Tabelle 38: Schadensausmaßwert für mechanische Ereignisse⁷⁶

SA _{Brand} /SA _{Gfg} /SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}	Durchschnittliche Verkehrssituation	Stau
PKW-Brand	1,67	1,50
LKW-Brand	4,50	1,50
Gefahrgutbeteiligung	9,00	3,00
Bus-Brand	11,33	1,50

Tabelle 39: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse in Richtungsverkehr Tunnels ohne mechanische Lüftung⁷⁷

⁷⁵ [Robatsch 2005] Sicherheitsvergleich von Tunnels - Seite 14, 16

⁷⁶ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 16

⁷⁷ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 18

		SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
Längslüftung	Länge 0,7 km	PKW-Brand			1,83
		LKW-Brand			10,67
		Gefahrgutbeteiligung			20,67
		Bus-Brand			20,50
	Länge 1,5 km	PKW-Brand	2,17	2,17	2,17
		LKW-Brand	4,17	30,00	35,00
		Gefahrgutbeteiligung	14,17	40,00	45,00
		Bus-Brand	7,33	43,17	49,00
	Länge 3,0 km	PKW-Brand			2,20
		LKW-Brand			49,00
		Gefahrgutbeteiligung			59,00
		Bus-Brand			63,67
Querlüftung	Länge >5,0 km	PKW-Brand	0,33	1,33	1,83
		LKW-Brand	1,67	2,00	2,17
		Gefahrgutbeteiligung	11,67	12,00	12,17
		Bus-Brand	2,17	2,50	2,67

Tabelle 40: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse in Richtungsverkehr Tunnels mit mechanischer Lüftung⁷⁸

		SA _{Brand} /SA _{Gfg}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
5.000 Kfz/d	PKW-Brand		1,00	1,00	1,00
	LKW-Brand		2,33	3,75	5,17
	Gefahrgutbeteiligung		7,33	8,75	10,17
	Bus-Brand		2,83	4,25	5,67
15.000 Kfz/d	PKW-Brand		2,00	2,00	2,00
	LKW-Brand		3,33	4,75	6,17
	Gefahrgutbeteiligung		8,33	9,75	11,17
	Bus-Brand		3,83	5,25	6,67

Tabelle 41: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 0,7 km Länge, keine mechanische Lüftung⁷⁹

		SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
		PKW-Brand	1,00	1,00	1,00
		LKW-Brand	1,67	1,67	1,67
		Gefahrgutbeteiligung	3,33	4,58	5,83
		Bus-Brand	1,67	1,67	1,67

Tabelle 42: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 0,7 km Länge, keine mechanische Lüftung⁸⁰

⁷⁸ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 18

⁷⁹ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 19

⁸⁰ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 19

		$SA_{\text{Brand}}/SA_{\text{Gfg}}$	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
5.000 Kfz/d	PKW-Brand		0,67	0,75	0,83
	LKW-Brand		1,33	4,00	6,67
	Gefahrgutbeteiligung		6,33	9,00	11,67
	Bus-Brand		8,83	11,83	14,83
15.000 Kfz/d	PKW-Brand		1,50	1,59	1,67
	LKW-Brand		3,33	7,00	10,67
	Gefahrgutbeteiligung		8,33	12,00	15,67
	Bus-Brand		8,83	14,33	19,83

Tabelle 43: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 0,7 km Länge, Längslüftung⁸¹

		$SA_{\text{Brand,Stau}}/SA_{\text{Gfg,Stau}}$	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
		PKW-Brand	1,17	1,25	1,34
		LKW-Brand	2,17	6,42	10,66
		Gefahrgutbeteiligung	3,50	10,42	17,33
		Bus-Brand	4,50	9,59	14,67

Tabelle 44: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 0,7 km Länge, Längslüftung⁸²

		$SA_{\text{Brand}}/SA_{\text{Gfg}}$	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
15.000 Kfz/d	PKW-Brand		1,33	1,33	1,50
	LKW-Brand		5,83	11,83	13,37
	Gefahrgutbeteiligung		10,83	16,83	18,67
	Bus-Brand		14,67	23,50	25,34

Tabelle 45: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normalen Verkehrsverhältnisse, 1,5 km Länge, Längslüftung⁸³

		$SA_{\text{Brand,Stau}}/SA_{\text{Gfg,Stau}}$	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
		PKW-Brand	1,17	1,17	1,17
		LKW-Brand	4,00	8,83	8,83
		Gefahrgutbeteiligung	4,00	8,83	8,83
		Bus-Brand	4,00	8,83	8,83

Tabelle 46: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 1,5 km Länge, Längslüftung⁸⁴

⁸¹ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 20

⁸² [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 20

⁸³ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 20

⁸⁴ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 21

		SA _{Brand} /SA _{Gfg}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
5.000 Kfz/d		PKW-Brand	0,83	0,83	0,83
		LKW-Brand	1,67	4,50	7,33
		Gefahrgutbeteiligung	6,67	10,59	17,17
		Bus-Brand	8,33	13,08	16,00
15.000 Kfz/d		PKW-Brand	1,50	1,85	2,17
		LKW-Brand	2,33	5,75	9,17
		Gefahrgutbeteiligung	7,33	10,75	14,17
		Bus-Brand	9,00	12,50	17,83

Tabelle 47: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 3,0 km Länge, Längslüftung mit Punktabsaugung⁸⁵

		SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
		PKW-Brand	0,67	0,92	1,17
		LKW-Brand	2,33	6,09	9,84
		Gefahrgutbeteiligung	4,00	9,50	12,33
		Bus-Brand	4,84	8,18	13,33

Tabelle 48: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 3,0 km Länge, Längslüftung mit Punktabsaugung⁸⁶

		SA _{Brand} /SA _{Gfg}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
5.000 Kfz/d		PKW-Brand	0,33	0,50	0,67
		LKW-Brand	0,33	0,50	0,67
		Gefahrgutbeteiligung	5,33	5,50	5,67
		Bus-Brand	0,83	1,00	1,17
15.000 Kfz/d		PKW-Brand	0,67	1,34	2,00
		LKW-Brand	0,67	1,34	2,00
		Gefahrgutbeteiligung	5,67	6,34	7,00
		Bus-Brand	1,00	1,75	2,50

Tabelle 49: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 5,0 km Länge, Querlüftung⁸⁷

		SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}	Notausgangsabstand		
			250 m	500 m	Kein NA
		PKW-Brand	0,33	0,50	1,00
		LKW-Brand	0,33	0,50	1,00
		Gefahrgutbeteiligung	0,33	1,00	1,67
		Bus-Brand	0,83	1,00	1,17

Tabelle 50: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 5,0 km Länge, Querlüftung⁸⁸

⁸⁵ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 21

⁸⁶ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 21

⁸⁷ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 22

SA _{Brand} /SA _{Gfg}		Notausgangsabstand		
		250 m	500 m	Kein NA
15.000 Kfz/d	PKW-Brand	1,00	1,67	2,50
	LKW-Brand	1,00	1,67	2,50
	Gefahrgutbeteiligung	6,00	6,67	7,50
	Bus-Brand	1,50	2,17	3,00

Tabelle 51: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normalen Verkehrsverhältnisse, 7,0 km Länge, Querlüftung⁸⁹

SA _{Brand,Stau} /SA _{Gfg,Stau}		Notausgangsabstand		
		250 m	500 m	Kein NA
15.000 Kfz/d	PKW-Brand	0,17	0,67	1,00
	LKW-Brand	0,17	0,67	1,00
	Gefahrgutbeteiligung	0,17	0,67	1,00
	Bus-Brand	0,17	0,67	1,00

Tabelle 52: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 7,0 km Länge, Querlüftung⁹⁰

Längenbereich	Lüftung	Schadensausmaßäquivalent S	
		Geringe Stauhäufigkeit	Mittlere Stauhäufigkeit
0,5 – 0,7 km	Keine mechanische Lüftung	0,13407	0,13420
0,5 – 1,0 km	Längslüftung	0,09547	0,09580
1,0 – 2,0 km	Längslüftung	0,09570	0,09649
2,0 – 3,0 km	Längslüftung	0,09582	0,09684
> 3,0 km	Querlüftung	0,09539	0,09557

Tabelle 53: Schadensausmaßäquivalent für Richtungsverkehrstunnels für das vereinfachte Risikoanalysemodell⁹¹

⁸⁸ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 22

⁸⁹ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 22

⁹⁰ [RVS 09.03.11] Tunnel Risikoanalysemodell – Seite 23

⁹¹ [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung – Seite 26

Längenbereich	Lüftung	Schadensausmaßäquivalent S					
		jDTV < 10.000 Kfz/Tag			jDTV > 10.000 Kfz/Tag		
		Ohne Notausgang	Notausgang Abstand 500m	Notausgang Abstand 250m	Ohne Notausgang	Notausgang Abstand 500m	Notausgang Abstand 250m
0,5 – 0,7 km	Keine mech. Lüftung	0,30491	0,28700	0,26910	0,33094	0,31304	0,29513
0,5 – 1,5 km	Längslüftung	0,32711	0,29199	0,25687	0,38950	0,34075	0,29186
1,5 – 3,0 km	Längslüftung mit Punktabsaugung	0,33847	0,30047	0,26272	0,37692	0,32806	0,28004
> 3,0 km	Querlüftung	0,24372	0,23926	0,23482	0,27834	0,26106	0,24355

Tabelle 54: Schadensausmaßäquivalent für GV-Tunnels, geringe Stauhäufigkeit für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell⁹²

Längenbereich	Lüftung	Schadensausmaßäquivalent S					
		jDTV < 10.000 Kfz/Tag			jDTV > 10.000 Kfz/Tag		
		Ohne Notausgang	Notausgang Abstand 500m	Notausgang Abstand 250m	Ohne Notausgang	Notausgang Abstand 500m	Notausgang Abstand 250m
0,5 – 0,7 km	Keine mech. Lüftung	0,30517	0,28720	0,26930	0,33114	0,31323	0,29533
0,5 – 1,5 km	Längslüftung	0,32798	0,29255	0,25712	0,39037	0,34131	0,29211
1,5 – 3,0 km	Längslüftung mit Punktabsaugung	0,33926	0,30098	0,26294	0,37771	0,32857	0,28027
> 3,0 km	Querlüftung	0,24386	0,23933	0,23487	0,27849	0,26114	0,24360

Tabelle 55: Schadensausmaßäquivalent für GV-Tunnels, mittlerer Stauhäufigkeit für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell⁹³

⁹² [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung – Seite 27

⁹³ [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung – Seite 27

Tunneltyp		LKW-Anteil			
		5%	20%	30%	
		Korrekturfaktor [%]			
RV-Tunnel	Natürliche Lüftung	-8,5	0	+5,1	
	Längslüftung	-5,5	0	+3,1	
	Querlüftung	-5,2	0	+2,9	
GV-Tunnel < 10.000 Kfz/Tag	Ohne Notausgänge	Natürliche Lüftung	-44,7	0	+26,9
		Längslüftung	-44,4	0	+27,2
		Querlüftung	-39,4	0	+24,4
	Notausgänge alle 500m	Natürliche Lüftung	-42,1	0	+26,1
		Längslüftung	-41,9	0	+25,6
		Querlüftung	-39,8	0	+24,6
	Notausgänge alle 250m	Natürliche Lüftung	-39,7	0	+26,5
		Längslüftung	-38,9	0	+23,7
		Querlüftung	-40,3	0	+24,9
GV-Tunnel > 10.000 Kfz/Tag	Ohne Notausgänge	Natürliche Lüftung	-41,5	0	+25,7
		Längslüftung	-43,6	0	+26,5
		Querlüftung	-36,7	0	+22,7
	Notausgänge alle 500m	Natürliche Lüftung	-40,1	0	+24,8
		Längslüftung	-31,3	0	+25,4
		Querlüftung	-38,0	0	+23,5
	Notausgänge alle 250m	Natürliche Lüftung	-38,4	0	+23,8
		Längslüftung	-38,3	0	+23,5
		Querlüftung	-39,5	0	+24,4

Tabelle 56: Korrekturfaktor für abweichenden Schwerverkehrsanteil für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell⁹⁴

⁹⁴ [RVS 09.02.31] Grundlagen Tunnelausrüstung – Seite 28

LITERATURVERZEICHNIS

[ade 2005]; Academic dictionaries and encyclopedias. (2005, 12 04). *Academic dictionaries and encyclopedias - Gleinalmtunnel*. Retrieved 10 03, 2010, from <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/527419>

[Baum 2010]; baum, herbert; Kranz, Thomas; westerkamo Ulrich. (2010). *Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft .

[Bopp 2009]; Bopp, Rudolf; Gruner GmbH. (2009). *Verfahren für die genehmigung des Tunnel-Vorentwurfs - Sicherheitsbeurteilung Tunnel Judenburg*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

[Borgeest 2010]; Borgeest, Kai. (2010). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik - Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement* (2. ed.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

[Buchmann 2010]; Buchmann, Reto; Gehrig, Samuel. (2010). *Leackages in exhaust ducts of transverse ventilated road tunnels* (5 ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Zürich: Verlag der Technischen Universität Graz.

[Bures 2009]; Bures, Doris. (2009). *Österreichisches verkehrssicherheitsprogramm 2002-2010: strategien für mehrverkehrssicherheit auf der Straße* (3 ed.). (I. u. bmvit - Bundesministerium für Verkehr, Ed.) Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

[C.Kaiser 2010]; Kaiser, Christian. (2010). *From the classical fire-fighting water supply to structure and smoke-gas cooling, taking the "Gleinalm Tunnel" as an example; part I* (5 ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Judendorf-Straßengel: Verlag der Technischen Universität Graz.

[CISCO 2010]; CISCO Systems Inc. (2010). *CISCO Systems Inc. - Internetworking Technology Handbook*. Retrieved 10 5, 2010, from http://www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/technology/handbook/ito_doc.html

[Dankmeier 2006]; Dankmeier, Wilfried. (2006). *Grundkurs Codierung, Verschlüsselung, Kompression, Fehlerbeseitigung* (3. ed.). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

[EtherCAT 2010]; EtherCAT Technology Group. (2010). *EtherCAT Technology Group*. Retrieved 10 5, 2010, from Technical Instruction and Overview: <http://www.ethercat.org/en/technology.html>

[Gruber 2010]; Gruber, M.; Ruhdorfer, G. (2010). *Highway and tunnel control center S35 at Bruck/Mur and safety standard for tunnel along the S35 expressway* (5 ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.

[H.Kern 2010]; Kern, Helmut. (2010). *From the classical fire-fighting water supply to structure and smoke-gas cooling, taking the "Gleinalm Tunnel" as an example; part II* (5 ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Linz: Verlag der Technischen Universität Graz.

[Herry Consult 2008]; Herry Consult GmbH; Ference, Damian; Feßl, Thomas; Kummer, Sebastian; riebemeier, Brigitta; Sedlacek, Norbert; Stefan, Christian; Sudy, Irene; Winklbauer, Martin. (2008). *Unfallkostenrechnung 2007 unter Berücksichtigung des menschlichen Leids (Willingness to Pay)*. wien, Österreich: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

[HMS 2010]; HMS Industrial Networks. (2010). *HMS Industrial Networks GmbH*. Retrieved 10 5, 2010, from Wegweiser für den schnellen Umstieg von Profibus auf Profinet: http://www.anybus.de/company/PDF/HMS_Whitepaper_Web.pdf

[IEEE 802.3z]; IEEE Xplore. (2002, 08 06). *IEEE Xplore - Digital Library*. Retrieved 10 08, 2010, from http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=690946

[InfoArchiv 2004]; Informationsarchiv.net - Lexikon. (2004). *Informationsarchiv.net*. Retrieved 10 07, 2010, from <http://www.informationsarchiv.net/lexikon/eintrag/425>

[ITWissen 2010]; IT Wissen - Onlinelexikon. (2010). *IT Wissen - Das Große Online-Lexikon für Informationstechnologie*. Retrieved 10 5, 2010, from Ethernet-POWERLINK:

<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Ethernet-powerlink-EPL-Ethernet-Powerlink.html>

[Kopetz 2001]; Kopetz, Hermann. (2001). *Real-timesystems - Design Principles for Distributed Embedded Applications* (5. ed.). Boston: Kluwer Academic Publishers Group.

[Koudelka 2004]; Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Koudelka, Otto; Dr. Birnbacher, Ulla. (2004). *Nachrichtentechnik*. Graz: Institut für Kommunikationsnetze und Satellitenkommunikation TU-Graz; Skriptenreferat HTU-Graz.

[Kowalk 2010]; Prof. Dr. Kowalk, W.; Universität Oldenburg. (2002, 03 19). *Rechnernetze*. Retrieved 10 05, 2010, from Signalkodierung: <http://einstein.informatik.uni-oldenburg.de/rechnernetze/signalko.htm>

[Metelka 1997]; Metelka; Cerwenka; Riebesmeier. (1997). *Österreichische Unfallkosten- und Verkehrssicherheitsrechnung Straße*. Wien: Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr; Arbeitsgruppe Unfallkostenrechnung; Verkehrswesen Band 97.

[Modiri 2010]; Modiri, Navid; Noferesti, Zainab. (2010). *Tehran Resalat Tunnel Innovation* (5 ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Iran: Verlag der Technischen Universität Graz.

[ÖAMTC 2005]; ÖAMTC - Tunnelsicherheit spielerisch lernen. (2005, 06 15). *ÖAMTC - Tunnelsicherheit spielerisch lernen*. Retrieved 10 03, 2010, from http://www.oamtc.at/index.php?type=article&id=1115490&menu_active=144

[OECD 1997]; Organisation for economic co-operation and development. (1997). *road safety principles and models: review of descriptive, predictive, risk and accident consequence models* (Vol. ROAD TRANSPORT RESEARCH). paris: Head of Publications Service, OECD, 2 rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

[Prytz 2008]; Prytz, Gunnar. (2008). *A performance analysis of EtherCAT and PROFINET IRT*. Hamburg: Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).

[RFID Basis 2009]; RFID Basis. (2009). *RFID Basis - Das RFID-Informations-Portal*. Retrieved 10 08, 2010, from <http://www.rfid-basis.de/datenuebertragung.html>

[RFID LS 2010]; Völkl, Georg; RFID Library Systems. (2010). *RFID Library Systems*. Retrieved 11 19, 2010, from RFID Betriebsarten: <http://ilchag.com/page13.html>

[Robatsch 2004]; Dipl.-Ing. Robatsch, Klaus; Cand.-Ing. Nussbaumer, Cornelia. (2004). *Tunnels mit Gegenverkehr und Richtungsverkehr - Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit anderen Straßenarten; Tunnels with Uni- and Bi-directional traffic - Comparison of traffic safety in tunnels with other road categories*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Straßenforschung Heft 539.

[Robatsch 2005]; Dipl.-Ing. Robatsch, Klaus; Dipl.-Ing. Nussbaumer, Cornelia. (2005). *Sicherheitsvergleich von Tunnels – Verkehrssicherheitsvergleich von Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr mit anderen Straßenarten; Comparative Analysis of Safety in Tunnels – Comparison of Traffic safety in tunnels with bi-direction*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie; Straßenforschung Heft 552.

[RVS 03.03.23]; Dipl.-Ing. Müller, Hans. (1997). *Trassierung; RVS 03.03.23*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr.

[RVS 09.01.21]; Dipl.-Ing. Eberl, Leitner; Dipl.-Ing. Fraccaro, Siegmund; Dipl.-Ing. Hörhan, Rudolf; Dipl.-Ing. Kronawetter, Edmund; Dipl.-Ing. Leitner, Andreas; Dipl.-Ing. Plöderl, Roman; Dipl.-Ing.Dr. Weninger-Vycudil, Alfred; Dipl.-Ing. Zacke, Ernst. (2010). *Linienführung im Tunnel; RVS 09.01.21*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr.

[RVS 09.02.22]; Dipl.-Ing. Hesse, Manfred. (2002). *Projektierungsrichtlinien: Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, Tunnelausrüstung, RVS 09.02.22*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr.

[RVS 09.02.31]; Dipl.-Ing. Hörhan, Rudolf; Dipl.-Ing. Hoyer, Katharina; Dipl.-Ing. Kohl, Bernhard; Dipl.-Ing. Dr. Lechner, Guntram. (2008). *Grundlagen Tunnelausrüstung; RVS 09.02.31*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr.

[RVS 09.03.11]; Dipl.-Ing. Hörhan, Rudolf; Dipl.-Ing. Hoyer, Katharina; Dipl.-Ing. Kohl, Bernhard; Dipl.-Ing. Dr. Lechner, Guntram. (2009). *Tunnel-Risikoanalysemodell; RVS 09.03.11*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft, Straße, Schiene, Verkehr.

[Schedl 2010]; Dipl. Ing. Schedl, Alois. (2010). *Austrian Tunnel Safety Initiative - Status and Outlook* (5. ed., Vols. 5th Symposium - Tunnel Safety and Ventilation). Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.

[Shalunov 2005]; Shalunov, Stanislav; Carlson, Richard. (2005). *Detecting Duplex Mismatch on Ethernet* (Vol. Passive and active network measurement: 6th international workshop). (C. D. Atlanta, Ed.) Boston, MA, USA: Springer.

[Sommer 2007]; Sommer, Heini; Brügger, Othmar; Lieb, Christoph; Niemann, Steffen. (2007). *Volkswirtschaftliche Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz: Strassenverkehr, Sport, Haus und Freizeit* (Vol. 58). (B. f. (bfu), Ed.) Bern, Schweiz: Budenberg Druck- und Verlags-AG.

[Sporer 2010]; BSc Sporer, Harald. (2010). *Echtzeitkommunikation im Bereich virtueller Motorenprüfstände*. Graz: Institut für Technische Informatik TU-Graz.

[SVZ 2000]; STATISTIK AUSTRIA; Rudlof, Manfred. (2002). *Straßenverkehrszählung 2000*. Wien: Verlag Österreich GmbH.

[Welte 2008]; Dipl. El.Ing. ETH/SIA Welte, Urs. (2008). *Umweltverträglichkeitsprüfung S10 Mühlviertler Schnellstraße: teilgutachten - Nr. 15: Tunnelsicherheit*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.

[Wiki_1 2010]; Wikipedia. (2010, 09 18). *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. Retrieved 10 08, 2010, from Dämpfung: <http://de.wikipedia.org/wiki/D%C3%A4mpfung>

[Wiki_2 2010]; Wikipedia. (2010, 10 8). *Wikipedia - Die freie Enzyklopädie*. Retrieved 10 09, 2010, from Tauerntunnel (Autobahn): [http://de.wikipedia.org/wiki/Tauerntunnel_\(Autobahn\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Tauerntunnel_(Autobahn))

[Zinecker 2006]; Zinecker, Robert. (2006). *Untersuchungen zu technischen Radbedingungen beim Einsatz von RFID zur Identifikation von Getränkemehrwegkästen*.

berlin: technische Fachhochschule Berlin - Fachbereich Wirtschafts- und Gesellschaftswissenschaften, Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen, Fachrichtung Maschinenbau.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vergleich der Unfälle mit Personenschaden 1999-2003 (Absolutzahlen)	7
Abbildung 2: Unfallrelativzahlen zwischen 1999-2003	10
Abbildung 3: Vergleich der Verletzungsschwere auf unterschiedlichen Straßenarten	12
Abbildung 4: Vergleich der Verletzungsschwere in Verkehrstunnels	13
Abbildung 5: Vergleich der Jahresunfallzahlen und Jahresverunglückten	14
Abbildung 6: Vergleich von Unfalltypen zwischen Tunnels und dem Autobahnnetz	16
Abbildung 7: Vergleich von Unfallrelativzahlen in Verkehrstunnels	18
Abbildung 8: Unfalltypen nach Ausgangspunkt in Tunnels mit Gegenverkehr und Tunnels mit Richtungsverkehr	22
Abbildung 9: Ursache und Ausgangspunkt von Tunnelunfällen	26
Abbildung 10: Ereignisbaum	31
Abbildung 11: Einstufung der Gefährdungsklasse anhand der jDTV	54
Abbildung 12: Minimal benötigte Abtastfrequenz der Lichtschranken in Hz bei gegebenem Abstand	65
Abbildung 13: Anzahl der Fahrzeuge bis es zu einer Überschneidung bei maximalem und normalem Verkehrsaufkommen kommt.	72
Abbildung 14: Signalelemente Autobahntunnel	77
Abbildung 15: Signalelemente Tunnelportal	78
Abbildung 16: ObjectIf - Use-Case-Diagramm	83
Abbildung 17: Zustandsdiagramm	84
Abbildung 18: Aktivitätendiagramm Main-control	86
Abbildung 19: Aktivitätendiagramm Call-Component	86
Abbildung 20: Klassendiagramm	89
Abbildung 21: Graphische Benutzeroberfläche, aktuelle Werte der Ein- und Ausgabemodule	90
Abbildung 22: Vergleich von Übertragungsverfahren	96
Abbildung 23: EtherCAT Frame	100
Abbildung 24: POWERLINK Basis-Frame	101
Abbildung 25: Übertragungszyklus von PROFINET IRT	102
Abbildung 26: Minimale Zykluszeit für 100 Stationen mit einem Abstand von je 50 Metern in Abhängigkeit vom verwendeten Bussystem	110

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Vergleich der Unfälle mit Personenschaden 1999-2003 (Absolutzahlen)	7
Tabelle 2: Unfallrelativzahlen für 1999-2003	9
Tabelle 3: Vergleich der Verletzungsschwere zwischen 1999-2003	11
Tabelle 4: Vergleich der Verletzungsschwere in Tunnels zwischen 1999-2003	12
Tabelle 5: Vergleich von Unfällen und Verunglückten zwischen 1999-2003	14
Tabelle 6: Vergleich von Unfalltypen zwischen 1999-2003	16
Tabelle 7: Vergleich von Unfallrelativzahlen in Tunnels zwischen 1999-2003	17
Tabelle 8: Entwicklung der Tunnelunfälle zwischen 1999-2003	19
Tabelle 9: Entwicklung der Unfallrelativzahlen zwischen 1999-2003	20
Tabelle 10: Unfallrate und deren Ausgangspunkt der Unfälle zwischen 1999-2003	20
Tabelle 11: Unfalltypen nach Ausgangspunkt der Unfälle zwischen 1999-2003	21
Tabelle 12: Verschulden nach Verkehrsteilnehmer und Ausgangspunkt zwischen 1999-2003	23
Tabelle 13: Verschulden und Unfalltyp zwischen 1999-2003	24
Tabelle 14: Vollschild nach Fahrzeugarten zwischen 1999-2003	25
Tabelle 15: Ursache und Ausgangspunkt von Tunnelunfällen zwischen 1999-2003	25
Tabelle 16: Basiswert Unfallrate	32
Tabelle 17: Aufteilung der Unfallrate auf Unfalltypen	35
Tabelle 18: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen und Unfällen	36
Tabelle 19: Folgebrände bei Pannen und Unfällen	46
Tabelle 20: Gefahrgutbeteiligung	47
Tabelle 21: Personengefährdung bei Brand infolge einer Panne	48
Tabelle 22: Schadensausmaß	49
Tabelle 23: Risikoberechnung	50
Tabelle 24: U_R Basiswert für vereinfachtes Risikoanalysenmodell	52
Tabelle 25: Einteilung der Gefährdungsklassen	53
Tabelle 26: Ermittlung der minimalen Abtastfrequenz der Sensoren	64
Tabelle 27: Straßenverkehrszählung 2000	67
Tabelle 28: Stundendurchschnittliche Verkehrsstärke	68
Tabelle 29: Maximale und Minimale Sekundendurchschnittliche Verkehrsstärke	68
Tabelle 30: Fahrzeuge je Fahrspur pro Sekunde oder pro Fahrzeug	70
Tabelle 31: Abstand der einzelnen Fahrzeuge je Fahrspur und Verkehrsstärke	71
Tabelle 32: Anzahl an einfahrenden Fahrzeugen je Fahrspur bis es zu einer Überschneidung kommt	72
Tabelle 33: Allgemeine Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit	103
Tabelle 34: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für EtherCAT	104
Tabelle 35: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für POWERLINK	106
Tabelle 36: Abkürzungen und Werte zur Berechnung der minimalen Zykluszeit für PROFINET IRT	107

Tabelle 37: Ausgangssituation für den Tunnelvergleich	112
Tabelle 38: Schadensausmaßwert für mechanische Ereignisse	112
Tabelle 39: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse in Richtungsverkehr Tunnels ohne mechanische Lüftung	112
Tabelle 40: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse in Richtungsverkehr Tunnels mit mechanischer Lüftung	113
Tabelle 41: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 0,7 km Länge, keine mechanische Lüftung	113
Tabelle 42: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 0,7 km Länge, keine mechanische Lüftung	113
Tabelle 43: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 0,7 km Länge, Längslüftung	114
Tabelle 44: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 0,7 km Länge, Längslüftung	114
Tabelle 45: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normalen Verkehrsverhältnisse, 1,5 km Länge, Längslüftung	114
Tabelle 46: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 1,5 km Länge, Längslüftung	114
Tabelle 47: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 3,0 km Länge, Längslüftung mit Punktabsaugung	115
Tabelle 48: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 3,0 km Länge, Längslüftung mit Punktabsaugung	115
Tabelle 49: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normale Verkehrsverhältnisse, 5,0 km Länge, Querlüftung	115
Tabelle 50: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 5,0 km Länge, Querlüftung	115
Tabelle 51: Schadensausmaß für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, normalen Verkehrsverhältnisse, 7,0 km Länge, Querlüftung	116
Tabelle 52: Zusätzliches Schadensausmaß bei Stau für Brand- und Gefahrgutereignisse bei Gegenverkehr Tunnels, 7,0 km Länge, Querlüftung	116
Tabelle 53: Schadensausmaßäquivalent für Richtungsverkehrstunnels für das vereinfachte Risikoanalysemodell	116
Tabelle 54: Schadensausmaßäquivalent für GV-Tunnels, geringe Stauhäufigkeit für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell	117
Tabelle 55: Schadensausmaßäquivalent für GV-Tunnels, mittlerer Stauhäufigkeit für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell	117
Tabelle 56: Korrekturfaktor für abweichenden Schwerverkehrsanteil für das vereinfachte Tunnelrisikoanalysemodell	118

FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Fahrleistung	3
Formel 2: Unfallrate.....	4
Formel 3: Verunglückungsrate.....	4
Formel 4: Getötetenrate	4
Formel 5: Beteiligungsrate.....	5
Formel 6: Unfallkostenrate	5
Formel 7: Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Richtungsverkehr	33
Formel 8: Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Gegenverkehr	33
Formel 9: Korrekturfaktor Tunnellänge	33
Formel 10: Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Richtungsverkehr.....	34
Formel 11: Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Gegenverkehr	34
Formel 12: Fahrzeugbeteiligung bei Pannen.....	36
Formel 13: Fahrzeugbeteiligung bei Alleinunfällen	37
Formel 14: Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen im Richtungsverkehr	37
Formel 15: Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen im Gegenverkehr.....	37
Formel 16: Schadensausmaß eines Brandes infolge einer Panne.....	39
Formel 17: Schadensausmaß bei Alleinunfällen ohne Folgebrand	39
Formel 18: Schadensausmaß bei Alleinunfällen mit Folgebrand	39
Formel 19: Schadensausmaß bei LKW – Alleinunfällen und Gefahrgutaustritt.....	39
Formel 20: Schadensausmaß bei LKW – Alleinunfällen, Folgebrand und Gefahrgutaustritt	39
Formel 21: Schadensausmaß bei Unfällen mit Richtungsverkehr ohne Folgebrand oder Gefahrgutaustritt	39
Formel 22: Schadensausmaß bei Unfällen mit Richtungsverkehr mit Folgebrand oder Gefahrgutaustritt	40
Formel 23: Schadensausmaß bei LKW-Unfällen im Richtungsverkehr ohne Folgebrand mit Gefahrgutaustritt.....	40
Formel 24: Schadensausmaß bei LKW-Unfällen im Richtungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgutaustritt	40
Formel 25: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr ohne Folgebrand und ohne Gefahrgutaustritt	40
Formel 26: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr mit Folgebrand ohne Gefahrgutaustritt	40
Formel 27: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr ohne Folgebrand mit Gefahrgutaustritt.....	40
Formel 28: Schadensausmaß bei Unfällen mit dem Begegnungsverkehr mit Folgebrand und Gefahrgutaustritt	41
Formel 29: Häufigkeitsäquivalent des vereinfachten Risikoanalysemodells	51
Formel 30: Risikoäquivalentwert des vereinfachten Risikoanalysemodells	52
Formel 31: Zeitberechnung zur Ermittlung der Abtastfrequenz	63
Formel 32: Ermittlung der Abtastfrequenz	63
Formel 33: Stundendurchschnittliche Verkehrsstärke	67
Formel 34: Aufteilung der Verkehrsstärke auf zwei Spuren.....	69

Formel 35: Zeit bis zum Eintreffen eines Fahrzeuges je Fahrspur.....	70
Formel 36: Weg/Zeitfunktion zur Ermittlung der Überlagerungen	71
Formel 37: Verzögerung der Weiterleitung im EtherCAT Master	103
Formel 38: minimale Zykluszeit bei EtherCAT.....	103
Formel 39: Nutzdaten im Frame mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich.....	104
Formel 40: Header Daten im Frame mit nicht vollständig ausgefüllten Nutzdatenbereich	104
Formel 41: Anzahl der Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich.....	105
Formel 42: Zeit für die Weiterleitung eines Frames mit ausgefülltem Nutzdatenbereich	105
Formel 43: Zeit für die Weiterleitung des Frames mit nicht vollständig ausgefülltem Nutzdatenbereich	105
Formel 44: Verzögerung der Weiterleitung im POWERLINK Master	106
Formel 45: minimale Zykluszeit bei POWERLINK.....	106
Formel 46: Verzögerung der Weiterleitung im PROFINET IRT Master	107
Formel 47: minimale Zykluszeit bei PROFINET IRT	107

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
DE	Deutsch
EN	Englisch
z.B.	zum Beispiel
Kfz	Kraftfahrzeug
FL	Fahrleistung
Ur	Unfallrate
Vr	Verunglückungsrate
Gr	Getötetenrate
Br	Beteiligungsrate
UKr	Unfallkostenrate
UPS	Anzahl der Unfälle mit Personenschaden
jDTV	jahresdurchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
FSV	Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr
R	Risikoäquivalentwert
SA	Schadensausmaß
kHz	Kilohertz
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung (EN: PLC)
PLC	Programmable Logic Control (DE: SPS)
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSMA/CR	Carrier Sense Multiple Access/Collision Resolution
SEQ	Sequenzielles Übertragungsverfahren
FDX	Vollduplex-Verfahren
HDX	Halbduplex-Verfahren

STICHWORTVERZEICHNIS

A

Ablenkung	26, 27
Abstandsmessung	27
Abstellstreifen.....	57
Aktivitätendiagramm	84
Alleinunfall.....	17, 22, 24, 34
Auffahrunfall	22, 24
Aufpralldämpfern.....	28

B

Bandbreite.....	94
Basiswert Pannensrate.....	32
Basiswert Unfallrat	32
Baudrate.....	94
Beckhoff	82
Begegnungsunfall	13, 23, 24
Begegnungsverkehr	17
Berechenbarkeit	91
Bereifung	26
Beteiligungsrate	5
Bitrate	94
Bremsen	26
Bus Anteil	35
Busse.....	23, 25
Bussystem	91

C

Codierung	93
CSMA/CA	97
CSMA/CD	97
CSMA/CR	97

D

Dämpfung	93
defekt am Motor	26

E

Echtzeitsystem91
EL125282
Elementevorrat92
Entscheidungsgehalt92
Ereignisbaum29, 31
EtherCAT 82, 99, 103, 108

F

Fahrleistung3
Fahrstreifenbreite57
Fahrzeugbeteiligung35, 43
Fahrzeugbeteiligung bei Alleinunfällen37
Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen, Gegenverkehr37
Fahrzeugbeteiligung bei Unfällen, Richtungsverkehr37
Fast Ethernet98
Fehleinschätzung des Lenkers26, 27
Fehlverhalten beim Überholen26, 27
Fehlverhalten des Lenkers26, 27
Folgebrand38

G

Gefährdungsklassen50, 52, 53
Gefahrgutbeteiligung38, 47
Geschwindigkeit26
Geschwindigkeitsmessung27
Getötetenrate4
Gleichzeitigkeit91
graphische Benutzeroberfläche83, 87, 89
GUI 83, 87, 89

H

Halbduplexverfahren95
Häufigkeitsanalyse29
Häufigkeitsäquivalentwert51

I

Informationsgehalt92

K

Kanalkapazität	95
Korrekturfaktor Tunnellänge	33
Korrekturfaktor Unfallrate	33
Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Gegenverkehr	34
Korrekturfaktor Verflechtungsstrecke, Richtungsverkehr	34
Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Gegenverkehr	33
Korrekturfaktor Verkehrsleistung, Richtungsverkehr	33

L

Längsneigung	56
LKW	23
LKW-Anteil	35, 56
LKW-Lenker	25
L_{TU}	33
Lüftungsart	55

M

Mangelnde Wachsamkeit von Lenkern	26, 27
microTOOL GmbH	82
Motorräder	23

O

ObjectIf	82
----------------	----

P

Pannenbucht	57
Pannenrate	32
Personengefährdung	48
PKW	23
PKW-Anteil	35
PKW-Lenker	25
POWERLINK	100, 106, 109
PROFINET IRT	101, 107, 109

R

Rechtzeitigkeit	91
Richtungsunfall	16
Risikoanalyse	29

Stichwortverzeichnis

Risikoanalysemodell	29
Risikoanalysemodell - allgemein	29
Risikoanalysemodell - vereinfacht	51
Risikoäquivalent	52
Risikoäquivalentwert	41
Risikoberechnung	50
Ruhezeiten	28

S

Schadensausmaß	49
Schadensausmaßäquivalent	52
Schadensszenario	32, 38
sequenzielle Verfahren	95
Sicherheitsabstand	22, 26, 27
Signalanlagen	27
Sondertransporte	23
sonstige Verkehrsteilnehmer	23
Speicherprogrammierbare Steuerung	76, 87
SPS	76, 87
Spurhaltung	26, 27
Spurwechsel	22
Stauhäufigkeit	51
Steuerlogik	82
Straßenführung	26, 27

T

Tauerntunnel	19
Tunnel Einfahrtsbereich	20, 22, 23
Tunnel Portal	20, 23, 24, 26, 34
Tunnel Vor-/Nachlauf	20
Tunnellänge	55
Tunnelmitte	20, 22, 23
Tunnelsicherheit	3

U

Übermüdung	26, 27
Übertragungsfrequenz	94
Übertragungsverfahren	95
Unaufmerksamkeit	26, 27
Unfall mit dem Begegnungsverkehr	34
Unfall mit dem Richtungsverkehr	34

Stichwortverzeichnis

Unfallanalyse	29
Unfallkosten.....	5
Unfallkostenrate.....	5
Unfallort.....	22
Unfallrate	4, 32
Unfallrelativzahlen.....	3
Unfallverursacher.....	23, 24
Use-Case-Diagramm.....	82

V

Verbindungslose Übertragungsverfahren.....	97
Verbindungsorientierte Übertragungsverfahren.....	97
Verflechtungsstrecke	34
Verkehrsführung	55
Verkehrsteilnehmer.....	23
Verunglückungsrate	4
Vollduplexverfahren	95

W

Witterung	26, 27
-----------------	--------

Z

Zeichenvorrat	92
Zugriffsverfahren	97
Zustandsdiagramm.....	84
Zuverlässigkeit.....	91