

**Analyse und Risikobetrachtung
von Brandereignissen in
schienengebundenen ÖPNV-
Tunnelanlagen**

Im Auftrag des
Bundesministeriums für Verkehr,
Bau und Stadtentwicklung

Forschungsbericht FE-Nummer: FE 70.0788/2009/

Thema: Analyse und Risikobetrachtung
von Brandereignissen in
schienegebundenen ÖPNV-Tunnelanlagen

Projektleiter: Dr.-Ing. J. Schreyer (Projektleitung),
STUVAtec - Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen mbH - Köln
Mathias-Brüggen-Straße 41, 50827 Köln

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. C. Zulauf, Ernst Basler + Partner AG, Zollikon (CH)
Dipl.-Ing. D. Hahne, STUVAtec GmbH

STUVAtec GmbH, Köln und
Erst Basler + Partner AG, Zollikon (CH)

26. April 2010

Projektausschuss-Mitglieder:

Aschenbrenner, D. Branddirektor, Berufsfeuerwehr Dortmund

Eberhardt, W. Baudirektor Dipl.-Ing., TAB Regierung Mittelfranken

Ehret, S. Dipl.-Ing., BMVBS E 14

Fischer, O. Dipl.-Ing., VBG

Fleischhauer, A. VA, Dipl.-Ing., RP Darmstadt, TAB Hessen

Gerhardt, P.-H. BDir. Dipl.-Ing., Referat EW 14, BMVBW

Jost, W. Dipl.-Ing., Eisenbahn-Bundesamt

Kaufmann, K. Referent Notfallmanagement, Brandschutz, Deutsche Bahn AG

Könnecke, R. Dr.-Ing., I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH

Krämer, W. Dipl.-Ing., RP Darmstadt

Laska, P. Dipl.-Ing., Verkehrsgesellschaft Frankfurt/Main

Levin, Ch. Dr.-Ing., Betriebsleiter, HHA

Metz, O. Dipl.-Ing. (FH), Branddirektion Frankfurt

Ortmann, St. Dipl.-Ing., Feuerwehr Hamburg

Otto, W. Dipl.-Ing., Betriebsleiter der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)

Reuter, K.-H. Dipl.-Ing., Stadtwerke München

Ries, R. Prof. Dipl.-Ing. Direktor, Branddirektion Frankfurt

Rüffer, M. Betriebsleiter, Verkehrsgesellschaft Frankfurt/Main

Ruhs, A. Dipl.-Ing., Branddirektion Frankfurt

Schlich, Ch. Dipl.-Ing., Berufsfeuerwehr Düsseldorf

Sistenich, Ch. Dipl.-Ing., BAST

Sladek, H. Dipl.-Ing., Fachbereichsleiter, VDV

Spronk, A. Dipl.-Ing., DST (Stadt Duisburg)

Stahlberg, U. Dipl.-Ing., Fachbereichsleiter, VDV

Wiegers, H. Dipl.-Ing., TAB Hamburg

Yurdakul, O. Dipl.-Ing., TAB Berlin

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Einleitung	8
2	Ziel	9
3	Fahrzeugbrände in Personenverkehrsanlagen des schienegebundenen ÖPNV	10
3.1	Brände in ÖPNV-Tunneln im Ausland	10
3.2	Brände in ÖPNV-Tunneln in Deutschland	12
3.3	Auswertung des Fragebogens	13
3.3.1.	Allgemeines	13
3.3.2.	Anzahl der Brandereignisse und Brandtyp	14
3.3.3.	Brandort	15
3.3.4.	Brandursache	16
3.3.5.	Brandstiftung	17
3.3.6.	Technischer Defekt	17
3.3.7.	Sonstiges	21
3.3.8.	Personenschäden	21
3.3.9.	Sachschäden	21
3.3.10.	Zusammenfassung	22
4	Risikoanalyseverfahren	24
4.1	Grundlagen	24
4.2	Risikoanalyseverfahren im Ausland	26
4.2.1.	Vorbemerkung	26
4.2.2.	Angewandte Risikoanalyseverfahren im Ausland	26
4.2.3.	Fazit	42
4.3	Auswahl einer geeigneten Risikoanalyse	42
4.3.1.	Anforderungen	42
4.3.2.	Spektrum der Risikoanalysen	43

4.3.3.	Analysetiefgang	47
4.3.4.	Risikodarstellung und Risikobewertung	48
4.3.5.	Schlussfolgerungen	49
5	Ereignisbaumanalyse für Brandereignisse in Tunnelanlagen	50
5.1	Allgemeines	50
5.2	Brandrate und Initialereignis	52
5.3	Einflussgrößen zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisbaums	54
5.3.1.	Brandort	54
5.3.2.	Brandtyp	55
5.3.3.	Brandentwicklung	56
5.3.4.	Personenanzahl	57
5.3.5.	Fluchtbeeinträchtigung	58
5.4	Schadensausmaßklassen	61
5.5	Grenzkosten	63
5.5.1.	Allgemeines	63
5.5.2.	Recherchen zu Grenzkosten	64
5.5.3.	Empfehlungen für die Höhe von Grenzkosten	69
6	Maßnahmenplanung auf Basis einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung	71
6.1	Grundlagen	71
6.2	Vorgehensweise	74
7	Anwendungsbeispiel	76
7.1	Allgemeines	76
7.2	Ausgangssituation	76
7.3	Sensitivitätsanalyse	84

7.4	Untersuchung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen mittels Kosten- Wirksamkeits-Analyse	87
7.4.1.	Zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“	87
7.4.2.	Zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „Löschsysteme in den Zügen“	91
8	Zusammenfassung und Empfehlungen	96
8.1	Zusammenfassung	96
8.2	Empfehlungen	98
9	Literatur	102
10	Glossar	108
Anhang 1: Fragebogen zur Erfassung von Brandereignissen in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV		111
Anhang 2: Ergebnistabelle der Fragebogenaktion		117
Anhang 3: Bewertung risikobasierter Methoden		119

1 Einleitung

Im Forschungsvorhaben „Notfallszenarien“ [1] wurden für unterirdische Haltestellen des schienengebundenen ÖPNV erstmals Grundlagen für einen einheitlichen Sicherheitsstandard in Deutschland bei Brandereignissen erarbeitet. Der erforderliche anlagentechnische und bauliche Brandschutz für unterirdische Personenverkehrsanlagen des schienengebundenen ÖPNV wird in erster Linie mit Evakuierungs- und Brandsimulations-Berechnungen festgelegt. Ein ausreichender Brandschutz ist z.B. gegeben, wenn die ermittelte Evakuierungszeit kürzer ist als die Verrauchungszeit. Eine unterirdische Haltestelle gilt als verraucht, wenn in der Brandsimulation definierte Grenzwerte (z.B. Mindestsichtweite) in der raucharmen Schichtdicke nicht mehr eingehalten werden. Diese Nachweisführung wurde bislang ohne systematische Risikobetrachtung durchgeführt, da in den letzten Jahren der Brandschutz für unterirdische Verkehrsanlagen (Neuanlagen und Bestand) des schienengebundenen ÖPNV maßnahmen- und nicht risikoorientiert dimensioniert worden ist.

Für den Bau und den Betrieb von schienengebundenen ÖPNV-Tunnelanlagen gelten in Deutschland die Vorschriften der BOStrab [2] bzw. bei der S-Bahn die Regelwerke der EBO [3] mit den nachgeordneten Vorschriften und Richtlinien. Sie bilden die Grundlage für die sicherheitstechnische Gestaltung von Anlagen und Zügen, enthalten aber keine Hinweise, wie Risikobetrachtungen durchgeführt werden sollen.

Wenn jedoch mit geeigneten Risikoanalysen für ausgewählte Szenarien das jeweilige Risiko abgeschätzt werden könnte, sind optimal an das Risiko angepasste Brandschutzmaßnahmen denkbar. Da derzeit keine verbindlichen Vorgaben zur Durchführung von Risikoanalysen für Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV und überdies in diesem Bereich nur wenige Erfahrungen vorliegen, kann ein solcher auch allgemein anerkannter Nachweis nur sehr schwer geführt werden.

Durch die geplanten detaillierten Risikobetrachtungen können die Szenarien identifiziert werden, die hinsichtlich der zu erwartenden Personen- und Sachschäden von Bedeutung sind. Hierdurch werden die notwendigen Grundlagen geschaffen, damit zukünftig gezielte Maßnahmen vorgeschlagen werden können, um solche Schäden besser als bisher zu vermeiden bzw. zumindest zu re-

duzieren. Dabei sind nicht nur die unmittelbar eingetretenen Schäden und die Kosten für deren Beseitigung zu betrachten, sondern auch mittel- und langfristige Folgen wie Schadensersatzansprüche, Einnahmenausfälle oder erhöhte Kosten beim Verkehrsunternehmen durch eingeschränkten Betrieb oder Ersatzverkehre und Einbußen beim Verkehrsunternehmen infolge des Imageschadens.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass Erkenntnisse über die konkrete Anwendung von Risikoanalysen und ihre zugehörigen Grenzen zur Beurteilung von Brandereignissen in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV nicht vorliegen und dass Risikoanalyseverfahren für den betrachteten Anwendungsfall dringend benötigt werden. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die im Rahmen der Forschungsarbeit beschriebene Risikoanalysemethode nicht in Konkurrenz zu Regelwerken (z.B. BOStrab) steht und diese auch nicht ersetzen soll.

2 Ziel

Vorrangiges Ziel der Untersuchung ist es, ein geeignetes Risikoanalyseverfahren auszuwählen und für den vorgesehenen Anwendungsfall an einem fiktiven Beispiel zu erläutern. Mit diesem Risikoanalyseverfahren sollen die beiden dominierenden Brandereignisse in ÖPNV-Personenverkehrsanlagen (Brandort: Haltestelle bzw. Streckentunnel) unter Berücksichtigung von Ereigniswahrscheinlichkeit und Abschätzung des Schadensausmaßes bewertet werden.

Im Ergebnis soll ein Verkehrsunternehmen mit Hilfe eines Risikoanalyseverfahrens beurteilen können, ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen verhältnismäßig sind oder nicht. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit auch dazu genutzt werden, um Empfehlungen zur Aufnahme von geeigneten Risikoanalyseverfahren in Regelwerken (z.B. TR Brandschutz) zu geben.

3 Fahrzeugbrände in Personenverkehrsanlagen des schienengebundenen ÖPNV

3.1 Brände in ÖPNV-Tunneln im Ausland

Es sollten ausschließlich Fahrzeugbrände und z.B. keine Kiosk- oder Papierkorbbrände in unterirdischen Haltestellen analysiert werden. Für den Zeitraum zwischen etwa 1970 und 2008 liegen Daten zu nennenswerten Bränden an Schienenfahrzeugen in Tunnelanlagen des ÖPNV im Ausland vor (Tabelle 1).

Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Auflistung nicht vollständig ist, da nicht zu allen Bränden Informationen vorliegen. Die 26 Brände von Schienenfahrzeugen in Tunnelanlagen des ÖPNV im Ausland über einen Zeitraum von nahezu 40 Jahren zeigen Folgendes (Tabelle 1):

(1) Brandort

12 brennende Züge erreichten noch die Haltestelle. 10 Züge blieben im Streckentunnel brennend liegen. Vier Züge gerieten in einer Abstellanlage in Brand.

Der hohe Anteil an Bränden im Streckentunnel kann eventuell damit erklärt werden, dass solche Brände zu vergleichsweise größeren Schäden führen, über die deshalb intensiv berichtet wird. Hingegen sind Fahrzeugbrände in Haltestellen für die Presse häufig weniger spektakulär.

(2) Brandursache

Bei der Brandursache können folgende Schwerpunkte festgestellt werden (Tabelle 1):

- a) Als Hauptbrandursache kann ein technischer Defekt der elektrischen Anlagen bezeichnet werden, da diese Ursache in 9 von 26 Fällen (ca. 35 %) angegeben wurde.
- b) Die nächsthäufigsten Ursachen für Brände waren technische Defekte der Stromabnehmer bzw. Stromschiene und Brandstiftungen mit jeweils vier Bränden.
- c) Mit jeweils drei Bränden folgen die Ursachen technischer Defekt der Triebfahrwerke und Unfälle.

Lfd.-Nr.	Jahr	Land	Brennender Zug steht in			Brandursache							Personenschäden		Sachschaden ca. [Mio. €]
			Haltestelle	Streckentunnel	Abstellanlage	Brandstiftung Zug	technischer Defekt					Unfall	Tote	Verletzte	
							Bremsen	Stromabnehmer/ Stromschiene	Triebfahrwerke	elektrische Anlagen	Hydraulik				
1	1971	Kanada			X							X	1	0	6
2	1974	Kanada		X				X					0	0	1,5
3	1974	USA		X					X				0	200	k.A.*
4	1975	USA		X				X					0	34	> 0,5
5	1976	Portugal	X					X					0	0	0,8
6	1976	Kanada	X			X							0	0	2,6
7	1979	USA		X				X					1	56	8,7
8	1979	USA	X							X			0	91	k.A.*
9	1979	USA			X								0	4	> 0,5
10	1979	USA	X			X							0	0	k.A.*
11	1980	Spanien		X						X			5	viele	k.A.*
12	1981	Russland	X							X			0	0	> 0,5
13	1982	USA		X				X					0	86	k.A.*
14	1982	USA			X								0	mehrere	k.A.*
15	1982	Großbritannien		X				X					0	15	0,4
16	1985	USA	X			X							0	15	> 2,5
17	1985	Mexiko	X							X			0	> 100	k.A.*
18	1991	Österreich			X					X			0	0	2,3
19	1995	Aserbeidschan		X						X			289	265	k.A.*
20	2003	Südkorea	X			X							196	147	k.A.*
21	2005	Schweden	X							X			0	13	k.A.*
22	2005	Frankreich	X							X			0	12	k.A.*
23	2006	Russland		X								X	0	0	k.A.*
24	2006	USA		X								X	0	150	k.A.*
25	2007	Frankreich	X				X						0	35	k.A.*
26	2008	Österreich	X								X		0	0	k.A.*
Summe			12	10	4	4	1	4	3	9	1	3	492	> 1076	

* k.A.: keine Angaben

Tabelle 1: Brandereignisse mit Schienenfahrzeugen im Ausland (Stadtbahnen, U-Bahnen) [1, 5 bis 12] (Auswahl)

(3) Schäden

Bei den Schäden wird zwischen Personen- und Sachschäden unterschieden (Tabelle 1):

a) Personenschäden

Bei den genannten Bränden in Tabelle 1 ist es insgesamt zu ca. 492 Todesopfern gekommen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass 485 Tote allein den beiden bisher schlimmsten U-Bahn-Unglücken überhaupt in Aserbaidschan und Südkorea zuzuordnen und ansonsten nur wenige Todesopfer zu beklagen sind.

Insgesamt ist es bei den 26 Bränden zu mehr als 1076 Verletzten gekommen, von denen alleine 265 Personen auf das Unglück in Aserbaidschan entfallen. Die restlichen mindestens ca. 811 verletzten Personen entfallen auf 16 Brände, da es bei 9 Ereignissen keine Verletzten gegeben hat. In der Regel handelt es sich bei den Verletzungen um den Verdacht auf Rauchvergiftung.

b) Sachschäden

Angaben zu Sachschäden liegen nur zu 11 der 26 Brände vor. Die Höhe variiert zwischen ca. 0,4 Mio. € und 8,7 Mio. €.

Aufgrund der anderen Sicherheitsbestimmungen und Fahrzeugausstattung können die Erkenntnisse aus dem Ausland nicht auf deutsche Verhältnisse übertragen werden.

3.2 Brände in ÖPNV-Tunneln in Deutschland

Für Deutschland liegen Angaben zu vereinzelt Fahrzeugbränden ab 1970 vor. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass in Deutschland anders als im Ausland bisher keine Todesopfer zu beklagen sind. Allerdings sind auch hier die Angaben zu den aufgetretenen Fahrzeugbränden nicht immer vollständig und daher nur wenig aussagekräftig. Um jedoch belastbare Angaben über z.B. Brandrate, Brandort und Brandtyp in Deutschland zu erhalten, war es erforderlich, die Brände mit Schienenfahrzeugen in ÖPNV-Tunnelanlagen der letzten zehn Jahre mit Hilfe eines Fragebogens zu erfassen und zu analysieren. Hier-

durch konnte eine verwertbare Grundlage für die geplante Risikoanalyse geschaffen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb insgesamt 18 deutsche Verkehrsunternehmen des ÖPNV und die DB AG angeschrieben und gebeten, einen speziellen Fragebogen auszufüllen (Anhang 1). Mit Hilfe dieses Fragebogens wurden Fahrzeugbrände der letzten 10 Jahre in Tunnelanlagen des ÖPNV, die Brandursachen und die entstandenen Personen- und Sachschäden infolge des Brandes erfasst. Unberücksichtigt jedoch blieben z.B. Imageschaden und Betriebsausfallkosten. Zu beachten ist, dass bedingt durch den technischen Fortschritt sowie die Weiterentwicklung in der Fahrzeugtechnik und im Brandschutz viele der erfassten Brandursachen zukünftig nicht so häufig bzw. gar nicht mehr auftreten werden. Beispielsweise werden durch die Fahrzeugleittechnik ausgelöste Abschaltungen, durch den Einsatz von Brandfrüherkennungssystemen oder Löschsystemen die Brandauswirkungen begrenzt bleiben. Dies gilt insbesondere für den als Hauptursache identifizierten Bereich „Elektrik“, in dem nennenswerte Verbesserungen in der frühzeitigen Erkennung und Abschaltung von Zündquellen oder thermischen Überlastungen als auch im Brandschutz in den letzten Jahren erreicht worden sind.

Mit Hilfe der Angaben aus dem Fragebogen (Anhang 1) kann eine mittlere Brandrate [Brände pro Mio. Zug-Kilometer im Tunnel] ermittelt werden, aus der sich die Häufigkeit des Initialereignisses [Zugbrände auf einem Tunnelabschnitt pro Jahr] errechnen lässt, die als Eingangsgröße für eine quantitative Risikoanalyse benötigt wird. Ferner werden die Brandereignisse mit Hilfe festgelegter Merkmale (z.B. Brandtyp, Brandort) kategorisiert. Diese Kategorien dienen im weiteren Verlauf als Orientierung an den Verzweigungspunkten des Ereignisbaums (Kapitel 5).

3.3 Auswertung des Fragebogens

3.3.1 Allgemeines

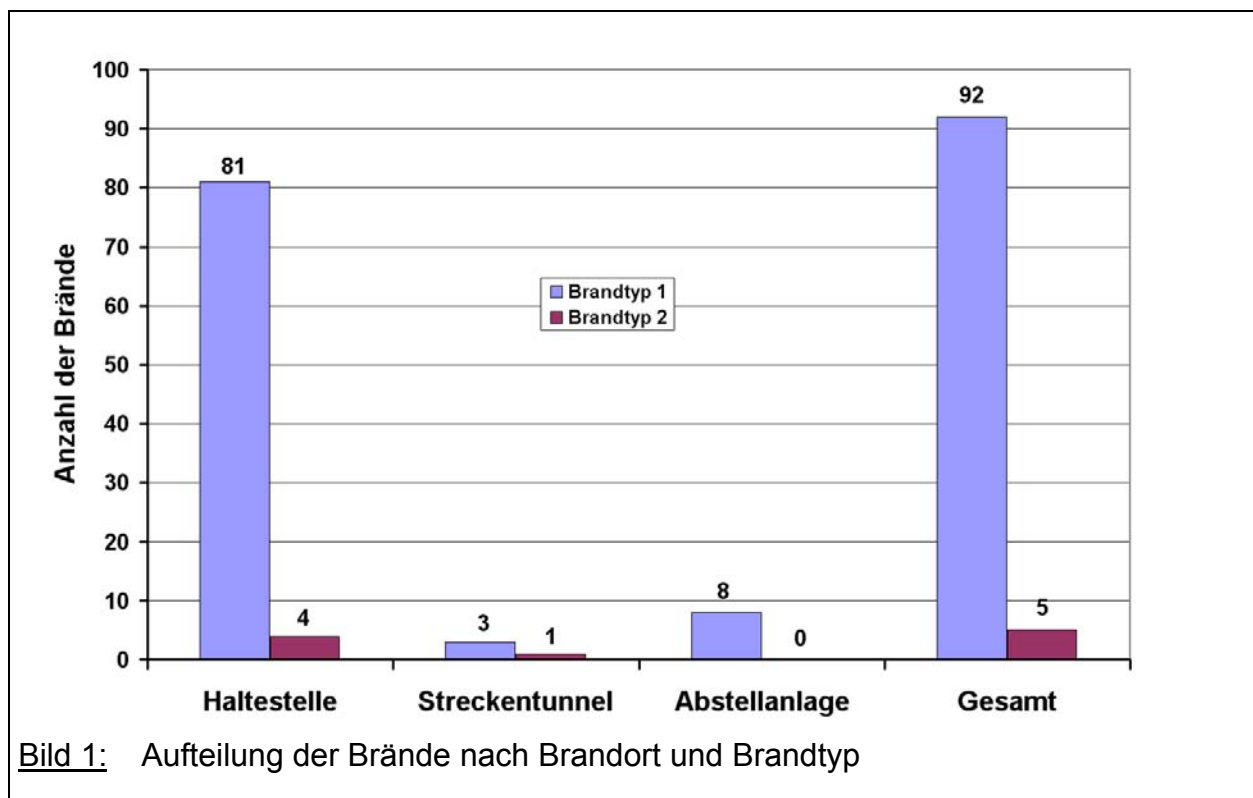
Aus den vorliegenden Fragebögen geht hervor, dass die 18 ÖPNV-Unternehmen und die DB AG insgesamt über ca. 966 km Tunnelanlagen mit 601 unterirdischen Haltestellen verfügen. Die Länge der Tunnelanlagen pro Be-

trieb reicht von ca. 0,5 km bis ca. 501 km, wobei 15 Verkehrsunternehmen über Tunnelanlagen mit einer Länge von jeweils weniger als ca. 30 km verfügen. Der mittlere Haltestellenabstand beträgt ca. 700 m und der längste Haltestellenabstand liegt bei ca. 4,8 km.

Insgesamt wurden im Jahr 2008 ca. 111.254.000 Zugkilometer im Tunnel zurückgelegt. Diese Zahl berücksichtigt nur die Angaben der 18 ÖPNV-Unternehmen. Die Fahrleistung der einzelnen Unternehmen im Tunnel pro Jahr variiert laut Angabe in den Fragebögen von ca. 45.500 Zugkilometern bis ca. 31.680.000 Zugkilometer.

3.3.2 Anzahl der Brandereignisse und Brandtyp

Den Fragebögen kann entnommen werden, dass es innerhalb der letzten zehn Jahre insgesamt 97 Brände gegeben hat (Anhang 2: Tabelle 1). Von diesen 97 Bränden entfällt die deutliche Mehrheit von 92 Bränden auf den Brandtyp I und nur fünf Ereignisse auf den Brandtyp II (Anhang 2: Tabelle 1) (Bild 1). Die beiden Brandtypen unterscheiden sich wie folgt:



(1) Brandtyp I

Lokale Branderscheinungen oder Brände, die anhand ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **keine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen (z. B. verschmorte Leitungen, Branderscheinungen in Gerätekisten).

(2) Brandtyp II

Brände, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **eine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen.

Die Gesamtzahl von 97 Bränden verteilt sich auf elf Verkehrsunternehmen (10 ÖPNV-Unternehmen und DB AG), da bei acht ÖPNV-Verkehrsunternehmen in den letzten zehn Jahren keine Brände aufgetreten sind.

3.3.3 Brandort

Beim Brandort wurden folgende drei Szenarien unterschieden:

(1) Szenario Nr. 1

Der brennende Zug steht in einer unterirdischen Haltestelle.

(2) Szenario Nr. 2

Der brennende Zug steht im Streckentunnel.

(3) Szenario Nr. 3

Der brennende Zug steht in einer unterirdischen Abstellanlage.

Auch beim Brandort kann eine große Mehrheit der Brände einem speziellen Szenario zugeordnet werden (Anhang 2: Tabelle 1) (Bild 1):

(1) Fahrzeugbrände der 18 ÖPNV-Verkehrsunternehmen und der DB AG insgesamt: 97 Brände

(2) Davon entfallen auf:

a) Szenario Nr. 1 (Haltestelle): 85 Brände (Brandtyp I und II)

b) Szenario Nr. 2 (Streckentunnel): 4 Brände (Brandtyp I und II)

c) Szenario Nr. 3 (Abstellanlage): 8 Brände (nur Brandtyp I)

Obwohl die Züge mit einer Notbremsüberbrückung ausgestattet sind und die Anweisung an den Zugführer besteht, im Brandfall nach Möglichkeit immer die nächste Haltestelle anzufahren bzw. den Tunnel zu verlassen, ergab die Fragebogenaktion, dass in einzelnen Fällen brennende Züge im Streckentunnel liegen bleiben. Ursache hierfür war unter anderem:

- (1) Durch den Brand wurde der Hauptschalter zerstört, wodurch der Zug nicht weiterfahren konnte.
- (2) Die Brandereignisse waren mit Überschlägen verbunden, die weitere Schäden am Zug verursachten (z.B. Beschädigung der Luftleitung für die Bremse), so dass die Züge im Streckentunnel stehen blieben.

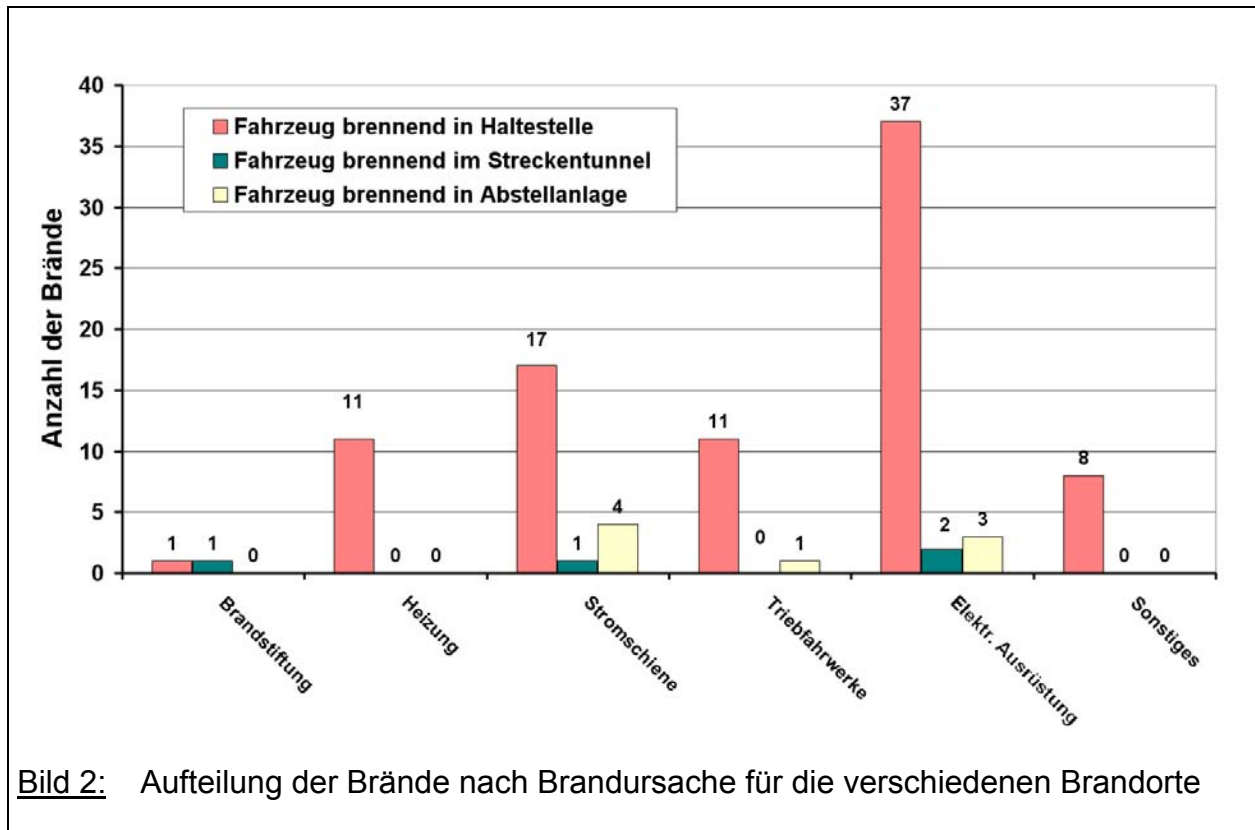
Bei allen vier Zügen, die im Streckentunnel liegengeblieben sind, wurde dies somit jeweils durch einen technischen Defekt im Zusammenhang mit dem Brandereignis verursacht und nicht aus betrieblichen Gründen (z.B. Signal „Rot“). Soweit möglich wurden die identifizierten technischen Schwachstellen mittlerweile behoben und sind somit nicht mehr existent.

3.3.4 Brandursache

Die Brandursachen der von den 18 ÖPNV-Verkehrsunternehmen und der DB AG gemeldeten Brände lassen sich in drei Hauptgruppen einteilen (vergleiche (1) bis (3)), wobei die Brandursache „technische Defekte“ noch fünf Untergruppen besitzt (Bild 2):

- (1) Brandstiftung
- (2) technischer Defekt
 - a) Heizung
 - b) Stromabnehmer / Stromschiene
 - c) Triebfahrwerk
 - d) Elektrische Ausrüstung
 - e) Hydraulik
- (3) Sonstiges

Die Verteilung der Brände auf die Brandursachen ist Bild 2 direkt zu entnehmen.



3.3.5 Brandstiftung

Insgesamt können zwei Brände auf Brandstiftung zurückgeführt werden (Anhang 2: Tabelle 1) (Bild 2). Ein Brand hiervon führte dazu, dass ein Zug im Streckentunnel liegen blieb (Szenario Nr. 2). In diesem Fall war ein Pullover entzündet worden, der in einen Faltenbalg geworfen wurde und diesen entzündete. Im anderen Fall, bei dem Zeitungen angezündet wurden, erreichte der Zug noch die nächste Haltestelle (Szenario Nr. 1). Die beiden Brandereignisse können dem Brandtyp I zugeordnet werden (Anhang 2: Tabelle 1).

3.3.6 Technischer Defekt

Bei den technischen Defekten wird als Brandursache in den Fragebögen der 18 ÖPNV-Verkehrsunternehmen und der DB AG zwischen folgenden fünf Bereichen unterschieden:

(1) Heizung

Die Heizungsanlage war in 11 Fällen die Ursache für die Brände (Anhang 2: Tabelle 1) (Bild 2). Bei allen 11 Bränden konnten die Züge noch die nächste

Haltestelle erreichen (Szenario Nr. 1). Ferner können alle Brände dem Brandtyp I zugeordnet werden (Anhang 2: Tabelle 1).

Zu zwei Bränden mit der Brandursache „Heizung“ können nähere Angaben gemacht werden. So waren einmal eine defekte Heizplatte und im anderen Fall defekte Radialventilatoren verantwortlich für die Brandentstehung.

(2) Stromabnehmer / Stromschiene

In 22 Fällen führten die Stromabnehmer bzw. die Stromschienen zu Bränden (Bild 2). Die Mehrzahl der Züge (17 Stück) konnte noch die nächste Haltestelle erreichen (Szenario Nr. 1) und nur vier Züge befanden sich in einer Abstellanlage (Szenario Nr. 3). Bei einem Brandereignis mit der Brandursache „Stromabnehmer / Stromschiene“ blieb der brennende Zug im Streckentunnel liegen (Szenario Nr. 2). In zwei Fällen führte das Brandereignis, ausgelöst durch die Stromschiene bzw. den Stromabnehmer, zu einem Brand des Typs II (einmal Szenario Nr. 1 und einmal Szenario Nr. 2). Der Sachschaden betrug in einem dieser Fälle ca. 2 Mio. € (Szenario Nr. 1). Die restlichen Brände können alle dem Brandtyp I zugeordnet werden (Anhang 2: Tabelle 1).

Bei einem Brand führte ein Defekt an der Oberleitung dazu, dass der Stromabnehmer abbrach und die stromführenden Teile mehrere Löcher ins Wagendach brannten (Szenario Nr. 1).

Hier ist zwischen Fahrdrabt- und Stromschieneneinspeisung zu unterscheiden. Durch die meist höhere Speiseleistung der Stromschiene sind hier höhere Kurzschlussenergien zu erwarten.

(3) Triebfahrwerk

Das Triebfahrwerk war bei insgesamt 12 Bränden die auslösende Ursache (Anhang 2: Tabelle 1) (Bild 2). Davon erreichten 11 Züge noch die nächste Haltestelle (Szenario Nr. 1) und ein Zug stand in einer Abstellanlage (Szenario Nr. 3). Ein Brandereignis mit der Brandursache „Triebfahrwerk“, bei dem der brennende Zug im Streckentunnel liegengeblieben ist (Szenario Nr. 2), ist nicht aufgetreten. In einem Fall führte diese Brandursache zu einem Brand des Typs II (Szenario Nr. 1). Bei allen anderen Bränden (11 Stück) handelt es sich um den Brandtyp I (Anhang 2: Tabelle 1).

Es können folgende nähere Angaben zur Brandursache „Triebfahrzeug“ genannt werden:

- a) festsitzende Mechanik einer Bremse
- b) defekter Fahrmotor
- c) lose Verklebung (stromführend)

Das Ereignis „Qualmen im Bereich der Bremsscheiben (nicht lösender Federspeicher)“ ohne tatsächlichen Brand blieb bei der Auswertung unberücksichtigt.

(4) Elektrische Ausrüstung

Die elektrische Ausrüstung kann in den letzten 10 Jahren als Hauptbrandursache bezeichnet werden, da insgesamt 42 Brände (ca. 43 %) diesem Bereich zugeordnet werden können (Bild 2). Auch bei dieser Brandursache erreichten die Züge in den meisten Fällen (37 Stück) noch die nächste Haltestelle (Szenario Nr. 1). Es blieben jedoch zwei Züge brennend im Tunnel liegen (Szenario Nr. 2) und drei Züge befanden sich in einer Abstellanlage (Szenario Nr. 3). Ferner können 40 Brände dem Typ I und zwei Brände dem Typ II zugeordnet werden (Anhang 2: Tabelle 1).

Zu den Bränden, die durch die elektrische Anlage ausgelöst wurden, können folgende weitergehende Aussagen gemacht werden:

a) Ursache

Es liegen zu einigen Brandfällen konkrete Angaben zur Brandursache „Elektrische Ausrüstung“ vor:

- Wackelkontakt parallel geschalteter Schütze
- Schmorbrand im Sicherungstableau
- Lichtbogen im Antriebsmotor
- defektes Schaltwerk
- elektrischer Umformer (750 V auf 230 V)
- Schütz gegen Masse durchgeschlagen (Lichtbogen entzündet Kabelisolierung)

- Widerstandsrahmen gegen Gerätekastendecke (Lichtbogen entzündet Kabelisolierung)
- defekte Schützbatterie
- defekte Drossel

b) Konsequenzen

Als störanfällig identifizierte Anlagenteile wurden verbessert, um diese Brandursache zukünftig ausschließen zu können, wie z.B.:

- Schützkontakte werden bei moderner Fahrzeugleittechnik weitgehend durch kontaktlose Steuergeräte ersetzt.
- Es werden kontaktlos arbeitende, leistungselektronische Schaltungen (Stromrichter) für Antrieb und Hilfsbetrieb verwendet, wodurch kontaktbehaftete Schaltwalzen und rotierender Umformer ersetzt werden.
- Drehstrommotoren lösen kontaktbehaftete Gleichstrom-Reihenschlussmotoren ab.
- Die Fahrzeug-Software enthält elektrische Schutzmechanismen, die potentielle Zündquellen bei Überschreitung von Grenzwerten präventiv abschalten (z.B. Effektivstromschutz für Netzdrossel)
- Die Leistungselektronik ist durch Temperatursensoren überwacht und dadurch vor Überhitzung geschützt.

c) Schäden

Für fünf Brände mit der Ursache „elektrische Ausrüstung“ liegen Angaben über die Sachschadenhöhe vor. Die Werte reichen von ca. 20.000 € bis zu 5.000.000 € (Anhang 2: Tabelle 1).

(5) Hydraulik

Im Rahmen der erfassten Branderscheinungen wurde bei keinem Ereignis die Hydraulik als Brandursache identifiziert (Anhang 2: Tabelle 1).

3.3.7 Sonstiges

Insgesamt können acht Brandereignisse keiner der vorgenannten Brandursachen zugeordnet werden, sodass diese Ereignisse unter Sonstiges genannt werden (Bild 2). In allen acht Fällen sind die Züge bis zur nächsten Haltestelle gefahren (Szenario Nr. 1) (Bild 2) und können dem Typ I zugeordnet werden.

3.3.8 Personenschäden

Insgesamt ist es laut Fragebogenauswertung zu 52 Personenschäden bei 7 Fahrzeugbränden gekommen. Da davon ausgegangen werden muss, dass den Verkehrsunternehmen nicht alle Angaben über verletzte Personen vorliegen, wurde ergänzend hierzu eine Presserecherche durchgeführt. Diese Recherche führte zu folgenden Ergebnissen:

- (1) Einem Brandereignis konnten sieben Verletzte zugeordnet werden, die bisher noch nicht erfasst wurden.
- (2) In einem Fall war die Anzahl der Verletzten in der Presse größer als nach Angaben des Verkehrsunternehmens. In der Auswertung wurde die höhere Anzahl an Verletzten aus der Pressemitteilung berücksichtigt.

Damit ergeben sich insgesamt 71 Verletzte (Anhang 2: Tabelle 1).

Bis auf eine Person, die eine Beinfraktur erlitt, wurden alle 70 anderen Personen wegen Verdachts auf Rauchvergiftung medizinisch behandelt. In drei Fällen wurde mehr als eine Person verletzt. Bei einem von diesen Ereignissen gab es 30 Verletzte (Anhang 2: Tabelle 1).

3.3.9 Sachschäden

Es liegen nur Angaben über die Sachschadenhöhe von fünf Brandereignissen vor (Anhang 2: Tabelle 1). Hierbei reicht die Schadenhöhe von ca. 20.000 € bis ca. 150.000 € für Brände des Typs I und von ca. 250.000 € bis ca. 5 Mio. € für Brände des Typs II. In allen fünf Fällen erreichte der Zug jeweils die nächste Haltestelle (Szenario Nr. 1) (Anhang 2: Tabelle 1).

3.3.10 Zusammenfassung

Die nennenswerten Ergebnisse der Fragebogenaktion lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(1) Insgesamt wurden 97 Brände in den letzten 10 Jahren erfasst. Die Brände konnten den Brandtypen bzw. Brandorten wie folgt zugeordnet werden:

a) Brandtyp

- Brandtyp I: 92 Brände
- Brandtyp II: 5 Brände

Damit wird deutlich, dass es in nur ca. 5 % der Schienenfahrzeugbrände zu einem Brand des Typs II kommt.

b) Brandort

- Haltestelle: 85 Brände
- Streckentunnel: 4 Brände
- Abstellanlage: 8 Brände

Erwartungsgemäß kann die Haltestelle als Brandort der meisten Zugbrände identifiziert werden.

(2) Es wurden grundsätzlich sechs verschiedene Brandursachen angegeben, von denen die elektrische Ausrüstung als häufigste Ursache identifiziert wurde (Tabelle 2).

Brandursache	Brandanzahl
Brandstiftung	2
Heizung	11
Stromabnehmer / Stromschiene	22
Triebfahrzeug	12
Elektrische Ausrüstung	42
Hydraulik	0
Sonstiges	8
Summe	97

Tabelle 2: Aufteilung der mit dem Fragebogen erfassten Brände nach Brandursache

Hierbei ist zu beachten, dass bedingt durch den technischen Fortschritt viele der erfassten Brandursachen zukünftig nicht so häufig bzw. gar nicht mehr auftreten werden. Dies gilt insbesondere für die als Hauptbrandursache identifizierte Elektrik. Hier sind in den letzten Jahren nennenswerte Verbesserungen erreicht worden, so dass in den kommenden Jahren in diesem Bereich mit deutlich weniger Bränden zu rechnen ist.

Beispiele hierzu sind:

- Der Brandschutz für die im Fahrzeug verlegten Kabel ist durch die Umsetzung der Forderungen gemäß der VDE-Reihe 0260 deutlich verbessert worden.
- Die Brandursache „Untersitzheizgeräte“ wird es in Zukunft nicht mehr geben, da solche Heizgeräte auch aus Gründen der Geräuschkentwicklung und einer verbesserten Klimatisierung des Fahrgastraumes nicht mehr in die Fahrzeuge eingebaut werden.
- Auch werden zukünftig in den Fahrzeugen weniger kontaktbehaftete Schaltelemente und keine kontaktbehafteten Fahrmotoren mehr verwendet, was eine deutliche Reduzierung der Zündquelle „Schaltlichtbogen“ bewirkt.
- Darüber hinaus überwachen Temperatursensoren als auch Überwachungsmechanismen in der Fahrzeugleittechnik elektrische Einrichtungen und schalten diese bei hohen Temperaturen oder Überlastungen ab. Hierdurch wird ein Brand infolge Überhitzung von vornherein vermieden.
- Zusätzlich werden heute elektrische Gerätecontainer besser gekapselt, die Auswirkungen einer Zündquelle auf das Gesamtfahrzeug werden geringer.

(3) Schäden

Insgesamt hat es bei 8 der 97 Brände ca. 71 Verletzte gegeben. Häufig handelte es sich um Rauchvergiftungen. Angaben zu Sachschäden liegen nur von fünf Bränden vor. Je nach Brandtyp variiert die angegebene Schadenssumme von ca. 20.000 € bis ca. 5.000.000 €.

- (4) Aus den Ergebnissen der Fragebogenaktion können als Orientierungshilfe die Brandrate (Kapitel 5.2) und die Eintrittswahrscheinlichkeiten in zwei Verzweigungspunkten des Ereignisbaums genutzt werden (Kapitel 5.3)

Bei der Verwendung der Ergebnisse der Fragebogenaktion ist zu beachten, dass die erfassten Daten eine gewisse Unschärfe besitzen, da sie aufgrund der geringen Datenmenge nicht in allen Bereichen repräsentativ sind und nicht alle Brände ausnahmslos erfasst werden konnten.

4 Risikoanalyseverfahren

4.1 Grundlagen

Risikobasierte Verfahren zur Ermittlung, Bewertung und Beurteilung von Risiken bestehen aus mehreren Einzelschritten, die in drei Hauptbereiche zusammengefasst werden können (Bild 3):

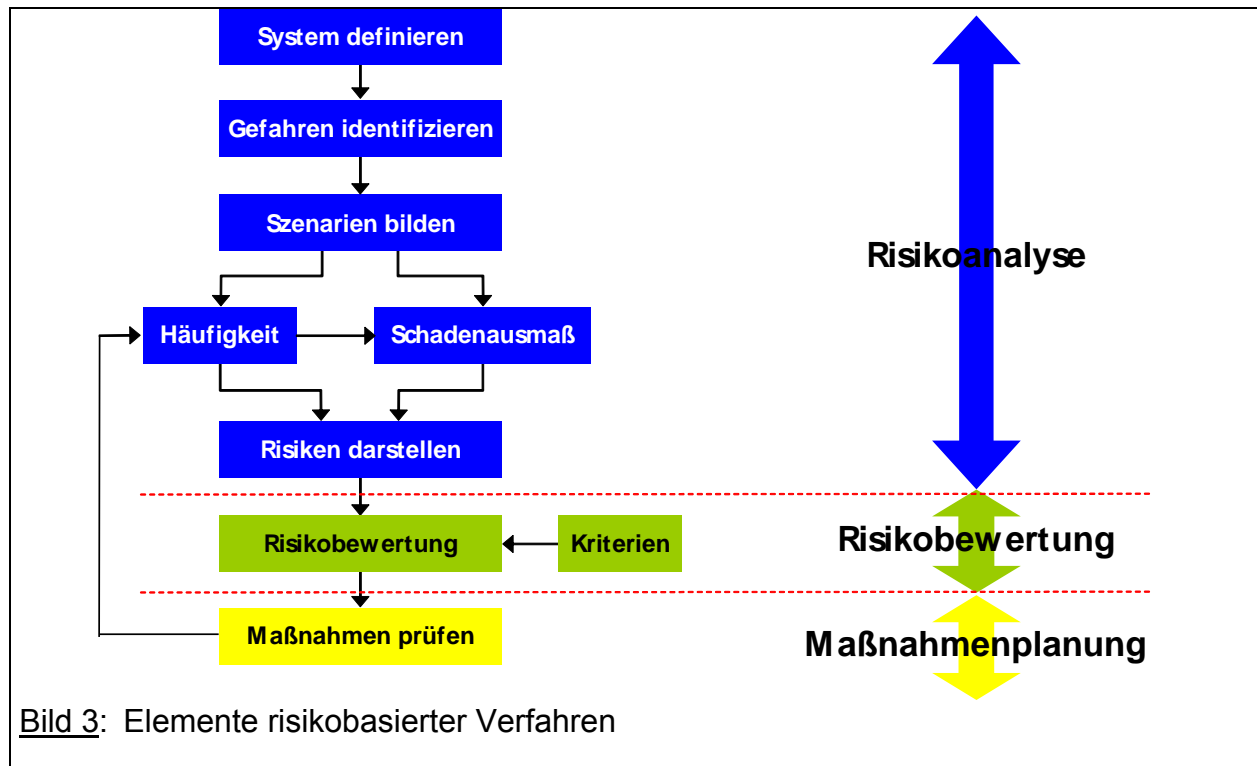
(1) Risikoanalyse

Die Risikoanalyse bildet die Basis risikobasierter Verfahren. Hierzu gehören folgende Elemente:

- a) System definieren: Im vorliegenden Anwendungsfall ist das System „der Betrieb der ÖPNV-Tunnelanlagen“. Streckenabschnitte im Freien werden nicht betrachtet.
- b) Gefahren identifizieren: Als Gefahr (Gefahrenpotenzial) kann das mit brennbarem Material ausgestattete Schienenfahrzeug identifiziert werden.
- c) Szenarien bilden: Es müssen für unterschiedliche Gegebenheiten verschiedene Szenarien gebildet und nachfolgend untersucht werden. Variiert werden hierbei z.B. Brandort, Brandtyp, Brandentwicklung, Personenanzahl und Fluchtmöglichkeit (Kapitel 5.3).
- d) Ermittlung Ereignishäufigkeiten und Schadenausmaße: Häufigkeiten für verschiedene Ereignisabläufe und deren zugehöriges Schadenausmaß (z.B. Todesopfer pro Brand) müssen bestimmt werden (Kapitel 5.1 und 5.4).

e) Risiken darstellen: Die ermittelten Risiken können in Form von (verschiedenen) Kenngrößen ausgewiesen oder in Diagrammen dargestellt werden.

Die Risikoanalyse versucht also vereinfacht die Frage "Was kann passieren?" zu beantworten.



(2) Risikobewertung

In der Risikobewertung wird die Tragbarkeit des ermittelten Risikos anhand von festgelegten Akzeptanzkriterien beurteilt. Diese Wertungen können nicht allein objektiv hergeleitet werden und basieren deshalb letztlich auch auf einer (subjektiven) Entscheidung der Beteiligten. Im Rahmen der Risikobewertung erfolgt eine Aussage, ob die Sicherheit eines Systems noch weiter verbessert werden soll. Vereinfacht ausgedrückt wird mit der Risikobewertung eine Antwort auf die Frage "Was darf passieren?" gesucht.

(3) Maßnahmenplanung

Die Maßnahmenplanung erfolgt in mehreren Schritten von der Auswahl der risikomindernden Maßnahmen bis zur Beurteilung dieser Maßnahmen. Die

Maßnahmenplanung soll also die Frage *"Welche Maßnahmen sind erforderlich, um das System sicherer zu gestalten?"* beantworten. Die Ergebnisse der Maßnahmenplanung fließen im Sinne einer Interaktion wieder in die Risikoanalyse und die Risikobewertung ein.

Die praktische Umsetzung der genannten drei Hauptbereiche eines risikobasierten Verfahrens erfolgt sehr unterschiedlich (Kapitel 4.2 und 4.3).

4.2 Risikoanalyseverfahren im Ausland

4.2.1 Vorbemerkung

Es wurde eine Recherche durchgeführt mit dem Ziel, Informationen zu erhalten, welche Risikoanalyseverfahren für den Bereich von ÖPNV-Tunnelanlagen im Ausland bereits erfolgreich verwendet wurden. Diese Recherche ergab, dass auf diesem Gebiet nur wenige Informationen verfügbar sind. Deshalb wurde die Recherche auf das Gebiet der Fernbahntunnel und weiterer vergleichbarer Bereiche bzw. Fragestellungen (z.B. Risiken von Gefahrguttransporten außerhalb von Tunnelstrecken) ausgeweitet.

4.2.2 Angewandte Risikoanalyseverfahren im Ausland

Die nachfolgende Darstellung der angewandten Risikoanalyseverfahren im Ausland erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wurden Zeitschriftenaufsätze und Tagungsbände durchgesehen und im Internet recherchiert. Es wurden Angaben über Risikoanalyseverfahren zu folgenden Ländern gefunden:

(1) Frankreich [13]

Es wurde im Rahmen der durchgeführten Recherche kein Risikoanalyseverfahren gefunden. Die Sicherheitsmaßnahmen werden nach „Expertenaussagen“ auf der Grundlage von speziellen Sicherheitsuntersuchungen festgelegt.

(2) Italien [14, 15, 16, 17]

In Italien existieren Methoden zur Risikobewertung und für ein Risikomanagement. Sie basieren auf einer quantitativen Analyse (Kapitel 4.3.2), in

der neben Bränden auch verschiedene Szenarien wie z.B. Unfälle oder Pannen berücksichtigt werden [14].

Ferner wurde eine ursprünglich aus dem nuklearen und chemischen Bereich stammende Risikoanalyse entwickelt, durch die das Sicherheitsniveau der Personen (Fahrgäste, Personal) und die Kosten für Verbesserungsmaßnahmen optimiert werden sollen [15]. Hierfür werden beispielsweise im Bereich des Brandschutzes Simulationen durchgeführt, um quantitativ zu bestimmen, welche Bedingungen für Fahrgäste bei einer Evakuierung eines brennenden Zuges im Tunnel herrschen (z.B. Konzentration von Verbrennungsprodukten, thermische Strahlung).

Ferner wird mit Hilfe von Kosten-Wirksamkeits-Untersuchungen jeweils bewertet, ob eine entsprechend entwickelte Schutzmaßnahme sinnvoll umgesetzt werden kann. So soll immer die bestmögliche Balance zwischen möglicher Sicherheit und technischer sowie finanzieller Umsetzbarkeit gefunden werden.

Die Erfahrungen mit dieser Risikoanalysemethode flossen in die italienische Norm „Railtunnel safety“ [17] ein, in der zwei Arten von Risikoanalysen erläutert werden (Basis- und erweiterte Analyse). Anhand dieser Analysemethoden soll überprüft werden, ob die Mindest-Sicherheitsanforderungen eingehalten werden. Ferner wird das Risikolevel des Tunnels mit den festgelegten Akzeptanz-Grenzwerten verglichen [16].

Bei dieser Methode [16] werden mit Hilfe von Eingabedaten, wie z.B. Tunnelgeometrie, Wärmefreisetzungsrate und Branddauer, Ventilationsbedingungen, Fluchtbedingungen und verschiedenen Umgebungsbedingungen (z.B. Brandgasverteilung, Temperaturverteilung) unter anderem die nachfolgenden Werte bestimmt:

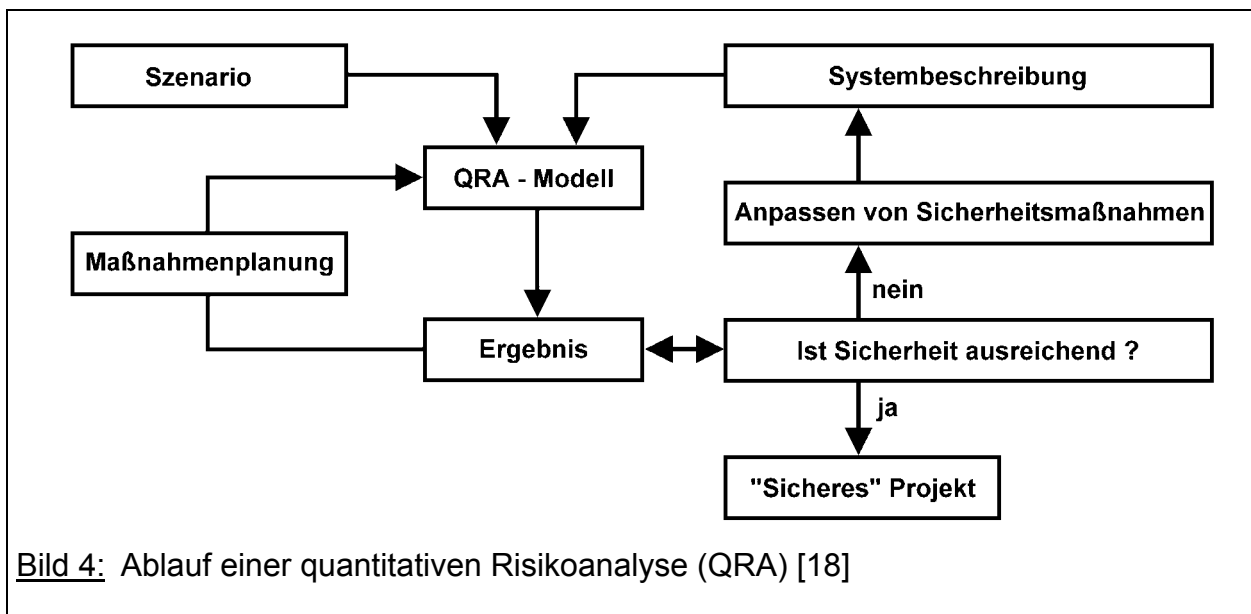
- a) Wahrscheinlichkeit des Unfalls
- b) voraussichtliche Anzahl der Toten und Verletzten
- c) Risikolevel des Tunnels

Mit Hilfe einer Maßnahmenplanung sollen dann die Auswirkungen einzelner Maßnahmen hinsichtlich der Verringerung des Risikos erfasst werden.

(3) Niederlande [18, 19, 20]

In den Niederlanden wurde eine quantitative Risikoanalyse (QRA) für den Brandschutz in ÖPNV-Tunnelanlagen entwickelt [18] (Kapitel 4.3.2).

Mit Hilfe dieser quantitativen Risikoanalyse (Bild 4) sollte die Sicherheit der Personen (Fahrgäste, Personal) für das bedrohlichste Szenario in Bezug auf mögliche Opfer untersucht werden.



Zunächst wurde auf Grundlage von bestehenden niederländischen Nahverkehrstunneln ein Standardtunnel entwickelt, auf den sich das Modell der quantitativen Risikoanalyse bezieht. In einer deterministischen Analyse wurden die drei Szenarien „Entgleisung“, „Kollision“ und „Feuer“ untersucht, da diese Zwischenfälle am ehesten der unerwünschten Eigenschaft „selten und großer Schaden“ entsprechen. Als „worst case“ wurde der Brand identifiziert, wobei terroristische Anschläge von der Betrachtung ausgenommen wurden. Genaue Angaben hinsichtlich der betrachteten Szenarien werden nicht gemacht.

Die Ermittlung der Risiken basiert auf einer Ereignisbaumanalyse. Die Risiken werden mittels einer Summenkurve in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm dargestellt (Bild 5). In dieses Diagramm werden Häufigkeiten von verschiedenen Unfällen und die zugehörigen zu erwartenden Schadensausmaße eingetragen. Die Entscheidung, ob das Risiko noch akzep-

tabel ist oder nicht, kann mit Hilfe einer „Akzeptanzgeraden“ entschieden werden (Bild 5). Der Verlauf dieser Akzeptanzgeraden ist abhängig von dem Risiko, das die Gesellschaft bzw. ein Inhaber oder Verantwortlicher für das System noch akzeptiert.

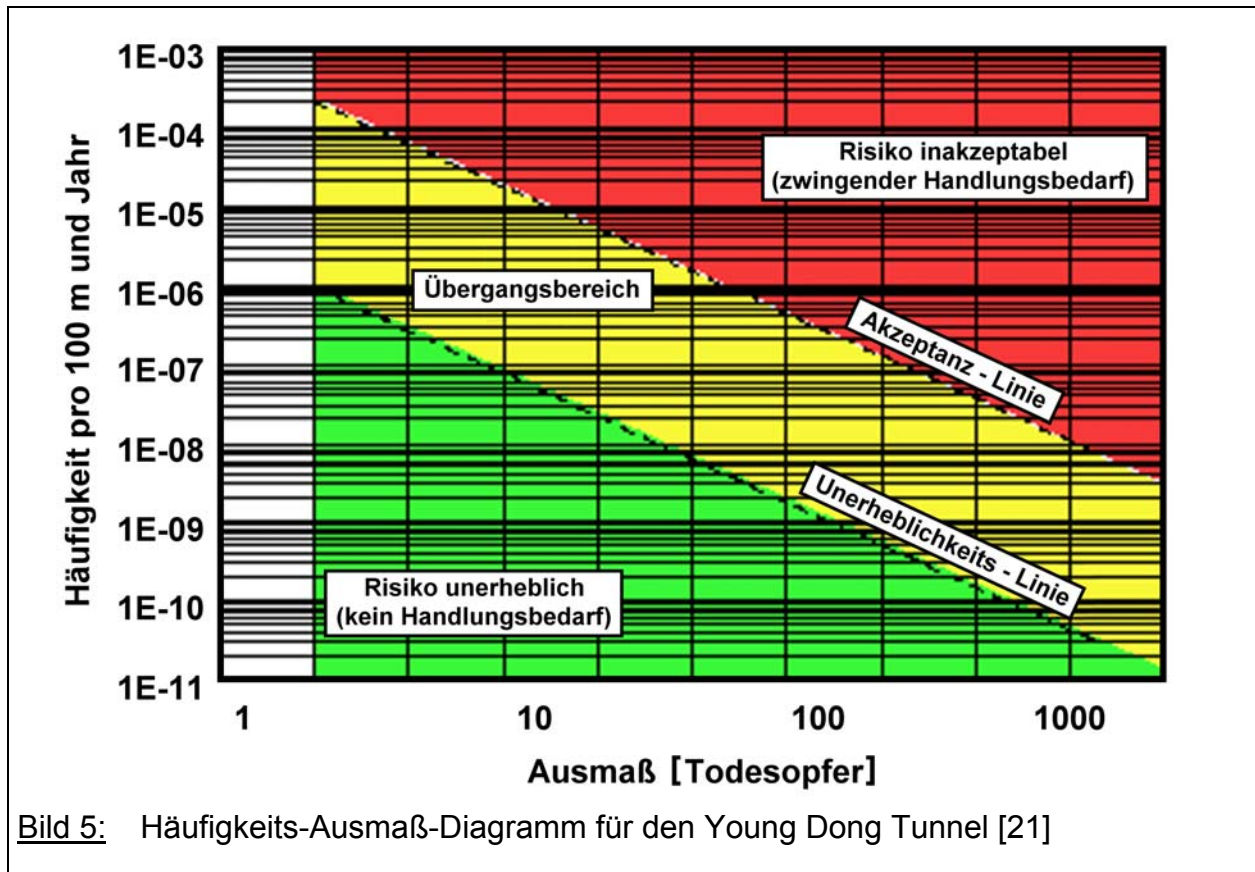
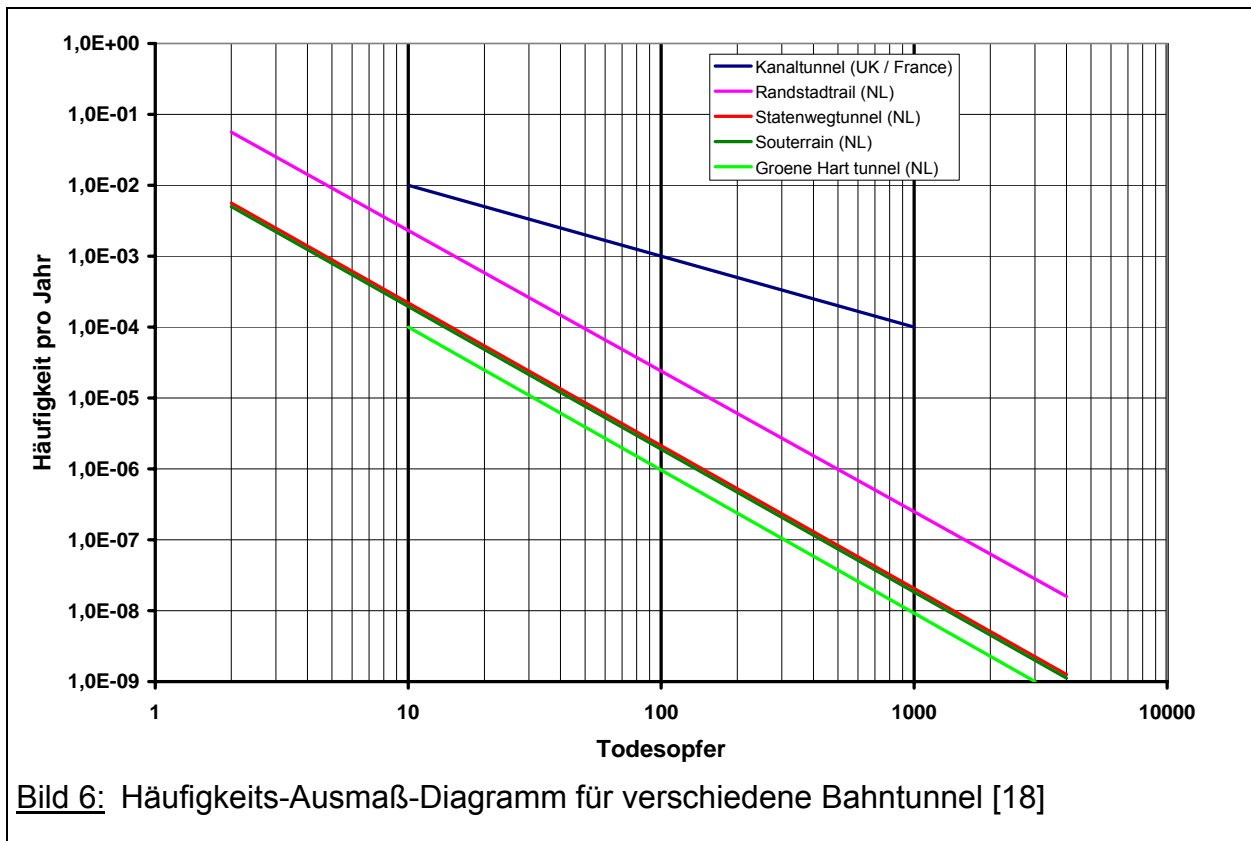


Bild 5: Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm für den Young Dong Tunnel [21]

Bei der Erstellung einer quantitativen Risikoanalyse werden „Akzeptanzgeraden“ festgelegt (Bild 5). Unterhalb der Unerheblichkeits-Linie (grüner Bereich) gilt das betrachtete System als sicher. Es sind keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit erforderlich. Zwischen der Unerheblichkeits- und der Akzeptanz-Linie (gelber Bereich) liegt ein Bereich, bei dem im Einzelfall entschieden werden muss, ob mit weiteren Maßnahmen die Sicherheit erhöht werden soll. Oberhalb der Akzeptanz-Linie (roter Bereich) besteht zwingend Handlungsbedarf, da für diesen Fall das Risiko nicht mehr akzeptabel ist. Es sind deshalb zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen erforderlich, um das Risiko zu senken.

In Bild 6 sind für verschiedene Bahntunnel „Akzeptanzgeraden“ in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm dargestellt. Darauf aufbauend kann nachfolgend mit Hilfe einer Maßnahmenprüfung untersucht werden, welchen Einfluss verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit haben.



Ferner wurden für niederländische Bahntunnel (ÖPNV und Fernbahn) verschiedene Risikoanalysen durchgeführt. Bei den ÖPNV-Tunneln RandstadRail (Rotterdam) und Nord / Süd-Linie (Amsterdam) wurden quantitative Risikoanalysen bisher jedoch nur in der Planungsphase durchgeführt, um die Sicherheit im Brandfall zu bestimmen [20].

Für den 1957 eröffneten Velserspoortunnel wurde im Jahr 2003 mit Hilfe einer quantitativen Risikoanalyse das Sicherheitslevel des Tunnels bestimmt. Nachfolgend wurden durch eine Risikoanalyse drei alternative Vorgehensweisen zur sicherheitstechnischen Aufrüstung des Tunnels verglichen. Dabei wurde der Schwerpunkt auf die Selbstrettungsmöglichkeiten gelegt.

Für den Willemspoorttunnel wurde mit einer qualitativen Risikoanalyse eine Grundlage geschaffen, auf der nachträglich bewertet werden sollte, wie das Sicherheitssystem weiter optimiert werden kann. Diese Maßnahme war erforderlich, da dieser Tunnel zukünftig auch für den Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsverkehr freigegeben werden sollte [20].

Auf Grundlage der untersuchten Tunnel und der durchgeführten Risikoanalysen wird die quantitative Risikoanalyse in [20] unter folgenden Bedingungen als effektives Hilfsmittel beschrieben:

- a) Es muss ein ganzheitlicher Ansatz erfolgen (z.B. Organisation, Infrastruktur, Fuhrpark, Szenarien)
- b) Quantitative Risikoanalyse soll in die Planung einfließen (z.B. Vergleich von Ausführungen und Sicherheitsmaßnahmen)
- c) Quantitative Risikoanalyse wird mit einer Szenarienanalyse wahrscheinlichkeits-theoretisch genutzt, um alle Bereiche (z.B. Verkehr, Selbstrettung, Rettungskräfte) abzudecken.

Ferner wird festgestellt, dass es nicht zielführend ist, für jeden Tunnel ein eigenes Modell einer quantitativen Risikoanalyse zu entwickeln, sondern besser einen einheitlichen Ansatz einer quantitativen Risikoanalyse zu verwenden, mit dem es möglich ist, verschiedene Tunnel miteinander zu vergleichen.

(4) Norwegen [22]

Der norwegische Rat für die Normierung von Bauwerken hat ein Grundmodell für Risikoanalysen von Bahntunneln und unterirdischen Gebäuden entwickelt, welches nach derzeitigen Informationen jedoch nur in norwegischer Sprache erhältlich ist. Detaillierte Angaben liegen daher derzeit noch nicht vor.

(5) Österreich [23]

In Österreich werden verschiedene Verfahren der Risikoanalyse angewendet, wie z.B.:

- a) Quantitative Risikoanalyse (Kapitel 4.3.2)

b) Ereignisbaumanalyse (Monte Carlo Simulationen, Wirkungssimulationen) (Anhang 3)

Für verschiedene Fernbahntunnel wurden umfangreiche quantitative Risikoanalysen auf Basis von Ereignisbaumanalysen durchgeführt. Die Ermittlung der Häufigkeit von Ereignissen erfolgt dabei durch Auswertung und Analyse von statistischen Daten bzw. auf entsprechend abgeleiteten Richtwerten. Die Ermittlung des Schadenausmaßes basiert ebenfalls auf Statistiken und Annahmen sowie teilweise auch spezifischen Untersuchungen wie beispielsweise Brandsimulationen.

(6) Schweiz [24, 25, 26, 27, 28]

In der Schweiz werden für verschiedene Fragestellungen zahlreiche unterschiedliche Methoden angewendet (Anhang 3):

- a) Quantitative Risikoanalyse, inkl. Kosten-Wirksamkeits-Untersuchungen
- b) Qualitative Methoden (z.B. Risikoabschätzungen mittels Szenarienanalyse, Experteneinschätzungen , etc.)

Das Instrument der Risikoanalyse hat sich hier insbesondere in Bereichen, in welchen keine klaren regulativen Vorgaben bestehen, und im Zusammenhang mit Fragen des Nachweises gleicher Sicherheit etabliert.

Daneben kommen risikobasierte Ansätze für "Spezialthemen" wie beispielsweise Gefahrguttransporte oder sehr lange Tunnel zum Einsatz. In der Regel werden insbesondere für komplexe Fragestellungen (z.B. Gefahrgutrisiken) quantitative Verfahren angewendet. So wurde z.B. für das gesamte Normalspur-Eisenbahnnetz der Schweiz mittels einer Ereignisbaumanalyse die Risiken von Gefahrguttransporten untersucht [25].

Grundlage war eine spezifisch entwickelte Methode [26], welche u.a. auf Basis von statistischen Analysen und der Verwendung von gefahrgutspezifischen Wirkungsmodellen die Ermittlung der Risiken ermöglicht.

Für pragmatische Risikoabschätzungen – z.B. um verhältnismäßig rasch einen Überblick über die "Risikolandschaft" gewinnen zu können – gelangen einfachere, qualitative Verfahren zur Anwendung (Kapitel 4.3.2). Beispiele hierzu sind die jährliche Risiko-Beurteilung der SBB-Strecken oder

die pragmatische Ersteinschätzung einzelner Fragestellungen auf Basis von Expertenschätzungen.

Ein Beispiel einer sehr umfangreichen quantitativen Risikoanalyse der jüngeren Vergangenheit ist eine Untersuchung für den Lötchberg-Basistunnel [28]. Für diesen langen, alpenquerenden Tunnel wurde eine umfangreiche Risikoanalyse mittels Ereignisbaum- und Fehlerbaumanalyse durchgeführt. Dabei wurden neben "konventionellen" Ereignissen auch Gefahrgutszenarien untersucht. Die Ermittlung des Schadensausmaßes basiert auf statistischen Auswertungen, Annahmen sowie der Anwendung spezifischer Modelle, insbesondere für Brand- und Gefahrgutszenarien. Dabei wurden unter anderem auch spezifische Brandraten für verschiedene Zugtypen ermittelt: Die ausgewiesenen Werte liegen in einem Bereich von $1 - 3 \cdot 10^{-8}$ Brände pro Zugkilometer (Kapitel 5.1).

Eine weitere Abschätzung der Brandraten wurde auch im Zusammenhang mit der Untersuchung der Zweckmäßigkeit von stationären Anlagen zur Detektion von Bränden und Gefahrgutfreisetzungen entlang des Streckennetzes vorgenommen [27]. Hier wurden statistische Grundlagen der Jahre 2000 bis 2005 ausgewertet. Die ermittelten Werte liegen – je nach Zug- und Wagentyp (Reisezug, Güterzug bzw. Lokomotiven/Triebfahrzeuge, Reisezugwagen/Güterwagen – bei ca. $2 \cdot 10^{-8}$ Brände pro Zugkilometer.

(7) Spanien [29]

In Spanien wird eine qualitative Risikoanalyse für Tunnel verwendet (Kapitel 4.3.2).

Detaillierte Angaben liegen nicht vor.

(8) Finnland [30], Litauen [31], Portugal [32], Slowakei [33]

In den durchgeführten Recherchen konnten keine relevanten Regelungen zur Risikobewertung von Bahntunneln in diesen Ländern gefunden werden.

(9) Vereinigte Staaten von Amerika [34, 35, 36]

In den durchgeführten Recherchen konnten keine konkreten Vorgaben für Risikoanalysen für Tunnel in den USA gefunden werden [34].

Mit der NFPA 551 „Guide for the Evaluation of Fire Risk Assessments“ [35] ist jedoch ein Regelwerk vorhanden, das ganz allgemein die Vorgehensweise bei Risikoanalysen beschreibt. Die NFPA 551 [35] erläutert hierbei z.B. folgende Analysemethoden (Anhang 3):

- a) Qualitative Methoden, inkl. Kosten-Wirksamkeits-Methoden
- b) Quantitative Methoden

Mit Bezug auf die Risiko-Matrix werden im erläuternden Anhang A der NFPA 551 [35] die in den Tabellen 3 und 4 angegebenen Grenzwerte bzw. Kategorien definiert.

Ein Beispiel einer praktischen Risikountersuchung bildet eine Untersuchung des U.S. Department of Transportation zum Gefahrguttransport auf der Bahn [36]. Zweck der Untersuchung war das Entwickeln einer allgemeinen Vorgehensweise für das Abschätzen von Risiken, die mit dem Transport von gefährlichen Gütern auf der Eisenbahn verbunden sind. Die Vorgehensweise soll für verschiedene Strecken und für unterschiedliche transportierte Stoffe anwendbar sein. Das Vorgehen wird auf zwei konkrete Strecken angewendet. Es werden für die beiden Streckenführungen die Risiken für den Transport von Chlor, von Flüssiggas und Schwefelsäure ermittelt.

Häufigkeit	Beschreibung
häufig	Eintritt häufig ($p > 0,1$)
wahrscheinlich	Wird während des Betriebszeitraums eines Systems einige Mal auftreten ($p > 0,001$)
gelegentlich	Eintritt unwahrscheinlich ($0,001 > p > 10^{-6}$)
abwegig	Eintritt sehr unwahrscheinlich ($p < 10^{-6}$)
unwahrscheinlich	Eintritt ist nahezu nicht von 0 abzugrenzen ($p \sim 0$)

Anmerkung: Worauf sich p bezieht, wird in [35] nicht angegeben.

Tabelle 3: Häufigkeitsstufen [35]

Schweregrad	Bedeutung
vernachlässigbar	Der Einfluss des Schadens ist so gering, dass er keine erkennbare Auswirkung auf die Anlage oder deren Abläufe hat.
gering	Der Schaden hat einen Einfluss auf die Einrichtung, was einen kurzen Ausfall einiger Abläufe zur Folge hat. Es sind kleine Investitionen erforderlich, um die volle Leistungsfähigkeit wieder herzustellen. Es können kleinere Verletzungen bei Personen auftreten.
bedenklich	Der Schaden hat einen großen Einfluss auf die Einrichtung, was zu einem Ausfall der gesamten Abläufe führt. Es sind wesentliche Investitionen erforderlich, um die volle Einsatzfähigkeit wieder herzustellen. Verletzte und eventuell auch Todesopfer sind zu erwarten.
katastrophal	Das Feuer fordert Tote und Verletzte oder die Auswirkungen auf den Betrieb sind desaströs, was zu einem langen Ausfall bzw. einer kompletten Schließung führt. Der Betrieb wird sofort eingestellt.

Tabelle 4: Definition der Schweregrade [35]

Das methodische Vorgehen umfasste folgende Elemente [36]:

a) Risikoanalyse

- Die Ermittlung der Häufigkeit von Ereignissen erfolgt durch Auswertung und Analyse von statistischem Datenmaterial.
- Die Abschätzung von potentiellen Schadensausmaßen erfolgt über die Ermittlung von durch Ereignisse gefährdeten Flächen und über die Bevölkerungsdichte in diesen Flächen. Die Ermittlung der gefährdeten Flächen erfolgt mittels physikalischer Modelle, welche das Verhalten der betrachteten Stoffe in der Umgebung beschreiben.
- Es werden verschiedene Szenarien betrachtet, die mit Hilfe von Fehler- und Ereignisbaumanalysen untersucht werden.
- Die Risiken werden in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen dargestellt. Es wird aufgezeigt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Wert für das Ausmaß erreicht oder überschritten wird.

b) Risikobewertung

- Es erfolgt keine explizite Risikobewertung.

- Im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm werden die Ergebnisse der zwei untersuchten Streckenführungen gegenübergestellt.

c) Maßnahmenplanung

- Es erfolgt keine eigentliche Maßnahmenplanung.
- Es werden Empfehlungen gemacht, in welchen Bereichen die Vorgehensweise zu verfeinern ist (z.B. Berücksichtigung einer tageszeitabhängigen Bevölkerungsdichte).

(10) Vereinigtes Königreich [37, 38]

Für das vereinigte Königreich existiert mit „Das gelbe Buch“ [37] ein allgemeines Grundlagenpapier zu den unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Risikoanalyse im Eisenbahnbereich. Hierbei wird sowohl auf die Einflussmöglichkeiten während der Planungs- und der Bauphase als auch während der Betriebsphase mit Blick auf die sichere Instandhaltung eingegangen. Die Hinweise sind nach dem „Sieben-Stufen-Ablauf“ aufgebaut (Bild 7). Bei den einzelnen Schritten wird in der Regel jeweils unterschieden zwischen quantitativer und qualitativer Analyse (Anhang 3).

Der Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen erfolgt häufig so, dass das Risiko, das im tolerablen Bereich liegt, erst dann akzeptiert werden kann, wenn es so gering wie angemessen möglich ist [37].

Ein Beispiel für die praktische Anwendung eines Risikoanalyseverfahrens bildet die Untersuchung zum Kanal-Tunnel, der Frankreich mit Großbritannien verbindet, aus dem Jahr 1994 [38]. Im Rahmen eines so genannten "Safety Case" wurde ein Nachweis geführt, dass das Sicherheitsniveau die gestellten Anforderungen erreicht und die Sicherheit beim Betrieb des Kanaltunnels gewährleistet ist. Der Nachweis wurde erst 1994, d.h. erst bei Fertigstellung der Anlagen und der Züge, geführt. Er diente somit nicht als Planungsinstrument.

Dieser Nachweis entstand in Zusammenarbeit zwischen britischen und französischen Experten. Dabei wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt, Die Engländer zogen einen quantitativen Ansatz, die Franzosen einen qualitativen Ansatz vor.

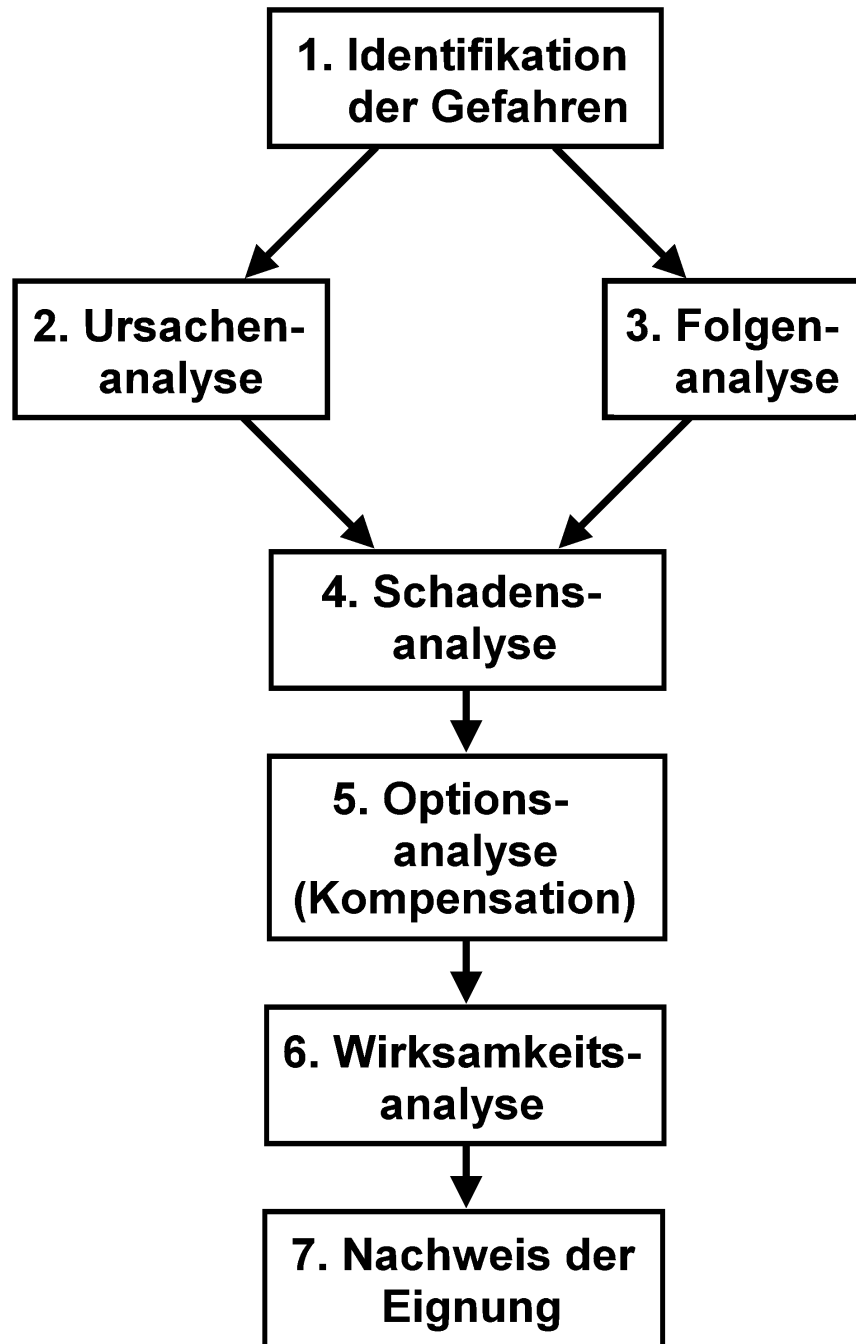


Bild 7: Sieben-Stufen-Ablauf [37]

Das methodische Vorgehen umfasste folgende Elemente:

a) Risikoanalyse

- Der qualitative Ansatz versucht die Frage „Was kann passieren und was kann daraus entstehen?“ zu beantworten. Das Ziel dieses Ansatzes besteht darin, Anforderungen an Sicherheitsmaßnahmen zu definieren, die diese Ursachen-Folge-Ketten möglichst unterbinden.

- Der quantitative Ansatz besteht aus der Gefahrenanalyse, der Quantifizierung von Initialereignissen, der Ereignisanalyse mit Szenarien, der Ausmaßabschätzung und der Bildung von Risikowerten.
- Für die Quantifizierung (Häufigkeit) von Initialereignissen wird statistisches Datenmaterial wie z.B. Unfallstatistiken ausgewertet und analysiert.

b) Risikobewertung

- Für das maximal zulässige individuelle Risiko sind absolute Grenzwerte festgelegt. Diese hängen von der betreffenden Personenkategorie ab und wurden für Reisende aus dem damals akzeptierten Zustand auf dem übrigen Bahnnetz abgeleitet. Für das Fahr- und Unterhaltspersonal galten Grenzwerte des Health and Safety Executive (HSE).
- Das kollektive Risiko wird in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm erfasst. Die Bewertung erfolgt durch die Festlegung einer Akzeptanzlinie. Auch hier war der damalige Zustand auf dem Netz der British Rail zugrunde gelegt.
- Aufgrund von Empfehlungen der Health and Safety Commission (HSC) wurde eine zweite Akzeptanzlinie um einen Faktor 1000 tiefer festgelegt. Der so entstehende Zwischenbereich wird als Übergangsbereich bezeichnet (Bild 5).

Ein weiteres Beispiel ist eine Studie zum Gefahrguttransport aus dem Jahr 1991. Ziel der Studie war das Aufzeigen eines Verfahrensvorschlages mit Fallbeispielen zur Untersuchung der Risiken beim Transport gefährlicher Güter auf dem Schienenweg.

Das methodische Vorgehen umfasste folgende Elemente:

a) Risikoanalyse

- Die Untersuchung basiert auf der Methode der quantitativen Risikoanalyse.

- Bei der quantitativen Risikoanalyse werden Daten statistisch ausgewertet und analysiert. Die Risiken werden mit dem Einsatz von Fehlerbäumen und von Ereignisablaufbäumen quantifiziert.

b) Risikobewertung

- Die Bewertung erfolgt durch das Festlegen von Akzeptanzbereichen. Es sind dies die Bereiche „untragbares Risiko / Übergangsbereich / vernachlässigbares Risiko“.
- Für die Bewertung von individuellen Risiken wird ein Messen an absoluten Grenzwerten vorgeschlagen. Diese Grenzwerte für das maximal zulässige Risiko sollen von der betreffenden Personenkategorie abhängen.

c) Maßnahmenplanung

Die Beurteilung von Maßnahmen soll aufgrund von Kosten-Wirksamkeits-Untersuchungen erfolgen. Die Wirksamkeit kann dabei mittels der für die Risikoanalyse verwendeten analytischen Methoden bestimmt werden.

(11) EU-Forschungsvorhaben „COUNTERACT“ [39]

Zum 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union gehörte das Forschungsvorhaben COUNTERACT (Cluster Of User Networks in Transport and Energy Relating to anti-terrorist ACTivities). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden Risikoanalysen mit Blick auf die Kosten-Wirksamkeits-Effektivität genutzt, um öffentliche Transportsysteme (z.B. U-Bahn, Bus) gegen Gefahren von Terroranschlägen sicherer zu gestalten.

Anhand eines Leitfadens sollten Schwachpunkte im betrachteten System erkannt werden. Darauf aufbauend wurden anhand einer Prioritätenliste die wichtigsten und effektivsten Investitionen aufgezeigt.

(12) Südkorea [21]

Für den Young Dong Bahntunnel (Länge ca. 16,3 km) in Korea wurde zur Bewertung des gesamten Bahnrisikos eine quantitative Risikoanalyse angewendet [21]. Es wurden Analysen mit und ohne Rettungsstation durchgeführt.

Die Risikoanalyse enthielt drei unterschiedliche Ansätze:

- a) Analyse bestehender Unfallstatistiken für koreanische Bahnen (z.B. Analyse von Unfallstatistiken, Fragebögen)
- b) Bewertung der Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen (z.B. Ermittlung der Brandrate aufgrund der Brandursache, Bewertung des Einflusses von Sicherheitsmaßnahmen)
- c) Ereignisbaumanalyse

Die angestrebten Schutzziele für die Risiken im Tunnel wurden in dem in Bild 5 dargestellten Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm festgelegt.

(13) Hong Kong [39]

Ein Feuer-Risiko-Modell für einen Bahntunnel in Hong Kong soll den Entscheidungsträgern mit Hilfe von Kosten/Risiken-Wirksamkeit-Kennziffern die Möglichkeit geben, verschiedene Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit zu vergleichen und zu bewerten [39].

Die Analyse teilt sich in drei Schritte auf:

- a) Szenario-Entwicklung: Zusammenstellung aller sinnvollen, absehbaren Ereignisse
- b) Ablauf-Analyse: Wahrscheinlichkeitsberechnung der Unfallszenarien (Ereignisbaumanalyse)
- c) Abschluss-Analyse: Bewertung von Folgen der Unfallszenarien

Auf der Grundlage der Häufigkeit eines Initialereignisses wird der weitere Verlauf eines Unglücksfalls in einem Ereignisbaum abgebildet. Hierzu sind sinnvolle Verzweigungspunkte zu definieren.

Die Häufigkeit des Initialereignisses „Zugbrand im Tunnel“ kann verschiedene Ausgangsbedingungen aufweisen, z.B.:

- a) Brandort (innerhalb oder außerhalb des Zuges)
- b) Größe des Zündinitials (klein, mittel, groß)
- c) Standort des Zuges (Mitte oder Ende des Tunnels)
- d) Fahrgastanzahl (viele, wenige)

e) Unfallart (Feuer, Feuer und Zusammenstoß, Feuer und Entgleisung).

Allein aus diesen Randbedingungen lassen sich unterschiedliche Häufigkeiten von Initialereignissen entwickeln. Basierend auf diesen Initialereignissen werden nun Ereignisbäume aufgestellt, um verschiedene Einflussfaktoren (Verzweigungspunkte) beurteilen zu können, wie z.B.:

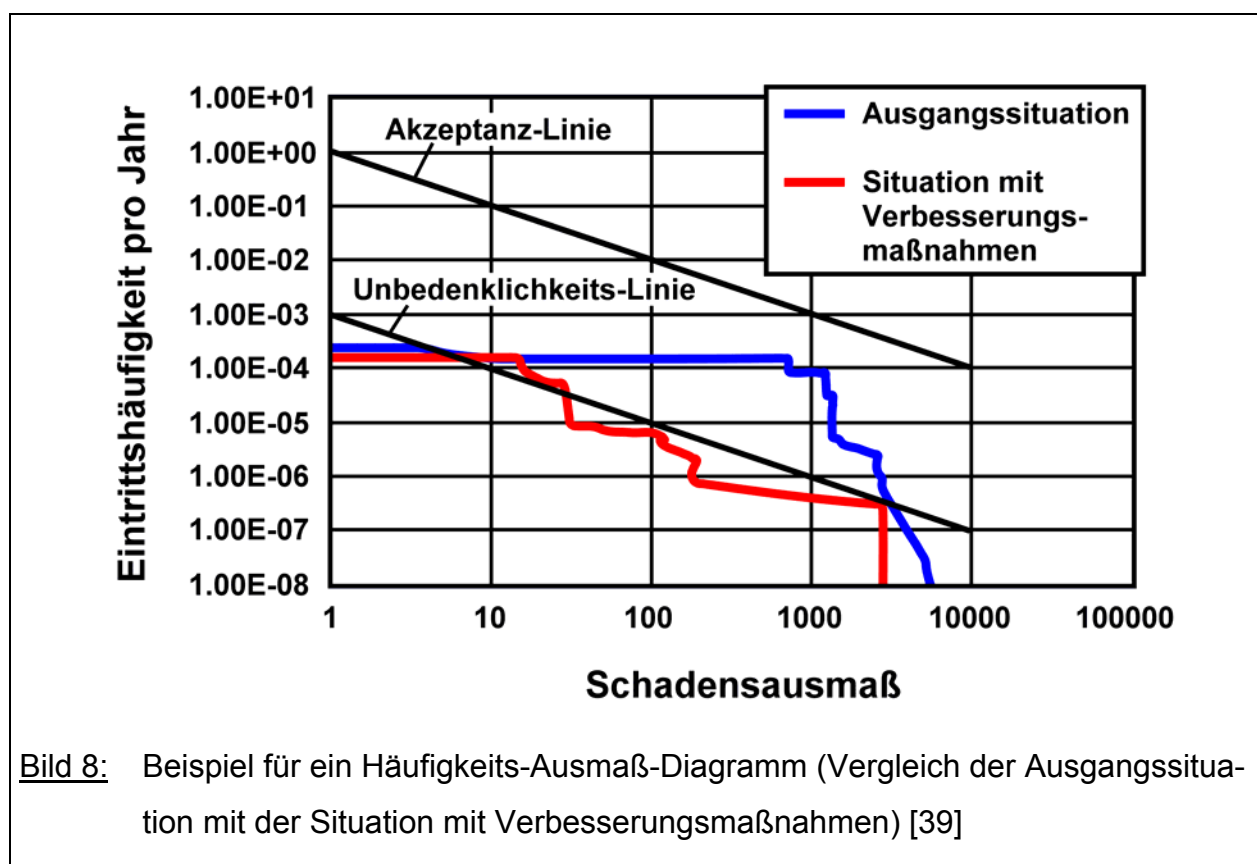
a) Erste Löschmaßnahmen erfolgreich (ja / nein)

b) Evakuierung möglich (ja / nein)

c) Notruf möglich (ja / nein).

Für jeden Ast des Ereignisbaums wird die Häufigkeit eines bestimmten Ereignisses bestimmt.

Es müssen nun geeignete Verbesserungsmaßnahmen gefunden werden, die dazu führen, dass das System insgesamt sicherer wird. Primärer Handlungsbedarf besteht bei den Punkten, die bei der vorangegangenen Analyse das größte Risiko darstellen. Die Auswirkung solcher Maßnahmen kann in Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen dargestellt werden (Bild 8).



Damit eine Investition zur Verbesserung der Sicherheit bewertet werden kann, sind Grenzkosten erforderlich (Kapitel 5.5). Zur Verhinderung eines Todesopfers wurden Grenzkosten in Höhe von 15 Mio. \$ festgelegt. Somit kann für eine bestimmte Maßnahme zur Reduzierung des identifizierten Risikos eine Kosten-Wirksamkeits-Analyse durchgeführt werden (Kapitel 6).

4.2.3 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein breites Spektrum von unterschiedlichen Analyseverfahren je nach Themengebiet und Land zum Einsatz kommt. Es werden bei Risikoanalyseverfahren Expertenschätzungen sowohl bei qualitativen als auch bei quantitativen Risikoanalysen in der Regel erforderlich, da die zur Verfügung stehenden Daten nur selten ausreichend sind.

Mit Bezug auf das vorliegende Forschungsvorhaben zeigt sich, dass im Ausland (z.B. Niederlande, Österreich und Schweiz) für vergleichbare Fragestellungen meist eine quantitative Risikoanalyse und für die grafische Darstellung des Risikos häufig ein Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm verwendet wird.

Die Ergebnisse dieser Recherche werden bei der folgenden Auswahl einer geeigneten Risikoanalyse berücksichtigt.

4.3 Auswahl einer geeigneten Risikoanalyse

4.3.1 Anforderungen

Das zu entwickelnde Risikoanalyseverfahren zur Untersuchung von Brandereignissen in ÖPNV-Tunnelanlagen soll folgende Anforderungen erfüllen:

- (1) Die Methodik soll eine strukturierte Analyse und Bewertung der Risiken von Brandereignissen in ÖPNV-Tunnelanlagen ermöglichen.
- (2) Die Methodik soll eine risikobasierte Entscheidungsgrundlage bieten, um zu klären, ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind oder nicht.
- (3) Die Methodik soll die in anderen, vergleichbaren Fragestellungen zur Anwendung gelangenden methodischen Ansätze und Verfahren berücksichtigen, soweit dies als zweckmäßig/sinnvoll erachtet wird.

- (4) Das Verfahren soll neben der Analyse und Bewertung der Risiken auch die wirtschaftlichen Aspekte des Aufwandes bzw. der Verhältnismäßigkeit zur etwaigen Umsetzung zusätzlicher Maßnahmen zur Risikoreduzierung berücksichtigen.
- (5) Das Risikoanalyseverfahren soll von einem Team des jeweiligen Verkehrsunternehmens (z.B. Betriebsleiter, Fahrzeugexperte und Sicherheitsingenieur) angewandt werden können, das nicht vertieft mit Methoden und Verfahren von Risikoanalysen vertraut ist. Nur in besonderen Fällen soll eine Unterstützung durch externe Spezialisten erforderlich sein.
- (6) Das Verfahren soll primär auf Einschätzungen dieses Teams beruhen. Vertiefende Analysen mittels Simulationen usw. sollen nicht verwendet werden müssen. Das gewählte Analyseverfahren soll aber bei Bedarf in Einzelfällen solche zusätzlichen Simulationen berücksichtigen können.

Nachfolgend wird zunächst das weite Spektrum der Risikoanalysen vorgestellt und dann mit Hilfe der oben genannten Anforderungen eine geeignete Analyse für den vorgesehenen Anwendungsfall vorgeschlagen.

4.3.2 Spektrum der Risikoanalysen

Für die Umsetzung risikobasierter Ansätze gelangt in der Praxis ein breites Spektrum an Verfahren und Methoden zur Anwendung (Anhang 3). Diese können grob in qualitative und quantitative Methoden gegliedert werden:

- (1) Die *qualitativen Methoden* basieren auf der Anwendung beliebig definierbarer Bewertungsmaßstäbe. Dadurch besteht die Gefahr, einerseits subjektive Eindrücke zu stark zu gewichten und andererseits systematische Zusammenhänge zwischen einzelnen Maßnahmen/Komponenten nicht vollständig zu berücksichtigen. Dies kann zum Schluss führen, dass durch eine höhere Anzahl risikomindernder Maßnahmen eine dazu proportionale Verbesserung der Sicherheit erreicht wird. Ferner sind mit diesen Methoden keine vergleichenden Aussagen, z. B. zwischen den Risiken in verschiedenen U-Bahntunneln und mit Risiken aus anderen Verkehrsbereichen, möglich. Ein illustrierendes Beispiel einer Häufigkeits-Schadensausmaß-Matrix zur qualitativen Beurteilung von Risiken zeigt Bild 9.

Häufigkeit				
<i>häufig</i>	unerwünscht	intolerabel	intolerabel	intolerabel
<i>wahrscheinlich</i>	tolerabel	unerwünscht	intolerabel	intolerabel
<i>gelegentlich</i>	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht	intolerabel
<i>selten</i>	vernachlässigbar	tolerabel	unerwünscht	unerwünscht
<i>unwahrscheinlich</i>	vernachlässigbar	vernachlässigbar	tolerabel	tolerabel
<i>unvorstellbar</i>	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
	<i>unbedeutend</i>	<i>marginal</i>	<i>kritisch</i>	<i>katastrophal</i>
	Ausmaß			

Bild 9: Beispiel für eine qualitativen Häufigkeits-Schadensausmaß-Matrix

(2) Bei den *quantitativen Methoden* wird das Risiko in Form einer quantitativen Größe (Zahl) ausgedrückt. Dazu wird beispielsweise versucht, mögliche Abläufe von Brandereignissen in einem System – z.B. „Tunnelanlage“ – gedanklich logisch und strukturiert nachzubilden. Hierzu werden ausgehend von einem Ausgangsereignis (Initialereignis) mögliche Ereignisabläufe betrachtet. Die Einflussgrößen, welche die Entwicklung eines spezifischen Ereignisablaufes beeinflussen, werden identifiziert und auf ihre Auswirkung hin bewertet. Darauf basierend werden für die verschiedenen, szenariospezifischen Ereignisabläufe (z.B. ein Zugbrand in einer bestimmten unterirdischen Haltestelle) die jeweiligen resultierenden Häufigkeiten und/oder Schadenausmaße (z.B. Todesopfer bei einem Brand) ermittelt und so das entsprechende Risiko (Häufigkeit multipliziert mit Schadenausmaß) bestimmt. Wesentlicher Vorteil der quantitativen Methoden ist die transparente Darstellung der Berechnungsabläufe vom Ausgangsereignis über Folgeereignisse bis zum Endzustand, wodurch ein besseres Verständnis für komplexe Zusammenhänge erreicht werden kann.

Für die praktische Umsetzung des risikobasierten Ansatzes gibt es zahlreiche methodische Verfahrensweisen für die drei Hauptbereiche Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung (Bild 3). Werden die Verfahrensweisen aus diesen drei Hauptbereichen zusammengefügt, entsteht ein Gesamtverfahren. Die jeweiligen Verfahrensweisen sind jedoch nicht beliebig kombinierbar. Gewisse Bewertungsmethoden bedingen bestimmte Analysemethoden und die

Beurteilung von Maßnahmen wiederum ist eng an die Bewertungsmethoden gekoppelt.

Eine schematische Darstellung des Spektrums an risikobasierten methodischen Ansätzen findet sich im Bild 10. Eine zusammenfassende Beschreibung der maßgeblichen Charakteristika einiger der wichtigsten dargestellten Methodikbausteine ist in Anhang 3 zusammengefasst.

Die Anwendung der verschiedenen Methodikbausteine in einem Gesamtverfahren ist je nach spezifischen Anforderungen und Komplexität der betrachteten Fragestellungen und Anwendungsgebiete unterschiedlich. Erfahrungsgemäß werden, insbesondere bei quantitativen Methoden, häufig verschiedene Methodikbausteine kombiniert angewendet.

Oft ist es aber schwierig, die verwendeten Methoden/Methodikbausteine eindeutig zu identifizieren, da Mischformen zur Anwendung gelangen. Mit zunehmender Komplexität der Systeme (z. B. in Bereichen der Kernenergie, chemische Industrie, Bauwesen oder Verkehrswege) werden i. d. R. verstärkt quantitative Methoden wie etwa logische Bäume, Simulationen oder Ausbreitungs- und Wirkungsmodelle verwendet. Viele quantitative Verfahren stützen sich auf statistische Auswertungen ab, oftmals in Kombination mit Expertenschätzungen, beispielsweise um Lücken in den Datengrundlagen schließen zu können.

Die Erfahrung im Umgang mit risikobasierten Methoden zeigt, dass für systemübergreifende Betrachtungen die Anwendung von quantitativen Methoden praktisch unumgänglich ist. Nur mit quantitativen Methoden kann eine anschauliche und vergleichbare Ermittlung und Bewertung von Risikokenngrößen gewährleistet werden. Durch die Quantifizierung kann somit die erforderliche Transparenz und Nachvollziehbarkeit und damit auch die Möglichkeit der Vergleichbarkeit gewährleistet werden. Bei einer quantitativen Erfassung und Verarbeitung von Risikokenngrößen ordnet man sich einer strengen Logik der Informationsverarbeitung unter, wie sie bei qualitativen Methoden nicht annähernd erreichbar ist.

Trotz der Quantifizierung bleibt oftmals das Problem, dass Risiken im Zusammenhang mit seltenen Ereignissen nur mit beträchtlichen Unschärfen ermittelt werden können. Diese Tatsache sowie der erhöhte Aufwand von quantitativen Risikoanalysen stellen in der Regel die Hauptkritikpunkte an der Durchführung von quantitativen Verfahren dar.

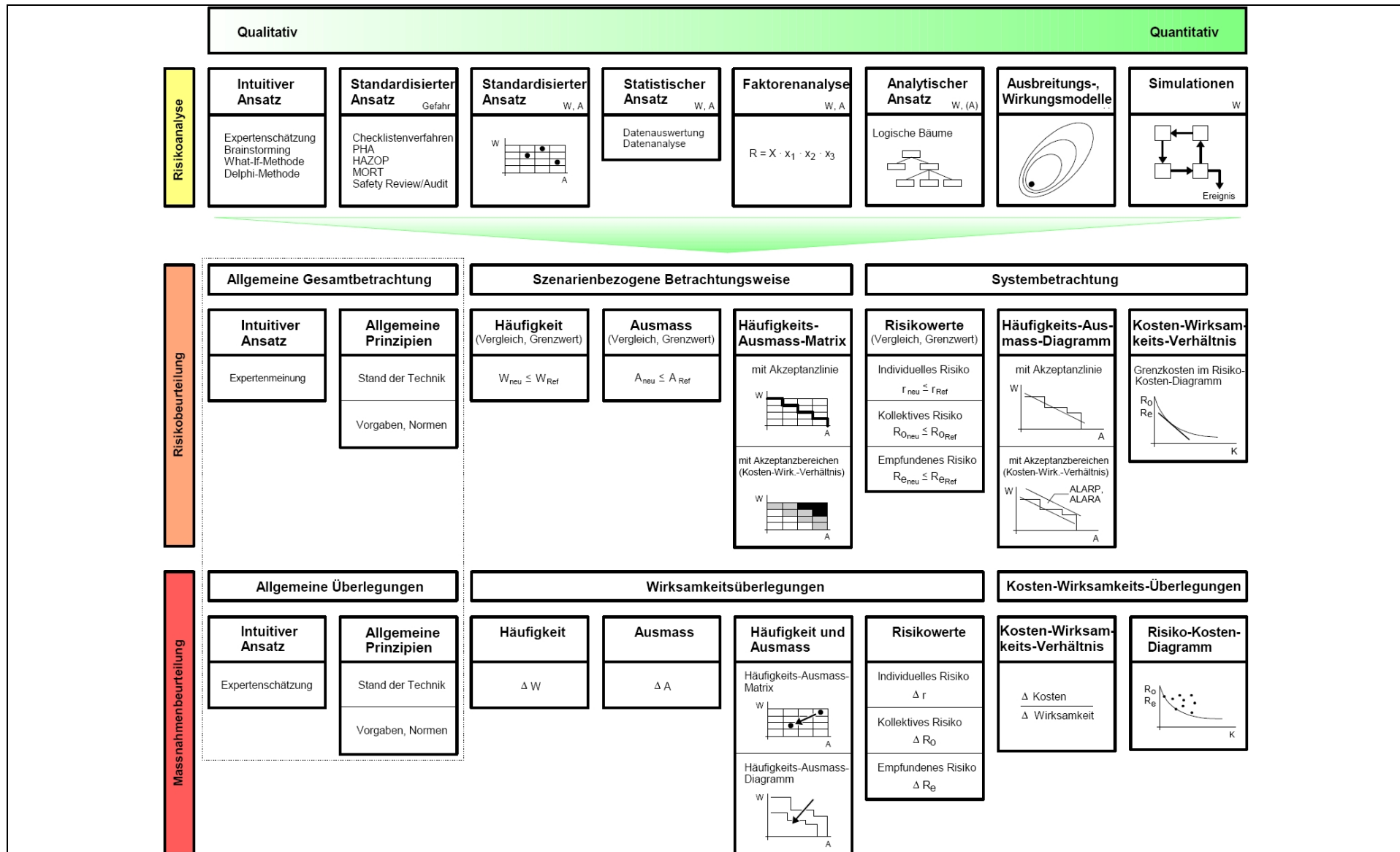


Bild 10: Schematische Darstellung des Spektrums risikobasierter Methoden

Erfahrungsgemäß können Brandschutz-Sicherheitsmaßnahmen für unterirdische Haltestellenanlagen des schienengebundenen Verkehrs mit vergleichsweise hohen Investitions- und/oder Betriebskosten verbunden sein. Um die Verhältnismäßigkeit von solchen Maßnahmen zu beurteilen, kann das Verhältnis zwischen der Risikominderung (Wirkung von Maßnahmen) und den erforderlichen Kosten herangezogen werden. Um das Verhältnis der beiden Einflussgrößen bestimmen zu können, bedarf es zum einen eines quantitativen Verfahrens, zum anderen müssen Risiken und Maßnahmenkosten mit derselben Maßeinheit ermittelt und quantifiziert werden. Dies erfordert die Darstellung der Risiken in quantitativer Form, genauer gesagt in Form monetärer Einheiten. Nur so lässt sich eine systematische Beurteilung der Maßnahmen bzw. der Verhältnismäßigkeit sicherstellen. Die Verwendung eines qualitativen Verfahrens wird deshalb für den vorliegenden Anwendungsfall nicht empfohlen. Es ist eine quantitative Methode erforderlich, um die festgelegten Anforderungen erfüllen zu können (Kapitel 4.3.1).

4.3.3 Analysetiefgang

Einer der Vorteile der Anwendung von logischen Bäumen ist die Tatsache, dass mit der Struktur der logischen Bäume die maßgeblichen Einflussgrößen modelliert werden können, die Ermittlung der jeweils erforderlichen Datengrundlagen aber flexibel mit unterschiedlichem Tiefgang/Aufwand bewerkstelligt werden kann. So können auch andere methodische Ansätze, wie beispielsweise statistische Analysen, Expertenschätzungen, Wirkungsmodelle oder Simulationen in Ereignis- und/oder Fehlerbaumanalysen integriert werden. Dies ist einer der Gründe, warum sich diese Methoden für die vorliegende Fragestellung eignen.

Um die geforderten praktischen Umsetzungsaspekte, d.h. die selbständige Durchführung des Verfahrens durch die Verkehrsunternehmen ohne Einbezug von Risikoanalyse-Spezialisten, ermöglichen zu können, ist jedoch eine pragmatische Methode zu wählen, für deren Umsetzung Basis-Kenntnisse zu Risikoanalyseverfahren, nicht aber spezifisches vertieftes Hintergrundwissen erforderlich sind. Die Erfüllung dieser Anforderungen bedingt weiter, dass keine komplexen (und aufwendigen) Modelle wie beispielsweise Ausbreitungs- / Wirkungs-Modelle, Simulationen oder ähnliche Elemente zwingend Teil des Ver-

fahrens sind. Trotzdem soll die Methode gewährleisten, dass eine systematische und strukturierte Abschätzung der Risiken erfolgt, welche die wesentlichen risikorelevanten Einflussgrößen des Systems berücksichtigt.

Für die vorliegende Fragestellung stehen mehrere quantitative Verfahren zur Verfügung. Komplexe und damit i.d.R. auch aufwändigere Verfahren kommen dabei aber aufgrund der festgelegten Anforderungen (Kapitel 4.3.1) nicht in Betracht.

4.3.4 Risikodarstellung und Risikobewertung

Die Darstellung der ermittelten Risiken ist in der Praxis ebenfalls unterschiedlich. Zusammenfassend können die wichtigsten Darstellungsarten unterteilt werden in:

- (1) Bestimmung des Risikos in Form einer Kenngröße bzw. eines (Risiko-) Wertes für individuelle Risiken (z.B. Sterbewahrscheinlichkeit einer Person von 10^{-5} pro Jahr infolge einer Aktivität) oder kollektive Risiken (z.B. Schadenserwartungswert von 0,01 Todesopfern pro Jahr oder 10^{-7} Todesopfer pro Zug-km).
- (2) Darstellung Risikomatrix (analog Bild 9), aber unter Verwendung quantitativer Klassen für Häufigkeiten und Schadensausmaß)
- (3) Darstellung als Summenkurve in einem Häufigkeits-Schadensausmaß-Diagramm (Bild 5)
- (4) Kosten-Wirksamkeits-Diagramm (Bild 14)

Für die Risikobewertung gelangen verschiedene methodische Elemente zum Einsatz. Die wichtigsten sind:

- (1) Festlegung von Grenzwerten für maximale Ereignishäufigkeiten oder maximale Schadensausmaße (keine Risikobewertung im eigentlichen Sinn).
- (2) Festlegung von Grenzwerten für das maximale Risiko. Dies kann z.B. als Grenzwert von Risikowerten oder in Häufigkeits-Schadensausmaß-Diagrammen mit Akzeptanzbereichen / -linien umgesetzt werden (Bild 8). In der Praxis zeigt sich immer wieder, dass die Festlegung von noch akzeptablen Risiken meist zu intensiven Diskussionen führt.

(3) Kosten-Wirksamkeits-Untersuchungen

Um die Forderung der methodischen Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der Kosten von Maßnahmen erfüllen zu können, ist zwingend die Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung einzubeziehen (Kapitel 6). Dies bedingt, dass ein monetarisiertes Risiko ermittelt werden muss.

In der Praxis werden teilweise auch hier Kombinationen angewandt, z.B. die Verknüpfung von absoluten Risikoakzeptabilitätskriterien und Kosten-Wirksamkeits-Betrachtungen in einem Häufigkeits-Schadensausmaß-Diagramm mit einem Übergangsbereich (Bild 5).

4.3.5 Schlussfolgerungen

Für das zu entwickelnde Risikoanalyseverfahren wird aufgrund der festgelegten Anforderungen (Kapitel 4.3.1) folgender Ansatz vorgeschlagen:

(1) Risikoanalyse

Für das Verfahren zur Risikoanalyse wird die Abschätzung der monetarisierten Risiken auf Basis einer Ereignisbaumanalyse vorgeschlagen. Die erforderlichen Angaben (z.B. Initialereignis, Schadensausmaß) sollen bei der Umsetzung durch die Verkehrsunternehmen auf der Grundlage der bereits dort verfügbaren Daten durch ein Expertenteam abgeschätzt werden. Als unterstützende Grundlage hierzu dienen Auswertungen von Statistiken und Literaturdaten sowie die Angaben aus den Fragebögen (Kapitel 3.3).

(2) Risikobewertung

Die Risikobewertung kann grob in zwei Ansätze unterteilt werden:

a) Festlegung von absoluten Grenzwerten

Ein System ist dann als sicher zu betrachten, wenn die ermittelten Risiken einen festgelegten Wert nicht überschreiten.

b) Verhältnismäßigkeitsprinzip

Ein System ist sicher, wenn alle verhältnismäßigen Maßnahmen ergriffen wurden.

Es wird vorgeschlagen, die Risikobewertung auf dem Prinzip der Verhältnismäßigkeit abzustützen und keine Bewertung mithilfe von absoluten Akzeptabilitätskriterien durchzuführen, da die Definition entsprechender Kriterien einen breiten Konsens aller beteiligten Partner erfordert, der erfahrungsgemäß nur schwierig zu erreichen ist. Darüber hinaus besteht bei der Festlegung von absoluten Akzeptanzkriterien das Problem, dass auch bei Einsatz umfangreicher Zusatzmaßnahmen die vorgegebenen Kriterien u.U. nicht eingehalten werden können.

Um die verschiedenen Risikoarten (Personenrisiken, Sachwertrisiken) miteinander vergleichen bzw. summarisch berücksichtigen zu können, wird vorgeschlagen, mit Hilfe von Grenzkosten (Kapitel 5.5) monetarisierte Risiken zu ermitteln und mittels einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung (Kapitel 6) die Verhältnismäßigkeit zu bestimmen. Mit der Festlegung der dazu erforderlichen Grenzkosten werden implizit auch die Bewertungskriterien des (kollektiven) Risikos festgelegt.

(3) Maßnahmenplanung

Zur Untersuchung der Zweckmäßigkeit bzw. der Verhältnismäßigkeit von zusätzlichen Maßnahmen wird eine Bewertung mittels Kosten-Wirksamkeits-Analyse vorgeschlagen. Die risikomindernde Wirkung von Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen kann wiederum durch eine Ereignisbaumanalyse ermittelt werden. Die Bestimmung der Maßnahmenkosten erfolgt mittels der zugehörigen Jahreskosten (Annuitätenmethode) (Kapitel 7).

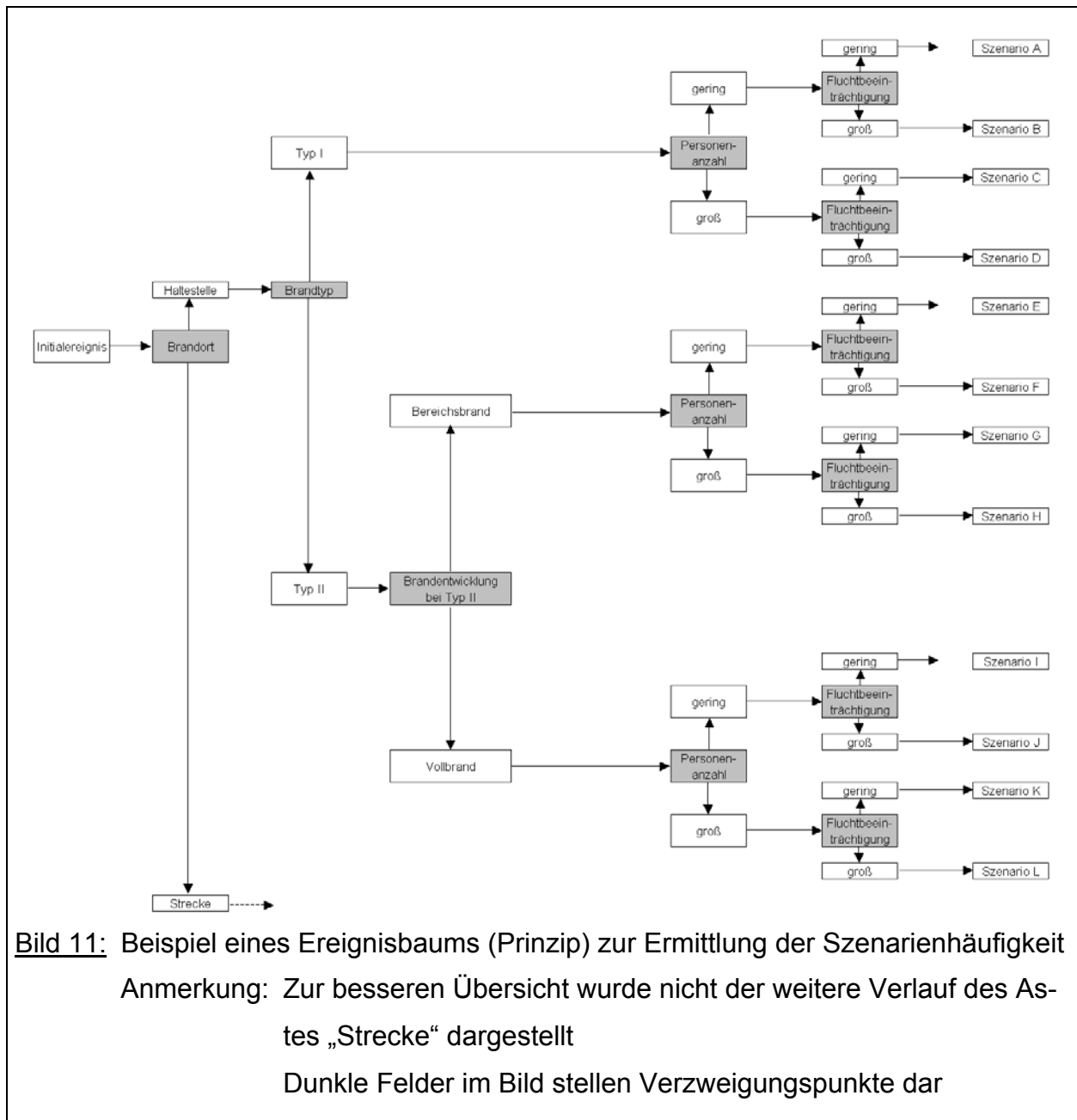
5 Ereignisbaumanalyse für Brandereignisse in Tunnelanlagen

5.1 Allgemeines

Bei einer Ereignisbaumanalyse werden Ereignisse (z.B. Brände in Tunnelanlagen) in einem sogenannten Ereignisbaum quantitativ dargestellt. Die Eingangsgröße in den Ereignisbaum ist die Häufigkeit des Initialereignisses [Zugbrände pro Jahr in einem Tunnelabschnitt] (Kapitel 5.2). Der Ereignisbaum selbst hat mehrere Verzweigungspunkte, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeit des je-

weiligen Szenarios abgeschätzt wird. Die Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten in jedem Verzweigungspunkt beträgt 100 %.

Jeder Ast des Ereignisbaums bildet ein mögliches Szenario ab. Am Ende eines jeweiligen Astes erhält man für dieses Szenario die entsprechende Szenarienhäufigkeit (Bild 11).



Zu beachten ist, dass alle maßgebenden Verzweigungspunkte für die Szenarienbestimmung identifiziert und im Ereignisbaum unter Berücksichtigung der Einflussgrößen (Kapitel 5.3) abgebildet werden. Im Verzweigungspunkt Brandort

müssen beispielsweise die Eintrittswahrscheinlichkeiten aufgrund der Fragebogenaktion (Kapitel 3.3) für die beiden Brandorte (Haltestelle und Streckentunnel) abgeschätzt werden.

Folgt man dem jeweiligen Ast im Ereignisbaum weiter, so kommt man zum nächsten Verzweigungspunkt, z.B. Brandtyp und schätzt wiederum die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Brandtyp (Brandtyp I oder II) ab.

Durch Multiplikation der Häufigkeit des Initialereignisses mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten in allen Verzweigungspunkten entlang eines Astes des Ereignisbaums erhält man an jedem Astende die Häufigkeit des jeweiligen Szenarios (Szenarienhäufigkeit) (Tabelle 9, Spalte 7) (Kapitel 7). Die Multiplikation dieser Szenarienhäufigkeit [Brände pro Jahr] mit dem gewählten Schadensausmaß [z.B. Tote pro Brand] ergibt das Risiko [Tote pro Jahr]. Das monetarisierte Risiko kann mit Hilfe der Grenzkosten (Kapitel 5.5) z.B. € je geretteten Menschenleben bestimmt werden. Mit Hilfe des monetarisierten Risikos [€ pro Jahr] kann eine Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung durchgeführt werden (Kapitel 6 und 7), die Auskunft darüber gibt, ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen sinnvoll sind oder nicht.

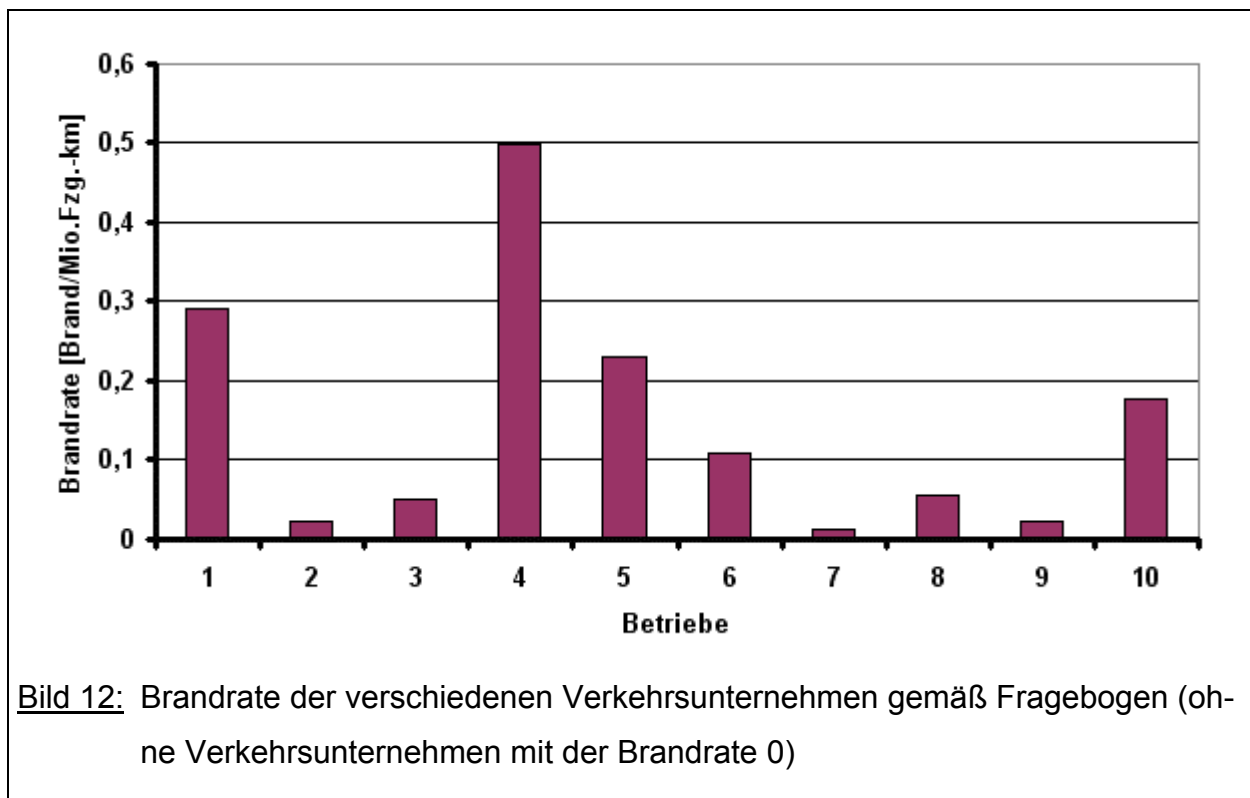
5.2 Brandrate und Initialereignis

Die Brandrate der verschiedenen Verkehrsunternehmen ist sehr unterschiedlich (Bild 12).

Aus den Daten der vorliegenden Fragebögen (Kapitel 3.3) wurde die mittlere Brandrate ermittelt. Separate Brandraten für Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle) und Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel) werden nicht bestimmt, da die vorliegende Datenmenge sehr gering ist.

Die mittlere Brandrate [Brände pro Mio. Zug-Kilometer im Tunnel] für die Brandorte Haltestelle und Streckentunnel lässt sich aus der Summe der Brandereignisse in den letzten 10 Jahren, dividiert durch die Gesamt-Fahrleistung der Verkehrsunternehmen im Tunnel pro Jahr (ca. 111.254.000 Zug-km pro Jahr) berechnen. Von den insgesamt 97 in der Fragebogenaktion erfassten Bränden konnten für die Berechnung der mittleren Brandrate 73 Brände herangezogen

werden, da bei den restlichen 24 Bränden ein eindeutiger Bezug zur Zug-Kilometerleistung nicht möglich war (Kapitel 3.3).



Die mittlere Brandrate kann wie folgt ermittelt werden:

$$\frac{73 \text{ Brände}}{111.254 \text{ Mio Zug - km /Jahr} \times 10 \text{ Jahre}} = 0,0656 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug - km}}$$

Für 8 der 18 Verkehrsunternehmen konnte die Brandrate zu 0 ermittelt werden. Die Brandraten der einzelnen Verkehrsunternehmen reichen in den ausgewerteten 10 Jahren von 0 bis ca. 0,5 Brände pro Millionen Zugkilometer im Tunnel.

Die mit Hilfe der Fragebogenaktion ermittelte mittlere Brandrate von ca. $6,6 \times 10^{-8}$ Bränden pro Zugkilometer entspricht in der Größenordnung in etwa der Brandrate die bei Risikoanalysen für den Lötschberg-Basistunnel bzw. das Fernbahn-Streckennetz der SBB verwendet wurden, welche im Bereich von ca. $1 \text{ bis } 3 \times 10^{-8}$ Bränden pro Zugkilometer liegen (Kapitel 4.2.2, Abschnitt (6)). Hierbei muss beachtet werden, dass die für die Schweiz angegebenen Brandraten für andere Randbedingungen (z.B. freie Strecke des Fernverkehrs) gelten.

Jedes Verkehrsunternehmen sollte für seinen Betrieb die jeweilige Brandrate ermitteln, wenn eine quantitative Risikoanalyse durchgeführt werden soll. Verkehrsunternehmen ohne bisherigen Zugbrand (Brandrate = 0) sollten die mittlere Brandrate verwenden. Wenn hiervon abgewichen wird, dann muss das jeweilige Expertenteam des Verkehrsunternehmens dies begründen.

Mit der Brandrate kann die Häufigkeit des Initialereignisses (z.B. Anzahl von Bränden in einem Tunnelabschnitt pro Jahr) berechnet werden, die als Eingangsgröße im Ereignisbaum der Risikoanalyse benötigt wird.

Beim Initialereignis handelt es sich um die für einen bestimmten Tunnelabschnitt zu erwartende Häufigkeit, mit welcher ein Zugbrand auftritt. Die Häufigkeit des Initialereignisses kann wie folgt berechnet werden:

Häufigkeit des Initialereignisses = Brandrate x betrachtete Tunnellänge x Anzahl der verkehrenden Züge pro Zeiteinheit

5.3 Einflussgrößen zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten in den Verzweigungspunkten des Ereignisbaums

5.3.1 Brandort

Am ersten Verzweigungspunkt des Ereignisbaums (Bild 11) muss die Wahrscheinlichkeit bezüglich des Brandortes festgelegt werden.

Die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein brennender Zug in der Tunnelstrecke oder in einer unterirdischen Haltestelle zum Stehen kommt, hängt beispielsweise von folgenden Einflussfaktoren ab:

(1) Streckentunnellänge zwischen zwei unterirdischen Haltestellen

Je größer der Abstand zwischen zwei unterirdischen Haltestellen bzw. zwischen Haltestelle und Tunnelportal ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch ein Zug brennend im Streckentunnel liegen bleiben kann.

(2) Zugeigenschaften

Alle Maßnahmen, die die Lauffähigkeit des Zuges auch bei einem Brand aufrecht erhalten, sowie eine funktionsfähige Notbremsüberbrückung verringern die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug brennend im Streckentunnel liegen bleibt.

(3) Betriebliche Situation

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug brennend im Streckentunnel liegen bleibt, wird reduziert, wenn im Streckentunnelabschnitt kein Haltesignal (planmäßiger Halt) und auch keine Weiche (Entgleisungsgefahr) angeordnet sind.

Aufgrund der Notbremsüberbrückung und der Dienstanweisung an den Triebfahrzeugführer, bei einem Brandfall nach Möglichkeit nicht im Streckentunnel zu halten, sondern bis zur nächsten Station weiterzufahren, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein brennender Zug im Streckentunnel liegen bleibt, nur gering.

5.3.2 Brandtyp

Am zweiten Verzweigungspunkt des Ereignisbaums (Bild 11) muss die Wahrscheinlichkeit hinsichtlich des Brandtyps angegeben werden. Folgende Brandtypen werden unterschieden:

(1) Brandtyp I

Lokale Branderscheinungen oder Brände, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **keine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen (z.B. verschmorte Leitungen, Branderscheinungen in Gerätekästen).

(2) Brandtyp II

Brände, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **eine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen.

Die Wahrscheinlichkeit dafür, welcher Brandtyp entsteht, hängt unter anderem von folgenden Punkten ab:

- (1) Zugmaterial (z.B. Brandlast, Entzündbarkeit des Materials)
- (2) Zugausstattung (z.B. Löschanlage, Detektion, Überwachung der Technik)
- (3) Besetzungsgrad des Zuges
- (4) Brandursachen

Als Brandursachen sind technische Defekte und Brandstiftungen möglich. Beispielsweise kann in den verkehrsaarmen Zeiten unbemerkt ein größeres Zündinital im Zug von Brandstiftern positioniert und in Brand gesetzt werden. Jedoch sind in diesen Zeiten aufgrund des geringeren Personenaufkommens auch nur wenige Personenschäden möglich. Ein größerer Sachschaden hingegen kann nicht ausgeschlossen werden. In den anderen Verkehrszeiten sind größere Brände infolge einer Brandstiftung weniger wahrscheinlich, da der Brand von Fahrgästen schnell entdeckt und zügig Löschmaßnahmen eingeleitet werden können.

5.3.3 Brandentwicklung

Am dritten Verzweigungspunkt muss die Wahrscheinlichkeit bezüglich der Brandentwicklung nur beim Brandtyp II angegeben werden. Für den Brandtyp I wird keine unterschiedliche Brandentwicklung angesetzt.

Es wird angenommen, dass sich der Brandtyp II entweder nur auf einen gewissen Bereich ausdehnen kann (Bereichsbrand) oder aber sich zum Vollbrand entwickelt. Der Unterschied zwischen einem Bereichs- und Vollbrand besteht in erster Linie in der Höhe des zu erwartenden Sachschadens. Bei einem Vollbrand ist der Sachschaden größer.

Diese Brandentwicklung ist beim Brandtyp II unter anderem von folgenden Parametern abhängig:

- (1) Zugmaterialien (z.B. Größe der Brandlast)
- (2) Brandursache (z.B. technischer Defekt, Brandstiftung)
- (3) Besetzungsgrad des Zuges

Bei einem geringen Besetzungsgrad ist eine schnelle Brandentdeckung weniger wahrscheinlich als bei einem normalen und hohen Besetzungsgrad.

- (4) Zugausstattung (z.B. Löschanlage, Detektion, Überwachung der Technik)

- (5) Abmessungen des Zuges (z.B. maximale Länge des durchgängigen Zugteils)

Bei einem langen durchgängigen Zug ist eine Brandausbreitung über den gesamten durchgängigen Zugteil möglich. Bei Zügen mit mehreren vergleichsweise kurzen Fahrzeugen kann davon ausgegangen werden, dass für die Dauer der Selbstrettung kein Feuerübersprung auf die benachbarten Fahrzeuge stattfindet.

- (6) Eingreifen der Feuerwehr

Bei einem schnellen Eingreifen der Feuerwehr werden die Brandentwicklung und die Brandausbreitung bereits frühzeitig eingedämmt.

5.3.4 Personenanzahl

Am vierten Verzweigungspunkt muss die Wahrscheinlichkeit hinsichtlich der zu erwartenden Personenzahl angegeben werden.

Je nach Zeitpunkt des Ereignisses ergibt sich eine unterschiedliche Personexposition und damit eine verschiedene Anzahl von gefährdeten Personen. Das Personenaufkommen ist unter anderem von folgenden Einflussparametern abhängig:

- (1) Tagesganglinien der Personenbeförderung

Im Berufsverkehr werden in der Regel mehr Personen befördert. Bei einem Brandereignis sind in dieser Zeit mehr Personen gefährdet als außerhalb der Verkehrsspitzen.

- (2) Lage der Haltestelle und der angrenzenden Streckentunnel

Haltestellen im Stadtkern werden häufig von mehr Fahrgästen aufgesucht als Haltestellen am Stadtrand. Insbesondere muss mit einem hohen Personenaufkommen an Haltestellen mit Umsteigemöglichkeit gerechnet werden.

Darüber hinaus werden Haltestellen von vielen Personen benutzt, wenn in der Haltestellennähe Veranstaltungsorte liegen (z.B. Stadien, Messegelände, Veranstaltungshäuser). Die erhöhte Personendichte in den Zügen gilt in diesen Fällen auch für die angrenzenden Streckentunnel.

(3) Betriebliche Störungen

Durch betriebliche Störungen (z.B. Verspätung oder Ausfall eines Zuges) kann es auf den Bahnsteigen zu einer größeren Personendichte kommen. Auch werden verspätet eintreffende Züge eine hohe Personenbelegung haben.

Die maßgebende Personenzahl auf Bahnsteigen kann mit Hilfe zweier Verfahren des Eisenbahnbundesamtes überschlägig ermittelt werden [41], wenn keine geeigneten Daten (z.B. Zählungen, Prognosen) vorliegen:

(1) Zugbesetzung

$$P_{\max} = n (P_1 + P_2) + P_3$$

Die einzelnen Parameter haben folgende Bedeutung:

n = Zahl der Gleise am Bahnsteig

P_1 = Zulässige Sitzplätze der längsten gleichzeitig am Bahnsteig haltenden Zugeinheit(en)

P_2 = Zulässige Stehplätze der längsten gleichzeitig am Bahnsteig haltenden Zugeinheit(en)

P_3 = 30 % aus der Summe $P_1 + P_2$

(2) Bahnsteigfläche

$$P_{\max} = 3 \text{ Personen/m}^2 \text{ anrechenbarer Bahnsteigfläche}$$

Die anrechenbare Bahnsteigfläche ergibt sich wie folgt:

Anrechenbare Bahnsteigfläche = Bahnsteiglänge x anrechenbare
Bahnsteigbreite

Anrechenbare Bahnsteigbreite = Bahnsteigbreite abzüglich:

a) Möblierungszone (10 % der Bahnsteigfläche)

b) 50 cm Sicherheitsstreifen je Bahnsteigkante

5.3.5 Fluchtbeeinträchtigung

Am fünften Verzweigungspunkt muss die Wahrscheinlichkeit bezüglich der Fluchtbeeinträchtigung angegeben werden.

Je nach den ortsspezifischen Verhältnissen sind die Möglichkeiten zur Flucht für gefährdete Personen unterschiedlich. Folgende Parameter können die Flucht in der **Haltestelle** beeinträchtigen:

(1) Form der Treppenhäuser

Bei einem V-förmigen Treppenhaus besteht die Gefahr, dass bei einem Zugbrand die nah beieinander auf dem Bahnsteig liegenden Treppenfußpunkte verrauchen, so dass keine der beiden Treppenanlagen benutzbar ist. Eine geringere Fluchtbeeinträchtigung ist daher möglicherweise gegeben, wenn die Treppenaufgänge an den Kopfenden der Haltestellen angeordnet sind.

Bei einem A-förmigen Treppenhaus liegen die Treppenfußpunkte auf dem Bahnsteig weit auseinander. Die Enden der beiden Treppenanlagen münden jedoch auf einen gemeinsamen Gang. Wenn in diesem Fall die Möglichkeit besteht, dass ein Treppenaufgang verraucht, dann ist der gemeinsame Gang ebenfalls nicht mehr passierbar. Dies bedeutet, dass beide Treppenaufgänge im Brandfall nicht mehr zur Flucht genutzt werden können.

(2) Besondere Fahrgastgruppen

Die Flucht kann auch beeinträchtigt werden, wenn z.B. die Haltestelle von vielen Personen mit Kinderwagen, von mehreren Rollstuhlfahrern oder von vielen Personen mit Fahrrädern oder mit schwerem Gepäck (z.B. U-Bahnlinie zum Flughafen) genutzt wird.

(3) Fahrtreppen

Die Flucht kann behindert werden, wenn die Treppenanlagen nur eingeschränkt benutzbar sind, da z.B. Reparaturen an Fahrtreppen durchgeführt werden und die Fahrtreppen deshalb nicht benutzbar sind.

(4) Orientierung in der Haltestelle

Die Flucht kann beeinträchtigt werden, wenn das Haltestellenbauwerk unübersichtlich ist und die Fliehenden Probleme haben, einen rettenden Ausgang zu finden.

(5) Geometrie des Haltestellenbauwerks

Haltestellen mit geringer Deckenhöhe und aufgrund der Örtlichkeit nur eingeschränkten Rauchabzugsmöglichkeiten können im Brandfall schneller verrauchen. Durch die Brandgase werden die Sicht und damit die Fluchtmöglichkeit beeinträchtigt. Die jeweilige Situation in einer bestimmten Haltestelle kann durch einen Vergleich der Räumungszeit mit der Verrauchungszeit analysiert werden. Wenn die Räumungszeit nahezu gleich lang oder länger als die Verrauchungszeit ist, besteht die Gefahr, dass Personen auf ihrer Flucht durch Brandgase gefährdet werden können.

(6) Personenanzahl

Die Fluchtmöglichkeit wird bei einer großen Personenanzahl im Zug und auf dem Bahnsteig erschwert.

Im **Streckentunnel** beeinflussen folgende Parameter die Flucht:

- (1) Der Weg zu den Notausstiegen (Notgehweg) ist deutlich schmaler als die Rettungswege in der Haltestelle.
- (2) Die Beleuchtungsstärke ist im Vergleich zur Haltestelle geringer.
- (3) Der Ausstieg aus dem Fahrzeug ist erschwert (in der Regel nicht niveaugleich).
- (4) Das Umfeld ist fremd für die Fahrgäste.
- (5) Die Wege für flüchtende Fahrgäste aus dem Streckentunnel sind länger.
- (6) Es können sich Personenstaus insbesondere beim Ausstieg aus dem Zug und auf dem Notgehweg parallel zum Zug bilden.
- (7) Insbesondere für spezielle Personengruppen (z.B. Rollstuhlfahrer, Personen mit Kinderwagen) ist der Ausstieg aus dem Zug im Streckentunnel und die anschließende Flucht beschwerlich. Hierdurch wird auch die Flucht der übrigen Personen erschwert.
- (8) Die Flucht wird erleichtert, wenn nicht nur der Notgehweg, sondern auch der Gleisbereich begehbar ist. Voraussetzung hierfür ist, dass der Betrieb im betroffenen Streckenabschnitt eingestellt wurde.
- (9) Bei einem 2-gleisigen Tunnel sind die Fluchtbedingungen aufgrund des größeren Volumens (höheres Rauchspeichervolumen) und der besseren

Platzverhältnisse (z.B. zwei Notgehwege oder Sicherheitsraum in der Mitte zwischen den Gleisen) günstiger als bei 1-gleisigen Tunneln.

- (10) Die geringeren Bauwerkshöhen im Streckentunnel können zu einer schnellen Verrauchung führen.
- (11) Falls Notausstiege im betroffenen Streckenabschnitt auf der Flucht benutzt werden, sind die dortigen Treppenanlagen beschwerlicher zu begehen, da sie im Vergleich zu Treppenanlagen in Haltestellen möglicherweise steiler und schmaler sind. Eine Flucht im Notausstieg ohne Behinderungen durch Brandgase wird erleichtert, wenn Rauchschutztüren den Raucheintritt in den Notausstieg erschweren.

5.4 Schadensausmaßklassen

Durch Multiplikation der Szenarienhäufigkeit [Brände pro Jahr] (Kapitel 5.1) und des Schadensausmaßes [z.B. Tote pro Brand] wird das Risiko [z.B. Tote pro Jahr] bestimmt.

Beim Schadensausmaß wird zwischen verschiedenen Schadensindikatoren unterschieden:

- (1) Todesopfer,
- (2) Verletzte und
- (3) Sachschäden

Für die Schadensindikatoren „Todesopfer“ und „Verletzte“ werden für eine pragmatische Bestimmung des Risikos verschiedene Schadensklassen definiert (Tabellen 5 und 6). Mit Hilfe von Berechnungsfaktoren wird in Abhängigkeit von der Schadensklasse das Schadensausmaß durch ein Expertenteam des Verkehrsunternehmens festgelegt. Für Sachschäden werden keine Schadensklassen vorgegeben. Vielmehr sollen hier die tatsächlich zu erwartenden Sachschäden in Ansatz gebracht werden.

Bei den Schadensklassen für den Schadensindikator Todesopfer wurden niedrige Werte gewählt, da es bis heute in Deutschland noch kein Brandereignis in Tunneln des schienengebundenen ÖPNV gegeben hat, bei dem Todesopfer zu beklagen waren.

Schadens- klasse	Todesopfer	
	Anzahl	Berechnungsfaktor für Schadensklasse
1	0	0
2	1	1
3	2 bis 5	3
4	6 bis 10	8
5	ab 11	15

Tabelle 5: Schadensklassen für den Schadensindikator Todesopfer

Schadens- klasse	Verletzte	
	Anzahl	Berechnungsfaktor für Schadensklasse
1	0	0
2	1	1
3	2 bis 5	3
4	6 bis 10	8
5	11 bis 20	15
6	21 bis 40	30
7	ab 41	60

Tabelle 6: Schadensklassen für den Schadensindikator Verletzte

In [42] sind Werte mit Bezug auf den schienengebundenen Fernverkehr angegeben:

- (1) Mittlere Auswirkungen: 3 Todesopfer
- (2) Schwere Auswirkungen: 30 Todesopfer
- (3) Katastrophale Auswirkungen: 300 Todesopfer

Diese deutlich höheren Werte können jedoch nicht für die vorliegende Arbeit herangezogen werden, da die Geschwindigkeit der Züge und die Fahrgastanzahl bei Fernbahnen deutlich höher sind als im schienengebundenen ÖPNV.

5.5 Grenzkosten

5.5.1 Allgemeines

Unter Grenzkosten werden die Kosten für Schutzmaßnahmen verstanden, die eine Gesellschaft bzw. ein Inhaber oder Betreiber einer Anlage maximal bereit ist zu investieren, um Schäden (z.B. Todesfälle, Verletzte, Sachschäden) zu verhindern. Bewertet wird dabei nicht z.B. der Wert eines Menschenlebens an sich, sondern die Bereitschaft und die finanzielle Möglichkeit, Schäden zu verhindern. Dies entspricht dem Grenzkostenkonzept, nach dem Aufwendungen für Sicherheitsmaßnahmen bis zu einem bestimmten Grenzbetrag als verhältnismäßig angesehen werden [43].

Die Grenzkosten umfassen verschiedene Elemente, welche letztlich die Zahlungsbereitschaft bestimmen:

- (1) Das erste Element beinhaltet die unmittelbaren Schäden, die bei einem Unfall verursacht werden (z. B. Sachschäden, Betriebsausfälle, Haftungsschäden). Sie stellen einen minimalen Schaden dar, den es aus betriebswirtschaftlicher Sicht mit Sicherheitsmaßnahmen zu verhindern gilt.
- (2) Das zweite Element enthält die volkswirtschaftlichen Folgekosten, die aus einer Schädigung entstehen. Hier wird davon ausgegangen, dass z.B. der Verlust eines Menschenlebens auch mit einem volkswirtschaftlichen Schaden verbunden ist. Der volkswirtschaftliche Ansatz liefert einen Mindestwert, den die Allgemeinheit für Sicherheitsmaßnahmen auszugeben bereit ist, unabhängig von der Art der Gefahr.
- (3) Das dritte Element geht über die erwähnten betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten hinaus und umfasst die zusätzliche Bereitschaft der Allgemeinheit, Schäden durch Sicherheitsmaßnahmen zu minimieren. Dabei spielen verschiedene weitere Faktoren eine Rolle, so beispielsweise die Frage, ob es sich um freiwillig oder eher unfreiwillig eingegangene Gefahrensituationen handelt.

Grenzkosten werden benötigt, um Risiken monetarisieren zu können. Durch z.B. Multiplikation des Risikos [Tote pro Jahr] mit den zugehörigen Grenzkosten [€ pro Tote] erhält man das monetarisierte Risiko in € pro Jahr. Mit Hilfe des monetarisierten Risikos kann eine Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung durch-

geführt werden (Kapitel 6). Die Höhe der jeweiligen Grenzkosten legt weitgehend das Sicherheitsniveau fest. Je höher sie sind, desto mehr und aufwendigere Sicherheitsmaßnahmen sind zu ergreifen. Die Festlegung der Höhe der Grenzkosten ist deshalb eine der zentralen Fragen bei der Bewertung von Risiken.

5.5.2 Recherchen zu Grenzkosten

Die Festlegung der Höhe von Grenzkosten hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Vereinfachend können drei Arten unterschieden werden, wie die Höhe der Grenzkosten ermittelt werden kann:

(1) Ermittlung der Grenzkosten anhand von Maßnahmenkosten

Über die effektiv verwendeten Mittel zur Risikominderung in einem System kann abgeschätzt werden, wie groß die Zahlungsbereitschaft für die Verhinderung einer Schadenseinheit ist.

(2) Ermittlung der Grenzkosten anhand von Schadenskosten

Über die Höhe der angefallenen direkten und indirekten Kosten von Ereignissen können die Grenzkosten abgeschätzt werden. Schwierig ist die genaue Erfassung von indirekten Kosten.

(3) Erhebungen zur Zahlungsbereitschaft

Dieser dritte Ansatz basiert auf Befragungen (Studien: "Was ist man bereit zu bezahlen").

Die Höhe der Grenzkosten ist davon abhängig, ob die damit verbundenen Risiken „freiwillig“ (geringer Grenzkostenbetrag) oder „unfreiwillig“ (hoher Grenzkostenbetrag) eingegangen werden. Die angesetzten Grenzkosten steigen mit der Höhe der Risikokategorie und der zugehörigen Einschränkung des Selbstbestimmungsgrades. Es werden vier Risikokategorien unterschieden, die nachfolgend beispielhaft beschrieben werden [44]:

(1) Risikokategorie 1: Absolut freiwillig

Ein Bergsteiger begeht eine ihm bekannte, steinschlaggefährdete Route und wird von einem Stein tödlich verletzt.

(2) Risikokategorie 2: Hohe Selbstbestimmung

Ein Bergsteiger wird auf einem gut ausgeschilderten, stark frequentierten Wanderweg im Aufstieg zu einer Hütte von einem Stein tödlich verletzt.

(3) Risikokategorie 3: Niedrige Selbstbestimmung

Ein Bergsteiger wird kurz außerhalb des Dorfes auf einer Landstraße von einem sich aus der Böschung lösenden Stein tödlich verletzt.

(4) Risikokategorie 4: Absolut unfreiwillig

Der Bergsteiger wird bei der Anfahrt zum Ausgangspunkt seiner Wanderung auf der nicht als steinschlaggefährdet bezeichneten Kantonsstraße im Postauto von einem Stein tödlich verletzt.

Bei dem Forschungsvorhaben zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln [45] wird beispielsweise das Szenario „Kollision“ der Risikokategorie 2 (Grenzkosten je geretteten Menschenleben 5 Mio. €) und das Szenario „Brand“ der Risikokategorie 3 (Grenzkosten 10 Mio. € je geretteten Menschenleben) zugeordnet (Tabelle 7). Auch in vielen anderen Quellen wurden die Grenzkosten mit Bezug auf die Risikokategorien festgelegt (Tabelle 7).

Einige umgesetzte oder beschlossene Sicherheitsmassnahmen im Bahnbereich können exemplarisch genannt werden (Bild 13):

(1) Englische Bahnen, Railway Safety:

a) Risikobetrachtung für die Einführung einer neuen Zugsicherung und Nachrüstung von Reisezugwagen (Anforderung der Aufsichtsbehörde).

b) Grenzkosten: rund € 16 Mio. je geretteten Menschenleben.

(2) Schweizerische Bundesbahnen, SBB:

a) Risikobetrachtung für die Ausrüstung von Streckenabschnitten mit der Zugsicherung ZUB (Anforderung der Aufsichtsbehörde).

b) Grenzkosten: 7 Mio. € je geretteten Menschenleben .

(3) Schweizerische Bundesbahnen, SBB:

a) Risikobetrachtung für Selbstrettungsmaßnahmen für bestehende Tunnel.

b) Grenzkosten: 25 Mio. € je geretteten Menschenleben.

lfd. Nr.	Grenzkosten je geretteten Menschenleben ca. [Mio. €]	Literatur	Bemerkung
1	0,5 - 1	[46, 47, 44, 45, 48, 49]	Risikokategorie 1: Absolut freiwillig
2	1 - 3	[44, 45, 48, 49]	Risikokategorie 2: Hohe Selbstbestimmung
3	3 – 6,5	[44, 44, 45, 48, 49]	Risikokategorie 3: Niedrige Selbstbestimmung
4	6,5 - 13	[50, 46, 44, 47, 44, 45, 48]	Risikokategorie 4: Absolut unfreiwillig
5	3	[50]	S-Bahn Zürich und Alp-Transit (RK 3) ¹⁾
6	6,5	[51]	Fernbahntunnel Gesamtrisiken
7	13	[51]	Fernbahntunnel Gefahrgutrisiken
8	2	[52]	Bahnverkehr
9	1,5 bzw. 4	[53]	Bahnverkehr, Werte gelten für einzelnes Todesopfer bzw. mehrere Todesopfer
10	16	[54]	Zugsicherung
11	0,5	[45]	EU / Straße (2000) (RK 2) ¹⁾
12	5	[45]	Kollision Straßentunnel (BASt) (RK 2) ¹⁾
13	10	[45]	Brand Straßentunnel (BASt) (RK 3) ¹⁾
14	1	[55]	Straßenverkehr (BASt)
15	1	[56]	Straßenverkehr
16	1	[57]	Straßenverkehr
17	1	[58]	Straßenverkehr
18	2	[59]	Straßenverkehr
19	2	[60]	Verkehrssicherheit
20	2	[60]	Verkehrssicherheit
21	2	[61]	Aufwendungen Verkehrssicherheit
22	2	[62]	Flugverkehr

¹⁾ RK = Risikokategorie

Tabelle 7: Zusammenstellung unterschiedlicher Grenzkostenansätze je geretteten Menschenleben (umgerechnet in Euro)

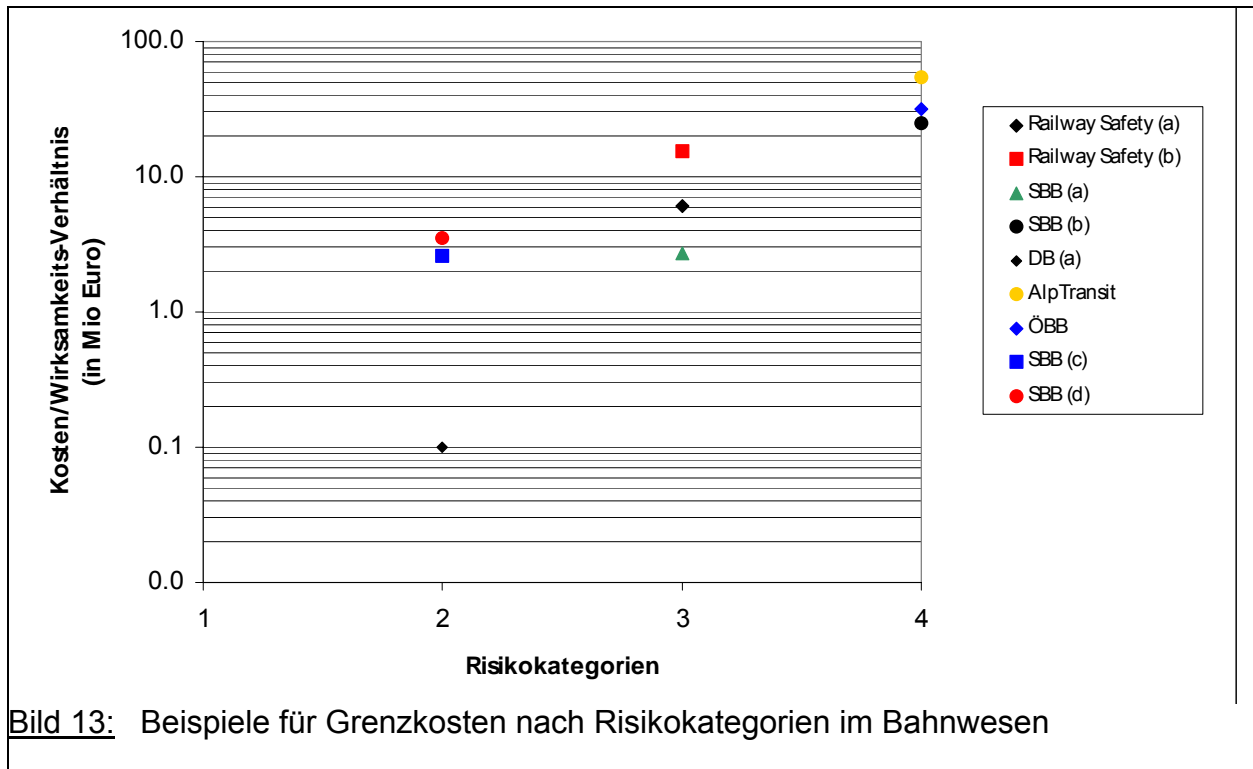


Bild 13: Beispiele für Grenzkosten nach Risikokategorien im Bahnwesen

(4) Deutsche Bahn, DB:

a) Risikobetrachtung für die Untersuchung zu Türverschlüssen an Reisezugwagen.

b) Grenzkosten: rund 0,1 Mio. € j je geretteten Menschenleben.

(5) AlpTransit Schweiz:

a) Risikobetrachtung für den Wechsel von einem zweigleisigen Tunnel auf ein Zwei-Einspursystem für einen Tunnel der neuen Alpentransversale (Anforderung der Aufsichtsbehörde).

b) Grenzkosten: Rund 55 Mio. € je geretteten Menschenleben.

(6) Österreich, ÖBB:

a) Risikobetrachtung für zusätzliche Notausstiege in Tunneln.

b) Grenzkosten: Rund 32 Mio. € je geretteten Menschenleben.

(7) Schweizerische Bundesbahnen, SBB:

a) Risikobetrachtung für die Sanierung von risikoreichen Bahnübergängen der Seetalbahn.

b) Grenzkosten: rund 2,5 Mio. € je geretteten Menschenleben.

(8) Schweizerische Bundesbahnen, SBB:

- a) Risikobetachtung für Bahnübergänge, mittlere Werte für Kosten und Risikoreduktion bei der Umrüstung eines unbewachten Bahnübergangs zu einem Bahnübergang mit Schranke.
- b) Grenzkosten: rund 3,5 Mio. € je geretteten Menschenleben.

Die in Tabelle 7 und Bild 13 aufgeführten Beispiele zeigen, dass sich für die unterschiedlichen Risikokategorien entsprechend unterschiedliche Grenzkosten aus den realen Aufwendungen für Sicherheitsmaßnahmen ableiten lassen. Innerhalb der einzelnen Risikokategorien sind aber auch teilweise erhebliche Bandbreiten erkennbar, da die angegebenen Werte teilweise auf unterschiedlichen Erhebungs- und Schätzmethode basieren. Dies ist bei einem direkten Vergleich zu berücksichtigen.

Bezüglich der Grenzkosten für **Verletzte und Sachschäden** konnten folgende Angaben der Literatur entnommen werden:

(1) Verletzte (Tabelle 8)

Die BAST-Info [55] unterscheidet Kostenansätze für Schwerverletzte (ca. 81.500 €) und für Leichtverletzte (ca. 3.650 €) im Straßenverkehr. Im BAST-Forschungsvorhaben [45] werden ähnliche Werte für Schwerverletzte (ca. 87.000 €) und für Leichtverletzte (ca. 3.750 €) angegeben. Mit Bezug auf Statistiken zu Verkehrsunfällen im Straßen- und Schienenverkehr leitet die KATARISK-Studie Grenzkosten von ca. 2.600 € bis ca. 200.000 € für verletzte Personen ab [63]. Aus diesen Angaben ergibt sich eine Spannweite für Grenzkosten von Verletzten von ca. 2.600 € bis 200.000 €.

(2) Sachschäden

Bei den Sachschäden sind die Grenzkosten nach [44] auch von den Risikokategorien abhängig:

- a) Risikokategorie 1 und 2: ca. 0,66 € pro 1 € Schaden
- b) Risikokategorie 3: ca. 2 € pro 1 € Schaden
- c) Risikokategorie 4: ca. 2,8 € pro 1 € Schaden

Im BAST-Forschungsvorhaben [45] wird bei den Sachschäden ein einheitlicher Wert von 3 € pro 1 € verhindertem Sachschaden in Straßentunneln

festgelegt. Dies entspricht in etwa den Grenzkosten der Risikokategorie 4 nach [44].

lfd. Nr.	Grenzkosten pro verletzte Person ca. [T€]	Quelle	Bemerkung
1	4	[55]	Leichtverletzte Straßenverkehr (BASt)
2	4	[45]	Leichtverletzte Straßenverkehr (BASt)
3	4	[56]	Leichtverletzte Straßenverkehr
4	4	[64]	Leichtverletzte Flugverkehr
5	6	[63]	Leichtverletzte Naturkatastrophen
6	44	[56]	Schwerverletzte Straßenverkehr
7	82	[55]	Schwerverletzte Straßenverkehr (BASt)
8	87	[45]	Schwerverletzte Straßenverkehr (BASt)
9	189	[63]	Schwerverletzte Naturkatastrophen
10	123	[64]	Schwerverletzte Flugverkehr
11	1.633	[64]	lebensbedrohlich Verletzte Flugverkehr
12	9	[66]	Verletzte durch Lawinenschäden
13	13	[58]	Verletzte Straßenverkehr
14	2,6 bis 200	[63]	Verletzte Straßen- und Schienenverkehr

Tabelle 8: Zusammenstellung unterschiedlicher Grenzkostenansätze pro verletzter Person (umgerechnet in Euro)

5.5.3 Empfehlungen für die Höhe von Grenzkosten

Die Untersuchungen zu den verwendeten Grenzkostenansätzen zeigen, dass durch unterschiedliche Tätigkeiten (bzw. für unterschiedliche Risikokategorien) in der Praxis unterschiedlich hohe Werte für die Grenzkosten angesetzt werden. Je geringer der Selbstbestimmungsgrad und das unmittelbare Nutzempfinden, desto höhere Grenzkosten werden angesetzt. Die Analyse zeigt aber auch, dass die Wertebandbreiten innerhalb einer Risikokategorie erheblich schwanken können (Tabellen 7 und 8). Dies ist einerseits auf die Art der Ermittlung der Grenzkosten (Bestimmung a priori bzw. a posteriori), andererseits aber auch auf divergierende Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit von den jeweiligen Tätigkeiten bzw. Themengebieten zurückzuführen. Dementsprechend lassen sich

für die im Rahmen der zu entwickelnden Methodik festzulegenden Grenzkosten keine wissenschaftlich "richtigen" Werte herleiten. Für die Festlegung der Grenzkosten sind deshalb Grenzkostenansätze für vergleichbare Tätigkeiten / Themenbereiche maßgebend. Im vorliegenden Fall wird vorgeschlagen, für den Bahnbereich die Risikokategorie 3 anzusetzen.

Es gibt keine allgemeingültigen Werte für die Grenzkosten. Auf Basis der vorliegenden Auswertungen werden jedoch folgende Empfehlungen für die Festlegung der Grenzkostenansätze gegeben:

(1) Grenzkosten für Todesopfer

Die Grenzkosten je geretteten Menschenleben unterscheiden sich sehr (Tabelle 7). Die Grenzkosten im Verkehrsbereich reichen nach Tabelle 7 von ca. 0,5 Mio. € bis ca. 16 Mio. € (Tabelle 7, Zeilen 10 und 11), was einem Faktor von ca. 32 entspricht.

Bezug nehmend auf die Kriterien der Risikokategorien kann der schienengebundene ÖPNV der Risikokategorie 3 zugeordnet werden, wo die Grenzkosten zwischen ca. 3 Mio. € und ca. 6,5 Mio. € liegen (Tabelle 7, Zeile 3).

Im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben ist es auf der Grundlage der Recherche sinnvoll, die Grenzkosten je geretteten Menschenleben mit 5 Mio. € festzulegen.

(2) Grenzkosten für Verletzte

Für verhinderte Verletzte variieren die Grenzkosten zwischen ca. 2.600 € und 200.000 € (Tabelle 8). Die Angabe von ca. 1,6 Mio. € aus dem Bereich der Luftfahrt für lebensbedrohlich verletzte Personen wird hierbei nicht weiter berücksichtigt. Für das vorliegende Forschungsvorhaben werden Grenzkosten je verhinderten Verletzten von 100.000 € vorgeschlagen.

(3) Grenzkosten für Sachschäden

Die Grenzkosten liegen für Sachschäden zwischen ca. 0,5 € und 3 € je verhinderten € Sachschaden. Für Sachschäden sollte entsprechend der Risikokategorie 3 und den Angaben aus [45] ein Mittelwert für die Grenzkosten von 2,5 € je € verhinderten Sachschaden gewählt werden.

6 Maßnahmenplanung auf Basis einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung

6.1 Grundlagen

Als Bewertungsgrundlage bzw. zur Beurteilung der Zweckmäßigkeit zusätzlicher Maßnahmen zur Risikominderung werden Kosten-Wirksamkeits-Betrachtungen genutzt.

Das vorgeschlagene Risikoanalyseverfahren zur Untersuchung von Brandereignissen in ÖPNV-Tunnelanlagen basiert auf einer Ereignisbaumanalyse (Kapitel 5.1). Die ermittelten Risiken können grundsätzlich auf verschiedene Weise ausgewiesen werden (z.B. monetarisiertes Risiko, bewertetes Risiko, Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm). Die Frage, welche Risiken akzeptiert bzw. nicht akzeptiert werden, ist damit aber noch nicht beantwortet. Die Frage "Welche Risiken werden in Kauf genommen bzw. sind weitere Maßnahmen vorzusehen?" ist deshalb im Rahmen der Risikobewertung explizit zu beantworten.

Wenn Risiken quantitativ ermittelt werden, sollten sie auch anhand quantitativer Kriterien beurteilt werden. Eine umfassende und aufwendige Risikoanalyse ist wenig sinnvoll, wenn anschließend mehr oder weniger intuitiv über zu treffende Maßnahmen entschieden wird. Zudem gilt es, zwischen der Beurteilungsmethodik und der zahlenmäßigen Festlegung der verwendeten Beurteilungskriterien zu unterscheiden. Während die Methodik strengen logischen Anforderungen zu genügen hat, ist die zahlenmäßige Festlegung der Kriterien subjektiv und kann nur im Konsens der Beteiligten erfolgen.

Der Gesamtschaden durch einen Brand in einer unterirdischen U-Bahn- bzw. Stadtbahn-Haltestelle lässt sich durch das kollektive Risiko ausdrücken. Dieser Wert entspricht dem statistischen Schadenserwartungswert (z. B. statistisch erwartete Zahl der Todesopfer pro Jahr).

Wie die Erfahrung zeigt, werden in der Praxis die Sicherheitsbemühungen zur Minderung der Risiken, welche von einem System oder einer Anlage ausgehen, stets nur bis zu einem gewissen Punkt vorgenommen. Damit wird deutlich, dass der Aufwand für Sicherheitsmaßnahmen und die als akzeptabel beurteilten Risiken in einem direkten Zusammenhang stehen. Diese Beziehung zwischen Maßnahmen, deren Kosten und der Risikominderung lässt sich in einem Diagramm mit den beiden Achsen „Risiko“ und „Kosten“ aufzeigen (Bild 14).

Jede Sicherheitsmaßnahme bzw. deren Kostenfolgen und ihre risikomindernde Wirkung lässt sich als Punkt im Diagramm darstellen. Werden alle Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen im Diagramm eingetragen, entsteht eine Punktwolke (Bild 14). Sie kann durch eine Kurve umfasst werden, so dass keine Maßnahme oder Maßnahmenkombination unterhalb der Kurve liegt. Diese untere Umhüllende hat eine spezielle Bedeutung. Alle Maßnahmen, die auf der Kurve liegen, sind aus Sicht der Kosten und der Wirksamkeit optimal, denn es gibt keine andere Maßnahme, die für den gleichen Geldbetrag das Risiko stärker reduziert. Beispielsweise liegt die Maßnahme M1 in Bild 14 auf der Umhüllenden. Mit den geringeren Kosten ΔK der Maßnahme M1 wird eine größere Risikoreduktion ΔR erreicht als beispielsweise mit der teureren Maßnahme M2. Typischerweise wird die Kurve mit zunehmendem Sicherheitsaufwand immer flacher, ihre Steigung erreicht aber nie Null, es sei denn, die Aktivität wird aufgegeben und somit das Risiko eliminiert. Damit wird deutlich, dass die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen bei abnehmendem Risiko immer geringer wird. Gleichzeitig nimmt der Aufwand für eine weitere Risikoreduktion zu.

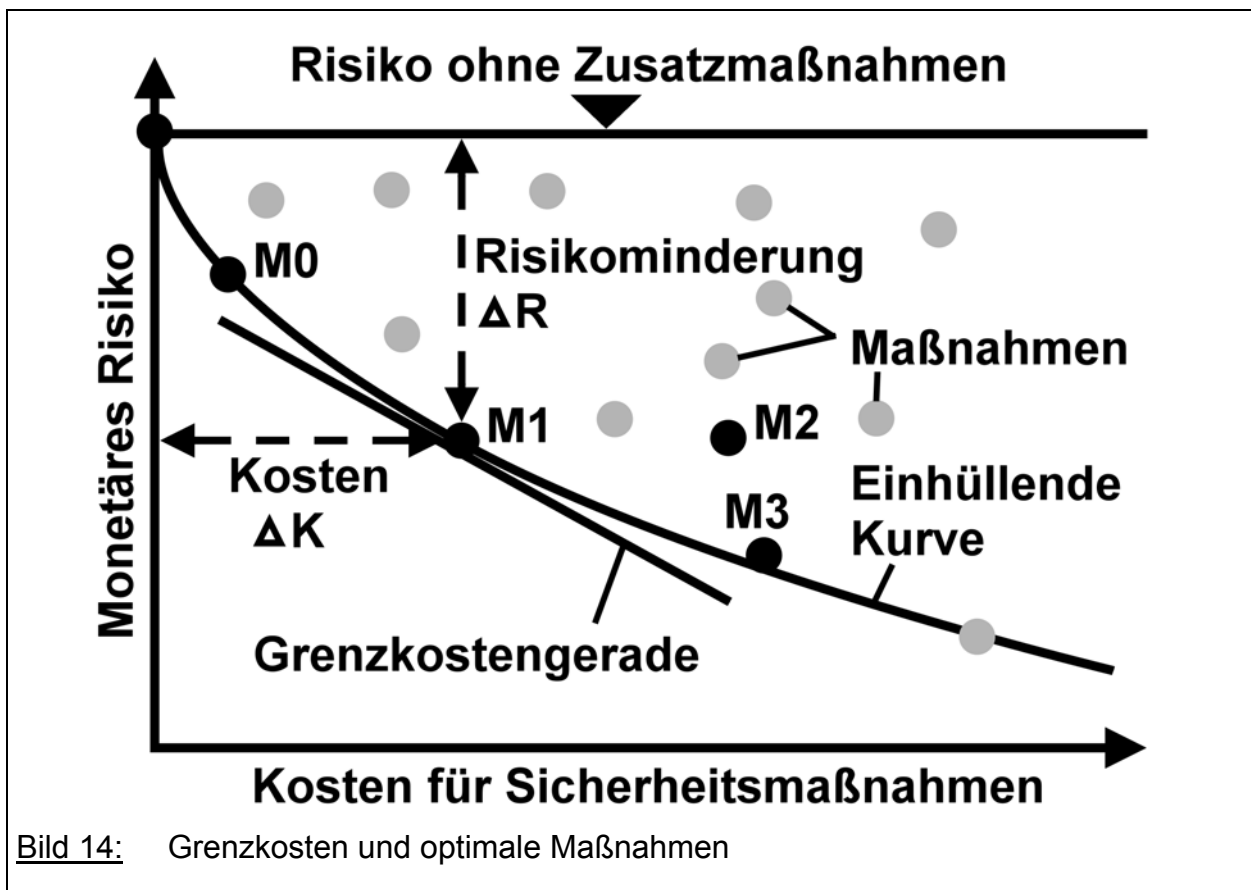


Bild 14: Grenzkosten und optimale Maßnahmen

Es stellt sich die Frage, bis zu welchem Punkt auf der Umhüllenden die Risiken zu reduzieren bzw. zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zu ergreifen sind. Sinnvoll ist dies bis zu derjenigen Maßnahme, bei welcher Aufwand und Sicherheitszuwachs gerade noch in einem vorgegebenen, als angemessen erachteten Verhältnis stehen. Die Antwort auf diese Frage lautet: Es sind alle Maßnahmen vorzukehren, bis die Maßnahmenkosten ΔK höchstens so hoch sind wie die durch diese Maßnahme gewonnene Risikominderung ΔR ausgedrückt in monetären Einheiten. Sind beide Beträge (ΔK und ΔR) gleich groß, so spricht man auch hier von den so genannten Grenzkosten. Der Begriff „Grenzkosten“ stammt aus der Ökonomie und entspricht denjenigen Kosten, die durch die Produktion einer zusätzlichen Einheit entstehen. Bei der Beurteilung von Sicherheitsmaßnahmen entspricht dies sinngemäß nicht den Kosten zusätzlicher Produktionseinheiten, sondern den Kosten für eine zusätzliche Risikoreduktion. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass ein kollektives Risiko eines Systems dann als zuverlässig bewertet wird, wenn mindestens alle Maßnahmen (oder Maßnahmenkombinationen) getroffen sind, deren Kosten-Wirksamkeit kleiner oder gleich diesen Grenzkosten ist.

Die Grenzkosten sind ein Maß für die Zahlungsbereitschaft (Kapitel 5.4), um Risiko reduzierende Maßnahmen zu ergreifen. Über die Grenzkosten wird somit explizit festgelegt, welche Maßnahmen noch als sinnvoll erachtet werden und welche nicht mehr. Damit legen die Grenzkosten quantitativ die Verhältnismäßigkeit fest. In Bild 14 stellt die Maßnahme M1 das optimale Maßnahmenpaket dar. Das Verhältnis von Kosten ΔK und Risikominderung ΔR entspricht gerade demjenigen der Grenzkostengeraden ($\Delta K/\Delta R = 1$). M0 ist nicht ausreichend, da $\Delta K/\Delta R \ll 1$ während M3 aufgrund der vorangehenden Festlegungen als unverhältnismäßig bezeichnet werden muss ($\Delta K/\Delta R \gg 1$).

Das System ist demnach ausreichend sicher, wenn es keine Maßnahmen mehr gibt, deren Verhältnis von Kosten ΔK und Risikominderung ΔR kleiner ist als der Anstieg der Grenzkostengerade. Oder anders ausgedrückt, wenn es keine verhältnismäßigen Maßnahmen mehr gibt, ist das System ausreichend sicher.

Die Anwendung des beschriebenen Kosten-Wirksamkeits-Ansatzes kommt heute in vielfältiger Art in verschiedensten Themengebieten zum Einsatz. Der Grad der Anwendungsvielfalt und der Akzeptanz solcher Ansätze sind je nach

Fachgebiet unterschiedlich. Beispiele für Bereiche, in denen Kosten-Wirksamkeits-Ansätze verstärkt Verwendung finden, sind:

- Straßenverkehrssicherheit (z.B. bei Sanierungen von Unfallschwerpunkten)
- Naturgefahren (z.B. ortsspezifische Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen)
- Risikomanagement in Unternehmen

In vielen anderen Bereichen werden Kosten-Wirksamkeits-Analysen im Zusammenhang mit spezifischen Fragestellungen eingesetzt.

Nicht zuletzt aufgrund beschränkter (finanzieller) Ressourcen gewinnen Kosten-Wirksamkeits-Ansätze auch in verschiedenen "neuen" Themenbereichen zunehmend an Bedeutung (z.B. Gesundheitswesen) und finden in fachspezifischen Regulativen vermehrt Eingang.

6.2 Vorgehensweise

Zur Durchführung einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung sind zunächst Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen festzulegen, mit denen das vorliegende Risiko reduziert werden kann. Ferner sind die zugehörigen Kosten der Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zu ermitteln. Das durch diese Maßnahmen reduzierte Risiko muss monetär bewertet und die zugehörige Risikominderung bestimmt werden. Aus dem Verhältnis der Maßnahmenkosten zur monetären Risikominderung kann die Kosten-Wirksamkeit bestimmt werden.

Im Einzelnen sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

(1) Bestimmung der risikomindernden Wirkung der Maßnahmen

Für mögliche zusätzliche Maßnahmen kann auf Basis des Risikoanalyseverfahrens die risikomindernde Wirkung einer Maßnahme oder von Maßnahmenkombinationen bestimmt und monetär bewertet werden.

(2) Bestimmung der Jahreskosten der Maßnahme

Für mögliche zusätzliche Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen sind die mit der Realisierung und dem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Für die Beurteilung einer Maßnahme nach deren Kosten-Wirksamkeit werden durch Anwendung der Annuitätenmethode die so genannten Jahreskosten ΔK ermittelt. Diese setzen sich zusammen aus:

- Investitionskosten (K_{Invest})
- Betriebs- und Instandhaltungskosten pro Jahr (K_{Betrieb})

Die resultierenden jährlichen Kosten können wie folgt berechnet werden:

$$\Delta K = K_{\text{Invest}} \cdot \frac{(1+d)^n \cdot d}{(1+d)^n - 1} + K_{\text{Betrieb}}$$

dabei bedeuten:

ΔK : Jahreskosten [€/Jahr]

K_{Invest} : Investitionskosten [€]

K_{Betrieb} : Betriebs-/Instandhaltungskosten [€/Jahr]

n : Lebensdauer [Jahre]

d : Diskontrate / Annuitätenfaktor [%]

Analog zur Bestimmung der Risiken bzw. zur Risikominderung sind die Maßnahmenkosten auf ein Jahr umzurechnen.

Durch den Faktor (Bruchausdruck) von K_{Invest} werden in obiger Gleichung die Investitionskosten auf ein Jahr bezogen (€ pro Jahr).

(3) Bestimmung der Kosten-Wirksamkeit

Die Beziehung zwischen Maßnahmen, deren Kosten und der Risikominderung lässt sich in einem Diagramm mit den beiden Achsen „Risiko“ und „Kosten“ aufzeigen (Bild 14). Jede Sicherheitsmaßnahme bzw. deren Kostenfolgen und ihre risikomindernde Wirkung lassen sich als Punkt im Diagramm darstellen. Die Maßnahmen werden anhand des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses beurteilt. Sowohl die Kosten (ΔK) für zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen als auch die Wirkung (monetarisiertes Risiko ΔR) beziehen sich auf ein Jahr und sind als monetäre Einheit [€] ausgedrückt:

$$\text{Kosten} - \text{Wirksamkeits} - \text{Verhältnis} = \frac{\Delta K}{\Delta R}$$

Ist das Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis kleiner als 1, so handelt es sich um eine kostenwirksame bzw. verhältnismäßige Maßnahme, d.h. die risikomindernde Wirkung übersteigt die Kosten.

dernde Wirkung ΔR ist größer als die zugehörigen Kosten für Sicherheitsmaßnahmen ΔK .

Da die Abschätzungen der Kosten und der Risikoreduktion eine gewisse Unschärfe aufweisen, wird für die Beurteilung auf Basis des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses Folgendes vorgeschlagen:

- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 1 : Maßnahmen sind zu realisieren, da sie kostenwirksam sind
- $1 \leq$ Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 2 : Realisierung der Maßnahmen fallweise prüfen
- Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis ≥ 2 : Realisierung nicht kostenwirksam

7 Anwendungsbeispiel

7.1 Allgemeines

Bei den nachfolgenden Zahlenbeispielen handelt es sich um fiktive Beispiele, deren Ziel es in erster Linie ist, die Anwendung der Risikoanalyse und ihrer Bewertung zu veranschaulichen und nicht realistische Verhältnisse wiederzugeben.

7.2 Ausgangssituation

Anhand eines Zahlenbeispiels wird nachfolgend aufgezeigt, wie das Risiko mit Hilfe eines Ereignisbaumes ermittelt wird. Die folgenden Eingangsgrößen werden verwendet:

(1) Ausgangs-/ Initialereignis Brand (Tabelle 9, Spalte 1)

Die folgenden drei Faktoren beeinflussen die Häufigkeit des Initialereignisses und werden im Beispiel wie folgt angesetzt:

a) Brandrate

Die Fragebogenaktion hat ergeben, dass die Brandraten der einzelnen Verkehrsunternehmen bis zu ca. $0,5 \times 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug-km}}$ reichen kann (Bild

12). Im Zahlenbeispiel wird nicht der Mittelwert von

$0,0656 \times 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug-km}}$ (Kapitel 5.2) verwendet, sondern folgende höhere

Brandrate gewählt: $0,15 \times 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug-km}}$

b) Tunnellänge

Laut den Angaben der Fragebogenaktion beträgt der mittlere Abstand der unterirdischen Haltestellen ca. 700 m. Im vorliegenden Beispiel wird zur einfacheren Berechnung eine Haltestelle mit einem Tunnelabschnitt von 1.000 m Länge betrachtet.

c) Anzahl der im Tunnelabschnitt verkehrenden Züge

Je mehr Züge in einem Tunnelabschnitt pro Zeiteinheit verkehren (z.B. gemeinsame Nutzung eines Tunnels durch mehrere U-Bahn-Linien), desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zugbrand entsteht.

Es wird im Zahlenbeispiel ein 2-gleisiger Tunnel angesetzt, der von zwei Linien befahren wird. Pro Linie wird von folgendem Zugaufkommen ausgegangen:

00 - 04 Uhr: kein Betrieb =	0 Züge
04 - 06 Uhr: 4 Züge / (Stunde x Richtung) = 2 x 4 x 2 =	16 Züge
06 - 20 Uhr: 7 Züge / (Stunde x Richtung) = 14 x 7 x 2 =	196 Züge
20 - 00 Uhr: 4 Züge / (Stunde x Richtung) = 4 x 4 x 2 =	<u>32 Züge</u>
Summe:	244 Züge/Tag

Im angenommenen Tunnelabschnitt verkehren auf den zwei Linien dann zusammen $2 \times 244 \text{ Züge/Tag} = 488 \text{ Züge/Tag}$.

Hochgerechnet auf ein Jahr sind dies schätzungsweise ca. 180.000 Züge

Mit den obigen Angaben ergibt sich folgende Häufigkeit für das Initiale-reignis (Kapitel 5.2):

Häufigkeit des Initialereignisses = Brandrate x betrachtete Tunnellänge x Anzahl der verkehrenden Züge pro Zeiteinheit ergibt:

$$0,15 \times 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug} - \text{km}} \times 1 \text{ km} \times 180.000 \text{ Züge/Jahr} \approx 27 \times 10^{-3} \frac{\text{Brände}}{\text{Jahr}}$$

Diese Häufigkeit des Initialereignisses wird als Eingangsgröße für den Ereignisbaum (Tabelle 9, Spalte 1) verwendet.

(2) Brandort (Tabelle 9, Spalte 2)

Aus der Fragebogenauswertung ergeben sich folgende Wahrscheinlichkeiten für den Brandort (Kapitel 5.3.1), die auch im Zahlenbeispiel verwendet werden (Tabelle 9):

a) Brandort Haltestelle: 69 von 73 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von ca. 94,5 %

b) Brandort Streckentunnel: 4 von 73 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von ca. 5,5 %

(3) Brandtyp (Tabelle 9, Spalte 3)

Aus der Fragebogenanalyse ergibt sich szenarienabhängig folgende Aufteilung der Zugbrände auf die beiden Brandtypen (Kapitel 5.3.2) (Tabelle 9, Spalte 3):

a) Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle)

- Brandtyp I: 66 von 69 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von ca. 96 %

- Brandtyp II: 3 von 69 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von ca. 4 %

b) Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel)

- Brandtyp I: 3 von 4 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 75 %

- Brandtyp II: 1 von 4 Bränden

Dies entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 25 %

1 Initialereignis [Fahrzeugbrände pro Jahr]	2 Brandort	3 Brandtyp	4 Brandentwicklung bei Brandtyp II	5 Personenanzahl	6 Fluchtbeeinträchtigung	7 Szenarienhäufigkeit [Fahrzeugbrände pro Jahr]	8 Schadensausmaß			11 Risiko			15 Monetarisiertes Risiko				17 Ifd. Szenarienbezeichnung			
							[Tote pro Brand]	[Verletzte pro Brand]	[Sachschaden in T € pro Brand]	[Tote pro Jahr]	[Verletzte pro Jahr]	[T € Sachschäden pro Jahr]	für Tote [€ pro Jahr]	für Verletzte [€ pro Jahr]	für Sachschäden [€ pro Jahr]	Summe [€ pro Jahr]				
27.000E-3	Haltestelle:	94,5%	Typ I: 96%	---	Gering: 60%	Nein: 97%	14.255,74E-6	0	0	10	0	0	142.557E-6	0	0	356,39	356,39	A		
					Ja: 3%	440,90E-6	0	1	10	0	440,90E-6	4.409E-6	0	44,08992	11,02	55,11	B			
					Groß: 40%	Nein: 90%	8.817,98E-6	0	1	30	0	8.817,98E-6	264.540E-6	0	881,7984	661,35	1.543,15	C		
					Ja: 10%	979,78E-6	0	3	50	0	2.939,33E-6	48.989E-6	0	293,93	122,47	416,40	D			
					Typ II: 4%	Bereichsbrand: 99%	Gering: 60%	Nein: 97%	588,05E-6	0	3	500	0	1.764,15E-6	294.025E-6	0	176,41	735,06	911,48	E
					Ja: 3%		18,19E-6	0	8	500	0	145,50E-6	9.094E-6	0	14,55	22,73	37,28	F		
					Groß: 40%		Nein: 90%	363,74E-6	0	8	500	0	2.909,93E-6	181.871E-6	0	290,99	454,68	745,67	G	
					Ja: 10%		40,42E-6	0	15	500	0	606,24E-6	20.208E-6	0	60,62	50,52	111,14	H		
					Vollbrand: 1%	Gering: 60%	Nein: 97%	5,94E-6	1	15	1000	5,94E-6	89,10E-6	5.940E-6	29,69946	8,91	14,85	53,46	I	
						Ja: 3%	0,18E-6	1	30	1000	0,18E-6	5,51E-6	184E-6	0,91854	0,55	0,46	1,93	J		
						Groß: 40%	Nein: 90%	3,67E-6	3	30	1000	11,02E-6	110,22E-6	3.674E-6	55,1124	11,02	9,19	75,32	K	
						Ja: 10%	0,41E-6	3	60	1000	1,22E-6	24,49E-6	408E-6	6,12	2,45	1,02	9,59	L		
					Summe:							18,37E-6	17.853,36E-6	975.898E-6	91,85	1785,34	2439,74	4316,93		
					Streckentunnel:	5,5%	Typ I: 75%	---	Gering: 60%	Nein: 60%	400,95E-6	0	1	500	0	400,95E-6	200.475E-6	0	40,10	501,19
Ja: 40%	267,30E-6	0	3	500					0	801,90E-6	133.650E-6	0	80,19	334,13	414,32	N				
Groß: 40%	Nein: 40%	178,20E-6	0	3					500	0	534,60E-6	89.100E-6	0	53,46	222,75	276,21	O			
Ja: 60%	267,30E-6	0	8	500					0	2.138,40E-6	133.650E-6	0	213,84	334,13	547,97	P				
Typ II: 25%	Bereichsbrand: 99%	Gering: 60%	Nein: 60%	132,31E-6					0	8	1000	0	1.058,51E-6	132.314E-6	0	105,85	330,78	436,63	Q	
Ja: 40%		88,21E-6	0	15					1000	0	1.323,14E-6	88.209E-6	0	132,31	220,52	352,84	R			
Groß: 40%		Nein: 40%	58,81E-6	0					15	1000	0	882,09E-6	58.806E-6	0	88,21	147,02	235,22	S		
Ja: 60%		88,21E-6	1	30					1000	88,21E-6	2.646,27E-6	88.209E-6	441,05	264,63	220,52	926,19	T			
Vollbrand: 1%	Gering: 60%	Nein: 60%	1,34E-6	1					30	5.000	1,34E-6	40,10E-6	6.683E-6	6,68	4,01	16,71	27,40	U		
	Ja: 40%	0,89E-6	3	60					5.000	2,67E-6	53,46E-6	4.455E-6	13,37	5,35	11,14	29,85	V			
Groß: 40%	Nein: 40%	0,59E-6	3	60	5.000	1,78E-6	35,64E-6	2.970E-6	8,91	3,56	7,43	19,90	W							
	Ja: 60%	0,89E-6	8	60	5.000	7,13E-6	53,46E-6	4.455E-6	35,64	5,35	11,14	52,12	X							
Summe:							101,13E-6	9.968,51E-6	942.975E-6	505,64	996,85	2357,44	3859,93							

Tabelle 9: Beispiel für einen Ereignisablauf (Ausgangssituation)

(4) Brandentwicklung (Tabelle 9, Spalte 4)

Die Wahrscheinlichkeit der Brandentwicklung zu Brandtyp II wird im Zahlenbeispiel für beide Brandorte (Haltestelle bzw. Streckentunnel) wie folgt angenommen, da hierzu bei der Fragebogenaktion keine genauen Angaben gemacht wurden (Tabelle 9, Spalte 4):

- a) Bereichsbrand: Wahrscheinlichkeit 99 %
- b) Vollbrand: Wahrscheinlichkeit 1 %

(5) Personenanzahl (Tabelle 9, Spalte 5)

Die vom Brandereignis betroffene Personenanzahl wird im Zahlenbeispiel für beide Brandorte (Haltestelle bzw. Streckentunnel) wie folgt berücksichtigt:

- a) Personenanzahl gering: Wahrscheinlichkeit 60 %
- b) Personenanzahl groß: Wahrscheinlichkeit 40 %

Diese Wahrscheinlichkeiten sind für das Zahlenbeispiel geschätzt, da eine Herleitung nur am konkreten Objekt unter Berücksichtigung der Einflussgrößen (Kapitel 5.3) möglich ist.

(6) Fluchtbeeinträchtigung (Tabelle 9, Spalte 6)

Im vorliegenden Zahlenbeispiel werden die in Tabelle 10 angegebenen Wahrscheinlichkeiten angenommen. Auch hier ist eine Herleitung nur am konkreten Objekt unter Berücksichtigung der Einflussgrößen (Kapitel 5.3) möglich.

(7) Szenarienhäufigkeit (Tabelle 9, Spalte 7)

Die Szenarienhäufigkeit ergibt sich durch die Multiplikation der Häufigkeit des Ausgangs-/Initialereignisses mit allen Eintrittswahrscheinlichkeiten entlang des entsprechenden Astes des Ereignisbaumes. Für das Zahlenbeispiel gilt:

- Häufigkeit des Initialereignisses (Brände pro Jahr) (Tabelle 9, Spalte 1)
- Wahrscheinlichkeit des Brandortes (Tabelle 9, Spalte 2)
- Wahrscheinlichkeit des Brandtyps (Tabelle 9, Spalte 3)

- Wahrscheinlichkeit der Brandentwicklung bei Brandtyp II (Tabelle 9, Spalte 4)
- Wahrscheinlichkeit der Personenanzahl (Tabelle 9, Spalte 5)
- Wahrscheinlichkeit der Fluchtbeeinträchtigung (Tabelle 9, Spalte 6)

Im Zahlenbeispiel wird die Szenarienhäufigkeit (Zugbrände pro Jahr) in Tabelle 9 jeweils in Spalte 7 angegeben.

lfd. Nr.	Szenario	Personenanzahl	Fluchtbeeinträchtigung vorhanden	Wahrscheinlichkeit [%]
1	Nr. 1 - Zug steht brennend in der Haltestelle (Brandtyp I bzw. Brandtyp II)	gering	ja	3
			nein	97
2		groß	ja	10
			nein	90
3	Nr. 2 - Zug steht brennend im Streckentunnel (Brandtyp I bzw. Brandtyp II)	gering	ja	40
			nein	60
4		groß	ja	60
			nein	40

Tabelle 10: Eintrittswahrscheinlichkeit im Verzweigungspunkt „Fluchtbeeinträchtigung“ (geschätzte Werte)

(8) Schadensausmaß (Tabelle 9, Spalten 8 bis 10)

Das jeweilige Schadensausmaß für Personenschäden wird mit Hilfe von Schadensklassen (Tabellen 5 und 6) abgeschätzt. Die möglichen Sachschäden wurden in ihrer Größe ohne die Festlegung einer Schadensklasse abgeschätzt.

(9) Risiko (Tabelle 9, Spalten 11 bis 13)

Für den jeweiligen Ereignisablauf wird das resultierende Risiko (Tote, Verletzte und Sachschäden pro Jahr) bestimmt, in dem folgende Werte mit einander multipliziert werden:

- Szenarienhäufigkeit (Zugbrände pro Jahr) (Tabelle 9, Spalte 7),
- Schadensausmaß (Tote, Verletzte und Sachschäden pro Brand) (Tabelle 9, Spalten 8 bis 10)

Das Ergebnis der Berechnung wird in Tabelle 9 in die Spalten 11 bis 13 eingetragen. In der Summe ergibt sich für das hier betrachtete Beispiel folgendes resultierendes Risiko (Tabelle 9):

a) Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle)

aa) ca. 18×10^{-6} Todesopfer pro Jahr

ab) ca. 17.900×10^{-6} Verletzte pro Jahr

ac) ca. 975 Euro Sachschäden pro Jahr

b) Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel)

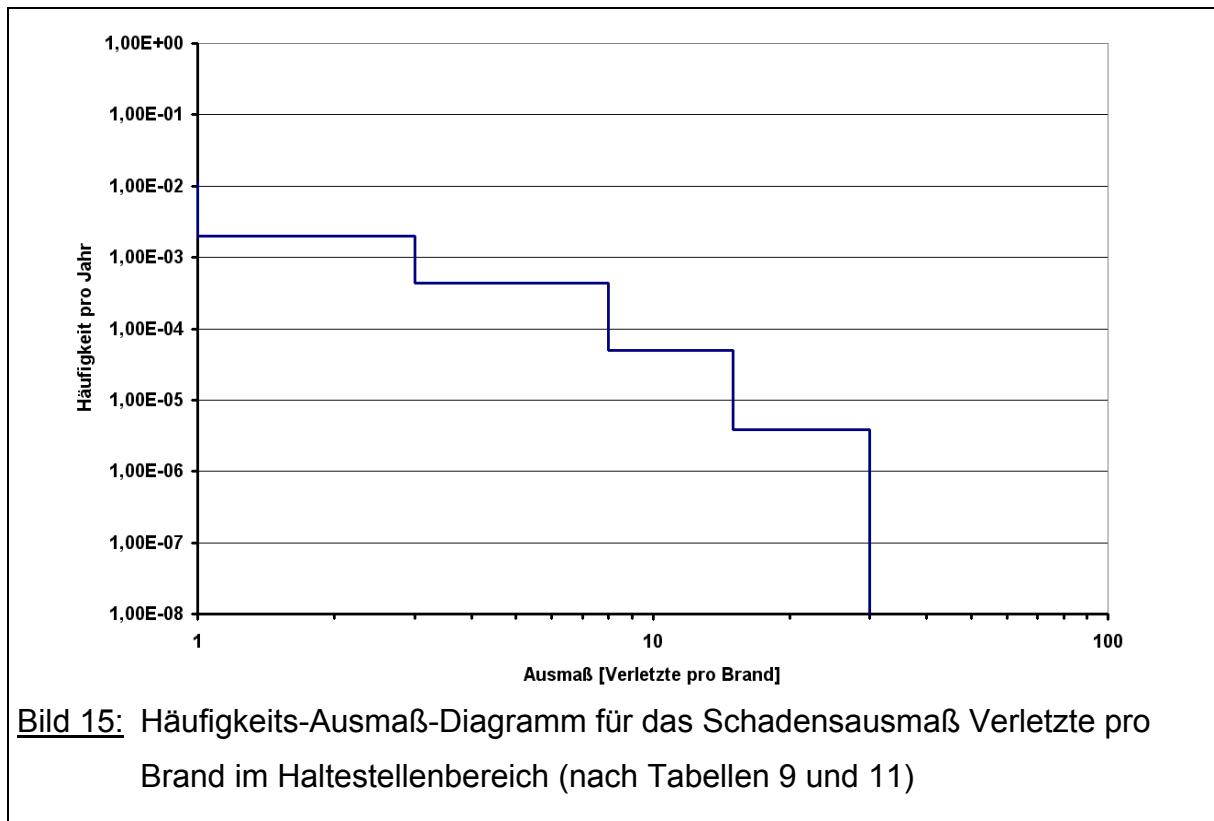
ba) ca. 100×10^{-6} Todesopfer pro Jahr

bb) ca. 10.000×10^{-6} Verletzte pro Jahr

bc) ca. 943 Euro Sachschäden pro Jahr

(10) Darstellung des Risikos

Exemplarisch ist für das Zahlenbeispiel in einem Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm das Risiko für Verletzte bei einem Zugbrand in der Haltestelle dargestellt (Bild 15).



Das Schadensausmaß (Verletzte pro Brand) und die zugehörige Szenarienhäufigkeit sind für den Brandort „Haltestelle“ Tabelle 9 entnommen.

Die Summenlinien erhält man, indem Paare aus dem jeweiligen Schadensausmaß (Verletzte) und den zugehörigen Häufigkeiten gebildet werden (Tabelle 11).

Schadensausmaß (Verletzte ¹⁾ pro Brand)	Szenarienhäufigkeit	Summe	Bemerkung
30	1×10^{-8}	1×10^{-8}	Schnittpunkt mit der X-Achse
30	$3,6 \times 10^{-6}$	$3,6 \times 10^{-6}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile K
30	$0,2 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile J
15	---	$3,8 \times 10^{-6}$	Stufe
15	4×10^{-5}	$4,4 \times 10^{-5}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile H
15	$0,6 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile I
8	---	$5,7 \times 10^{-5}$	Stufe
8	$3,6 \times 10^{-4}$	$4,1 \times 10^{-4}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile G
8	$0,2 \times 10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile F
3	---	$4,3 \times 10^{-4}$	Stufe
3	1×10^{-3}	$1,4 \times 10^{-3}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile D
3	$0,6 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile E
1	---	2×10^{-3}	Stufe
1	$0,4 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile B
1	$0,9 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-2}$	Tabelle 9, Spalte 7, Zeile C

¹⁾ Verletzte bei einem Zugbrand in der Haltestelle

Tabelle 11: Quellwerte für das Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm (Bild 15)

(11) Monetarisiertes Risiko (Tabelle 9, Spalten 14 bis 17)

Das monetarisierte Risiko (Kosten pro Jahr) ist eine Hilfsgröße und stellt einen theoretischen, statistischen Erwartungswert für die jährlichen Schäden (Todesopfer, Verletzte und Sachschäden pro Jahr) dar, die infolge von Zugbränden in der untersuchten ÖPNV-Tunnelanlage auftreten können.

Zur Monetarisierung des Risikos werden folgende Grenzkosten angesetzt (Kapitel 5.5.3):

- a) je geretteten Menschenleben: 5 Mio €
- b) je verhinderten Verletzten: 100.000 €
- c) Sachschäden: 2,5 € je € verhinderten Sachschaden

Das monetarisierte Risiko ergibt sich aus der Multiplikation des Risikos (Tabelle 9, Spalten 11, 12 bzw. 13) mit den zugehörigen Grenzkosten. Hierdurch ergeben sich die monetarisierten Risiken für die einzelnen Schadensindikatoren (Tabelle 9, Spalten 14, 15 bzw. 16).

Die Summe des monetarisierten Risikos aller drei Schadensindikatoren Todesopfer, Verletzte und Sachschäden ist aus Tabelle 9, Spalte 17 ersichtlich.

Für das vorliegende Zahlenbeispiel ergeben sich unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen folgende Summen für das monetarisierte Risiko pro Jahr (Tabelle 9, Spalte 17):

- a) Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle): ca. 4.300 €
- b) Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel): ca. 3.900 €

Das monetarisierte Risiko für das Zahlenbeispiel beträgt für beide Szenarien insgesamt ca. 8.200 € pro Jahr.

7.3 Sensitivitätsanalyse

Die Berechnungsergebnisse aus der Anwendung des Verfahrens sollten generell über Sensitivitätsanalysen überprüft werden, um die Auswirkungen von Einflussgrößen (z.B. Häufigkeit des Initialereignis, Eintrittswahrscheinlichkeit) bestimmen und so das Analyseergebnis besser bewerten zu können. Nachfolgend wird daher eine Sensitivitätsanalyse für das in Kapitel 7.2 angegebene Zahlenbeispiel (Tabelle 9) exemplarisch durchgeführt, um festzustellen welche Auswirkungen eine ungünstigere Festlegung der abgeschätzten Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Verzweigungspunkten „Brandentwicklung“, „Personenanzahl“ und „Fluchtbeeinträchtigung“ haben.

Die Sensitivitätsanalyse wird mit den in Tabelle 12 angegebenen Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Es ergeben sich folgende Summen für das monetarisierte Risiko pro Jahr (Tabelle 13, Spalte 17):

a) Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle): ca. 5.200 €

b) Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel): ca. 4.400 €

Das monetarisierte Risiko für die durchgeführte Sensitivitätsanalyse beträgt für beide Szenarien insgesamt ca. 9.600 € pro Jahr.

Zusammenfassend kann für das Zahlenbeispiel festgestellt werden, dass im Vergleich zur Ausgangssituation (Tabelle 9; monetarisiertes Risiko insgesamt ca. 8.200 €) das mit ungünstigeren Ansätzen im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ermittelte monetarisierte Risiko (Tabelle 13) zwar insgesamt um ca. 17 % größer, aber immer noch relativ gering ist.

Nr.	Position	Eintrittswahrscheinlichkeit	
		Ausgangssituation (Tabelle 9)	Sensitivitätsanalyse (Tabelle 13)
	Brandentwicklung bei Typ II		
1	a) Bereichsbrand	99 %	98 %
2	b) Vollbrand	1 %	2 %
	Personenanzahl		
3	a) gering	60 %	50 %
4	b) groß	40 %	50 %
	Fluchtbeeinträchtigung		
	a) Brandort „Haltestelle“		
5	• Personenanzahl gering:	Nein: 97 %; Ja: 3 %	Nein: 95 %; Ja: 5 %
6	• Personenanzahl groß:	Nein: 90 %; Ja: 10 %	Nein: 80 %; Ja: 20 %
	b) Brandort „Strecke“		
7	• Personenanzahl gering:	Nein: 60 %; Ja: 40 %	Nein: 40 %; Ja: 60 %
8	• Personenanzahl groß:	Nein: 40 %; Ja: 60 %	Nein: 30 %; Ja: 70 %

Tabelle 12: Verwendete Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Verzweigungspunkte „Brandentwicklung“, „Personenanzahl“ und „Fluchtbeeinträchtigung“ im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

1	2	3	4	5	6	7	8			9			10				11				12				13				14				15				16				17				Ifd. Szenarienbezeichnung
Initialereignis [Fahrzeugbrände pro Jahr]	Brandort	Brandtyp	Brandentwicklung bei Brandtyp II	Personenanzahl	Fluchtbeeinträchtigung	Szenarienhäufigkeit [Fahrzeugbrände pro Jahr]	Schadensausmaß			Risiko			Monetarisiertes Risiko				Monetarisiertes Risiko				Monetarisiertes Risiko				Monetarisiertes Risiko				Monetarisiertes Risiko																
							[Tote pro Brand]	[Verletzte pro Brand]	[Sachschaden in T € pro Brand]	[Tote pro Jahr]	[Verletzte pro Jahr]	[T € Sachschaden pro Jahr]	für Tote [€ pro Jahr]	für Verletzte [€ pro Jahr]	für Sachschäden [€ pro Jahr]	Summe [€ pro Jahr]																													
27,000E-3	Haltestelle: 94,5%	Typ I: 96%	---	Gering: 50%	Nein: 95%	11.634,84E-6	0	0	10	0	0	116.348E-6	0	0	290,87	290,87	A																												
					Ja: 5%	612,36E-6	0	1	10	0	612,36E-6	6.124E-6	0	61,236	15,31	76,55	B																												
				Groß: 50%	Nein: 80%	9.797,76E-6	0	1	30	0	9.797,76E-6	293.933E-6	0	979,776	734,83	1.714,61	C																												
					Ja: 20%	2.449,44E-6	0	3	50	0	7.348,32E-6	122.472E-6	0	734,83	306,18	1.041,01	D																												
				Typ II: 4%	Bereichsbrand: 98%	Gering: 50%	Nein: 95%	475,09E-6	0	3	500	0	1.425,27E-6	237.545E-6	0	142,53	593,86	736,39	E																										
							Ja: 5%	25,00E-6	0	8	500	0	200,04E-6	12.502E-6	0	20,00	31,26	51,26	F																										
		Groß: 50%	Nein: 80%			400,08E-6	0	8	500	0	3.200,80E-6	200.038E-6	0	320,06	500,09	820,15	G																												
			Ja: 20%			100,02E-6	0	15	500	0	1.500,28E-6	50.009E-6	0	150,03	125,02	275,05	H																												
		Vollbrand: 2%	Gering: 50%			Nein: 9%	0,92E-6	1	15	1000	0,92E-6	13,78E-6	919E-6	4,5927	1,38	2,30	8,27	I																											
			Ja: 5%			0,51E-6	1	30	1000	0,51E-6	15,31E-6	510E-6	2,5515	1,53	1,28	5,36	J																												
		Groß: 50%	Nein: 80%	8,16E-6	3	30	1000	24,49E-6	244,94E-6	8.165E-6	122,472	24,49	20,41	167,38	K																														
			Ja: 20%	2,04E-6	3	60	1000	6,12E-6	122,47E-6	2.041E-6	30,62	12,25	5,10	47,97	L																														
		Summe:										32,05E-6	24.481,13E-6	1.050.606E-6	160,23	2448,11	2626,51	5234,86																											
		Strecken-tunnel: 5,5%	---	Typ I: 75%	Gering: 50%	Nein: 40%	222,75E-6	0	1	500	0	222,75E-6	111.375E-6	0	22,28	278,44	300,71	M																											
Ja: 60%	334,13E-6					0	3	500	0	1.002,38E-6	167.063E-6	0	100,24	417,66	517,89	N																													
Groß: 50%	Nein: 30%				167,06E-6	0	3	500	0	501,19E-6	83.531E-6	0	50,12	208,83	258,95	O																													
	Ja: 70%				389,81E-6	0	8	500	0	3.118,50E-6	194.906E-6	0	311,85	487,27	799,12	P																													
Typ II: 25%	Bereichsbrand: 98%				Gering: 50%	Nein: 40%	72,77E-6	0	8	1000	0	582,12E-6	72.765E-6	0	58,21	181,91	240,12	Q																											
						Ja: 60%	109,15E-6	0	15	1000	0	1.637,21E-6	109.148E-6	0	163,72	272,87	436,59	R																											
				Groß: 50%	Nein: 30%	54,57E-6	0	15	1000	0	818,81E-6	54.574E-6	0	81,86	136,43	218,30	S																												
					Ja: 70%	127,34E-6	1	30	1000	127,34E-6	3.820,16E-6	127.339E-6	636,69	382,02	318,35	1337,06	T																												
				Vollbrand: 2%	Gering: 50%	Nein: 40%	1,49E-6	1	30	5.000	1,49E-6	44,55E-6	7.425E-6	7,43	4,46	18,56	30,44	U																											
					Ja: 60%	2,23E-6	3	60	5.000	6,68E-6	133,65E-6	11.138E-6	33,41	13,37	27,84	74,62	V																												
Groß: 50%	Nein: 20%			0,74E-6	3	60	5.000	2,23E-6	44,55E-6	3.713E-6	11,14	4,46	9,28	24,87	W																														
	Ja: 80%			2,97E-6	8	60	5.000	23,76E-6	178,20E-6	14.850E-6	118,80	17,82	37,13	173,75	X																														
Summe:										161,49E-6	12.103,86E-6	957.825E-6	807,47	1210,39	2394,56	4412,42																													

Tabelle 13: Bestimmung des monetarisierten Risikos im Rahmen der Sensitivitätsanalyse der Ausgangssituation

In den nachfolgenden Kosten-Wirksamkeits-Untersuchungen (Kapitel 0) wird das monetarisierte Risiko der Ausgangssituation (Tabelle 9) verwendet.

7.4 Untersuchung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen mittels Kosten-Wirksamkeits-Analyse

7.4.1 Zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“

Das monetarisierte Gesamtrisiko für beide Brandorte (Haltestelle bzw. Streckentunnel) im Berechnungsbeispiel (Kapitel 7.2) beträgt ca. 8.200,- € pro Jahr. Es wird nachfolgend mit Hilfe einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung geprüft, ob es zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen gibt, die verhältnismäßig sind. Hierzu werden folgende Arbeitsschritte ausgeführt:

(1) Auswahl einer geeigneten zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme

An der im untersuchten Tunnelabschnitt bestehenden Haltestelle wird ein neues Fluchttreppenhaus errichtet. Dadurch werden die Fluchtmöglichkeiten im Brandfall für die Tunnelnutzer verbessert.

(2) Bestimmung der risikomindernden Wirkung der Zusatzmaßnahme

Die risikomindernde Wirkung der zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme kann durch einen Vergleich des Ausgangsrisikos (ohne neues Fluchttreppenhaus) mit dem verbleibenden Risiko unter Berücksichtigung des neuen Fluchttreppenhauses ermittelt werden.

Um die Maßnahmenwirkung abbilden zu können, ist die beschriebene Ereignisbaumanalyse unter Berücksichtigung des Einflusses der zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme nochmals durchzuführen. Im gewählten Beispiel wirkt sich die zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ wie folgt aus:

a) Brandort Haltestelle

Das „neue Fluchttreppenhaus“ reduziert die Wahrscheinlichkeit einer Fluchtbeeinträchtigung in der Haltestelle. Die zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten sind in Tabelle 14 der Ausgangssituation (Tabelle 9) gegenübergestellt. Ferner bewirken die zusätzlichen Fluchtwege, dass die Personenschäden infolge der Brandauswirkungen (Verrauchung) gerin-

ger ausfallen, da die Personen schneller den Brandbereich verlassen können. Deshalb wird im Zahlenbeispiel angenommen, dass im Ereignisbaumabschnitt „Haltestelle“ die Summe der Personenschäden geringer ist (vergleiche Tabelle 9 und Tabelle 15, Spalte 8 und 9). Ferner wird davon ausgegangen, dass sich die Höhe der Sachschäden (vergleiche Tabelle 9 und Tabelle 15, Spalte 10) und auch die Eintrittswahrscheinlichkeiten an den übrigen Verzweigungspunkten des Ereignisbaumes durch die Zusatzmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ nicht ändern.

b) Brandort Streckentunnel

Für das betrachtete Beispiel wird davon ausgegangen, dass die zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ in der Haltestelle keinen nennenswerten Einfluss auf die Risiken für die Ereignisabläufe im Streckentunnel hat.

Personenanzahl	Fluchtbeeinträchtigung			
	ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahme *)		mit zusätzlicher Sicherheitsmaßnahme **)	
gering	nein	97 %	nein	99 %
	ja	3 %	ja	1 %
groß	nein	90 %	nein	95 %
	ja	10 %	ja	5 %

*) Ausgangssituation nach Tabelle 9 ohne neues Fluchttreppenhaus **) mit neuem Fluchttreppenhaus

Tabelle 14: Gegenüberstellung der Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Verzweigungspunkt „Fluchtbeeinträchtigung“ mit und ohne zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ (geschätzte Werte)

In Tabelle 15 ist die Ereignisbaumanalyse unter Berücksichtigung der zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ mit den genannten Änderungen der Eintrittswahrscheinlichkeiten (Tabelle 14) und des Schadensausmaßes dargestellt.

1 Initiale Ereignis [Fahrzeugbrände pro Jahr]	2 Brandort	3 Brandtyp	4 Brandentwicklung bei Brandtyp II	5 Personenanzahl	6 Fluchtbeeinträchtigung	7 Szenarienhäufigkeit [Fahrzeugbrände pro Jahr]	8 Schadensmaß			11 Risiko			14 Monetarisiertes Risiko				17 lfd. Szenarienzuordnung		
							[Tote pro Brand]	[Verletzte pro Brand]	[Sachschäden in T € pro Brand]	[Tote pro Jahr]	[Verletzte pro Jahr]	[T € Sachschäden pro Jahr]	für Tote [€ pro Jahr]	für Verletzte [€ pro Jahr]	für Sachschäden [€ pro Jahr]	Summe [€ pro Jahr]			
27,000E-3	Haltestelle: 94,5%	Typ I: 96%	---	Gering: 60%	Nein: 99%	14,549,67E-6	0	0	10	0	0	145,497E-6	0	0	363,74	363,74	A		
					Ja: 1%	146,97E-6	0	0	10	0	0	1,470E-6	0	0	3,67	3,67	B		
				Groß: 40%	Nein: 95%	9,307,87E-6	0	0	30	0	0	279,236E-6	0	0	698,09	698,09	C		
					Ja: 5%	489,89E-6	0	1	50	0	489,89E-6	24,494E-6	0	48,99	61,24	110,22	D		
				Typ II: 4%	Bereichsbrand: 99%	Gering: 60%	Nein: 99%	600,17E-6	0	1	500	0	600,17E-6	300,087E-6	0	60,02	750,22	810,23	E
							Ja: 1%	6,06E-6	0	3	500	0	18,19E-6	3,031E-6	0	1,82	7,58	9,40	F
				Groß: 40%	Nein: 95%	383,95E-6	0	3	500	0	1,151,85E-6	191,975E-6	0	115,18	479,94	595,12	G		
																		Ja: 5%	20,21E-6
				Vollbrand: 1%	Gering: 60%	Nein: 99%	6,06E-6	1	8	1000	6,06E-6	48,50E-6	6,062E-6	30,31182	4,85	15,16	50,32	I	
																			Ja: 1%
				Groß: 40%	Nein: 95%	3,88E-6	3	15	1000	11,63E-6	58,17E-6	3,878E-6	58,1742	5,82	9,70	73,69	K		
																		Ja: 5%	0,20E-6
				Summe: 18,37E-6 2,535,48E-6 966,100E-6 91,85 253,55 2415,25 2760,65															
				Streckentunnel: 5,5%	Typ I: 75%	---	Gering: 60%	Nein: 60%	400,95E-6	0	1	500	0	400,95E-6	200,475E-6	0	40,10	501,19	541,28
Ja: 40%	267,30E-6	0	3					500	0	801,90E-6	133,650E-6	0	80,19	334,13	414,32	N			
Groß: 40%	Nein: 40%	178,20E-6	0				3	500	0	534,60E-6	89,100E-6	0	53,46	222,75	276,21	O			
																	Ja: 60%	267,30E-6	0
Typ II: 25%	Bereichsbrand: 99%	Gering: 60%	Nein: 60%				132,31E-6	0	8	1000	0	1,058,51E-6	132,314E-6	0	105,85	330,78	436,63	Q	
			Ja: 40%				88,21E-6	0	15	1000	0	1,323,14E-6	88,209E-6	0	132,31	220,52	352,84	R	
Groß: 40%	Nein: 40%	58,81E-6	0				15	1000	0	882,09E-6	58,806E-6	0	88,21	147,02	235,22	S			
																	Ja: 60%	88,21E-6	1
Vollbrand: 1%	Gering: 60%	Nein: 60%	1,34E-6				1	30	5,000	1,34E-6	40,10E-6	6,683E-6	6,68	4,01	16,71	27,40	U		
																		Ja: 40%	0,89E-6
Groß: 40%	Nein: 40%	0,59E-6	3				60	5,000	1,78E-6	35,64E-6	2,970E-6	8,91	3,56	7,43	19,90	W			
																	Ja: 60%	0,89E-6	8
Summe: 101,13E-6 9,968,51E-6 942,975E-6 505,64 996,85 2367,44 3859,93																			

Tabelle 15: Ereignisablauf unter Berücksichtigung der zusätzlichen Maßnahme „neues Fluchttreppenhaus“

Für das vorliegende Zahlenbeispiel ergeben sich für die unterirdische Haltestelle mit der Maßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ folgende monetarisierten Risiken (Tabelle 15, Spalte 17):

- a) Szenario Nr. 1 (Zug steht brennend in der Haltestelle): ca. 2.800 € pro Jahr
- b) Szenario Nr. 2 (Zug steht brennend im Streckentunnel): ca. 3.900 € pro Jahr (unverändert gegenüber der Ausgangssituation)

Damit ergibt sich durch die gewählte Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ insgesamt ein monetarisiertes Risiko von $2.800 \text{ €} + 3.900 \text{ €} = 6.700 \text{ €}$ pro Jahr bzw. eine Risikominderung gegenüber dem Ausgangszustand (Kapitel 7.2) von $8.200 \text{ €} - 6.700 \text{ €} = 1.500 \text{ €}$ pro Jahr.

(3) Bestimmung der Jahreskosten der Maßnahme

Für die zusätzliche Maßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ sind die mit der Realisierung und dem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Für deren Beurteilung hinsichtlich der Kosten-Wirksamkeit werden durch Anwendung der Annuitätenmethode die so genannten Jahreskosten ΔK ermittelt. Diese jährlichen Kosten setzen sich aus den mittels Annuitätenmethode abgezinsten Investitionskosten sowie den jährlichen Betriebs- und Instandhaltungskosten zusammen.

Für das vorliegende Beispiel wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- a) Erforderliche Investitionskosten (K_{Invest}) für den Bau des „neuen Fluchttreppenhauses“: 1,5 Mio. €
- b) Unterhalts- und Instandhaltungskosten für das „neue Fluchttreppenhaus“ (K_{Betrieb}): 5.000 € pro Jahr
- c) Lebensdauer
 - Es wird von einer Lebensdauer von 50 Jahren der Anlage (neues Fluchttreppenhaus) ausgegangen
- d) Diskontrate: 2%

Gemäß der in Kapitel 6.2 angegebenen Berechnungsformel ergeben sich für diese Werte umgerechnet Jahreskosten von ca.

$$\Delta K = 1.500.000 \times \frac{(1 + 0,02)^{50} \times 0,02}{(1 + 0,02)^{50} - 1} + 5.000 \approx 53.000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} .$$

(4) Kosten-Wirksamkeit der Maßnahme

Basierend auf den Abschätzungen zur risikomindernden Wirkung und den zugehörigen Jahreskosten für das vorliegende Berechnungsbeispiel lässt sich die Kosten-Wirksamkeit wie folgt beurteilen:

a) Monetarisierter Risikominderung ΔR : 8.200 € - 6.700 € = 1.500 € pro Jahr

b) Jahreskosten ΔK (siehe (3)): 53.000 € pro Jahr

c) Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis (Kapitel 6.2) $\frac{\Delta K}{\Delta R} \approx 35$

Die Maßnahme ist somit deutlich nicht kostenwirksam, da $\frac{\Delta K}{\Delta R} \gg 1$.

Grund dafür sind die hohen Investitionskosten. Eine Umsetzung der Maßnahme für die vorliegende Situation ist somit nicht verhältnismäßig und dementsprechend nicht zu empfehlen.

7.4.2 Zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „Löschsysteme in den Zügen“

Als Erweiterung zum Beispiel in Kapitel 7.2 wird nachfolgend exemplarisch eine Maßnahme untersucht, welche nicht nur an einer spezifischen unterirdischen Haltestelle, sondern netzweit wirkt:

(1) Auswahl eines geeigneten Sicherheitsszenarios

Es wird der Einsatz automatischer Löschsysteme in Zügen untersucht.

Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

a) Der Einsatz automatischer Löschsysteme in Zügen führt auf dem gesamten Tunnelnetz zu einer Reduktion der Brandrisiken. Dementsprechend ist für die Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung auch das gesamte Tunnelnetz in Betracht zu ziehen. Es wird angenommen, dass das betrachtete Netz aus 40 unterirdischen Haltestellen und 40 km Streckentunnel besteht.

b) Das Verkehrsunternehmen verfügt über 200 Züge, die mit dem automatischen Löschsystem ausgerüstet werden.

(2) Bestimmung der risikomindernden Wirkung der Maßnahme

Es wird zunächst die risikomindernde Wirkung der Maßnahme „automatisches Löschesystem“ für den in der Ausgangssituation beschriebenen Tunnelabschnitt (1 Haltestelle inklusive 1000 m Tunnellänge) (Kapitel 7.2) ermittelt. Nachfolgend wird die risikomindernde Wirkung dieser Maßnahme auf das gesamte Tunnelnetz abgeschätzt.

Die Umsetzung der Maßnahme „automatisches Löschesystem“ führt dazu, dass im Brandfall die Wahrscheinlichkeit einer Ausbreitung des Feuers reduziert und dass der durch einen Brand entstehende Schaden gemindert wird.

Der Einfluss der Maßnahme „automatisches Löschesystem“ für den untersuchten Tunnelabschnitt wirkt sich in der Ereignisbaumanalyse wie folgt aus (Tabelle 16):

- a) Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Brand zum Brandtyp II entwickelt, wird durch die Maßnahme „automatisches Löschesystem“ reduziert. Im Rechenbeispiel wird aufgrund des „automatischen Löschesystems“ angenommen, dass beim Brandort „Haltestelle“ die Wahrscheinlichkeit des Brandtyps II von 4 % auf 2 % und beim Brandort Streckentunnel die Wahrscheinlichkeit des Brandtyps II von 25 % auf 10 % sinkt (vergleiche Tabelle 9 und Tabelle 16, Spalte 3).
- b) Kommt es zu einem Brand des Typs II, so kann mit der Maßnahme „automatisches Löschesystem“ die – ohnehin schon geringe – Wahrscheinlichkeit der Ausweitung des Brandes zu einem Vollbrand nochmals reduziert werden. Im Rechenbeispiel reduziert sich daher die Wahrscheinlichkeit eines Vollbrandes für beide Brandorte (Haltestelle und Streckentunnel) von 1 % auf 0,2 % (Tabelle 9 und Tabelle 16, Spalte 4).
- c) Es wird angenommen, dass sich das Schadensausmaß durch die zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „automatisches Löschesystem“ gemäß Tabelle 17 reduziert (vergleiche Tabellen 9 und Tabelle 16, Spalte 8 bis 10).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Ifd. Szenarienbezeichnung		
Initialereignis [Fahrzeugbrände pro Jahr]	Brandort	Brandtyp	Brandentwicklung bei Brandtyp II	Personenanzahl	Fluchtbeeinträchtigung	Szenarienhäufigkeit [Fahrzeugbrände pro Jahr]	Schadensausmaß			Risiko			Monetarisiertes Risiko						
							[Tote pro Brand]	[Verletzte pro Brand]	[Sachschaden in T € pro Brand]	[Tote pro Jahr]	[Verletzte pro Jahr]	[T € Sachschäden pro Jahr]	für Tote [€ pro Jahr]	für Verletzte [€ pro Jahr]	für Sachschäden [€ pro Jahr]	Summe [€ pro Jahr]			
27,000E-3	Haltestelle: 94,5%	Typ I: 98%	---	Gering: 60%	Nein: 97%	14.552,74E-6	0	0	0	0	0	0E-6	0	0	0,00	0,00	A		
					Ja: 3%	450,08E-6	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	B			
				Groß: 40%	Nein: 90%	9.001,69E-6	0	0	10	0	0	90,017E-6	0	0	225,04	225,04	C		
					Ja: 10%	1.000,19E-6	0	0	10	0	0,00E-6	10,002E-6	0	0,00	25,00	25,00	D		
				Typ II: 2%	Bereichsbrand: 99,8%	Gering: 60%	Nein: 97%	296,40E-6	0	1	30	0	296,40E-6	8.892E-6	0	29,64	22,23	51,87	E
							Ja: 3%	9,17E-6	0	3	50	0	27,50E-6	458E-6	0	2,75	1,15	3,90	F
			Groß: 40%	Nein: 90%	183,34E-6	0	3	100	0	550,02E-6	18.334E-6	0	55,00	45,84	100,84	G			
					Ja: 10%	20,37E-6	0	8	100	0	162,97E-6	2.037E-6	0	16,30	5,09	21,39	H		
			Vollbrand: 0,2%	Gering: 60%	Nein: 97%	0,59E-6	0	8	300	0	4,75E-6	178E-6	0	0,48	0,45	0,92	I		
						Ja: 3%	0,02E-6	0	15	300	0	0,28E-6	6E-6	0	0,03	0,01	0,04	J	
			Groß: 40%	Nein: 90%	0,37E-6	0	15	500	0	5,51E-6	184E-6	0	0,55	0,46	1,01	K			
					Ja: 10%	0,04E-6	0	30	500	0,00E-6	1,22E-6	20E-6	0,00	0,12	0,05	0,17	L		
										Summe:	0,00E-6	1.048,66E-6	130,128E-6	0,00	104,87	325,32	430,19		
			Streckentunnel: 5,5%	Typ I: 90%	---	Gering: 60%	Nein: 60%	481,14E-6	0	0	100	0	0,00E-6	48,114E-6	0	0,00	120,29	120,29	M
Ja: 40%	320,76E-6	0					0	100	0	0,00E-6	32,076E-6	0	0,00	80,19	80,19	N			
Groß: 40%	Nein: 40%	213,84E-6				0	1	100	0	213,84E-6	21,384E-6	0	21,38	53,46	74,84	O			
		Ja: 60%				320,76E-6	0	3	100	0	962,28E-6	32,076E-6	0	96,23	80,19	176,42	P		
Typ II: 10%	Bereichsbrand: 99,8%	Gering: 60%				Nein: 60%	53,35E-6	0	3	300	0	160,06E-6	16,006E-6	0	16,01	40,01	56,02	Q	
						Ja: 40%	35,57E-6	0	8	300	0	284,55E-6	10,671E-6	0	28,45	26,68	55,13	R	
Groß: 40%	Nein: 40%	23,71E-6			0	8	300	0	189,70E-6	7,114E-6	0	18,97	17,78	36,75	S				
		Ja: 60%			35,57E-6	0	15	300	0,00E-6	533,53E-6	10,671E-6	0,00	53,35	26,68	80,03	T			
Vollbrand: 0,2%	Gering: 60%	Nein: 60%			0,11E-6	0	15	500	0,00E-6	1,60E-6	53E-6	0,00	0,16	0,13	0,29	U			
					Ja: 40%	0,07E-6	1	30	500	0,07E-6	2,14E-6	36E-6	0,36	0,21	0,09	0,66	V		
Groß: 40%	Nein: 40%	0,05E-6			1	30	500	0,05E-6	1,43E-6	24E-6	0,24	0,14	0,06	0,44	W				
		Ja: 60%			0,07E-6	3	30	500	0,21E-6	2,14E-6	36E-6	1,07	0,21	0,09	1,37	X			
							Summe:	0,33E-6	2.351,27E-6	178,259E-6	1,66	235,13	445,65	682,44					

Tabelle 16: Ereignisablauf unter Berücksichtigung der möglichen zusätzlichen Maßnahme „automatische Löschsyste in Zügen“

Szenarien- bezeichnung	Tote pro Brand		Schadensausmaß Verletzte pro Brand		Sachschaden pro Brand [T€]	
	ohne automati- sches Löschsystem ¹⁾	mit automatischem Löschsystem ²⁾	ohne automati- sches Löschsystem ¹⁾	mit automatischem Löschsystem ²⁾	ohne automati- sches Löschsystem ¹⁾	mit automatischem Löschsystem ²⁾
A	0	0	0	0	10	0
B	0	0	1	0	10	0
C	0	0	1	0	30	10
D	0	0	3	0	50	10
E	0	0	3	1	500	30
F	0	0	8	3	500	50
G	0	0	8	3	500	100
H	0	0	15	8	500	100
I	1	0	15	8	1000	300
J	1	0	30	15	1000	300
K	3	0	30	15	1000	500
L	3	0	60	30	1000	500
M	0	0	1	0	500	100
N	0	0	3	0	500	100
O	0	0	3	1	500	100
P	0	0	8	3	500	100
Q	0	0	8	3	1000	300
R	0	0	15	8	1000	300
S	0	0	15	8	1000	300
T	1	0	30	15	1000	300
U	1	0	30	15	5000	500
V	3	1	60	30	5000	500
W	3	1	60	30	5000	500
X	8	3	60	30	5000	500

¹⁾ Tabelle 9: Ereignisbaum für „Ausgangssituation“ ²⁾ Tabelle 16: Ereignisbaum für Sicherheitsmaßnahme „automatisches Löschsystem“

Tabelle 17: Auswirkungen der Sicherheitsmaßnahme „automatisches Löschsystem“ auf das Schadensausmaß im Vergleich zur Ausgangssituation

In Tabelle 16 ist die Ereignisbaumanalyse unter Berücksichtigung der Maßnahme „automatische Löschanlage“ und den genannten veränderten Einflussgrößen dargestellt.

Für den betrachteten **Tunnelabschnitt (1 Haltestelle inklusive 1000 m Streckentunnel; nicht für das gesamte Netz)** ergibt sich unter Berücksichtigung der zusätzlichen Sicherheitsmaßnahme „automatisches Löschesystem“ insgesamt ein monetarisiertes Risiko von ca. $430 \text{ €} + 680 \text{ €} = \text{ca. } 1.110 \text{ €}$ im Jahr (Tabelle 16, Spalte 17). Das entspricht einer Risikominimierung gegenüber dem Ausgangszustand (Kapitel 7.2) für 1 Haltestelle inklusive 1000 m Streckentunnel (nicht für das gesamte Netz) von etwa $8.200 \text{ €} - 1.110 \text{ €} = 7.090 \text{ €}$ pro Jahr.

Für das gewählte **gesamte Tunnelnetz bestehend aus 40 Haltestellen inklusive 40.000 m Streckentunnel** ergibt sich schätzungsweise eine Risikominderung von etwa $40 \times 7.090 \text{ €} = 283.600 \text{ €}$ pro Jahr.

(3) Bestimmung der Jahreskosten der Maßnahme

Für die zusätzliche Maßnahme „automatische Löschanlage“ sind die mit der Realisierung und dem Betrieb verbundenen Kosten abzuschätzen. Das methodische Vorgehen hierzu ist in Kapitel 6 beschrieben.

Für das vorliegende Beispiel wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- a) Erforderliche Investitionskosten (K_{Invest}) für die Beschaffung und Installation der Löschanlagen in den Zügen 50.000,- € pro Zug bzw. insgesamt 10 Mio. € für die 200 Züge.
- b) Betriebs- und Instandhaltungskosten (K_{Betrieb})

Es wird angenommen, dass pro System bzw. Zug jährlich 2.500,- € aufgewendet werden müssen. Somit ergeben sich für die 200 Züge jährliche Betriebs- und Instandhaltungskosten im Umfang von 500.000,- €.
- c) Lebensdauer: Es wird von einer Lebensdauer von 20 Jahren der Systeme ausgegangen.
- d) Diskontrate: 2%

Gemäß der Berechnungsformel zur Bestimmung der Jahreskosten (Kapitel 6.2) ergibt sich umgerechnet ein Wert von ca.

$$\Delta K = 10.000.000 \times \frac{(1+0,02)^{20} \times 0,02}{(1+0,02)^{20} - 1} + 500.000 \approx 1,1 \text{ Mio. } \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$$

(4) Kosten-Wirksamkeit der Maßnahme

Basierend auf den Abschätzungen zur risikomindernden Wirkung und den zugehörigen Jahreskosten für das vorliegende Berechnungsbeispiel lässt sich die Kosten-Wirksamkeit wie folgt beurteilen:

- a) Monetarisierter Risikominderung ΔR (netzweit) (siehe (2)): 283.600,- € pro Jahr
- b) Jahreskosten ΔK (200 Züge) (siehe (3)): ca. 1,1 Mio. € pro Jahr
- c) Resultierendes Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis (Kapitel 6.2)

$$\frac{\Delta K}{\Delta R} = \text{ca. } 4$$

Die Umsetzung der zusätzlichen Maßnahme ist in diesem Beispiel somit

ebenfalls nicht kostenwirksam bzw. verhältnismäßig, da $\frac{\Delta K}{\Delta R} > 1$ (Kapitel

6.2). Jedoch ist in diesem Fall das Kosten-Wirksamkeitsverhältnis wesentlich kleiner als für die zusätzliche Sicherheitsmaßnahme „neues Fluchttreppenhaus“ (Kapitel 7.4.1).

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

8.1 Zusammenfassung

Der Nachweis, dass die Flucht- und Rettungswege in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV ausreichend lang raucharm bleiben, wurde bislang ohne Berücksichtigung einer Risikobetrachtung geführt, da der Brandschutzmaßnahmen- und nicht risiko-orientiert dimensioniert worden ist.

Wenn jedoch mit geeigneten Risikoanalysen für ausgewählte Szenarien das jeweilige Risiko abgeschätzt werden könnte, sind optimal an das Risiko angepasste Brandschutzmaßnahmen denkbar. Da derzeit keine verbindlichen Vorgaben zur Durchführung von Risikoanalysen für Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV und überdies in diesem Bereich nur wenig Erfahrungen vorliegen, kann ein solcher allgemein anerkannter Nachweis nur sehr schwer

durchgeführt werden. Vorrangiges Ziel dieser Untersuchung war es daher, eine geeignete Risikoanalyse auszuwählen und für den vorgesehenen Anwendungsfall an einem fiktiven Beispiel zu erläutern. Mit dieser Risikoanalyse sollen verschiedene Brandereignisse unter Berücksichtigung von Ereigniswahrscheinlichkeit und Abschätzung des Schadensausmaßes realistisch bewertet werden. Darüber hinaus soll das Risikoanalyseverfahren von einem Team des jeweiligen Verkehrsunternehmens (z.B. Betriebsleiter, Fahrzeugexperte und Sicherheitsingenieur) angewandt werden können, das nicht vertieft mit Methoden und Verfahren von Risikoanalysen vertraut ist. Nur in besonderen Fällen soll eine Unterstützung von externen Spezialisten erforderlich sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit Hilfe eines speziellen Fragebogens (Anhang 1) Schienenfahrzeugbrände der letzten 10 Jahre in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV, die zugehörigen Brandursachen und die entstandenen Schäden (z. B. Personen- und Sachschäden) infolge des Brandes erfasst (Kapitel 3.3). Mit den Angaben aus den Fragebögen konnten eine mittlere Brandrate und die Eintrittswahrscheinlichkeiten für den Brandort und den Brandtyp bestimmt werden. Diese Daten sind für eine quantitative Risikoanalyse erforderlich.

Eine geeignete quantitative Risikoanalyse zur Beurteilung von Brandereignissen in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV wurde auf der Grundlage von definierten Anforderungen ausgewählt (Kapitel 4.3.1). Als Eingangsgröße für eine quantitative Risikoanalyse wird die Häufigkeit eines Initialereignisses benötigt. Sie wurde aus der Brandrate ermittelt, die aus den Angaben im Fragebogen berechnet wurde (Kapitel 5.2). Die verschiedenen Szenarien werden in einem Ereignisbaum logisch strukturiert dargestellt. Vorteilhaft hierbei ist, dass auch andere methodische Ansätze, wie beispielsweise statistische Analysen, Expertenschätzungen, Wirkungsmodelle oder Simulationen in Ereignis- und/oder Fehlerbaumanalysen integriert werden können (Anhang 3).

Die Struktur des Ereignisbaumes charakterisiert die Gesamtheit aller Szenarien/Ereignisabläufe. Die wichtigsten Verzweigungspunkte im Ereignisbaum konnten identifiziert (z.B. Brandort, Brandtyp) und die Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden (Kapitel 5). Entlang eines Astes des Ereignisbaumes wird ein Szenario abgebildet und hierfür seine Häufigkeit ermittelt (Bild 11). Mit

definierten Schadensausmaßklassen für Todesopfer und Verletzte sowie abgeschätzten Sachkosten (Kapitel 5.4) wird für das jeweilige Szenario das zugehörige Risiko bestimmt. Mit Hilfe von Grenzkosten (Kapitel 5.5) kann hieraus das monetarisierte Risiko ermittelt werden, das für eine Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung benötigt wird. Mit einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung kann die Verhältnismäßigkeit von risikomindernden Sicherheitsmaßnahmen nachgewiesen werden (Kapitel 6).

Zahlenbeispiele erläutern die Vorgehensweise bei der Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse mit einer nachfolgenden Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung (Kapitel 7).

8.2 Empfehlungen

Folgende Empfehlungen können für Risikoanalysen für Brandereignisse in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV gegeben werden:

(1) Methode des risikobasierten Verfahrens (Kapitel 4.3)

Erfahrungsgemäß können Brandschutz-Sicherheitsmaßnahmen für unterirdische Haltestellenanlagen des schienengebundenen Verkehrs mit vergleichsweise hohen Investitions- und/oder Betriebskosten verbunden sein. Um die Verhältnismäßigkeit von solchen Maßnahmen zu beurteilen, kann das Verhältnis zwischen den erforderlichen Kosten für die Maßnahmen und der zugehörigen Risikominderung (Wirkung von Maßnahmen) herangezogen werden. Um das Verhältnis der beiden Einflussgrößen bestimmen zu können, bedarf es zum einen eines quantitativen Verfahrens, zum anderen müssen Risiken und Maßnahmenkosten mit derselben Maßeinheit ermittelt und quantifiziert werden. Dies erfordert die Darstellung der Risiken in quantitativer Form, genauer gesagt in Form von monetären Einheiten. Nur so lässt sich eine systematische Beurteilung der Maßnahmen bzw. der Verhältnismäßigkeit sicherstellen. Es wird daher empfohlen, eine quantitative Risikoanalyse für den vorliegenden Anwendungsfall zu wählen.

(2) Ereignisbaumanalyse (Kapitel 5)

Für die quantitative Risikoanalyse wird die Bestimmung der Szenarienhäufigkeit und die Abschätzung der monetarisierten Risiken auf Basis einer Er-

eignisbaumanalyse vorgeschlagen (Bild 11). Die erforderlichen Datengrundlagen sollen bei der Umsetzung durch die Verkehrsunternehmen jeweils abgeschätzt werden. Als unterstützende Grundlage hierzu dienen Auswertungen von Statistiken und Literaturdaten, sowie die Angaben aus den Fragebogen (Kapitel 3.3).

(3) Häufigkeit des Initialereignisses (Kapitel 5.2)

Jedes Verkehrsunternehmen sollte für seinen Betrieb die jeweilige Brandrate ermitteln, wenn eine quantitative Risikoanalyse durchgeführt werden soll. Betriebe ohne bisherigen Zugbrand (Brandrate = 0) sollten die mittlere Brandrate verwenden. Wenn hiervon abgewichen wird, dann muss das jeweilige Expertenteam des Verkehrsunternehmens dies begründen.

Aus der Fragebogenaktion (Kapitel 3.2) konnte folgende mittlere Brandrate ermittelt werden:

$$0,0656 * 10^{-6} \frac{\text{Brände}}{\text{Zug-km}}$$

Mit der Brandrate kann die Häufigkeit des Initialereignisses (z.B. Anzahl von Bränden in einem Tunnelabschnitt pro Jahr) berechnet werden, die als Eingangsgröße im Ereignisbaum der Risikoanalyse benötigt wird (Kapitel 5.2). Das Zahlenbeispiel in Kapitel 7 erläutert die Bestimmung des Initialereignisses.

(4) Verzweigungspunkte im Ereignisbaum (Kapitel 5.3)

Es werden folgende Verzweigungspunkte für den Ereignisbaum vorgeschlagen (Bild 11):

- a) Brandort (Haltestelle oder Streckentunnel)
- b) Brandtyp (Typ I oder Typ II)
- c) Brandentwicklung bei Brandtyp II (Bereichs- oder Vollbrand)
- d) Personenanzahl (gering oder groß)
- e) Fluchtbeeinträchtigung (nein oder ja)

In jedem Verzweigungspunkt muss die jeweilige Eintrittswahrscheinlichkeit abgeschätzt werden. Aus den Fragebogen (Kapitel 3.3; Bild 1) konnten für die Verzweigungspunkte „Brandort“ und „Brandtyp“ die in Kapitel 7.2 (2)

und (3) angegebenen Eintrittswahrscheinlichkeiten ermittelt werden, die als Orientierungshilfe dienen können. Hinweise zu den Einflussgrößen, die die Eintrittswahrscheinlichkeit in den Verzweigungspunkten bestimmen, werden in Kapitel 5.3 gegeben.

(5) Schadensausmaß (Kapitel 5.4)

Es wird empfohlen, das Schadensausmaß für Tote pro Brand bzw. Verletzte pro Brand mit Hilfe von Schadensausmaßklassen (Tabellen 5 und 6) festzulegen und für Sachschäden eine realistische Abschätzung durch das Expertenteam des Verkehrsunternehmens vorzunehmen.

(6) Grenzkosten (Kapitel 5.5)

Grenzkosten sind keine exakt herleitbare Zahl. Auf der Grundlage einer Literaturrecherche werden zur Monetarisierung des Risikos folgende Grenzkosten empfohlen:

a) Grenzkosten für Todesopfer

Es wird empfohlen, die Grenzkosten je geretteten Menschenleben mit 5 Mio. € festzulegen.

b) Grenzkosten für Verletzte

Die Grenzkosten je verhinderten Verletzten sollten 100.000 € betragen.

c) Grenzkosten für Sachschäden

Für Sachschäden sollte entsprechend der Risikokategorie 3 ein Mittelwert für die Grenzkosten von 2,5 € je € verhinderten Sachschaden gewählt werden.

Oben genannte Grenzkosten sollten für die praktische Anwendung von Risikoanalysen einheitlich für einen längeren Zeitraum festgeschrieben und angewandt werden, um hierdurch die Vergleichbarkeit von Risikoanalysen der verschiedenen Verkehrsunternehmen zu erleichtern.

(7) Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung (Kapitel 6)

Mit Hilfe einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung wird überprüft, ob zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen verhältnismäßig sind oder nicht. Zur Durchführung einer Kosten-Wirksamkeits-Untersuchung sind zunächst Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen festzulegen, mit denen das

vorliegende Risiko reduziert werden kann. Ferner sind die zugehörigen Kosten der Maßnahmen oder Maßnahmenkombinationen zu ermitteln. Das durch diese Maßnahmen reduzierte Risiko muss monetär bewertet und die zugehörige Risikominderung ermittelt werden. Aus dem Verhältnis der Maßnahmenkosten zur monetären Risikominderung kann die Kosten-Wirksamkeit bestimmt werden.

Sowohl die Kosten (ΔK) für die zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen als auch die Wirkung (monetarisierte Risikominderung ΔR) beziehen sich auf ein Jahr und sind als monetäre Einheit [€] ausgedrückt:

$$\text{Kosten – Wirksamkeits – Verhältnis} = \frac{\Delta K}{\Delta R}$$

Ist das Verhältnis kleiner als 1, so handelt es sich um eine kostenwirksame bzw. verhältnismäßige Maßnahme, d.h. die risikomindernde Wirkung ist größer als die Kosten.

Da die Abschätzungen der Kosten und der Risikoreduktion eine gewisse Unschärfe aufweisen, werden für die Beurteilung auf Basis des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses folgende Kriterien empfohlen:

Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 1: Maßnahmen sind zu realisieren, da sie kostenwirksam sind

$1 \leq$ Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis < 2: Realisierung Maßnahmen fallweise prüfen

Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis \geq 2: Realisierung nicht kostenwirksam

(8) Erfassung von Brandereignissen

Die Erfahrungen aus realen Ereignissen, die die wesentliche Grundlage für die Eingangsdaten der Risikoanalyse bilden, werden heute sehr unterschiedlich erfasst und ausgewertet, wie die Fragebogenauswertung gezeigt hat. Es wird daher empfohlen, dass für die Auswertung vorliegender Erfahrungen und zur besseren statistischen Auswertung einheitliche Ereignisauswertungen vorgenommen werden. Hierzu könnte ein unter den Betrieben abgestimmtes Konzept/Vorgehen weiterhelfen. Beispielsweise wird bei Straßentunneln in Deutschland mit den Ereignismeldebogen ein vergleichbarer Ansatz umgesetzt. Die Daten von Zugbränden in schienengebunde-

nen ÖPNV-Tunnelanlagen sollten fortlaufend systematisch erfasst und ausgewertet werden, um eine verlässliche Datenbasis aufbauen zu können.

Eine praktische Erprobung des vorgeschlagenen Risikoanalyseverfahrens an bestehenden oder geplanten Objekten wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht durchgeführt und steht daher noch aus. Die praktische Erprobung muss zeigen, ob sich die vorgeschlagene quantitative Risikoanalyse für den vorgesehenen Anwendungsfall eignet und evtl. Korrekturen (z.B. Eintrittswahrscheinlichkeiten, Schadensausmaßklassen, Grenzkosten) erforderlich sind. Zu beachten ist, dass eine Risikoanalyse ein zusätzliches Hilfsinstrument ist und keine klaren Vorgaben z.B. in der BOStrab oder der TR Brandschutz ersetzen soll. Risikoanalysen können jedoch dann eingesetzt werden, wenn eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Lösungsansätze durchgeführt, oder aber die Verhältnismäßigkeit einer Sicherheitsmaßnahme nachgewiesen werden soll.

Es sollte die Beschränkung der Risikoanalyse auf Fahrzeugbrände überdacht werden, da auch Brände außerhalb von Fahrzeugen für Personen eine Gefährdung darstellen können (auf Bahnsteigen z.B. durch Kioske, in Betriebsräumen z.B. durch elektrische Schaltanlagen und im Streckentunnel z.B. durch Holzwerksoffe).

Im Sinne einer Weiterentwicklung sollte die Methodik auf freie Strecken und auch auf andere Ereignisarten (Entgleisungen, Kollisionen usw.) ausgeweitet werden. Dies würde die betrieblichen Sicherheitsfragen in einen noch größeren Kontext stellen.

9 Literatur

- [1] Notfallszenarien für Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV und deren Bewältigung, Bericht der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. - STUVA -, Köln, zum Forschungsauftrag FE 70.653/2001 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2005

- [2] Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab) vom 11. Dezember 1987; Herausgeber: Der Bundesminister für Verkehr
- [3] Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO), Stand März 2008
- [4] Neil, G.: Brandschutz von U-Bahn-Rollmaterial, UITP RS-Arbeitsgruppe
- [5] Haack, A. / Schreyer, J. / Meyeroltmanns, W. Beyer, S.: „Brandschutz in Verkehrstunneln - Schlussbericht“ und Anhang. Forschungsauftrag FE 82.166/1999/B3 der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), veranlasst durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen / Deutscher Verkehrssicherheitsrat / Tiefbau-Berufsgenossenschaft; STUVA / STUVAtec GmbH Köln, Dezember 2000
- [6] Avenarius, T.: Mit der Untergrundbahn in den Tod - www.sueddeutsche.de vom 06. Februar 2004
- [7] www.news.at: Feuerunglück in Schweden - Brand in Stockholmer U-Bahn ausgebrochen, 16. Mai 2005
- [8] www.netzzeitung.de: Pariser Metro in Brand geraten, 06. August 2005
- [9] de.wikinews.org: Brand in Moskauer U-Bahn, 20. März 2006
- [10] www.welt.de: 150 Verletzte nach U-Bahn-Brand in Chicago, 12. Juli 2006
- [11] www.rp-online.de: Brand in Pariser Metro, 29. Juli 2007
- [12] www.wien-konkret.at: Brand in Wiener U-Bahn, 06. Dezember 2008
- [13] France - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/16 UNECE
- [14] Italien - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/7 UNECE
- [15] Italferr - Risk analysis of railway works , www.italferr.it
- [16] Martinelli, F.; Cara, S.; Domenichi, L.: Rail Tunnel Risk Analysis: The Effects of Infrastructure and Fire Characteristics; 4th International SIIV Congress - Palermo (Italy), 12th - 14th September 2007
- [17] D.M. 28/10/2005 – “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie” – Gazzetta Ufficiale n. 83, 8/4/2006

- [18] Soons, C.J.; Bosch, J.W.; Arends, G., van Gelder, P.H.A.J.M.: Framework of a Quantitative Risk Analysis for the Fire Safety in Metro Systems, World Tunnel Congress 2006, Seoul (Südkorea), Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 21, Issue 3-4, 2006
- [19] Niederlande - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/15 UNECE
- [20] Soons, C.J.; Bosch, J.W.; van Gelder, P.H.A.J.M; Vrijling, J.K.: Experiences and (in)effective application of QRA for assessing tunnel safety in The Netherlands; Underground Space - The 4th Dimension of Metropolises, Proceedings of the ITA World Tunnel Congress 2007, Prague, Czech Republic
- [21] Tarada, F.; Bopp, R.; Nyfeler, S.; Jegal, K.-S.; Kim, D.-S.: Ventilation and Risk control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea; HBI Haerter, Switzerland; Daewoo, Korea; presented at the First International Conference on Major Tunnel and Infrastructure Projects, 22. bis 24. Mai 2000, Taipei, Taiwan
- [22] Norwegen - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/9 UNECE
- [23] Österreich - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/11 UNECE
- [24] Schweiz - Result of questionnaire on Safety in Tunnels
TRANS/AC.9/2002/14 UNECE
- [25] Schweizerische Bundesbahnen, BLS AG, Bundesamt für Verkehr, Bundesamt für Umwelt: Personenrisiken beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn - Aktualisierte netzweite Abschätzung der Personenrisiken (Screening 2006), Ernst Basler + Partner AG, 2007
- [26] Unterarbeitsgruppe "Beurteilungskriterien Verkehrswege":
Pilotrisikoanalyse für den Transport gefährlicher Güter - Fallbeispiel Bahn, Ernst Basler + Partner AG, 1998
- [27] Schweizerische Bundesbahnen, Zentralbereich Sicherheit: Beurteilung von Anlagen zur Brand und Chemiedetektion an fahrenden Zügen, Ernst Basler + Partner AG, 2007

- [28] BLS Lötschbergbahn AG: Quantitative Risikoanalyse Lötschberg-Basistunnel - QRALBT (Teil 1- 3), 2006, Emch + Berger AG (nicht öffentlich)
- [29] Spanien - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/10 UNECE
- [30] Finnland - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/12 UNECE
- [31] Litauen - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/8 UNECE
- [32] Portugal - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/4 UNECE
- [33] Slowakei - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/6 UNECE
- [34] Vereinigte Staaten von Amerika - Result of questionnaire on Safety in Tunnels TRANS/AC.9/2002/13 UNECE
- [35] NFPA 551: Evaluation of Fire Risk Assessments, 2007 Edition, National fire Protection Association, Quincy, USA
- [36] U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration: Risk assessment study on the transportation of hazardous materials over the U.S. railroads, 1988
- [37] Engineering Safety Management (The Yellow Book), Volumes 1 and 2; Fundamentals and Guidance, Issue 4, published by Rail Safety and Standards Board on behalf of the UK Rail Industry, London, 2007
- [38] Eurotunnel: The Channel Tunnel – A Safety Case (Etude Globale de Sécurité sous la Manche), 1994
- [39] Security in Public Transport Systems, UITP - International organisation for public transport, www.uitp.org
- [40] Ho, V.: Fire Risk Analysis for Railway Tunnel Operations; The Hong Kong Institute of Engineers
- [41] Eisenbahn-Bundesamt: Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes, Januar 2001

- [42] Diamantidis, D.: Risk acceptance criteria for long railway tunnels: a need for a periodic review; FH Regensburg PSAM 6 International conference, San Juan, Puerto Rico, Juni 2002
- [43] Wirtschaftlichkeit von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren, Glossar EconoMe, Schweizer Eidgenossenschaft, Juni 2007
- [44] Strategie Naturgefahren Schweiz - Synthesebericht im Auftrag des Bundesrates von 20. August 2008; Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT), Biel, November 2004
- [45] Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln, Forschungsvorhaben FE 03.0378/2004/FRB; Auftraggeber BMVBS und BASt, November 2007
- [46] Schneider, Th.: Grundgedanken und Methodik moderner Sicherheitsplanung, Zürich
- [47] Seiler, H.: Risikobasiertes Recht - Wieviel Sicherheit wollen wir? Abschlussbericht des Nationalfonds-Projekts „Risk Based Regulation - Ein taugliches Konzept für das Sicherheitsrecht?“, Schweiz
- [48] Risikoorientierte Sicherheitsnachweise im Eisenbahnbetrieb; Ernst Basler + Partner im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bonn, Oktober 1996
- [49] Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Wirtschaftliche Bewertung von Sicherheitsmaßnahmen, Schweiz, 1998
- [50] Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren (Methode); Umwelt-Materialien Nr. 107/I Naturgefahren, herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 1999
- [51] Sicherheit bestehender Eisenbahntunnels; Schweizerische Bundesbahn (SBB), Emch + Berger AG, März 2003
- [52] Railway Strategic Safety Plan: Value of preventing a fatality June 2009; United Kingdom, 2009
- [53] Railway safety - Mitteilung P. Wigley gemäß Angaben Railway Group Safety Plan 2002/3, 2002
- [54] BBC News vom 6.11.1999 zitiert Andrew Evans, Professor für Transportsicherheit am University College London

- [55] Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland - BASt-Info 12/2000
- [56] Kuratorium für Verkehrssicherheit; Grundlagenermittlung für ein österreichisches Verkehrssicherheitsprogramm 2002 - 2010, Stand 1993
- [57] Desaigues, B.: Reference values for human life: an econometric analysis of a contingent valuation in France, 1995
- [58] Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu), Sigrist, Huguenin, Schweiz, 1997
- [59] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Motor Vehicle Accident Costs (1999, last update), Technical Advisory T 7570.2
- [60] Schleining, R.: Der Wert des Lebens aus ökonomischer Sicht: Methoden, Empirie, Anwendungen; Winterthurer Institut für Gesundheitsökonomie (WIG), August 2006
- [61] Persson, U.; Norinder, A. et al.: The value of a statistical life in transport : Findings from a new contingent valuation study in Sweden. Journal of Risk and Uncertainty 23(2): 121 - 134, 2001
- [62] Federal Aviation Administration (FAA) USA, 2002
- [63] Hess, J. Th.: Schutzziele im Umgang mit Naturrisiken in der Schweiz; Dissertation an der ETH Zürich, 2008
- [64] Ackermann, F.; Heinzerling, L.: Global Development and Environmental Institute zitiert die Environmental Protection Agency EPA, USA, 2001
- [65] Bureau of transport and regional economics, Australia, 2000
- [66] Wilhelm, C.: Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Mitteilungen. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF: 308 S.

10 Glossar

Begriff	Erläuterung
Ausgangsereignis	Aus den →Gefahren können verschiedene →Ereignisse entstehen. An sich ist eine unendliche Zahl an Ereignissen denkbar, die sich in Ursache, Ablauf und den dafür wesentlichen Rahmenbedingungen unterscheiden. Für eine quantitative →Risikoanalyse (QRA) wird diese Vielzahl möglicher Ereignisse auf eine begrenzte Anzahl „repräsentativer“ Ereignisse, den so genannten Ausgangsereignissen beschränkt (siehe auch →Folgeereignis).
Eintretenshäufigkeit	Häufigkeit, dass ein bestimmtes Ereignis innerhalb eines vorgegebenen Zeiteinabschnitts (häufig 1 Jahr) eintritt.
Ereignis	Generell verwendeter Begriff, sobald aus einer →Gefahr ein Schaden entsteht (siehe auch →Ausgangsereignis, →Folgeereignis).
Ereignisbaum / Ereignisbaumanalyse	Logischer Baum zur Darstellung und Quantifizierung der →Eintretenshäufigkeit und des →Schadenausmaßes möglicher →Folgeereignisse, die aus einem →Ausgangsereignis entstehen können (siehe auch →Fehlerbaum).
Fehlerbaum / Fehlerbaumanalyse	Logischer Baum zur Darstellung und Quantifizierung der →Eintretenshäufigkeit eines bestimmten →Ausgangsereignisses aufgrund verschiedener Ursachen und Ursachenkombinationen (siehe auch →Ereignisbaum).
Folgeereignis	Aus den definierten →Ausgangsereignissen werden die möglichen →Folgeereignisse ermittelt. Folgeereignisse sind das letzte Glied in einem Ereignisablauf, wo das entsprechende →Schadenausmaß quantifizierbar ist. Hilfsmittel für das systematische Ermitteln von Folgeereignissen sind →Ereignisbäume.
Gefahr	Zustand, aus dem ein →Ereignis mit Schadenwirkung entstehen kann (z.B. Brand).
Gefährdung	Wirkt eine →Gefahr auf ein bestimmtes Objekt, so wird aus der Gefahr eine konkrete Gefährdung (Beispiel: Brand Y wirkt auf technische Einrichtung Z).
Gefahrenanalyse	In der Gefahrenanalyse werden mögliche →Gefahren, →Gefährdungen und →Szenarien untersucht. Auch die Beschreibung möglicher Folgen kann in die Gefahrenanalyse integriert sein. Teil der →Risikoanalyse.
Grenzkosten	Unter Grenzkosten werden die Kosten für Schutzmaßnahmen verstanden, die eine Gesellschaft bzw. ein Inhaber oder Betreiber einer Anlage maximal bereit ist zu investieren, um Schäden (z.B. Todesfälle, Verletzte, Sachschäden) zu verhindern.
Kosten-Wirksamkeit	Verhältnis zwischen Wirksamkeit (Risikominderung) einer Maßnahme und den Kosten (aus Investitions- und Betriebskosten ermittelte Jahreskosten) dieser Maßnahme
Risiko	Das Risiko wird als Maß für die Größe einer →Gefahr verstanden. Das Risiko wird charakterisiert durch die beiden Komponenten →Eintretenshäufigkeit und →Schadenausmaß.

Begriff	Erläuterung
Risikoverision	Risiken infolge von seltenen Ereignissen mit großem Schadenausmaß werden in der Gesellschaft als schwerer wahrgenommen als vergleichbare Risiken, die sich aus einer Vielzahl kleiner Ereignisse ergeben ("1 x 100 Todesopfer ≠ 100 x 1 Todesopfer"). Dieser Effekt kann in der Risikobewertung durch eine überproportionale Gewichtung — mit Hilfe eines Aversionsfaktors — von Ereignissen mit großem Ausmaß berücksichtigt werden.
Risiko, akzeptiertes	Eine absolute →Sicherheit gibt es nicht. Ein Zustand wird als sicher definiert, wenn das verbleibende Risiko akzeptierbar klein ist.
Risiko, empfundenes/bewertetes	Das empfundene (oder bewertete) Risiko R_e wird, ausgehend vom kollektiven Risiko R_0 , abgeleitet, indem das Schadenausmaß A jedes Szenarios mit einem entsprechenden Aversionsfaktor $\alpha(A)$ multipliziert wird.
Risiko, individuelles	Gefährdung einer Einzelperson. Bezüglich des Indikators Todesopfer entspricht es der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Jahr.
Risiko, kollektives	Entspricht der Summe der Risiken von →Ereignissen in einem System, im Allgemeinen bezogen auf ein Jahr.
Risikoanalyse	In der Risikoanalyse geht es darum, →Gefahren, →Ereignisse und →Auswirkungen – das heißt ganze →Ereignisabläufe – zu untersuchen, um die →Eintrittshäufigkeit und das →Schadenausmaß von Ereignissen zu ermitteln. Teil der →Sicherheitsbewertung.
Schadenausmaß	Unter dem Schadenausmaß A (Ausmaß A) eines →Ereignisses wird der entstandene Schaden verstanden. Mögliche Schäden sind z. B. Personenschäden oder Sachschäden. Das Schadenausmaß ist eine der beiden Komponenten des →Risikos.
Schadenerwartungswert	Bemessungsgröße des →kollektiven Risikos. Der Schadenerwartungswertung ist gleich der Summe der Summe der Risiken von →Ereignissen in einem System, im Allgemeinen bezogen auf ein Jahr (z.B. [€/Jahr]).
Schadenindikator	Unter dem Schadenindikator wird diejenige Größe verstanden, mit welcher das →Schadenausmaß eines →Ereignisses bemessen wird (z. B. Todesopfer oder Verletzte für Personenschäden oder Euro für Sachschäden).
Sicherheitsbewertung	Mit einer Sicherheitsbewertung wird aufgezeigt, dass in einem definierten System (ÖPNV-Tunnelanlage X) ein sicherer Betrieb gewährleistet werden kann. Beim risikobasierten Ansatz besteht die Sicherheitsbewertung im Wesentlichen aus drei iterativ zu durchlaufenden Schritten: →Risikoanalyse. Risikobewertung: Bewertung bzw. Beurteilung der Risiken anhand vorgängig definierter Kriterien. Maßnahmenplanung: Evaluation und Prüfung möglicher Maßnahmen zur Reduktion der Risiken.
Szenario	Zusammenwirken mehrerer →Gefährdungen oder eine Abfolge von Gefährdungen.
Wirkung	Eine Einwirkung ist die physikalische/chemische Wirkung einer →Gefährdung, wenn sie auftritt (Beispiel: Hitzeeinwirkung, Toxizität von Rauchgasen etc.).

Anhang 1

Fragebogen zur Erfassung von Brandereignissen in Tunnelanlagen des schienengebundenen ÖPNV

Analyse und Risikobetrachtung von Brandereignissen in schienengebundenen
ÖPNV-Tunnelanlagen

Fragebogen zur Erfassung von Brandereignissen

Vorbemerkung:

Nachfolgende Angaben werden nur für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens verwendet. Eine Weitergabe an Dritte erfolgt nicht!

Falls keine Daten vorliegen, können auch Schätzwerte angegeben werden.

Angaben zum Ausfüller des Fragebogens

Name:.....

Dienstbezeichnung:.....

Organisationseinheit / Abteilung:.....

.....

Telefon-Nummer:.....

E-Mail-Adresse:.....

Anschrift des Verkehrs-/ Infrastrukturbetriebes:.....

.....

.....

.....

.....

Fragen zum Fragebogen beantwortet: Dr.-Ing. Jörg Schreyer, STUVAtec GmbH

(Telefon 0221 / 5979514 , e-mail: schreyer@stuvatec.de)

A Grunddaten des Verkehrsunternehmens

1. Länge der Tunnelanlage insgesamt
(Stand 31.12.2008)km
2. Unterirdische Haltestellen / Streckenführung
 - a) Anzahl der Haltestellenbauwerke
 - b) Mittlerer Haltestellenabstand in Tunnelstreckenm
 - c) Längster Haltestellenabstand im Tunnelm
3. Wie viele Fahrzeug-km werden pro Jahr
im Tunnel zurückgelegt (Stand 2008)?..... **Fahrzeug-km/Jahr**

B Halt von Zügen im Streckentunnel

4. Wie oft halten Züge im Streckentunnel?
 - a) insgesamtMal/Jahr
 - b) infolge Branderscheinung / Brand des Fahrzeugs.....Mal/Jahr

C Häufigkeiten, Ursachen und Schäden von Fahrzeugbränden

5. Wie oft hat es in den vergangenen 10 Jahren Branderscheinungen
und Fahrzeugbrände mit welchen Ursachen gegeben?

Bitte angehängte Tabelle (Seite 4) ausfüllen und, falls vorhanden, zu größeren Bränden weiteres Informationsmaterial beifügen.

Beim Ausfüllen der Tabelle bitte folgende Definitionen beachten:

- (1) Brandtyp (in Anlehnung an Entwurf Norm pr EN 50xxx):

Typ I

Lokale Branderscheinungen oder Brände, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **keine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen (z.B. verschmorte Leitungen, Branderscheinungen in Geräteboxen).

Typ II

Brände, die aufgrund ihrer Größe bzw. ihres Ausmaßes und/oder ihrer Lage **eine** Gefahr für ernsthafte Verletzungen oder eine Lebensbedrohung darstellen.

(2) Gruppenangabe möglich

Branderscheinungen und kleinere Brände müssen nicht einzeln in der Tabelle aufgeführt werden, sondern können auch als Gruppe mit gleichartigen Ursachen in jeweils einer Zeile der Tabelle erfasst werden.

D Räumung

6. Wie oft musste in den vergangenen 10 Jahren ein Zug aufgrund einer Branderscheinung oder eines Brandes geräumt werden?

a) in einer unterirdischen HaltestelleMal

b) im StreckentunnelMal

E Anmerkungen/Erläuterungen

7. Welche Konsequenzen wurden in Ihrem Unternehmen aus den Ereignissen der Vergangenheit gezogen?

Anhang 2

Ergebnistabelle der Fragebogenaktion

Lfd. Nr. Brandereignis	Brandtyp	Brennendes Fahrzeug			Brandursache							Durch das Brandereignis verursachte Schäden						
		steht in einer unterirdischen Haltestelle (Szenario Nr. 1)	ist im Streckentunnel lieengeblieben (Szenario Nr. 2)	steht in der Abstellanlage (Szenario Nr. 3)	Brandstiftung Fahrzeug	technischer Defekt					Sonstiges	Personenschäden		Sachschaden ca. in €				
						Heizung	Stromabnehmer / Stromschiene	Triebfahrwerke	Elektrische Ausrüstung	Hydraulik		Tote	Verletzte					
1	1	1							1									
2	1	1					1											
3	1	1							1				1					
4	1	1							1									
5	1	1							1									
6	1	1							1					20.000				
7	1	1					1											
8	1	1					1											
9	1	1				1												
10	1	1							1									
11	1	1							1									
12	1	1							1									
13	1	1							1									
14	1	1							1									
15	1	1							1									
16	1	1								1								
17	1	1							1									
18	1	1					1											
19	1	1						1										
20	1	1						1										
21	1	1					1											
22	1	1							1									
23	1	1							1									
24	1	1							1									
25	1	1							1				7	150.000				
26-33	1	8					8											
34-45	1	12						12										
46-53	1	8						8										
54-65	1	12							12									
66	1	1			1													
67	1	1							1									
68	1	1								1								
69	1	1							1									
70	1	1							1									
71	1	1							1									
72	1	1							1									
73	1	1							1									
74	1	1							1									
75	1	1								1								
76	1	1								1								
77	1	1						1										
78	1	1								1								
79	1	1								1								
80	1	1								1								
81	1	1								1								
82	1		1						1				1					
83	1		1		1													
84	1		1						1									
85-88	1			4			4											
89	1			1				1										
90-92	1			3					3				1					
93	2	1						1										
94	2	1						1					29	2.000.000				
95	2		1					1					30					
96	2	1							1				1	250.000				
97	2	1							1				1	5.000.000				
Summe Szenario Nr. 1	Brandtyp 1	81	85	---	---	1	11	17	11	37	0	8						
	Brandtyp 2	4																
Summe Szenario Nr. 2	Brandtyp 1	3	---	4	---	1	0	1	0	2	0	0						
	Brandtyp 2	1																
Summe Szenario Nr. 3	Brandtyp 1	8	---	---	8	0	0	4	1	3	0	0						
	Brandtyp 2	0																
Gesamt - Summe	Brandtyp 1	92	97			2	11	22	12	42	0	8						
	Brandtyp 2	5																

Tabelle 1: Aufgetretene Brandereignisse und Brandursachen sowie zugehörige Personenschäden und entstandene Sachkosten

Anhang 3

Bewertung risikobasierter Methoden (Übersicht)

Nachfolgend werden die maßgeblichen Charakteristika einiger der wichtigsten Methodikbausteine zusammengefasst. Die Beschreibungen sind in die drei Bereiche Risikoanalyse, Risikobewertung und Maßnahmenplanung gegliedert. Dabei werden jeweils folgende Eigenschaften erörtert:

- Methode
- Beschreibung
- Anwendungsbereiche
- Vor-/Nachteile

Nachfolgend zu jeder Beschreibung der Bausteine wird jeweils eine Einschätzung zur Eignung hinsichtlich der vorliegenden Fragestellung im Forschungsprojekt vorgenommen.

Methodikbausteine Risikoanalyse

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Expertenschätzung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Expertenschätzung wird die Aussage eines oder mehrerer Experten aus dem betreffenden Fachgebiet zu einer konkreten Fragestellung bezeichnet. Die Schätzung widerspiegelt das Wissen und die Erfahrung dieser Fachleute. • Expertenschätzungen können sowohl qualitativ als auch quantitativ erfolgen. • Expertenschätzungen fließen als Basisbaustein in weiteren Methoden ein (z. B. beim Brainstorming oder der Delphi-Befragungs-Methode). 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzen von Häufigkeit, Ausmaß und Risiko von Gefahren • Vergleichende Bewertung von Häufigkeit, Ausmaß und Risiko • Generierung von Maßnahmen, Abschätzung der Kosten von Maßnahmen, Abschätzung einer möglichen Risikoreduktion durch Maßnahmen • Geeignet zur Abschätzung in Teilsystemen oder bei fehlenden Daten Grundlagen • Plausibilitätskontrollen 	<ul style="list-style-type: none"> + Der Aufwand ist gering. – Die „Güte“ einer Schätzung hängt direkt vom Wissens- und Erfahrungsschatz des Experten ab (große Streuung in den Aussagen). – Expertenschätzungen können durch (aktuelle, individuelle) Erfahrungen stark beeinflusst werden. Länger zurückliegende Erfahrungen gehen vergessen. – Gefahr der Betriebsblindheit („Es kann nicht sein, was nicht sein darf.“). – Bezug zu einer Gesamtbeurteilung fehlt.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Eine alleinige Bestimmung des Risikos auf Basis einer Expertenschätzung reicht angesichts der vorliegenden Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik nicht aus.</p>			

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
What-If-Methode What-If Analysis	<ul style="list-style-type: none"> Die What If-Methode ist eine kreative, brainstormartige Technik, die im Team durchgeführt wird. Ausgegangen wird von der Fragestellung „Was passiert wenn...?“. Jedes Mitglied formuliert konkrete Fragen, die im Team beantwortet werden. Auf diese Weise werden mögliche Gefährdungen in einem Prozess erkannt. Es werden auch mögliche Gegenmaßnahmen formuliert. 	<ul style="list-style-type: none"> Identifikation und Analyse von Gefahren Generierung von Maßnahmen Instrument zur Planung oder Verbesserung eines Systems Eher geeignet bei einfachen kausalen Zusammenhängen, problematisch bei komplexen Systemen 	<ul style="list-style-type: none"> + Mit relativ geringem Aufwand können mögliche Schwachstellen in einem System erkannt werden. - Die Qualität der Ergebnisse hängt direkt von der Zusammensetzung des Teams ab. - Die What If-Methode hat den Nachteil, dass unter Umständen wesentliche Elemente eines Systems übersehen werden. - Nicht einsetzbar als Sicherheitsnachweis
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Angesichts der vorliegenden Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik ist die Methode nur bedingt geeignet. Die Methode ist eher geeignet für die Beurteilung eines technischen Systems / einer technischen Anlage mit klar definierten Anlagenkomponenten und zugehörigen Prozessen.</p>			
Checklistenverfahren Checklist Analysis	<ul style="list-style-type: none"> Das Checklistenverfahren ist eine einfache, rein qualitative Methode für eine erste Einsichtnahme in ein System. Der Einsatz erfolgt häufig in Kombination mit anderen Methoden, oder als vorbereitende Analysemethode. Checklisten sind Fragelisten. Aufgrund von Checklisten wird ein System durchgegangen. Checklisten beinhalten über Jahrzehnte gesammelte Erfahrungen in den jeweiligen Bereichen und werden laufend fortgeschrieben. 	<ul style="list-style-type: none"> Methode wird zur Analyse von technischen Systemen und Prozessen eingesetzt. Das Checklistenverfahren ist in der chemischen Industrie verbreitet. Identifikation und Analyse von Gefahren Eignet sich vor allem für routinemäßige, sich wiederholende Überprüfungen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Anwendung des Checklistenverfahrens bietet vor allem den Vorteil eines einfachen Aufbaus und breiter Anwendungsmöglichkeiten. Das Checklistenverfahren erlaubt mit relativ geringem Aufwand einen ersten Überblick zu erhalten eine Vielzahl von potentiellen Sicherheitsproblemen zu erfassen. - Je komplexer das zu untersuchende System ist, desto unübersichtlicher werden die Checklisten. Es bleibt fraglich, ob alle wichtigen Aspekte eines Systems erkannt und beschrieben werden. - Neue Probleme, wie sie aus der Kombination prozessspezifischer Gegebenheiten ergeben können, werden nur ungenügend erfasst. Gekoppelte sowie Folgeereignisse werden schlecht erkannt. - Die Qualität der Analyse hängt direkt von der Vollständigkeit der Checkliste sowie stark vom Wissen der durchführenden Personen ab.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Mit Checklistenverfahren können komplexe Fragestellungen i.d.R. nur sehr bedingt erfasst. Dementsprechend ist das Verfahren im vorliegenden Fall nicht geeignet</p>			

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Safety Review, Safety Audit Sicherheitsüberprüfung, Sicherheitsrevision	<ul style="list-style-type: none"> • Ziel einer Sicherheitsrevision ist die Überprüfung einer Anlage hinsichtlich Schwachstellen und Gefahren. • In Gesprächen mit Betriebspersonal wird nach möglichen Gefahren bzw. nach Schwachstellen in den Anlagen gesucht. Das Vorgehen schließt eine Begehung der Anlage ein. 	<ul style="list-style-type: none"> • Schwachstellenanalyse • Generierung von Maßnahmen • Verbesserung eines bestehenden Systems oder einer bereits ausgearbeiteten Planung (aber: kein Planungsinstrument) 	<ul style="list-style-type: none"> + Relativ geringer Aufwand bis erste Ergebnisse vorliegen. + Die an den Interviews beteiligten Mitarbeiter können sich der vorhandenen Gefahren bewusst werden (Ausbildungseffekt). + Praxisbezogenes Verfahren – Keine Aussagen zur Größe einer Gefahr bzw. Schwachstelle – Nicht einsetzbar als Sicherheitsnachweis
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Das Verfahren eignet sich wenig, für eine Bestimmung eines Risikos und ist deshalb angesichts der vorliegenden Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik wenig geeignet</p>			
Statistische Datenanalyse, Datenauswertung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit der statistischen Datenanalyse wird gemachte und festgehaltene Erfahrung ausgewertet. • Die Auswertungen können bezüglich Häufigkeit und Ausmaß erfolgen. Bei genügendem Datenumfang sind auch Angaben zu Verteilungstypen, Standardabweichungen, etc. sinnvoll. • Neben der eigentlichen Datenauswertung ist immer auch eine Interpretation erforderlich. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignet in Systemen mit folgenden Eigenheiten: <ul style="list-style-type: none"> – Bekannte Technik – Genügend Ereignisdaten • Aus den Ergebnissen von statistischen Datenauswertungen kann direkt auf Risiken geschlossen werden. Sie können aber auch Inputs für Fehlerbäume oder für Ereignisablaufbäume liefern. • Statistische Datenanalysen sind eine maßgebende Grundlage aller quantitativen Analysen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Zentraler Bezug zwischen „Wirklichkeit“ und Modellen – Die Randbedingungen, unter denen die Daten erfasst wurden, sind uneinheitlich und zum Auswertungszeitpunkt oft nicht mehr bekannt. – Mögliche Großereignisse sind oft nicht im Untersuchungszeitraum enthalten (Unvollständigkeit)
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Insgesamt liegen nur wenige statistische Grundlagen zur vorliegenden Fragestellung vor. Dementsprechend kann das zu entwickelnde Verfahren nicht allein darauf abstützen. Die vorliegenden statistischen Angaben können jedoch wertvolle Hinweise und Inputs für das zu entwickelnde Verfahren bieten.</p>			

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
FTA Fault Tree Analysis Fehlerbaumanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Die Aufgabe einer FTA besteht in der Ermittlung der logischen Verknüpfungen von Komponenten- oder Teilsystemzuständen eines Systems, die zu einem unerwünschten Ereignis (Top event) führen können. In der praktischen Anwendung bedeutet dies die systematische Identifizierung aller möglichen Ausfallkombinationen (Ursachen) und dahinter liegender Basisereignisse, die zu einem vorgegebenen Top event führen können. Eine FTA findet bei einer deduktiven Fragestellung Verwendung (Abwärtslogik). Ausgangssituation ist ein definierter Systemzustand (Top event), der weiter top down (von oben herab) bis zu einem Basisereignis aufgeschlüsselt wird. Für die quantitative Ermittlung der Eintrittshäufigkeit des Top events werden Zuverlässigkeitskenngrößen zu den einzelnen betrachteten Basisereignissen benötigt. 	<ul style="list-style-type: none"> FTA werden bei der Planung neuer wie bei der Analyse bestehender Systeme, aber auch für eine Untersuchung im Versagensfall, angewendet. FTA kann zur Analyse aller technischen Systeme eingesetzt werden. Analyse der Ursachen von unerwünschten Ereignissen (Top event) Bestimmung der Häufigkeit von unerwünschten Ereignissen (Top event) Zeigt die Ansatzpunkte für Maßnahmen in einem System. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die FTA erlaubt scharfe quantitative Aussagen. + Die Darstellung in einem logischen Fehlerbaum fördert den Einblick und das Verständnis in nicht leicht erkennbare Zusammenhänge und Verknüpfungen. + Mit einer FTA können auch Ereignisse betrachtet werden, über die keine direkte Information vorhanden ist, bei denen jedoch auf der Ebene der Komponenten das Verhalten bekannt oder besser abschätzbar ist. - Bei großen Systemen können die Fehlerbäume stark verzweigt und sehr kompliziert werden (zeitlicher Aufwand). - Oft ist auch auf der Komponentenebene die statistische Information ungenügend, so dass Schätzungen mit Expertenwissen notwendig sind (Genauigkeit der Ergebnisse). - Das verfügbare statistische Datenmaterial und die Vielzahl der Einflussfaktoren erlauben häufig nur eine vergleichende Beurteilung von Varianten.
ETA Event Tree Analysis Ereignisablaufanalyse	<ul style="list-style-type: none"> In der ETA werden Ereignisse ermittelt, die sich aus einem vorgegebenen Ausgangsereignis entwickeln können. Es handelt sich um eine induktive Analyse, d.h. man geht von einem Anfangsereignis aus und ermittelt die Folgeereignisse (Vorwärtslogik). Die Aufgabe einer ETA besteht im Erfassen der Ereignisabläufe in einem (größeren) System oder einer Anlage, die nach einem auslösenden Ereignis (Ausgangsereignis) durch die Reaktion nachfolgender Subsysteme entstehen können. Damit werden die Folgen, die ein auslösendes Ereignis in einem System verursacht, schrittweise bis zu einem Endzustand des Systems (Anlagenzustand „Funktion“ oder „Ausfall“) verfolgt. Jedes Ereignis in dieser Kette hat die Folgen der vorausgehenden Ereignisse zu tragen. Mit Hilfe einer einfachen grafischen Darstellungsweise werden die logischen Abläufe unter der Bedingung aufgezeigt, dass die nacheinander folgenden Subsysteme ausfallen oder funktionieren (binäre Logik). 	<ul style="list-style-type: none"> ETA kann zur Beschreibung und Quantifizierung von Ereignisabläufen aller Art angewendet werden. Sie wird bevorzugt zur Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt. Analyse der Abläufe (Folgen) von Ereignissen Bestimmung der Häufigkeit von Ereignissen Zeigt die Ansatzpunkte für Maßnahmen in einem System. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die ETA erlaubt scharfe quantitative Aussagen. + Die ETA zeigt und strukturiert systematisch die möglichen Folgen eines Ereignisses. - In großen Systemen verzweigen die Bäume stark und werden unübersichtlich (auch ein Darstellungsproblem). - Ähnliche Nachteile und Schwierigkeiten wie bei der FTA

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
CCA Cause-Consequence Analysis Ursachenfolgeanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Die Methode der CCA verknüpft die Fehlerbaumanalyse FTA und die Ereignisbaumanalyse ETA. Die CCA wird zur Ermittlung von relevanten Ereignisszenarien verwendet. Fehler, die zu einem kritischen Ereignis führen können, werden mit der FTA, die möglichen Auswirkungen mit der ETA analysiert. siehe FTA und ETA 	<ul style="list-style-type: none"> CCA wird bevorzugt zur Untersuchung von Störungen und Störfällen in technischen Systemen eingesetzt. siehe FTA und ETA 	<ul style="list-style-type: none"> + CCA ist sehr flexibel einsetzbar und es ergibt sich eine gute Dokumentation der Ereignisabläufe. • Weitere Vor- und Nachteile: siehe FTA und ETA
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Die quantitative Ermittlung der Risiken mittels logischer Bäume ist in Fachgebieten mit vergleichbaren Fragestellungen ein weit verbreiteter Ansatz. Die Verwendung logischer Bäume erlaubt die logische Strukturierung von möglichen Ereignisabläufen und Wirkungsketten. Zudem ist das Vorgehen vergleichsweise einfach nachzuvollziehen.</p>			
Ausbreitungs- und Wirkungsmodelle	<ul style="list-style-type: none"> Ziel von Ausbreitungs- und Wirkungsanalysen ist die quantitative Bestimmung des Ausmaßes von Ereignissen. Dazu sind mehrere Schritte notwendig. Ausbreitungsanalyse, Expositionsanalyse, Wirkungsanalyse. Mit einer Ausbreitungsanalyse wird die räumliche und zeitliche Ausbreitung freigesetzter Stoffe in der Umgebung ermittelt. Unter Berücksichtigung von den Umgebungseigenschaften und atmosphärischen Bedingungen werden einerseits die Schadstoffkonzentration bzw. Hitze oder Druck am Wirkungsort bestimmt. Mit einer Expositionsanalyse wird untersucht, welche Objekte sowie Personen in einer konkreten Situation gefährdet sind. Es wird untersucht was oder wer sich wie lange und wie geschützt innerhalb von bestimmten Gefährdungszonen befindet. Mit der Wirkungsanalyse wird abgeschätzt, welche Auswirkungen Giftigkeit, Hitze oder Druck auf das gefährdete Objekt bzw. Personen haben. Bei der Wirkung auf Menschen können Letalitätsmodelle eingesetzt werden. Das Ausmaß, das durch eine Freisetzung von gefährlichen Stoffen bzw. durch eine Energiefreisetzung hervorgerufen werden kann, ist u.a. von Art und Menge des Stoffes, dem Freisetzungsvorgang, dem Ausbreitungsverhalten und den Dosis-Wirkungsbeziehungen bei radioaktiven oder toxischen Stoffen oder seinem Brand- oder Explosionsverhalten abhängig. Das Verfahren eignet sich deshalb nur dann, wenn die im Ereignis involvierten Stoffe bekannt sind, und deren Wirkung auf Personen oder Objekte abgeschätzt werden kann. 	<ul style="list-style-type: none"> Für vertiefte Analysen, vorwiegend in Betrieben mit einem hohen Gefahrenpotential (chemische Industrie) und in empfindlicher Umgebung. Für eine eng definierte Fragestellung: wenige, klar definierte Stoffe, bekannte Umgebungssituation. 	<ul style="list-style-type: none"> + Das Vorgehen erlaubt detaillierte, quantitative Aussagen zum Ausmaß eines Ereignisses. + Komplizierte Rechenmodelle sind in Computerprogrammen integriert. - Der Aufwand für detaillierte Ausbreitungs- und Wirkungsanalysen kann groß werden - Spezifische Modelle beschränken sich auf einen engen Einsatzbereich. Die Wirklichkeit lässt sich unter Umständen nur schwer in einem Modell abbilden. - Konkrete Wirkung auf Personen (Letalitäten) zur Abschätzung des quantitativen Ausmaßes meist unbekannt (Annahmen, Analogieschlüsse notwendig, was unter Umständen zu größeren Ungenauigkeiten führen kann). - Eichung der Modelle an „tatsächlichem“ Ausmaß oft problematisch (Über- oder Unterschätzung möglich).

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Simulationen	<ul style="list-style-type: none"> • Eine Tätigkeit (Prozess) wird modelliert und mehrfach durchgespielt. Das Modell enthält insbesondere alle sicherheitsrelevanten Elemente, die beispielsweise mit einer gewissen Häufigkeit versagen können. Als Output lassen sich Ereignishäufigkeiten oder Risiken darstellen. • Dynamische Simulationsmodelle können einerseits zeitliche Abhängigkeiten und andererseits das Zusammenspiel von mehreren Teilsystemen berücksichtigen. • Durch Veränderungen am System kann beispielsweise der Einfluss einzelner Sicherheitsmaßnahmen auf das Gesamtsystem geprüft werden (Änderung von Komponenten, Eingriffe in den Betrieb). 	<ul style="list-style-type: none"> • Kreisläufe, in denen sich ein Prozess mehrfach wiederholt und die jeweilige Ausgangssituation variabel ist (dynamisches System). • Simulieren einer Tätigkeit: Beispielsweise mehrfaches Befahren einer Strecke mit verschiedenen Möglichkeiten für Ereignisse (z. B. ein Jahr simulieren). 	<ul style="list-style-type: none"> + Aussagen zu einem Gesamtsystem möglich. + Optimales Abbild der Realität in einem Modell. + Möglichkeit, die Wirkung von Eingriffen (Maßnahmen) ins System zu prüfen. - Aufwand kann sehr groß werden. Braucht allenfalls spezielle EDV-Programme (spezielle Entwicklungen). - Das Verhalten der Systemelemente muss bekannt sein (bedingt beispielsweise vorgängige Analysen mit Fehlerbäumen etc.).
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Wirkungsmodelle und Simulationen dienen i.d.R. dazu, Schadenausmaße von Ereignissen möglichst gut abschätzen zu können. Sie können damit Bestandteil einer Risikoanalyse sein, geben im Normalfall aber keine Information zur Höhe des Risikos. In den weitaus meisten Fällen ist Anwendung von Wirkungsmodellen oder Simulationen aufwendig und daher für das zu entwickelnde Verfahren wenig geeignet. Entsprechende Ergebnisse können aber bei Bedarf in eine Analyse mittels logischer Bäume einbezogen werden.</p>			

Methodikbausteine Risikobewertung

Methoden	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Expertenmeinung	<ul style="list-style-type: none"> • Mit Expertenmeinung wird die Aussage eines oder mehrerer Experten aus dem betreffenden Fachgebiet zu einer konkreten Fragestellung bezeichnet. Die Meinung widerspiegelt das Wissen und die Erfahrung dieser Fachleute. • Expertenmeinungen können sowohl qualitativen als auch quantitativen Charakter haben. 	<ul style="list-style-type: none"> • Expertenmeinungen als Beurteilungsinstrument sind bei allen Fragestellungen anwendbar. • Eignet sich für eine erste Grobbeurteilung komplexer Fragestellungen sowie für die Beurteilung von Routinefragen. • Entspricht der traditionellen Methode der Juristen. Teilweise auch Gutachter-tätigkeit im Ingenieurwesen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Der Aufwand ist gering. - Die „Güte“ einer Expertenmeinung hängt direkt vom Wissens- und Erfahrungsschatz des Experten ab (große Streuung in den Aussagen). - Expertenmeinungen können durch (aktuelle, individuelle) Erfahrungen stark beeinflusst werden. Länger zurückliegende Erfahrungen gehen vergessen. - Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Vergleichbarkeit verschiedener Fragestellungen sind nicht gegeben. - Akzeptanz bei komplexen Fragestellungen in der Öffentlichkeit ist fraglich. - Keine expliziten Aussagen zu verbleibenden Risiken.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes:</p> <p>Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikoanalyse.</p>			
Stand der Technik / Vorgaben, Normen	<ul style="list-style-type: none"> • Die Risikobewertung erfolgt durch den Nachweis, dass das untersuchte System dem Stand der Technik entspricht. • Die Bewertung anhand des Standes der Technik entspricht einem maßnahmenorientierten Ansatz. Die Risikobewertung erfolgt nicht anhand von Risiken, sondern am Vorhandensein gewisser Maßnahmen oder am Erreichen gewisser Merkmale (z. B. einer bestimmten Schadstoff- 	<ul style="list-style-type: none"> • Beurteilung von Fragen aus Bereichen, wo sich ein Stand der Technik herauskristallisiert hat (traditionelle Bereiche). 	<ul style="list-style-type: none"> + Relativ geringer Aufwand, wenn der Stand der Technik klar definiert vorliegt. + Gedanklich einfacher und nachvollziehbarer Ansatz. + Vorgehen entspricht der Tradition bzw. den Gewohnheiten. - Maßnahmenorientierter Ansatz: Es erfolgt kein Bezug zu Risiken (bzw. zum Stellenwert des Problems).

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
	konzentration). <ul style="list-style-type: none"> Das Vorgehen nach dem Stand der Technik ist eng gekoppelt mit der Maßnahmenplanung und -beurteilung. 		<ul style="list-style-type: none"> Keine expliziten Aussagen zu verbleibenden Risiken. Die Verhältnismäßigkeit etwaiger zusätzlicher Maßnahmen wird nicht berücksichtigt. Wenig geeignet für neue Fragestellungen, bei denen noch kein Stand der Technik definiert ist. Vergleichbarkeit zu anderen Fragestellungen ist nur bedingt gegeben.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die geltenden normativen und regulativen Vorgaben geben keine Hinweise zur Tragbarkeit der Risiken infolge von Bränden.</p>			
Vergleich/Grenzwert von Häufigkeiten oder Ausmaß	<ul style="list-style-type: none"> Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). 	<ul style="list-style-type: none"> Quervergleiche in einem Bereich oder in eindeutig vergleichbaren Bereichen. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. Die Häufigkeit bzw. das Ausmaß ist nur ein Teilaspekt des Risikos (unvollständige Aussage). Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Systemen mit stark unterschiedlichen Szenarien ist nicht gegeben. Indem nur einzelne oder mehrere Szenarien bewertet werden, ist eine Aussage zum Gesamtsystem nicht möglich.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Der Ansatz geht von der Beurteilung der Häufigkeiten oder des Ausmaßes aus und berücksichtigt damit nicht das Risiko als solches (Verknüpfung von Häufigkeit und Ausmaß)</p>			
Vergleich/Grenzwert von individuellen Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). Der Vergleich erfolgt über das individuelle Risiko r eines Benutzers/Betroffenen. Das individuelle Risiko berücksichtigt alle im System auftretenden Szenarien und deren Wirkung auf die betrachtete Person. 	<ul style="list-style-type: none"> Geeignet für einen quantitativen Sicherheitsnachweis: z. B. bei Arbeitssicherheit, bei der Ausübung bestimmter Tätigkeiten (auch im Verkehr). Überall dort einsetzbar, wo Referenzwerte vorhanden sind oder sich abschätzen lassen. Meist dort eingesetzt, wo einzelne (wenige) Personen hohen Gefährdungen ausgesetzt sind. 	<ul style="list-style-type: none"> Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. Das individuelle Risiko umfasst alle aus dem betrachteten System auf eine Person wirkenden Gefahren und ergibt deshalb ein vollständiges Bild der Gefährdung. Werden die individuellen Risiken aus einem neuen System und einem Referenzsystem mit den gleichen Methoden und Grundlagen berechnet, nimmt die Schärfe der Aussage zu (systematische Fehler werden eliminiert). Quervergleiche über verschiedene Bereiche hinweg sind möglich. Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand, fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. Annahme, dass vorhandene

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
			individuelle Risiken akzeptiert sind, muss nicht unbedingt richtig sein. – Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht gewährleistet.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Der Ansatz eignet sich nicht, um die Verhältnismäßigkeit von möglichen zusätzlichen Maßnahmen zu beurteilen, da beim individuellen Risiko jeweils das Risiko eines Individuums betrachtet wird, Maßnahmen i.d.R. aber auf mehrere bzw. alle exponierten Personen einen risikomindernden Einfluss haben.</p>			
Ver- gleich/Gren- zwert von kollektiven Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • Die Bewertung erfolgt über einen Vergleich des neuen (zu prüfenden) Systems mit einem bestehenden System (Referenzsystem). • Der Vergleich erfolgt auf dem Niveau des kollektiven Risikos R_o. Die ermittelten kollektiven Risiken eines Systems werden mit denjenigen eines Referenzsystems verglichen. 	<ul style="list-style-type: none"> • Geeignet für einen quantitativen Sicherheitsnachweis in eindeutig vergleichbaren Systemen: z. B. Routenwahl für einen Transport von A nach B. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung auf der Basis von Vergleichen ist leicht verständlich und gut kommunizierbar. + Mit dem kollektiven Risiko wird das Gesamtsystem (alle Szenarien) erfasst und ergibt deshalb ein vollständiges Bild der Gefährdung. + Werden die kollektiven Risiken aus einem System und einem Referenzsystem mit den gleichen Methoden und Grundlagen berechnet, nimmt die Schärfe der Aussagen zu (systematische Fehler werden eliminiert). – Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Systemen ist nicht gegeben, da die Größe des Systems (z. B. Streckenlänge) und Merkmale, beispielsweise aus dem Betrieb, das kollektive Risiko direkt beeinflusst (verfälschen). – Entspricht der Referenzzustand dem Ist-Zustand, fließen Fortschritte zur Verbesserung von Systemen kaum in die Bewertung ein. – Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht gewährleistet.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die Verwendung eines solchen Ansatzes ist grundsätzlich möglich. Schwierig ist jedoch erfahrungsgemäß die Festlegung des Referenzzustandes (welches System dient als Basis für den Vergleich?). Zudem werden die Kosten von Maßnahmen und deren Verhältnismäßigkeit nicht in die Betrachtungen einbezogen.</p>			

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen	<ul style="list-style-type: none"> Die Darstellung von kollektiven Risiken im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm zeigt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Wert für das Schadenausmaß im gegebenen System erreicht oder überschritten wird. Durch die Festlegung einer Akzeptanzlinie im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm wird implizit auch der Grenzwert des akzeptierten kollektiven Risikos festgelegt. 	<ul style="list-style-type: none"> Störfallsicherheit für Transport und Lagerung von Gefahrgütern (Schweiz) Bewertung von chemischen Gefahrenpotentialen Bewertung von kollektiven Risiken. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Bewertung mittels Häufigkeits-Ausmaß-Diagrammen ist einfach verständlich und leicht kommunizierbar. + Die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wird berücksichtigt (bei Akzeptanzbereichen) - Die Bewertung erfolgt unabhängig von der Größe des betrachteten Systems, d.h. große Systeme sind a priori im Nachteil. - Der Vergleich verschiedenartiger Systeme ist schwierig (Festlegen der Akzeptanzlinie). - Linienförmige Systeme (Verkehrswege) müssen in geeignete Einheiten zerlegt werden. Das Festlegen einer sinnvollen Größe dieser Einheiten stellt ein Normierungsproblem dar.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die Verwendung eines solchen Ansatzes ist grundsätzlich möglich. Schwierig ist jedoch erfahrungsgemäß die Festlegung des akzeptierten Risikos. Zudem werden die Kosten von Maßnahmen und deren Verhältnismäßigkeit nicht in die Betrachtungen einbezogen.</p>			
Risiko-Kosten-Diagramm mit Grenzkosten	<ul style="list-style-type: none"> Das kollektive Risiko eines technischen Systems kann (in der Regel) stets durch weitere Sicherheitsmaßnahmen gesenkt werden, und zwar umso mehr, je größer die dafür eingesetzten Aufwendungen (Kosten) sind. Dabei muss vorausgesetzt werden, dass hier jeweils alle denkbaren Maßnahmen und Maßnahmenkombinationen berücksichtigt werden. Jede Maßnahme oder Maßnahmenkombination ist durch eine bestimmte Reduktion des kollektiven Risikos und durch bestimmte Kosten charakterisiert. Sie lässt sich als Punkt in einem Risiko-Kosten-Diagramm darstellen. Die untere Umhüllende der Punkteschar bildet die optimale Risikoreduktionsstrategie: Wenn Maßnahmen in der Reihenfolge dieser Kurve getroffen werden, so resultiert für ein gegebenes Kostenniveau die größtmögliche Reduktion des Risikos. Jedes technische System lässt sich damit auch durch seine charakteristische Risikoreduktionskurve im Risiko-Kosten-Diagramm charakterisieren. Das Prinzip der Kostenwirksamkeit sagt aus, dass die kollektiven Risiken eines Systems bis zu jenem Punkt auf dessen Risikoreduktionskurve zu senken sind, bei dem eine bestimmte Kostenwirksamkeit der Maßnahmen erreicht wird. Systeme, die als gleich sicher bezeichnet werden, können durchaus unterschiedlich hohe kollektive (Rest)Risiken aufweisen. 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort sinnvoll, wo ein Eigentümer/Benutzer die maximale Sicherheit in seinem System oder seinen verschiedenen Systemen erreichen will, aber die Mittel beschränkt sind und nicht ausreichen, um alle (bekannt)en Maßnahmen zu ergreifen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Systemgröße fließt in die Betrachtung mit ein, was einen Vergleich verschiedener Systeme ermöglicht. + Berücksichtigt einen optimalen Mitteleinsatz, die Verhältnismäßigkeit ist explizit gewährleistet. + Liefert die maximale Sicherheit im betrachteten System bei begrenzten zur Verfügung stehenden Mitteln. - Erfordert Kenntnisse über mögliche Maßnahmen, deren Kosten und Wirksamkeit (Aufwand). - Sicherheitsniveau wird indirekt über die Verhältnismäßigkeit zusätzlicher Maßnahmen definiert (Kommunizierbarkeit). - Keine harte Grenze für das kollektive Risiko. Unterschiedlich hohes (Rest)Risiko in verschiedenen Systemen möglich.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die Verwendung eines solchen Ansatzes ist möglich. Der Ansatz berücksichtigt neben der Höhe des Risikos auch Kosten von Maßnahmen und deren Verhältnismäßigkeit.</p>			

Methodikbausteine Maßnahmenplanung

Methodikbaustein	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Experten-schätzung	<ul style="list-style-type: none"> Experten schlagen Maßnahmen vor oder ordnen sie an. Die Basis dafür bildet deren Erfahrung sowie alle weiteren verfügbaren Informationen. 	<ul style="list-style-type: none"> Expertenschätzungen als Beurteilungsinstrument für Maßnahmen sind bei allen Fragestellungen anwendbar. Eignet sich für eine erste Grobbeurteilung von Maßnahmen sowie für die Beurteilung von Routinefragen. Im Rahmen einer Gutachtertätigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Expertenmeinung“. <ul style="list-style-type: none"> Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Vergleichbarkeit der Anordnung / des Vorschlags verschiedener Maßnahmen sind nicht gewährleistet. Keine expliziten Aussagen zur Wirksamkeit von Maßnahmen und zu verbleibenden Risiken.
Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikoanalyse.			
Stand der Technik / Vorgaben Normen	<ul style="list-style-type: none"> Die Maßnahmenplanung bzw. die Beurteilung von Maßnahmen wird durch den Stand der Technik vorgegeben. Vgl. Bewertungsmethodik „Stand der Technik“. 	<ul style="list-style-type: none"> Beurteilung von Maßnahmen aus Bereichen, wo sich ein Stand der Technik herauskristallisiert hat (traditionelle Bereiche). 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Stand der Technik“. <ul style="list-style-type: none"> Keine expliziten Aussagen zur Wirksamkeit von Maßnahmen und zu verbleibenden Risiken. Die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen wird nicht berücksichtigt.
Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die bestehenden regulativen Grundlagen geben im Moment noch kaum Hinweise über den risikobasierten Umgang mit möglichen zusätzlichen Maßnahmen.			
Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich Häufigkeiten oder Ausmaß	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich der Häufigkeit bzw. Schadenausmaß von Gefahrenszenarien beurteilt. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort einsetzbar, wo der Einfluss von Maßnahmen nur auf eine der beiden Komponenten des Risikos (Häufigkeit bzw. Ausmaß) der Gefahrenszenarien von Bedeutung ist. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von Häufigkeiten oder Ausmaß“
Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikobewertung.			
Wirksamkeitsüberlegungen im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm	<ul style="list-style-type: none"> Die Darstellung von kollektiven Risiken im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm zeigt, mit welcher Häufigkeit ein bestimmter Wert für das Schadenausmaß im gegebenen System erreicht oder überschritten wird. Die Bewertung der Risiken erfolgt aufgrund einer festgelegten Akzeptanzlinie (oder Akzeptanzbereichen). Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit auf die Lage der Summenkurve im Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm beurteilt. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen“. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm mit Akzeptanzlinie oder -bereichen“. <ul style="list-style-type: none"> Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich W und A wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.
Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikobewertung.			
Wirksamkeitsüber-	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von indi-

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
Legungen bezüglich individueller Risiken	<p>lungen.</p> <ul style="list-style-type: none"> Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich des individuellen Risikos eines Benutzers/Betroffenen beurteilt. Das individuelle Risiko berücksichtigt alle im System auftretenden Szenarien und deren Wirkung auf die betrachtete Person. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<p>individuellen Risiken“.</p>	<p>viduellen Risiken“.</p> <ul style="list-style-type: none"> Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich individueller Risiken wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikobewertung.</p>			
Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich kollektiver Risiken	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeitsüberlegungen. Konkret werden Maßnahmen aufgrund ihrer Wirksamkeit bezüglich des kollektiven Risikos eines Systems beurteilt. Maßnahmen mit einer größeren Wirksamkeit werden solchen mit einer kleineren Wirksamkeit vorgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von kollektiven Risiken“ 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethodik „Vergleich/Grenzwert von kollektiven Risiken“ Bei reinen Wirksamkeitsüberlegungen bezüglich des kollektiven Risikos wird die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen nicht berücksichtigt.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Vgl. Bemerkungen zu Verfahren bei Risikobewertung.</p>			
Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen	<ul style="list-style-type: none"> Die Beurteilung von Maßnahmen erfolgt mittels Wirksamkeits- und Kostenüberlegungen. Dabei wird die Wirksamkeit einer Maßnahme den Kosten, die sie verursacht, gegenübergestellt. Die Beurteilung der Maßnahme erfolgt aufgrund des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses. Maßnahmen mit einem kleineren Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis werden solchen mit einem größeren vorgezogen. Beim Prinzip des Kosten-Wirksamkeits-Verhältnisses kann die Wirksamkeit von Maßnahmen grundsätzlich bezüglich individueller, kollektiver oder empfundener Risiken berücksichtigt werden. Üblich ist die Anwendung in Zusammenhang mit kollektiven und empfundenen Risiken. 	<ul style="list-style-type: none"> Kann kombiniert werden mit Bewertungsmethode „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm“ (vgl. diese Beschreibungen). 	<ul style="list-style-type: none"> Vgl. Bewertungsmethode „Häufigkeits-Ausmaß-Diagramm“. + Berücksichtigt explizit die Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen
Kosten-Wirksamkeits-Überlegungen im Risiko-Kosten-Diagramm	<ul style="list-style-type: none"> Das kollektive Risiko eines technischen Systems kann (in der Regel) stets durch weitere Sicherheitsmaßnahmen gesenkt werden, und zwar umso mehr, je größer die dafür eingesetzten Aufwendungen (Kosten) sind. berücksichtigt werden. Jede Maßnahme oder Maßnahmenkombination ist durch eine bestimmte Reduktion des kollektiven Risikos und durch bestimmte Kosten charakterisiert. Sie lässt sich als Punkt in einem Risiko-Kosten-Diagramm darstellen. Das Prinzip der Kostenwirksamkeit sagt aus, dass die kollektiven Risiken durch die Maßnahmen... 	<ul style="list-style-type: none"> Überall dort sinnvoll, wo ein Eigentümer/Benutzer die maximale Sicherheit in seinem System oder seinen verschiedenen Systemen erreichen will, aber die Mittel beschränkt sind und nicht ausreichen, um alle (bekannten) Maßnahmen zu ergreifen. 	<ul style="list-style-type: none"> + Die Systemgröße fließt in die Betrachtung mit ein, was einen Vergleich verschiedener Systeme ermöglicht. + Berücksichtigt einen optimalen Mitteleinsatz, die Verhältnismäßigkeit ist explizit gewährleistet. + Liefert die maximale Sicherheit im betrachteten System bei begrenzten zur Verfügung stehenden Mitteln. - Erfordert Kenntnisse über mögliche Maßnahmen, deren Kosten und Wirksamkeit (Aufwand).

Methode	Beschreibung	Anwendungsbereiche	Vor-/Nachteile
	<p>ken eines Systems bis zu jenem Punkt auf dessen Risikoreduktionskurve zu senken sind, bei dem eine bestimmte Kostenwirksamkeit der Maßnahmen erreicht wird. Für diesen Grenzwert für die Kostenwirksamkeit steht der Begriff der Grenzkosten.</p>		<ul style="list-style-type: none"> – Sicherheitsniveau wird indirekt über die Verhältnismäßigkeit zusätzlicher Maßnahmen definiert (Kommunizierbarkeit). – Keine harte Grenze für das kollektive Risiko. Unterschiedlich hohes (Rest-)Risiko in verschiedenen Systemen möglich.
<p>Beurteilung Eignung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes: Die Maßnahmenplanung auf Basis von Kosten-Wirksamkeits-Analysen ist ein möglicher Ansatz, der die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik erfüllt.</p>			